

Научный журнал

ВЕСТНИК

Сибирского
государственного
индустриального
университета

№ 1 (39), 2022

Основан в 2012 году
Выходит 4 раза в год

Учредитель:

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

Редакционная коллегия

Н.А. Козырев
(главный редактор)
Е.М. Запольская
(отв. секретарь)

Арвинд Сингх
А.С. Водолеев
В.Ф. Горюшкин
В.И. Данилов
А.В. Зимин
С.В. Коновалов
С.М. Кулаков
А.Г. Никитин
И.В. Ноздрин
Е.Г. Оршанская
Т.Н. Осколкова
В.И. Пантелеев
Т.В. Петрова
С.В. Риб
И.А. Рыбенко
М.В. Темлянцев
Ю.С. Серенков
Си Чжан Чен
А.Ю. Столбоушкин
И.А. Султангузин
Л.А. Тресвятский
В.Н. Фрянов
А.Н. Шиплюк
Н.Х. Юлдашев
А.Б. Юрьев

СОДЕРЖАНИЕ

А.Б. Юрьев 60 лет научной школе «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий»...3

В.Е. Громов, Ю.А. Шлярова К юбилею научной школы «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий».....4

Guoyi Tang The most memorial moments of my scientific contacts with Professor V. Gromov from Siberian State University of Industry, Russia.....33

Негода Т.А. Два правила профессора Громова.....40

Филяков А.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А. Влияние биоинертных электровзрывных покрытий на распределение напряжений на границе раздела имплантат – кость.....43

Гришунин В.А., Перегудов О.А., Кормышев В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Мартусевич Е.В. Повышение усталостной долговечности рельсов электронно-пучковой обработкой.....56

Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Исследование параметров кристаллической решетки, фазового состава и структуры сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и с последующего облучения электронным пучком.....63

Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Воробьев С.В., Шлярова Ю.А., Громов В.Е., Семин А.П. Изменение поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CoCrFeMnNi после электронно-пучковой обработки.....69

К 65-летию Ивана Семеновича Кузнецова.....75

70 лет А.Р. Фастыковскому.....76

Поздравляем Людмилу Петровну Башенко с днем рождения!.....77

К сведению авторов.....78

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

Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС77-77872 от 03.03.2021 г.

Адрес редакции:

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

Адрес издателя:

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. 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:

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. 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

Подписано в печать

31.03.2022 г.

Выход в свет

31.03.2022 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл.печ.л. 4,3.

Уч.-изд.л. 4,6.

Тираж 300 экз.

Заказ № 87.

Цена свободная.

60 ЛЕТ НАУЧНОЙ ШКОЛЕ «ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ»

А. Б. Юрьев

Научная школа «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», возглавляемая д.ф.-м.н., профессором Виктором Евгеньевичем Громовым, хорошо известна в России и за рубежом. Под его руководством в последние годы экспериментальные исследования проводили по следующим научным направлениям: фундаментальное (физические механизмы прочности и пластичности металлов, сталей и сплавов при внешних электромагнитных воздействиях); прикладное (физическое материаловедение в современных технологиях обработки металлов давлением); методическое (аппаратурное и методическое обеспечение фундаментальных и прикладных исследований).

В 2014 г. к 85-летию университета были изданы материалы по научной школе «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий».

За последние 20 лет членами школы (сотрудниками университета, специалистами производства) защищены свыше 50 кандидатских и докторских диссертаций. Решены задачи оценки напряженно-деформированного состояния материала и эволюции субструктуры при волочении и холодной объемной штамповке. Это позволило разработать основы технологии безкислотного удаления окалины. Проведен комплекс исследований влияния легирования сталей азотом на механические и технологические свойства. Установлены причины ухудшения свойств металлов пароперегревателей и паропроводов, а также предложены рекомендации по контролю состояния металла с помощью неразрушающих методов. Разработаны перспективные способы и технологии повышения эксплуатационных характеристик рельсовой стали. Реализована методика электростимулированного восстановления усталостного ресурса деталей. Развита синергетика для электростимулированной пластичности, внедрена технология прокатки листовой стали в валках переменного сечения. Установлены закономерности эволюции градиентных структурно-фазовых состояний при различных сложных видах деформации и обработки поверхностей потоками электронных пучков и плазмой. Установлена физическая природа влияния слабых электрических потенциалов, переменных и постоянных магнитных полей на пластическую деформацию металлов.

Разработаны физико-технические основы термомеханического упрочнения стальной арматуры и плазменного упрочнения валков. Выявлены механизмы формирования наноразмерных фаз и упрочнения низкоуглеродистой стали при термомеханической обработке и чугуновых валков при плазменной обработке. Установлены основные закономерности и природа формирования структурно-фазовых состояний поверхностных слоев металлов и сплавов при одно- и двухкомпонентном электро-взрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке. Выполнен комплекс исследований по эволюции структуры, фазового состава и дефектной субструктуры объемно и дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации. Установлена природа формирования износостойких покрытий на низкоуглеродистых сталях наплавкой порошковыми легированными проволоками. Выявлены закономерности модифицирования Al – Si сплавов комплексной электронно-ионной плазменной обработкой. Выполнен комплекс исследований по созданию высокоэнтропийных AlCoCrFeNi сплавов и их модифицированию электронно-пучковой обработкой.

Результаты научных исследований систематически представляются научной общественности в виде докладов на Международных, Всероссийских конференциях, симпозиумах и семинарах.

Итоги формирования и развития научных направлений и результаты исследований нашли отражение более чем в 4700 публикациях (в том числе 25 изобретений и патентов РФ, 100 монографий в центральных издательствах, некоторые из которых рекомендованы УМО по металлургии Минобрнауки в качестве учебных пособий для студентов технических вузов страны; 165 статей в зарубежных физических журналах (США, Англии, Чехии, Китая и Германии)). Семь монографий изданы в Великобритании (Cambridge Publishing House) и США (Taylor and Francis Group).

Школа встречает свой юбилей новыми достижениями, выигранными грантами РФ, стипендиями Президента, докладами на престижных конференциях, публикациями в журналах Q1 и Q2, подготовкой и защитой диссертаций.

Примите мои поздравления с 60-летием научной школы и пожелания дальнейших научных достижений!

УДК 378:001.891:[669.017:539]

К ЮБИЛЕЮ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ «ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ»

В. Е. Громов, Ю. А. Шлярова

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

Аннотация. В работе рассмотрены достижения научной школы «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» за последние 10 лет. За это время было опубликовано большое количество статей в престижных журналах, входящих в Q1 (Materials Letters, Journal of Materials Research and Technology, Applied Surface Science, Rapid Prototyping Journal, Materials Characterization, Metallurgical and Materials Transactions A, Surface and Coatings Technology, Engineering Failure Analysis, JOM, Metals), также было выпущено девять монографий в зарубежных издательствах Cambridge, CISP Ltd, Springer, Taylor and Francis, Materials Science Forum LLC.

Ключевые слова: научная школа, рельсы, бейнитная сталь, высокоэнтропийный сплав, силумин, электронный пучок, усталость, электровзрывное легирование

Для цитирования: Громов В.Е., Шлярова Ю.А. К юбилею научной школы «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 1 (39). С. 4 – 32.

TO THE ANNIVERSARY OF THE SCIENTIFIC SCHOOL “STRENGTH AND PLASTICITY OF MATERIALS UNDER EXTERNAL ENERGY INFLUENCES”

V. E. Gromov, Yu. A. Shlyarova

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

Abstract. The paper considers the achievements of the scientific school “Strength and plasticity of materials under external energy influences” over the past 10 years. During this time, a large number of articles have been published in prestigious journals included in Q1 (Materials Letters, Journal of Materials Research and Technology, Applied Surface Science, Rapid Prototyping Journal, Materials Characterization, Metallurgical and Materials Transactions A, Surface and Coatings Technology, Engineering Failure Analysis, JOM, Metals), 9 monographs were also published in foreign publishing houses Cambridge, CISP Ltd, Springer, Taylor and Francis, Materials Science Forum LLC.

Keywords: scientific school, rails, bainitic steel, high-entropy alloy, silumin, electron beam, fatigue, electroexplosive alloying

For citation: Gromov V.E., Shlyarova Yu.A. To the anniversary of the scientific school “Strength and plasticity of materials under external energy influences”. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 1 (39), pp. 4 – 32. (In Russ.).

В 2014 году к 85-летию Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ) были изданы материалы по работам научной школы «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий». И вот уже отметили 90-летие СибГИУ. В 2021 году отмечаем 60-летие нашей научной школы.

60 лет – это солидный возраст, школа известна и признана не только в России, но и за рубежом. Доказательством этому является публикационная активность членов школы в престижных журналах, входящих в Q1 (Materials Letters, Journal of Materials Research and Technology, Applied Surface Science, Rapid Prototyping Journal,

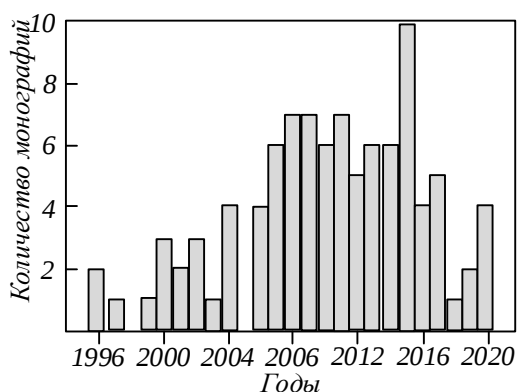


Рис. 1. Публикационная активность научной школы
Fig. 1. Publication activity of the scientific school

Materials Characterization, Metallurgical and Materials Transactions A, Surface and Coatings Technology, Engineering Failure Analysis, JOM, Metals), а также монографии в издательствах Springer, Taylor and Francis, Materials Science Forum LLC и других. Динамика публикаций монографий по годам представлена на рис. 1.

За последние 20 лет членами школы (сотрудниками университета, специалистами производства) защищены свыше 50 кандидатских и докторских диссертаций.

Остановимся подробнее на международной стороне деятельности членов школы, которую характеризует индивидуальный индекс Хирша. Индекс Хирша (наукометрический показатель ученого в базах данных Web of Science (WoS) и Scopus) является количественной характеристикой его международного признания. Чем он выше, тем известнее ученый и тем более признаны его труды международным научным сообществом. Индекс Хирша по РИНЦ – только для внутрисерийского уровня.

Для того, чтобы выиграть хорошо финансируемый грант Российского научного фонда и Российского фонда фундаментальных исследований, необходимо отметить в заявке публикацию результатов в журналах, входящих в первый или второй квартиль. Квартиль – это категория научных журналов, определяемая библиометрическими показателями, отражающими уровень цитируемости, то есть востребованности журнала научным сообществом. В результате ранжирования каждый журнал попадает в один из четырех квартилей: от Q1 (самого высокого) до Q4 (самого низкого). Наиболее авторитетные журналы принадлежат, как правило, к первым двум квартилям (Q1 и Q2). Для определения квартиля журнала используются следующие показатели: импакт-фактор Journal Citation Reports (JCR) – для базы данных Web of Science, индексирующей около 12500 журналов; SCIMago Journal Rank (SJR) – для базы данных Scopus, индексирующей около 21000 журналов, в том числе по-

давливающее большинство журналов, индексируемых WoS.

Импакт-фактор (или JCR) – показатель цитируемости, рассчитывается на основе годового количества ссылок на статьи, опубликованные в журнале за предшествующие два года. Импакт-фактор был разработан в 1960-е годы американским Институтом научной информации (Institute for Scientific Information, ныне Thomson Scientific в составе медиаконцерна Thomson Reuters) для сопоставления близких по тематике журналов и не дает возможности сравнивать журналы из разных научных областей. Для многих журналов из области гуманитарных наук официальный импакт-фактор не публикуется; для оценки публикаций в таких журналах применяется SJR. Импакт-фактор и SJR рассчитываются только для тех журналов, которые индексируются в базах достаточное время для их расчета. Журналы, включенные в базы недавно (менее четырех лет назад для Web of Science и один-два года назад для Scopus), этих показателей еще не имеют.

Все журналы в Web of Science и Scopus приписаны к тематическим категориям (научным областям). В Web of Science их около 250, в Scopus – около 350; при этом классификаторы баз по некоторым позициям не совпадают. Журналы в пределах одной тематической категории ранжируются по величине импакт-фактора или SJR, в результате чего попадают в тот или иной квартиль.

Особое место в списке журналов по научному профилю школы занимает Philosophical Magazine. Именно в нем публиковались выдающиеся ученые-классики Майкл Фарадей, Джеймс Джоуль, лорд Кельвин, Рудольф Клаузиус, Джеймс Клерк Максвелл, лорд Рэлей, Альберт Майкельсон, Йоханнес Ридберг, Питер Зеeman, Дж. Дж. Томсон, Эрнест Резерфорд, Роберт Милликен, Нильс Бор, Луи де Бройль. Их основополагающие работы в журнале «Philosophical Magazine»:

- статья Дж.К. Максвелла «О физических силовых линиях» (Physical Lines of Force, 1861 – 1862), в которой были заложены основы электромагнитной теории света;

- статья Дж. Дж. Томсона «Катодные лучи» (Cathode Rays, 1897), в которой было описано открытие электрона;

- трилогия Н. Бора «О строении атомов и молекул» (On the Constitution of Atoms and Molecules, 1913), в которой излагалась квантовая теория атома;

- статья Э. Резерфорда «Аномальный эффект в азоте» (An Anomalous Effect in Nitrogen, 1919), в которой сообщалось о первом успешном искусственном превращении элемента.

Philosophical Magazine был основан в 1798 году Александром Тиллоком (Alexander Tilloch), первая опубликованная статья называлась «Сообщение о патентованном паровом двигателе мистера Картрайта» (англ. *Account of Mr. Cartwright's Patent Steam Engine*). Название журнала несколько раз менялось. В 1814 году после объединения с *Journal of Natural Philosophy, Chemistry, and the Arts* издание стало именоваться *The Philosophical Magazine and Journal*, с 1827 года после объединения с *Annals of Philosophy* журнал стал называться *The Philosophical Magazine or Annals*, с 1832 года – *The London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science* (после слияния с *The Edinburgh Journal of Science*), наконец с 1840 года – *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. Последнее название продержалось более ста лет; в 1949 году было возвращено более короткое *Philosophical Magazine*. В 1978 – 2002 годах журнал издавался в двух частях *Philosophical Magazine A* и *B*, с 2003 года они были вновь объединены.

Именно в этом журнале опубликована статья «Microstructural and mechanical characterisation of non-equiatomic $\text{Al}_{2.1}\text{Co}_{0.3}\text{Cr}_{0.5}\text{FeNi}_{2.1}$ high-entropy alloy fabricated via wire-arc additive manufacturing», авторами которой являются члены научной школы – профессор В.Е. Громов и доцент И.А. Панченко. Достижение такого уровня стало возможным благодаря кооперации с учеными из Института сильноточной электроники СО РАН (профессор Ю.Ф. Иванов) и Самарского национального исследовательского университета (профессор С.В. Коновалов, аспирант К.А. Осинцев).

Традиционным направлением исследований школы еще со времен Ю.В. Грдины и В.М. Финкеля являются рельсы. На рис. 2 представлена монография «Microstructure of Quenched rails», опубликованная в 2015 г. в Cambridge International Science Publishing Ltd.

Хорошо известно, что эксплуатационная стойкость железнодорожных рельсов во многом определяется их структурно-фазовым состоянием, формируемым при термообработке. Несмотря на ряд недостатков объемной закалки рельсов в масле эта технология термического упрочнения еще используется на металлургических предприятиях. Целесообразность дифференцированной закалки сжатым воздухом с прокатного нагрева, особенно для 100-метровых рельсов, обусловлена экономическими соображениями. Возрастающие требования российских железных

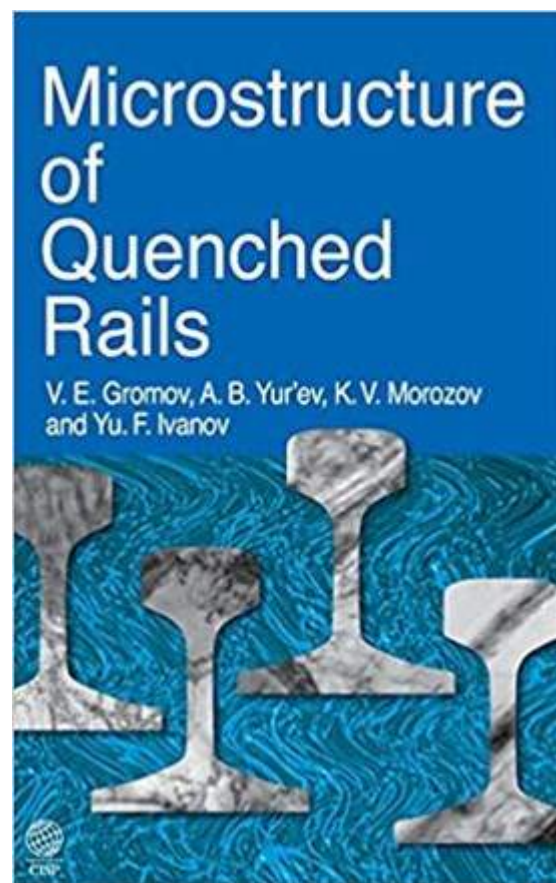


Рис. 2. Книга «Microstructure of Quenched rails / V.E. Gromov, A.B. Yur'ev, K.V. Morozov, Yu.F. Ivanov. Cambridge, CISP Ltd, 2015. 215 p.»

Fig. 2. The book «Microstructure of Quenched rails / V.E. Gromov, A.B. Yur'ev, K.V. Morozov, Yu.F. Ivanov. Cambridge, CISP Ltd, 2015. 215 p.»

дорог по дифференцированной прочности по сечению рельсов и другим важным параметрам могут быть удовлетворены только технологией дифференцированной закалки. Для разработки режимов дифференцированной закалки, обеспечивающих требуемый уровень механических и эксплуатационных свойств, особенно для рельсов специальных категорий, необходим анализ природы формирования и эволюции структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры. В этом аспекте полезными могут оказаться данные по объемно закаленным рельсам, производство которых имеет уже более чем 50-летнюю историю. Все вышесказанное определяет актуальность данной монографии, поскольку сравнительный анализ структур и фазового состава, формирующихся в сечении рельсов при различных видах закалки, важны для понимания природы превращений, так как позволяют целенаправленно формировать эксплуатационные свойства.

В настоящее время на долю железных дорог в мире приходится до 85 % грузооборота и более

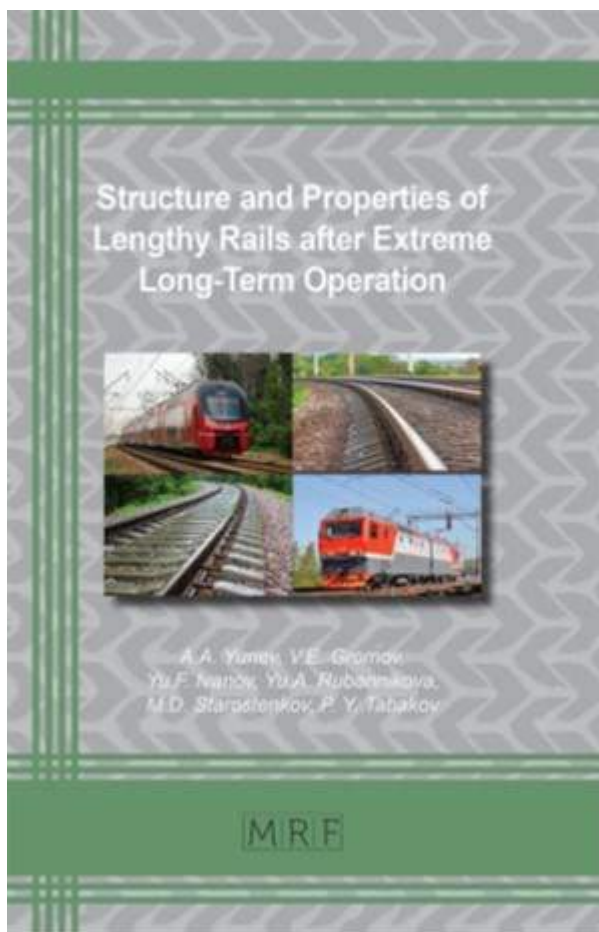


Рис. 3. Книга «Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation / A.A. Yuriev, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, Yu.A. Rubannikova, M.D. Starostenkov, P.Y. Tabakov. Materials Science Forum LLC, 2021. 185 p.»

Fig. 3. The book “Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation / A.A. Yuriev, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, Yu.A. Rubannikova, M.D. Starostenkov, P.Y. Tabakov. Materials Science Forum LLC, 2021, 185 p.”

50 % пассажирских перевозок. В последнее время наблюдается значительное увеличение интенсивности эксплуатации железнодорожного транспорта и его грузонапряженности, что требует высокой эксплуатационной стойкости рельсов. Для решения этих проблем используется технология дифференцированной закалки 100-метровых рельсов, производство которых в России начато в 2013 году. Процессы формирования и эволюции структурно-фазовых состояний и свойств поверхностных слоев рельсов при длительной эксплуатации представляют сложный комплекс взаимосвязанных научных и технических вопросов. Важность информации в этой области определяется глубиной понимания фундаментальных проблем физики конденсированного состояния, с одной стороны, и практической значимостью проблемы – с другой.

Совершенствование режимов дифференцированной закалки длинномерных рельсов для формирования высоких эксплуатационных

свойств должно базироваться на знании механизмов структурно-фазовых изменений по сечению рельсов при их длительной эксплуатации. Выявление таких механизмов возможно лишь при анализе закономерностей эволюции параметров тонкой структуры и оценки вкладов структурных составляющих и дефектной субструктуры в упрочнение рельсов при длительной эксплуатации. В настоящее время это возможно при использовании высокоинформативных методов просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), позволяющих проводить комплексный анализ как морфологии и дефектной структуры, так и фазового состава с достаточной степенью локальности по сечению рельсов.

На рис. 3 показана монография «Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation», опубликованная в 2020 г. в Materials Science Forum LLC (США). Впервые проведены комплексные количественные исследования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры, трибологических свойств на различном расстоянии от поверхности катания по центральной оси и по выкружке 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов после длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 691,8 и 1411,0 млн т брутто). Прослежено перераспределение атомов углерода в структуре рельсов при длительной эксплуатации. Выполнена количественная оценка механизмов упрочнения поверхностных слоев рельсов по центральной оси и по выкружке после длительной эксплуатации [1 – 10].

В работах [11 – 24] сформирован банк данных о закономерностях формирования структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры, распределения атомов углерода в головке длинномерных дифференцированно закаленных рельсов по центральной оси и по выкружке после длительной эксплуатации. Отмечен градиентный характер структуры, фазового состава и дефектной субструктуры, характеризующийся закономерным изменением скалярной и избыточной плотности дислокаций, кривизны кручения кристаллической решетки и степени деформационного преобразования структуры пластинчатого перлита по сечению головки рельсов. Выявлена физическая природа и механизмы упрочнения поверхностных слоев рельсов по различным направлениям при длительной эксплуатации [11 – 24].

Внимание исследователей в области физического материаловедения в последние годы акцентировано на поиске возможностей создания и использования высокопрочных сталей с бейнитной структурой. Бейнитные стали представляют собой новый тип сталей, в которых сочетаются одновременно высокая прочность, по-

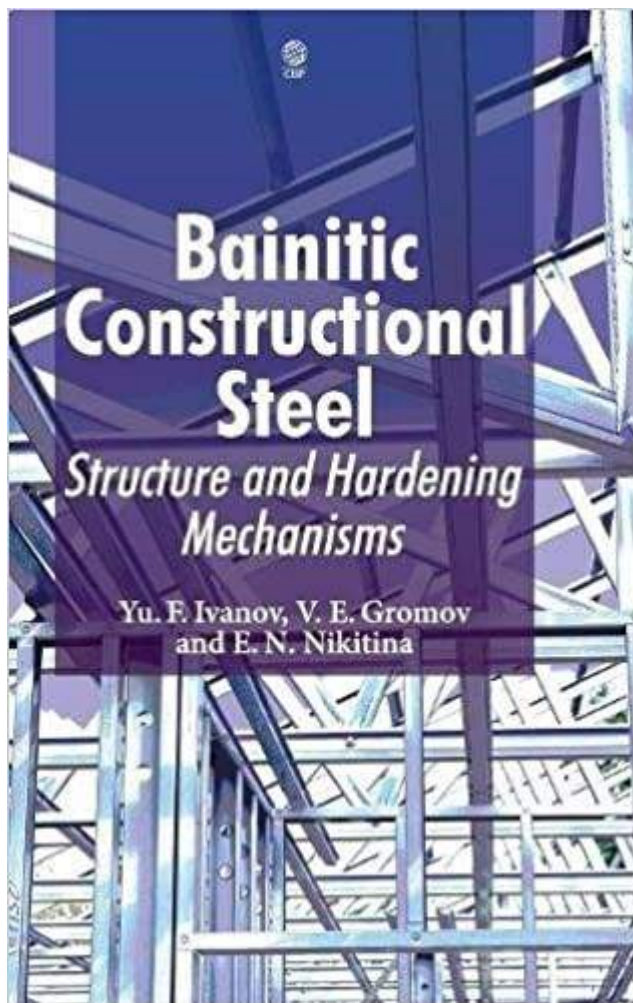


Рис. 4. Книга «Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Nikitina E.N. Bainitic constructional steel. Structure and hardening mechanisms. Cambridge, CISP Ltd, 2017. 120 p.»

Fig. 4. The book "Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Nikitina E.N. Bainitic constructional steel. Structure and hardening mechanisms. Cambridge, CISP Ltd, 2017, 120 p."

вышенная ударная вязкость и хорошая свариваемость, благодаря чему обеспечиваются высокие служебные характеристики и сравнительно малая себестоимость производства конструкций.

Известно, что механические свойства стали определяются состоянием ее структуры. Общеизвестно, что основными факторами, определяющими механические свойства материала, являются структура твердого раствора, наноразмерные частицы вторых фаз (карбиды, нитриды, карбонитриды и т.д.), дислокационная структура, типы и расположение различного рода границ, внутренние поля напряжений. Необходимость тщательного и всестороннего анализа эволюции структурно-фазовых состояний стали с бейнитной структурой, формирующихся при деформационном упрочнении, обусловлена научным и прикладным характером решаемых задач.

Конструкционные стали с бейнитной структурой, обладающие целым рядом высоких эксплуатационных свойств, широко используются в

автомобилестроении, энергетике, производстве рельсов, труб для нефтегазовой отрасли промышленности и т.д. Это штампованные емкости, корпуса котлов, грузоподъемные краны, различные стойки, паровые установки и т.п. Установление закономерностей эволюции фазового состава, дефектной субструктуры и выявление механизмов деформационного упрочнения бейнитной стали 30X2H2MФА, деформированной одноосным сжатием при комнатной температуре, являлось целью монографии «Bainitic constructional steel. Structure and hardening mechanisms» (рис. 4).

Впервые методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии и рентгеноструктурного анализа экспериментально исследованы на количественном уровне дислокационная субструктура и фазовый состав бейнитной стали марки 30X2H2MФА, подвергнутой пластической деформации до разрушения. Определены качественные и количественные параметры структуры, среди которых основное внимание уделено карбидной фазе, перераспределению углерода, скалярной плотности дислокаций, внутренним полям напряжений, их источникам, кривизне-кручению кристаллической решетки. Впервые выявлено формирование каналов локализованной деформации. Впервые проведены оценки механизмов деформационного упрочнения бейнитной стали и выполнен анализ физических основ повышения прочности конструкционной стали марки 30X2H2MФА при деформировании [25 – 32].

С момента создания научной школы основное направление исследований было связано с изучением природы влияния электрических, магнитных полей, электрического тока, электро-взрывного легирования, электронно-пучковой обработки на прочность и пластичность материалов. Отсюда и название школы.

Эксплуатационные свойства металлических изделий можно увеличивать различными способами. Обработка поверхности металлических материалов импульсными электронными пучками является одним из таких современных способов. Позитивными отличиями такого воздействия в сравнении с другими способами модифицирования поверхности, используемыми для ее изменения, являются высокий коэффициент полезного действия и небольшие ускоряющие напряжения, используемые для генерации импульсных электронных пучков. Кроме того, не требуется создания специальной радиационной защиты. При применении импульсных электронных пучков (в отличие от импульсных потоков низкотемпературной плазмы) наблюдаются повышенная однородность плотности энергии по сечению потока пучков электронов, увеличенная

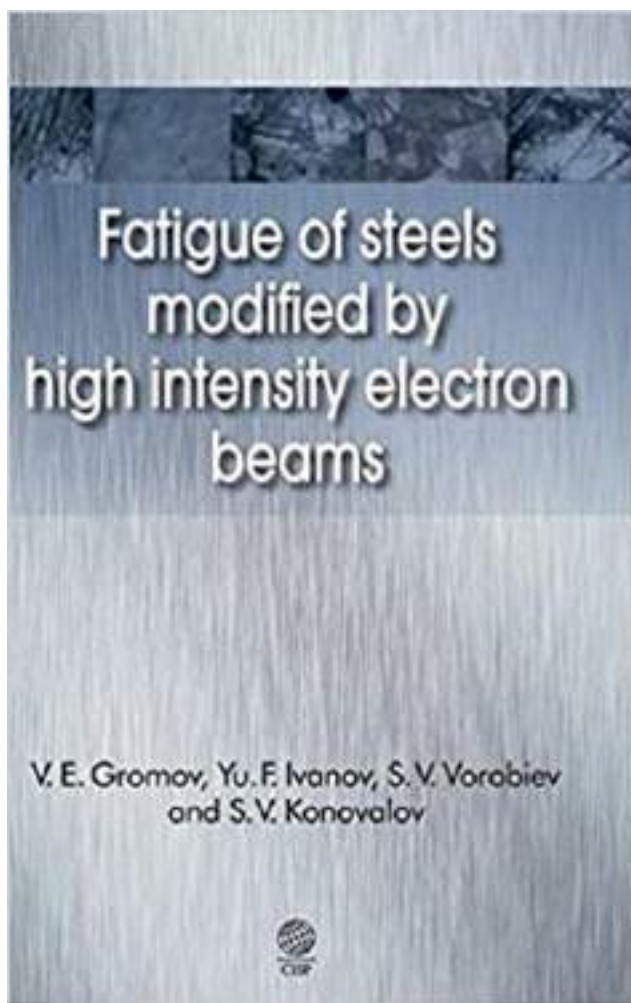


Рис. 5. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams (V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Konovalov. Cambridge, CISP Ltd, 2017. 272 p.

Fig. 5. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams (V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Konovalov. Cambridge, CISP Ltd, 2017, 272 p.

энергетическая эффективность, хорошая повторяемость импульсов, повышенная частота следования импульсов.

В монографии «Fatigue of steels modified by high intensity electron beams» (рис. 5) методами растровой и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии выявлено, что при обработке сталей 08X18H10T, 20X13, 20X23H18 импульсными электронными пучками формируются градиентные структурно-фазовые состояния, которые описываются закономерным изменением параметров дефектной субструктуры и фазового состава при удалении от поверхности обработки. Показано сохранение градиентности при испытаниях на многоцикловую усталость. Причиной усталостного разрушения сталей 08X18H10T, подвергнутой электронно-пучковому воздействию, является образование ϵ - и α -фаз, вдоль границ раздела которых с γ -фазой наблюдается формирование полей напряжений высокого уровня, релаксирующих путем

образования микротрещин. Причинами увеличения усталостной долговечности облученных сталей 08X18H10T и 20X13 являются измельчение субзеренной и зеренной структуры, вызванное обработкой пучками электронов растворение карбидных частиц в поверхностном слое. Установлено, что повышение (вследствие воздействия пучками электронов) усталостного ресурса сталей 20X23H18 связано с замедлением процесса образования участков с критической структурой, не способной к преобразованиям при усталости и являющейся местом возникновения микротрещин. Причиной усталостного разрушения сталей 20X13, подвергнутой обработке электронным пучком, является наличие глобулярных субмикронных частиц карбида типа $Me_{23}C_6$, а также формирование при воздействии электронных пучков кристаллов ϵ -мартенсита [33 – 61].

В 2021 году в издательстве Springer была опубликована монография «Surface Processing of Light Alloys Subject to Concentrated Energy Flows», посвященная формированию и эволюции структурно-фазовых состояний титана при многоцикловой усталости в условиях внешних энергетических воздействий (рис. 6). Ее основу составили публикации [62 – 67].

В современных условиях эксплуатации машин и конструкций проблемы повышения прочности, ресурса, живучести и долговечности материалов выдвигаются в число основных задач. Наиболее ответственные и уникальные изделия, машины и конструкции эксплуатируются в режимах циклических деформаций, которые определяют разрушение даже при незначительных нагрузках. Их роль особенно возрастает для современных высоконагруженных ответственных изделий, подвергающихся воздействию циклических нагрузок. Сложность оценки циклической прочности конструкционных материалов связана с тем, что на усталостное разрушение оказывают влияние различные факторы. Технически чистый титан и его сплавы широко применяются в промышленности благодаря уникальному сочетанию физических и механических характеристик, являются одними из наиболее привлекательных конструкционных материалов. Повышение ресурса работоспособности ответственных изделий является важной научной и производственной задачей. Среди методов целенаправленной модификации свойств и структуры металлических материалов отдельно выделяется обработка пучками электронов и токовое импульсное воздействие.

Методами оптической, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии проведены комплексные экспериментальные исследования влияния электронно-пучковой и токовой

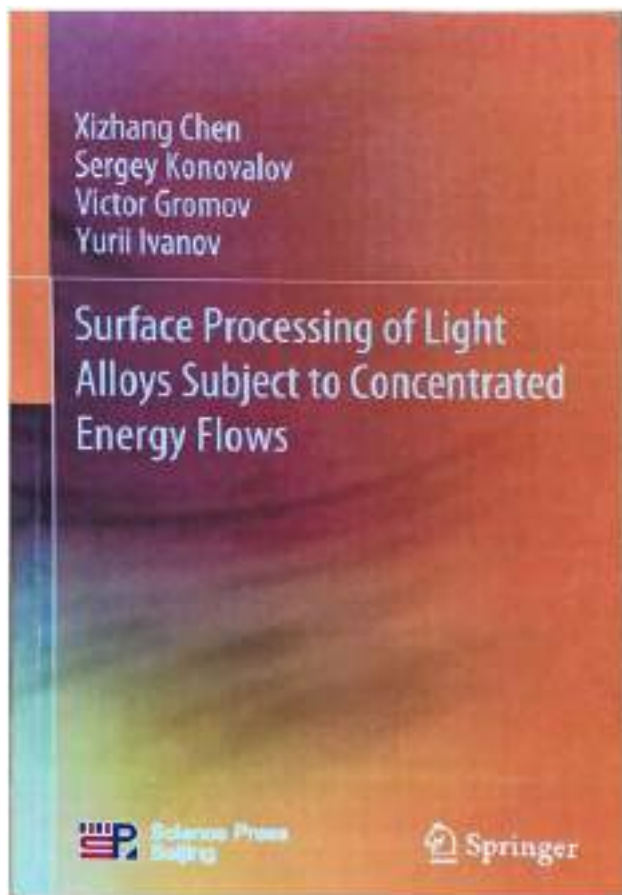


Рис. 6. Книга «Surface Processing of Light Alloys Subject to Concentrated Energy Flows / X. Chen, S. Konovalov, V. Gromov, Yu. Ivanov. Germany, Springer, 2021. 198 p.»
 Fig. 6. The book "Surface Processing of Light Alloys Subject to Concentrated Energy Flows / X. Chen, S. Konovalov, V. Gromov, Yu. Ivanov. Germany, Springer, 2021, 198 p."

