

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,

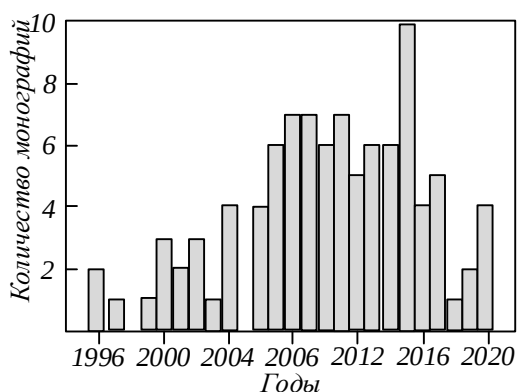


Рис. 1. Публикационная активность научной школы
Fig. 1. Publication activity of the scientific school

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 (наукOMETрический 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 внутрИроссийского 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-

давлиющее 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 медиаконпании 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

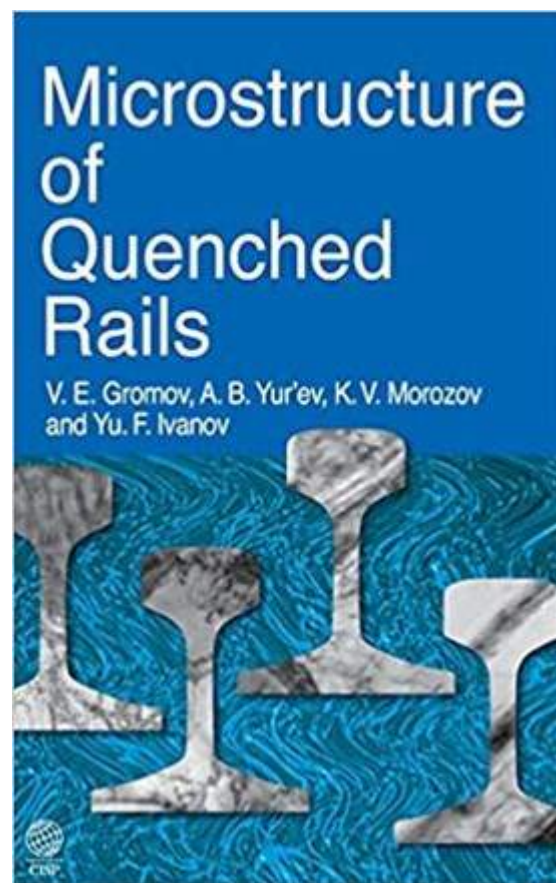


Рис. 2. Книга «Microstructure of Quenched rails / V.E. Gromov, A.B. Yur'ev, K.V. Morozov, Yu.F. Ivanov. Cambridge, CISP Ltd, 2015, 215 p.»

