ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Ефимов Михаил Олегович

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

1.3.8 - физика конденсированного состояния

Томск - 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель	Громов Виктор Евгеньевич				
	доктор физико-математических наук, профессор				
Официальные оппоненты:	Клопотов Анатолий Анатольевич доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и материаловедения, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск				
	Потекаев Александр Иванович доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей экспериментальной физики, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.				

Защита состоится «21» мая 2025 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.03 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 4, аудитория 245 Факс:

E-mail:



С диссертацией можно ознакомиться в научнотехнической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QRкода.

Автореферат разослан «___»____2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор технических наук, профессор

7cm

С.А. Гынгазов

Привлекательной особенностью Актуальность темы. высокоэнтропийных являются уникальные сплавов (BOC) физикомеханические и функциональные свойства по сравнению с традиционными формирования легированными сплавами основе однофазного на твердого термодинамически устойчивого высокопрочного раствора И замещения преимущественно с ГЦК- или ОЦК- решеткой. Среди многообразия методов получения ВЭС особое место занимают аддитивные технологии. В последние годы наметились два принципиально новых направления в физике ВЭС: улучшение свойств поверхности путем создания тонких покрытий и пленок и модифицирование поверхности за счет внешних энергетических высокоэффективных методов поверхностного воздействий. Одним ИЗ упрочнения электронно-пучковая обработка, обеспечивающая является сверхвысокие скорости нагрева поверхностного слоя и охлаждения его за счет теплоотвода в основной объем материала, в результате чего образуются субмикро- и нанокристаллические структурно-фазовые состояния. Научнопрактический интерес представляют другие виды поверхностной обработки ВЭС, в частности, напыление пленок. Это способствует появлению новых полезных свойств и позволяет значительно расширить области возможного применения ВЭС.

Степень разработанности темы исследования. Исследование структурно-фазовых состояний, свойств, термодинамики ВЭС, моделирования их структуры, методов получения и областей применения занимают одно из центральных мест в современной физике конденсированного состояния. По базе данных Web of Science число публикаций по этой теме уже значительно превышает 10000.

Наиболее результаты значимые достигнуты исследованиями отечественных и зарубежных ученых Погребняка А.Д., Рогачева А.С., Салищева Г.А., Фирстова С.А., Шайсултанова Д.Г., Senkov O.N., Chen S.K., Jeh J.W., Shang Y., Cantor B., Miracle D.B., Murty B.S. и других. Необходимо отметить, что число публикаций зарубежных коллег значительно больше, чем отечественных. Электронно-пучковая обработка материалов, как показал анализ публикаций ученых Института сильноточной электроники СО РАН РФ, приводит к наноструктурированию поверхности и значительному улучшению комплекса свойств. Необходимо констатировать, что, количество работ, по влиянию электронно-пучковой обработки на ВЭС крайне ограничено (Lyu P., Репд Т., Саі Ј., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Осинцев К.А.), что не позволяет провести систематический анализ и выявить физическую природу эволюции структурно-фазовых состояний и свойств ВЭС при электронно-пучковой обработке. Вышеизложенное определило тему исследования, постановку цели и задач.

Цель работы: установление закономерностей формирования структурнофазовых состояний и свойств ВЭС, подвергнутых электронно-пучковой обработке.

При достижении цели были решены следующие задачи:

1. Изучение структурно-фазовых состояний и свойств ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Mn, нанесенного на подложку из нержавеющей стали, проволочно-дуговой аддитивной технологией и подвергнутого электронно-пучковой обработке.

2. Изучение структурно-фазовых состояний и свойств ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Mn, нанесенного на подложку из сплава 5083, проволочно-дуговой аддитивной технологией и подвергнутого электронно-пучковой обработке

3. Анализ структуры и свойств зоны контакта «покрытия ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Mn/подложка (сплав 5083)» после электронно-пучковой обработки.

4. Выявление закономерностей эволюции структурно-фазовых состояний и свойств поверхности ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Al с пленкой (B+Cr) после электронно-пучковой обработки.

Научная новизна. На основе выявленных закономерностей формирования и эволюции структуры и свойств ВЭС при электронной пучковой обработке в работе впервые:

1. Определены механические и трибологические свойства сплава ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Mn, после ЭПО с плотностью энергии $E_s = 10-30$ Дж/см². Установлено, что ЭПО формирует в поверхностном слое до 5 мкм зеренную структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации, размер ячеек которой возрастает с ростом E_s в диапазоне 310-800 нм. Показано, что электроннопучковая обработка (ЭПО) при $E_s=15$ Дж/см² увеличивает износостойкость в 4,5 раза.

2. Исследованы структура и свойства ВЭС Кантора неэквиатомного состава Co-Cr-Fe-Ni-Mn, на подложке из сплава 5083. Показано, что нанесение покрытий ВЭС приводит к взаимному легированию покрытия и подложки. Проанализированы зависимости структурно-фазовых состояний покрытий от расстояния до зоны контакта «покрытие-подложка».

3. Выявлена роль ЭПО в изменении элементного и фазового состава, дефектной структуры контакта. состояния сплава В зоне Показано формирование многоэлементной субмикро-нанокристаллической структуры контакта «покрытие (ВЭС)/подложка (сплав 5083) зоны подложка», образовавшейся преимущественно в сплаве 5083.

4. Сформированная на поверхности ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Al пленка (Cr+B) после облучения электронным пучком в различных режимах плотности энергии пучка электронов обладает повышенной микротвердостью и износостойкостью. При этом коэффициент трения снижается. Обсуждена физическая природа наблюдаемых изменений.