импульсной обработок на формирование и эволюцию структуры, фазового состава и дефектной субструктуры титана BT1-0, подвергнутого многоциклового усталостному нагружению до разрушения. Выявлены и проанализированы основные факторы и механизмы, определяющие усталостную долговечность технически чистого титана после электронно-пучковой обработки и токового импульсного воздействия. Установлено, что увеличение усталостной долговечности титана, подвергнутого энергетическим обработкам, обусловлено формированием субмикро- и наноразмерной структуры поверхностного слоя.

Полученные экспериментальные данные по влиянию электронно-пучковой и токовой импульсной обработок на формирование и эволюцию структуры, фазового состава и дефектной субструктуры титана BT1-0 позволяют углубить знания о физических процессах формирования структурно-фазовых состояний при внешних энергетических воздействиях.

По данным Международной Ассоциации «Интерэлектромаш» доля отказов в работе электрооборудования по причине выхода из строя

контактного аппарата занимает первое место среди прочих неисправностей и составляет 26 %. Для восстановления работы электрооборудования контакты заменяют на новые. Дугостойкие электрические контакты изготавливают из композиционных материалов методами порошковой металлургии. Эти материалы состоят на 90 % из меди, которая обладает высокой электропроводностью, и тугоплавкого компонента, обладающего высокой электроэрозионной стойкостью и износостойкостью. Объем мирового рынка композиционных материалов за 2016 год составил около 17 млн т. В структуре мирового потребления композиционных материалов и изделий из них по секторам экономики доля композиционных материалов, потребляемых электротехнической и энергетической отраслями, составляет 21 % среди прочих отраслей промышленности и в будущем будет расти. Объем внутреннего производства дугостойких электрических контактов из композиционных материалов составляет 300 млн \$. Если учесть, что фактически износ контакта до выхода его из строя и замены на новый не превышает 50 %, то около 150 млн \$, израсходованных на производство электрических контактов, остаются неиспользованными при эксплуатации контактов только в Российской Федерации. В силу того, что разрушение материала начинается с поверхности, то на практике, например, для упрочнения электрических контактов средне- и тяжелонагруженных коммутационных аппаратов и выключателей перспективно формирование покрытий, защищающих их поверхность, поскольку в этом случае важна электроэрозионная стойкость только поверхности контакта, а не всего объема. Экономически и технически целесообразно развивать подход к созданию материалов, когда механическая прочность детали обеспечивается применением экономичных подложек, а специальные свойства поверхности – сплошным или локальным формированием на ней композиционных покрытий, свойства которых соответствуют эксплуатационным требованиям. Экономия материалов при таком подходе может достигать 90 %. Экспертные оценки подтверждают эту тенденцию. Разработка методов повышения эксплуатационных характеристик различных материалов является одним из приоритетных направлений современной физики конденсированного состояния. Учитывая все вышесказанное, упрочнение поверхности электрических дугостойких контактов является актуальной задачей для развития современных технологий [68 – 103] (рис. 7).

В монографии «Formation of Structure and Properties of Electro-Explosive Electroerosionresistant Coatings on Switch Contacts of Powerful Electrical Networks» (рис. 7)

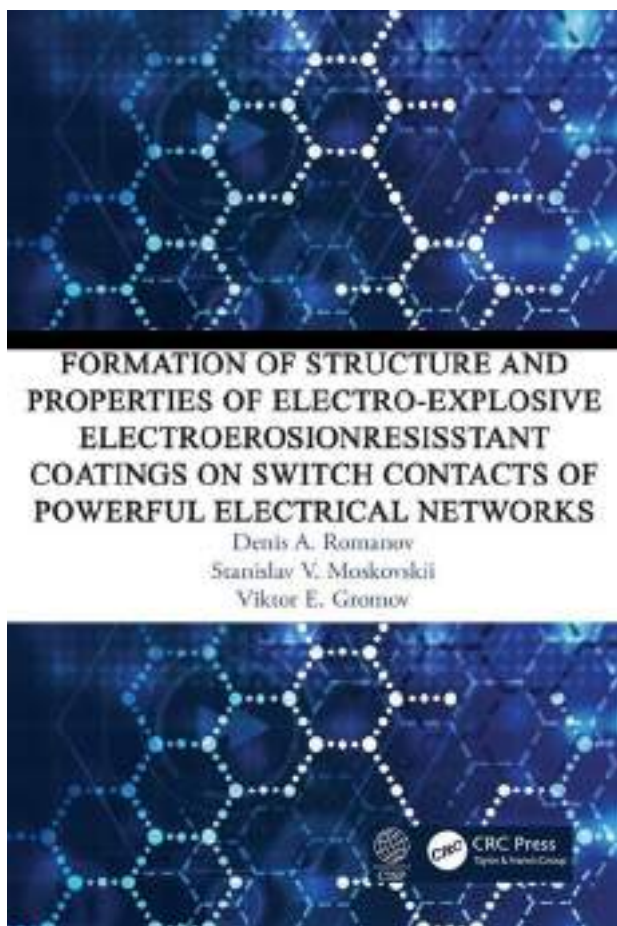


Рис. 7. Книга «Romanov D., Moskovskii S., Gromov V. Formation of Structure and Properties of Electro-Explosive Electroerosionresistant Coatings on Switch Contacts of Powerful Electrical Networks. USA, Taylor and Fransic Group, 2021. 253 p.»

Fig. 7. The book “Romanov D., Moskovskii S., Gromov V. Formation of Structure and Properties of Electro-Explosive Electroerosionresistant Coatings on Switch Contacts of Powerful Electrical Networks. USA, Taylor and Fransic Group, 2021, 253 p.”

описан метод электровзрывного напыления покрытий различных электроэрозионно- и износостойких систем на подложки из технически чистых меди, алюминия и низкоуглеродистой стали. Режимные параметры обработки защищены патентами, согласно которым напыление проводится с использованием медных, никелевых, молибденовых или алюминиевых фольг с порошковыми навесками вольфрама, молибдена, никеля или высокопрочных высокомолекулярных диборида титана, карбида хрома и других соединений при длительности импульсов 100 мкс и поглощаемой плотности мощности от 3,5 до 10,0 ГВт/м². Последующая импульсно-периодическая электронно-пучковая обработка поверхности покрытий для улучшения их качества проводится при поглощаемой плотности энергии от 40 до 60 Дж/см², длительности импульсов от 150 до 200 мкс и их количестве от 10 до 30.

Установлено, что поверхность электровзрывных покрытий имеет высокоразвитый рельеф (R_a достигает 2,4 мкм). Последующая электронно-пучковая обработка позволяет уменьшить шероховатость покрытий до 1,2 мкм. Покрытия толщиной до 2 мм имеют мелкодисперсную структуру (включения частиц вторых фаз имеют размеры от 100 нм до 5 мкм), однородны по глубине и площади, характеризуются отсутствием микротрещин и пор. На границе покрытий с подложкой формируется промежуточный слой (зона смешивания).

Установлены физические закономерности формирования электровзрывных покрытий различных систем: закономерности формирования рельефа поверхности, строения по глубине, структурно-фазовых состояний, дислокационной субструктуры. На шероховатость поверхности и морфологические особенности рельефа покрытий влияет материал взрываемого проводника: применение композиционного электрически взрываемого проводника приводит к минимальным значениям шероховатости $R_a = 2,2$ мкм. Соотношение металлической матрицы и наполнителя в электровзрывных покрытиях с композиционной наполненной структурой задается путем изменения масс фольги и частиц порошков в композиционном электрически взрываемом материале. Толщина единичных слоев, полученных при напылении фольгами и фольгами с размещенными на них порошковыми навесками, а также композиционными электрически взрываемыми материалами, пропорциональна массе взрываемого проводника. Зависимость толщины зоны смешивания покрытий с медной подложкой от плотности теплового потока носит линейный характер при изменении поглощаемой плотности мощности от 4,1 до 5,3 ГВт/м², после чего выходит на насыщение.

Существенное улучшение комплекса конструкционных, функциональных и технологических параметров сплавов и интерметаллидов связано с дополнительным микро- и макролегированием (третьими, четвертыми, пятыми, шестыми элементами), разработкой специальных упрочняющих и пластифицирующих технологий как синтеза, так и последующей обработки поли- и монокристаллов, модификации их микро- и субмикроструктур. В начале XXI века появились работы по созданию и комплексному исследованию новых так называемых высокоэнтропийных полиметаллических сплавов, включающих пять – шесть и более основных элементов.

В работах [104 – 131], опубликованных в 2000 – 2015 годах, рассмотрены результаты исследований методов получения высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) различного химического

состава, микроструктуры и свойств. Сюда необходимо добавить работы [132 – 141], в которых проанализировано влияние термической и деформационной обработок на структуру и механические свойства ВЭС. Оригинальные результаты, полученные в области ВЭС до 2015 года, подробно рассмотрены в аналитических обзорах [142 – 146], где описана термодинамика ВЭС, рассмотрены результаты моделирования их структуры, обсуждены новые варианты методов получения многокомпонентных сплавов.

Исследования ВЭС показали, что в них возможно формирование наноразмерных структур и даже аморфных фаз вследствие значительных искажений решетки, обусловленных различием атомных радиусов элементов замещения. При этом уменьшается скорость диффузионных процессов и, как следствие, снижается скорость роста кристаллитов [147].

Вследствие различий в размерах атомов разных металлов, кристаллическая решетка ВЭС оказывается сильно искаженной, поэтому структуру таких фаз можно рассматривать как промежуточную между стабильными кристаллическими фазами с относительно небольшой равновесной концентрацией дефектов, включая примесные атомы, и метастабильными металлическими стеклами, в которых дальний порядок вообще отсутствует [148]. Вследствие особенностей структуры ВЭС характеризуются малыми коэффициентами диффузии, коррозионной стойкостью, повышенной пластичностью при низких температурах и другими особыми свойствами, которые могут быть весьма полезны для многих перспективных материалов и технологий.

В экономически развитых странах к настоящему времени опубликовано уже более 10000 работ по базам Scopus и Web of Science. Доля публикаций по теме ВЭС составляет от 5 % в Иране до 20 – 22 % в Китае и США [148]. Такой экспоненциальный рост количества публикаций не может не вызывать вопрос: не является ли концепция ВЭС очередной научной модой типа представлений об индивидуальных дислокациях прошлого века, способных объяснить все многообразие деформационного поведения кристаллических материалов.

К настоящему времени не может быть однозначного ответа на этот вопрос. Это связано с тем, что «Direct comparison of data is difficult, due to differences in the type and concentration of principal elements, the type and extent of thermomechanical processing, and the temperature and duration of post-process thermal treatment» [149].

Разрабатываются практически все типы таких сплавов (конструкционные, крио- и жаропрочные, коррозионностойкие, с особыми магнит-

ными и электрическими свойствами) и соединений (карбиды, нитриды, оксиды, бориды, силициды). В большинстве случаев удается получить однофазный высокоэнтروпийный материал или же многофазный материал, состоящий из многокомпонентной матрицы и включений, которые могут приводить к дисперсионному упрочнению [149].

В настоящее время идет процесс накопления и осмысления результатов по методам получения ВЭС, механическим свойствам, микроструктуре и т.п., начиная с классических сплавов Кантора CrMnFeCoNi и Сенкова TiZrHfNbTa и заканчивая уникальными составами с редкоземельными элементами. Оценка уникальности ВЭС по сравнению с традиционными сплавами имеет решающее значение для развития различных отраслей промышленности. На основе имеющихся данных есть все основания считать, что бурное развитие ВЭС будет продолжаться в ближайшее время. В монографии «Structure and Properties of High-Entropy Alloys» (рис. 8) проанализированы новейшие результаты за последние годы по основным разделам: методы получения ВЭС; механические свойства и механизмы деформации; стабильность; перспективы применения; расчеты термодинамических параметров и прогнозирование фазового состава пятикомпонентных высокоэнтропийных сплавов; формирование и исследование структуры и свойств ВЭС системы AlCoCrFeNi; возможности использования внешних энергетических воздействий для улучшения структурно-фазовых состояний и свойств ВЭС. Именно эти разделы являются определяющими в оценке перспектив крупномасштабного промышленного внедрения ВЭС.

Известно, что первое место среди металлов по распространенности в земной коре (по информации из разных источников от 7,45 до 8,20 %) принадлежит алюминию. По объему использования в различных отраслях промышленности алюминий уступает только железу. Однозначно можно утверждать, что без алюминия аэрокосмическая индустрия никогда не получила бы развития, не зря алюминий часто называют крылатым металлом, поскольку одним из его ключевых потребителей является аэрокосмическая отрасль. Однако нельзя недооценивать и другие сферы использования алюминия. Алюминий используется для производства автомобилей, вагонов скоростных поездов, морских судов. С каждым годом неизбежно растет доля использования алюминия как конструкционного материала при строительстве. Передача электрической энергии на большие расстояния существенно удорожается без применения алюминия как основного мате-

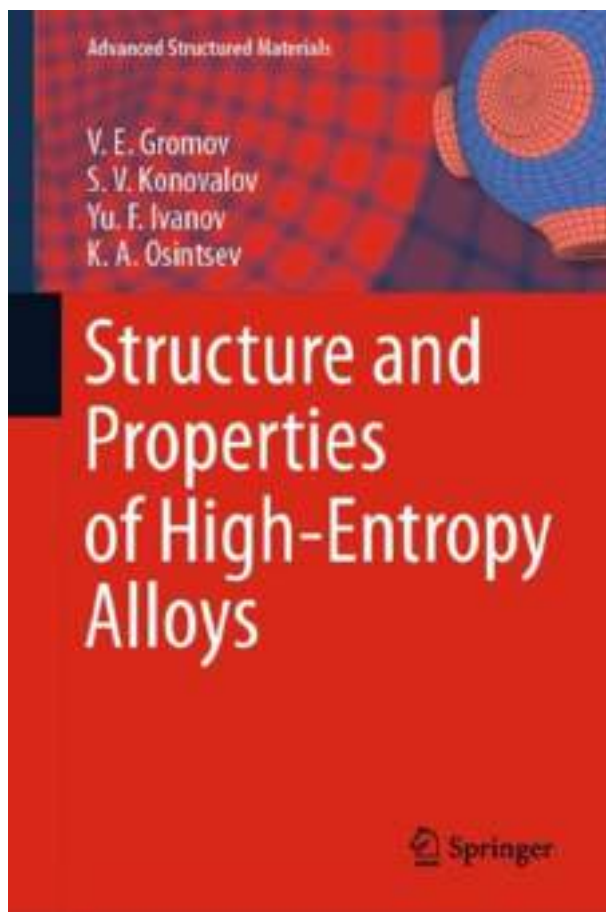


Рис. 8. Монография «Structure and Properties of High-Entropy Alloys. V.E. Gromov, S.V. Kononov, Yu.F. Ivanov, K.A. Osintsev. USA, Springer, 2021. 129 p.»

Fig. 8. The book “Structure and Properties of High-Entropy Alloys. V.E. Gromov, S.V. Kononov, Yu.F. Ivanov, K.A. Osintsev. USA, Springer, 2021, 129 p.”

риала для изготовления высоковольтных линий электропередачи. В быту алюминий также находит применение (часть посуды изготавливается из алюминия, сейчас тяжело представить магазины без алюминиевых банок для напитков, аптеки без лекарств, упакованных в алюминиевую фольгу).

Чрезвычайная распространенность в природе в сочетании с уникальными свойствами определили широчайший спектр применения легкого металла и его огромное значение в мировой экономике.

Однако детали и узлы в большинстве случаев изготавливают не из чистого алюминия. Вместо чистого алюминия используются сплавы на основе алюминия, которые получают добавлением различных элементов в процессе литья (бериллий, ванадий, вольфрам, ниобий, кремний, магний, кобальт и т.д.). В качестве одного из сплавов стоит отметить сплав алюминия с кремнием. Эти широко используемые алюминиевые сплавы обладают высокими литейными свойствами, низким коэффициентом теплового

расширения, высокой коррозионной стойкостью и другими повышенными эксплуатационными свойствами.

Сплавы системы AlSi сравнимы по свойствам с нержавеющей сталью, но при этом обладают меньшим весом, с этим они широко используются в различных отраслях промышленности в качестве конструкционных и функциональных материалов (машино-, корабле-, авиа- и автомобилестроении, производстве оружия), в быту (водяные краны и смесители, мебель, посуда, лестницы, оконные рамы и др.).

В качестве наиболее распространенных литейных алюминиевых сплавов, которые содержат дополнительные легирующие элементы (Cu, Mg и Ni) и применяются во многих областях техники, следует отметить сплавы АК10М2Н и АК5М2.

Однако прочностных и пластических свойств сплавов системы AlSi в последнее время становится недостаточно, ввиду расширения сфер их использования. С целью улучшения прочностных свойств в алюминий добавляют кремний, но в некоторых случаях его наличие приводит к охрупчиванию материала по причине образования в структуре сплава крупнозернистых частиц пластинчатой формы, а избыточная концентрация примесей и других легирующих элементов приводит к образованию интерметаллидных соединений, которые снижают прочностные свойства сплава.

Обычно для улучшения прочностных свойств проводят объемное модифицирование расплава путем добавления легирующих элементов, что существенно удорожает продукцию. Кроме этого, некоторые из модификаторов являются токсичными, что не позволяет использовать такие сплавы в медицине. К экономичным и экологически чистым относятся методы поверхностного модифицирования материала концентрированными потоками энергии.

Основной принцип работы рассматриваемых воздействий заключается в сверхвысокоскоростном нагреве и охлаждении тонкого поверхностного слоя, что приводит к растворению частиц кремния и интерметаллидов, а также позволяет сформировать однородную структуру субмикронного и наноразмерного масштабного диапазонов. Это положительным образом сказывается на свойствах изделия.

В монографии «Electron-Ion-Plasma Modification of a Hypoeutectoid Al-Si Alloy» (рис. 9) в качестве методов поверхностного упрочнения выбраны: облучение интенсивным импульсным электронным пучком (ИИЭП); ионно-плазменная обработка системой Al – Y₂O₃; комбинирование двух вышеупомянутых методов

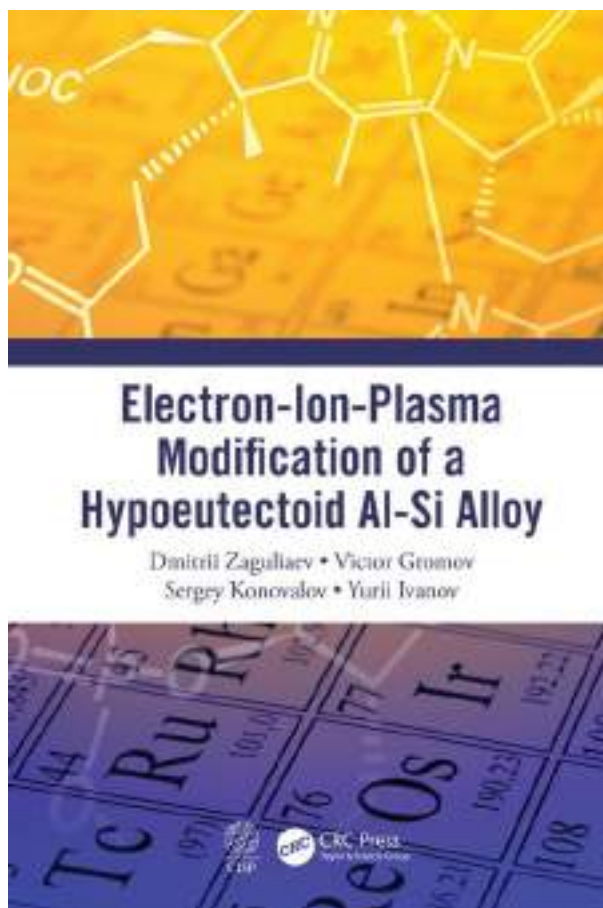


Рис. 9. Книга «Electron-Ion-Plasma Modification of a Hypoeutectoid Al-Si Alloy / D. Zaguliaev, V. Gromov, S. Konovalov, Yu. Ivanov. USA, Taylor and Francis, 2021. 260 p.»
 Fig. 9. The book “Electron-Ion-Plasma Modification of a Hypoeutectoid Al-Si Alloy / D. Zaguliaev, V. Gromov, S. Konovalov, Yu. Ivanov. USA, Taylor and Francis, 2021, 260 p.”

внешнего энергетического воздействия.

Для этих сплавов установлено, что облучение ИИЭП, независимо от времени импульса (50, 150 и 200 мкс) приводит к увеличению HV. Оптимальным режимом обработки, приводящим к максимальному увеличению HV в 1,96 раза (1,41 ГПа после обработки, 0,72 ГПа – литое состояние), является режим с плотностью энергии пучка электронов 30 Дж/см² и временем импульса 150 мкс. Установлено, что одновременно с ростом HV в облученных образцах наблюдается снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания. По сравнению с материалом в состоянии поставки коэффициент трения снизился примерно в 1,3 раза, интенсивность изнашивания – примерно в 6,6 раза [150 – 158].

Комплексная обработка поверхности сплавов, сочетающая электровзрывное легирование титаном и иттрием с последующим облучением импульсным электронным пучком, приводит к формированию в поверхностном слое сплава

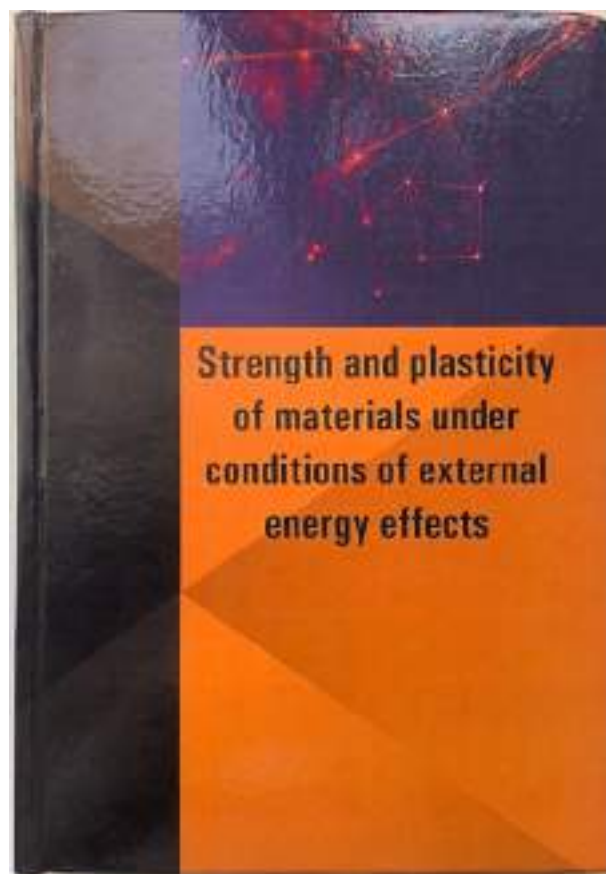


Рис. 10. Книга «Strength and plasticity of materials under conditions of external energy effects. Novokuznetsk, Polygraphist, 2021. 141 p.»

Fig. 10. The book “Strength and plasticity of materials under conditions of external energy effects. Novokuznetsk, Polygraphist, 2021, 141 p.”

многофазного субмикро-наноразмерного состояния, размеры кристаллитов которого изменяются в пределах от единиц до сотен нанометров. Износостойкость материала слабо зависит от варианта комбинированной обработки. По отношению к исходному сплаву выявлено повышение износостойкости в 18 – 20 раз; по отношению к сплаву, облученному интенсивным импульсным электронным пучком, повышение износостойкости составило 2,6 – 2,8 раз [159 – 168].

К своему юбилею школа выпустила монографию «Strength and plasticity of materials under conditions of external energy effects» (рис. 10), в которой обобщены последние достижения членов школы.

Научная школа «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» (рис. 11) встречает свой юбилей новыми достижениями, выигранными грантами РФФИ, стипендиями Президента, докладами на престижных конференциях, публикациями в журналах Q1 и Q2, подготовкой и защитой диссертаций. Все как обычно, в рабочем режиме!



Рис. 11. Кафедра физики – основа научной школы до образования кафедры естественнонаучных дисциплин (присоединения к ней кафедры химии)

Fig. 11. The Department of Physics is the basis of the scientific school before the formation of the Department of Natural Sciences (joining the Department of Chemistry)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов В.Е., Юрьев А.А., Морозов К.В. и др. Эволюция тонкой структуры в поверхностных слоях 100-м дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т. 14. № 2. С. 267–273.
2. Громов В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф. и др. Перераспределение атомов углерода в дифференцированно закаленных рельсах при длительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 6. С. 56–69.
3. Юрьев А.А., Громов В.Е., Морозов К.В. и др. Изменение структуры и фазового состава поверхности 100-м дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 10. С. 826–831.
4. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Юрьев А.А. и др. Природа поверхностного упрочнения дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Деформация и разрушение материалов. 2018. № 4. С. 67–85.
5. Громов В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф. и др. Анализ механизмов деформационного упрочнения рельсовой стали в процессе длительной эксплуатации // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2017. № 3. С. 76–84.
6. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Юрьев А.А. и др. Градиенты структуры и свойств поверхностных слоев дифференцированно закаленных рельсов после длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т. 14. № 3. С. 297–305.
7. Юрьев А.А., Громов В.Е., Гришунин В.А. и др. Механизмы разрушения пластинчатого перлита дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т. 14. № 4. С. 438–444.
8. Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Громов В.Е. и др. Преобразование карбидной фазы рельсов при длительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 2. С. 140–148.

9. Громов В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф. и др. Эволюция структуры и свойств дифференцированно закаленных рельсов в процессе длительной эксплуатации // Металлофизика и новейшие технологии. 2017. Т. 39. № 12. С. 1599–1646.
10. Громов В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф. и др. Трансформация структуры 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15. № 1. С. 128–134.
11. Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Yuriev A.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Structural phase states and properties of rails after long-term operation // Materials Letters. 2020. Vol. 268. Article 127499.
12. Кормышев В.Е., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Юрьев А.А., Полевой Е.В. Структура и свойства дифференцированно закаленных 100-м рельсов после экстремально длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2019. Т. 16. № 4. С. 538–546.
13. Кормышев В.Е., Полевой Е.В., Юрьев А.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Формирование структуры дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при длительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 2. С. 108–115.
14. Кормышев В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Полевой Е.В., Громов В.Е., Глезер А.М. Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 1. Структура и свойства рельсовой стали перед эксплуатацией // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2019. № 4. С. 50–56.
15. Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Глезер А.М. Структура дифференцированно закаленных рельсов при интенсивной пластической деформации // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 8. С. 16–20.
16. Кормышев В.Е., Юрьев А.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Рубанникова Ю.А., Полевой Е.В. Стадии преобразования пластинчатого перлита дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2020. № 2. С. 51–56.
17. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Кормышев В.Е., Глезер А.М. Структура и свойства рельсов после экстремально длительной эксплуатации // Вопросы материаловедения. 2020. № 2 (102). С. 30–39.
18. Юрьев А.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Рубанникова Ю.А. Структура и свойства длинномерных дифференцированно закаленных рельсов после экстремально длительной эксплуатации. Новокузнецк: Полиграфист, 2020. 253 с.
19. Панин В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Кормышев В.Е. Роль кривизны решетки в деградации структуры поверхностного слоя металла рельсов при длительной эксплуатации // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 494. С. 68–71.
20. Громов В.Е., Кормышев В.Е., Иванов Ю.Ф., Глезер А.М. Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 2. Структура и свойства головки рельсов после пропущенного тоннажа 1411 млн. тонн // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2020. № 3. С. 53–61.
21. Иванов Ю.Ф., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Юрьев А.А., Глезер А.М., Рубанникова Ю.А. Механизмы упрочнения металла рельсов при длительной эксплуатации // Вопросы материаловедения. 2020. № 3 (103). С. 17–28.
22. Panin S.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yuriev A.A., Kormyshev V.E. The Role of Lattice Curvature in Structural Degradation of the Metal Surface Layer of a Rail under Long-term Operation // Doklady Physics. 2020. Vol. 65. No. 10. P. 394–396.
23. Kormyshev V.E., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Yuriev A.A., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Formation of Fine Surface of Long Rails on Differentiated Hardening // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. Vol. 14. No. 6. P. 1186–1189.
24. Панин В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Громов В.Е., Панин С.В., Кормышев В.Е., Рубанникова Ю.А. Эволюция тонкой структуры и свойств металла рельсов при длительной эксплуатации // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 5. С. 85–94.
25. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Никитина Е.Н., Алсараева К.В. Перераспределение углерода в стали с бейнитной структурой при деформации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2015. Т. 12. № 3. С. 278–281.
26. Громов В.Е., Никитина Е.Н., Иванов Ю.Ф. Эволюция карбидной и дефектной подсистем стали с бейнитной структурой при деформации // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 3. С. 74–80.
27. Никитина Е.Н., Громов В.Е., Алсараева К.В. Эволюция дефектной подсистемы конструк-

- ционной стали с бейнитной структурой при деформации // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 8. С. 603–607.
28. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Никитина Е.Н. Эволюция карбидной подсистемы конструкционной стали с бейнитной структурой при деформации одноостным сжатием // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2015. Т. 12. № 2. С. 227–230.
 29. Ivanov Yu.F., Nikitina E.N., Gromov V.E. Carbon distribution in bainitic steel subjected to deformation // AIP Conference Proceedings. 2015. Vol. 1683. Article 020075.
 30. Громов В.Е., Никитина Е.Н., Иванов Ю.Ф., Аксенова К.В., Корнет Ю.Ф. Деформационное упрочнение стали с бейнитной структурой // Институт металлофизики НАН Украины. Успехи физики металлов. 2015. Т. 16. № 4. С. 299–328.
 31. Gromov V.E., Nikitina E.N., Ivanov Yu.F., Aksenova K.V., Semina O.A. Bainite steel: structure and work hardening // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 1. С. 87–100.
 32. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Глезер А.М., Никитина Е.Н., Аксёнова К.В. Локализация пластической деформации на наноуровне в стали с бейнитной структурой // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 8. С. 18–21.
 33. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В., Горбунов С.В., Коновалов С.В. Модифицирование структурно-фазовых состояний поверхности нержавеющей стали электронно-пучковой обработкой // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2010. № 4. С. 31–37.
 34. Горбунов С.В., Воробьев С.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В. Формирование градиентной структуры поверхностного слоя при электронно-лучевой обработке аустенитной стали // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 1. С. 61–65.
 35. Иванов Ю.Ф., Горбунов С.В., Воробьев С.В., Коваль Н.Н., Коновалов С.В., Громов В.Е. Структура поверхностного слоя, формирующегося в стали 08X18H10T, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком, в условиях многоциклового усталости // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 1. С. 75–82.
 36. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В., Горбунов С.В., Коновалов С.В. Структурно-фазовые превращения при многоциклового усталости нержавеющей стали, обработанной электронными пучками // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2011. № 1. С. 57–63.
 37. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Горбунов С.В., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Градиентные структурно-фазовые состояния, формирующиеся в стали 08X18H10T при многоциклового усталости до разрушения // Физика металлов и материаловедение. 2011. Т. 112. № 1. С. 85–93.
 38. Громов В.Е., Горбунов С.В., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Формирование поверхностных градиентных структурно-фазовых состояний при электронно-пучковой обработке нержавеющей стали // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 10. С. 62–67.
 39. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Горбунов С.В., Воробьев С.В., Коновалов С.В., Громов В.Е. Многоцикловая усталость нержавеющей стали, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком: структура поверхностного слоя // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 5. С. 61–69.
 40. Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В., Горбунов С.В., Громов В.Е. Влияние токовой обработки на формирование градиентных структурно-фазовых состояний в аустенитной стали // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2010. Т. 15. № 3-1. С. 823–824.
 41. Иванов Ю.Ф., Горбунов С.В., Громов В.Е., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Формирование структурно-фазового состояния поверхностного слоя стали 08X18H10T при обработке высокоинтенсивным электронным пучком // Материаловедение. 2011. № 5. С. 43–47.
 42. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Бессонов Д.А., Воробьев С.В., Тересов А.Д., Коваль Н.Н., Коновалов С.В. Фазовый состав и дефектная субструктура стали 20X13, обработанной электронным пучком в режиме оплавления поверхности // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8. № 3. С. 28–33.
 43. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Воробьев С.В., Бессонов Д.А., Колубаева Ю.А., Коновалов С.В. Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя, формирующееся в стали 20X13 в результате облучения высокоинтенсивным электронным пучком // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 6. С. 111–116.
 44. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Бессонов Д.А., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Эволюция структуры и фазового состава стали 20X13 в процессе упрочняющей электронно-

- пучковой обработки и последующего усталостного нагружения // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 12. С. 19–23.
45. Бессонов Д.А., Воробьев С.В., Иванов Ю.Ф. Повышение усталостной долговечности стали 20X13 электронно-пучковой обработкой // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 48–49.
 46. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Сизов В.В., Воробьев С.В., Софрошенков А.Ф. Повышение усталостного ресурса стали 20X23H18 высокоинтенсивной электронно-пучковой обработкой // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8. № 4. С. 131–36.
 47. Воробьев С.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Бессонов Д.А., Коваль Н.Н., Тересов А.Д. Формирование градиентной структуры и фазового состава поверхностных слоев стали 20X13 после облучения высокоинтенсивным электронным пучком // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 4. С. 97–99.
 48. Бессонов Д.А., Воробьев С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Целлермаер В.Я. Эволюция зеренной структуры поверхностного слоя стали 20X13, подвергнутой электронно-пучковой обработке // Известия вузов. Черная металлургия. 2012. № 2. С. 44–48.
 49. Сизов В.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Эволюция зеренной структуры поверхностного слоя стали 20X23H18, подвергнутой электронно-пучковой обработке и многоциклового нагружению // Известия вузов. Черная металлургия. 2012. № 10. С. 56–60.
 50. Воробьев С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Сизов В.В., Софрошенков А.Ф. Формирование нанокристаллической структуры и усталостная долговечность нержавеющей стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2012. № 4. С. 51–53.
 51. Сизов В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Усталостное разрушение нержавеющей стали после электронно-пучковой обработки // Известия вузов. Черная металлургия. 2012. № 6. С. 35–37.
 52. Сизов В.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Формирование и эволюция зеренной структуры нержавеющей стали при электронно-пучковой обработке и многоциклового усталости // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. № 2. С. 136–140.
 53. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Сизов В.В., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Увеличение усталостной долговечности нержавеющей стали электронно-пучковой обработкой // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2012. № 1. С. 66–75.
 54. Бессонов Д.А., Воробьев С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Формирование нанокристаллических структур в нержавеющей стали, подвергнутой электронно-пучковой обработке и многоциклового усталостному нагружению // Наноинженерия. 2013. № 3. С. 20–24.
 55. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Сизов В.В., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Увеличение усталостной долговечности нержавеющей стали электронно-пучковой обработкой поверхности // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 1. С. 99–104.
 56. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Сизов В.В., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Структурно-масштабные уровни деформации стали 20X23H18, подвергнутой усталостному разрушению после электронно-пучковой обработки // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. № 1. С. 85–90.
 57. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Сизов В.В., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Эволюция структуры и фазового состава нержавеющей стали 20X23H18 при циклическом деформировании // Материаловедение. 2013. № 4. С. 34–39.
 58. Громов В.Е., Воробьев С.В., Сизов В.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. Структурно-масштабные уровни увеличения усталостной долговечности сталей и сплавов электронно-пучковой обработкой // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 5. С. 346–351.
 59. Коновалов С.В., Воробьев С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Комиссарова И.А., Кобзарева Т.Ю. Роль обработки электронными пучками в изменении структуры и фазового состава сталей и сплавов, подвергаемых испытаниям на многоцикловую усталость // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 4. С. 92–97.
 60. Воробьев С.В., Увеличение усталостной долговечности сталей различных структурных классов электронно-пучковой обработкой // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. № 4. С. 260–262.
 61. Воробьев С.В., Глезер А.М., Бессонов Д.А., Коновалов С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Закономерности влияния электронно-пучковой обработки на фазовый состав и дефектную субструктуру стали 20X13 при усталости // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2016. № 3. С. 68–73.

