

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»



На правах рукописи

Осинцев Кирилл Александрович

Влияние электронно-пучковой обработки на структуру и механические свойства
высокоэнтропийного сплава Al-Co-Cr-Fe-Ni, изготовленного с помощью
аддитивного производства

Специальность 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и
сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена на кафедре технологии металлов и авиационного материаловедения в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», и на кафедре естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
КОНОВАЛОВ Сергей Валерьевич

Официальные оппоненты: **ЖЕРЕБЦОВ Сергей Валерьевич**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», профессор кафедры «Материаловедение и нанотехнологии» Института инженерных и цифровых технологий;
АСТАФУРОВА Елена Геннадьевна, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, заведующий лабораторией физики иерархических структур в металлах и сплавах;
СТЕПАНОВ Степан Игоревич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, доцент кафедры термообработки и физики металлов.

Защита состоится «30» ноября 2023 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.01.04 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=5183>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ольга Владимировна Селиванова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В последние десятилетия внимание исследователей привлекла концепция высокоэнтропийных сплавов (ВЭСов), которые состоят из не менее пяти компонентов с концентрациями от 5 до 35 ат. %. Атомы разнородных элементов в структуре ВЭС имеют равную вероятность расположения в узлах кристаллической решетки, поэтому такая система с точки зрения статистической термодинамики обладает высокой энтропией смешения. Предыдущие исследования показали, что благодаря этому в ВЭСах стабильными фазами являются простые кубические структуры с объемно-центрированной (ОЦК) и/или гранецентрированной (ГЦК) кристаллическими решетками вместо большого количества интерметаллидов. Наряду с этим, расположение разнородных атомов в узлах ячеек снижает скорость их диффузии, что увеличивает твердость, коррозионную стойкость, износостойкость и жаропрочность сплава.

Благодаря обнаруженным свойствам ВЭСы перспективны для аэрокосмической, автомобильной, и энергетической промышленности, в которых к материалам предъявляются повышенные требования. Поскольку некоторые ВЭСы, например, системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, обладают высокими прочностью и пределом текучести и характеризуются низкой обрабатываемостью, их внедрение экономически целесообразно только при минимальном использовании механической обработки в технологическом процессе. Снижение затрат может быть достигнуто с помощью аддитивного производства, которое в отличие от литья и штамповки позволяет создавать физические объекты по электронной геометрической модели путем добавления материала слой за слоем.

При аддитивном производстве число операций технологического процесса снижается, и изготавливаемое изделие не вырезается из заготовки. Тем не менее, поверхность требуется обрабатывать для получения заданных свойств. Среди перспективных способов выделяется обработка высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (ЭПО), который отличается очень быстрым нагревом (до 10^6 К/с) и охлаждением (10^4 - 10^9 К/с) поверхности материалов, что формирует неравновесные субмикро- и нанокристаллические структуры, обладающие повышенной твердостью. Данный вид обработки продемонстрировал увеличение механических и трибологических свойств поверхности сталей, алюминиевых и никелевых сплавов, а также чистых металлов. Однако остается малоизученным влияние ЭПО с различной плотностью энергии пучка электронов на механические свойства и структуру поверхности ВЭСов.

Таким образом, исследование влияния различных режимов высокоинтенсивной импульсной электронно-пучковой обработки на структурно-фазовое состояние и механические характеристики высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, изготовленного методом проволочно-дугового аддитивного производства, является актуальным и перспективным для дальнейшего развития и внедрения ВЭСов в современное производство.

Исследования по теме диссертационной работы проводились в рамках гранта РФФИ № 20-19-00452 «Исследование высокоэнтропийных сплавов, получаемых с помощью технологии холодного переноса металла».

Степень научной разработанности проблемы

Анализ состояния научной проблемы показал, что в большинстве исследований, посвященных изготовлению ВЭСов с помощью аддитивных технологий, использовались такие методы, как селективное лазерное плавление или прямое лазерное осаждение. Однако затраты на дорогостоящее оборудование и исходный материал – порошок из чистых компонентов – превышают предполагаемый экономический эффект от внедрения ВЭСов с использованием данных способов. Помимо этого, селективное лазерное плавление подразумевает наличие рабочей камеры, наполненной инертным газом, что делает невозможным изготовление цельных крупногабаритных изделий. Имеющиеся ограничения свидетельствуют о необходимости проведения дальнейших исследований по разработке доступных технологий для изготовления ВЭСов.

Одним из перспективных способов является проволочно-дуговое аддитивное производство, в котором в качестве исходного материала используется металлическая проволока. Возможность получения ВЭСов с помощью данной технологии рассматривалась в ряде работ. В частности, в работах Шэнь К. с соавторами и Ахсан М. Р. с соавторами показано применение многожильных проволок кабельного типа, состоящих из жил чистых металлов и сплавов, для проволочно-дугового аддитивного производства ВЭСов. Использование этого метода осложняется тем, что число доступных проволок из чистых металлов, как и сплавов, ограничено. При этом необходимо точно определять химический и фазовый состав конечного сплава, путем подбора проволок с различными композициями и диаметрами сечения, что является трудоемким процессом. Поэтому для дальнейшего развития технологии проволочно-дугового аддитивного производства для изготовления ВЭСов требуется создание методики, позволяющей ускорить процесс выбора исходных проволок.

Изучению влияния электронного пучка на ВЭСы посвящено ограниченное число работ. Так Лю с соавторами фокусировались на изучении влияния количества импульсов на микроструктуру и свойства литого сплава $\text{CrFeCoNiMo}_{0.2}$. А Нахмани с соавторами применили данный вид энергетического воздействия для сварки высокоэнтропийных сплавов $\text{Al}_{0.6}\text{CrFeCoNi}$ и $\text{Al}_{0.8}\text{CrFeCoNi}$. Полученные результаты показали увеличение износостойкости и микротвердости обработанных материалов за счет измельчения дендритных зерен. Тем не менее, влияние одного из главных параметров обработки электронным пучком, такого как плотность энергии пучка электронов, на микроструктуру, механические и трибологические свойства ВЭС до сих пор остается не изученным.

Данные аспекты определили тему исследования, постановку цели и задач.

Цель работы: установить влияние различных режимов высокоинтенсивной импульсной электронно-пучковой обработки на структурно-

фазовое состояние и механические характеристики высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, изготовленного методом проволочно-дугового аддитивного производства.

В соответствии с этим в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать методику для выбора исходных жил многожильной проволоки, формирующей при проволочно-дуговом аддитивном производстве высокоэнтропийный сплав с заданным химическим и фазовым составом.

2. Выявить особенности микроструктуры, фазового состава, механических и трибологических свойств высокоэнтропийного сплава, изготовленного с помощью проволочно-дугового аддитивного производства.

3. Установить влияние импульсной электронно-пучковой обработки с различной плотностью энергии на микроструктуру, фазовый состав, механические и трибологические свойства высокоэнтропийного сплава, изготовленного с помощью проволочно-дугового аддитивного производства.

Научная новизна.

1. Предложена методика для выбора исходных жил многожильной проволоки, позволяющая получать высокоэнтропийный сплав с заданным химическим и фазовым составом при проволочно-дуговом аддитивном производстве. Разработаны программы для ЭВМ № 2021667530 и № 2020666726 для расчета химического состава изделий, изготавливаемых с помощью многожильной проволоки по технологии проволочно-дугового аддитивного производства, а также для сопоставления рассчитанных термодинамических и физических параметров с феноменологическими критериями и определения на основе этого фазового состава пятикомпонентных высокоэнтропийных сплавов.

2. Впервые изготовлен высокоэнтропийный сплав $Al_{36}Co_5Cr_8Fe_{17}Ni_{34}$ с помощью проволочно-дугового аддитивного производства с использованием многожильной проволоки. Показано, что сплав имеет микроструктуру, состоящую из основной фазы AlNi с типом строения упорядоченной ОЦК/B2 решетки и включений вторых фаз Al_3Ni , Cr_3C_2 и $(Ni,Co)_3Al_4$, выделившихся в междендритных областях.

3. Впервые установлено влияние различной плотности энергии пучка электронов импульсной электронно-пучковой обработки на микроструктуру, фазовый состав, механические и трибологические свойства высокоэнтропийного сплава $Al_{36}Co_5Cr_8Fe_{17}Ni_{34}$, изготовленного с помощью проволочно-дугового аддитивного производства. Обнаружено увеличение однородности распределения химических элементов, а также растворение включений вторых фаз в поверхности после ЭПО, приводящее к увеличению механических и трибологических свойств.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты исследования, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, продемонстрировали возможность изготовления высокоэнтропийного сплава с заданным химическим и фазовым составом с помощью проволочно-дугового аддитивного производства с использованием многожильной проволоки. Показана эффективность ЭПО для улучшения свойств поверхности высокоэнтропийного сплава $Al_{36}Co_5Cr_8Fe_{17}Ni_{34}$, изготовленного с помощью

проволочно-дугового аддитивного производства, которая выражается в формировании мелкозернистой ячеистой структуры и увеличении однородности распределения химических элементов. Использование данного метода поверхностной модификации имеет перспективы для уменьшения скорости износа и коэффициента трения высокоэнтропийного сплава, а также улучшения механических свойств.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых в области высокоэнтропийных сплавов, а также исследований в области аддитивного производства и поверхностной обработки металлических материалов. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были использованы следующие методы исследования: рентгеноструктурный анализ, оптическая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, измерение микротвердости, испытания на одноосное сжатие, трибологические испытания.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика для выбора исходных жил многожильной проволоки, позволяющая получать высокоэнтропийный сплав с заданным химическим и фазовым составом при проволочно-дуговом аддитивном производстве.