Теоретическая и практическая значимость работы. Сформирован банк данных по влиянию электронно-пучковой обработки на эволюцию структурно-фазовых состояний и свойств ВЭС Со-Сг-Fe-Ni-Mn и Со-Сг-Fe-Ni-Al, сформированных на подложках из нержавеющей стали и сплава 5083. Эти результаты имеют фундаментальную ценность для развития области физики конденсированного состояния, связанной с разработкой нового класса материалов и методов их поверхностной обработки. Результаты диссертации будут способствовать развитию теории структурно-фазовых превращений в многокомпонентных системах при облучении пучками электронов. Факультативные курсы физическому материаловедению физике ПО И конденсированного состояния могут содержать основные положения и выводы диссертации. Практическая значимость работы заключается в том, что ее результаты могут использоваться при решении металловедческих задач и создании технологий обработки ВЭС. Справки и акты об использовании результатов диссертационной работы прилагаются.

Методология и методы исследования. Результаты исследований отечественных и зарубежных ученых последних двух десятилетий, а также положения физики конденсированного состояния, физического материаловедения и физических методов исследования явились методологической основой работы.

выполнении экспериментов использовалось При аналитическое И испытательное оборудование кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора B.M. Финкеля, центра коллективного пользования «Материаловедение» при Сибирском государственном индустриальном материаловедческого университете, Томского коллективного центра пользования при Национальном исследовательском Томском государственном университете, лаборатории плазменной эмиссионной электроники Института сильноточной электроники СО РАН (оптический микроскоп Olympus GX-51, растровый электронный микроскоп Phillips SEM 515 с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа EDAX ECON IV, просвечивающий электронный дифракционный микроскоп JEOL JEM-2100F, прибор HVS-1000A, трибометр Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция)).

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты изучения структурно-фазовых состояний, механических и трибологических свойств ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Mn, на подложке из нержавеющей стали методом WAAM в исходном состоянии и после ЭПО в различных режимах. Причины снижения прочности и пластичности при ЭПО: рост размера зерна, формирование ячеек высокоскоростной кристаллизации, выделение наноразмерных частиц FeCr, образование пластинчатой структуры в изломе и субмикротрещин в подповерхностном слое, перпендикулярных поверхности образца.

2. Результаты исследования элементного и фазового состава, дефектной структуры и свойств зоны контакта ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Mn-(покрытие) - сплав 5083 (подложка). Анализ немонотонного изменения микротвердости, физическая природа упрочнения зоны контакта, обусловленного образованием алюминидов Al₁₃Fe₄ пластинчатой морфологии, формированием зеренносубмикронных размеров субзеренной субструктуры с наноразмерными частицами второй фазы Al₃Ni, твердорастворным упрочнением из-за взаимного подложки и покрытия, формированием внутренних легирования полей напряжений.

3. Совокупность результатов изучения влияния ЭПО на структурнофазовые состояния зоны контакта ВЭС Co-Cr-Fe-Ni-Mn с подложкой из сплава 5083. Послойный анализ структуры зоны контакта и закономерности изменения концентрации легирующих элементов подложки и покрытия в сечении зоны контакта.

4. Закономерности формирования и эволюции структуры, фазового состава и свойств поверхности ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Al с пленкой (Cr+B) после электронно-пучковой обработки. Природа и основные физические механизмы повышения механических и трибологических свойств ВЭС CoCrFeNiAl с пленкой Cr+B после ЭПО с плотностью энергии 20 Дж/см². Основные упрочняющие факторы – формирование структуры ячеистой кристаллизации, внедрение атомов В в решетку ВЭС, образование наноразмерных частиц боридов и оксиборидов сложного элементного состава.

Достоверность результатов и сделанных выводов обеспечиваются, использованием современных взаимодополняющих методов современного физического материаловедения при исследовании структуры и свойств на сертифицированном исследовательском оборудовании, статистической обработкой результатов, а также сопоставлением полученных результатов, их соответствием с опубликованными работами других авторов и обсуждением на международных и всероссийских конференциях.

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: 11-13th International online symposium on materials in external fields. Novokuznetsk, 2022-2024; ХҮ Международная конференция Новокузнецк, 2022; 3-я Международная «Металлургия 22», научнопрактическая конференция «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов», Курск, 2022; Международные конференции Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения, Томск, 2023-24; LXVIII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» Витебск, Беларусь 2024.

Личный вклад автора. Автор лично принимал непосредственное участие при получении всех результатов диссертации. Разработка и деи исследований, их целей и задач, статистическая обработка и анализ данных, написание статей и тезисов формулировка основных положений и выводов выполнены автором.

Публикации. Результаты работы представлены в <u>35</u> публикациях, в том числе <u>12</u> статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, <u>12</u> статьях в изданиях, входящих в перечень Scopus и Web of Science, 2 главах в монографиях. Список основных работ приведен в конце автореферата.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методом исследования, научной новизне соответствует пункту 1 «Экспериментальное изучение физической

природы и свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и, в том числе, материала световодов как в твердом (кристаллы, поликристаллы), так и аморфном состоянии в зависимости от их химического изотопного состава, температуры и давления» и пункту 3 «Экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ», паспорта специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния» (технические науки).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, приложений и списка цитируемой литературы, включающего 155 наименований. Диссертация содержит 137 страниц, в том числе 113 рисунков и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, приведены цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, указан личный вклад автора, соответствие паспорту специальности, структура и объем диссертации.

первой главе «Структура И свойства B B₃C, полученных аддитивными технологиями», являющейся обзорной, проведен анализ работ отечественных и зарубежных исследователей по формированию структурнофазовых состояний и свойствам ВЭС, созданных различными способами. Отмечены преимущества проволочно-дугового аддитивного производства (WAAM). Проанализированы свойства ВЭС, их поведение при усталости, ползучести в широком диапазоне температур. Отмечено отсутствие работ по влиянию электронно-пучковой обработки на формирование и эволюцию структуры и свойств ВЭС, полученных аддитивными технологиями. На основании анализа литературных источников сформулированы цель и задачи настоящей диссертации.