62. Коновалов С.В., Воробьев С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Комиссарова И.А., Кобзарева Т.Ю. Роль обработки электронными пучками в изменении структуры и фазового состава сталей и сплавов, подвергаемых испытаниям на многоцикловую усталость // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 4. С. 92–97.
63. Коновалов С.В., Комиссарова И.А., Косинов Д.А. и др. Структура титанового сплава, модифицированного электронными пучками и разрушенного при усталости // Письма о материалах. 2017. Т. 7. № 3 (27). С. 266–271.
64. Коновалов С.В., Комиссарова И.А., Чэнь С. и др. Исследование титанового сплава, подвергнутого электронно-пучковой обработке, приводящей к повышению усталостного ресурса // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15. № 1. С. 109–113.
65. Комиссарова И.А., Косинов Д.А., Коновалов С.В. и др. Изменение при многоцикло-вой усталости структуры титанового сплава BT1-0, подвергнутого токовому импульсному воздействию // Ползуновский вестник. 2018. № 3. С. 139–143.
66. Комиссарова И.А., Коновалов С.В., Косинов Д.А. Влияние токового импульсного воздействия на структуру титанового сплава при многоцикло-вой усталости // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15. № 3. С. 409–415.
67. Коновалов С.В., Комиссарова И.А., Глезер А.М., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Чэнь С. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру технически чистого титана, подвергнутого усталостному разрушению // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 9. С. 42–48.
68. Романов Д.А., Жмакин Ю.Д., Будовских Е.А. и др. Формирование электроконтактных поверхностных слоев системы W – C – Cu с использованием модернизированной электровзрывной установки ЭВУ 60/10М // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8. № 2. С. 19–23.
69. Романов Д.А., Будовских Е.А., Жмакин Ю.Д., Громов В.Е. Опыт и перспективы использования электровзрывной установки ЭВУ 60/10 для модификации поверхности материалов // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 6. С. 20–24.
70. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Рельеф поверхности и структура электровзрывных композиционных поверхностных слоев системы молибден-медь // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 11. С. 95–100.
71. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Рельеф поверхности и структура композиционных поверхностных слоев систем W–Cu и Mo–Cu, сформированных электровзрывным способом // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 5. С. 51–55.
72. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Рельеф поверхности и структура псевдосплавных покрытий системы молибден-медь, сформированных электровзрывным способом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 10. С. 19–21.
73. Романов Д.А., Будовских Е.А., Ионина А.В., Громов В.Е. Электровзрывное напыление электроэрозионностойких покрытий системы Ti–B–Cu // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8. № 4. С. 60–64.
74. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. и др. Структура и фазовый состав электроэрозионностойких покрытий системы TiB₂–Cu, сформированных методом электровзрывного напыления // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2012. № 3. С. 87–91.
75. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Рельеф поверхности и структура электровзрывных композиционных поверхностных слоев системы титан-бор-медь // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 9. С. 30–33.
76. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Электроконтактные покрытия системы Mo–C–Cu, полученные методом электровзрывного напыления // Перспективные материалы. 2012. № 6. С. 75–78.
77. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионностойких покрытий, полученных методом электровзрывного напыления // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 1. С. 36–43.
78. Романов Д.А., Олесюк О.А., Будовских Е.А. и др. Структура и свойства электроэрозионностойких покрытий, формируемых методом электровзрывного напыления // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2013. № 1. С. 53–57.
79. Будовских Е.А., Громов В.Е., Романов Д.А. Механизм формирования высокой адгезии электровзрывных покрытий с основой металла // Доклады академии наук. 2013. Т. 449. № 1. С. 25–27.
80. Олесюк О.В., Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Структура износостойких покры-

- тий систем TiB_2-Al и $TiC-Mo$, полученных электровзрывным напылением // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 3. С. 417–423.
81. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Особенности структуры и свойств электроэрозионностойких покрытий, формируемых методом электровзрывного напыления // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2014. № 2. С. 58–62.
 82. Романов Д.А., Олесюк О.В., Будовских Е.А. и др. Структура и фазовый состав износостойких покрытий системы TiB_2-Al , полученных электровзрывным напылением // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2014. № 3. С. 60–65.
 83. Панин В.Е., Громов В.Е., Романов Д.А. и др. Физические основы структурообразования в электровзрывных покрытиях // Доклады академии наук. 2017. Т. 472. № 6. С. 650–653.
 84. Романов Д.А., Олесюк О.В., Будовских Е.А. и др. Структура электровзрывных композиционных покрытий из несмешивающихся компонентов системы $Cu-Mo$ после электронно-пучковой обработки // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2014. № 1. С. 54–60.
 85. Романов Д.А., Олесюк О.В., Коновалов С.В. и др. Структура композиционных покрытий системы $W-C-Cu$, полученных электровзрывным напылением и последующей электронно-пучковой обработкой // Перспективные материалы. 2014. № 4. С. 64–69.
 86. Романов Д.А., Олесюк О.В., Будовских Е.А. и др. Структура композиционных покрытий из несмешивающихся компонентов системы $Cu - Mo$, полученных электровзрывным напылением и последующей электронно-пучковой обработкой // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2014. № 1. С. 7–10.
 87. Романов Д.А., Олесюк О.В., Будовских Е.А. и др. Структура электровзрывных композиционных покрытий системы $TiB_2 - Cu$ после электронно-пучковой обработки // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 1. С. 73–78.
 88. Романов Д.А., Олесюк О.В., Будовских Е.А. и др. Структурно фазовые состояния и трибологические свойства электровзрывных композиционных покрытий на меди после электроннопучковой обработки // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 7. С. 50–56.
 89. Олесюк О.В., Коновалов С.В., Романов Д.А. Влияние электронно-пучковой обработки на трибологические свойства электровзрывных электроэрозионностойких покрытий // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.scienceeducation.ru/116-12659>. (Дата обращения: 01.02.2022).
 90. Романов Д.А., Гончарова Е.Н., Будовских Е.А. и др. Структурно-фазовое состояние электроэрозионного покрытия $Cu-Cr$, сформированного на меди комбинированным методом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 7. С. 25–29.
 91. Романов Д.А., Гончарова Е.Н., Громов В.Е. и др. Элементный и фазовый анализ покрытия TiB_2-Mo и TiB_2-Ni , сформированного на стали электровзрывным методом после электронно-пучковой обработки // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2015. Т. 12. № 1. С. 118–125.
 92. Романов Д.А., Гончарова Е.Н., Будовских Е.А. и др. Структура электровзрывных композиционных покрытий системы TiB_2-Ni // Перспективные материалы. 2015. № 5. С. 69–77.
 93. Романов Д.А., Протопопов Е.В., Батаев В.А. и др. Анализ структуры и свойств электровзрывных покрытий системы $TiC-Ni$ на штамповой стали после электронно-пучковой обработки // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 4 (42). С. 108–118.
 94. Романов Д.А., Протопопов Е.В. Структура, фазовый состав и свойства электровзрывных износостойких покрытий после электронно-пучковой обработки // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 12. С. 972 – 979.
 95. Романов Д.А., Гончарова Е.Н., Будовских Е.А. и др. Элементный и фазовый анализ покрытия $TiB_2 - Mo$, сформированного на стали электровзрывным методом // Физика и химия обработки материалов. 2016. № 1. С. 47–52.
 96. Романов Д.А., Гончарова Е.Н., Будовских Е.А. и др. Структурно-фазовый состав и свойства электроэрозионного покрытия $TiC-Ni$, сформированного на среднеуглеродистой стали комбинированным методом // Перспективные материалы. 2016. № 10. С. 62–68.
 97. Романов Д.А., Гончарова Е.Н., Будовских Е.А. и др. Анализ структуры электровзрывных композиционных покрытий системы

- TiC–Ni на стали после электронно-пучковой обработки // *Металлы*. 2016. № 6. С. 69–77.
98. Молотков С.Г., Романов Д.А., Будовских Е.А., Софрошенков А.Ф. Анализ особенностей формирования структуры электровзрывных покрытий на границе с основой // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2012. № 2. С. 69–70.
 99. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Формирование глобулярных особенностей структуры электровзрывных покрытий // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2016. Т. 13. № 3. С. 355–357.
 100. Романов Д.А., Молотков С.Г., Степиков М.А., Громов В.Е. Расчет температурного поля с учетом теплоты химических реакций при электровзрывном никелировании // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2017. Т. 14. № 1. С. 100–107.
 101. Романов Д.А., Молотков С.Г., Колмакова Т.В. и др. Моделирование неустойчивости Рихтмайера-Мешкова границы раздела покрытие-подложка при электровзрывном никелировании алюминия // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2017. Т. 14. № 2. С. 189–192.
 102. Романов Д.А., Протопопов Е.В. Модель электроэрозионного разрушения композиционных электровзрывных покрытий в условиях искровой эрозии // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 2. С. 143–147.
 103. Романов Д.А., Московский С.В., Громов В.Е., Соснин К.В. Электровзрывные электроэрозионностойкие покрытия системы Ag – W для электрических контактов силового шахтного оборудования // *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2018. № 4. С. 265–269.
 104. Tong C.-J., Chen Y.-L., Yeh J.-W., Lin S.-J., Lee P.-H., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Microstructure characterization of Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005. Vol. 36. P. 881–893.
 105. Chen Y.Y., Duval T., Hung U.D., Yeh J.W., Shih H.C. Microstructure and electrochemical properties of high entropy alloys – a comparison with type-304 stainless steel // *Corrosion Science*. 2005. Vol. 47. P. 2257–2279.
 106. Li A., Zhang X. Thermodynamic analysis of the simple microstructure of AlCrFeNiCu high-entropy alloy with multi-principal elements // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2009. Vol. 22. P. 219–224.
 107. Tsai C.-W., Tsai M.-H., Yeh J.-W., Yang C.-C. Effect of temperature on mechanical properties of Al_{0.5}CoCrCuFeNi wrought alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. Vol. 490. P. 160–165.
 108. Braic M., Braic V., Balaceanu M., Zoita C.N., Vladescu A., Grigore E. Characteristics of (TiAlCrNbY)C films deposited by reactive magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 204. P. 2010–2014.
 109. Huang P.-K., Yeh J.-W. Effects of nitrogen content on structure and mechanical properties of multi-element (AlCrNbSiTiV)N coating // *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 203. P. 1891–1896.
 110. Hu Z., Zhan Y., Zhang G., She J., Li C. Effect of rare earth Y addition on the microstructure and mechanical properties of high entropy AlCoCrCuNiTi alloys // *Materials & Design*. 2010. Vol. 31. P. 1599–1602.
 111. Lin M.-I., Tsai M.-H., Shen W.-J., Yeh J.-W. Evolution of structure and properties of multi-component (AlCrTaTiZr)Ox films // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 518. P. 2732–2737.
 112. Dolique V., Thomann A.-L., Brault P., Tessier Y., & Gillon P. Thermal stability of AlCoCrCuFeNi high entropy alloy thin films studied by in-situ XRD analysis // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 204. P. 1989–1992.
 113. Zhang K.B., Fu Z.Y., Zhang J.Y., Shi J., Wang W.M., Wang H., Wang Y.C., Zhang Q.J. Annealing on the structure and properties evolution of the CoCrFeNiCuAl high-entropy alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. Vol. 502. P. 295–299.
 114. Singh S., Wanderka N., Murty B.S., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. P. 182–190.
 115. Chuang M.-H., Tsai M.-H., Wang W.-R., Lin S.-J., Yeh J.-W. Microstructure and wear behavior of Al_xCo_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_y high-entropy alloys // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. P. 6308–6317.
 116. Hsu Y.-J., Chiang W.-C., Wu J.-K. Corrosion behavior of FeCoNiCrCu_x high-entropy alloys in 3.5 % sodium chloride solution // *Materials Chemistry and Physics*. 2005. Vol. 92. P. 112–117.
 117. Lin C.-M., Tsai H.-L. Evolution of microstructure, hardness, and corrosion properties of high-entropy Al_{0.5}CoCrFeNi alloy // *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. P. 288–294.
 118. Liu L., Zhu J.B., Zhang C., Li J.C., Jiang Q. Microstructure and the properties of FeCoCu-NiSn_x high entropy alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 548. P. 64–68.

119. Manzoni A., Daoud H., Völkl R., Glatzel U., Wanderka N. Phase separation in equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy // *Ultramicroscopy*. 2013. Vol. 132. P. 212–215.
120. Li B., Peng K., Hu A., Zhou L., Zhu J., Li D. Structure and properties of FeCoNiCrCu_{0.5}Al_x high-entropy alloy // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013. Vol. 23. P. 735–741.
121. Qiu X.-W. Microstructure and properties of AlCrFeNiCoCu high entropy alloy prepared by powder metallurgy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 555. P. 246–249.
122. Tariq N.H., Naeem M., Hasan B.A., Akhter J.I., Siddique M. Effect of W and Zr on structural, thermal and magnetic properties of AlCoCrCuFeNi high entropy alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 556. P. 79–85.
123. Daoud H.M., Manzoni A., Völkl R., Wanderka N., Glatzel U., Microstructure and Tensile Behavior of Al₈Co₁₇Cr₁₇Cu₈Fe₁₇Ni₃₃ (at. %) High-Entropy Alloy // *JOM*. 2013. Vol. 65. P. 1805–1814.
124. Pradeep K.G., Wanderka N., Choi P., Banhart J., Murty B.S., Raabe D. Atomic-scale compositional characterization of a nanocrystalline AlCrCuFeNiZn high-entropy alloy using atom probe tomography // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. P. 4696–4706.
125. Chen M.-R., Lin S.-J., Yeh J.-W., Chuang M.-H., Lee P.-H., Huang Y.-S. Effect of vanadium addition on the microstructure, hardness, and wear resistance of Al_{0.5}CoCrCuFeNi high-entropy alloy // *Metallurgical and Materials Transactions A-physical Metallurgy and Materials Science – METALL MATER TRANS A*. 2006. Vol. 37. P. 1363–1369.
126. Yeh J.W., Chen Y.L., Lin S.J., Chen S.K. High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation // *Materials Science Forum*. 2007. Vol. 560. P. 1–9.
127. Hsu U.S., Hung U.D., Yeh J.W., Chen S.K., Huang Y.S., Yang C.C. Alloying behavior of iron, gold and silver in AlCoCrCuNi-based equimolar high-entropy alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2007. Vol. 460-461. P. 403–408.
128. Wang X.F., Zhang Y., Qiao Y., Chen G.L. Novel microstructure and properties of multi-component CoCrCuFeNiTi_x alloys // *Intermetallics*. 2007. Vol. 15. P. 357–362.
129. Tung C.-C., Yeh J.-W., Shun T., Chen S.-K., Huang Y.-S., Chen H.-C. On the elemental effect of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy system // *Materials Letters*. 2007. Vol. 61. P. 1–5.
130. Wang Y.P., Li B.S., Ren M.X., Yang C., Fu H.Z. Microstructure and compressive properties of AlCrFeCoNi high entropy alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2008. Vol. 491. P. 154–158.
131. Chen M.-R., Lin S.-J., Yeh J.-W., Chen S.-K., Huang Y.-S., Tu C.-P. Microstructure and Properties of Al_{0.5}CoCrCuFeNiTi_x (x=0–2.0) High-Entropy Alloys // *Materials Transactions*. 2006. Vol. 47. P. 1395–1401.
132. Wen L.H., Kou H.C., Li J.S., Chang H., Xue X.Y., Zhou L. Effect of aging temperature on microstructure and properties of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy // *Intermetallics*. 2009. Vol. 17. P. 266–269.
133. Strife J., Passoja D. The effect of heat treatment on microstructure and cryogenic fracture properties in 5Ni and 9Ni steel // *Metallurgical Transactions*. 1980. Vol. 11. P. 1341–1350.
134. Ng C., Guo S., Luan J., Shi S., Liu C. Entropy-driven phase stability and slow diffusion kinetics in an Al_{0.5}CoCrCuFeNi high entropy alloy // *Intermetallics*. 2012. Vol. 31. P. 165–172.
135. Jones N.G., Frezza A., Stone H.J. Phase equilibria of an Al_{0.5}CrFeCoNiCu High Entropy Alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 615. P. 214–221.
136. Shun T.-T., Du Y.-C. Age hardening of the Al_{0.3}CoCrFeNiC_{0.1} high entropy alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 478. P. 269–272.
137. Kao Y.-F., Chen T.-J., Chen S.-K., Yeh J.-W. Microstructure and mechanical property of as-cast, -homogenized, and -deformed Al_x-CoCrFeNi (0 ≤ x ≤ 2) high-entropy alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 488. P. 57–64.
138. Tsai C.-W., Chen Y.-L., Tsai M.-H., Yeh J.-W., Shun T.-T., Chen S.-K. Deformation and annealing behaviors of high-entropy alloy Al_{0.5}CoCrCuFeNi // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 486. P. 427–435.
139. Otto F., Dlouhý A., Somsen C., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. P. 5743–5755.
140. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E., George E., Ritchie R. A Fracture-Resistant High-Entropy Alloy for Cryogenic Applications // *Science*. 2014. Vol. 345. P. 1153–1158.
141. Mills W.J. Fracture toughness of type 304 and 316 stainless steels and their welds // *International Materials Reviews*. 1997. Vol. 42. P. 45–82.
142. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys //

- Progress in Materials Science. 2014. Vol. 61. P. 1–93.
143. Cantor B. Multicomponent and High Entropy Alloys // *Entropy*. 2014. Vol. 16. P. 4749–4768.
 144. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 122. P. 448–511.
 145. Zhang W., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // *Science China Earth Science*. 2018. P. 2–22.
 146. Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. ВЭС: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 4. С. 249–258.
 147. Погребняк А.Д., Багдасарян А.А., Якущенко И.В., Береснев В.М. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе // *Успехи химии*. 2014. Т. 83. С. 1027–1061.
 148. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121. С. 807–841.
 149. George E.P., Curtin W.A., Tasan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 188. P. 435–474.
 150. Zaguliaev D., Gromov V., Konovalov S., Ivanov Yu. Electron-Ion-Plasma Modification of a Hypoeutectoid Al-Si Alloy. – Great Britain: Taylor & Francis Group: Home, 2020. – 268 p.
 151. Konovalov S., Zaguliaev D., Ivanov Y., Gromov V., Abaturova A. Modification of Al-10Si-2Cu alloy surface by intensive pulsed electron beam // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9 (3). P. 5591–5598.
 152. Zaguliaev D., Ivanov Yu., Konovalov S., Abaturova A., Gromov V., Rubannikova Yu., Semin A. Effect of electron-plasma treatment on the microstructure of Al-11wt%Si alloy // *Materials Research*. 2020. Vol. 23 (2). Article e20200057.
 153. Zaguliaev D., Konovalov S., Ivanov Y., Abaturova A., Leonov A. Microstructure and Microhardness of Piston Alloy Al-10Si-2Cu Irradiated by Pulsed Electron Beam // *Archives of foundry engineering*. 2020. Vol. 20 (3/2020). P. 92–98.
 154. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Zagulyaev D.V., Petrikova E.A., Konovalov S.V., Teresov A.D., Rygina M.E. Evolution of the structure and properties of AK10M2N silumin under irradiation with a high-intensity pulsed electron beam // *Inorganic Materials*. 2018. Vol. 54. No. 12. P. 1308–1314.
 155. Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Gromov V.E., Glezer A.M., Ivanov Yu.F., Sundeev R.V. Structure and properties changes of Al – Si alloy treated by pulsed electron beam // *Materials Letters*. 2018. Vol. 2209. P. 377–380.
 156. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Konovalov S.V., Zagulyaev D.V., Petrikova E.A. Structural-phase state and the properties of silumin after electron-beam surface treatment // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. Vol. 4. P. 398–402.
 157. Zagulyaev D.V., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F. Increase in wear resistance of the surface layers of AK10M2N silumin at electron-beam treatment // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. Vol. 10 (3). P. 622–628.
 158. Gromov V., Konovalov S., Ivanov Y., Zaguliaev D., Petrikova E., Serenkov Y. Evolution of structure-phase states of hypoeutectic silumin irradiated by intensive pulse electron beams // *Materials Research Express*. 2019. Vol. 6 (7). P. 076574.
 159. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. Москва: Металлургия, 1973. 584 с.
 160. Zaguliaev D., Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V. Effect of electron-plasma alloying on structure and mechanical properties of Al-Si alloy // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 498. Article 143767.
 161. Zagulyaev D.V., Shlyarov V.V., Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Semin A.P., Teresov A.D. Analysis of changes in structure and microhardness of Al – 11Si – 2Cu alloy after complex treatment // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2167. Article 020398.
 162. Zaguliaev D., Gromov V., Rubannikova Yu., Konovalov S., Ivanov Yu., Romanov D., Semin A. Structure and phase states modification of AL – 11SI – 2CU alloy processed by ion-plasma jet and pulsed electron beam // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 383. Article 125246.
 163. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Nanostructurisation of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying and subsequent electron beam processing // *International Journal of Nanotechnology*. 2019. Vol. 16. P. 619–628.
 164. Ivanov Yu., Gromov V., Zaguliaev D., Glezer A., Sundeev R., Rubannikova Y., Semin A. Modification of surface layer of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying followed by electron beam processing // *Materials Letters*. 2019. Vol. 253. P. 55–58.

165. Zaguliaev D., Konovalov S., Ivanov Yu., Gromov V., Petrikova E. Microstructure and mechanical properties of doped and electron-beam treated surface of hypereutectic Al – 11.1 % Si alloy // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8 (5). P. 3835–3842.
 166. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Zaguliaev D.V., Perikova E.A., Teresov A.D., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Structural Phase State of Surface Alloyed Y2O3 Silumin After Electron beam Processing // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2019. Vol. 13 (60). P. 1343–1349.
 167. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A., Petrikova E.A., Rygina M.E. Nanostructure formation of hypoeutectic silumin by electronion-plasma methods // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1393. Article 012091.
 168. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zaguliaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. The Structure and Properties of a Hypoeutectic Silumin Subjected to Complex Electron-Ion-Plasma Processing // *Progress in Physics of Metals*. 2019. Vol. 20 (4). P. 634–671.
- REFERENCES**
1. Gromov V.E., Yur'ev A.A., Morozov K.V. etc. Evolution of fine structure in surface layers of 100-m differentially hardened rails during long-term operation. *Fundamental problems of modern materials science*. 2017, vol. 14, no. 2, pp. 267–273. (In Russ.).
 2. Gromov V.E., Yur'ev A.A., Ivanov Yu.F. etc. Redistribution of carbon atoms in differentially hardened rails during long-term operation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 6, pp. 56–69. (In Russ.).
 3. Yur'ev A.A., Gromov V.E., Morozov K.V. etc. Changing the structure and phase composition of the surface of 100-m differentially hardened rails during long-term operation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 826–831. (In Russ.).
 4. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Yur'ev A.A. etc. The nature of surface hardening of differentially hardened rails during long-term operation. *Deformation and destruction of materials*. 2018, no. 4, pp. 67–85. (In Russ.).
 5. Gromov V.E., Yur'ev A.A., Ivanov Yu.F. etc. Analysis of the mechanisms of deformation hardening of rail steel during long-term operation. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2017, no. 3, pp. 76–84. (In Russ.).
 6. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Yur'ev A.A. etc. Gradients of structure and properties of surface layers of differentially hardened rails after long-term operation. *Fundamental problems of modern materials science*. 2017, vol. 14, no. 3, pp. 297–305. (In Russ.).
 7. Yur'ev A.A., Gromov V.E., Grishunin V.A. etc. Mechanisms of destruction of lamellar perlite of differentially hardened rails during long-term operation. *Fundamental problems of modern materials science*. 2017, vol. 14, no. 4, pp. 438–444. (In Russ.).
 8. Ivanov Yu.F., Yur'ev A.A., Gromov V.E. etc. Transformation of the carbide phase of rails during long-term operation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 2, pp. 140–148. (In Russ.).
 9. Gromov V.E., Yur'ev A.A., Ivanov Yu.F. etc. Evolution of the structure and properties of differentially hardened rails during long-term operation. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*. 2017, vol. 39, no. 12, pp. 1599–1646. (In Russ.).
 10. Gromov V.E., Yur'ev A.A., Ivanov Yu.F. etc. Transformation of the structure of 100-meter differentially hardened rails during long-term operation. *Fundamental problems of modern materials science*. 2018, vol. 15, no. 1, pp. 128–134. (In Russ.).
 11. Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Yuriev A.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Structural phase states and properties of rails after long-term operation. *Materials Letters*. 2020, vol. 268, article 127499.
 12. Kormyshev V.E., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Yur'ev A.A., Polevoi E.V. Structure and properties of differentially hardened 100-m rails after extremely long operation. *Fundamental problems of modern materials science*. 2019, vol. 16, no. 4, pp. 538–546. (In Russ.).
 13. Kormyshev V.E., Polevoi E.V., Yur'ev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Formation of the structure of differentially hardened 100-meter rails during long-term operation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 2, pp. 108–115. (In Russ.).
 14. Kormyshev V.E., Ivanov Yu.F., Yur'ev A.A., Polevoi E.V., Gromov V.E., Glezer A.M. Evolution of structural-phase states and properties of differentially hardened 100-meter rails during extremely long-term operation. Message 1. Structure and properties of rail steel before operation. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2019, no. 4, pp. 50–56. (In Russ.).
 15. Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M. Structure of differentially hardened rails under intense plastic deformation.

- Deformation and destruction of materials*. 2020, no. 8, pp. 16–20. (In Russ.).
16. Kormyshev V.E., Yur'ev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A., Polevoi E.V. Stages of transformation of plate perlite of differentially hardened rails during long-term operation. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2020, no. 2, pp. 51–56. (In Russ.).
 17. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kormyshev V.E., Glezer A.M. Structure and properties of rails after extremely long operation. *Voprosy materialovedeniya*. 2020, no. 2 (102), pp. 30–39. (In Russ.).
 18. Yur'ev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A. *Structure and properties of long-length differentially hardened rails after extremely long operation*. Novokuznetsk: Polygraphist, 2020, 253 p. (In Russ.).
 19. Panin V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yur'ev A.A., Kormyshev V.E. The role of lattice curvature in the degradation of the structure of the surface layer of metal rails during long-term operation. *Doklady RAN. Fizika, tekhnicheskie nauki*. 2020, vol. 494, pp. 68–71. (In Russ.).
 20. Gromov V.E., Kormyshev V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M. Evolution of structural-phase states and properties of differentially hardened 100-meter rails during extremely long operation. Message 2. Structure and properties of the rail head after the missed tonnage of 1411 million tons. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2020, no. 3, pp. 53–61. (In Russ.).
 21. Ivanov Yu.F., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Yur'ev A.A., Glezer A.M., Rubannikova Yu.A. Mechanisms of hardening of metal rails during long-term operation. *Questions of materials science*. 2020, no. 3 (103), pp. 17–28. (In Russ.).
 22. Panin S.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yuriev A.A., Kormyshev V.E. The Role of Lattice Curvature in Structural Degradation of the Metal Surface Layer of a Rail under Long-term Operation. *Doklady Physics*. 2020, vol. 65, no. 10, pp. 394–396.
 23. Kormyshev V.E., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Yuriev A.A., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Formation of Fine Surface of Long Rails on Differentiated Hardening. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2020, vol. 14, no. 6, pp. 1186–1189.
 24. Panin V.E., Ivanov Yu.F., Yur'ev A.A., Gromov V.E., Panin S.V., Kormyshev V.E., Rubannikova Yu.A. Evolution of the fine structure and properties of metal rails during long-term operation. *Physical Mesomechanics*. 2020, vol. 23, no. 5, pp. 85–94. (In Russ.).
 25. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Nikitina E.N., Al-saraeva K.V. Redistribution of carbon in steel with a bainite structure during deformation. *Fundamental problems of modern materials science*. 2015, vol. 12, no. 3, pp. 278–281. (In Russ.).
 26. Gromov V.E., Nikitina E.N., Ivanov Yu.F. Evolution of carbide and defective subsystems of steel with a bainite structure during deformation. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2015, no. 3, pp. 74–80. (In Russ.).
 27. Nikitina E.N., Gromov V.E., Al-saraeva K.V. Evolution of a defective subsystem of structural steel with a bainite structure during deformation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 8, pp. 603–607. (In Russ.).
 28. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Nikitina E.N. Evolution of the carbide subsystem of structural steel with a bainite structure under deformation by single-walled compression. *Fundamental problems of modern materials science*. 2015, vol. 12, no. 2, pp. 227–230. (In Russ.).
 29. Ivanov Yu.F., Nikitina E.N., Gromov V.E. Carbon distribution in bainitic steel subjected to deformation. *AIP Conference Proceedings*. 2015, vol. 1683, article 020075.
 30. Gromov V.E., Nikitina E.N., Ivanov Yu.F., Aksenova K.V., Kornet Yu.F. Deformation hardening of steel with a bainite structure. *Institut metallofiziki NAN Ukrainy. Uspekhi fiziki metallov*. 2015, vol. 16, no. 4, pp. 299–328. (In Russ.).
 31. Gromov V.E., Nikitina E.N., Ivanov Yu.F., Aksenova K.V., Semina O.A. Bainite steel: structure and work hardening. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 87–100.
 32. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Glezer A.M., Nikitina E.N., Aksenova K.V. Localization of plastic deformation at the nanoscale in steel with a bainite structure. *Deformation and destruction of materials*. 2016, no. 8, pp. 18–21. (In Russ.).
 33. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorob'ev S.V., Gorbunov S.V., Konovalov S.V. Modification of structural-phase states of stainless steel surface by electron beam processing. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2010, no. 4, pp. 31–37. (In Russ.).
 34. Gorbunov S.V., Vorob'ev S.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Konovalov S.V. Formation of the gradient structure of the surface layer during electron beam processing of austenitic

- steel. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2011, no. 1, pp. 61–65. (In Russ.).
35. Ivanov Yu.F., Gorbunov S.V., Vorob'ev S.V., Koval' N.N., Konovalov S.V., Gromov V.E. Structure of the surface layer, which is formed in steel 08KH18N10T, treated by high-intensity electron beam, in terms of high cycle fatigue. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2011, vol. 14, no. 1, pp. 75–82. (In Russ.).
 36. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorob'ev S.V., Gorbunov S.V., Konovalov S.V. Structural-phase transformations at multicycle fatigue of stainless steel treated with electron beams. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2011, no. 1, pp. 57–63. (In Russ.).
 37. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Gorbunov S.V., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Gradient structural-phase states formed in steel 08X18N10T with multicycle fatigue before destruction. *Physics of Metals and Metallovedenie*. 2011, vol. 112, no. 1, pp. 85–93. (In Russ.).
 38. Gromov V.E., Gorbunov S.V., Ivanov Yu.F., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Formation of surface gradient structural-phase states during electron-beam processing of stainless steel. *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*. 2011, no. 10, pp. 62–67. (In Russ.).
 39. Ivanov Yu.F., Koval' N.N., Gorbunov S.V., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V., Gromov V.E. Multicycle fatigue of stainless steel treated with a high-intensity electron beam: the structure of the surface layer. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2011, vol. 54, no. 5, pp. 61–69. (In Russ.).
 40. Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Vorob'ev S.V., Gorbunov S.V., Gromov V.E. The influence of current treatment on the formation of gradient structural-phase states in austenitic steel. *Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences*. 2010, vol. 15, no. 3-1, pp. 823–824. (In Russ.).
 41. Ivanov Yu.F., Gorbunov S.V., Gromov V.E., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Formation of the structural-phase state of the surface layer of steel 08X18N10T when treated with a high-intensity electron beam. *Materials Science*. 2011, no. 5, pp. 43–47. (In Russ.).
 42. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Bessonov D.A., Vorob'ev S.V., Teresov A.D., Koval' N.N., Konovalov S.V. Phase composition and defect substructure of steel 20KH13 treated by the electron beam in the mode of surface melting. *Fundamental problems of modern materials science*. 2011, vol. 8, no. 3, pp. 28–33. (In Russ.).
 43. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Vorob'ev S.V., Bessonov D.A., Kolubaeva Yu.A., Konovalov S.V. Structural-phase state of the surface layer formed in steel 20X13 as a result of irradiation with a high-intensity electron beam. *Physical Mesomechanics*. 2011, vol. 14, no. 6, pp. 111–116. (In Russ.).
 44. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Bessonov D.A., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Evolution of the structure and phase composition of 20X13 steel in the process of strengthening electron beam processing and subsequent fatigue loading. *Deformation and destruction of materials*. 2011, no. 12, pp. 19–23. (In Russ.).
 45. Bessonov D.A., Vorob'ev S.V., Ivanov Yu.F. Increasing the fatigue life of steel 20X13 by electron beam processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 10, pp. 48–49. (In Russ.).
 46. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Sizov V.V., Vorob'ev S.V., Sofroshenkov A.F. Increasing the fatigue life of steel 20X23N18 by high-intensity electron beam processing. *Fundamental problems of modern materials science*. 2011, vol. 8, no. 4, pp. 131–36. (In Russ.).
 47. Vorob'ev S.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Bessonov D.A., Koval' N.N., Teresov A.D. Formation of the gradient structure and phase composition of the surface layers of steel 20X13 after irradiation with a high-intensity electron beam. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2012, no. 4, pp. 97–99. (In Russ.).
 48. Bessonov D.A., Vorob'ev S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Tsellermaer V.Ya. Evolution of the grain structure of the surface layer of 20X13 steel subjected to electron beam processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 2, pp. 44–48. (In Russ.).
 49. Sizov V.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Evolution of the grain structure of the surface layer of 20X23H18 steel subjected to electron beam processing and multicycle loading. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 10, pp. 56–60. (In Russ.).
 50. Vorob'ev S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Sizov V.V., Sofroshenkov A.F. Formation of nanocrystalline structure and fatigue durability of stainless steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 4, pp. 51–53. (In Russ.).
 51. Sizov V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Fatigue failure of stainless steel after electron beam processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 6, pp. 35–37. (In Russ.).
 52. Sizov V.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Formation and evolution of the grain structure of stainless steel during electron beam processing and multicycle fatigue. *Fundamental problems of mod-*