2. Результаты исследования микроструктуры, фазового состава, механических и трибологических свойств высокоэнтропийного сплава $Al_{36}Co_5Cr_8Fe_{17}Ni_{34}$, изготовленного с помощью проволочно-дугового аддитивного производства.

3. Результаты исследования влияния электронно-пучковой обработки с различной плотностью энергии на микроструктуру, фазовый состав, механические и трибологические свойства высокоэнтропийного сплава $Al_{36}Co_5Cr_8Fe_{17}Ni_{34}$, изготовленного с помощью проволочно-дугового аддитивного производства.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов проведенного исследования обеспечивается применением комплекса современных методов исследований, значительным объемом экспериментальных данных и их согласованностью с результатами, полученными другими исследователями.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XI Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов», Россия, г. Тольятти, 26–30 октября 2020 г., XIII ежегодном заседании Научного Совета РАН по физике конденсированных сред и научно-практическом семинаре «Актуальные проблемы физики конденсированных сред», Россия, г. Черноголовка, 2020, международной конференции «Twenty-Eighth International Conference on Processing and Fabrication of Advanced Materials» Индия, г. Ченнай, 2020, международной научно-практической конференции «Проблемы прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий», Россия, г. Новокузнецк, 2021, международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии», Россия, г.

Томск, 2021 г., LXIII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», Россия, г. Тольятти, 2021, XXII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество», Россия, г. Новокузнецк, 2021, международной конференции «The VIII International Youth Scientific Conference Physics. Technologies. Innovation. PTI-2021», Россия, г. Екатеринбург, 2021, международной конференции «The IX International Youth Scientific Conference Physics. Technologies. Innovation. PTI-2022», Россия, г. Екатеринбург, 2022, всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения», Россия, г. Новокузнецк, 2022.

Публикации. Соискатель имеет 26 опубликованных работ по теме диссертации общим объёмом 24,625 печатных листов, из которых 11 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 4, проиндексированных в международных базах цитирования Scopus, 2 монографии, 9 в сборниках трудов международных научно-технических конференций, 1 в прочих изданиях. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, а также 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора состоит в разработке методики для выбора исходных жил многожильной проволоки, позволяющей получать высокоэнтропийный сплав с заданным химическим и фазовым составом при проволочно-дуговом аддитивном производстве, изготовлении образцов высокоэнтропийного сплава с помощью проволочно-дугового аддитивного производства, проведении структурного анализа с использованием оптической и электронной микроскопии, оценке фазового состава методом рентгеноструктурного анализа, обобщении и анализе полученных экспериментальных данных, а также формировании выводов.

Соответствие диссертации специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствует научной специальности 2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов в части пунктов: 2. Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, включая технологические воздействия, и влияние сварочного цикла на металл зоны термического влияния, их моделирование и прогнозирование; 11. Определение механизмов влияния различных механических, тепловых, магнитных и других внешних воздействий на структуру металлических материалов и разработка на этой основе новых методик их испытаний, обеспечивающих надежное прогнозирование и моделирование работоспособности конструкций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 6 приложений. Полный объем диссертации составляет 126 страниц, включая 47 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 150 наименований.

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.

В первой главе «Анализ свойств и методов получения высокоэнтропийных сплавов», являющейся обзорной, проведен анализ научных источников, отражающих современное состояние проблемы получения и исследования структуры и свойств высокоэнтропийных сплавов. Особое внимание уделено методам изготовления и обработки высокоэнтропийных сплавов. На основе анализа литературных источников сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе «Разработка методики по выбору исходных жил для многожильной проволоки, формирующей высокоэнтропийный сплав» предложены методики по выбору химического состава исходных жил многожильной проволоки для изготовления высокоэнтропийного сплава с помощью проволочно-дугового аддитивного производства. Для определения химического состава исходных проволок и их диаметров, при сплавлении которых полученный будет высокоэнтропийным (концентрация каждого из пяти основных компонентов должна составлять от 5 до 35 ат. %) была разработана программа WAAMwire_v.1. Программа позволяет комбинировать различные проволоки и их диаметры, чтобы рассчитать химический состав их сплавления. Расчет был основан на допущении о том, что каждая жила не имеет дефектов, а атомы находятся на бесконечно малых расстояниях друг от друга, тем самым занимая всю площадь поперечного сечения. Если рассмотреть в качестве модели поперечный вырез из многожильной проволоки, состоящей из трех жил с известными диаметрами и толщиной в 1 атом, то площадь занимаемой атомами поверхности можно считать пропорциональной их химическому составу в исходных жилах. Зная химический состав исходных проволок, можно найти общий химический состав (в ат.%), разделив рассчитанное количество атомов каждого из элементов на общее число атомов. Для прогнозирования фазового состава, была разработана программа HEAPredict_v.1, в которой на основе расчетов феноменологических критериев, термодинамических и физических параметров, известных из литературы, производилась оценка образования различных фаз, в зависимости от химического состава сплава. Разработанные программы использовались следующим образом:

1. В базу данных программы WAAMwire_v.1 вносились химические составы различных проволок.

2. Варьируя значением диаметров и химическим составом исходных проволок, рассчитывались химические составы сплавов, которые могут быть получены в результате аддитивного производства.

3. Результаты комбинирования вносились в таблицу и использовались в программе HEAPredict_v.1.

4. Критерием выбора являлось формирование однофазной объемно-центрированной кубической решетки.

В результате выбраны исходные проволоки, сплавление которых образует сплав, имеющий ОЦК кристаллическую решетку со следующим химическим составом: 35,0 ат. % Al, 6,0 ат. % Co, 7,1 ат. % Cr, 16,6 ат. % Fe и 34,4 ат. % Ni. Были также оценены возможные примеси: 0,33 ат. % Si, 0,04 ат. % C, 0,33 ат. % Mn.

В третьей главе «Материалы и методы исследования» представлены материалы и оборудование, применяемое для изготовления высокоэнтропийного сплава выбранного состава. В качестве исходных проволок были выбраны алюминиевая проволока (Al \approx 99,95 масс.%, диаметр 0,5 мм), хромоникелевая проволока X20Ni80 (Cr \approx 20 масс.%, Ni \approx 80 масс.%, диаметр 0,4 мм), а также проволока из прецизионного сплава 29NiCo (Co \approx 17 масс.%, Fe \approx 54 масс.%, Ni \approx 29 масс.%, диаметр 0,4 мм). С помощью лабораторной установки проволоки были скручены в трехжильный кабель с диаметром 1 мм и шагом витка 10 мм. Наплавка заготовок производилась с помощью инверторного сварочного аппарата для полуавтоматической сварки Сварог Tech MIG 250, управляемого модифицированным для наплавки металлических материалов 3D принтером Anycubic Chiron. Сварочный аппарат был подключен к 3D принтеру таким образом, что зажигание дуги, направление и скорость движения горелки задавались программным путем. Следующие параметры работы наплавочного комплекса были подобраны в результате предварительных экспериментов и сохранялись постоянными во время аддитивного производства: скорость подачи проволоки – 8 м/мин, напряжение – 17 В, скорость движения горелки – 0,3 м/мин, скорость подачи газа (Ar) – 14 л/мин. Полученные заготовки высокоэнтропийного сплава имели размеры 60x140x20 мм и представляли собой параллелепипеды, состоящие из 20 наплавленных слоев в высоту и 4 слоев в толщину (рисунок 1).

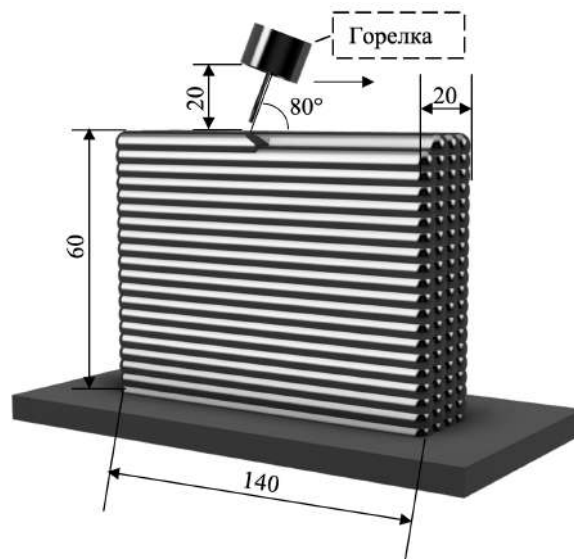


Рисунок 1 – Схема проведения проволоочно-дугового аддитивного производства образцов высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni. Стрелкой указано направление движения горелки

Облучение образцов интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛЮ» в Институте сильноточной электроники СО РАН. Электронно-пучковая обработка была проведена при следующих параметрах: энергия ускоренных электронов $U = 18$ кэВ, плотность энергии пучка электронов $E_s = (10, 20, 30)$ Дж/см², длительность импульса пучка электронов $f = 200$ мкс, количество импульсов $N = 3$. Облучение осуществляли в вакууме при давлении остаточного газа (аргон) в камере установки $p = 0,02$ Па.