Во второй главе «Материалы и методы исследования» описаны ВЭС, выбранные для исследований, оборудование и режимы ЭПО и напыления пленок бора и хрома, особенности ПЭМ исследований, определение параметров дефектной структуры. В качестве материалов исследования использовались ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Al и Co-Cr-Fe-Ni-Mn неэквиатомного состава, полученные методом проволочно-дугового аддитивного производства (WAAM-Wire Arc Additive Manufacture). Для формирования ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Al и Co-Cr-Fe-Ni-Mn в качестве исходного материала была использована многокомпонентная проволока из жил разного химического состава.

ВЭС Co-Cr-Fe-Ni-Al имел следующий элементный состав (масс %): 7,78Со; 8,87Сг; 22,31Fe; 44,57Ni; 15,64Al. По данным энергодисперсионного

анализа химический состав ВЭС Co-Cr-Fe-Ni-Mn соответствовал предварительно рассчитанному (ат. %): 25,2Со; 15,1Сг; 37,8Fe; 16,3Ni; 3,4Mn.

Облучение ВЭС импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО» (ИСЭ СО РАН). Режим облучения образцов: энергия ускоренных электронов U = 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов E_S = (10-40) Дж/см², длительность импульса пучка электронов t = 200 мкс, количество импульсов N = 3, частота следования импульсов f = 0,3 c⁻¹. Облучение осуществляли в вакууме при давлении остаточного газа (аргон) в камере установки p = 0,02 Па.

Часть образцов подвергали модифицированию на установке «КОМПЛЕКС» (ИСЭ СО РАН), а именно, напыляли пленку бора толщиной 0,5 мкм, поверх пленки бора напыляли пленку хрома толщиной 0,5 мкм. На образцы с пленкой бора напыляли пленку хрома толщиной 0,5 мкм с помощью дугового испарителя. Облучение системы «пленка/подложка» интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО» при вышеуказанных параметрах.

Исследования структуры элементного и фазового состава, состояния дефектной структуры ВЭС и системы «пленка (Cr+B)/(ВЭС) подложка» сканирующей (прибор SEM 515 Philips проводили методами с микрорентгеноспектральным анализатором EDAX ECON IV) И просвечивающей дифракционной (прибор JEM 2100F, JEOL) электронной микроскопии. Фазовый состав и состояние кристаллической решетки основных фаз поверхностного слоя образцов изучали методами рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000, Япония); съемку осуществляли в медном отфильтрованном излучении Cu-Ka1; монохроматор CM-3121. Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Твердость материала определяли по схеме Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н. Исследование трибологических (коэффициент трения и параметр износа) характеристик материала осуществляли на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция). Светлопольные изображения тонкой структуры были использованы для классификации морфологических признаков структуры, определения размеров, объемной доли и мест локализации фаз.

Скалярная плотность дислокаций измерялась методом секущих с поправкой на невидимость дислокаций. Она определялась для каждого типа дислокационной структуры. Избыточная плотность дислокаций $\rho_{\pm} = \rho_{+} + \rho_{-} (\rho_{+} u \rho_{-} - плотность соответственно положительно и отрицательно заряженных дислокаций) измерялась локально по градиенту разориентировки.$

В третьей главе «Структурно-фазовые состояния и свойства ВЭС Со-Сr-Fe-Ni-Mn нанесенного на подложку из нержавеющей стали и облученного импульсным электронным пучком» представлены результаты анализа структуры, фазового состава, механических и трибологических свойств сплава Co-Cr-Fe-Ni-Mn, полученного по технологии WAAM с последующей электронно-пучковой обработкой. Исследуемый сплав имеет дендритную структуру с поперечным размером дендритов 7,7±0,4 мкм. Результаты элементного анализа показали высокий уровень однородности распределения химических элементов по толщине.

Показано, что ВЭС, независимо от способа формирования слитка, является однофазным материалом и имеет ГЦК решетку с параметром кристаллической решетки a = 0,35582 нм. Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии в исследуемом ВЭС выявлены наноразмерные включения элементного состава СоСr.

В объеме зерен наблюдается хаотически распределенные дислокации со скалярной плотностью 1,2·10¹⁰ см⁻². Методом термографического анализа на приборе Setarum Labsys Evo выявлено, что значения температур начала и окончания плавления составляют 1438,71°C и 1449,74 °C.

Выполнены механические испытания на одноосное растяжение и сжатие образцов, полученных при различных режимах наплавочного комплекса. Результаты испытаний на сжатие позволили определить режим, соответствующий наилучшему сочетанию прочности и пластичности. А именно, режим № 1, при котором условный предел текучести при сжатии имел наибольшее значение, по сравнению с двумя другими режимами и составлял 279 МПа (таблица 1). Временное сопротивление при данном режиме имело среднее значение 1689 МПа, а относительная деформация при сжатии – 54 %.

Таблица 1 – Результаты измерения механических свойств ВЭС в зависимости от режима изготовления (испытания на одноосное сжатие)

№ Режима получени я	Условный предел текучести при сжатии, МПа	Временное сопротивление разрушению	Относительная деформация, %	Микротвердость, HV
1	279	1689	54	174
2	155	1690	56	176
3	56	1720	56	178

При испытаниях на растяжение при первом режиме образцы обладали также наилучшими значениями прочности (более 500 МПа) и пластичности (более 75%). Режим получения образцов практически не влиял на значения микротвердости. При испытаниях на сухое трение (комнатная температура) коэффициент износа ВЭС составляет 2,9х10⁻⁴ мм³/Н·м, коэффициент трения 0,62. Электронно-микроскопический анализ поверхности разрушения образцов, наряду с вязким ямочным характером излома, выявил присутствие в материале микропор, микрорасслоений и пустот.