- ern materials science*. 2012, no. 2, pp. 136–140. (In Russ.).
53. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Sizov V.V., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Increasing the fatigue life of stainless steel by electron beam processing. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2012, no. 1, pp. 66–75. (In Russ.).
 54. Bessonov D.A., Vorob'ev S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Formation of nanocrystalline structures in stainless steel subjected to electron beam processing and multi-cycle fatigue loading. *Nanoengineering*. 2013, no. 3, pp. 20–24. (In Russ.).
 55. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Sizov V.V., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Increasing the fatigue life of stainless steel by electron beam surface treatment. *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*. 2013, no. 1, pp. 99–104. (In Russ.).
 56. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Sizov V.V., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Structural-scale levels of deformation of steel 20X23H18 subjected to fatigue failure after electron beam processing. *Physical Mesomechanics*. 2013, vol. 16, no. 1, pp. 85–90. (In Russ.).
 57. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Sizov V.V., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Evolution of structure and phase composition of stainless steel 20X23H18 under cyclic deformation. *Materials Science*. 2013, no. 4, pp. 34–39. (In Russ.).
 58. Gromov V.E., Vorob'ev S.V., Sizov V.V., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F. Structural-scale levels of increasing fatigue durability of steels and alloys by electron beam processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 5, pp. 346–351. (In Russ.).
 59. Konovalov S.V., Vorob'ev S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Komissarova I.A., Kobzareva T.Yu. The role of electron beam processing in changing the structure and phase composition of steels and alloys subjected to multicycle fatigue tests. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2015, no. 4, pp. 92–97. (In Russ.).
 60. Vorob'ev S.V. Increasing the fatigue life of steels of various structural classes by electron beam processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 4, pp. 260–262. (In Russ.).
 61. Vorob'ev S.V., Glezer A.M., Bessonov D.A., Konovalov S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Regularities of the influence of electron beam processing on the phase composition and defective substructure of 20X13 steel at fatigue. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2016, no. 3, pp. 68–73. (In Russ.).
 62. Konovalov S.V., Vorob'ev S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Komissarova I.A., Kobzareva T.Yu. The role of electron beam processing in changing the structure and phase composition of steels and alloys subjected to multicycle fatigue tests. *Problems of ferrous metallurgy and Materials Science*. 2015, no. 4, pp. 92–97. (In Russ.).
 63. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Kosinov D.A. etc. Structure of a titanium alloy modified by electron beams and destroyed by fatigue. *Letters about materials*. 2017, vol. 7, no. 3 (27), pp. 266–271. (In Russ.).
 64. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Chen' C. etc. Investigation of a titanium alloy subjected to electron-beam processing leading to an increase in fatigue life. *Fundamental problems of modern materials science*. 2018, vol. 15, no. 1, pp. 109–113. (In Russ.).
 65. Komissarova I.A., Kosinov D.A., Konovalov S.V. etc. Changes in the structure of titanium alloy VT1-0 under high cycle fatigue subjected to current impulse action. *Polzunovskii vestnik*. 2018, no. 3, pp. 139–143. (In Russ.).
 66. Komissarova I.A., Konovalov S.V., Kosinov D.A. Influence of current pulse action on the structure of a titanium alloy at multicycle fatigue. *Fundamental problems of modern materials science*. 2018, vol. 15, no. 3, pp. 409–415. (In Russ.).
 67. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Glezer A.M., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Chen' S. The effect of electron beam processing on the structure of technically pure titanium subjected to fatigue failure. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2019, no. 9, pp. 42–48. (In Russ.).
 68. Romanov D.A., Zhmakin Yu.D., Budovskikh E.A. etc. Formation of electrocontact surface layers of the W – C – Cu system with the use of an upgraded electric explosive installation EVU 60/10M. *Fundamental problems of modern materials science*. 2011, vol. 8, no. 2, pp. 19–23. (In Russ.).
 69. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Zhmakin Yu.D., Gromov V.E. Experience and prospects of using an electric explosive installation EVU 60/10 for modifying the surface of materials. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 6, pp. 20–24. (In Russ.).
 70. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Surface relief and structure of electro-explosive composite surface layers of the molybdenum-copper system. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 2011, no. 11, pp. 95–100. (In Russ.).
 71. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Surface relief and structure of composite surface layers of W–Cu and Mo–Cu systems

- formed by electroexplosive method. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2011, no. 5, pp. 51–55. (In Russ.).
72. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Surface relief and structure of pseudo-alloy coatings of the molybdenum-copper system formed by electroexplosive method. *Hardening technologies and coatings. Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2011, no. 10, pp. 19–21. (In Russ.).
 73. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Ionina A.V., Gromov V.E. Electroexplosive spraying of electroerosion-resistant coatings of Ti – B – Cu system. *Fundamental problems of modern materials science*. 2011, vol. 8, no. 4, pp. 60–64. (In Russ.).
 74. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. etc. Structure and phase composition of electroerosion-resistant coatings of the TiB₂ – Cu system formed by the method of electroexplosive spraying. *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*. 2012, no. 3, pp. 87–91. (In Russ.).
 75. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Surface relief and structure of electroexplosive composite surface layers of the titanium-boron-copper system. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2012, no. 9, pp. 30–33. (In Russ.).
 76. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Electrocontact coatings of the Mo–C–Cu system obtained by electroexplosive spraying. *Perspektivnye materialy*. 2012, no. 6, pp. 75–78. (In Russ.).
 77. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Formation of structure, phase composition and properties of electroerosion-resistant coatings obtained by the method of electroexplosive spraying. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2013, no. 1, pp. 36–43. (In Russ.).
 78. Romanov D.A., Olesyuk O.A., Budovskikh E.A. etc. Structure and properties of electroerosion-resistant coatings formed by the method of electroexplosive spraying. *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*. 2013, no. 1, pp. 53–57. (In Russ.).
 79. Budovskikh E.A., Gromov V.E., Romanov D.A. Mechanism of formation of high adhesion of electroexplosive coatings with a metal base. *Doklady akademii nauk*. 2013, vol. 449, no. 1, pp. 25–27. (In Russ.).
 80. Olesyuk O.V., Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. The structure of wear-resistant coatings of TiB₂–Al and TiC–Mo systems obtained by electroexplosive spraying. *Fundamental problems of modern materials science*. 2013, vol. 10, no. 3, pp. 417–423. (In Russ.).
 81. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Features of the structure and properties of electroerosion-resistant coatings formed by the method of electroexplosive spraying. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2014, no. 2, pp. 58–62. (In Russ.).
 82. Romanov D.A., Olesyuk O.V., Budovskikh E.A. etc. Structure and phase composition of wear-resistant coatings of the TiB₂ – Al system obtained by electroexplosive spraying. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2014, no. 3, pp. 60–65. (In Russ.).
 83. Panin V.E., Gromov V.E., Romanov D.A. etc. Physical bases of structure formation in electroexplosive coatings. *Doklady akademii nauk*. 2017, vol. 472, no. 6, pp. 650–653. (In Russ.).
 84. Romanov D.A., Olesyuk O.V., Budovskikh E.A. etc. The structure of electro-explosive composite coatings from immiscible components of the Cu – Mo system after electron beam processing. *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*. 2014, no. 1, pp. 54–60. (In Russ.).
 85. Romanov D.A., Olesyuk O.V., Kononov S.V. etc. Structure of composite coatings of the W–C–Cu system obtained by electroexplosive spraying and subsequent electron beam processing. *Perspektivnye materialy*. 2014, no. 4, pp. 64–69. (In Russ.).
 86. Romanov D.A., Olesyuk O.V., Budovskikh E.A. etc. The structure of composite coatings made of immiscible components of the Cu – Mo system obtained by electroexplosive spraying and subsequent electron beam processing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2014, no. 1, pp. 7–10. (In Russ.).
 87. Romanov D.A., Olesyuk O.V., Budovskikh E.A. etc. Structure of electroexplosive composite coatings of the TiB₂ – Cu system after electron beam processing. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2015, no. 1, pp. 73–78. (In Russ.).
 88. Romanov D.A., Olesyuk O.V., Budovskikh E.A. etc. Structural and phase states and tribological properties of electroexplosive composite coatings on copper after electron beam processing. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 2015, no. 7, pp. 50–56. (In Russ.).
 89. Olesyuk O.V., Kononov S.V., Romanov D.A. Influence of electron beam processing on tribological properties of electroexplosive electroerosion-resistant coatings. *Modern problems of science and education*. 2014, no. 2. [El-

- ektronnyi resurs]. URL: <http://www.scienceeducation.ru/116-12659>. (Data obrashcheniya: 01.02.2022). (In Russ.).
90. Romanov D.A., Goncharova E.N., Budovskikh E.A. etc. Structural-phase state of the Si – Cr electroerosive coating formed on copper by the combined method. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2016, no. 7, pp. 25–29. (In Russ.).
 91. Romanov D.A., Goncharova E.N., Gromov V.E. etc. Elemental and phase analysis of the coating TiB₂ – Mo and TiB₂ – Ni formed on steel by the electroexplosive method after electron beam processing. *Fundamental problems of modern materials science*. 2015, vol. 12, no. 1, pp. 118–125. (In Russ.).
 92. Romanov D.A., Goncharova E.N., Budovskikh E.A. etc. The structure of electro-explosive composite coatings of the TiB₂ – Ni system. *Perspective materials*. 2015, no. 5, pp. 69–77. (In Russ.).
 93. Romanov D.A., Protopopov E.V., Bataev V.A. etc. Analysis of the structure and properties of electroexplosive coatings of the TiC – Ni system on stamped steel after electron beam processing. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017, no. 4 (42), pp. 108–118. (In Russ.).
 94. Romanov D.A., Protopopov E.V. Structure, phase composition and properties of electroexplosive wear-resistant coatings after electron beam processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 12, pp. 972 – 979. (In Russ.).
 95. Romanov D.A., Goncharova E.N., Budovskikh E.A. etc. Elemental and phase analysis of the TiB₂ – Mo coating formed on steel by the electro-explosive method. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2016, no. 1, pp. 47–52. (In Russ.).
 96. Romanov D.A., Goncharova E.N., Budovskikh E.A. etc. Structural-phase composition and properties of the TiC – Ni electroerosive coating formed on medium-carbon steel by the combined method. *Perspective Materials*. 2016, no. 10, pp. 62–68. (In Russ.).
 97. Romanov D.A., Goncharova E.N., Budovskikh E.A. etc. Analysis of the structure of electro-explosive composite coatings of the TiC – Ni system on steel after electron beam processing. *Metals*. 2016, no. 6, pp. 69–77. (In Russ.).
 98. Molotkov S.G., Romanov D.A., Budovskikh E.A., Sofroshenkov A.F. Analysis of the features of the formation of the structure of electro-explosive coatings on the border with the base. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 2, pp. 69–70. (In Russ.).
 99. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Formation of globular features of the structure of electroexplosive coatings. *Fundamental problems of modern materials science*. 2016, vol. 13, no. 3, pp. 355–357. (In Russ.).
 100. Romanov D.A., Molotkov S.G., Stepikov M.A., Gromov V.E. Calculation of the temperature field taking into account the heat of chemical reactions during electroexplosive nickel plating. *Fundamental problems of modern materials science*. 2017, vol. 14, no. 1, pp. 100–107. (In Russ.).
 101. Romanov D.A., Molotkov S.G., Kolmakova T.V. etc. Modeling of Richtmayer-Meshkov instability of the coating-substrate interface during electroexplosive nickel plating of aluminum. *Fundamental problems of modern materials science*. 2017, vol. 14, no. 2, pp. 189–192. (In Russ.).
 102. Romanov D.A., Protopopov E.V. Model of electroerosive destruction of composite electroexplosive coatings in conditions of spark erosion. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 2, pp. 143–147. (In Russ.).
 103. Romanov D.A., Moskovskii S.V., Gromov V.E., Sosnin K.V. Electroexplosive electroerosion-resistant coatings of the Ag–W system for electrical contacts of power mine equipment. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2018, no. 4, pp. 265–269. (In Russ.).
 104. Tong C.-J., Chen Y.-L., Yeh J.-W., Lin S.-J., Lee P.-H., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Microstructure characterization of Alx-CoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005, vol. 36, pp. 881–893.
 105. Chen Y.Y., Duval T., Hung U.D., Yeh J.W., Shih H.C. Microstructure and electrochemical properties of high entropy alloys – a comparison with type-304 stainless steel. *Corrosion Science*. 2005, vol. 47, pp. 2257–2279.
 106. Li A., Zhang X. Thermodynamic analysis of the simple microstructure of AlCrFeNiCu high-entropy alloy with multi-principal elements. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2009, vol. 22, pp. 219–224.
 107. Tsai C.-W., Tsai M.-H., Yeh J.-W., Yang C.-C. Effect of temperature on mechanical properties of Al_{0.5}CoCrCuFeNi wrought alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010, vol. 490, pp. 160–165.
 108. Braic M., Braic V., Balaceanu M., Zoita C.N., Vladescu A., Grigore E. Characteristics of (TiAlCrNbY)C films deposited by reactive

- magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*. 2010, vol. 204, pp. 2010–2014.
109. Huang P.-K., Yeh J.-W. Effects of nitrogen content on structure and mechanical properties of multi-element (AlCrNbSiTiV)N coating. *Surface and Coatings Technology*. 2009, vol. 203, pp. 1891–1896.
 110. Hu Z., Zhan Y., Zhang G., She J., Li C. Effect of rare earth Y addition on the microstructure and mechanical properties of high entropy AlCoCrCuNiTi alloys. *Materials & Design*. 2010, vol. 31, pp. 1599–1602.
 111. Lin M.-I., Tsai M.-H., Shen W.-J., Yeh J.-W. Evolution of structure and properties of multi-component (AlCrTaTiZr)O_x films. *Thin Solid Films*. 2010, vol. 518, pp. 2732–2737.
 112. Dolique V., Thomann A.-L., Brault P., Tessier Y., & Gillon P. Thermal stability of AlCoCrCuFeNi high entropy alloy thin films studied by in-situ XRD analysis. *Surface and Coatings Technology*. 2010, vol. 204, pp. 1989–1992.
 113. Zhang K.B., Fu Z.Y., Zhang J.Y., Shi J., Wang W.M., Wang H., Wang Y.C., Zhang Q.J. Annealing on the structure and properties evolution of the CoCrFeNiCuAl high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010, vol. 502, pp. 295–299.
 114. Singh S., Wanderka N., Murty B.S., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2011, vol. 59, pp. 182–190.
 115. Chuang M.-H., Tsai M.-H., Wang W.-R., Lin S.-J., Yeh J.-W. Microstructure and wear behavior of Al_xCo_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_y high-entropy alloys. *Acta Materialia*. 2011, vol. 59, pp. 6308–6317.
 116. Hsu Y.-J., Chiang W.-C., Wu J.-K. Corrosion behavior of FeCoNiCrCu_x high-entropy alloys in 3.5 % sodium chloride solution. *Materials Chemistry and Physics*. 2005, vol. 92, pp. 112–117.
 117. Lin C.-M., Tsai H.-L. Evolution of microstructure, hardness, and corrosion properties of high-entropy Al_{0.5}CoCrFeNi alloy. *Intermetallics*. 2011, vol. 19, pp. 288–294.
 118. Liu L., Zhu J.B., Zhang C., Li J.C., Jiang Q. Microstructure and the properties of FeCoCuNiSn_x high entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2012, vol. 548, pp. 64–68.
 119. Manzoni A., Daoud H., Völkl R., Glatzel U., Wanderka N. Phase separation in equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Ultramicroscopy*. 2013, vol. 132, pp. 212–215.
 120. Li B., Peng K., Hu A., Zhou L., Zhu J., Li D. Structure and properties of FeCoNiCrCu_{0.5}Al_x high-entropy alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013, vol. 23, pp. 735–741.
 121. Qiu X.-W. Microstructure and properties of AlCrFeNiCoCu high entropy alloy prepared by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013, vol. 555, pp. 246–249.
 122. Tariq N.H., Naeem M., Hasan B.A., Akhter J.I., Siddique M. Effect of W and Zr on structural, thermal and magnetic properties of AlCoCrCuFeNi high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013, vol. 556, pp. 79–85.
 123. Daoud H.M., Manzoni A., Völkl R., Wanderka N., Glatzel U. Microstructure and Tensile Behavior of Al₈Co₁₇Cr₁₇Cu₈Fe₁₇Ni₃₃ (at. %) High-Entropy Alloy. *JOM*. 2013, vol. 65, pp. 1805–1814.
 124. Pradeep K.G., Wanderka N., Choi P., Banhart J., Murty B.S., Raabe D. Atomic-scale compositional characterization of a nanocrystalline AlCrCuFeNiZn high-entropy alloy using atom probe tomography. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, pp. 4696–4706.
 125. Chen M.-R., Lin S.-J., Yeh J.-W., Chuang M.-H., Lee P.-H., Huang Y.-S. Effect of vanadium addition on the microstructure, hardness, and wear resistance of Al_{0.5}CoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A-physical Metallurgy and Materials Science – METALL MATER TRANS A*. 2006, vol. 37, pp. 1363–1369.
 126. Yeh J.W., Chen Y.L., Lin S.J., Chen S.K. High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation. *Materials Science Forum*. 2007, vol. 560, pp. 1–9.
 127. Hsu U.S., Hung U.D., Yeh J.W., Chen S.K., Huang Y.S., Yang C.C. Alloying behavior of iron, gold and silver in AlCoCrCuNi-based equimolar high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2007, vol. 460–461, pp. 403–408.
 128. Wang X.F., Zhang Y., Qiao Y., Chen G.L. Novel microstructure and properties of multi-component CoCrCuFeNiTi_x alloys. *Intermetallics*. 2007, vol. 15, pp. 357–362.
 129. Tung C.-C., Yeh J.-W., Shun T., Chen S.-K., Huang Y.-S., Chen H.-C. On the elemental effect of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy system. *Materials Letters*. 2007, vol. 61, pp. 1–5.
 130. Wang Y.P., Li B.S., Ren M.X., Yang C., Fu H.Z. Microstructure and compressive properties of AlCrFeCoNi high entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2008, vol. 491, pp. 154–158.
 131. Chen M.-R., Lin S.-J., Yeh J.-W., Chen S.-K., Huang Y.-S., Tu C.-P. Microstructure and

- Properties of Al_{0.5}CoCrCuFeNiTi_x ($x = 0 - 2.0$) High-Entropy Alloys. *Materials Transactions*. 2006, vol. 47, pp. 1395–1401.
132. Wen L.H., Kou H.C., Li J.S., Chang H., Xue X.Y., Zhou L. Effect of aging temperature on microstructure and properties of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Intermetallics*. 2009, vol. 17, pp. 266–269.
 133. Strife J., Passoja D. The effect of heat treatment on microstructure and cryogenic fracture properties in 5Ni and 9Ni steel. *Metallurgical Transactions*. 1980, vol. 11, pp. 1341–1350.
 134. Ng C., Guo S., Luan J., Shi S., Liu C. Entropy-driven phase stability and slow diffusion kinetics in an Al_{0.5}CoCrCuFeNi high entropy alloy. *Intermetallics*. 2012, vol. 31, pp. 165–172.
 135. Jones N.G., Frezza A., Stone H.J. Phase equilibria of an Al_{0.5}CrFeCoNiCu High Entropy Alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2014, vol. 615, pp. 214–221.
 136. Shun T.-T., Du Y.-C. Age hardening of the Al_{0.3}CoCrFeNi_{0.1} high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009, vol. 478, pp. 269–272.
 137. Kao Y.-F., Chen T.-J., Chen S.-K., Yeh J.-W. Microstructure and mechanical property of as-cast, -homogenized, and -deformed Al_xCoCrFeNi ($0 \leq x \leq 2$) high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009, vol. 488, pp. 57–64.
 138. Tsai C.-W., Chen Y.-L., Tsai M.-H., Yeh J.-W., Shun T.-T., Chen S.-K. Deformation and annealing behaviors of high-entropy alloy Al_{0.5}CoCrCuFeNi. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009, vol. 486, pp. 427–435.
 139. Otto F., Dlouhý A., Somsen C., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, pp. 5743–5755.
 140. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E., George E., Ritchie R. A Fracture-Resistant High-Entropy Alloy for Cryogenic Applications. *Science*. 2014, vol. 345, pp. 1153–1158.
 141. Mills W.J. Fracture toughness of type 304 and 316 stainless steels and their welds. *International Materials Reviews*. 1997, vol. 42, pp. 45–82.
 142. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014, vol. 61, pp. 1–93.
 143. Cantor B. Multicomponent and High Entropy Alloys. *Entropy*. 2014, vol. 16, pp. 4749–4768.
 144. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017, vol. 122, pp. 448–511.
 145. Zhang W., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Earth Science*. 2018, pp. 2–22.
 146. Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High entropy alloy: structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 249–258. (In Russ.).
 147. Pogrebnyak A.D., Bagdasaryan A.A., Yakushchenko I.V., Beresnev V.M. Structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them. *Advances in Chemistry*. 2014, vol. 83, pp. 1027–1061. (In Russ.).
 148. Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high-entropy alloys. *Physics of metals and metal science*. 2020, vol. 121, pp. 807–841. (In Russ.).
 149. George E.P., Curtin W.A., Tasan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*. 2020, vol. 188, pp. 435–474.
 150. Zaguliaev D., Gromov V., Konovalov S., Ivanov Yu. Electron-Ion-Plasma Modification of a Hypoeutectoid Al–Si Alloy. *Great Britain: Taylor & Francis Group: Home*, 2020, 268 p.
 151. Konovalov S., Zaguliaev D., Ivanov Y., Gromov V., Abaturova A. Modification of Al-10Si-2Cu alloy surface by intensive pulsed electron beam. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, vol. 9 (3), pp. 5591–5598.
 152. Zaguliaev D., Ivanov Yu., Konovalov S., Abaturova A., Gromov V., Rubannikova Yu., Semin A. Effect of electron-plasma treatment on the microstructure of Al – 11 wt % Si alloy. *Materials Research*. 2020, vol. 23 (2), article 20200057.
 153. Zaguliaev D., Konovalov S., Ivanov Y., Abaturova A., Leonov A. Microstructure and Microhardness of Piston Alloy Al-10Si-2Cu Irradiated by Pulsed Electron Beam. *Archives of foundry engineering*. 2020, vol. 20 (3/2020), pp. 92–98.
 154. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Zagulyaev D.V., Petrikova E.A., Konovalov S.V., Teresov A.D., Rygina M.E. Evolution of the structure and properties of AK10M2N silumin under irradiation with a high-intensity pulsed electron beam. *Inorganic Materials*. 2018, vol. 54, no. 12, pp. 1308–1314.
 155. Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Gromov V.E., Glezer A.M., Ivanov Yu.F., Sundeev

- R.V. Structure and properties changes of Al–Si alloy treated by pulsed electron beam. *Materials Letters*. 2018, vol. 2209, pp. 377–380.
156. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Konovalov S.V., Zagulyaev D.V., Petrikova E.A. Structural-phase state and the properties of silumin after electron-beam surface treatment. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019, vol. 4, pp. 398–402.
 157. Zagulyaev D.V., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F. Increase in wear resistance of the surface layers of AK10M2N silumin at electron-beam treatment. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019, vol. 10 (3), pp. 622–628.
 158. Gromov V., Konovalov S., Ivanov Y., Zagulyaev D., Petrikova E., Serenkov Y. Evolution of structure-phase states of hypoeutectic silumin irradiated by intensive pulse electron beams. *Materials Research Express*. 2019, vol. 6 (7), pp. 076574.
 159. Utevsky L.M. *Diffraction electron microscopy in metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 584 p. (In Russ.).
 160. Zagulyaev D., Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V. Effect of electron-plasma alloying on structure and mechanical properties of Al–Si alloy. *Applied Surface Science*. 2019, vol. 498, article 143767.
 161. Zagulyaev D.V., Shlyarov V.V., Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Semin A.P., Teresov A.D. Analysis of changes in structure and microhardness of Al–11Si–2Cu alloy after complex treatment. *AIP Conference Proceedings*. 2019, vol. 2167, article 020398.
 162. Zagulyaev D., Gromov V., Rubannikova Yu., Konovalov S., Ivanov Yu., Romanov D., Semin A. Structure and phase states modification of AL – 11SI – 2CU alloy processed by ion-plasma jet and pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2020, vol. 383, article 125246.
 163. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Nanostructurisation of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying and subsequent electron beam processing. *International Journal of Nanotechnology*. 2019, vol. 16, pp. 619–628.
 164. Ivanov Yu., Gromov V., Zagulyaev D., Glezer A., Sundeev R., Rubannikova Y., Semin A. Modification of surface layer of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying followed by electron beam processing. *Materials Letters*. 2019, vol. 253, pp. 55–58.
 165. Zagulyaev D., Konovalov S., Ivanov Yu., Gromov V., Petrikova E. Microstructure and mechanical properties of doped and electron-beam treated surface of hypereutectic Al–11.1 % Si alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, vol. 8 (5), pp. 3835–3842.
 166. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Zagulyaev D.V., Perikova E.A., Teresov A.D., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Structural Phase State of Surface Alloyed Y₂O₃ Silumin After Electron beam Processing. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2019, vol. 13 (60), pp. 1343–1349.
 167. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A., Petrikova E.A., Rygina M.E. Nanostructure formation of hypoeutectic silumin by electronion-plasma methods. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1393, article 012091.
 168. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. The Structure and Properties of a Hypoeutectic Silumin Subjected to Complex Electron-Ion-Plasma Processing. *Progress in Physics of Metals*. 2019, vol. 20 (4), pp. 634–671.

Сведения об авторах

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: gromov@physics.sibsui.ru

Юлия Андреевна Шлярова, аспирантка кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Российская Федерация
ORCID: 0000-0001-5677-1427
Email: rubannikova96@mail.ru

Information about the authors

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-5147-5343
Email: gromov@physics.sibsui.ru

Yuliya A. Shlyarova, postgraduate student of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-5677-1427
Email: rubannikova96@mail.ru

© 2022 г. В.Е. Громов, Ю.А. Шлярова
 Поступила в редакцию 12.01.2022 г.

УДК 517.9:539.4:537.29

THE MOST MEMORIAL MOMENTS OF MY SCIENTIFIC CONTACTS WITH PROFESSOR V. GROMOV FROM SIBERIAN STATE UNIVERSITY OF INDUSTRY (RUSSIA)

Guoyi Tang

Tsinghua University, P.R. China

I am Professor Guoyi Tang, who has been working as the executive director of the Institute of Advance Materials at the Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, P.R. China between 2003 to 2018. As early as 1996, when I started to engage in the studies on the electro-plastic processing technology for metals in China, I have been already aware of the outstanding research results in the relevant fields from Russia. During the academic visit to North Carolina State University in the United States from 2001 to 2003, I carried out a research work in collaboration with Professor H. Conard, who is a world-famous leader in the electro-plastic research field. Meanwhile, for the first time Prof. H. Conard introduced me to meet Prof. Trosiky and Prof. Victor Gromov, who are outstanding professors in the field of electro-plastic research in Russia.

In 2003 I was assigned as the executive director of Advanced Materials Institute at the Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University right after my return in China. Then I established the first electro-plastic processing technology research center in Shenzhen. By focusing on engineering problems, various advanced processing technologies for difficult-to-process metals based on the electro-plastic effect were successfully developed in this center.

These include electro-plastic drawing, electro-plastic stamping, electro-plastic rolling, acoustic-electric coupling ultra-precision machining, and etc.

At the same time, more intensive collaborations with Russian scientists such as Professor V. Gromov from Siberian State University of Industry were formed. In May 2007, the two parties organized the China-Russia Metal Electro-plastic research symposium for the first time in Shenzhen, China [1]. A comprehensive collaboration agreement was also assigned with support of the president of Siberian State University of Industry and the head of Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University. Since then the two parties experienced a 15-year close collaboration (Fig. 1, 2). The China-Russia symposium of metal electro-plastic processing technology has been gradually developed into an international conference under the enormous efforts from both parties. To date such conference has been held for ten times in Shenzhen, Beijing, Moscow, Tomsk, Altai, London and Seoul, respectively [2 – 6]. Scientists and scholars from dozens of countries have participated in this event (Fig. 3 – 7). Both Siberian State University of Industry and Tsinghua University were involved in the organization committee of



Fig. 1. The collaboration agreement between Siberian State University of Industry and Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University



Fig. 2. Participants of the first conference, Shenzhen, China



Fig. 3. Moscow, Russia



Fig. 4. Shenzhen, China



Fig. 5. Shenzhen, China



Fig. 6. Shenzhen, China

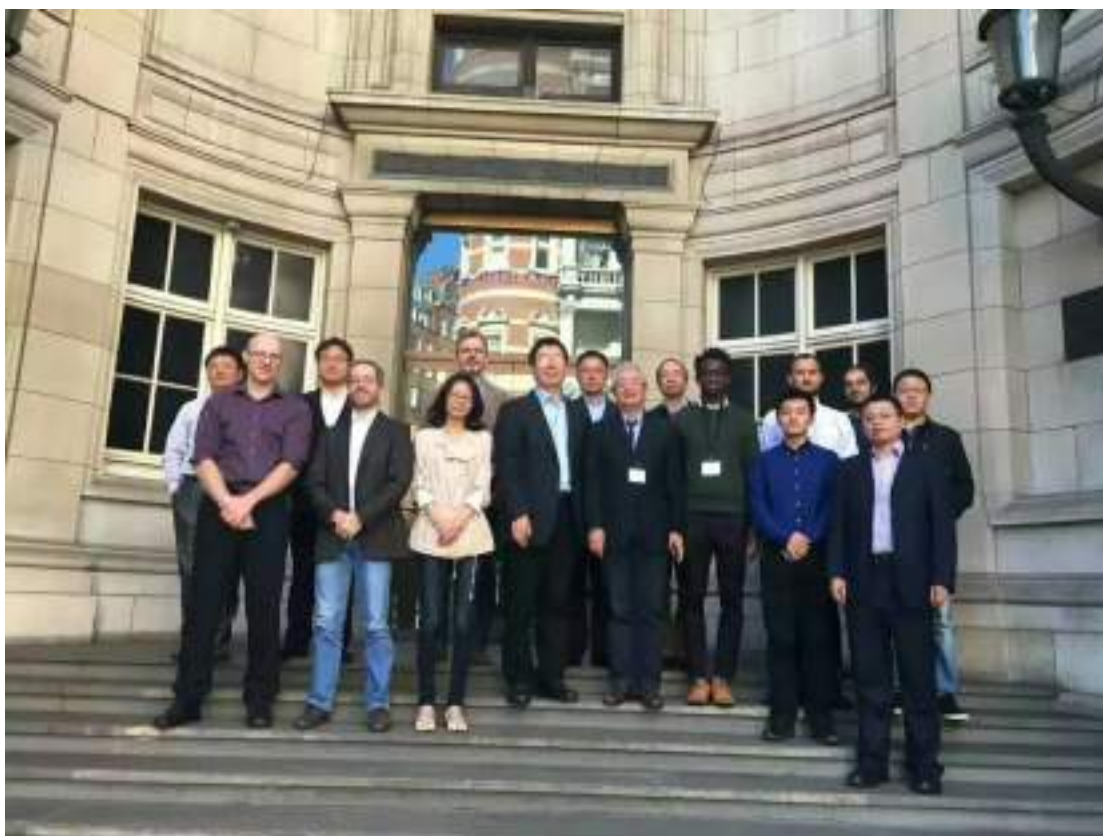


Fig. 7. London, UK

each conference. Moreover, the press house of Siberian State University of Industry has published several special issues for the conference. All these activities have greatly promoted the progress of research on the metal processing under external fields

and the international collaborations within the relevant fields.

Photos the Tsinghua- Siberian State University organization international symposiums (Fig. 2 – 7).

Under the framework of the collaboration agreement between the two parties, the short-term overseas academic visiting program for postgraduate students was also built up and developed. Two PhD candidates (Dr. Roman Filipiev and Dr. Oxana Stolboushkina) from Siberian State University of Industry have entered my laboratory at the Advanced Materials Institute of the Graduate School at

Shenzhen, Tsinghua University (Fig. 8, 9) to carry out our joint research work. By working with Chinese professors, scholars and students during their visit in China, both Russian students not only felt the positive academic atmosphere and ethos of Tsinghua University, but also gained a more comprehensive and in-depth understanding of Chinese history and culture.



Fig. 8. Photos of Dr. Roman Filipiev during his visiting in China





Fig. 9. Photos of Dr. Oxana Stolboushkina during her visiting in China

In the past years, the two parties have been jointly worked on various topics including development of high-energy pulsing generator for electro-plastic

processing, acquisition and analysis of high-energy electrical pulse signals, applications of electro-plastic technology on metal (i.e. Mg, Al and Ti Al-

loy and steels) forming and surface modification, and electric explosive alloying technology. Numbers of co-authored scientific papers were successfully published based on these collaborations. Especially, the international cooperation project of electric explosive alloying technology was funded by the National Foundation of China and Russia. Moreover, years of cooperation experiences between the two parties have brought two individuals enormous collaborative potentials in each other's country, and remarkably promoted the academic exchanges and cooperation between China and Russia.

I am really willing to see more and more strengthened collaborations in wider fields between the two parties being established, and more and more young scholars' exchange visit being promoted in the future. I also deeply believe that both parties will make greater contributions to the friendly exchanges and cooperation between China and Russia in the field of science and technology.

REFERENCES

1. Electroplastic effect in metals (Proceedings of China-Russian Symposium 31th May – 4th June 2007, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, China). Novokuznetsk: SibSIU, 2007. 319 p.
2. Electromagnetic fields effect on the structure and characteristics of materials / Под ред. Ю.В. Баранова, В.Е. Громова, Г. Танга. Новокузнецк: ОАО «Новокузнецкий полиграфкомбинат», 2009. 378 с.
3. Fundamental Aspects of External Fields Action on Materials (Book of the International conference articles, 26-28 May, 2010, Advanced Materials Institute Graduate School at Shenzhen Tsinghua University / V. Gromov ed. Novokuznetsk, «Novokuznetsk Polygraphic Center», 2010. 613 p.
4. Development of advanced materials and processing technology for energy saving applications (Book of the International seminar articles, 9-13 September 2013. Institute of strength physics and materials science SB RAS, Tomsk) / V. Gromov, S. Panin, A. Potekaev, G. Tang ed. Novokuznetsk, SibSIU Publ. Center., 2013. 157 p.
5. External Fields processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metals and alloys: Book of the International seminar articles, 1-7 October 2014 / V. Gromov ed. Novokuznetsk: Publishing Center SibSIU, 2014. 348 p.
6. Effect of external influences on the strength and plasticity of metals and alloys: Book of the International seminar articles, 15-20 September 2015 / M.D. Starostenkov, I.I. Polzunov ed. Barnaul: AltSTU Publ., 2015. 187 p.

© 2022 г. *Guoyi Tang*

Поступила в редакцию 12.01.2022 г.

ДВА ПРАВИЛА ПРОФЕССОРА ГРОМОВА

Т. А. Негода

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

Научная деятельность Виктора Евгеньевича Громова, профессора, заведующего кафедрой естественнонаучных дисциплин имени В.М. Финкеля началась 50 лет назад. Он с отличием окончил технологический факультет Сибирского металлургического института (сегодня – СибГИУ). Должность по окончании института досталась не самая высокая – работал старшим лаборантом на кафедре физики СМИ. На старых профессорских фотографиях В.Е. Громов сосредоточенный, серьезный. Виктор Евгеньевич и сейчас не потерял того юношеского рвения, той любви к науке, которая и рождает открытия. Лаборатории, с которых начинается любая дорога в науку, и сейчас излюбленное место пребывания Виктора Евгеньевича Громова. Он ездит, узнает, удивляется, пишет, воспитывает новое поколение ученых, радуется их успехам, подталкивает к изучению. О чем он мечтал в это время? Что думал? Об этом Виктор Евгеньевич любит говорить так: «Ты должен быть тем, кем хочешь казаться (*esto, quod esse videris*)». Пожалуй, это первое правило Громова.

В 1978 г. Виктор Евгеньевич защитил кандидатскую диссертацию по теме «Подвижность дислокаций в щелочно-галоидных кристаллах в электрическом поле». Это было время «развитого социализма» – «все во имя человека, все на благо человека». Надо сказать, что молодых ученых СССР охотно поддерживал. Понемногу, но стабильно. Работалось над диссертацией довольно сложно, во-первых, не хватало времени подольше посидеть в библиотеке, задержаться в лаборатории. Работу В.Е. Громов выполнял в полном объеме. Во-вторых, в библиотеке не всякую книгу можно было «добыть» сразу, говорили, «на руках», «ждите».

Виктор Евгеньевич относился к научной работе основательно, изучал кропотливо, даже с пристрастием, предмет и фактуру, сравнивал, экспериментировал, иногда надеялся на чудо, но всегда его тщательно «готовил». Поэтому чудеса случались закономерно. Первая в его жизни защита прошла блестяще! Оставаясь на своем месте, Виктор Евгеньевич, тем не менее, двигался вперед. Подталкивали азарт и молодое любопытство. Увлекательное это дело –

наука! Она рождается из гипотезы, взрослеет экспериментами, а живет и здравствует в опыте, формулах, в продукте, в конечном счете. А главное – остается в биографии, погружая жизнь в парадигму осмысленности.