Проведено исследование микроструктуры и фазового состава высокоэнтропийного сплава до и после ЭПО. В качестве оборудования для металлографии был использован оптический микроскоп ЛОМО МЕТАМ РВ-21. Для составления карт распределения химических элементов, исследования фрактотграфии разрушения образцов до и после ЭПО, а также для выявления особенностей микроструктуры применяли растровые сканирующие электронные микроскопы «LEO EVO 50», Carl Zeiss с энергодисперсионным анализатором INCA-energy и TESCAN VEGA с энергодисперсионным анализатором INCAx-act. Фазовый состав и состояние кристаллической решетки образцов ВЭС до и после ЭПО изучали методами рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа (рентгеновские дифрактометры Shimadzu XRD 6000 и ДРОН-7). Распределение химических элементов в ВЭС до и после ЭПО изучали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (JEOL JEM-2100, с насадкой EM-24511SIOD).

Механические свойства оценивались с помощью проведения испытаний на одноосное сжатие и растяжение, а также измерения твердости по Виккерсу. Испытания на сжатие проводились на испытательном прессе ИП-500М-авто. Скорость нагружения составляла 0,1 кН/с. Испытания на растяжение проводились на установке Instron 3369 при скорости испытаний 2 мм/мин. Твердость ВЭС, полученного с помощью проволочно-дугового аддитивного производства определяли по Виккерсу на твердомере HV-1000. Во время испытаний величина нагрузки и время выдержки составляли 1 Н и 10 с. Твердость по Виккерсу после ЭПО определяли внедрением индентора в обработанную поверхность. Величина нагрузки 0,2 Н и время нагружения 10 с были выбраны таким образом, чтобы глубина внедрения индентора не превышала толщину обработанного слоя. Трибологические свойства (износостойкость и коэффициент трения) определяли на обработанной поверхности плоских образцов на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция).

В четвертой главе «Исследование структурно-фазового состояния и механических свойств сплава Al-Co-Cr-Fe-Ni после проволочно-дугового аддитивного производства» представлены результаты исследований микроструктуры, фазового и химического состава, а также механических свойств сплава Al-Co-Cr-Fe-Ni, изготовленного с помощью проволочно-дугового аддитивного производства. Сплав имеет следующий химический состав, определенный методом микрорентгеноспектрального анализа: $35,6 \pm 1,3$ ат. % Al, $5,0 \pm 0,1$ ат. % Co, $8,3 \pm 0,2$ ат. % Cr, $17,3 \pm 1,8$ ат. % Fe и $33,8 \pm 0,5$ ат. % Ni.

Каждый наплавленный слой ВЭСа имеет высоту 2,4 мм и состоит из дендритных зерен, образование которых характерно для проволочно-дугового аддитивного производства и обусловлено скоростями охлаждения 100–300 К/с, сравнимыми со скоростями охлаждения при дуговой плавке (100 К/с) (рисунок 2). Кристаллизация жидкого металла, поступающего от расплавляемой проволоки, начинается в нижней части ванны расплава, контактирующей с предыдущим наплавленным слоем. Возникает явление сильного переохлаждения, в результате которого образуется прослойка толщиной 80–100 мкм, состоящая из полиэдрических зерен с размерами 14–40 мкм (рисунок 2 (б, г, д, ж)). Образовавшаяся прослойка уменьшает скорость теплообмена, поэтому микроструктура в средней части наплавленного слоя имеет форму столбчатых зерен, ориентированных вдоль направлений отвода тепла, с продольными размерами 100–250 мкм и поперечными размерами 30–70 мкм (рисунок 2 (в, е)). В верхней части наплавленного слоя наблюдается образование дефектов в виде пор с размерами 20–75 мкм, наличие которых может быть связано с поглощением H_2 , O_2 и/или N_2 в виде газа в расплавленной ванне. Наряду с этим, причиной возникновения пор может являться Al, который имеет в 2 раза больший коэффициент линейного термического расширения и меньшую температуру плавления, чем остальные элементы, входящие в состав сплава. Поскольку содержание Al в сплаве превышает стехиометрическое значение для образования фазы AlNi, то часть чистого Al, которая не сплавилась с Ni при температуре 1638 °С, находится между кристаллами в жидкой фазе до температуры ~660 °С и заполняет больший объем, чем в твердой фазе. При охлаждении ниже температуры солидуса занимаемый атомами Al объем уменьшается и формируются наблюдаемые пустоты (Рисунок 2 д).

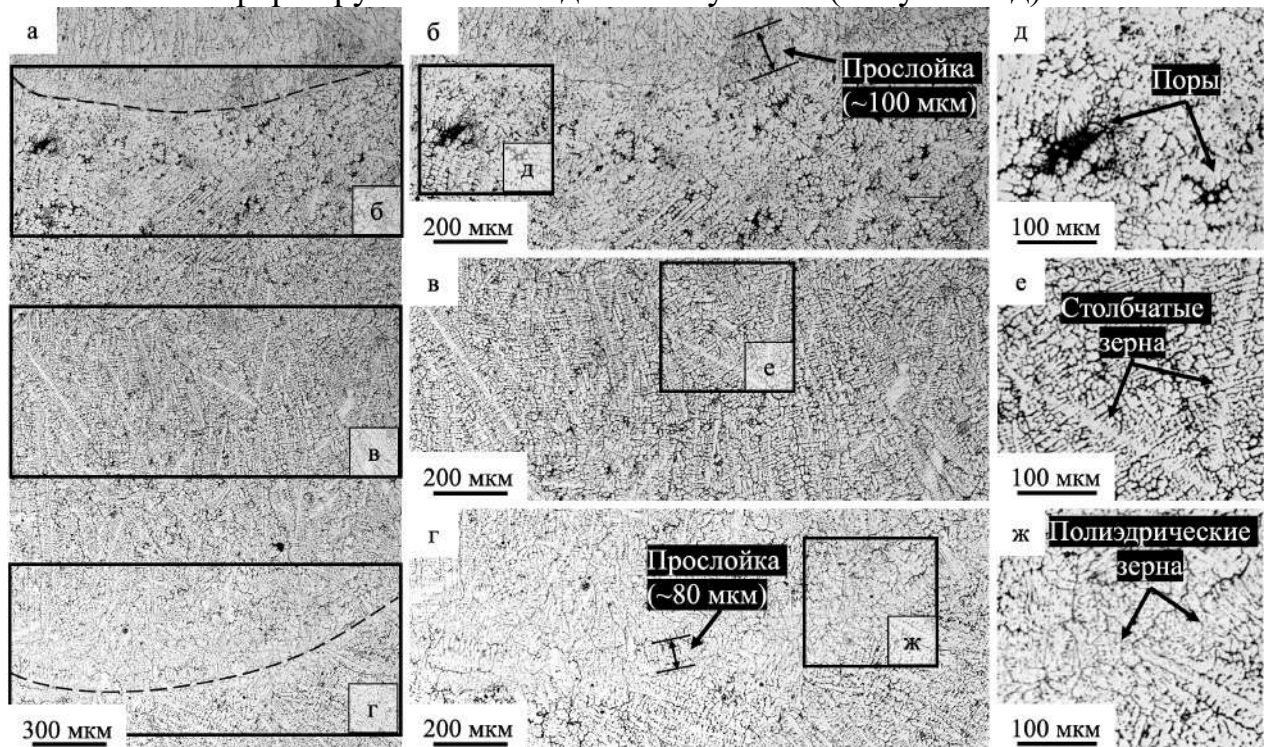


Рисунок 2 – (а) Панорамное изображение микроструктуры поперечного сечения ВЭС $Al_{36}Co_5Cr_8Fe_{17}Ni_{34}$, полученное с помощью оптической микроскопии: (а)

наплавленный слой, условные границы которого обозначены пунктирными линиями, (б–ж) увеличенные изображения микроструктуры, соответствующие выделенным областям

С помощью сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа установлено неоднородное распределение химических элементов в осях и межосных промежутках дендритов (дендритная ликвация): Ni и Al сосредоточены в осях дендритов, Fe и Cr выделяются по границам и в междендритных областях, а Co распределен однородно (рисунок 3). В данном случае, вероятно, что Al и Ni сосредоточены в осях дендритов, потому что эти элементы имеют более высокую скорость диффузии, чем Fe и Cr, которые собираются в областях, где диффузионный поток меньше. Co распределен однородно, вероятно, из-за того, что его концентрация в сплаве невысока (5 ат. %), и он диффундирует в кристаллическую решетку без какой-либо предпочтительной ориентации.