Облучение электронным пучком с плотностью энергии E_s=10 Дж/см² сопровождается протеканием в поверхностном слое процесса первичной рекристаллизации. Размеры образующихся зерен изменяются в пределах 1,5–3

9

мкм. Располагаются данные зерна вдоль границ зерен исходной структуры. При большей величине плотности энергии пучка электронов (15-30 Дж/см²) в поверхностном слое ВЭС развивается процесс собирательной рекристаллизации, сопровождающийся увеличением размеров зерен. Средний размер зерен увеличивается от 35 мкм до 120 мкм при увеличении плотности энергии пучка электронов от 15 Дж/см² до 30 Дж/см². В объеме зерен выявляется структура высокоскоростной кристаллизации. Средний размер ячеек кристаллизации зависит от плотности энергии пучка электронов и увеличивается от 310 нм при $E_S = 15 \ \text{Дж/см}^2$ до 800 нм при $E_S = 30 \ \text{Дж/см}^2$. Облучение сплава, не изменяя типа кристаллической решетки, приводит к увеличению параметра кристаллической решетки ВЭС с ростом плотности энергии пучка электронов.

 $Дж/см^2$ При $E_{s}=30$ В поверхностном формируется слое неразориентированная ячеистая дислокационная структура. С ростом увеличения расстояния она трансформируется в ячеисто-сетчатую и на расстоянии 120÷130 мкм от поверхности присутствует только лишь хаотически распределенная.

Можно отметить немонотонное изменение скалярной плотности дислокаций при удалении от поверхности облучения (рисунок 1). Одной из такой может быть существенно причин зависимости неоднородное распределение дислокаций в слое, примыкающем к поверхности облучения, что связано с формированием ячеистой структуры, в которой часть дислокаций расположена в границах ячеек и не учитывается при оценке скалярной плотности дислокаций.



Рисунок 1 – Зависимость скалярной плотности дислокаций от расстояния от поверхности облучения ВЭС импульсным электронным пучком (E_s=30 Дж/см²)

Установлено, что обработка сплава импульсным электронным пучком приводит к распаду твердого раствора с выделением наноразмерных частиц состава FeCr. Выявленные преобразования структуры и фазового состава привели к снижению пластичности сплава более чем в 2 раза, прочности в 1,3 раза, микротвердости в 1,6 раза облученного сплава относительно исходного состояния. Показано, что обработка сплава импульсным электронным пучком с плотностью энергии 15 Дж/см² приводит к увеличению износостойкости в 4,5 раза относительно исходного состояния.

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

В облученном сплаве размер области материала, разрушение которого произошло с образованием полосовой структуры, увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов, а именно, при $E_s = 10 \text{ Дж/см}^2$ области с полосовой структурой занимают $\approx 25 \%$ площади излома, при $E_s = 30 \text{ Дж/см}^2 \approx 65 \%$. Можно предположить, что формирование полосовой структуры при разрушении ВЭС является одной из причин снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии (рисунок 2).



Рисунок 2 – Зависимость временного сопротивления σ_в (кривая 1) и относительного удлинения ε (кривая 2) при одноосном растяжении высокоэнтропийного сплава системы Co-Cr-Fe-Ni-Mn от плотности энергии пучка электронов

Исследование поверхности разрушения образцов ВЭС показали, что толщина расплавленного слоя изменяется в пределах от 0,8 мкм до 5 мкм и увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов.

Размеры кристаллитов слоя практически совпадают с размерами ячеек кристаллизации, указанными выше. Модифицированный электронным пучком объем ВЭС имеет двухслойное строение (рисунок 3). На границе раздела поверхностного и подповерхностного слоев, а также подповерхностного слоя и основного объема сплава располагаются микропоры (рисунок 3, а, микропоры указаны стрелками). Подповерхностный слой и прилегающий к нему объем образца содержат микротрещины, расположенные преимущественно перпендикулярно к поверхности образца (рисунок 3, б).



Рисунок 3 – Структура высокоскоростной ячеистой кристаллизации, формирующаяся в поверхностном слое ВЭС при облучении импульсным электронным пучком при E_s = 30 Дж/см² и выявленная при исследовании поверхности разрушения

В поверхностном слое такие трещины не обнаружены. Данные дефекты также могут быть причиной снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии.

В четвертой главе «Структура и свойства ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Mn наплавленного на сплав 5083 после электронно-пучковой обработки» исследованы структурно-фазовые состояния и механические свойства зоны контакта ВЭС, сформированного на подложке из алюминиевого сплава 5083 и подвергнутого ЭПО.

Для сплава Кантора Co-Cr-Fe-Ni-Mn неэквиатомного состава выявлено существенное увеличение микротвердости материала зоны контакта покрытия с подложкой. Показано, что нанесение высокоэнтропийного покрытия Fe-Co-Cr-Ni-Mn на поверхность сплава 5083 сопровождается взаимным легированием покрытия и подложки, формированием в зоне контакта покрытия и подложки структуры пластинчатого типа. Установлено, что включения пластинчатой формы, расположенные в зоне контакта у границы с подложкой, обогащены атомами, формирующими покрытие (ВЭС Co-Cr-Fe-Ni-Mn). Показано, что зоне контакта с подложкой высокоэнтропийная наплавка В имеет субмикрокристаллическую (0,5-1,1 мкм) зеренно-субзеренную структуру. В объеме зерен и субзерен, а также на их границах выявляются частицы второй фазы. Основываясь на результатах исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной структуры, обсуждены физические механизмы повышения твердости материала в зоне контакта покрытия ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Mn с подложкой. А именно, (1) упрочнение подложки обусловлено формированием алюминидов железа пластинчатой морфологии; (2) упрочнение высокоэнтропийного сплава обусловлено формированием зеренно- субзеренной структуры субмикронных размеров, на границах и в объеме которых наблюдаются наноразмерные частицы второй фазы; (3) выявленное взаимное легирование подложки и покрытия указывает на твердорастворное упрочнение материала зоны контакта; (4) не следует исключать формирование в зоне контакта внутренних полей напряжений, обусловленных различием теплофизических характеристик контактирующих материалов.