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

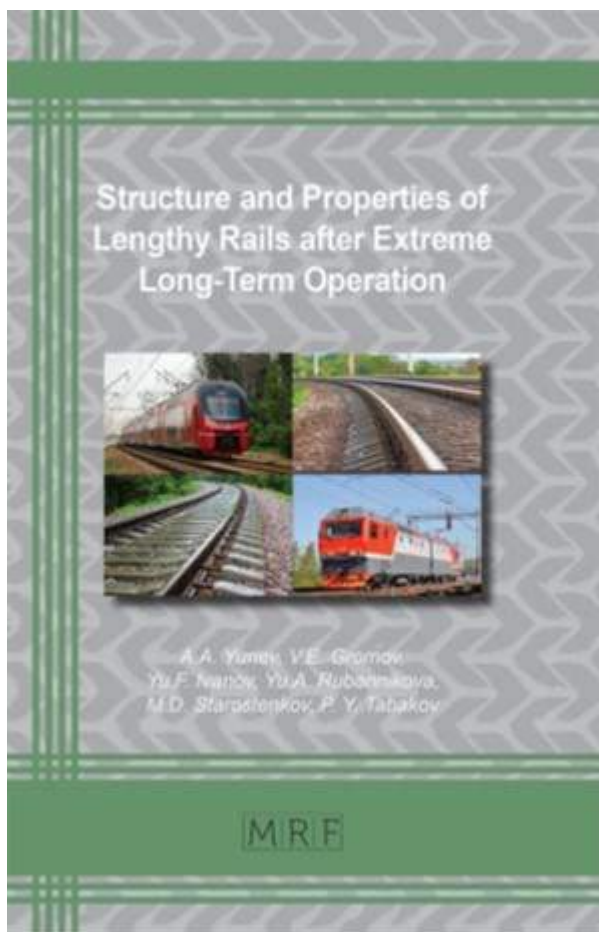


Рис. 3. Книга «Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation / A.A. Yuriev, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, Yu.A. Rubannikova, M.D. Starostenkov, P.Y. Tabakov. Materials Science Forum LLC, 2021. 185 p.»

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-

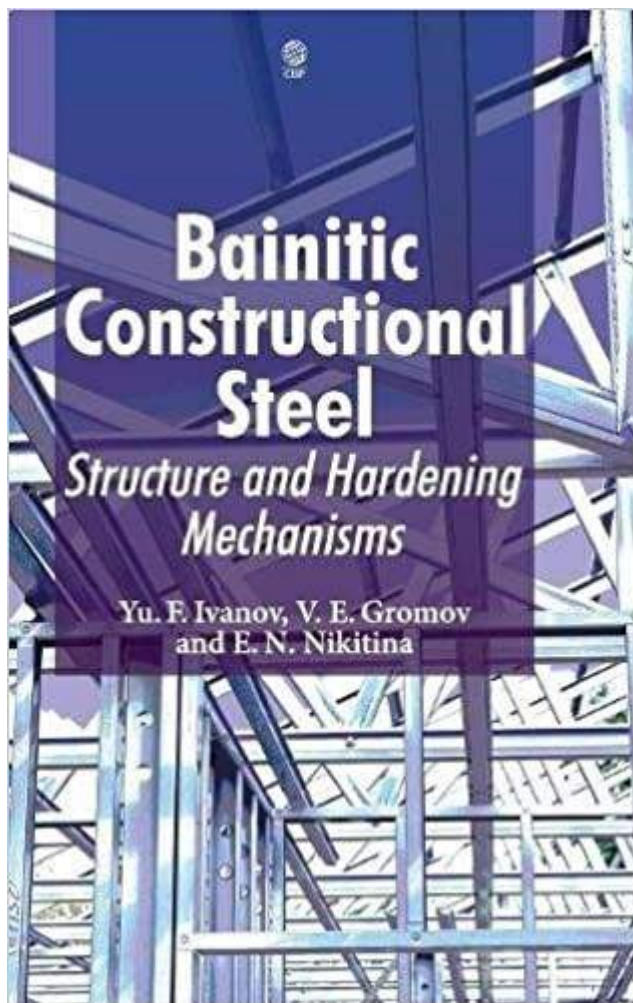


Рис. 4. Книга «Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Nikitina E.N. Bainitic constructional steel. Structure and hardening mechanisms. Cambridge, CISP Ltd, 2017. 120 p.»