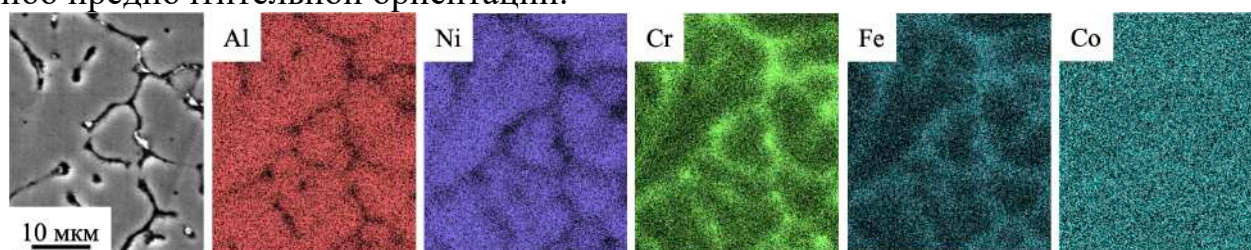


Рисунок 3 – СЭМ-изображение и карты распределения компонентов в микроструктуре ВЭС $Al_{36}Co_5Cr_8Fe_{17}Ni_{34}$, полученные с помощью энергодисперсионного микроанализа

Рентгенофазовый анализ установил формирование фазы AlNi с типом строения упорядоченной ОЦК/В2 решетки с параметром 0,2883 нм (рисунок 4). Однако, этот метод не всегда позволяет распознать все фазы, присутствующие в материале, особенно в случае, когда фазы имеют схожие параметры решетки, поэтому для уточнения фазового состава был также применен микродифракционный анализ с использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

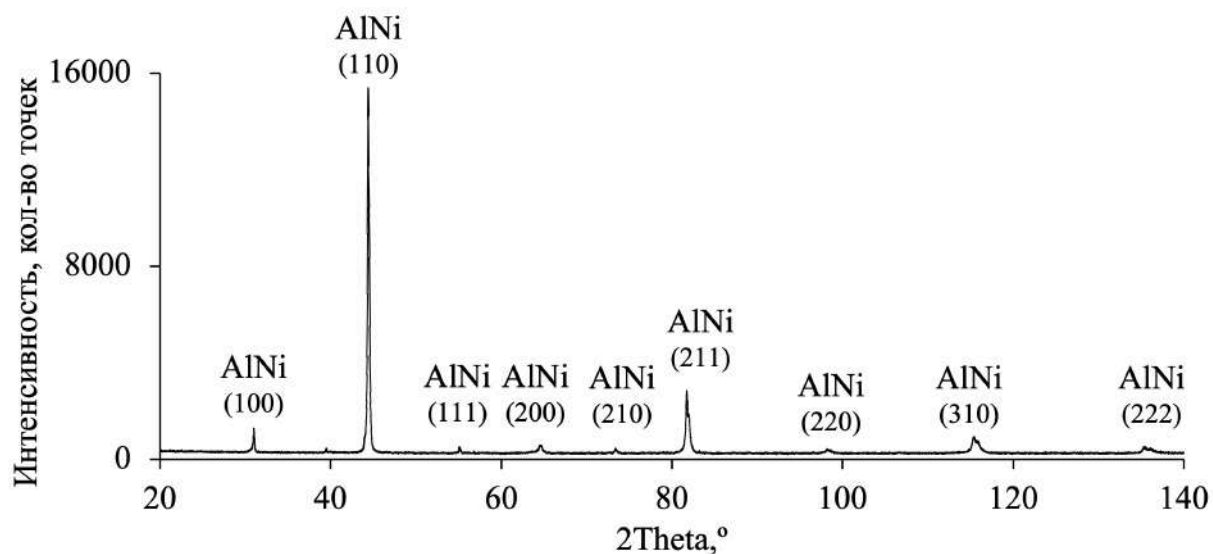


Рисунок 4 – (а) Дифрактограмма ВЭС $Al_{36}Co_5Cr_8Fe_{17}Ni_{34}$

Анализ структуры сплава методами ПЭМ показал, что в межосных промежутках дендритов присутствуют кубовидные частицы с размерами 42 ± 3 нм (Рисунок 5 (б)), вытянутые лентообразные частицы с продольными размерами 590 ± 229 нм, поперечными размерами 152 ± 30 нм (Рисунок 5 (в)) и наноразмерные частицы с размерами 3-10 нм (Рисунок 5 (г, ж)). Результаты микродифракционного анализа и микрорентгеноспектрального анализа показали, что частицы кубовидной формы являются интерметаллидам Al_3Ni , вытянутые частицы – Cr_3C_2 , а наноразмерные частицы – алюминиды $(\text{Ni},\text{Co})_3\text{Al}_4$. Обнаружение в междендритных промежутках частиц карбида Cr_3C_2 может быть обусловлено тем, что в процессе наплавки на поверхности материала образовался оксидный слой, который содержал углерод. Этот слой может формироваться из углекислого газа, который образуется в результате реакции между металлом и оксидами, присутствующими в окружающей среде. Далее, при наплавке, углерод из оксидного слоя может взаимодействовать с хромом, образуя карбид Cr_3C_2 .

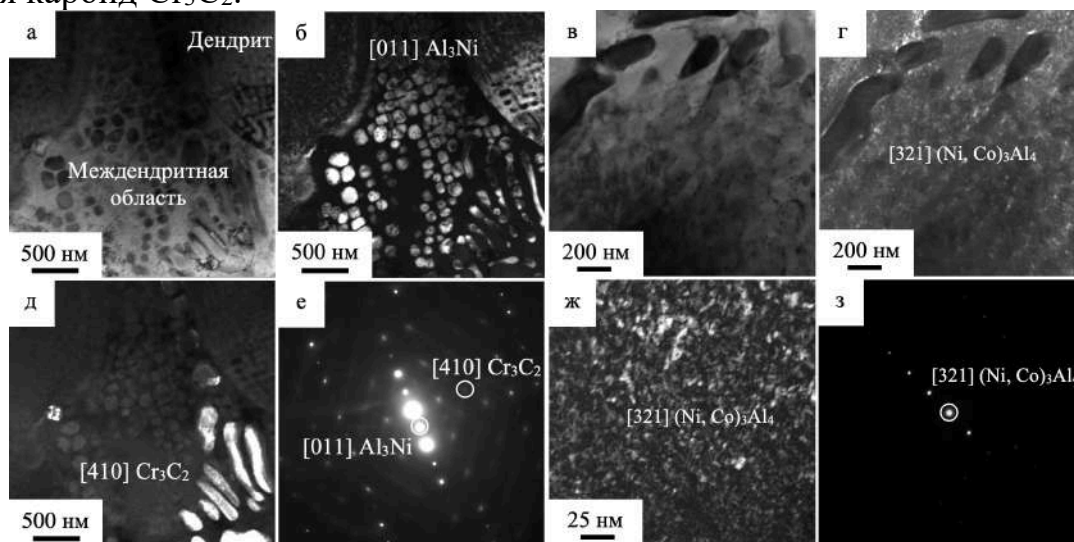


Рисунок 5 – ПЭМ-изображения ВЭС $\text{Al}_{36}\text{Co}_5\text{Cr}_8\text{Fe}_{17}\text{Ni}_{34}$; (а, в) – светлопольные изображения; (б) – темнопольное изображение в рефлексе $[011] \text{Al}_3\text{Ni}$; (г, ж) – темнопольные изображения в рефлексе $[321] (\text{Ni}, \text{Co})_3\text{Al}_4$; (д) – темнопольное изображение в рефлексе $[410] \text{Cr}_3\text{C}_2$; (е,з) – дифракционные картины соответствующих участков

Испытания на сжатие (рисунок 6 (а)) показали, что сплав характеризуется хрупким механизмом разрушения. Величина временного сопротивления материала равна 1361 МПа, а условный предел текучести – 523 МПа. Относительная деформация до разрушения составляет 11%. Фрактография после растяжения (рисунок 6 (б)) показала, что в объеме зерен присутствует ручьеобразный узор, который представляет собой ступеньки между различными локальными фасетками скола одной и той же общей плоскости. Источником локального разрушения явилась частица второй фазы, расположенная в стыке четырех зерен. Исходя из результатов, полученных с помощью ПЭМ, такой фазой могли быть: Al_3Ni , $(\text{Ni}, \text{Co})_3\text{Al}_4$ или Cr_3C_2 .

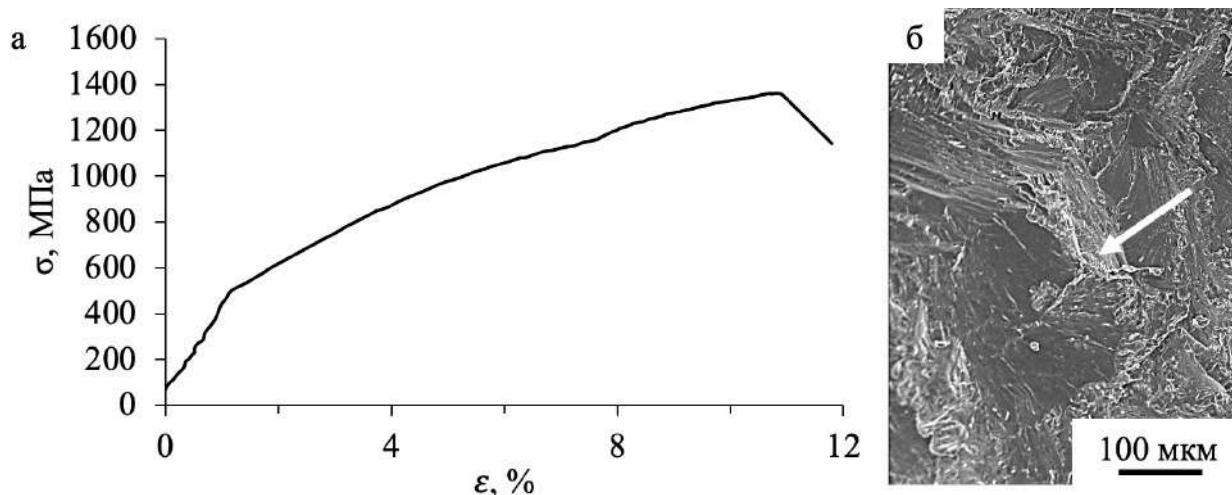


Рисунок 6 – (а) кривая одноосного сжатия ВЭС, (б) СЭМ поверхности разрушения ВЭС после растяжения. Стрелкой указана частица второй фазы

В пятой главе «Влияние электронно-пучковой обработки на микроструктуру, фазовый состав и свойства высокоэнтропийного сплава» представлены результаты исследования влияния ЭПО с плотностью энергии 10, 20 и 30 Дж/см² на микроструктуру, фазовый состав, механические и трибологические свойства высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, изготовленного с помощью проволочно-дугового аддитивного производства.