Для сплава Кантора Co-Cr-Fe-Ni-Mn в зоне контакта формируется протяженный слой толщиной до 700 мкм, имеющий извилистые границы, свидетельствующие о высоком уровне сплавления подложки и ВЭС. Методами микрорентгеноспектрального анализа выявлена взаимная диффузия атомов подложки и покрытия. При этом алюминий в существенно большей степени легирует покрытие. Последнее связано, очевидно, с низкой температурой плавления алюминия по сравнению с ВЭС. Плавное изменение элементного состава зоны контакта свидетельствует об отсутствии вихревых потоков при использованном способе нанесения покрытия и последующей ЭПО (рисунок 4 и таблица 2).

Таблица 2 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава покрытия в области «А» и подложки в области «Б»

Элемент, ат. %	Mg	Al	Cr	Mn	Fe	Со	Ni
Область А	0.0	12.3	12.6	2.7	32.5	25.3	14.6
Область Б	5.7	92.4	0.3	0.5	0.5	0.3	0.3



Рисунок 4 – Зависимость концентрации легирующих элементов (б) зоны контакта покрытия (ВЭС) и подложки (5083), выявленная вдоль линии (0-1700), приведенной на (а). Цифрами I, II, III обозначены слои, в которых осуществлялся анализ структуры и фазового состава сплава методами ТЕМ и STEM

Взаимное легирование покрытия и подложки при ЭПО приводит к существенному изменению элементного фазового состава зоны контакта. Установлено, что структура слоя I сформирована ячейками высокоскоростной кристаллизации.

Слой II имеет пластинчатую структуру показано, что основным элементом данного слоя является алюминий (76,8 ат.%), в меньшем количестве

присутствуют Mg (4.1 ат.%), Cr (2.2 ат.%), Mn (0.3 ат.%), Fe (4.9 ат.%), Co (1.6 ат.%), Ni (10.1 ат.%).

Слоя III, как и слой I, сформирован ячейками высокоскоростной кристаллизации. Объем ячеек образован сплавом состава 0.17Mg-20.3Al-4.3Cr-16.7Fe-9.3Co-49.2Ni, что соответствует ВЭС, легированному элементами подложки (5083). Прослойки второй фазы, расположенные по границам ячеек, также сформированы элементами, формирующими наплавку и подложку (41.5Mg-10.9Al-9.0Cr-1.0 Mn-15.2Fe-4.1Co-18.4Ni). Ячейки кристаллизации разделены прослойками фазы Al₁₈Cr₂Mg₃

В пятой главе «Структура и свойства поверхности ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Al после нанесения пленки (B+Cr) и облучения импульсным электронным пучком» проведен анализ структурно-фазовых состояний и свойств поверхности ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Al после формирования на нем системы пленка (B+Cr)/BЭС (Co-Cr-Fe-Ni-Al), нанесенной на поверхность ВЭС и облученной импульсным электронным пучком при плотности энергии (20-40) Дж/см².

Облучение системы «пленка (Cr+B)/(ВЭС) подложка» импульсным электронным пучком при вариации плотности энергии пучка электронов приводит, во-первых, к фрагментации, независимо от величины E_s , поверхностного слоя микротрещинами и, во-вторых, к формированию при $E_s = 20$ Дж/см² структуры типа «пчелиных сотов», а при $E_s = (30 \text{ и } 40)$ Дж/см² – структуры островкового типа.

Выявлено изменение размеров зерен: если в исходных образцах ВЭС средний размер зерен 12,3 мкм, то после облучения при $E_S = 20 \text{ Дж/см}^2$ средний размер зерен 2,7 мкм. При больших значениях E_S размер зерен увеличивается и при $E_S = 40 \text{ Дж/см}^2$ достигает 19,1 мкм. Во-вторых, высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя приводит к повсеместному формированию субзеренной структуры (структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации) с размером кристаллитов (150-200) нм. При $E_S = 40 \text{ Дж/см}^2$ ячейки высокоскоростной кристаллизации покрывают всю площадь образца.

Ячейки разделены прослойками второй фазы толщиной (35-45) нм. микроэлектронограмм показывает, по границам Анализ что ячеек высокоскоростной кристаллизации формируются бориды различного элементного состава. Последнее указывает на насыщение поверхностного слоя ВЭС атомами бора, имеющее место в условиях кратковременного (сотни микросекунд) термического воздействия.

Параметр кристаллической решетки подложки изменяется. Одной из причин изменения параметра кристаллической решетки сплава является легирование образцов атомами бора, концентрация которых в объеме сплава, судя по результатам, полученным методами сканирующей электронной микроскопии, будет увеличиваться с ростом плотности энергии в интервале $E_s = (20-30)$ Дж/см². Следует отметить, что располагаться атомы бора в кристаллической решетке ВЭС будут на позициях внедрения, что и приведет к росту параметра решетки.

Облучение «пленка/подложка» системы импульсным электронным приводит существенному пучком к изменению механических И трибологических свойств образцов ВЭС. Во-первых, существенно (почти в 2 раза) увеличивается микротвердость, достигая максимального значения после облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см².

Во-вторых, повышается (более чем в 5 раз) износостойкость образцов и снижается (в 1,3 раза) коэффициент трения, достигая наилучших значений после облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см².