С 1989 по 1992 г. Виктор Евгеньевич становится докторантом Государственного научного центра «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН». Три года плотной учебы, больших надежд и черновой работы. В 1992 г. Виктор Громов защищает докторскую диссертацию на тему «Закономерности электростимулированной пластичности металлов и сплавов». В металлургии – самая горячая тема!

Биографии наших ученых похожи друг на друга: начинал с малого, осваивал высоты, защищался, шел по кадровой лестнице вверх, любил науку. Работая в вузе, Виктор Евгеньевич Громов также прошел все ступени преподавательской квалификации: ассистент, старший преподаватель, доцент, профессор. Всего четыре слова и вся жизнь, в них квинтэссенция опыта.

В 1993 г. В.Е. Громов избран заведующим кафедрой физики, которую он возглавляет по настоящее время. Виктор Евгеньевичем была проведена большая организаторская работа по созданию методической, учебно-материальной базы и по набору высококвалифицированного профессорско-преподавательского состава кафедры. Его организаторский талант, глубокое понимание стоящих перед вузовской наукой проблем позволили в предельно короткий срок сформировать творчески работающий научный коллектив, объединяющий сотрудников ряда кафедр университета, аспирантов, стажеров и специалистов-производственников предприятия Новокузнецка и Томска.

Нужно было в тот «славный» период безденежья и полураспада многих наработанных связей все же соединить в конгломератный узел интересы науки, людей и кафедры. Ему досталась нелегкая доля дирижировать этим разноголосым оркестром и в итоге получить красивую общую песню. О чем была она? О научной школе, конечно!

Научная школа «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетиче-

ских воздействий», возглавляемая д.ф.-м.н., профессором В.Е. Громовым, была и остается хорошо известной в России и за рубежом. Профессор Виктор Евгеньевич Громов поддерживает дружбу с зарубежными коллегами, понимая важность обмена опытом. При этом, Виктор Громов в душе остается таким же азартным юношей, который много лет назад переступил порог СМИ. Пожалуй второе правило Громова – «Работать и не уставать». Несмотря на непроходящие трудности, которых на исследовательском пути всегда немало.

Под его руководством в последние годы экспериментальные исследования проводились, главным образом, по таким научным направлениям, как фундаментальные (физические механизмы прочности и пластичности металлов, сталей и сплавов при внешних электромагнитных воздействиях), а также прикладные (физическое материаловедение в современных технологиях обработки металлов давлением), методические (аппаратурное и методическое обеспечение фундаментальных и прикладных исследований).

Исследования в области физики прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий (электрические поля и токи, слабые электрические потенциалы, электровзрывное легирование, электронно-пучковая обработка), выполненные в последние 30 лет В.Е. Громовым и его учениками, получили широкую известность и признание в научных кругах и привели к созданию нового научного направления.

Работы в направлении физики металлов выполнялись и выполняются по планам, которые формировались не только в стенах кафедры и факультета, но и в Академии Наук СССР, с помощью грантов Госкомвуза и Министерства науки и высшего образования по фундаментальным проблемам металлургии и программой «Интеграция» и другими государственными стратегическими программами. Великолепная осведомленность и информированность профессора В.Е. Громова в этой части помогали с блеском выполнять самые актуальные научно-исследовательские работы, которые венчались неизменным успехом.

Полученные результаты работы кафедры нашли применение на предприятиях металлургической промышленности, машиностроения (ОАО «КМК», АО «ЗСМК», ОАО «КМЗ») и других при разработке соответствующих электротехнологий. И как обычно бывает, когда работа сделана ученым с большой буквы, результаты получают широкую известность как в России, так и за рубежом. Они внедрены со

значительным экономическим эффектом на предприятиях Кузбасса.

Результатом многолетней активной исследовательской деятельности В.Е. Громова стала научная школа, в которой его ученики развивают начатое учителем. Виктор Евгеньевич, интенсивно работая в научной школе, активно осуществляет воспитание и подготовку научных кадров (42 кандидата наук и 10 докторов наук). Понимая, что наука без практики «вещь в себе», он проводит большую организаторскую работу по привлечению ведущих производственников к подготовке диссертаций, неумолимо оказывая им консультационную помощь.

В последние годы исследовательские усилия междисциплинарного коллектива (кафедр физики, механики, материаловедения, математики) во главе с профессором В.Е. Громовым, сосредоточены на решении проблем разработки физических принципов новейших технологий обработки металлов.

Решены такие задачи, которым оценку дает уже сегодняшнее время: результаты научных исследований В.Е. Громова представлены научной общественности в виде докладов на Международных, Всероссийских конференциях, симпозиумах и семинарах. Виктора Евгеньевича знают в научных кругах Москвы и дальнего зарубежья. Имя Сибирского вуза становится еще более известным, когда оно сопрягается с работами В.Е. Громова, его представительством, его научной школой. В качестве сопредседателя с Российской стороны в 2007 – 2014 гг. Виктор Евгеньевич организовал и провел шесть международных конференций «Влияние внешних полей на прочность и пластичность материалов» в городе Шэньчжэнь (КНР) и городах Томск и Москва. Награжден знаком «Отличник высшей школы» и медалями «За служение Кузбассу», «За особый вклад в развитие Кузбасса» I, II и III степени.

Виктор Евгеньевич является председателем оргкомитета девяти Всесоюзных и международных конференций «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий», «Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях и сплавах». Профессор Виктор Евгеньевич входит в состав оргкомитетов международных конференций «Действие электрических полей и токов на пластическую деформацию металлов», «Актуальные проблемы прочности», «Физические свойства металлов и сплавов». Его лекции отличаются сочетанием высокого теоретического уровня с ясной формой изложения. Виктор Евгеньевич Громов – «Лучший профессор Кузбасса 2003», «Почетный профессор Куз-

басса» 2015 г., он один из ведущих профессоров университета. Для студентов, углубленно изучающих иностранный язык, с приоритетным участием Виктора Евгеньевича издано четыре учебных пособия с грифом НТС по физике Министерства науки и высшего образования на английском языке. С честью неся преподавательскую нагрузку, профессор Громов активно участвует в работе Межгосударственного координационного совета по физике прочности и пластичности материалов, пишет и редактирует статьи в научные журналы, готовит аспирантов к защите, побуждая их также активно, как он, писать научные статьи.

Будучи блестящим экспериментатором, В.Е. Громов не забывает «дружить» с практикой: в 2013 г. совместно с партнерами АО «ЕВРАЗ ЗСМК» он становится лауреатом премии РАН имени академика И.П. Бардина за цикл работ по разработке и внедрению ресурсосберегающих технологий упрочнения проката и прокатных валков, обеспечивающих получение высокого уровня прочности и эксплуатационной стойкости. Международной академией авторов научных открытий и изобретений в 2013 – 2015 гг. подтверждено соавторство трех научных открытий: «Явление увеличения усталостной долговечности нержавеющей стали электронно-пучковой обработкой»; «Явление ускорения синтеза химических соединений на поверхности металлов и сплавов при электровзрывном легировании»; «Закономерность изменения структурно-фазового со-

стояния металлов при внешнем энергетическом воздействии».

Имя Виктора Евгеньевича Громова включено в федеральный реестр экспертов научной технической сферы Минобрнауки РФ, а в 2016 г. – в реестр экспертов Российской Академии наук.

Развитие научных направлений и результаты исследований В.Е. Громова нашли отражение более чем в 3700 публикациях (в том числе в 25 изобретениях и патентах РФ, 100 монографиях в центральных и зарубежных издательствах, некоторые из которых рекомендованы УМО по металлургии Минобрнауки в качестве учебных пособий для студентов технических вузов страны; в статьях в зарубежных физических журналах (США, Англии, Чехии, Китая и Германии). Шесть монографий изданы в Великобритании (Cambridge Publishing House) и США (Taylor and Frensis Group, Materials Research Forum LLC), Германии (Springer).

Профессор В.Е. Громов является членом редакционной коллегии журналов «Известия вузов. Черная металлургия», «Заготовительные производства в машиностроении», «Деформация и разрушение материалов», «Фундаментальные проблемы современного материаловедения», «Вестник Магнитогорского государственного технического университета».

Сегодня профессор В.Е. Громов успешно заведует кафедрой естественнонаучных дисциплин, мечтает о вполне земном: достойной оценке трудов ученых и талантливой смене. Думается, что когда-нибудь это сбудется.

УДК 538.951:616.31

ВЛИЯНИЕ БИОИНЕРТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫХ ПОКРЫТИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ИМПЛАНТАТ – КОСТЬ

А. Д. Филяков, Д. А. Романов, Е. А. Будовских

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

Аннотация. Помимо агрессивной внутренней среды организма человека на долговечность имплантата влияет адаптивная перестройка костной ткани, при которой концентрация напряжения локализуется внутри объема имплантата возле границы с костной тканью. Это приводит к расшатыванию и выходу имплантата из строя несмотря на то, что, фактически, поверхностный слой имплантата остается неповрежденным. Существуют свидетельства, что покрытия с низким модулем Юнга способствуют изменению распределения нагрузок между имплантатом и прилегающей костной тканью, снижая тем самым эффект адаптивной перестройки. В настоящее время интенсивно развивается метод электровзрывного напыления покрытий различных систем, в том числе и биоинертных покрытий систем Ti – Zr и Ti – Nb, обладающих низким модулем Юнга. Для оценки влияния биоинертных покрытий системы Ti – Zr и Ti – Nb на распределение напряжений в программе COMSOL Multiphysics® версии 5.5 была разработана двумерная модель. В настоящей работе впервые проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния костной ткани, расположенной возле имплантата с нанесенным на его поверхность электровзрывным покрытием системы Ti – Zr или Ti – Nb. В результате моделирования установлено, что напряжения распространяются более равномерно по сравнению со случаем без покрытия. Среди исследуемых покрытий наибольший эффект удалось достичь при моделировании системы с промежуточным слоем, выполненным из биоинертного покрытия системы Ti – Zr. Несмотря на простоту изученных моделей, можно с большой уверенностью судить о пригодности применения электровзрывных биоинертных покрытий в имплантатах.

Ключевые слова: биоинертные покрытия, компьютерное моделирование, электровзрывное напыление, титан, цирконий, ниобий, напряжение

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания (тема 0809-2021-0013).

Для цитирования: Филяков А.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А. Влияние биоинертных электровзрывных покрытий на распределение напряжений на границе раздела имплантат – кость // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 1 (39). С. 43 – 55.

THE EFFECT OF BIOINERT ELECTROEXPLOSIVE COATINGS ON STRESS DISTRIBUTION NEAR THE DENTAL IMPLANT – BONE INTERFACE

A. D. Filyakov, D. A. Romanov, E. A. Budovskikh

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

Abstract. In addition to the aggressive internal environment of the human body, the durability of the implant is affected by the adaptive restructuring of the bone tissue, in which the stress concentration is localized inside the implant volume near the border with the bone tissue. This leads to loosening and failure of the implant, despite the fact that, in fact, the surface layer of the implant remains intact. There is evidence that coatings with a low Young's modulus contribute to a change in the distribution of loads between the implant and adjacent bone tissue, thereby reducing the effect of adaptive restructuring. At present, the method of electroexplosive spraying of coatings of various systems, including bioinert coatings of Ti – Zr and Ti – Nb systems with a low Young's modulus, is being intensively developed. A 2D model was developed to evaluate the effect of bioinert Ti – Zr and Ti – Nb coatings on stress distribution in COMSOL Multiphysics® version 5.5. In the present work, for the first time, computer simulation of the stress-strain state of bone tissue located near an implant with an electroexplosive

coating of the Ti – Zr or Ti – Nb system applied to its surface was carried out. As a result of the simulation, it was found that the stresses propagate more evenly compared to the case without a coating. Among the coatings under study, the greatest effect was achieved when modeling a system with an intermediate layer made of a bioinert coating of the Ti – Zr system. Despite the simplicity of the studied models, it is possible to judge with great confidence the suitability of using electroexplosive bioinert coatings in implants.

Keywords: bioinert coating, computer modelling, electroexplosive spraying, titanium, zirconium, niobium, mechanical stress

Financing. The research was carried out within the framework of the state assignment (theme number 0809-2021-0013).

For citation: Filyakov A.D., Romanov D.A., Budovskikh E.A. The effect of bioinert electroexplosive coatings on stress distribution near the dental implant – bone interface. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 1 (39), pp. 43 – 55. (In Russ.).

Введение

В настоящее время большая часть имплантационных устройств, существующих на рынке ортопедических и дентальных имплантатов, изготавливается из α - β -титанового сплава Ti-6Al-4V, также известного за рубежом как титан Grade 5 и Ti-6-4 [1, 2]. Значительным недостатком данного сплава является присутствие в его химическом составе алюминия и ванадия. Выход ионов этих металлов с поверхности имплантата под действием коррозии в ходе эксплуатации способствует развитию патологических проблем со здоровьем. Многочисленные исследования демонстрируют канцерогенность и цитотоксичность рассматриваемых металлов [3, 4]. Так, чрезмерное воздействие алюминия увеличивает риск развития рака молочной железы [5] и неврологических состояний, таких как болезнь Альцгеймера [6]. Оральное или ингаляционное поступление ванадия и его соединений в организм неблагоприятно воздействует на дыхательную и нервную системы, кровь, печень и другие органы, а также повышает риск образования злокачественных опухолей [7, 8]. Решением данной проблемы могут служить биоинертные покрытия систем Ti – Zr и Ti – Nb. Многочисленные *In vivo* и *In vitro* исследования показывают высокую безопасность, коррозионную стойкость и биосовместимость титановых сплавов, содержащих ниобий и цирконий [9, 10]. Так, в работе [11] под руководством J. Урефа изучена и продемонстрирована биосовместимость ниобиевых покрытий, нанесенных различными методами. При испытаниях *In vitro* для всех поверхностей с покрытием Ti – Nb была достигнута положительная жизнеспособность остеобластоподобных клеток (MG-63). В работе [12] показано, что бинарные сплавы системы Ti – Zr с различными концентрациями циркония (5, 10 и 15 % (по массе)) имеют лучшие

показатели электрохимического поведения в среде, имитирующей свойства биологических жидкостей.

Еще одним недостатком сплава Ti-6Al-4V является высокое значение модуля Юнга, которое достигает 110 ГПа [13, 14]. Данное значение намного выше показателей, демонстрируемых костью. Так, для кортикальной ткани рассматриваемый параметр составляет 10 – 30 ГПа, а для губчатой – 0,01 – 2 ГПа [15, 16]. Различие значений модуля Юнга способствует неравномерному распределению нагрузок между имплантатом и костью, что приводит, согласно закону Вольфа, к адаптивной перестройке костных тканей вокруг имплантата и, в конечном счете, увеличивает риск выхода имплантата из строя [17].

В работе [18] продемонстрировано, что значение модуля Юнга покрытия Ti – Zr, нанесенного методом ионно-плазменного напыления толщиной 5 мкм (при содержании 11 и 22 % циркония), составляет 77 – 98 ГПа, в то время как модуль Юнга титановой подложки – 110 ГПа. В работе [19] демонстрируется схожая ситуация. Значения модуля Юнга покрытия системы Ti – Nb изменяются в пределах от 53 до 64 ГПа.

Помимо агрессивной внутренней среды организма человека на долговечность имплантата влияет адаптивная перестройка костной ткани, при которой напряжения локализуются внутри объема имплантата возле границы с костной тканью, что приводит к ослаблению кости, расшатыванию и выходу имплантата из строя, несмотря на то, что фактически поверхностный слой имплантата остается неповрежденным.

Существуют свидетельства, что покрытия с низким модулем Юнга способствуют изменению распределения нагрузок между имплантатом и прилегающей костной тканью. Так, в работе [20] демонстрируется, что нанесенное на дентальный имплантат биоинертное покрытие

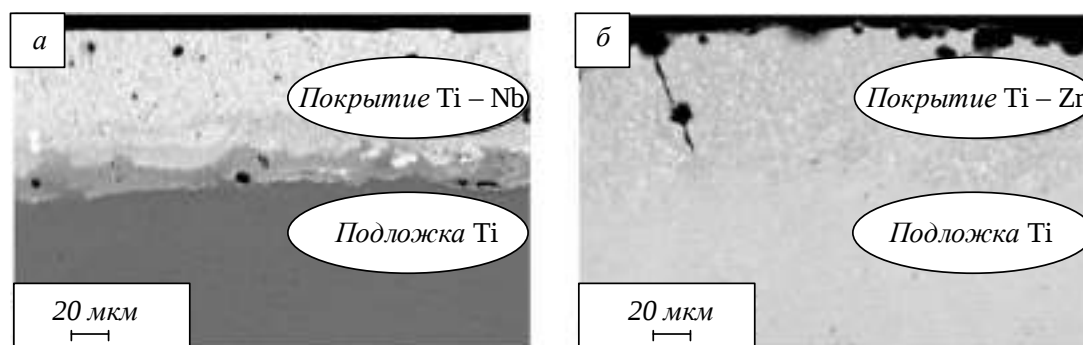


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения поперечных шлифов электровзрывных покрытий систем Ti – Nb (a) и Ti – Zr (б)

Fig. 1. Electron microscopic images of transverse sections of electroexplosive coatings of Ti – Nb (a) and Ti – Zr (b) systems

Poiyactive® при нагрузке, приложенной по вертикальной оси, уменьшает сжимающее радиальное напряжение на границе между костью и имплантатом вокруг его шейки в 6,6 раза и растягивающее радиальное напряжение в 3,6 раза.

В настоящее время интенсивно развивается метод электровзрывного напыления покрытий различных систем [21, 22], в том числе и биоинертных покрытий систем Ti – Zr и Ti – Nb. При изучении [23] покрытий систем Ti – Zr, Ti – Nb обнаружено, что они имеют меньший модуль Юнга по сравнению с подложкой, выполненной из сплава BT6 или коммерчески чистого титана BT1-0, на которую они были нанесены.

Целью настоящей работы является определение и анализ напряженно-деформированного состояния электровзрывных биоинертных покрытий систем Ti – Zr и Ti – Nb при их эксплуатации в человеческом теле.

Материалы и методы

Одним из наиболее эффективных и информативных методов исследования проблем, связанных с биомеханикой, является компьютерное моделирование методом конечных элементов. Этот метод позволяет избежать проблем, связанных с использованием аналитических методов, и получить более точные результаты [24, 25].

В качестве подложки, на которую производилось электровзрывное напыление биоинертных покрытий систем Ti – Zr и Ti – Nb, использовался зубной имплантат из титанового сплава Ti-6Al-4V (BT6). Поверхностный слой формировали на электровзрывной установке ЭВУ 60/10М путем электрического взрыва ниобиевой или циркониевой фольги при поглощаемой плотности мощности 2,0 ГВт/м². Масса циркониевой и ниобиевой фольг составляла 850 мг.

Структуру и морфологию полученного покрытия и прилегающего слоя подложки (рис. 1) анализировали методами сканирующей элек-

тронной микроскопии (прибор Carl Zeiss EVO50).

Толщину полученного электровзрывного покрытия определяли на поперечных шлифах, использовали программное обеспечение Leica Application Suite. При указанных параметрах толщина покрытия составляла примерно 63 мкм. Модуль Юнга определяли путем наноиндентирования покрытия при нагрузке 50 мН (NAN-твёрдомер NHT-S-AX-000X).

Для оценки влияния механического поведения биоинертных покрытий систем Ti – Zr и Ti – Nb в программе COMSOL Multiphysics® версии 5.5 была разработана двумерная модель.

Все материалы, используемые при создании исследуемых моделей, принимаются как линейно-упругие и изотропные. Характеристики применяемых материалов приведены в табл. 1. Параметры плотности губчатой и кортикальной кости в единицах Хаунсфилда равны 1362,94 и 472,21 соответственно [26]. Для представления данных значений в кг/м³ использовалась формула $\rho = a + b \cdot H$, (где $a = 527$, $b = 0,44$, H – плотность в единицах Хаунсфилда [27]) (табл. 1).

Все расчеты проводили согласно теории упругости для стационарного случая. Второй закон Ньютона, служащий уравнением равновесия, в тензорной форме имеет вид:

$$0 = \nabla \sigma + F_v,$$

где σ – напряжение; F_v – сила, действующая на объем.

Основным уравнением, связывающим тензор напряжений σ с деформацией ε , является обобщенный закон Гука:

$$\sigma = E\varepsilon.$$

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики материалов
Main characteristics of materials

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³
BT6	110,0	0,30	4470,50
Ti – Zr	73,8	0,36	6520,00
Ti – Nb	84,3	0,35	8750,00
Кортикальная кость	14,8	0,30	1126,28
Губчатая кость	1,85	0,30	734,77

Модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν связаны с параметрами Ламе следующим уравнением:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

Последнее требуемое уравнение – кинематическая связь между смещениями u и деформациями ε . В тензорной форме (тензор деформации Коши) это уравнение имеет вид

$$\varepsilon_{el} = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u],$$

где T – операция транспонирования.

Оценка распределения напряжений, возникающих под действием физиологических нагрузок, проводится при помощи двумерной модели. В качестве модели рассматривается многослойная балка, состоящая из подложки (представленной во всех вариантах титановым сплавом BT6), промежуточного слоя (в разных вариантах симулирующего поведение покры-

тий систем Ti – Zr и Ti – Nb) и костного слоя (табл. 2). Также в настоящей работе исследуется вариант, не содержащий биоинертное электровзрывное покрытие; в дальнейшем «контрольная модель». Костный слой представлен кортикальной и губчатой тканью. Длина модели составляет 1000 мкм, а толщина 300 мкм. Толщина титановой подложки 87 мкм, костной ткани – 150 мкм, а промежуточного слоя – 63 мкм.

Образцы закреплены по грани BE , с противоположной стороны к грани JF прикладывается сжимающая сила F_1 , направленная по оси X и равная 114,6 Н, и изгибающая сила F_2 (29 Н), направленная по оси Y в сторону слоя костной ткани. Результирующая сила составляет 118,2 Н и направлена под углом 75° к поверхности имплантата. Грани AB , AJ , AC , HD , FE являются свободными (рис. 2). Исследуемая модель была разделена на 745634 конечных элементов с размером от 0,02 мкм до 1 мкм.

а б л и ц а 2

Основные характеристики исследуемых моделей
The main characteristics of the studied models

Слой	Материал слоя	Толщина слоя, мкм
Модель с биоинертным покрытием системы Ti – Zr		
Титановая подложка	BT 6	83
Промежуточный слой	биоинертное покрытие системы Ti – Zr	63
Костная ткань	Кортикальная костная ткань / Губчатая костная ткань	150
Модель с биоинертным покрытием системы Ti – Nb		
Титановая подложка	BT6	83
Промежуточный слой	биоинертное покрытие системы Ti – Nb	63
Костная ткань	Кортикальная костная ткань / Губчатая костная ткань	150
Контрольная модель		
Титановая подложка	BT6	83
Промежуточный слой	BT6	63
Костная ткань	Кортикальная костная ткань / Губчатая костная ткань	150

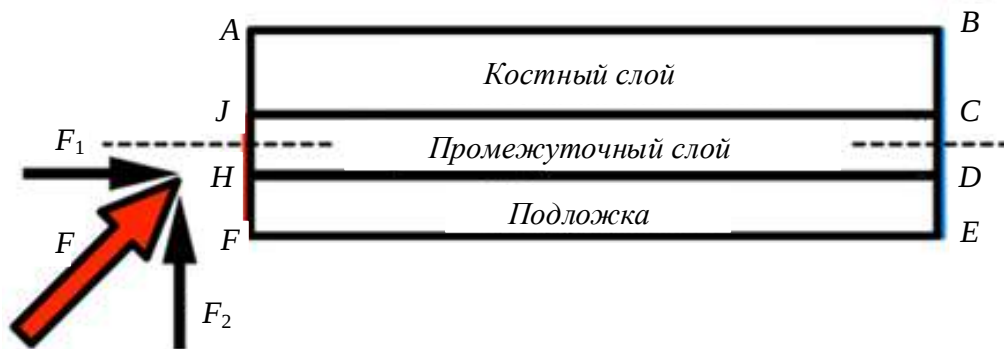


Рис. 2. Схема приложения нагрузки и граничные условия

Fig. 2. Load application scheme and boundary conditions

Результаты и их анализ

Конечно-элементное моделирование показало, что напряжения по критерию Мизеса сконцентрированы в объеме имплантата (рис. 3). Наибольшие напряжения расположены в двух крупных очагах, находящихся возле границы раздела JC и нижней грани FE . При этом их максимумы смещены к грани закрепления BE .

В слое костной ткани, ограниченном областью $ABCH$, напряжения по критерию Мизеса возрастают с уменьшением модуля Юнга промежуточного слоя. Для контрольного образца с кортикальной костной тканью минимальные, средние и максимальные показатели напряжений по критерию Мизеса составляют $1,0727 \cdot 10^{-6}$, 0,3691 и 3,9655 МПа. Для образца с биоинертным покрытием системы $Ti - Nb$ и аналогичным типом костной ткани минимум составляет $1,2183 \cdot 10^{-6}$ МПа, средний показатель увеличивается до 0,3942 МПа, а максимум – до 4,1995 МПа. Среднее значение напряжений по критерию Мизеса в образце со слоем $Ti - Zr$ и кортикальной тканью увеличивается до 0,4066 МПа, а максимальное – до 4,3123 МПа. Минимум, напротив, уменьшается до $1,1918 \cdot 10^{-6}$ МПа.

В образцах с губчатой костной тканью рассматриваемые типы напряжений имеют меньшие значения по сравнению с образцами, в которых моделируется кортикальная ткань, но изменяются аналогичным образом. Для контрольного варианта минимальные и максимальные напряжения по Мизесу равны $4,9102 \cdot 10^{-7}$ и 1,0927 МПа при среднем значении 0,1032 МПа. Для варианта со слоем покрытия $Ti - Nb$ минимальное значение равно $5,8782 \cdot 10^{-7}$ МПа, максимальное и среднее – 1,2586 и 0,1198 МПа. В образце с покрытием системы $Ti - Zr$ минимальное и максимальное значения составляют $6,4073 \cdot 10^{-7}$ и 1,3506 МПа, среднее значение – 0,1291 МПа.

На границе между костной тканью и имплантатом, представленной гранью JC , напря-

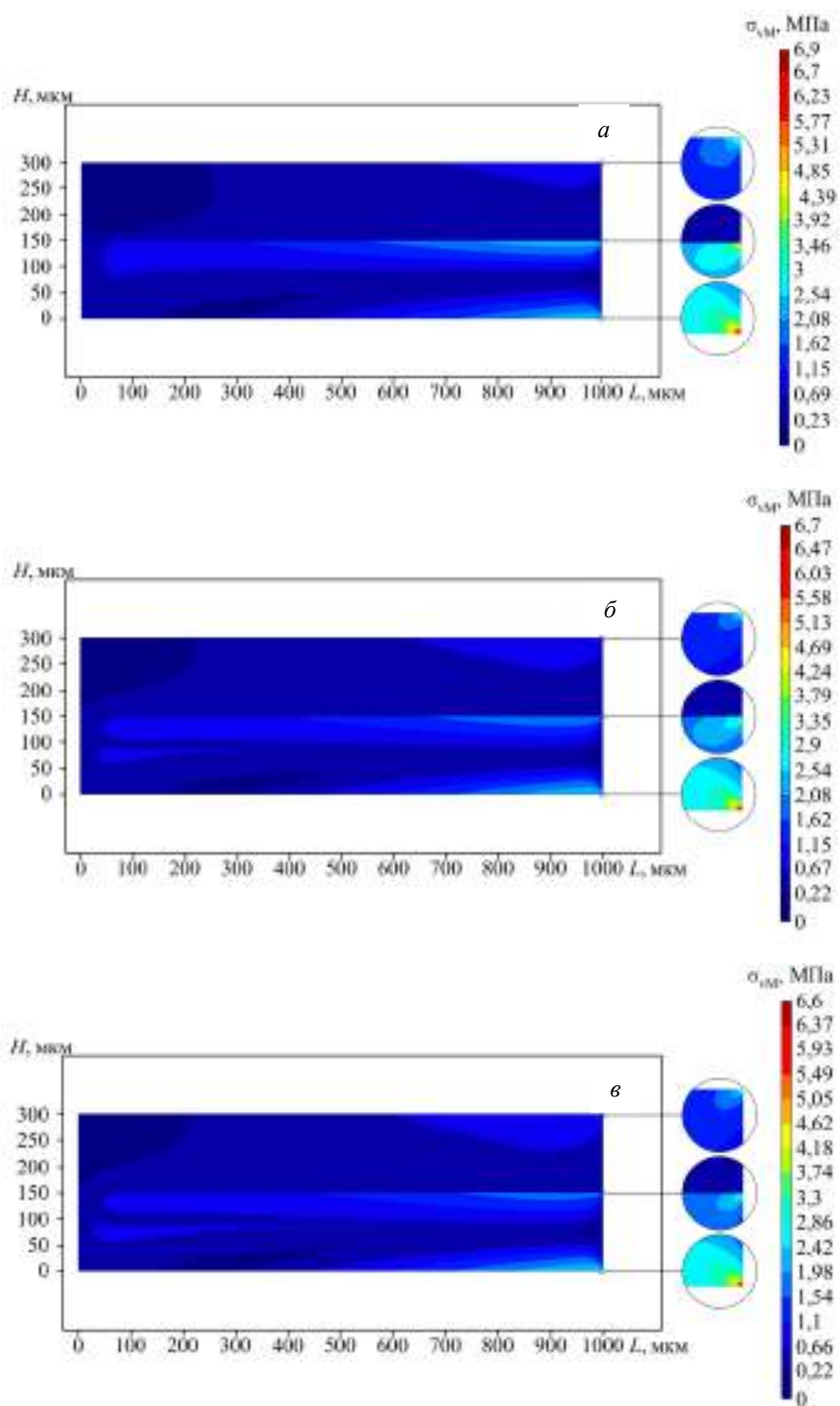
жения по критерию Мизеса убывают при использовании биоинертных покрытий (рис. 4).

При моделировании образцов с кортикальной костной тканью наибольшие минимальные, средние и максимальные напряжения по Мизесу, наблюдаемые в контрольном образце, составляют 0,3468, 0,9156 и 3,4144 МПа. При применении биоинертного покрытия системы $Ti - Nb$ наблюдаются меньшие значения рассматриваемого типа напряжений. Так, минимальное напряжение по критерию Мизеса в данном случае равно 0,3626 МПа, среднее – 0,8097 МПа и максимальное – 2,7899 МПа. Минимальные напряжения получены при моделировании образца, содержащего покрытие системы $Ti - Zr$. Для данной модели минимальное, среднее и максимальное напряжения составляют 0,3734, 0,7606 и 2,4606 МПа.

Варианты с губчатой костной тканью ведут себя аналогичным образом. Минимальные и максимальные напряжения по критерию Мизеса равны 0,3032 и 9,9578 МПа, а среднее – 9,9578 МПа. Для модели с покрытием системы $Ti - Nb$ напряжения наблюдаются на границе между данным типом костной ткани и промежуточным слоем, среднее, минимальное и максимальное значения составляют 1,5833, 0,2964 и 9,3731 МПа. Наименьшие значения были достигнуты при моделировании варианта с биоинертным слоем системы $Ti - Zr$. Минимальное, максимальное и среднее значения напряжений по критерию Мизеса равны 0,2992, 8,9331 и 1,5154 МПа.

В промежуточном слое толщиной 63 мкм, ограниченном плоскостью $JCDH$, наблюдается уменьшение средних значений всех типов рассматриваемых напряжений. Сильнее всего данный эффект проявляется в образцах с покрытием системы $Ti - Zr$.

В контрольной модели, содержащей кортикальную костную ткань, минимальные, средние и максимальные напряжения по критерию Мизеса составляют 0,2814, 1,0698 и 5,9249 МПа.



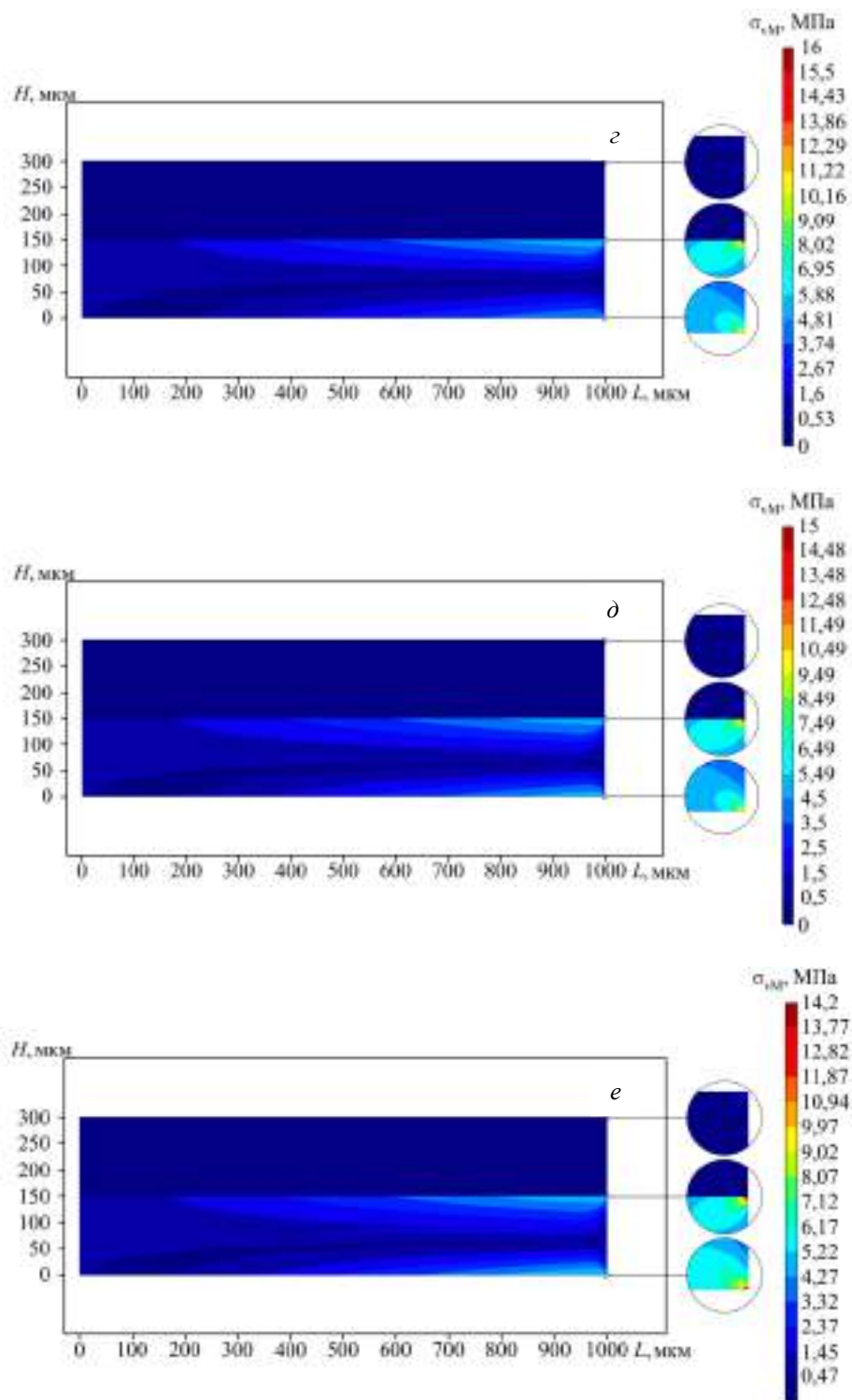


Рис. 3. Распределение напряжений по Мизесу:

a и *б* – контрольная модель; *в* и *г* – модель с покрытием системы Ti – Nb; *д* и *е* – модель с покрытием системы Ti – Zr;
a, *в*, *д* – вариант с кортикальным слоем костной ткани; *б*, *г*, *е* – вариант с губчатым слоем костной ткани

Fig. 3. Mises stress distribution:

a and *б* – control model; *в* and *г* – model with Ti – Nb system coating; *д* and *е* – model with Ti – Zr system coating;

a, *в*, *д* – variant with cortical bone layer; *б*, *г*, *е* – variant with spongy bone layer

Для образца с биоинертным покрытием системы Ti – Nb рассматриваемые показатели уменьшаются. В данном случае минимальное, среднее и максимальное напряжения имеют значения 0,2833, 0,9326 и 4,6520 МПа. Для модели с с биоинерт-

ным покрытием системы Ti – Zr минимальное, среднее и максимальное напряжения по критерию Мизеса составляют 0,2675, 0,8658 и 4,0112 МПа. В моделях с губчатой костной тканью наблюдается аналогичная тенденция:

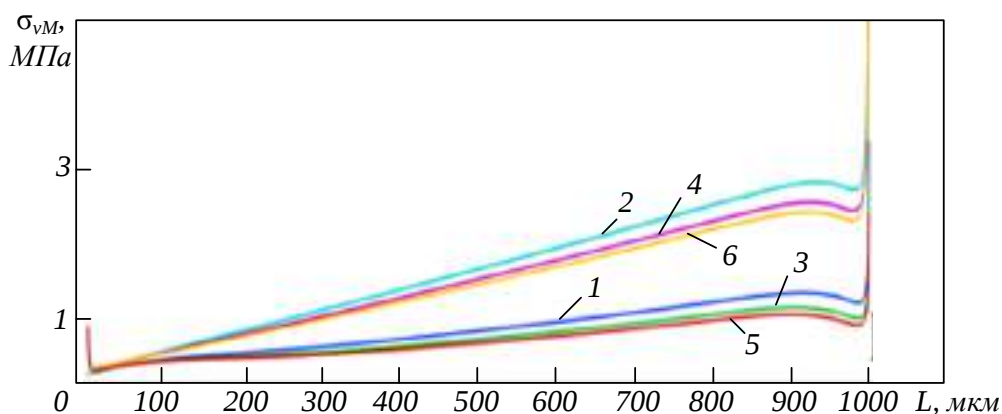


Рис. 4. Распределение напряжений на границе между имплантатом и костной тканью (грань JC) (здесь и на рис. 5 и 6): 1 и 2 – контрольная модель с кортикальным и губчатым слоем костной ткани; 3 и 4 – модель с покрытием системы Ti – Nb с кортикальным слоем и губчатым слоем костной ткани; 5 и 6 – модель с покрытием системы Ti – Zr с кортикальным и губчатым слоем костной ткани

Fig. 4. The stress distribution on the boundary between the implant and bone tissue (face JC) (here and in Fig. 5 and 6): 1 and 2 – reference model of the cortical and model with the layer of spongy bone tissue; 3 and 4 – model with coating of Ti – Nb system with cortical layer of bone tissue and with the layer of spongy bone tissue; 5 and 6 – model with the Ti – Zr coating system with cortical layer of bone tissue and with the layer of spongy bone tissue

напряжения уменьшаются вместе со снижением модуля Юнга промежуточного слоя, однако их значения выше, чем в вариантах с кортикальной тканью. Для контрольного варианта минимальное и максимальное напряжения по Мизесу равны 0,3323 и 19,5352 МПа, среднее напряжение – 2,2102 МПа. Для варианта со слоем покрытия системы Ti – Nb минимальное, максимальное и среднее напряжение составляют 0,2627, 18,2784 и 2,0689 МПа. В модели с покрытием Ti – Zr минимальное, максимальное и среднее напряжения равны 0,2432, 17,3587 и 1,9912 МПа.