При обработке ВЭС электронным пучком микроструктура поверхностного слоя изменяется на глубину от 5 до 15 мкм при увеличении плотности энергии пучка электронов от 10 до 30 Дж/см² (рисунок 7 (а–в)). Результаты сканирующей электронной микроскопии показали, что при воздействии с плотностью энергии пучка электронов 10 Дж/см² поверхность образца приобретает оплавленную и рельефную структуру, о наличии которой можно сделать вывод по темным и светлым областям (рисунок 7 (г)). Темные области представляют собой оплавленные границы зерен, а светлые – оплавленные зерна. Микроструктура поверхности после ЭПО с плотностью энергии 20 Дж/см² характеризуется менее выраженным рельефом, чем при 10 Дж/см², что может свидетельствовать о частичном переплавлении исходных зерен и формировании новых (рисунок 7 (б, д)). При режиме воздействия с плотностью энергии 30 Дж/см² в обработанной слое, как на поверхности, так и в поперечном сечении отсутствуют границы зерен исходного материала, что указывает на их полную перекристаллизацию (рисунок 7 (в, е)).

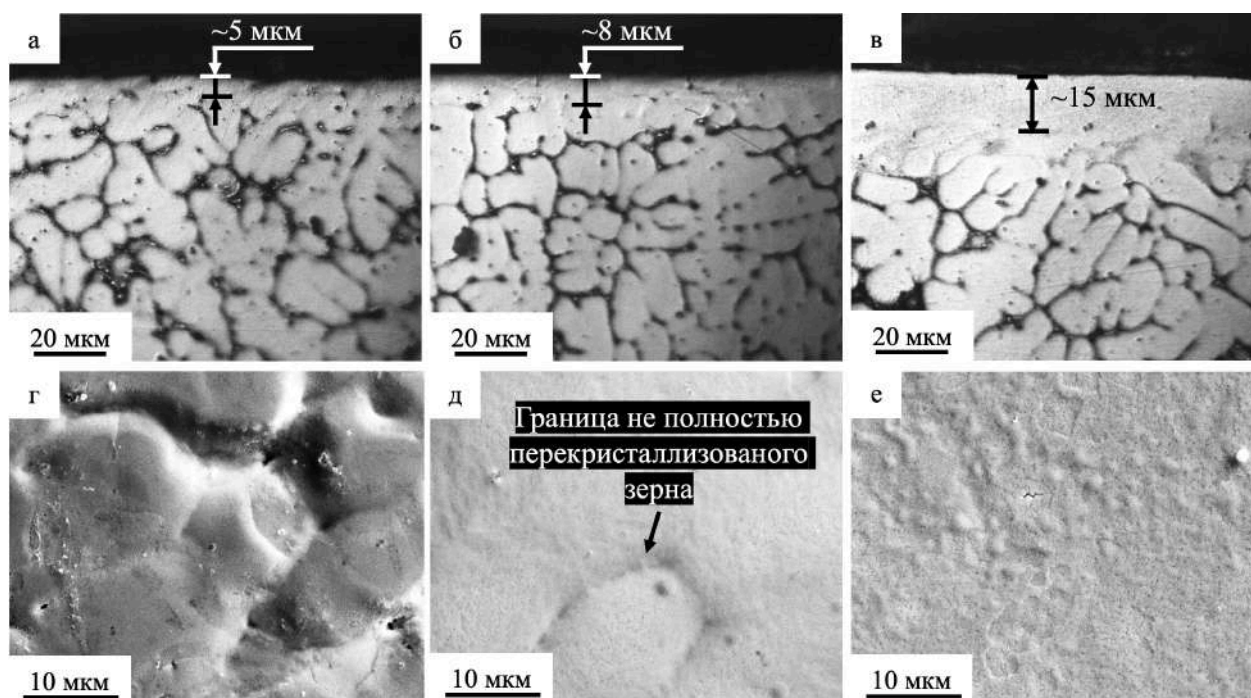


Рисунок 7 – СЭМ-изображения поперечного сечения (а–в) и обработанной поверхности (г–е) сплава Al-Co-Cr-Fe-Ni после ЭПО с различной плотностью энергии пучка электронов: (а, г) 10 Дж/см², (б, д) 20 Дж/см², (в, е) 30 Дж/см²

Просвечивающая электронная микроскопия и энергодисперсионный микроанализ подтвердили различия в микроструктуре ВЭС на субмикроразмерном уровне после ЭПО с плотностями энергий 10–30 Дж/см². Микроструктура поверхности образца после воздействия пучка электронов с плотностью энергии 10 Дж/см², демонстрирует сходства с микроструктурой в исходном состоянии: наблюдается неоднородное распределение химических элементов с преобладанием Cr ($50,7 \pm 18,1$ ат. %) в междендритных областях (темные области) и Fe ($31,3 \pm 8,2$ ат. %) и Ni ($20,7 \pm 7,2$ ат. %) в зернах (светлые области) (рисунок 8). Вероятно, это связано с тем, что плотность энергии пучка электронов при его воздействии на образец не позволяет достичь критических условий для полной перекристаллизации дендритных зерен и образования более однородной структуры. В то же время плотность энергии все еще достаточна для активации диффузионных процессов, что может приводить к некоторому перераспределению элементов, но не настолько интенсивному, чтобы существенно изменить микроструктуру.

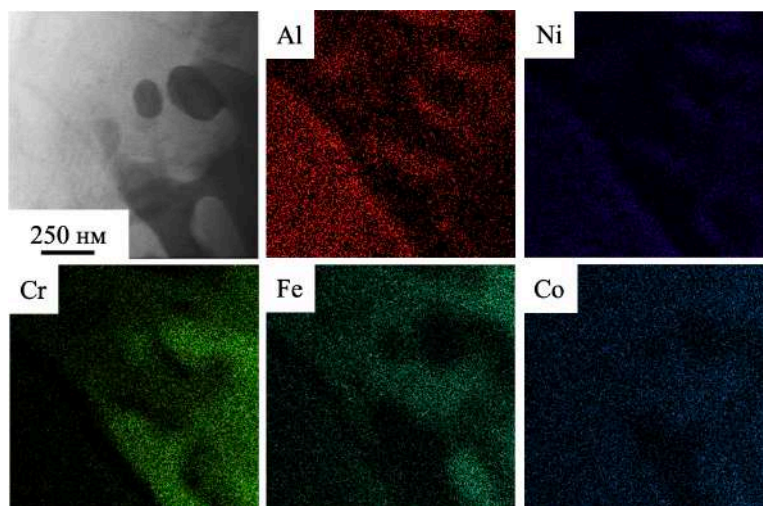


Рисунок 8 – Карты распределения элементов в ВЭС после облучения импульсным электронным пучком с плотностью энергии 10 Дж/см²

Облучение ВЭС импульсным электронным пучком с плотностью энергии 20 Дж/см² (рисунок 9) формирует ячеистую структуру высокоскоростной кристаллизации в поверхностном слое. Размер ячеек варьируется в диапазоне 100–200 нм. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что границы ячеек обогащены Fe ($20,0 \pm 3,4$ ат. %) и Cr ($18,6 \pm 3,3$ ат. %), а внутри ячеек преобладают Al ($39,2 \pm 2,3$ ат. %) и Ni ($27,5 \pm 2,4$ ат. %).

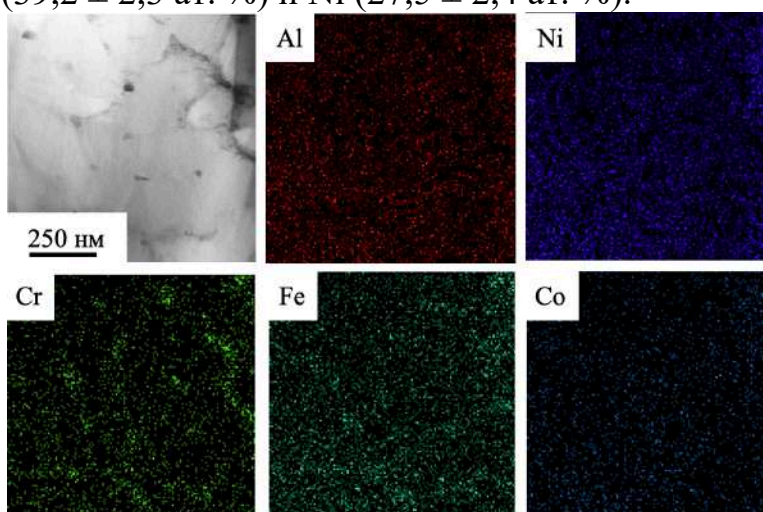


Рисунок 9 – Карты распределения элементов в ВЭС после облучения импульсным электронным пучком с плотностью энергии 20 Дж/см²

Увеличение плотности энергии пучка электронов до 30 Дж/см² приводит к полной перекристаллизации дендритных зерен и сопровождается формированием ячеек с размерами 192 ± 5 нм (рисунок 10). На границах ячеек наблюдаются скопления атомов Fe ($20,9 \pm 3,8$ ат. %) и Cr ($23,8 \pm 8,6$ ат. %), тогда как само зерно обогащено Al ($40,6 \pm 0,8$ ат. %) и Ni ($29,2 \pm 0,8$ ат. %). Полная перекристаллизация дендритных зерен может быть объяснена более интенсивным расплавлением материала и более высокими температурными градиентами, которые способствуют быстрому росту новых зерен и формированию мелкозернистой структуры.