Выполненные в настоящей работе исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной структуры позволяют заключить, что основными физическими механизмами повышения механических и трибологических свойств модифицированного слоя ВЭС являются, во-первых, зернограничный, обусловленный снижением (в 4,5 раза) среднего размера зерен сплава при облучении и формировании структуры ячеистой кристаллизации, во-вторых, твердорастворный, обусловленный внедрением атомов бора в кристаллическую решетку ВЭС, в-третьих, дисперсионный, обусловленный формированием наноразмерных частиц второй фазы (бориды и оксибориды сложного элементного состава) в объеме и на границах зерен и ячеек.



Рисунок 5 – Зависимость параметра кристаллической решетки (а); микротвердости (б); параметра износа (в); коэффициента трения (г) поверхностного слоя системы «пленка/подложка» от плотности энергии пучка электронов. Микротвердость ВЭС в исходном состоянии 4,7 ГПа, параметр износа 14·10⁻⁵ мм³/Н·м, коэффициент трения 0,65.

выводы

Используя методы просвечивающей, сканирующей электронной микроскопии, измерения механических и трибологических свойств выполнены исследования структурно-фазовых состояний и свойств ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Mn и Co-Cr-Fe-Ni-Al, полученных по аддитивной технологии на подложках из нержавеющей стали и сплава 5083 и подвергнутых ЭПО.

1. Определены механические свойства при сжатии и растяжении ВЭС Со-Сг-Fe-Ni-Mn, полученного при разных режимах наплавочного комплекса, что позволило выявить режим, обеспечивающий наилучшее сочетание прочности и пластичности. При испытаниях на сжатие условный предел текучести составил 279 МПа, временное сопротивление разрушению 1689 МПа, относительная деформация – 54%, а при растяжении – 279 МПа, ≈500 МПа и ≈75%, соответственно. Параметр износа $2,9\cdot10^{-4}$ мм³/H·м, коэффициент трения 0,62. Поверхность разрушения носит вязкий ямочный характер излома.

2. Электронно-пучковая обработка ВЭС Со-Сг-Fе-Ni-Mn с плотностью энергии $E_S = 10$ Дж/см² сопровождается первичной рекристаллизацией с образованием зерен размером 1,5-3 мкм. Увеличение E_S в интервале = (15-30) Дж/см² приводит собирательной рекристаллизации с ростом среднего размера зерен в интервале 35 до 120 мкм. Размер образующихся в объеме зерен ячейки высокоскоростной кристаллизации увеличивается в интервале 310 - 800 нм при соответствующем изменении E_S в интервале 15-30 Дж/см². Скалярная плотность дислокаций немонотонно уменьшается по мере удаления до 130 мкм от поверхности облучения, тип дислокационной структуры меняется от неразориентированной ячеистой до хаотической через неразориентированную ячеисто-сетчатую.

3. ЭПО сопровождается выделением наноразмерных (1-3 нм) частиц FeCr округлой формы на дислокациях. Увеличение E_s приводит при испытаниях на растяжение приводит к заметному снижению прочностных и пластических свойств относительно исходного состояния. Выявлены области материала, разрушение которого произошло с образованием полосовой (пластинчатой) структуры, объемная доля которой увеличивается от 25% до 65 % при изменении E_s в интервале 10-30 Дж/см². Площадь излома пластинчатой структуры увеличивается от 25% при $E_s=10$ Дж/см² до 65% при $E_s=30$ Дж/см², что может являться одной из причин снижения прочности и пластичности материала в облученном состоянии.

4. При формировании ВЭС Со-Cr-Fe-Ni-Mn на поверхности сплава 5083 наблюдается взаимное легирование зоны контакта И повышается микротвердость. Формирование алюминидов железа (Al₁₃Fe₄) пластинчатой морфологии ответственно за упрочнение подложки. Образование зеренносубзеренной структуры субмикронных размеров, на границах и в объеме наблюдаются наноразмерные частицы второй фазы которых (Al₃Ni) обуславливает упрочнение ВЭС.

5. После ЭПО зоны контакта, слой, примыкающий к подложке, состоит из ячеек на основе твердого раствора Mg и Al, по границам которых выявлены

прослойки второй фазы, обогащенные атомами, формирующими покрытие и подложку. Кристаллиты пластинчатой формы (Al 77 ат.%), являются основой центральной области зоны контакта. Контактный слой, примыкающий к покрытию, состоит из структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации, состава 0,17Mg-20,3Al-4,3Cr-16,7Fe-9,3Co-49,2Ni. Ячейки разделены прослойками фазы Al18Cr2Mg3.

6. Установлена природа и основные физические механизмы повышения механических и трибологических свойств ВЭС состава Co-Cr-Fe-Ni-Al с пленкой Cr + В после ЭПО с плотностью E_s = 20 Дж/см². Показано, что ячеистой зернограничный (формирование структуры кристаллизации). твердорастворный (внедрение атомов В в решетку ВЭС), дисперсионный (формирование наноразмерных частиц второй фазы – бориды и оксибориды сложного элементного состава) являются основными упрочняющими факторами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Громов, В.Е. Структура и свойства покрытий из высокоэнтропийных сплавов FeCoCrNiMn и FeCoNiCrAl / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, М.О. Ефимов, К.А. Осинцев, Ю.А. Шлярова, А.Н. Гостевская // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2022. – № 2. – с.88-97.

2. Громов, В.Е. Структура и свойства покрытий из высокоэнтропийных сплавов FeCoCrNiMn и FeCoNiCrAl. Сообщение 2. Анализ структуры и свойств зоны контакта с подложкой / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, М.О. Ефимов, Ю.А. Шлярова, И.А. Панченко // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2022. – № 3. – с.77-89.