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

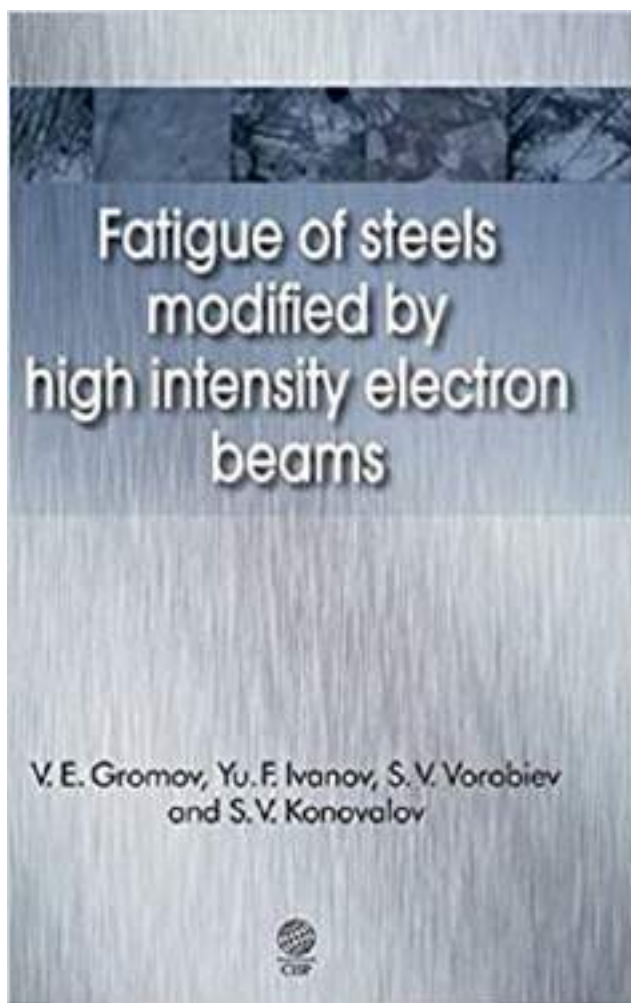


Рис. 5. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams (V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Konovalov. Cambridge, CISP Ltd, 2017. 272 p.

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 стали 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

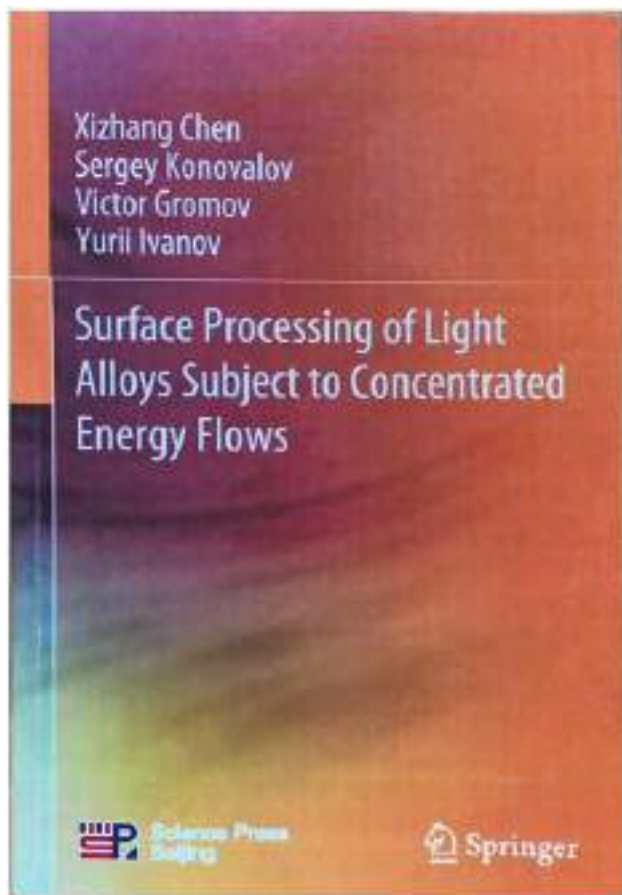


Рис. 6. Книга «Surface Processing of Light Alloys Subject to Concentrated Energy Flows / X. Chen, S. Konovalov, V. Gromov, Yu. Ivanov. Germany, Springer, 2021. 198 p.»
 Fig. 6. The book "Surface Processing of Light Alloys Subject to Concentrated Energy Flows / X. Chen, S. Konovalov, V. Gromov, Yu. Ivanov.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