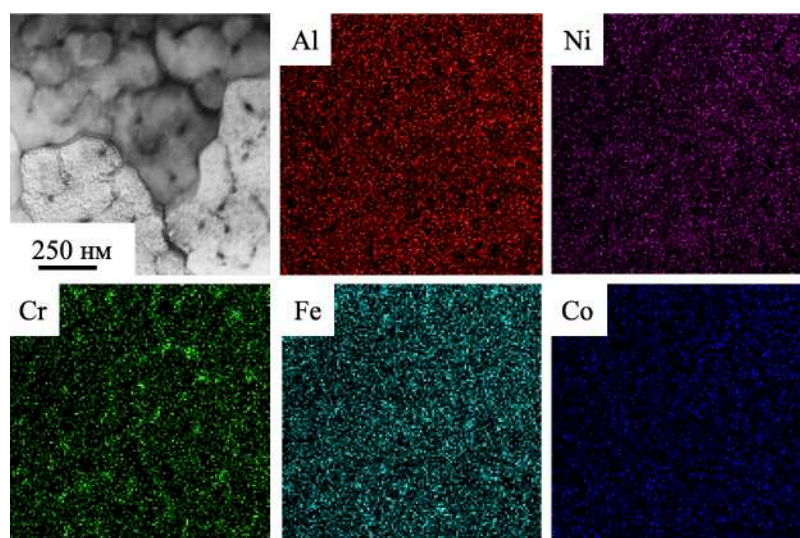


Рисунок 10 – Карты распределения элементов в ВЭС после облучения импульсным электронным пучком с плотностью энергии 30 Дж/см²

Для количественной оценки степени химической микронеоднородности был использован коэффициент ликвации, $K_{ц}$, который определялся как отношение количества элемента на границе и внутри зерна, выраженных в процентном соотношении (рисунок 11). В исходном состоянии наибольшие значения $K_{ц}$ наблюдаются у Al (7,2) и Ni (4,9). Воздействие электронными пучками снижает микронеоднородность распределения всех компонентов, при этом наибольшая однородность достигается при режимах обработки с плотностями энергии 20 и 30 Дж/см². Так, коэффициент ликвации Al снижается в ~4 раза до величины 1,8, а Ni – в ~3 раза до величины 1,7. Снижение коэффициента ликвации Al и Ni в результате обработки электронными пучками может быть объяснено эффектом термодиффузии. Этот эффект заключается в том, что при повышенной температуре в материале происходит диффузия элементов из областей повышенной концентрации в области с меньшей концентрацией. Таким образом, обработка электронными пучками ВЭС Al₃₆Co₅Cr₈Fe₁₇Ni₃₄ формирует мелкозернистую структуру с более однородным распределением компонентов, чем в исходном состоянии.

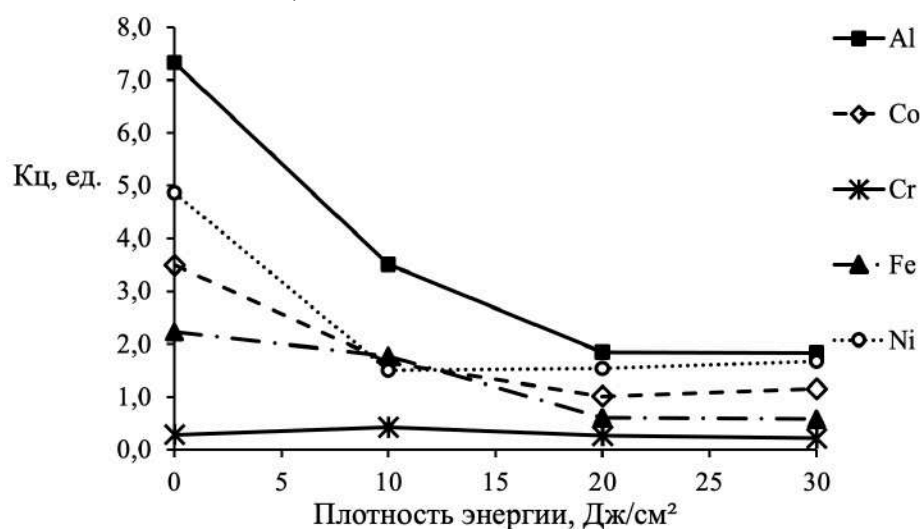


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента ликвации химических элементов от плотности энергии пучка электронов

Фазовый состав ВЭС не изменяется после ЭПО (Рисунок 12), но уменьшается параметр решетки: 0,28832 нм (исходный), 0,28774 (10 Дж/см²), 0,28816 (20 Дж/см²), 0,28806 нм (30 Дж/см²). Об этом свидетельствует смещение пиков дифракции относительно исходных позиций. Уменьшение параметра решетки может быть связано с растворением вторых фаз, отсутствие которых было зафиксировано с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

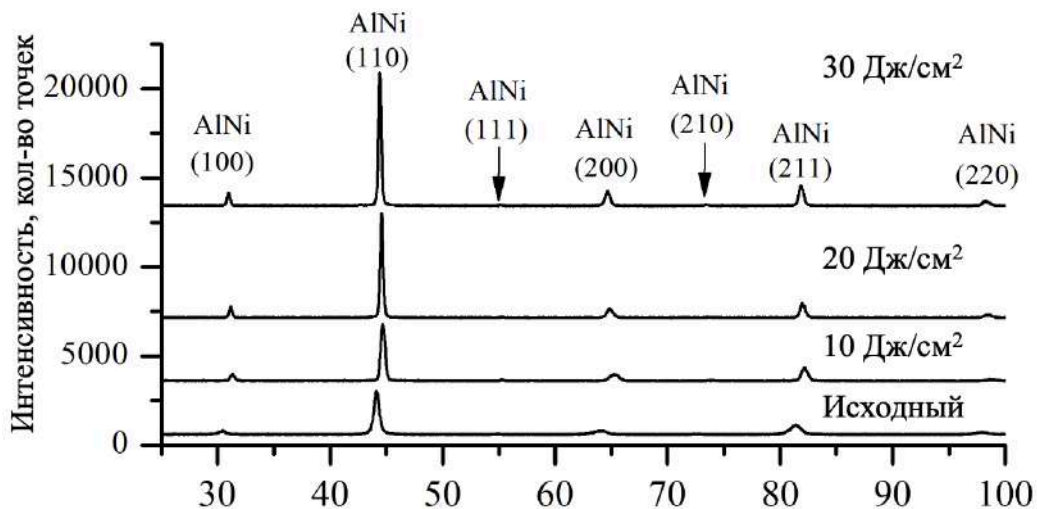


Рисунок 12 – Дифрактограммы ВЭС, полученные с поверхности, обработанной электронным пучком с различной плотностью энергии

Облучение ВЭС электронным пучком привело к увеличению значений механических свойств материала. Так, временное сопротивление на сжатие, увеличилось в 1,6 раза (Рисунок 13). Наибольшее значение временного сопротивления при сжатии 2179 МПа было получено в сплаве, обработанном электронным пучком с плотностью энергии 30 Дж/см². Условный предел текучести при сжатии при этом составил 522 МПа, а относительная деформация до разрушения 25 %. Улучшение механических свойств может быть связано с растворением твердых фаз и более однородным распределением компонентов в поверхностном слое, чем в исходном состоянии.

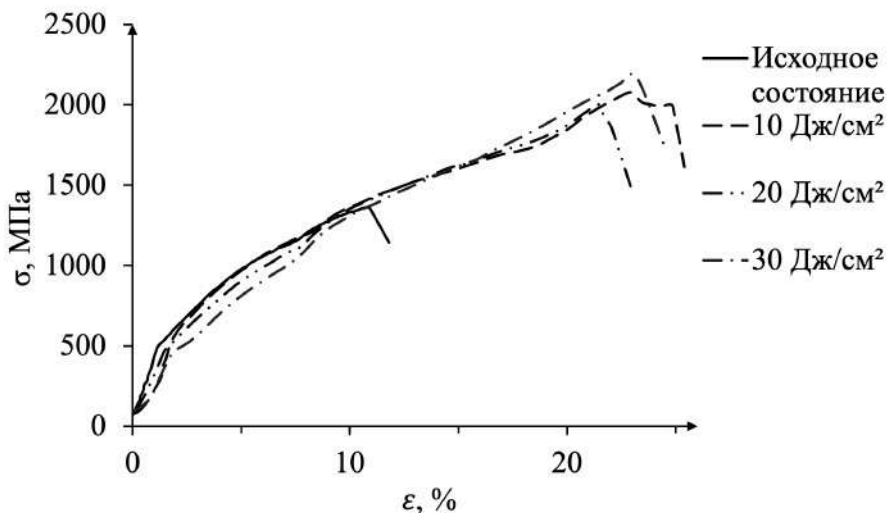


Рисунок 13 – Кривые напряжение-деформация ВЭС в исходном состоянии и после ЭПО

Результаты трибологических испытаний показали, что ЭПО приводит к снижению площади износа до 40 % и уменьшению скорости износа в ~2 раза (рисунок 14). Это может быть связано с тем, что обработанный слой имеет ячеистую структуру с размером кристаллитов не превышающим 200 нм, которые могут выступать в качестве твердой смазки при откалывании от поверхности и уменьшать износ.