3. Иванов, Ю.Ф. Влияние электронно-пучковой обработки на систему «пленка (B+CR) - подложка (высокоэнтропийный сплав AlCrFeCoNi). / Ю.Ф. Иванов, В.В. Шугуров, А.Д. Тересов, М.О. Ефимов, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, И.А. Панченко, Ю.А. Шлярова / Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2022. – № 3. – с.343-352.

4. Иванов, Ю.Ф. Структура и свойства высокоэнтропийного сплава, подвергнутого электронно-ионно-плазменной обработке / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, В.В. Шугуров, М.О. Ефимов, А.Д. Тересов, Е.А. Петрикова, И.А. Панченко, Ю.А. Шлярова // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2022. – № 4. – с.102-115.

5. Иванов, Ю.Ф. Структура и свойства высокоэнтропийного сплава, подвергнутого электронно-ионно-плазменной обработке / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, В.В. Шугуров, М.О. Ефимов, А.Д. Тересов, Е.А. Петрикова, И.А. Панченко, Ю.А. Шлярова // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2022. – № 4. – с.102-116.

6. Громов, В.Е. Вектор развития улучшения свойств ВЭС Кантора / В. Е. Громов, С. В. Коновалов, М. О. Ефимов, И. А. Панченко, В. В. Шляров // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2023. – № 2. – Т.44. – с. 3-12.

7. Иванов, Ю.Ф. Структура и свойства системы «покрытие ВЭС Кантора (Mn-Fe-Cr-Co-Ni) / подложка (сплав 5083)/ Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, М.О. Ефимов, И.А. Панченко, Ю.А. Шлярова // Известия АлтГУ. – 2023. – №1. – с. 37-43.

8. Иванов, Ю.Ф. Структурно-фазовые состояния покрытия ВЭС Al-Fe-Co-Cr-Ni, сформированного на сплаве 5083 / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, М.О. Ефимов, Ю.А. Шлярова, И.А. Панченко, М.Д. Старостенков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2023. – Т. 20. – № 1. С. 41–51.

9. Чень, С. Покрытия из высокоэнтропийных сплавов FeCoCrNiMn и FeCoNiCrAl: структура и свойства/ С. Чень, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, М. О. Ефимов, С. В. Коновалов, В. В. Шляров, И. А. Панченко // Известия АлтГУ. – 2023. – № 4(132). – С. 11-19.

10. Иванов, Ю.Ф., Электронно-микроскопическое исследование структуры зоны контакта подложка-покрытие, подвергнутой облучению импульсным электронным пучком / Ю.Ф. Иванов, М.О. Ефимов, В.Е. Громов, Ю.А. Шлярова, С.В. Коновалов, И.А. Панченко // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2024. – Т. 21. – № 1. – с. 9–16. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.001.

11. Ефимов М.О., Громов В.Е., Коновалов С.В., Панченко И.А., Семин А.П. Изменение механических свойств сплава Cantor при легировании / М.О. Ефимов, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, И.А. Панченко, А.П. Семин // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2024 – Т.48. – №2. – с.69–78.

12. Громов В.Е., Коновалов С.В., Юрьев А.Б., Ефимов М.О. Пути модифицирования свойств и применения высокоэнтропийных канторовских сплавов / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, А.Б. Юрьев, М.О. Ефимов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 4. С. 422–427.

Статьи в зарубежных и переводных рецензируемых изданиях:

1. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Y.F., Efimov M.O., Panchenko I.A., Vorob'ev S.V. Investigation of the Structure and Properties of a Coating from a High-Entropy FeCoCrNiMn Alloy Obtained by a Wire Arc Additive Manufacturing // Phys. Solid State. – 2022. – Vol. 64. – p. 307–311.

2. Громов, В.Е. Управление механическими свойствами высокоэнтропийного сплава Cantor CoCrFeMnNi / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.А. Шлярова, М.О. Ефимов, И.А. Панченко // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2022. – Т.65. – № 8. – с.563-573.

3. Громов, В.Е. Покрытия из высокоэнтропийных сплавов: состояние проблемы и перспективы развития / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, О.Ф. Перегудов, Ю.А. Шлярова, М.О. Ефимов // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2022. – Т.65. – №10. – с.683-692.

4. Ivanov Yu., Gromov V., Konovalov S., Efimov M., Shliarova Yu., Panchenko I. Effect of electron-beam treatment on the structure and properties of (B+Cr) film deposited on a high-entropy alloy AlCrFeCoNi // Materials Letters. 2023. – Vol. 335. – P. 133704

5. Efimov M.O., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A. Analysis of contact zone of coating-substrate system exposed to irradiation with a pulse electron beam // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. -2023. -T.66. $-N_{2}6$. -p.666-672. <u>https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-666-672</u>

6. Громов, В.Е. Управление механическими свойствами высокоэнтропийного сплава Cantor CoCrFeMnNi / С.В. Коновалов, Ю.А. Шлярова, М.О. Ефимов, И.А. Панченко // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2022. – vol.65. – № 8. – p.563-572.

7. Gromov V.E., Ivanov Y.F., Efimov M.O., Shliarova Y.A. Structure and Properties of a high-entropy AlCrFeCoNi alloy after treatment with an electron–ion plasma // Doklady Physics. – 2023. – V. 68(7). – p. 205–208.

8. Иванов, Ю.Ф. Структура зоны контакта наплавка-подложка, подвергнутой электронно-пучковой обработке / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, М.О. Ефимов, Ю.А. Шлярова, И.А. Панченко, С.В. Коновалов // Письма в ЖТФ. – 2023. – Т.49. – Вып.6. – с.26-31. (Ivanov, Yu. F. The structure of the contact zone of the surfacing-substrate subjected to electron-beam processing / Yu. F. Ivanov, V.E.Gromov, M.O. Efimov, Yu. A. Shliarova, I.A.Panchenko, S.V.Konovalov // Technical Physics Letters, 2023. – Vol. 49. – No. 3. – pp.63-66.)