На расстоянии 63 мкм от интерфейса, разделяющего костную ткань и плоскость имплантата, на грани HD, играющей в моделях роль границы раздела промежуточного слоя и материала подложки, напряжения по критерию

Мизеса увеличиваются с уменьшением модуля Юнга промежуточного слоя (рис. 5).

В моделях с кортикальной костной тканью наименьшие значения напряжений по критерию Мизеса демонстрирует контрольный образец. Минимальный показатель равен 0,3100 МПа, средний – 0,6034 МПа, а максимальный составляет 0,7082 МПа. С уменьшением модуля Юнга моделируемого покрытия исследуемые показатели увеличиваются.

В модели с биоинертным слоем системы Ti – Nb минимальные средние и максимальные показатели равны 0,3589, 0,6209 и 0,7008 МПа соответственно. В образце с Ti – Zr промежуточным слоем 0,3152 МПа является минимальным значением, 0,6292 МПа – средним, а 0,7004 МПа – максимальным.

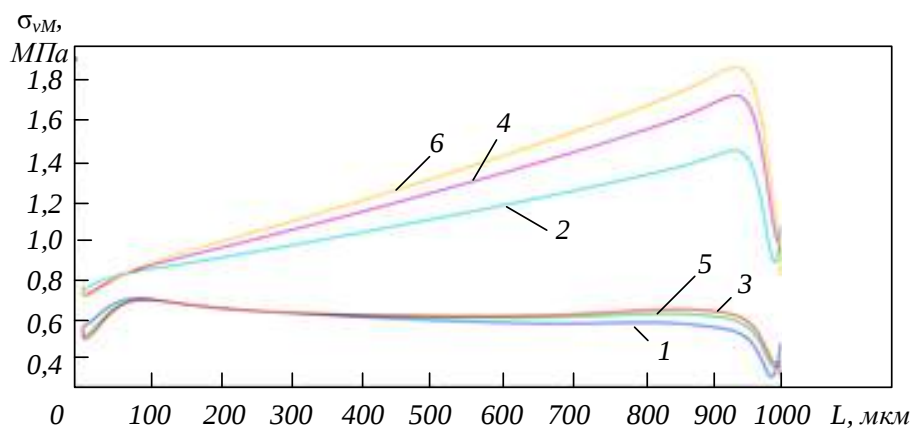


Рис. 5. Распределение напряжений на границе между промежуточным слоем и подложкой (грань HD):
Fig. 5. Stress distribution at the boundary between the intermediate layer and the substrate (HD face)

При моделировании образцов с губчатой костью напряжения изменяются аналогичным образом. Наибольшие напряжения по критерию Мизеса наблюдаются в контрольном образце. В данном случае минимальное, максимальное и среднее значения составляют 0,7435, 1,4559 и 1,1044 МПа. В варианте с Ti – Nb промежуточным слоем минимальное значение уменьшается до 0,7175 МПа, максимум – до 1,7331 МПа, среднее составляет 1,2374 МПа. В модели с биоинертным покрытием Ti – Zr наблюдаются наименьшие напряжения по критерию Мизеса: минимальное, максимальное и среднее напряжения в данном случае составляют 0,7222, 1,8748 и 1,3089 МПа.

Как и в промежуточном слое, закономерное уменьшение напряжений по критерию Мизеса наблюдается и в слое подложки, ограниченном плоскостью *HDEF*.

В контрольной модели, содержащей кортикальную костную ткань, минимальное, среднее и максимальное напряжения по критерию Мизеса равны $1,7650 \cdot 10^{-4}$, 0,6101 и 8,4059 МПа. Для образца с биоинертным покрытием системы Ti – Nb рассматриваемые показатели уменьшаются. В данном случае минимальное, среднее и максимальное напряжения составляют $2,7396 \cdot 10^{-4}$, 0,6077 и 8,1253 МПа. Для модели с Ti – Zr слоем минимальное, среднее и максимальное напряжения по критерию Мизеса равны $1,1007 \cdot 10^{-4}$, 0,6084 МПа и 8,0011 МПа.

Варианты с губчатой костной тканью демонстрируют большие значения напряжений. Для контрольной модели минимальное, максимальное и среднее напряжения по Мизесу равны $3,0457 \cdot 10^{-4}$, 16,0305 и 1,1333 МПа. При применении биоинертного слоя системы Ti – Nb минимальное, максимальное и среднее напряжения составляют $2,4720 \cdot 10^{-4}$, 6,4231 и 1,1971 МПа. Вариант с покрытием системы Ti – Zr демонстрирует большие напряжения: минимальное, максимальное и среднее напряжения составляют $1,0682 \cdot 10^{-4}$, 16,6668 и 1,2377 МПа.

Полученные при помощи двумерной трехслойной модели результаты не способны отразить реальные напряжения, возникающие в имплантате и окружающей его костной ткани, так как для упрощения вычислений все материалы, применяемые в настоящей работе, были заданы как изотропные, что не соответствует действительности. Разница между моделированием изотропной и анизотропной среды наглядно демонстрируется в работе [28]. Также для данной модели большое внимание уде-

ляется минимальному и максимальному напряжениям, так как данная модель довольно проста и не отражает геометрических особенностей реального имплантата и окружающей его костной структуры.

Однако при помощи описанных выше моделей в настоящей работе, как и в материалах [29, 30], удастся продемонстрировать неоднородность напряженно-деформированного состояния в системе имплантат – кость. Большие напряжения сконцентрированы в плоскости имплантата, а не в костном слое. Такая разница в распределении нагрузок обусловлена более высоким модулем Юнга сплава Ti-6Al-4V, применяемого в качестве конструкционного материала имплантата. При этом демонстрируется, что напряжения, возникающие в кортикальной костной ткани, выше, чем в губчатой, а напряжения на границе между костным веществом и имплантатом, напротив, выше возле губчатой. Данный факт можно объяснить более высоким модулем Юнга кортикальной костной ткани.

Стоит также отметить, что на границе между покрытием и имплантатом возникает второй пик напряжений, вызванный разницей значений модуля Юнга покрытия и подложки (рис. 6).

Выводы

Механические напряжения, возникающие при эксплуатации имплантата в человеческом теле, распределяются неравномерно между ним и окружающей его костной тканью. Наибольшие напряжения по критерию Мизеса лежат на границе между костной тканью в объеме имплантата.

Применение биоинертных покрытий систем Ti – Zr и Ti – Nb позволяет уменьшить напряжения на границе между имплантатом и костной тканью. При этом наибольший результат был получен при моделировании биоинертного покрытия системы Ti – Zr с более низким модулем Юнга, равным 73,8 МПа.

На границе между титановой подложкой и электровзрывным биоинертным покрытием образуется второй скачок механических напряжений, вызванный различием в значениях модулей Юнга покрытия и подложки.

Несмотря на простоту изученных моделей, можно с большой уверенностью судить о пригодности применения электровзрывных биоинертных покрытий в имплантатах.

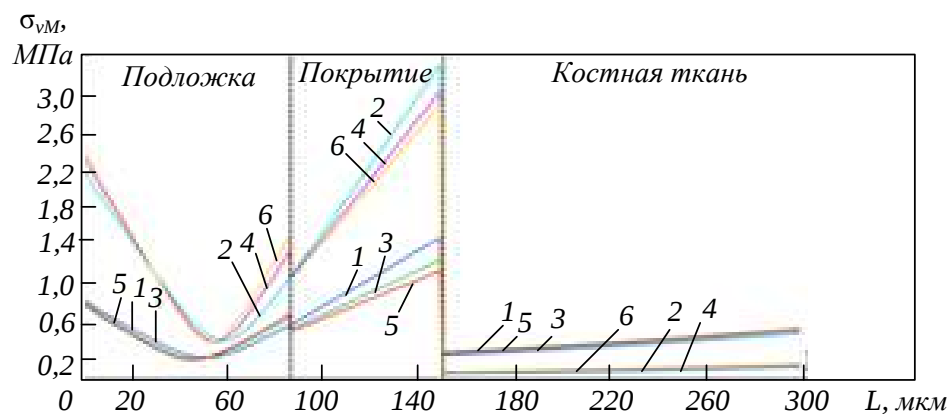


Рис. 6. Распределение напряжений по критерию Мизеса по поперечному сечению модели

Fig. 6. Stress distribution according to the Mises criterion over the cross section of the model

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chen Q., Thouas G.A. Metallic implant biomaterials // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2015. Vol. 87. P. 1–57.
- Colic K., Sedmak A., Grbovic A., Tatic U., Sedmak S., Djordjevic B. Finite Element Modeling of Hip Implant Static Loading // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 149. P. 257–262.
- Sjögren B., Iregren A., Montelius J., Yokel R.A. Aluminum. In: *Handbook on the Toxicology of Metals*. 2015. P. 549–564.
- Assem F.L., Oskarsson A. Vanadium. In: *Handbook on the Toxicology of Metals*. 2015. P. 1347–1367.
- Darbre P.D. Environmental oestrogens, cosmetics and breast cancer // *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*. 2006. Vol. 20. No. 1. P. 121–143.
- Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals // *Interdisciplinary Toxicology*. 2014. Vol. 7. No. 2. P. 60–72.
- Rhoads L.S., Silkworth W.T., Roppolo M.L., Whittingham M.S. Cytotoxicity of nanostructured vanadium oxide on human cells in vitro // *Toxicology in Vitro*. 2010. Vol. 24. No. 1. P. 292–296.
- Wagner J.G., Van Dyken S.J., Wierenga J.R., etc. Ozone Exposure Enhances Endotoxin-Induced Mucous Cell Metaplasia in Rat Pulmonary Airways // *Toxicological Sciences*. 2003. Vol. 74. No. 2. P. 437–446.
- Bai Y., Deng Y., Zheng Y., etc. Characterization, corrosion behavior, cellular response and *in vivo* bone tissue compatibility of titanium–niobium alloy with low Young’s modulus // *Materials Science and Engineering: C*. 2016. Vol. 59. P. 565–576.
- Calderon Moreno J.M., Vasilescu E., Drob P., etc. Surface analysis and electrochemical behavior of Ti – 20Zr alloy in simulated physiological fluids // *Materials Science and Engineering: B*. 2013. Vol. 178. No. 18. P. 1195–1204.
- Ureña J., Tsipas S., Jiménez-Morales A., Gordo E., etc. In-vitro study of the bioactivity and cytotoxicity response of Ti surfaces modified by Nb and Mo diffusion treatments // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 335. P. 148–158.
- Kirmanidou Y., Sidira M., Drosou M.-E., etc. New Ti-alloys and surface modifications to improve the mechanical properties and the biological response to orthopedic and dental implants: A Review // *BioMed Research International*. 2016. Vol. 2016. Article 2908570.
- Kuroda D., Niinomi M., Morinaga M., etc. Design and mechanical properties of new β type titanium alloys for implant materials // *Materials Science and Engineering: A*. 1998. Vol. 243. No. 1-2. P. 244–249.
- Jin W., Chu P.K. Orthopedic Implants. In: *Reference Module in Biomedical Sciences*. 2017. 15 p.
- Long M., Rack H.J. Titanium alloys in total joint replacement – a materials science perspective // *Biomaterials*. 1998. Vol. 19. No. 18. P. 1621–1639.
- Li Y., Yang C., Zhao H., etc. New Developments of Ti-based alloys for biomedical applications // *Materials*. 2014. Vol. 7. No. 3. P. 1709–1800.
- Denard P.J., Raiss P., Gobezie R., etc. Stress shielding of the humerus in press-fit anatomic shoulder arthroplasty: review and recommendations for evaluation // *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2018. Vol. 27. No. 6. P. 1139–1147.

18. Ivanova A.A., Surmeneva M.A., Shugurov V.V., Koval N.N., etc. Physico-mechanical properties of Ti – Zr coatings fabricated via ion-assisted arc-plasma deposition // *Vacuum*. 2018. Vol. 149. P. 129–133.
19. Ureña J., Tabares E., Tsipas S., etc. Dry sliding wear behaviour of β -type Ti – Nb and Ti – Mo surfaces designed by diffusion treatments for biomedical applications // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018. Vol. 91. P. 335–344.
20. Meijer G.J., Starmans F.J.M., Putter C., etc. The influence of a flexible coating on the bone stress around dental implants // *Journal of Oral Rehabilitation*. 1995. Vol. 22. No. 2. P. 105–111.
21. Romanov D.A., Moskovskii S.V., Martusevich E.A., etc. Structural-phase state of the system “CdO-Ag coating / copper substrate” formed by electroexplosive method // *Metallurgija*. 2018. Vol. 57. P. 299–302.
22. Romanov D.A., Moskovskii S.V., Sosnin K.V., etc. Effect of electron-beam processing on structure of electroexplosive electroerosion resistant coatings of CuO-Ag system // *Materials Research Express*. 2019. Vol. 8. No. 6. P. 10.
23. Romanov D.A., Sosnin K.V., Gromov V.E., etc. Titanium-zirconium coatings formed on the titanium implant surface by the electroexplosive method // *Materials Letters*. 2019. Vol. 242. P. 79–82.
24. Limbert G., van Lierde C., Muraru O.L., etc. Trabecular bone strains around a dental implant and associated micromotions – A micro-CT-based three-dimensional finite element study // *Journal of Biomechanics*. 2010. Vol. 43. No. 7. P. 1251–1261.
25. Zhang Q.-H., Cossey A., Tong J. Stress shielding in bone of a bone-cement interface // *Medical Engineering & Physics*. 2016. Vol. 38. No. 4. P. 423–426.
26. Chugh T., Ganeshkar S.V., Revankar A.V. etc. Quantitative assessment of interradicular bone density in the maxilla and mandible: implications in clinical orthodontics // *Progress in Orthodontics*. 2013. Vol. 14. No. 1. P. 38.
27. Khan S.N., Warkhedkar R.M., Shyam A.K. Analysis of Hounsfield Unit of Human Bones for Strength Evaluation // *Analysis of Hounsfield Unit of Human Bones for Strength Evaluation*. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 6. P. 512–519.
28. Hasegawa M., Saruta J., Hirota M., etc. A Newly Created Meso-, Micro-, and Nano-Scale Rough Titanium Surface Promotes Bone-Implant Integration // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21. No. 3. Article 783.
29. Bosshardt D.D., Chappuis V., Buser D. Osseointegration of titanium, titanium alloy and zirconia dental implants: current knowledge and open questions // *Periodontology*. 2000. Vol. 73. No. 1. P. 22–40.
30. Hayes J.S., Richards R.G. Osseointegration of Permanent and Temporary Orthopedic Implants // *Encyclopedia of Biomedical Engineering*. 2019. P. 257–269.

REFERENCES

1. Chen Q., Thouas G.A. Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2015, vol. 87, pp. 1–57.
2. Colic K., Sedmak A., Grbovic A., Tatic U., Sedmak S., Djordjevic B. Finite Element Modeling of Hip Implant Static Loading. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 149, pp. 257–262.
3. Sjögren B., Iregren A., Montelius J., Yokel R.A. Aluminum. In: *Handbook on the Toxicology of Metals*. 2015, pp. 549–564.
4. Assem F.L., Oskarsson A. Vanadium. In: *Handbook on the Toxicology of Metals*. 2015, pp. 1347–1367.
5. Darbre P.D. Environmental oestrogens, cosmetics and breast cancer. *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*. 2006, vol. 20, no. 1, pp. 121–143.
6. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*. 2014, vol. 7, no. 2, pp. 60–72.
7. Rhoads L.S., Silkworth W.T., Roppolo M.L., Whittingham M.S. Cytotoxicity of nanostructured vanadium oxide on human cells in vitro. *Toxicology in Vitro*. 2010, vol. 24, no. 1, pp. 292–296.
8. Wagner J.G., Van Dyken S.J., Wierenga J.R., etc. Ozone Exposure Enhances Endotoxin-Induced Mucous Cell Metaplasia in Rat Pulmonary Airways. *Toxicological Sciences*. 2003, vol. 74, no. 2, pp. 437–446.
9. Bai Y., Deng Y., Zheng Y., etc. Characterization, corrosion behavior, cellular response and *in vivo* bone tissue compatibility of titanium–niobium alloy with low Young’s modulus. *Materials Science and Engineering: C*. 2016, vol. 59, pp. 565–576.
10. Calderon Moreno J.M., Vasilescu E., Drob P., etc. Surface analysis and electrochemical behavior of Ti – 20Zr alloy in simulated physiological fluids. *Materials Science and Engineering: B*. 2013, vol. 178, no. 18, pp. 1195–1204.

11. Ureña J., Tsipas S., Jiménez-Morales A., Gordo E., etc. In-vitro study of the bioactivity and cytotoxicity response of Ti surfaces modified by Nb and Mo diffusion treatments. *Surface and Coatings Technology*. 2018, vol. 335, pp. 148–158.
12. Kirmanidou Y., Sidira M., Drosou M.-E., etc. New Ti-alloys and surface modifications to improve the mechanical properties and the biological response to orthopedic and dental implants: A Review. *BioMed Research International*. 2016, vol. 2016, article 2908570.
13. Kuroda D., Niinomi M., Morinaga M., etc. Design and mechanical properties of new β type titanium alloys for implant materials. *Materials Science and Engineering: A*. 1998, vol. 243, no. 1-2, pp. 244–249.
14. Jin W., Chu P.K. Orthopedic Implants. In: *Reference Module in Biomedical Sciences*. 2017, 15 p.
15. Long M., Rack H.J. Titanium alloys in total joint replacement – a materials science perspective. *Biomaterials*. 1998, vol. 19, no. 18, pp. 1621–1639.
16. Li Y., Yang C., Zhao H., etc. New Developments of Ti-based alloys for biomedical applications. *Materials*. 2014, vol. 7, no. 3, pp. 1709–1800.
17. Denard P.J., Raiss P., Gobeze R., etc. Stress shielding of the humerus in press-fit anatomic shoulder arthroplasty: review and recommendations for evaluation. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2018, vol. 27, no. 6, pp. 1139–1147.
18. Ivanova A.A., Surmeneva M.A., Shugurov V.V., Koval N.N., etc. Physico-mechanical properties of Ti – Zr coatings fabricated via ion-assisted arc-plasma deposition. *Vacuum*. 2018, vol. 149, pp. 129–133.
19. Ureña J., Tabares E., Tsipas S., etc. Dry sliding wear behaviour of β -type Ti – Nb and Ti – Mo surfaces designed by diffusion treatments for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018, vol. 91, pp. 335–344.
20. Meijer G.J., Starmans F.J.M., Putter C., etc. The influence of a flexible coating on the bone stress around dental implants. *Journal of Oral Rehabilitation*. 1995, vol. 22, no. 2, pp. 105–111.
21. Romanov D.A., Moskovskii S.V., Martusevich E.A., etc. Structural-phase state of the system “CdO-Ag coating / copper substrate” formed by electroexplosive method. *Metallurgija*. 2018, vol. 57, pp. 299–302.
22. Romanov D.A., Moskovskii S.V., Sosnin K.V., etc. Effect of electron-beam processing on structure of electroexplosive electroerosion resistant coatings of CuO-Ag system. *Materials Research Express*. 2019, vol. 8, no. 6, pp. 10.
23. Romanov D.A., Sosnin K.V., Gromov V.E., etc. Titanium-zirconium coatings formed on the titanium implant surface by the electroexplosive method. *Materials Letters*. 2019, vol. 242, pp. 79–82.
24. Limbert G., van Lierde C., Muraru O.L., etc. Trabecular bone strains around a dental implant and associated micromotions – A micro-CT-based three-dimensional finite element study. *Journal of Biomechanics*. 2010, vol. 43, no. 7, pp. 1251–1261.
25. Zhang Q.-H., Cossey A., Tong J. Stress shielding in bone of a bone-cement interface. *Medical Engineering & Physics*. 2016, vol. 38, no. 4, pp. 423–426.
26. Chugh T., Ganeshkar S.V., Revankar A.V., etc. Quantitative assessment of interradiar bone density in the maxilla and mandible: implications in clinical orthodontics. *Progress in Orthodontics*. 2013, vol. 14, no. 1, pp. 38.
27. Khan S.N., Warkhedkar R.M., Shyam A.K. Analysis of Hounsfield Unit of Human Bones for Strength Evaluation. *Analysis of Hounsfield Unit of Human Bones for Strength Evaluation. Procedia Materials Science*. 2014, vol. 6, pp. 512–519.
28. Hasegawa M., Saruta J., Hirota M., etc. A Newly Created Meso-, Micro-, and Nano-Scale Rough Titanium Surface Promotes Bone-Implant Integration. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020, vol. 21, no. 3, article 783.
29. Bosshardt D.D., Chappuis V., Buser D. Osseointegration of titanium, titanium alloy and zirconia dental implants: current knowledge and open questions. *Periodontology*. 2000, vol. 73, no. 1, pp. 22–40.
30. Hayes J.S., Richards R.G. Osseointegration of Permanent and Temporary Orthopedic Implants. *Encyclopedia of Biomedical Engineering*. 2019, pp. 257–269.

Сведения об авторах

Артём Дмитриевич Филяков, научный сотрудник, Сибирский государственный индустриальный университет

Email: filyakov.1999@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8168-8809

Денис Анатольевич Романов, д.т.н., доцент,
старший научный сотрудник, Сибирский гос-
ударственный индустриальный университет
Email: romanov_da@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-6880-2849

Евгений Александрович Будовских, д.т.н.,
доцент, старший научный сотрудник, Сибир-
ский государственный индустриальный уни-
верситет
Email: budovskikh@mail.ru
ORCID: ORCID 0000-0002-3795-0726

Information about the authors

Artem D. Filyakov, Research scientist, Siberian
State Industrial University
Email: filyakov.1999@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8168-8809

Denis A. Romanov, Dr. Sci. (Eng.), Associate
Professor, Senior Researcher, Siberian State In-
dustrial University
Email: romanov_da@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-6880-2849

Evgeny A. Budovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Associate
Professor, Senior Researcher, Siberian State In-
dustrial University
Email: budovskikh@mail.ru
ORCID: ORCID 0000-0002-3795-0726

© 2022 г. А.Д. Филяков, Д.А. Романов,
Е.А. Будовских
Поступила в редакцию 18.01.2022 г.

УДК 669.539.382:669.17:669.046

ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЛЬСОВ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

В. А. Гришунин¹, О. А. Перегудов², В. Е. Кормышев¹, А. А. Юрьев³,
Ю. Ф. Иванов⁴, В. Е. Громов¹, Е. В. Мартусевич¹

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

²Омский государственный технический университет (Россия, 644050, Омск, пр. Мира, 11)

³АО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Космическое шоссе, 16)

⁴Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический 2/3)

Аннотация. Проведены количественные и качественные исследования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры, поверхности разрушения рельсовой стали, подвергнутой многоцикловой усталости до разрушения с исходной перлитной структурой и после электронно-пучковой обработки в различных режимах. Послойными электронно-микроскопическими исследованиями выявлен градиентный характер структурно-фазовых состояний, характеризующийся закономерным изменением фазового состава и параметров дефектной субструктуры по мере удаления от поверхности облучения. Выявлены и подвергнуты анализу основные факторы и механизмы, определяющие усталостную долговечность рельсовой стали в исходном состоянии и после электронно-пучковой обработки. Установлено, что увеличение усталостной долговечности стали, облученной электронным пучком, обусловлено формированием игольчатого профиля границы раздела, приводящего к диспергированию концентраторов напряжений и способствующего более однородному пластическому течению в подложке.

Ключевые слова: многоцикловая усталость, рельсы, электронно-пучковая обработка

Для цитирования: Гришунин В.А., Перегудов О.А., Кормышев В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Мартусевич Е.В. Повышение усталостной долговечности рельсов электронно-пучковой обработкой // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 1 (39). С. 56 – 62.

IMPROVEMENT OF RAILS FATIGUE LIFE BY ELECTRON-BEAM PROCESSING

V. A. Grishunin, O. A. Peregudov, V. E. Kormyshev, A. A. Yuriev,
Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, E. V. Martusevich

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

²Omsk State Technical University (11 Mira Ave., Omsk 644050, Russian Federation)

³JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

⁴Institute of High-Current Electronics SB RAS (2/3 Akademicheskii Ave., 634055 Tomsk, Russian Federation)

Abstract. Quantitative and qualitative studies of the structure, phase composition, defective substructure, fracture surface of rail steel subjected to high-cycle fatigue to fracture with the initial pearlite structure and after electron beam treatment (EBT) in various modes were carried out. Layer-by-layer electron microscopic studies revealed the gradient nature of the structural-phase states, which is characterized by a regular change in the phase composition and parameters of the defective substructure with distance from the irradiation surface. The main factors and mechanisms that determine the fatigue life of rail steel in the initial state and after EPO were identified and analyzed. It was established that an increase in the fatigue life of steel irradiated with an electron

beam is due to the formation of an acicular profile of the interface, which leads to dispersion of stress concentrators and contributes to a more uniform plastic flow in the substrate.

Keywords: high-cycle fatigue, rails, electron-beam processing

For citation: Grishunin V.A., Peregudov O.A., Kormyshev V.E., Yuriev A.A., Ivanov Yu.F., V.E. Gromov, Martusevich E.V. Improvement of rails fatigue life by electron-beam processing. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 1 (39), pp. 56 – 62. (In Russ.).

Введение

Одной из основных причин выхода рельсов из строя является формирование усталостных дефектов при эксплуатации. Вопросы сопротивления усталости и износу – предмет самого тщательного рассмотрения с точки зрения как научных исследований, так и опытно-конструкторских и технологических разработок.

Одним из перспективных методов целенаправленной модификации структурно-фазового состояния поверхностного слоя металлов и сплавов является электронно-пучковая обработка (ЭПО), которая обладает большими возможностями для контроля количества подводимой энергии, создания большой площади воздействия концентрированным потоком энергии на обрабатываемый материал, малыми коэффициентами отражения энергии, высокой концентрацией энергии в единице объема материала [1 – 3].

Принципиально важной особенностью модификации поверхностного слоя низкоэнергетическими высокоинтенсивными электронными пучками является отсутствие выраженной поверхности раздела между модифицированным слоем и объемом материала, что определяет хорошие демпфирующие свойства материала при механических и температурных внешних воздействиях, предотвращая преждевременное зарождение и распространение с поверхности в основной объем материала хрупких микротрещин, приводящих к разрушению [4, 5].

Для установления оптимальных режимов ЭПО необходимо знание закономерностей и физических механизмов формирования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры поверхностных слоев при электронно-пучковом облучении. Все вышесказанное определяет актуальность настоящей работы.

Целью работы являлось выявление на различных масштабных уровнях закономерностей и физической природы формирования и эволюции структуры, фазового состава и дефектной субструктуры рельсовой стали, подвергнутой электронно-пучковой обработке и последующей многоцикловой усталости до разрушения.

Материал и методы исследования

В качестве материала исследования использовалась рельсовая сталь Э76Ф, образцы из которой подвергались нагреву до 1173 К (в течение 2 ч) с последующим охлаждением с печью.

Усталостные испытания проводили на специальной установке по схеме циклического асимметричного консольного изгиба. Напряжение циклической нагрузки – 20 МПа, частота нагружения – 20 Гц, температура испытания – 296 К. При испытаниях определялось количество циклов до полного разрушения образцов размерами 8×15×145 мм и концентратором напряжений в виде полукруглого выреза радиусом 10 мм.

Модификацию поверхностного слоя стали осуществляли высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Режим электронно-пучковой обработки: энергия электронов $e_U = 18$ кэВ; длительность импульса воздействия пучка электронов $\tau = 50$ мкс; количество импульсов воздействия $N = 3$; частота следования импульсов $f = 0,3$ Гц; плотность энергии пучка электронов $E_s = 10 \div 30$ Дж/см².

Исследования структурно-фазового состояния и дефектной субструктуры стали осуществляли на расстояниях 0, 10, 40 и 100 мкм методами просвечивающей дифракционной (метод тонких фольг) электронной микроскопии. Для идентификации фаз применялся микродифракционный анализ с использованием темнопольной методики и последующего индицирования микроэлектроннограмм. Морфологию поверхности облучения и поверхность разрушения образцов исследовали методами сканирующей электронной микроскопии.

Результаты и их обсуждение

Термическая обработка стали привела к образованию поликристаллической структуры, представленной зернами структурно свободно-феррита и зернами перлита преимущественно пластинчатой морфологии. В небольшом количестве в исследуемой стали присутствует так называемый «псевдоперлит». Зерна

феррита содержат дислокационную субструктуру в виде сеток или в виде хаотически расположенных дислокаций. Скалярная плотность дислокаций составляет примерно $4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Вблизи границ и стыков границ зерен выявляются области с фрагментированной субструктурой; размеры фрагментов изменяются в пределах от 0,3 до 0,4 мкм. В зернах феррита обнаруживается полосовая субструктура и субзерна. Размеры субзерен изменяются в пределах от 0,45 до 0,75 мкм. В ферритных прослойках выявляется дислокационная субструктура преимущественно в виде хаотически распределенных дислокаций, скалярная плотность которых составляет примерно $2,8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

В поверхностном слое формируется поликристаллическая структура, средний размер зерен которой при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см^2 составляет примерно 5 мкм. В объеме зерен наблюдается субзеренная структура в виде ячеек. Средний размер ячеек 330 нм; размер реально существующих ячеек изменяется в пределах от 130 до 670 нм.

Увеличение плотности энергии пучка электронов до 30 Дж/см^2 сопровождается ростом среднего размера зерна примерно до 8,5 мкм. В объеме зерен в обоих случаях наблюдается структура ячеистой кристаллизации. Увеличение плотности энергии пучка электронов приводит к росту ячеек кристаллизации, средний размер (d) которых при $E_S = 20 \text{ Дж/см}^2$ составил 352 нм, $d_{\min} = 200 \text{ нм}$, $d_{\max} = 800 \text{ нм}$; при $E_S = 30 \text{ Дж/см}^2$, $d = 427 \text{ нм}$, $d_{\min} = 200 \text{ нм}$, $d_{\max} = 800 \text{ нм}$.

Выполненные исследования показали, что независимо от плотности энергии пучка электронов в анализируемом слое формируется многофазная структура. Основной является α -фаза, представленная мартенситом. Наряду с α -фазой обнаруживаются остаточный аустенит, цементит и графит.

При $E_S = 10 \text{ Дж/см}^2$ наряду со структурой ячеистой кристаллизации, содержащей наноразмерные (50 – 70 нм) кристаллы мартенсита, в поверхностном слое выявляются зерна со структурой пакетного мартенсита, поперечные размеры кристаллитов которых изменяются в пределах от 85 до 220 нм.

Одновременно с этим выявляются зерна, в объеме которых присутствуют области микронных размеров, границы которых оконтуриваются кристаллами мартенсита. В объеме таких областей присутствует сетчатая дислокационная субструктура, скалярная плотность дислокаций составляет примерно $10 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Увеличение плотности энергии пучка электронов до $20 - 30 \text{ Дж/см}^2$ приводит к формированию в поверхностном слое морфологиче-

ски и размерно однородной структуры пакетного мартенсита. Размеры пакетов (ячеек кристаллизации) изменяются в пределах 0,8 – 1,0 мкм, поперечные размеры кристаллов мартенсита – в пределах до 100 нм.

При $E_S = 10 \text{ Дж/см}^2$ на глубине около 10 мкм формируется многофазная структура, представленная мартенситом пакетной и пластинчатой морфологии, остаточным аустенитом и цементитом. На глубине приблизительно 100 мкм наблюдается структура, подобная структуре исходного состояния. При $E_S = 30 \text{ Дж/см}^2$ фиксируется устойчивое плавление поверхностного слоя стали. Анализ структурно-фазовых градиентов, формирующихся в стали при этом режиме обработки, показал, что слой на расстоянии 10 – 15 мкм от поверхности облучения находится в зоне контакта стали в жидком и твердом состоянии. Основной фазой исследуемого слоя является α -фаза. Особенностью структуры α -фазы, формирующейся в данном слое, является малый размер зерен, величина которых изменяется в пределах от 0,8 до 1,5 мкм. В слое на глубине приблизительно 40 мкм от поверхности обработки формируется многофазная структура, представленная α - и γ -фазами, а также цементитом.