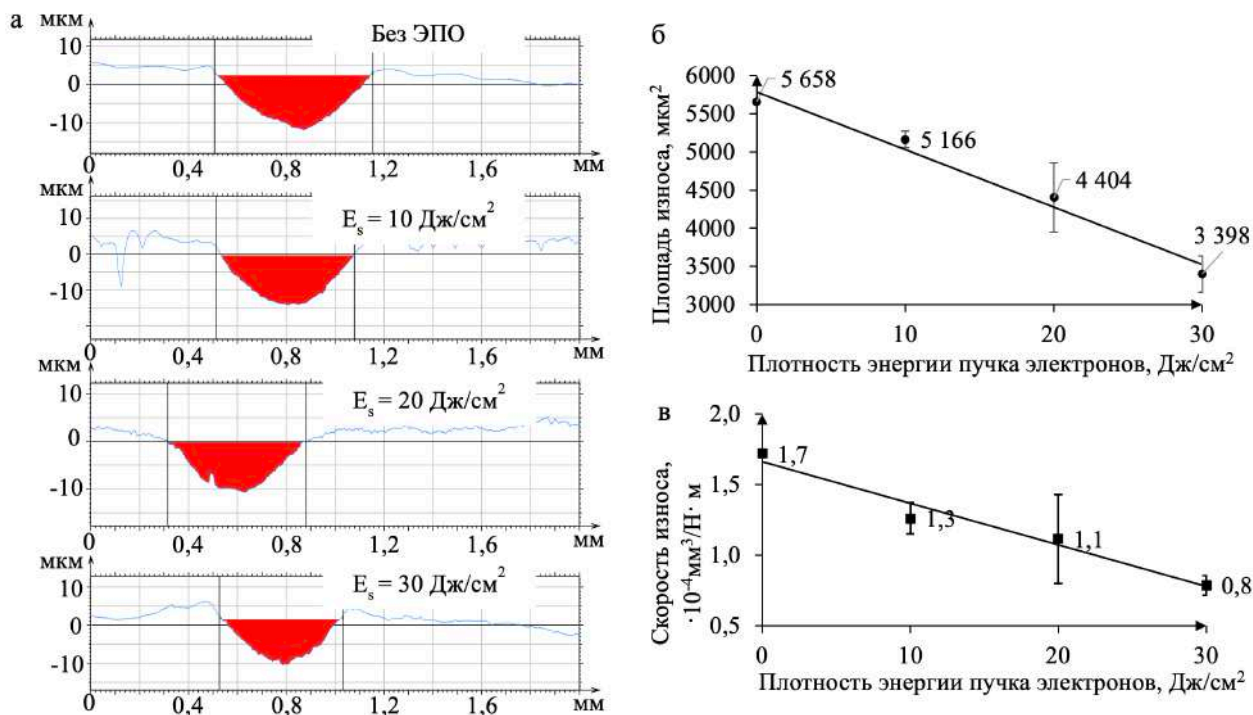


Рисунок 14 – Результаты трибологических исследований: (а) профили износа до и после ЭПО с различной плотностью энергии пучка электронов, E_s , (б) зависимость площади износа от плотности энергии пучка электронов, (в) зависимость скорости износа от плотности энергии пучка электронов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика по расчету химического и фазового состава ВЭС, изготавливаемого с помощью проволочно-дугового аддитивного производства с использованием многожильной проволоки.

2. Установлено, что изготовленный методом проволочно-дугового аддитивного производства ВЭС $Al_{36}Co_5Cr_8Fe_{17}Ni_{34}$ характеризуется сложной микроструктурой, состоящей из основной фазы AlNi с типом строения упорядоченной ОЦК/B2 решетки и включений вторых фаз Al_3Ni , Cr_3C_2 и $(Ni,Co)_3Al_4$, выделившихся в междендритных областях.

3. Показано, что ВЭС в исходном состоянии обладает твердостью 465 ± 12 HV₁ и при деформации демонстрирует хрупкий механизм разрушения. Временное сопротивление материала при сжатии составляет 1361 МПа, условный предел текучести 523 МПа и относительная деформация до разрушения 11 %.

4. Исследовано влияние ЭПО с плотностью энергии от 10 Дж/см² до 30 Дж/см² на микроструктуру, фазовый состав, механические и трибологические

свойства высокоэнтروпийного сплава $Al_{36}Co_5Cr_8Fe_{17}Ni_{34}$, изготовленного с помощью проволочно-дугового аддитивного производства. Установлено, что ЭПО с плотностью энергии 10 Дж/см² не приводит к полной перекристаллизации дендритной структуры сплава. С увеличением плотности энергии до 20 и 30 Дж/см² дендритная структура плавится, и на поверхности формируется ячеистая структура с размерами ячеек 100-200 нм. Показано, что толщина обработанного слоя на поверхности сплава увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов от 5 до 15 мкм.

5. Выявлено, что ЭПО приводит к увеличению однородности распределения химических элементов в структуре поверхностного слоя сплава. Наибольшая однородность химического состава достигается при ЭПО с плотностями энергии 20 и 30 Дж/см². Гомогенизация после ЭПО сопровождается растворением вторых фаз, обнаруженных в междендритных пространствах сплава в исходном состоянии.

6. Установлено, что ЭПО приводит к увеличению прочности материала. Наибольшее значение временного сопротивления на сжатие 2179 МПа было получено в сплаве при ЭПО с плотностью энергии 30 Дж/см², что превышает исходную величину в 1,6 раз. Условный предел текучести при сжатии составил 522 МПа, а деформация до разрушения 25 %. ЭПО приводит к уменьшению площади износа до 40 % и скорости износа в 2 раза с увеличением плотности энергии пучка электронов.

Перспективы дальнейшего развития темы исследования:

На основе полученных в настоящей работе результатов можно сформулировать следующие направления исследований высокоэнтропийных сплавов, в том числе и на основе системы Al-Co-Cr-Fe-Ni:

1. Оптимизация параметров процесса проволочно-дугового аддитивного производства высокоэнтропийных сплавов.

2. Разработка методики получения одножильной проволоки из высокоэнтропийного сплава, которая может быть использована для проволочно-дугового аддитивного производства.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ

1. Осинцев, К. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, обработанного электронным пучком [Текст] / К. А. Осинцев, С. В. Коновалов, Ю. Ф. Иванов, С. В. Воронин, И. И. Левин, В. С. Данилушкин, В. Е. Громов, И. А. Панченко // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2022. – Т. 19. – № 3. – С. 376–383. (0,4375 п.л./ 0,0547 п.л.).

2. Nevskii, S. Modeling the mechanism of micro/nanostructured surface formation in Al-Co-Cr-Fe-Ni and Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys treated with a high current pulsed electron beam [Text] / S. Nevskii, V. Sarychev, S. Konovalov, K.

Osintsev, Yu. Ivanov, I. Panchenko, V. Gromov // Письма о материалах. – 2022. – V. 12. – № 3. – P. 249-254. (0,3125 п.л./ 0,0446 п.л.).

3. Осинцев, К. А. Структурно-фазовое состояние высокоэнтропийного сплава Al-Co-Cr-Fe-Ni, полученного проволочно-дуговой аддитивной технологией [Текст] / **К. А. Осинцев**, В. Е. Громов, С. В. Коновалов, Ю. Ф. Иванов, И. А. Панченко // Ползуновский вестник. – 2021. – № 1. – С. 141–146. (0,3125 п.л./ 0,0625 п.л.).

4. Nevskii, S. The mechanism of formation of surface micro- and nanostructures in the AlCoCrFeNi high-entropy alloy during electron-beam treatment [Text] / S. Nevskii, S. Konovalov, **К. Osintsev**, Yu. Ivanov, A. Granovskii, V. Gromov // Письма о материалах. – 2021. – V. 11. – № 3. – P. 309–314. (0,3125 п.л./ 0,0521 п.л.).