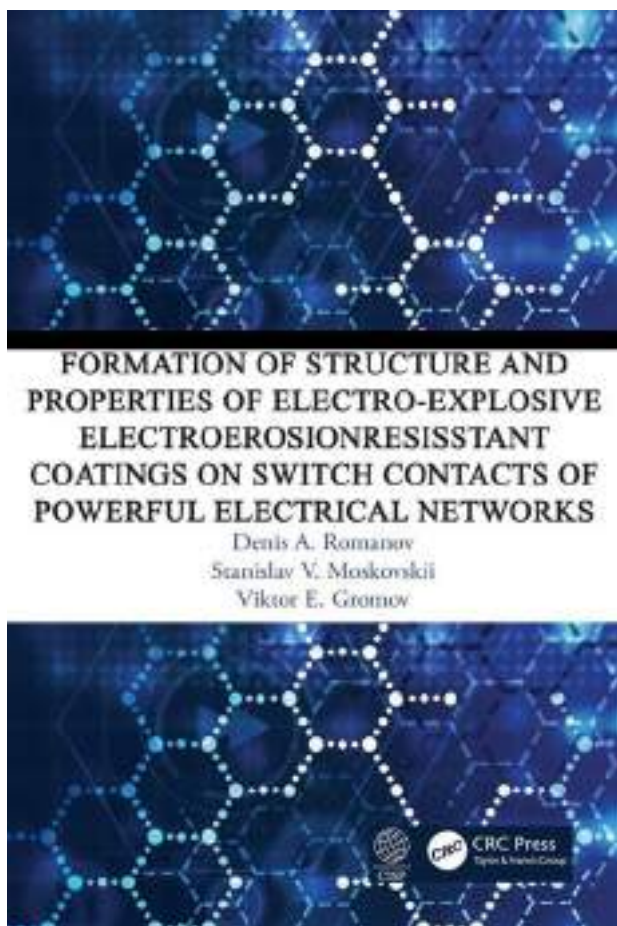


Рис. 7. Книга «Romanov D., Moskovskii S., Gromov V. Formation of Structure and Properties of Electro-Explosive Electroerosionresistant Coatings on Switch Contacts of Powerful Electrical Networks. USA, Taylor and Fransic Group, 2021. 253 p.»

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 диборидов 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 взрывающимися 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 конструктивных, 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-

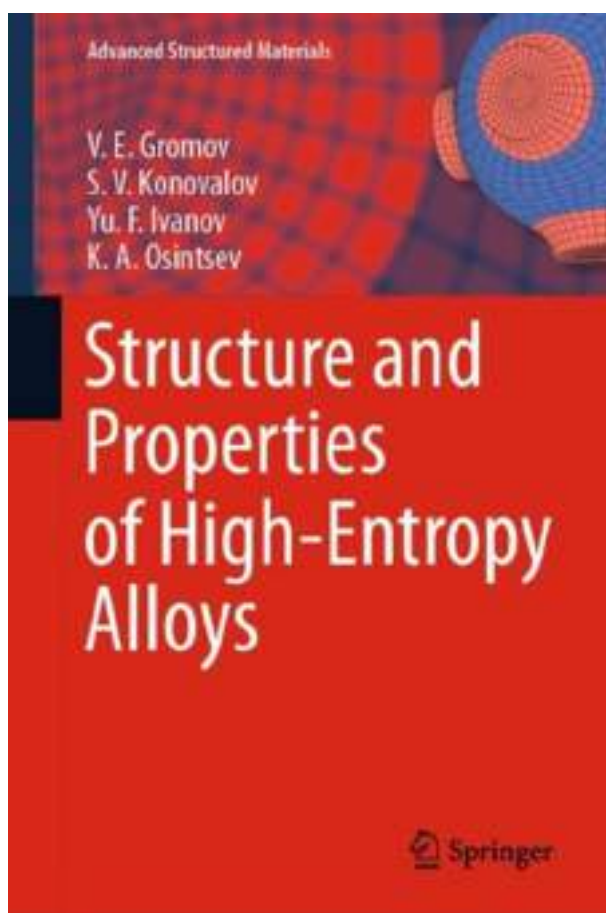


Рис. 8. Монография «Structure and Properties of High-Entropy Alloys. V.E. Gromov, S.V. Kononov, Yu.F. Ivanov, K.A. Osintsev. USA, Springer, 2021. 129 p.»