Весьма часто в исследуемом слое выявляются зерна перлита и «псевдоперлита», в объеме которых фиксируются различные стадии термического разрушения пластин цементита и реализации процесса $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. В стыках и вдоль границ зерен псевдоперлита располагаются частицы цементита глобулярной морфологии; размеры частиц изменяются в пределах от 15 до 25 нм. В объеме таких зерен и субзерен присутствуют кристаллы пакетного мартенсита, поперечные размеры которых изменяются в пределах 30 – 50 нм.

Усталостные испытания стали выявили зависимость долговечности материала от плотности энергии пучка электронов E_S (рис. 1, кривая 1). Отчетливо видно, что максимальный эффект (увеличение усталостной долговечности стали примерно в 2,5 раза) наблюдается при $E_S = 20 \text{ Дж/см}^2$.

Наиболее ярко процесс порообразования проявляется при исследовании поверхности разрушения стали, обработанной электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см^2 . Размеры пор в этом случае изменяются в пределах от 1 до 6 мкм. В стали, обработанной электронным пучком при большей ($20 - 30 \text{ Дж/см}^2$) плотности энергии пучка, размеры пор существенно меньше и составляют 0,3 – 1,0 мкм. Строчки, формируемые порами, выражены менее явно, располагаются на

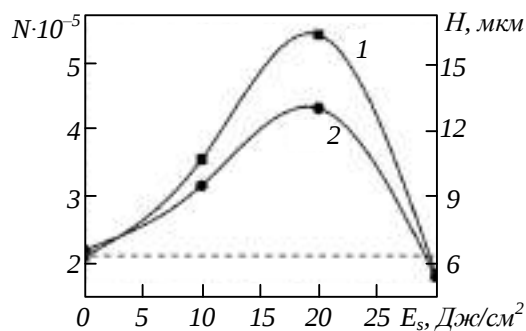


Рис. 1. Зависимость от плотности энергии пучка электронов E_s числа циклов до разрушения N (кривая 1) и толщины H поверхностного слоя, отделенного от основы микропорами (кривая 2). Штриховой линией отмечена величина усталостной долговечности стали в исходном (до обработки электронным пучком) состоянии

Fig. 1. Dependence on the electron beam energy density E_s of the number of cycles to fracture N (curve 1) and the thickness H of the surface layer separated from the base by micropores (curve 2). The dotted line marks the value of the fatigue life of steel in the initial state (before processing with an electron beam)

определенном расстоянии от поверхности облучения, коррелируя с изменением усталостной долговечности стали (рис. 1, кривая 2).

Сопоставляя результаты исследования структуры стали, выявленные методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, можно отметить, что порообразование в стали, обработанной электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см², протекает в слое, разделяющем поверхностный слой, упрочненный вследствие формирования мартенситной структуры, и основной объем стали с феррито-перлитной структурой. Граница раздела данных слоев проходит преимущественно по границе раздела зерен и, следовательно, является относительно плоской, предрасположенной к формированию мощных концентраторов напряжений, релаксация которых сопровождается растрескиванием упрочненного слоя.

В стали, обработанной электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 20 Дж/см², слой, в котором наблюдается порообразование, располагается преимущественно на границе раздела слоя кристаллизации и слоя термического влияния (рис. 2). Слой кристаллизации имеет столбчатую структуру с субмикрокристаллическим поперечным размером столбиков. Следовательно, граница раздела упрочненный слой – основа имеет зубчатый или игольчатый профиль. Последнее, согласно результатам работ школы академика В.Е. Панина, приводит к диспергированию концентраторов напряжений и способствует более однородному пластическому течению в под-

ложке, многократно (примерно в 2,5 раза) повышая усталостную долговечность стали.

Электронно-пучковая обработка стали при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см² сопровождается формированием протяженного упрочненного слоя, концентраторы напряжения в котором формируются в слое высокоскоростной кристаллизации. На это указывает цепочка пор, располагающихся в слое на глубине 6 – 8 мкм. Исследования структуры стали методом тонких фольг, расположенных на данной глубине, выявили высокий уровень внутренних полей напряжений, релаксация которых приводит к формированию многочисленных микротрещин при утонении пластинки в процессе приготовления фольги. Следовательно, основной причиной низкого уровня усталостной долговечности стали, обработанной электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см², являются остаточные напряжения, формирующиеся в упрочненном слое.

Выводы

Показано, что облучение рельсовой стали высокоинтенсивным электронным пучком сопровождается плавлением поверхностного слоя и формированием структуры ячеистой кристаллизации. Выявлено расслоение поверхностного слоя стали по углероду с образованием в стыках ячеек кристаллизации частиц графита при высокоскоростной кристаллизации, инициированной обработкой высокоинтенсивным электронным пучком.

Выявлен градиентный характер структуры, формирующейся в поверхностном слое стали, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком. Показано, что в условиях высокоскоростного нагрева и охлаждения в режиме оплавления в поверхностном (0,5 – 1,0 мкм) слое стали формируется микронеоднородное структурно-фазовое состояние, представленное зернами α -фазы с ячейками кристаллизации, в объеме которых образуются кристаллы мартенсита наноразмерного диапазона, и зернами α -фазы с кристаллами мартенсита субмикронного диапазона.

Выявлен режим облучения высокоинтенсивным электронным пучком, позволяющий примерно в 2,5 раза увеличить усталостную долговечность стали Э76Ф. Показано, что преимущественным местом формирования концентраторов напряжений в облученной электронным пучком стали является граница раздела слоя высокоскоростной кристаллизации и слоя термического влияния (дно ванны расплава). Установлено, что увеличение усталостной

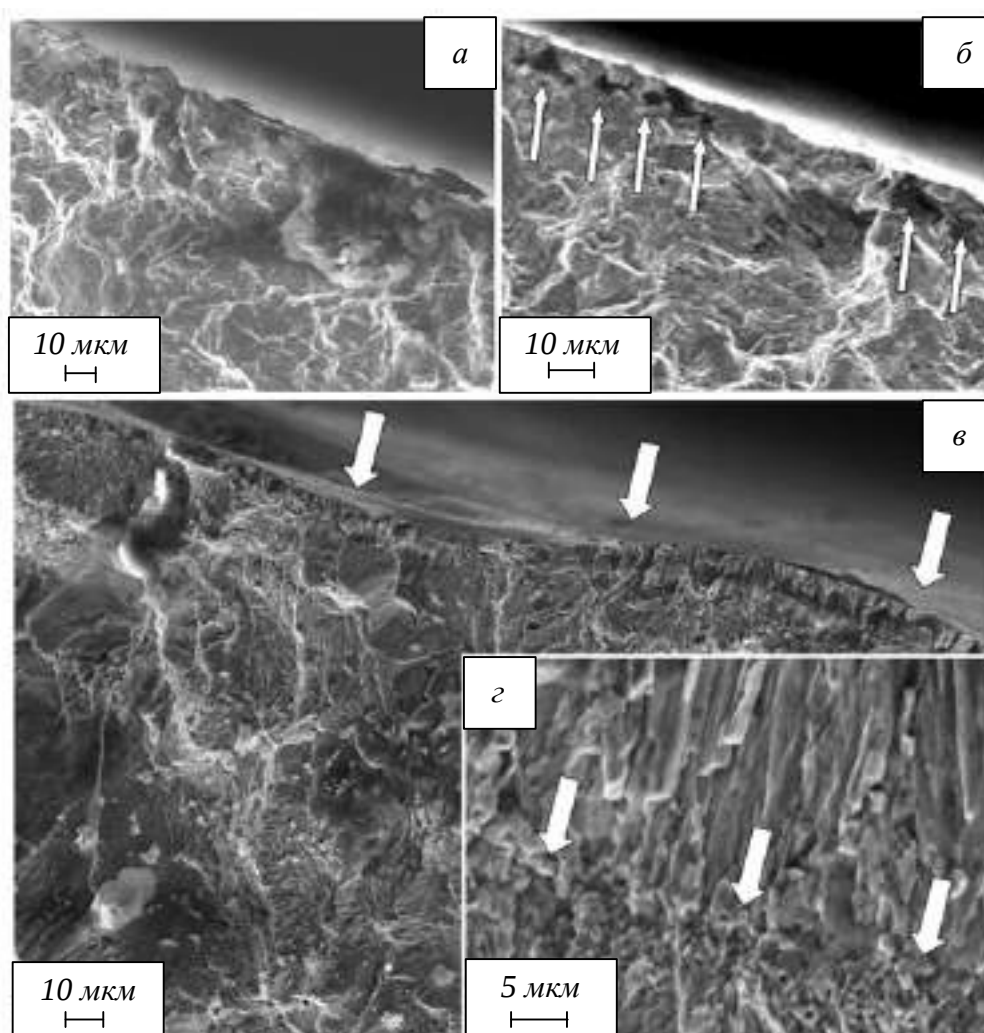


Рис. 2. Поверхность усталостного разрушения рельсовой стали в исходном состоянии (а) и после облучения электронным пучком при $E_S = 10 \text{ Дж/см}^2$ (б) и $E_S = 20 \text{ Дж/см}^2$ (в, з). На поз. б стрелками показаны поры, расположенные в подповерхностном слое; на поз. в – поверхность, подвергнутая облучению; на поз. з – переходный слой, разделяющий зону кристаллизации и зону термического влияния

Fig. 2. Fatigue fracture surface of rail steel in the initial state (a) and after electron beam irradiation at $E_S = 10 \text{ J/cm}^2$ (б) and $E_S = 20 \text{ J/cm}^2$ (в, з). On pos. б the arrows show the pores located in the subsurface layer; in pos. в – the surface exposed to radiation; in pos. з is the transition layer separating the crystallization zone and the thermal influence zone

долговечности стали, облученной электронным пучком, обусловлено формированием игольчатого профиля границы раздела, приводящего к диспергированию концентраторов напряжений и способствующего более однородному пластическому течению в подложке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Manufacturing Techniques for Materials: Engineering and Engineered. London: CRC Press and Taylor & Francis Inc., 2018. 518 p.
2. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Сизов В.В., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Увеличение усталостной долговечности стали электронно-пучковой обработкой поверхности // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 1. С. 99–104.
3. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Сизов В.В., Воробьев С.В., Базайкин В.И. Увеличение усталостной долговечности нержавеющей стали электронно-пучковой обработкой // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2012. № 1. С. 66–75.
4. Коновалов С.В., Воробьев С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Комиссарова И.А., Кобзарева Т.Ю. Роль обработки электронными пучками в изменении структуры и фазового состава сталей и сплавов, подвергаемых испытаниям на многоцикловую усталость // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 8. С. 95–97.
5. Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, К.В. Аксё-

нова, Т.Ю. Кобзарева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 249 с.

REFERENCES

1. *Advances in Manufacturing Techniques for Materials: Engineering and Engineered*. London: CRC Press and Taylor & Francis Inc., 2018, 518 p.
2. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Sizov V.V., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Increasing the fatigue life of steel by electron beam surface treatment. *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*. 2013, no. 1, pp. 99–104. (In Russ.).
3. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Sizov V.V., Vorob'ev S.V., Bazaikin V.I. Increasing the fatigue life of stainless steel by electron beam processing. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2012, no. 1, pp. 66–75. (In Russ.).
4. Konovalov S.V., Vorob'ev S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Komissarova I.A., Kobzareva T.Yu. The role of electron beam processing in changing the structure and phase composition of steels and alloys subjected to multicycle fatigue tests. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2015, no. 8, pp. 95–97. (In Russ.).
5. Gromov V.E., Konovalov S.V., Aksenova K.V., Kobzareva T.Yu. *Evolution of the structure and properties of light alloys under energy influences*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2016, 249 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Владимир Анатольевич Гришунин, к.т.н., доцент кафедры транспорта и логистики, проректор по управлению имуществом, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: vladimir.grishunin@mail.ru

Олег Александрович Перегудов, к.т.н., помощник ректора по молодежной политике, Омский государственный технический университет
Email: olegomgtu@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5154-5498

Василий Евгеньевич Кормышев, к.т.н., старший научный сотрудник Управления

научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: 89236230000@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Антон Алексеевич Юрьев, к.т.н., менеджером по управлению продуктами и ресурсами, АО «ЕВРАЗ – объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
Email: ant-yurev@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН
Email: yufi55@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8022-7958

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Елена Владимировна Мартусевич, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: martusevich_ev@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Information about the authors

Vladimir A. Grishunin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Transport and Logistics, Vice-Rector for Property Complex Management, Siberian State Industrial University
Email: vladimir.grishunin@mail.ru

Oleg A. Peregudov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Rector for Youth Policy, Omsk State Technical University
Email: olegomgtu@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5154-5498

Vasilii E. Kormyshev, *Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Scientific Researches, Siberian State Industrial University*
Email: 89236230000@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Anton A. Yuriev, *Sci. (Eng.), Product and resource manager, JSC «EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant»*
Email: ant-yurev@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Yurii F. Ivanov, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation*
Email: yufi55@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8022-7958

Viktor E. Gromov, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named*

after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: gromov@physics.sibsui.ru

Elena V. Martusevich, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University*
Email: martusevich_ev@physics.sibsui.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

© 2022 г. *В.А. Гришунин, О.А. Перегудов, В.Е. Кормышев, А.А. Юрьев, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Е.В. Мартусевич*
Поступила в редакцию 01.02.2022 г.

УДК 621.789:538.911

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ СПЛАВА АК5М2 ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ТИТАНОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

А. А. Серебрякова, Д. В. Загуляев, Ю. А. Шлярова, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов

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

Аннотация. Методами рентгенофазового анализа исследованы параметры кристаллической решетки и фазовый состав образцов сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком. Методами сканирующей электронной микроскопии исследована дефектная субструктура образцов. На основании проведенных испытаний образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном, выявлены оптимальные режимы электронно-пучковой обработки, приводящие к формированию в поверхностном слое сплава структуры с повышенными механическими свойствами.

Ключевые слова: сплав АК5М2, напыление пленки титана, электронно-пучковая обработка, предел прочности, предел текучести, параметр кристаллической решетки

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10059).

Для цитирования: Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Исследование параметров кристаллической решетки, фазового состава и структуры сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 1 (39). С. 63 – 68.

LATTICE, PHASE COMPOSITION AND STRUCTURE OF THE AK5M2 ALLOY SURFACE-MODIFIED WITH TITANIUM AND SUBSEQUENT ELECTRON BEAM IRRADIATION

A. A. Serebryakova, D. V. Zagulyaev, Yu. A. Sklyarova, Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov

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

Abstract. The parameters of the crystal lattice and the phase composition of the AK5M2 alloy samples surface-modified with titanium, followed by electron beam irradiation, were studied by X-ray phase analysis. The defective substructure of the samples was investigated by scanning electron microscopy. Based on the conducted tests of the AK5M2 alloy samples, surface-modified with titanium, optimal modes of electron beam processing were identified, leading to the formation of the structure characterized by improved mechanical properties in the alloy surface layer.

Keywords: AK5M2 alloy, titanium film deposition, electron beam processing, tensile strength, yield strength, crystal lattice parameter

Financing. The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 19-79-10059).

For citation: Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Lattice, phase composition and structure of the AK5M2 alloy surface-modified with titanium and subsequent electron beam irradiation. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 1 (39), pp. 63 – 68. (In Russ.).

Введение

В настоящее время в области физического материаловедения уделяется большое внимание повышению прочностных свойств металлов и сплавов за счет обработки концентрированными потоками энергии [1, 2]. К методам модифицирования поверхностных свойств относятся легирование поверхностного слоя напылением пленки, ионные пучки, обработка при помощи плазмы и ультразвука. Одним из наиболее оптимальных методов, является электронно-пучковая обработка (ЭПО) [3 – 5]. Она по сравнению с остальными методами модифицирования имеет ряд преимуществ (высокую энергетическую эффективность, более высокую однородность плотности энергии по сечению потока, хорошую воспроизводимость импульсов и высокую частоту их следования).

Модифицирование поверхностного слоя также возможно с помощью напыления тонкой пленки на поверхность материала и последующего переплавления пленки с поверхностным слоем (подложкой) вакуумно-дуговым методом [6]. Исходя из результатов современных исследований [7 – 11], наибольшего эффекта в модифицировании поверхностных слоев металлов и сплавов можно достигнуть благодаря комплексной обработке и комбинированию методов энергетических воздействий. Одним из видов комплексной обработки является комбинирование легирования путем нанесения пленки на поверхность исследуемого материала методом ионно-плазменного напыления с последующим переплавлением модифицированного слоя электронным пучком. Применение таких инновационных методов обработки позволяет повысить прочностные свойства поверхности материалов и сплавов, а, следовательно, и улучшить прочностные свойства изготовленных из них деталей.

В связи с вышеперечисленным, настоящая работа является актуальной, так как ее цель состоит в исследовании влияния облучения электронным пучком сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном, а именно на изменение структуры поверхности, фазового состава и параметров кристаллической решетки.

Методы и принципы исследования

В качестве материала исследований использован сплав АК5М2, образцы в форме пропорциональных лопаток (толщина 2,48 мм; ширина 9,1 мм; длина рабочей части 15,0 мм).

Формирование композитного материала происходило вакуумно-дуговым методом на автоматизированной вакуумной ионно-плазменной установке «КВИНТА» [11]. На образцы сплава АК5М2 напыляли пленку титана толщиной 0,5 –

1,0 мкм с помощью дугового испарителя при следующих параметрах процесса: образцы располагали напротив дугового испарителя, напыление проводили без вращения образца, ток дугового испарителя $I_d = 80$ А (ток электродинамической стойкости); $I_n = 20$ А (пусковой ток); $I_H = 135$ А (номинальный ток); $\gamma = 75$ %; $U_{cm} = 35$ В; $p = 0,3$ Па; $t = 10$ мин.

Образцы облучали при разной плотности энергии пучка электронов E_s : режимы 1 – 5 при 10, 20, 30, 40, 50 Дж/см².

Исследования поверхности разрушения проводили методами сканирующей электронной микроскопии [12], используя прибор Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV. Исследования фазового состава и параметров кристаллической решетки проводили методами рентгенофазового анализа [13] с использованием дифрактометра Shimadzu XRD 6000.

Основные результаты

Результаты рентгенофазового анализа

Качественный и количественный фазовый состав, выявленные методами рентгенофазового анализа, показывают разнообразное распределение элементов на поверхности материала в зависимости от режима обработки.

Основными фазами в исходном состоянии сплава АК5М2 являются алюминий, кремний и Si_3N_4 . Облучение сплава АК5М2 импульсным электронным пучком сопровождается изменением параметра кристаллической решетки фазы алюминия.

В результате рентгенофазового анализа сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком (режим 1), выявлен состав, представленный фазами алюминия, кремния и титана. При режиме 2 фазовый состав представлен алюминием, титаном и фазой Al_3Ti . При повышении плотности энергии пучка электронов (режим 3) выявлены фазы Al и Al_3Ti . При дальнейшем увеличении плотности энергии пучка электронов (режим 4) фазовый состав представлен исключительно фазой алюминия. При исследованиях образца после ЭПО (режим 5) были обнаружены фазы Al и Al_3Ti , а также фаза CuO.

Для фаз Al и Al_3Ti методами рентгенофазового анализа были определены параметры кристаллической решетки сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком. Выявлены изменения по сравнению с исходным литым состоянием сплава АК5М2 (рис. 1).

Представлено изменение параметра кристаллической решетки фазы алюминия в зависимости от режима ЭПО (рис. 1, а). Из полученных дан-

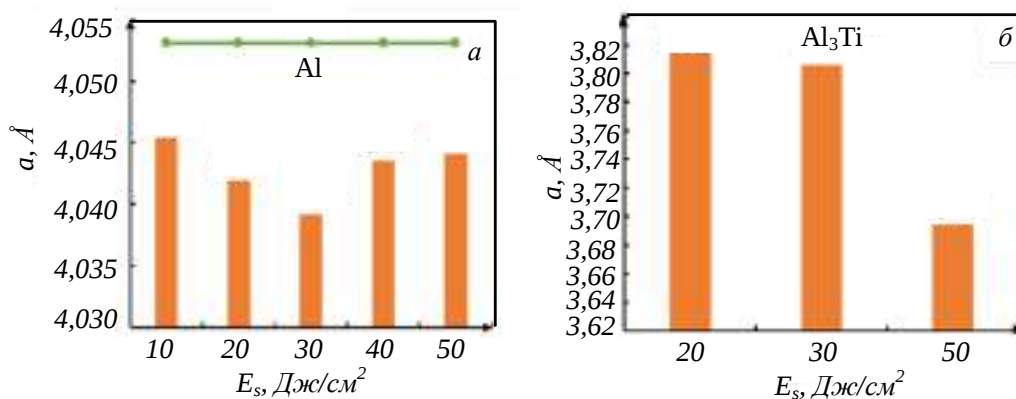


Рис. 1. Параметры кристаллической решетки фаз Al (а) и Al₃Ti (б)
Fig. 1. Parameters of the crystal lattice of phases Al (a) and Al₃Ti (b)

ных видно, что в литом состоянии параметр кристаллической решетки $a = 4,0531$ Å. Далее при применении ЭПО значения показывают уменьшение размера постоянной решетки по всем режимам. Наименьший размер ($a = 4,0392$ Å) постоянной решетки выявлен при режиме 3. При уменьшении размера параметра кристаллической решетки происходит уплотнение структуры кристаллической решетки, что в свою очередь может привести к изменениям свойств исследуемого материала.

На рис. 1, б представлена динамика параметра кристаллической решетки фазы Al₃Ti, которая выявляется только в трех из пяти режимов обработки. Как показано на диаграмме, образованию фазы Al₃Ti способствуют режимы ЭПО при $E_s = 20$ Дж/см² ($a = 3,8148$ Å), $E_s = 30$ Дж/см² ($a = 3,8054$ Å) и $E_s = 50$ Дж/см² ($a = 3,6942$ Å). Наблюдается обратно пропорциональная связь параметра кристаллической решетки a со значением плотности энергии пучка электронов E_s . С увеличением E_s происходит уменьшение параметра кристаллической решетки фазы Al₃Ti.

Результаты сканирующей электронной микроскопии

Результаты сканирующей электронной микроскопии позволили провести анализ структуры поверхности образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном. Характерные изображения структуры поперечных шлифов и поверхности образца исследуемого сплава демонстрируют морфологически разнообразный характер материала (рис. 2, 3). Рассмотрим подробнее изображения по каждому режиму обработки.

На рис. 2 представлено изображение, полученное методами СЭМ-анализа поперечного шлифа образца сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном.

Образцы были обработаны электронным пучком по пяти режимам с повышением плотности

пучка электронов от 10 до 50 Дж/см² (рис. 2). С увеличением плотности пучка энергии электронов, структура образца становится более однородной (рис. 2, в, г). При меньших значениях плотности пучка электронов в структуре наблюдается большее количество интерметаллидов (рис. 2, б) и микропор (рис. 2, а).

На рис. 3 представлены результаты СЭМ-анализа поверхности сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком.

Образцы также были обработаны электронным пучком с различной плотностью по пяти установленным режимам. На рис. 3, а, б представлена поверхность композитного материала с каплями светло-серого и белого цветов, а также микрократерами. Анализ этих элементов показывает, что это слой пленки, состоящий из атомов титана, который под воздействием ЭПО 10 и 20 Дж/см² начинает постепенно растворяться в слое подложки.

На рис. 3, в представлена поверхность после облучения электронным пучком 30 Дж/см². Можно отметить отсутствие капельной фракции титана на поверхности, структура стала однородной. На рис. 3, г, д демонстрируется состояние поверхности композитного материала после ЭПО с плотностью пучка 40 и 50 Дж/см². Можно отметить появление крупных трещин, причиной которых может быть переплавление материала вследствие нагрева до высокой температуры в процессе ЭПО, а также резкое охлаждение материала после обработки.

Выводы

Установлено, что параметр кристаллической решетки фазы алюминия неоднозначно зависит от плотности энергии пучка электронов. При увеличении E_s происходит монотонное снижение параметра кристаллической решетки с достижением минимума при $E_s = 30$ Дж/см², дальнейшее увеличение приводит к возрастанию параметра a

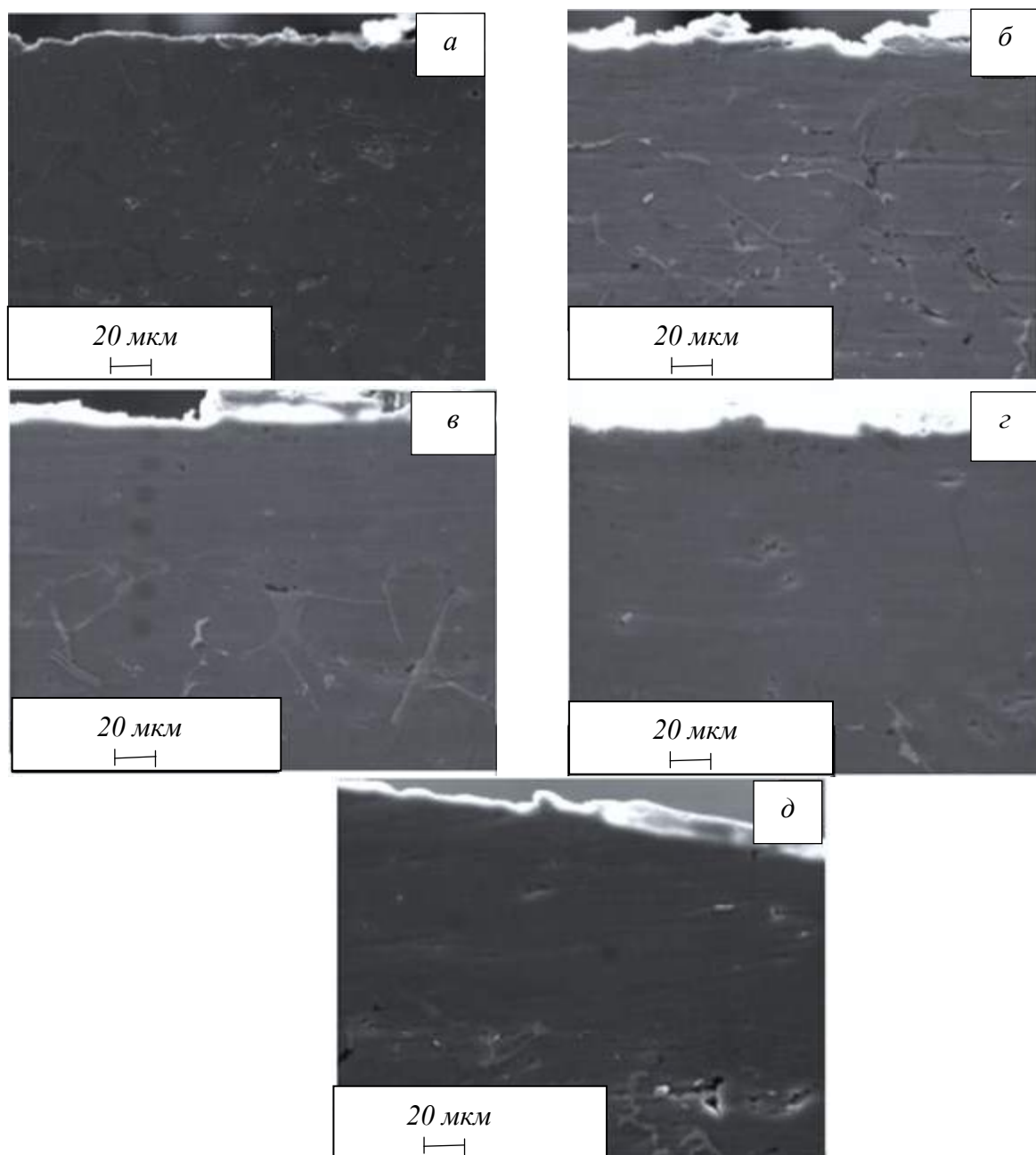


Рис. 2. Структуры поперечных шлифов образцов сплава АК5М2 поверхностно модифицированного титаном

Fig. 2. Structures of transverse sections of AK5M2 alloy samples surface-modified with titanium

при $E_S = 50 \text{ Дж/см}^2$. Параметр кристаллической решетки фазы Al_3Ti обратно пропорционально зависит от плотности пучка электронов (с увеличением E_S происходит снижение параметра решетки фазы Al_3Ti).

Выявлено, что режимы облучения 1 и 2 являются недостаточными по величине плотности пучка энергии электронов для формирования эффективного поверхностного слоя. Режимы 4 и 5 приводят к переплавлению материала, появляется большее количество трещин и микропор, что в свою очередь приводит к разрушению материала. Установлен оптимальный режим электронно-пучковой обработки – 3 ($E_S = 30 \text{ Дж/см}^2$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова и др. Минск: Беларус. Навука, 2013. 287 с.
2. Волочко А.Т. Модифицирование эвтектических и первичных частиц кремния в силуминах. Перспективы развития // Литье и металлургия. 2015. № 4. С. 39–45.
3. Ren X., Wang R., Wei D., Huang Y., Zhang H. Study on surface alloying of 38CrMoAl steel by electron beam // Nuclear Instruments and

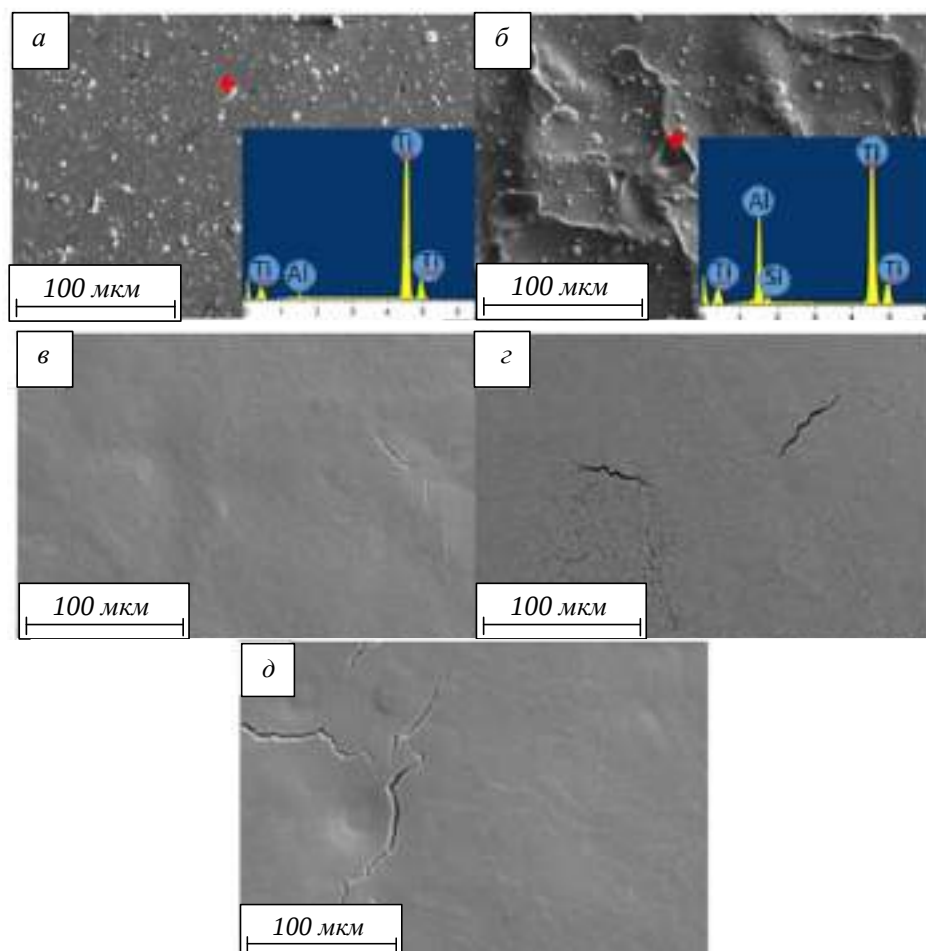


Рис. 3. Структура сплава АК5М2 поверхностно модифицированного титаном после ЭПО
 Fig. 3. Structure of the AK5M2 alloy surface-modified with titanium, followed by electron beam irradiation according to five EPO modes

- Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2021. No. 505. P. 44–49.
4. Xu F., Tang G., Guo G., Ozur G. Influence of irradiation number of high current pulsed electron beam on the structure and properties of M50 steel // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010. No. 15. P. 2395–2399.
 5. Белов А.Б., Быценко О.А., Крайников А.В. Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения / Под общ. ред. А.С. Новикова, В.А. Шулова, В.И. Энгелько. М.: Дипак, 2012. 292 с.
 6. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / Под общ. ред. Н.Н. Ковалю, Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 312 с.
 7. Barrirero J. Eutectic Modification of Al–Si casting alloys. Materials Science. 2019. 113 p.
 8. Федун В., Коляда Ю. Динамика фазовых превращений при поверхностной модификации металлов и сплавов электронным пучком // Вопросы атомной науки и техники. 2010. № 7. С. 316–320.
 9. Bratushka S., Malikov L.V. Ion-plasma modification of titanium alloys // Problems of Atomic Science and Technology. 2021. P. 126–140.
 10. Andrianova N., Borisov A., Krit B., Mashkova E., Ovchinnikov M., Timofeev M., Umarov F. Ion-plasma modification of the surface of light fiber materials // Journal of Physics: Conference Series. 2020. No. 1713. P. 012006.
 11. Ivanov Yu., Klopotov A., Potekae A., Koval N., Vlasov V. Electron-ion-plasma modification of the structure and properties of commercial steels // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. No. 168. P. 012070.
 12. Inkson B.J. Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization // Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods Elsevier Ltd. 2016. P. 17–43.
 13. Publisher B. Fundamentals of X-Ray Phase Analysis // Multifunctional two-and three-dimensional polycrystalline x-ray diffractometry. 2012. P. 34–41.

REFERENCES

1. Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A. et al. *Modification of the structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma treatment*. Minsk: Belarus. Navuka, 2013, 287 p. (In Russ.).

2. Volochko A.T. Modification of eutectic and primary silicon particles in silumins. Prospects of development. *Lit'e i metallurgiya*. 2015, no. 4, pp. 39–45. (In Russ.).
3. Ren X., Wang R., Wei D., Huang Y., Zhang H. Study on surface alloying of 38CrMoAl steel by electron beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2021, no. 505, pp. 44–49.
4. Xu F., Tang G., Guo G., Ozur G. Influence of irradiation number of high current pulsed electron beam on the structure and properties of M50 steel. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2010, no. 15, pp. 2395–2399.
5. Belov A.B., Bytsenko O.A., Krainikov A.V.; Novikov A.S., Shulov V.A., Engel'ko V.I. ed. *High-current pulsed electron beams for aircraft engine building* / M.: Dipak, 2012, 292 p. (In Russ.).
6. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. ed. *Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys*. Tomsk: Izd-vo NTL, 2016, 312 p. (In Russ.).
7. Barrirero J. Eutectic Modification of Al–Si casting alloys. *Materials Science*. 2019. 113 p.
8. Fedun V., Kolyada Yu. Dynamics of phase transformations during surface modification of metals and alloys by an electron beam. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki*. 2010, no. 7, pp. 316–320. (In Russ.).
9. Bratushka S., Malikov L.V. Ion-plasma modification of titanium alloys. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021, pp. 126–140.
10. Andrianova N., Borisov A., Krit B., Mashkova E., Ovchinnikov M., Timofeev M., Umarov F. Ion-plasma modification of the surface of light fiber materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, no. 1713, pp. 012006.
11. Ivanov Yu., Klopotov A., Potekaev A., Koval N., Vlasov V. Electron-ion-plasma modification of the structure and properties of commercial steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, no. 168, pp. 012070.
12. Inkson B.J. Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods Elsevier Ltd*. 2016, pp. 17–43.
13. Publisher B. Fundamentals of X-Ray Phase Analysis. *Multifunctional two-and three-dimensional polycrystalline x-ray diffractometry*. 2012, pp. 34–41.