5. Osintsev, K. Microstructural and mechanical characterisation of non-equiatom Al_{2.1}Co_{0.3}Cr_{0.5}FeNi_{2.1} high-entropy alloy fabricated via wire-arc additive manufacturing [Text] / **К. Osintsev**, S. Konovalov, V. Gromov, I. Panchenko, Yu. Ivanov // Philos. Mag. Lett. – 2021. – V. 101. – № 9. – P. 353–359. (0,3125 п.л./ 0,0446 п.л.). (Scopus)

6. Osintsev, K. Research on the structure of Al_{2.1}Co_{0.3}Cr_{0.5}FeNi_{2.1} high-entropy alloy at submicro- and nano-scale levels [Text] / **К. Osintsev**, S. Konovalov, A. Glezer, V. Gromov, Yu. Ivanov, I. Panchenko, R. Sundeev // Mater. Lett. – 2021. – V. 294. – P. 129717. (0,25 п.л./ 0,0357 п.л.). (Scopus)

7. Osintsev, K. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam [Text] / **К. Osintsev**, V. Gromov, Y. Ivanov, S. Konovalov, I. Panchenko, S. Vorobyev // Metals. – 2021. – V. 11. – № 8. – P. 1228. (0,875 п.л./ 0,1458 п.л.). (Scopus)

8. Osintsev, K. Phase composition prediction of Al-Co-Cr-Fe-Ni high entropy alloy system based on thermodynamic and electronic properties calculations [Text] / **К. Osintsev**, S. Konovalov, V. Gromov, I. Panchenko, X. Chen // Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 46. – P. 961–965. (0,25 п.л./ 0,05 п.л.). (Scopus)

9. Иванов, Ю.Ф. Деформационное поведение высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, изготовленного методом проволочно-дугового аддитивного производства [Текст] / Ю. Ф. Иванов, **К. А. Осинцев**, В. Е. Громов, С. В. Коновалов, И. А. Панченко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 1. – С. 68–74. (0,375 п.л./ 0,075 п.л.).

10. Осинцев, К. А. Влияние облучения импульсным электронным пучком на структуру поверхности неэквивалентного высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni [Текст] / **К. А. Осинцев**, В. Е. Громов, С. В. Коновалов, Ю. Ф. Иванов, И. А. Панченко, С. Чэнь // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – № 8. – С. 76–81. (0,3125 п.л./ 0,0521 п.л.).

11. Осинцев, К. А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение [Текст] / **К. А. Осинцев**, В. Е. Громов, С. В. Коновалов, Ю. Ф. Иванов, И. А. Панченко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 249–258. (0,5625 п.л./ 0,1125 п.л.).

Результаты интеллектуальной деятельности

12. Пат. 2759347 Российская Федерация, МПК⁵¹ В23К 35/30, В23К 35/08, В21F 15/04, В21С 23/22. Многокомпонентная проволока для получения высокоэнтروпийного сплава AlCoCrFeNi [Текст] / Загуляев Д. В., **Осинцев К. А.**, Коновалов С. В., Громов В. Е, Панченко И. А; заявитель и патентообладатель Сибирский гос. индустр. университет. – № 2021106005 ; заявл. 09.03.21 ; опубл. 12.11.21, Бюл. № 32. – 8 с. (0,5 п.л./ 0,1 п.л.).

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021667530 Российская Федерация. Программа WAAMwire_v.1 для расчета химического состава изделий, изготавливаемых с помощью комбинированной проволоки по технологии проволочно-дугового аддитивного производства [Текст] / **Осинцев К. А.**, Коновалов С. В., Панченко И. А., Громов В. Е. ; заявитель и правообладатель Сибирский гос. инд. унив. – № 2021666557 ; заявл. 20.10.21 ; опубл. 29.10.21, Бюл. № 11. – 1 с. (0,0625 п.л./ 0,0156 п.л.).

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020666726 Российская Федерация. Программа HEAPredict_v.1 для расчета термодинамических критериев и прогнозирования фазового состава пятикомпонентных высокоэнтропийных сплавов [Текст] / **Осинцев К. А.**, Коновалов С. В., Панченко И. А., Громов В. Е. ; заявитель и правообладатель Сибирский гос. инд. унив. – № 2020665373 ; заявл. 26.11.20 ; опубл. 15.12.20, Бюл. № 12. – 1 с. (0,0625 п.л./ 0,0156 п.л.).

Монографии

15. Gromov, V. Structure and properties of high-entropy alloys [Text] / V. Gromov, S. Konovalov, Yu. Ivanov, **K. Osintsev**. – Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2021. – 110 p. (6,875 п.л./ 1,7187 п.л.). (Scopus)

16. Громов, В. Е. Высокоэнтропийные сплавы [Текст] / В. Е. Громов, С. В. Коновалов, Ю. Ф. Иванов, **К. А. Осинцев**, Ю. А. Рубанникова, О. А. Перегудов, А. П. Семин. – Новокузнецк : ООО “Полиграфист”, 2021. – 178 с. (11,125 п.л./ 1,589 п.л.).

В прочих изданиях

17. Osintsev, K. Influence of high-current pulsed electron beam surface treatment on tribological characteristics of non-equimolar Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy alloy [Text] / **K. Osintsev**, S. Konovalov, Yu. Ivanov, V. Gromov, I. Panchenko // Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2022. [Электронный ресурс]: тезисы докладов IX Международной молодежной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора С. П. Распопина, Екатеринбург, 16-20 мая 2022 г. / отв. за вып. А. В. Ищенко. – Екатеринбург: УрФУ, 2022. – 18 Мбайт. 1 электрон. опт диск (CDROM). – С. 283–284. (0,125 п.л./ 0,025 п.л.).

18. Осинцев К. А. Влияние электронно-пучковой обработки на напряженно-деформированное состояние сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, полученного с помощью проволочно-дугового аддитивного производства [Текст] / **К. А. Осинцев**, В. С. Данилушкин, М. А. Епифанцев, С. В. Воронин // «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» : сб. трудов всероссийской научной

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк, 2022. – С. 31-33. (0,1875 п.л./ 0,0468 п.л.).

19. Осинцев К. А. Исследование структуры высокоэнтропийного сплава Al-Co-Cr-Fe-Ni, полученного проволочно-дуговой аддитивной технологией [Текст] / **К. А. Осинцев**, Громов В. Е., С. В. Коновалов, С. В. Воробьев, Ю. Ф. Иванов, И. А. Панченко, Е. О. Розенштейн // Физическое материаловедение. Актуальные проблемы прочности : сб. материалов X Международной школы, посвященной 10-летию лаборатории "Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы" и LXIII Международной конференции. – Тольятти, 2021. – С. 248-249. (0,125 п.л./ 0,025 п.л.).

20. Розенштейн Е. О. Модифицирование 3D принтера для изготовления металлических материалов по технологии проволочно-дугового аддитивного производства / Е. О. Розенштейн, Б. В. Гомзяков, **К. А. Осинцев**, С. В. Коновалов // Metallurgy: технологии, инновации, качество : труды XXII Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2021. – С. 87-90. (0,25 п.л./ 0,0625 п.л.).

21. Осинцев, К. А. Изменение структурно-фазового состояния ВЭС сплава Al-Co-Cr-Fe-Ni, полученного проволочно-дуговой аддитивной технологией [Текст] / **К. А. Осинцев**, В. Е. Громов, С. В. Коновалов, И. А. Панченко, Ю. Ф. Иванов, Е. С. Ващук // Проблемы прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий : сб. трудов Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2021. – С. 103–104. (0,125 п.л./ 0,021 п.л.).

22. Невский, С.А. Механизм формирования поверхностных наноструктур в высокоэнтропийных сплавах при электронно-пучковой обработке [Текст] / С.А. Невский, С.В. Коновалов, **К.А. Осинцев**, В.Д. Сарычев, В.Е. Громов // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. – Томск, 2021. – С. 229. (0,0625 п.л./ 0,0125 п.л.).

23. Осинцев, К. А. Прогнозирование фазового состава высокоэнтропийных сплавов системы Al-Co-Cr-Fe-Ni на основе расчета феноменологических параметров [Текст] / **К. А. Осинцев**, С. В. Коновалов, В. Е. Громов, И. А. Панченко // «Фазовые превращения и прочность кристаллов» : сб. тезисов XI Международной конференции. – Черногловка, 2020. – С. 143. (0,0625 п.л./ 0,0156 п.л.).

24. Осинцев, К. А. Исследование микроструктуры, фазового и элементного состава неэквимолярного высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni [Текст] / **К. А. Осинцев**, С. В. Коновалов, В. Е. Громов, И. А. Панченко, С. Чэнь // Сб. трудов тринадцатого ежегодного заседания Научного Совета РАН по физике конденсированных сред и научно-практического семинара «Актуальные проблемы физики конденсированных сред». – Черногловка, 2020. – С. 28. (0,0625 п.л./ 0,0125 п.л.).

25. Осинцев, К. А. Влияние облучения импульсным электронным пучком на структуру поверхности неэквимолярного высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni [Текст] / **К. А. Осинцев**, В. Е. Громов, С. В. Коновалов, Ю. Ф.

Иванов, И. А. Панченко, С. Чэнь // Сб. трудов тринадцатого ежегодного заседания Научного Совета РАН по физике конденсированных сред и научно-практического семинара «Актуальные проблемы физики конденсированных сред». – Черногловка, 2020. – С. 29. (0,0625 п.л./ 0,01 п.л.).

26. Розенштейн, Е. О. Автоматизация процесса наплавки с помощью настольного 3D принтера [Текст] / Е. О. Розенштейн, Б. В. Гомзяков, **К. А. Осинцев**, С. В. Коновалов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2021. № 4. – С. 31–35. (0,3125 п.л./ 0,078 п.л.).