9. Иванов, Ю.Ф. Структура и свойства поверхностного слоя ВЭС после электронно-ионно-плазменной обработки. / Ю.Ф. Иванов, В.В. Шугуров, А.Д. Тересов, Е.А. Петрикова, М.О. Ефимов // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2023. – Т.66. – №4. – с. 427-433

10. Gromov V.E., Konovalov S.V., Yuriev, A.B., Efimov M.O., Polevoi E.V. Effect of Niobium on Mechanical Properties of Steels and High-Entropy Alloys // Russian Physics Journal. – 2024. – V. 67. – P. 742–746. https://doi.org/10.1007/s11182-024-03174-5

11. Иванов, Ю.Ф. Комплексное модифицирование поверхностного слоя высокоэнтропийного сплава Al-Cr-Fe-Co-Ni электронно-ионно-плазменной обработкой / Ю.Ф. Иванов, М.О. Ефимов, А.Д. Тересов, В.Е. Громов, Ю.А. Шлярова, И.А. Панченко // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2024г. – №2. – с.3-10. (Ivanov Y.F., Efimov M.O., Teresov A.D. Gromov V.E., Shliarova Yu.A., Panchenko I.A. Complex Modification of the Surface Layer of a High-Entropy Al–Cr–Fe–Co–Ni Alloy by Electron-Ion-Plasma Treatment // Journal of Surface Investigation. – 2024. – V. 18. – 121–127. https://doi.org/10.1134/S1027451024010269) 12. Громов, В.Е. Пути улучшения свойств ВЭС Cantor CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, М.О. Ефимов, И.А. Панченко, В.В. Шляров // Известия вузов. Черная металлургия. – 2024. – Т.67. – № 3. – с.283–292.

Монографии

1. М.О. Ефимов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Шлярова, И.А. Панченко, Материалы XXI века: высокоэнтропийные сплавы. Полиграфист. 2022. – 225 С.

2. В.Е. Громов, С.В. Коновалов, М.О. Ефимов, И.А. Панченко, А.А. Серебрякова, Структурно-фазовые изменения высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiAl после электронно-пучковой обработки / в монографии: Влияние энергетических воздействий на структуру и свойства многокомпонентных сплавов. – под ред. И.А. Панченко и С.В. Коновалова. – Новокузнецк: Изд-во ООО «Полиграфист», 2023. – с.4-37.

Статьи и тезисы докладов в трудах конференций

Осинцев, К.А. Влияние плотности энергии пучка электронов на 1. поверхности высокоэнтропийного сплава CoCrFeMnNi / K.A. структуру Осинцев, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, И.А. Панченко, М.О. Пашкова || Международная конференция Физическая Ефимов, Д.Д. Физические принципы формирования мезомеханика материалов. многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения. 5-8 сентября 2022. – Томск. Россия. – с.50.

2. Громов, В.Е. Изменение микротвердости покрытий из высокоэнтропийных сплавов / В.Е. Громов, М.О. Ефимов, Ю.А. Шлярова, И.А. Панченко, С.В. Коновалов // Труды XII Международного онлайн симпозиума «Материалы во внешних полях (МВП-2023)», 13-14 марта 2023г. – с.118.

3. Громов, В.Е. Структура и свойства покрытий из высокоэнтропийных сплавов FeCoCrN и FeCoCrNaAl / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, М.О. Ефимов, Ю.А. Шлярова, И.А. Панченко, Г.И. Черепанова // Труды XII Международного онлайн симпозиума «Материалы во внешних полях (МВП-2023)», 13-14 марта 2023г. – с.122.

4. Громов, В.Е. Высокоэнтропийные сплавы кантора CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl: пути улучшения свойств / Громов В.Е., Коновалов С.В., Бирюкова Е.Н., Ефимов М.О., Панченко И.А., Шляров В.В // Тезисы докладов Международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии», 11-14 сентября 2023 г. – с.28

5. Gromov, V.E. High entropy Cantor alloys CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl:methods for improving properties/ V.E. Gromov, S.V. Konovalov, E.N. Biryukova, M.O. Efimov, I.A. Panchenko, V.V. Shlyarov // Advanced High Entropy materials: Abstracts of the 5th international conference and school « Advanced High Entropy materials », October 9-13, 2023. – p.30. 6. Ефимов, М.О. Электронно-микроскопический анализ зоны контакта покрытия из высокоэнтропийного сплава AlFeCoCrNi на подложке из сплава 5083 после облучения электронными пучками/ М. О. Ефимов, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, И.А. Панченко, Ю.А. Шлярова // Физика и технология перспективных материалов–2023: Ф50 сборник трудов Международной конференции (г. Уфа, 2-6 октября 2023 г. / отв. ред. А.А. Назаров. — Уфа: РИЦ УУНиТ, 2023. – с. 409-410

7. Громов, В.Е Изменение механических свойств сплава кантора легированием ниобием и цирконием / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, М.О. Ефимов, И.А. Панченко // Труды XII Международного онлайн симпозиума «Материалы во внешних полях (МВП-2024)», 20 марта 2024 г. – с.72.

8. Ефимов, М.О. Влияние облучения электронными пучками на структуру и свойств высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMn / М.О. Ефимов, И.А. Панченко, В.Е. Громов, С.В. Коновалов // Труды XII Международного онлайн симпозиума «Материалы во внешних полях (МВП-2024)», 20 марта 2024 г. – с.76-77.

9. Ефимов, M.O. Роль электронно-пучковой обработки В формировании структуры и свойств высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMn / М.О. Ефимов, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, И.А. Панченко // Актуальные проблемы прочности: материалы LXVIII международной научной конференции, Витебск, 27-31 мая 2024 года / под ред. В.В. Рубаника. - Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2024. – с. 4.