Сведения об авторах

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

Дмитрий Валерьевич Загуляев, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Юлия Андреевна Шлярова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, Институт сильноточной электроники СО РАН
E-mail: yufi55@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Information about the authors:

Anna A. Serebryakova, Post-graduate student of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: aserebrakova87@gmail.com

Dmitry V. Zagulyaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Yulia A. Shklyarova, postgraduate student of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Yuri F. Ivanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of High-Current Electronics SB RAS
E-mail: yufi55@mail.ru

Viktor E. Gromov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

© 2022 г. А.А. Серебрякова, Д.В. Загуляев, Ю.А. Шлярова, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов
 Поступила в редакцию 01.02.2022 г.

УДК 536.425:539.25:539.351

ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CoCrFeMnNi ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Ю. Ф. Иванов¹, С. В. Коновалов², С. В. Воробьев³, Ю. А. Шлярова³, В. Е. Громов³,
А. П. Семин³, А. В. Кириллова²

¹Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

³Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. По технологии проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) был получен высокоэнтропийный сплав (ВЭС) CoCrFeMnNi неэквимоного состава. Методами сканирующей электронной микроскопии исследована структура поверхности разрушения образцов ВЭС в исходном состоянии и после облучения импульсным электронным пучком (плотность энергии пучка электронов 10 – 30 Дж/см²; длительность 50 мкс; количество импульсов 3; частота следования импульсов 0,3 Гц). Исследование поверхности разрушения высокоэнтропийных сплавов после электронно-пучковой обработки (ЭПО) кроме областей с вязким механизмом разрушения выявило области с полосовой (пластинчатой) структурой. Площадь с полосовой структурой увеличивается с ростом плотности пучка электронов от 25 (10 Дж/см²) до 65 % (30 Дж/см²). Диаметр ямок отрыва в полосах разрушения изменяется в пределах 0,1 – 0,2 мкм, что значительно меньше размера ямок отрыва остальной части образца ВЭС. Толщина расплавленного слоя после ЭПО изменяется в пределах 0,8 – 5,0 мкм и увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов. Средний размер ячеек кристаллизации, сформированных при ЭПО, зависит от плотности энергии пучка электронов и увеличивается от 310 (15 Дж/см²) до 800 нм (30 Дж/см²).

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, электронно-пучковая обработка, структура, поверхность разрушения

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РНФ проект 2019-00452.

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Воробьев С.В., Шлярова Ю.А., Громов В.Е., Семин А.П., Кириллова А.В. Изменение поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CoCrFeMnNi после электронно-пучковой обработки // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 1 (39). С. 69 – 74.

CHANGES IN THE FRACTURE SURFACE OF A HIGH-ENTROPY CoCrFeMnNi ALLOY AFTER ELECTRON BEAM PROCESSING

Yu. F. Ivanov¹, S. V. Konovalov², S. V. Vorob'ev³, Yu. A. Shlyarova³,
V. E. Gromov³, A. P. Semin³

¹Institute of High Current Electronics, SB RAS (2/3 Akademicheskii ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

²Samara National Research University (34 Moskovskoe route, Samara 443086, Russian Federation)

³Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. Using the technology of wire-arc additive manufacturing (WAAM), a high-entropy alloy (HEA) CoCrFeMnNi of non-equiatom composition was obtained. Using scanning electron microscopy, the structure of the destruction surface of HEA samples in the initial state and after irradiation with a pulsed electron beam with the following parameters was studied: electron beam energy density 10–30 J/cm², duration 50 μs, number of pulses 3, pulse repetition rate 0,3 Hz. The study of the destruction surface of the HEA after EPO, in addition to

areas with a viscous mechanism of destruction, revealed areas with a strip (lamellar) structure. The area with a band structure increases with an increase in the electron beam density from 25 % at 10 J/cm² to 65 % at 30 J/cm². The diameter of the separation pits in the fracture bands varies within 0.1–0.2 μm, which is much smaller than the size of the separation pits in the rest of the HEA sample. After EPO, the thickness of the molten layer varies within (0.8–5.0) μm and increases with increasing energy density of the electron beam. The average size of crystallization cells formed during EPO depends on the energy density of the electron beam and increases from 310 nm at 15 J/cm² to 800 nm at 30 J/cm².

Keywords: high-entropy alloy, electron-beam processing, structure, fracture surface

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation grant project 2019-00452.

For citation: Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Vorob'ev S.V., Shlyarova Yu.A., Gromov V.E., Semin A.P. Changes in the fracture surface of a high-entropy CrMnFeCoNi alloy after electron beam processing. *Bulletin of SibSIU*. 2022. No. 1 (39), pp. 69 – 74. (In Russ.).

Введение

В последние годы внимание ученых привлекает новая система сплавов, известная как высокоэнтропийные сплавы (ВЭС). В отличие от традиционных сплавов высокоэнтропийные состоят из пяти и более основных элементов с процентным содержанием от 5 до 35 % (ат.).

Оригинальные результаты, полученные при изучении ВЭС, подробно рассмотрены в работах [1 – 6], в которых описаны микроструктура, свойства, термодинамика ВЭС, рассмотрены результаты моделирования их структуры и обсуждены новые варианты методов получения многокомпонентных сплавов. Исследования ВЭС показали, что в них возможно формирование наноразмерных структур и даже аморфных фаз вследствие значительных искажений решетки, обусловленных различием атомных радиусов элементов замещения [1, 5]. Одним из первых исследуемых высокоэнтропийных материалов является сплав CoCrFeMnNi, который способен сохранять гранецентрированную кубическую структуру в широком диапазоне температур, а также обладает хорошим балансом прочности и пластичности.

Электронно-пучковая обработка является одним из перспективных методов поверхностной модификации металлических материалов, приводящих к значительному увеличению механических свойств всего материала за счет оптимизации структуры его поверхностного слоя. Характеристики металлов и сплавов, подвергнутых облучению электронным пучком, могут вырасти в 20 раз, что значительно превышает эффективность традиционных видов обработки. В процессе облучения пучки электронов высокой плотности за чрезвычайно короткий промежуток времени вызывают различные явления в поверхностном слое, такие как высокоскоростная рекристаллизация, сглаживание поверхности и отжиг. Электронно-пучковая обработка может вызывать пластиче-

скую деформацию приповерхностного слоя, что приводит к образованию дислокаций с высокой плотностью и значительному улучшению свойств [7]. Электронно-пучковая обработка обеспечивает сверхвысокие скорости нагрева (до 10⁶ К/с) поверхностного слоя до заданных температур и охлаждение за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростями 10⁴ – 10⁹ К/с, в результате чего в поверхностном слое образуются неравновесные субмикро- и нанокристаллические структурно-фазовые состояния. Ранее было показано, что электронно-пучковая обработка приводит к гомогенизации химического состава высокоэнтропийного сплава системы CoCrFeAlNi [8].

Целью настоящей работы является исследование структурно-фазового состояния дефектной субструктуры, поверхности разрушения и свойств высокоэнтропийного сплава CoCrFeMnNi, подвергнутого электронно-пучковой обработке.

Материал и методы исследования

В качестве материала исследования был использован высокоэнтропийный сплав (ВЭС) элементного состава CoCrFeMnNi. Сплав был изготовлен методом электродуговой аддитивной технологии (WAAM) [5]. Изготовление образцов ВЭС осуществлялось послойным нанесением на подложку из стали марки 12X18H10T с помощью технологии проволоочно-дугового аддитивного производства в атмосфере инертного газа (99,99 % Ar). Использовался следующий режим нанесения слоев: скорость подачи проволоки 13 м/мин, напряжение 22 В, скорость движения горелки 0,1 м/мин. Полученный образец высокоэнтропийный сплав имел размеры 140×20×30 мм и представлял собой параллелепипед, состоящий из семи наплавленных слоев в высоту и четырех слоев в толщину. Испытания на растяжение осуществляли на плоских пропорциональных образцах в виде двухсторонних лопаток в соответствии с ГОСТ 1497 – 84. Образцы вырезали из массивной заготовки методами

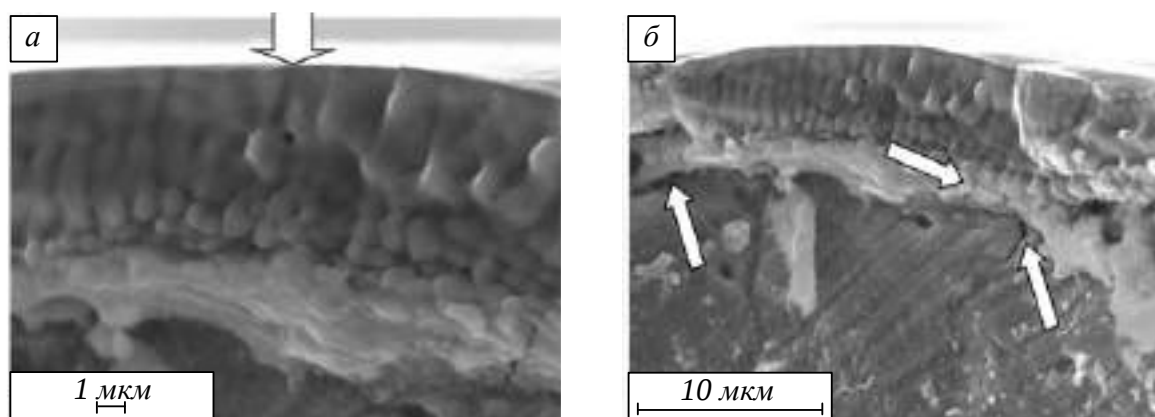


Рис. 1. Структура кристаллизации поверхностного слоя ВЭС, выявленная при анализе поверхности разрушения сплава (стрелкой указана поверхность облучения (а) и микротрещины и микропоры (б))

Fig. 1. The structure of crystallization of the HEA surface layer, revealed in the analysis of the fracture surface of the alloy (the arrow indicates the irradiation surface (a) and microcracks and micropores (b))

электроэрозионной резки. Перед испытаниями образцы имели следующие размеры: толщина 1,05 мм; ширина 4,4 мм; длина рабочей части 8,0 мм. Часть образцов облучали с двух сторон (рабочая часть) на установке СОЛЮ, разработанной и изготовленной в Институте сильноточной электроники СО РАН [9]. Режимы облучения: плотность энергии E_s пучка электронов 10, 15, 20, 25, 30 Дж/см², длительность импульса пучка 50 мкс; количество импульсов 3; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹. Облучение проводили в среде аргона при остаточном давлении 0,02 Па. Деформацию образцов осуществляли путем одноосного растяжения на установке Instron 3369 (скорость испытаний – 1,2 мм/мин; температура – 22 °С) с автоматической записью кривой растяжения.

Состояние исходных и облученных образцов, а также образцов, разрушенных в результате испытаний на растяжение, изучали методами сканирующей электронной микроскопии (прибор LEO EVO 50 (Carl Zeiss), оснащенный энергодисперсионным анализатором INCA – energy).

Результаты и их обсуждение

Анализ поверхности разрушения образцов, формирующейся при одноосном растяжении, показал, что толщина поверхностного слоя, имеющего ячеистую структуру, составляет примерно 5 мкм. Ячейки имеют форму, близкую к равноосной, и формируют столбчатую структуру (рис. 1). Следует отметить, что формирование структуры высокоскоростной кристаллизации приводит к образованию прослойки микропор вдоль границы раздела модифицированного слоя и основного объема материала, в модифицированном слое и прилегающем к нему объеме сплава фиксируются микротрещины (рис. 1, б).

Электронно-микроскопический анализ поверхности разрушения образцов, наряду с вязким

ямочным характером излома (рис. 2), выявил присутствие в материале микропор, микрорасслоений и пустот (рис. 2, б, в). Весьма часто указанные дефекты материала располагаются на изломе в виде протяженных полос (рис. 2, з). Можно предположить, что такое расположение дефектов обусловлено методом изготовления объемного материала.

Исследования поверхности разрушения образцов, предварительно облученных импульсным электронным пучком, выявили, наряду с областями, разрушенными по вязкому механизму, области материала, при разрушении которых формируется полосовая (пластинчатая) структура (рис. 3).

Полосы разрушения в большинстве случаев пересекают образец от верхней до нижней кромки, располагаются под углом 90 или 45° к поверхности образца. Разрушение образца в полосах также протекает по вязкому механизму. Диаметр ямок отрыва в полосах разрушения изменяется в пределах 0,1 – 0,2 мкм, что почти на порядок меньше диаметра ямок вязкого отрыва остальной части образца (рис. 3).

Выполненные исследования показали, что в образце, не облученном импульсным электронным пучком, полосы разрушения материала не формируются. В облученном сплаве размер области материала, разрушение которого произошло с образованием полосовой структуры, увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов (при $E_s = 10$ Дж/см² области с полосовой структурой занимают примерно 25 % площади излома; при $E_s = 30$ Дж/см² – примерно 65 %). Можно предположить, что формирование полосовой структуры при разрушении ВЭС является одной из причин снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии.

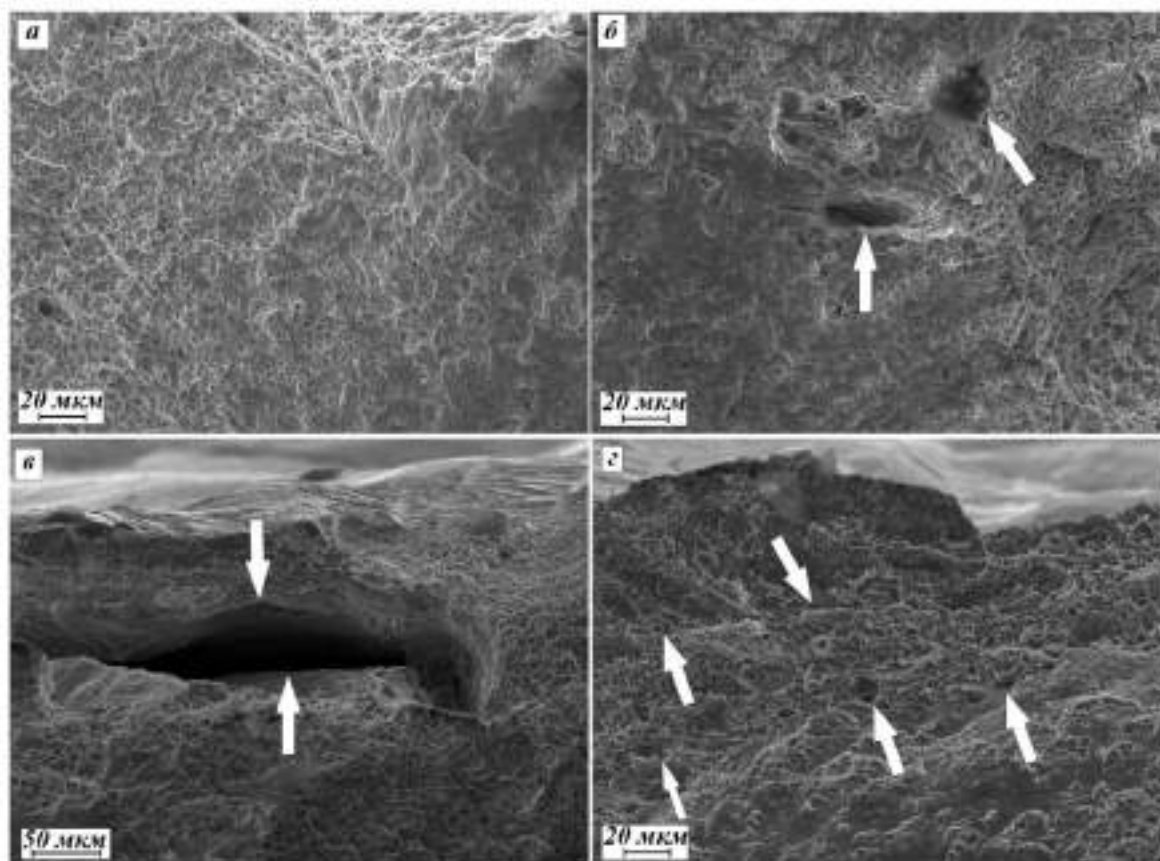


Рис. 2. Поверхность разрушения ВЭС в исходном состоянии:
а – вязкий ямочный излом; *б* – микропоры; *в* – микрорасслоения; *г* – слоистое расположение микропор
 Fig. 2. HEA fracture surface in the initial state:
a – viscous pit fracture; *б* – micropores; *в* – micro-layering; *г* – layered arrangement of micropores

Исследование поверхности разрушения образцов ВЭС позволило оценить толщину расплавленного слоя и рассмотреть состояние пограничного (расплава/твердое тело) слоя, формирующегося при высокоскоростной кристаллизации материала, реализую-

щейся в результате облучения импульсным электронным пучком. Выполненные исследования показали, что толщина расплавленного слоя изменяется в пределах от 0,8 до 5,0 мкм и увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов (рис. 4).

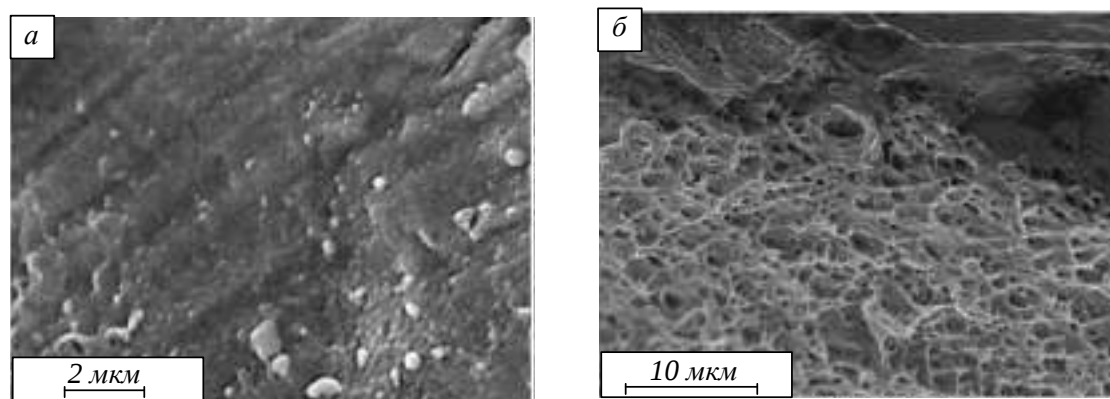


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение поверхности разрушения ВЭС, подвергнутого деформации растяжением (предварительное облучение импульсным электронным пучком при $E_s = 30$ Дж/см²):

а – структура в полосе разрушения; *б* – вне полосы

Fig. 3. Electron microscopic image of the fracture surface of HEA subjected to tensile deformation (preliminary irradiation with a pulsed electron beam at $E_s = 30$ J/cm²):

a – structure in the fracture zone; *б* – outside the zone

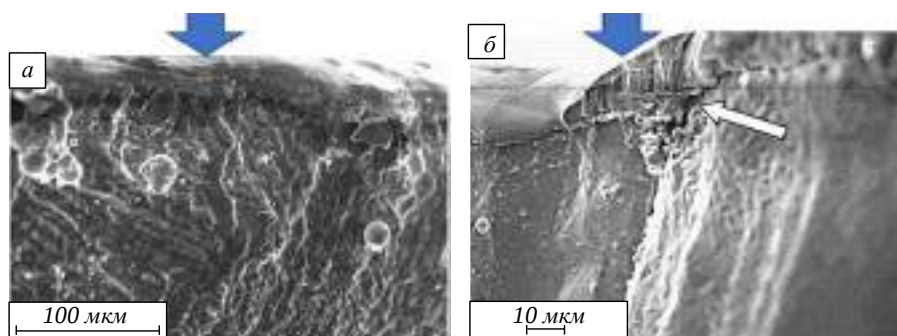


Рис. 4. Структура поверхности разрушения образца, облученного импульсным электронным пучком при $E_s = 20 \text{ Дж/см}^2$ (а) и $E_s = 25 \text{ Дж/см}^2$ (б) (темными стрелками указана поверхность облучения, светлой стрелкой – микротрещина)
 Fig. 4. Structure of the fracture surface of a sample irradiated with a pulsed electron beam at $E_s = 20 \text{ J/cm}^2$ (a) and $E_s = 25 \text{ J/cm}^2$ (b) (the dark arrows indicate the irradiation surface, the light arrow indicates the microcrack)

Размеры кристаллитов слоя практически совпадают с размерами ячеек кристаллизации, указанными выше. Модифицированный электронным пучком объем ВЭС имеет двухслойное строение. На границе раздела поверхностного и подповерхностного слоев, а также подповерхностного слоя и основного объема сплава располагаются микропоры. Подповерхностный слой и прилегающий к нему объем образца содержат микротрещины, расположенные преимущественно перпендикулярно к поверхности образца (рис. 4, б). В поверхностном слое такие трещины не обнаружены. Можно предположить, что дефекты, выявленные в поверхностном и подповерхностном слоях, формируются в результате упругих напряжений, возникающих при высокоскоростной закалке образцов после завершения термического воздействия пучка электронов. Рассматриваемые дефекты также могут быть причиной снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии.

Выводы

Методами современного физического материаловедения проведены исследования поверхности разрушения ВЭС CoCrFeMnNi, подвергнутого электронно-пучковой обработке (плотность энергии пучка $10 - 30 \text{ Дж/см}^2$; длительность 50 мкс; частота $0,3 \text{ с}^{-1}$; количество импульсов 3). Выявлены механизм разрушения и его эволюция с ростом плотности энергии пучка электронов. Проведена оценка толщины расплавленного слоя и состояние пограничного (расплав/твердое тело) слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 188. P. 435–474.
2. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 122. P. 448–511.

3. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // *Science China Materials*. 2018. Vol. 61. No. 1. P. 2–22.
4. Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. ВЭС: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 4. С. 259–265.
5. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys // *Springer. Advanced structured materials*. 2021. Vol. 107. P. 79–110.
6. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Шлярова Ю.А. Эволюция структуры AlCoCrFeNi высокоэнтروпийного сплава при облучении импульсным электронным пучком // *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91. № 12. С. 1971–1974.
7. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Kosiniv D.A., Ivanov Y.F., Gromov V.E. Structure of titanium alloy, modified by electron beams and destroyed during fatigue // *Letters on Materials*. 2017. Vol. 7. No. 3. P. 266–271.
8. Osintsev K., Gromov V., Ivanov Y., Konovalov S., Panchenko I., Vorobyev S. Evolution of structure in alccrfe high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam // *Metals*. 2021. Vol. 11. P. 1228.
9. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // *Известия вузов. Физика*. 2008. № 5. С. 60–70.

REFERENCES

1. George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*. 2020, vol. 188, pp. 435–474.
2. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017, vol. 122, pp. 448–511.

3. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 2–22.
4. Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. WES: structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, no. 4, pp. 1–8. (In Russ.).
5. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys. *Springer. Advanced structured materials*. 2021, vol. 107, pp. 79–110.
6. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Konovalov S.V., Shlyarova Yu.A. Structure evolution of AlCo-CrFeNi high-entropy alloy under pulsed electron beam irradiation. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2021, vol. 91, no. 12, pp. 1971–1974. (In Russ.).
7. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Kosiniv D.A., Ivanov Y.F., Gromov V.E. Structure of titanium alloy, modified by electron beams and destroyed during fatigue. *Letters on Materials*. 2017, vol. 7, no. 3, pp. 266–271.
8. Osintsev K., Gromov V., Ivanov Y., Konovalov S., Panchenko I., Vorobyev S. Evolution of structure in alccrfeNi high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam. *Metals*. 2021, vol. 11, p. 1228.
9. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of the surface of ceramic-metal and ceramic materials during pulsed electron-beam processing. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2008, no. 5, pp. 60–70. (In Russ.).

Сведения об авторах

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН
ORCID: 0000-0001-8022-7958
E-mail: yufi55@mail.ru

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
ORCID: 0000-0003-4809-8660
E-mail: ksv@ssau.ru

Сергей Владимирович Воробьев, д.т.н., старший научный сотрудник управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-3957-0249
E-mail: sparrow1981@mail.ru

Юлия Андреевна Шлярова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-5677-1427
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Александр Петрович Семин, к.т.н., заведующий кафедрой инженерных конструкций, строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-3989-7420
E-mail: syomin53@gmail.com

Information about the authors

Yuri F. Ivanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS
ORCID: 0000-0001-8022-7958
E-mail: yufi55@mail.ru

Sergei V. Konovalov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University
ORCID: 0000-0003-4809-8660
E-mail: ksv@ssau.ru

Sergei V. Vorob'ov, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-3957-0249
E-mail: sparrow1981@mail.ru

Yulia A. Shlyarova, postgraduate student of the Department of Natural Sciences n.a. Prof. V.M. Finkel, Researcher, Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-5677-1427
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Viktor E. Gromov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences n.a. Prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Alexander P. Semin, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Engineering Structures, Building Technologies and Materials, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-3989-7420
E-mail: syomin53@gmail.com

© 2022 г. Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, С.В. Воробьев, Ю.А. Шлярова, В.Е. Громов, А.П. Семин
 Поступила в редакцию 11.02.2022 г.

К 65-ЛЕТИЮ ИВАНА СЕМЕНОВИЧА КУЗНЕЦОВА

*Отличная учеба – успехи на производстве.
Производственный опыт – успехи в преподавании.*



6 марта 2022 г. исполняется 65 лет Ивану Семеновичу Кузнецову, кандидату технических наук, члену – корреспонденту Академии проблем качества, академическому советнику Кузбасского филиала инженерной академии, преподавателю кафедры «Обработка металлов давлением и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК», активному изобретателю.

Иван Семенович родился в 1957 г. в г. Дмитров Московской области. В 1979 г. с отличием окончил Сибирский металлургический институт по специальности «Обработка металлов давлением». Со студенческих пор он был неравнодушен к научным исследованиям. Сфера научных интересов – технология и теория сортопрокатного производства. С 1979 г. он трудился в Центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ) ЗСМК сначала в должности инженера-исследователя, потом ведущим инженером-исследователем, начальником группы прокатной лаборатории ЦЗЛ. Занимался разработкой и совершенствованием технологических процессов производства проката. В 1989 г. Иван Семенович окончил Специальный факультет по переподготовке кадров Московского института стали и сплавов. В 1994 г. защитил кандидатскую диссертацию в Московском институте стали и сплавов. С 1999 по 2001 г. И.С. Кузнецов работал в должности начальника лаборатории сталепрокатного производства ЦЗЛ. В его обязанности входили руководство и организация анализов и испытаний сырья, материалов и готовой продукции сталепрокатного производства, разработка и совершенствование технологии производства продукции. Успешная работа на производстве позволила руководству комбината выдвинуть его на

должность начальника ЦЗЛ, где он приобрел опыт руководства коллективом более 500 человек. В масштабах всего предприятия он приобрел опыт разработки и совершенствования технологических процессов производства продукции всего металлургического комбината полного замкнутого цикла. Он соавтор более 90 научных работ, из которых 25 научных статей опубликованы в изданиях, индексируемых международной базой данных SCOPUS, получено 12 патентов на изобретения.

В 2014 – 2018 гг. он проработал в должности главного специалиста по прокатному производству в техническом управлении и управлении по качеству АО «ЕВРАЗ ЗСМК», занимался совершенствованием технологии производства проката. В рамках программы для курсового обучения по технологическим профессиям прокатного производства в РЦПП «ЕВРАЗ Сибирь» читал лекции по теории и технологии прокатки, по оборудованию и автоматизации прокатных цехов. Настало время для Ивана Семеновича делиться своими знаниями и в стенах родного вуза.

В феврале 2019 г. он стал руководителем Центра стратегического партнерства и практик в Сибирском государственном индустриальном университете. С 2021 г. и по настоящее время является преподавателем на кафедре «Обработка металлов давлением и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК». Его опыт дал возможность написать много полезной информации для студентов, магистрантов и производственников в виде учебного пособия «Проектирование технологических процессов обработки металлов давлением». В этом пособии И.С. Кузнецов совместно с соавторами, используя многолетний опыт работы с персоналом, представили современный алгоритм решения технических и организационных проблем, возникающих в цехах металлургического предприятия, путем построения «дерева проблем», «дерева целей», анализа альтернатив. Кроме того, опираясь на опыт работы по повышению квалификации персонала, представили описание существующих и перспективных технологий обработки металлов давлением. Это пособие позволит качественно улучшить обучение студентов за счет реализации тезиса по практикоориентированному обучению. Учебное пособие награждено «Золотой медалью» Франкфуртской книжной ярмарки, которая проходила 20 – 24 октября 2021 г. во Франкфурте-на-Майне, Германия.

Коллектив кафедры, студенты и магистранты вуза, ректорат, коллеги университета сердечно поздравляют его с юбилеем и желают ему дальнейших творческих успехов!

70 ЛЕТ А.Р. ФАСТЫКОВСКОМУ



26 апреля 2022 года исполняется 70 лет заведующему кафедрой «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ), доктору технических наук, профессору Фастыковскому Андрею Ростиславовичу.

Андрей Ростиславович окончил в 1974 году Сибирский металлургический институт имени Серго Орджоникидзе (в настоящее время СибГИУ) по специальности «Обработка металлов давлением» и получил квалификацию инженера-металлурга. Всю свою дальнейшую трудовую деятельность Фастыковский А.Р. связал с СибГИУ, пройдя путь от инженера-исследователя до заведующего кафедрой «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», доктора технических наук, профессора.

Андрей Ростиславович Фастыковский – известный специалист в области обработки металлов давлением. Под его руководством и при непосредственном участии выполнялись многочисленные прикладные исследовательские работы по совершенствованию технологических процессов прокатки на предприятиях Сибири, Даль-

него Востока и ближнего зарубежья (ОАО «Амурметалл», АО «Новосибирский металлургический завод им. Кузьмина», АО «Узметкомбинат», АО «ЕВРАЗ ЗСМК»).

Научно-исследовательские работы Андрея Ростиславовича дали возможность заложить научные основы практического применения новых совмещенных методов обработки металлов давлением, что, в свою очередь, позволило решить широкий круг задач, направленных на совершенствование процессов прокатки-пресования, Slitting процесса, разработать теоретические основы безаварийной работы валковой арматуры сортовых станов.

А.Р. Фастыковский обладает большим опытом педагогической деятельности, которую он начал в 1980 году. Андрей Ростиславович – автор более 250 научных и учебно-методических работ, в том числе монография, 7 учебных пособий с грифом УМО, 17 патентов и авторских свидетельств. Высокое качество учебных пособий отмечено золотыми медалями на международных книжных выставках в Париже, Лондоне, Мадриде.

А.Р. Фастыковский – член диссертационных советов, член-корреспондент Международной академии Естествознания. Его заслуги отмечены званием «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации», отечественными и зарубежными наградами: орденом РАС «LABORE ET SCIENTIA – Трудом и знанием», медалями «За служение Кузбассу», «70 лет Кемеровской области», «Ветеран труда», другими наградами и грамотами администрации Кемеровской области.

Под руководством А.Р. Фастыковского защищены две кандидатские диссертации.

Человек высокой культуры, всегда доброжелательный и отзывчивый, подтянутый и собранный А.Р. Фастыковский пользуется заслуженным уважением и авторитетом у своих коллег и обучающихся.

Редакционная коллегия и редакция журнала, коллектив университета и друзья сердечно поздравляют Андрея Ростиславовича с юбилеем, желают ему творческих успехов, энергии и здоровья.

ПОЗДРАВЛЯЕМ ЛЮДМИЛУ ПЕТРОВНУ БАЩЕНКО С ДНЕМ РОЖДЕНИЯ!



29 марта 2022 г. Людмила Петровна Башченко, ответственный секретарь журнала «Известия вузов. Черная металлургия», доцент кафедры «Теплоэнергетика и экология» отмечает красивый день рождения – 55 лет!

В 1984 г. окончила школу № 26 в г. Новокузнецке, при этом получила знак «За отличную учебу». Людмила Петровна окончила в 1989 г. с красным дипломом Сибирский металлургический институт им. Серго Орджоникидзе (СибГИУ) по специальности «Улавливание и утилизация пылей и газов». Была приглашена в аспирантуру на кафедру «Теплотехника печей и газоочистка». В 1994 г. была принята на работу в редакцию журнала «Известия вузов. Черная металлургия» при СМИ на должность редактора.

В 2013 г. Л.П. Башченко защитила кандидатскую диссертацию, выполненную в научной школе В.Е. Громова, и ей была присвоена ученая степень кандидата технических наук. Людмила Петровна с 2016 г. возглавляет Сибирскую редакцию журнала «Известия вузов. Черная металлургия». Людмила Петровна обладает большим опытом научно-педагогической деятельности. Руководить работой в редакции – большой труд: подготовка номеров журнала к печати (редактирование текста, таблиц, рисунков, библиографического материала в соответствии с ГОСТами и

требованиями издательств); работа с редакторами разделов, авторами, рецензентами; оформление материалов статей; подготовка документов для публикаций; работа с различными электронными базами данных и библиотеками. Вся эта колоссальная работа, квалификация позволяют выпускать журнал, который поднимает престиж и статус университета.

С 2012 г. сотрудники редакции занимаются подготовкой к печати журнала «Вестник СибГИУ», где Л.П. Башченко принимает активное участие.

Людмила Петровна начала педагогическую деятельность с 2018 г. на кафедре «Теплоэнергетика и экология», продолжая династию преподавателей: мама, Раиса Ивановна Соловьева, 46 лет преподавала в стенах университета на кафедре «Инженерные конструкции».

За время работы Л.П. Башченко неоднократно проходила повышение квалификации по направлению своей деятельности «Стратегия и тактика развития и продвижения научного издания международного уровня» (Государственный академический университет гуманитарных наук, Москва); по педагогической деятельности СибГИУ по направлениям «Цифровая трансформация образования: новые компетенции преподавателя», «Способы постановки задач стратегического развития вуза». Принимала участие и получила сертификаты участника множества вебинаров и семинаров по подготовке материалов для публикации в журналах.

Башченко Л.П. воспитывает двоих детей. Сын Людмилы Петровны является выпускником Санкт-Петербургского государственного университета имени Петра Великого, дочь заканчивает обучение в лицее № 11 на хорошо и отлично, имеет второй взрослый разряд по шахматам, увлекается баскетболом.

Людмила Петровна ведет большую работу по оформлению документов в диссоте в качестве технического секретаря диссовета Д212.252.04.

Людмила Петровна Башченко – профессионал высокого уровня, доброжелательный и отзывчивый человек, вызывающий только положительные эмоции, пользуется заслуженным уважением у коллег и студентов.

Редакционная коллегия и редакция журнала, коллектив университета и друзья сердечно поздравляют Людмилу Петровну с юбилеем, желают энергии и здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов!

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В журнале «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» публикуются оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим направлениям:

- металлургия и материаловедение;
- горное дело и геотехнологии;
- машиностроение и транспорт;
- энергетика и электротехнологии;
- химия и химические технологии;
- архитектура и строительство;
- автоматизация и информационные технологии;
- экология и рациональное природопользование;
- экономика и управление;
- образование и педагогика;
- социально-гуманитарные науки;
- отклики, рецензии, биографии.

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).

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.

Таблицы, библиографический список и подрисуночный 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 75х75 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 пространственных 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 Equation 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 и e-mail). 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 10.

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 библиографическом 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 до 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 оформле-

нию 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 и представлены на сайте СибГИУ (www.sibsiu.ru) в разделе Наука и инновации (Периодические научные издания (Журнал «Вестник СибГИУ»)).

Н а д н о м е р о м р а б о т а л и

Козырев Н.А., главный редактор

Запольская Е.М., ответственный секретарь

Бащенко Л.П., ведущий редактор

Киселева Н.Н., ведущий редактор

Темлянцева Е.Н., верстка

Олендаренко Е.В., менеджер по работе с клиентами