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

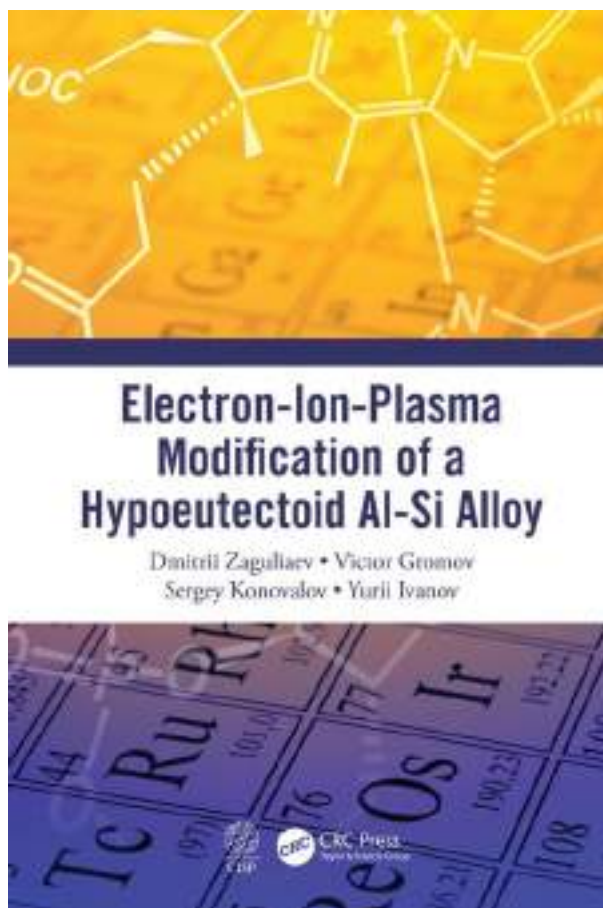


Рис. 9. Книга «Electron-Ion-Plasma Modification of a Hypoeutectoid Al-Si Alloy / D. Zaguliaev, V. Gromov, S. Konovalov, Yu. Ivanov. USA, Taylor and Francis, 2021. 260 p.»
 Fig. 9. The book “Electron-Ion-Plasma Modification of a Hypoeutectoid Al-Si Alloy / D. Zaguliaev, V. Gromov, S. Konovalov, Yu. Ivanov.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

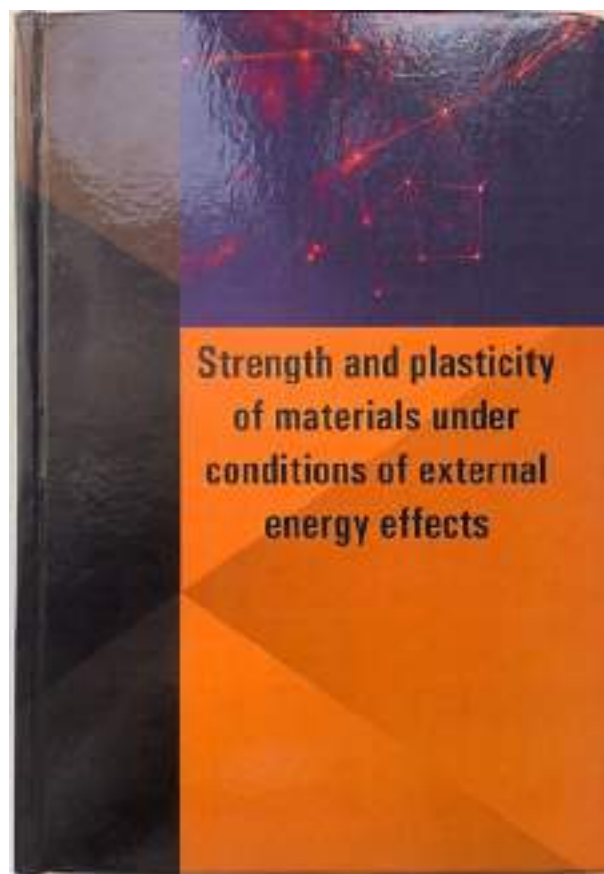


Рис. 10. Книга «Strength and plasticity of materials under conditions of external energy effects. Novokuznetsk, Polygraphist, 2021. 141 p.»

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 $TiCMo$, 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., Yur'ev 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., Yur'ev 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., Alsaraeva 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., Alsaraeva 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 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNiTi}_x$ ($x = 0 - 2.0$) 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 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$ high entropy alloy. *Intermetallics*. 2012, vol. 31, pp. 165–172.
 135. Jones N.G., Frezza A., Stone H.J. Phase equilibria of an $\text{Al}_{0.5}\text{CrFeCoNiCu}$ 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 $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}_{0.1}$ 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 $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($0 \leq x \leq 2$) 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 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$. *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.sibsiu.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.sibsiu.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.