ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу **Власова Ивана Игоревича**

«ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СПЛАВА НА БАЗЕ СИСТЕМЫ NiCoCr, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДАМИ ЛИТЬЯ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17. – Материаловедение

Диссертационная работа Власова Ивана Игоревича посвящена исследованию закономерностей формирования структуры и физико-механических свойств высокоэнтропийного многокомпонентного сплава на базе системы NiCoCr, полученного методами традиционной металлургии и аддитивных технологий. Актуальность темы обусловлена возрастающим интересом к высокоэнтропийным сплавам (ВЭС) как перспективным конструкционным материалам нового поколения, сочетающим высокую прочность, пластичность, стабильность структуры при высоких температурах, износо- и коррозионную стойкость.

1. Актуальность исследования. Современное развитие авиационных, энергетических и космических систем предъявляет повышенные требования к конструкционным материалам, работающим в условиях сочетания термомеханических и коррозионных воздействий. Традиционные сплавы на основе одного или двух основных элементов во многих случаях исчерпали свой потенциал эксплуатационных характеристик. В связи с этим за последние два десятилетия в материаловедении активно развиваются новые принципы разработки и составления химического состава металлических материалов, в частности концепция высокоэнтропийных сплавов.

В отличие от традиционных сплавов, высокоэнтропийные системы содержат равновесные или близкие к равновесным концентрации трех и более элементов, что приводит к формированию достаточно стабильных твёрдых растворов, обладающих рядом уникальных эффектов: усилением деформационного упрочнения, замедленной диффузией, искажением кристаллической решётки и особыми фазовыми взаимодействиями. Это обеспечивает повышенную стабильность механических свойств при

эксплуатационных нагрузках, устойчивость к радиационному и термическому воздействию, а также длительный ресурс работы материала.

Особую актуальность представляет разработка и исследование многокомпонентных ВЭС на базе системы NiCoCr, обладающих сочетанием прочности и пластичности, а также высокой коррозионной стойкостью. При этом большой научный и практический интерес вызывает установление связи между условиями получения материала (литьё, горячая деформация, селективное лазерное плавление), особенностями формирования структуры и эксплуатационными свойствами.

Таким образом, выбранная тема диссертации является актуальной, имеет высокую научно-техническую значимость и несомненно соответствует современным направлениям развития материаловедения и технологии конструкционных материалов.

2. Оценка содержания диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков и 20 таблиц. Структура диссертации логична, материал изложен последовательно и аргументированно, содержание каждой главы направлено на достижение общей цели исследования.

В первой главе приведён аналитический обзор современных исследований в области высокоэнтропийных сплавов, рассмотрены основные теоретические подходы к их проектированию и классификации. Автор корректно выделяет ключевые механизмы, определяющие структурообразование ВЭС: эффект высокой энтропии смешения, искажение кристаллической решётки, эффект замедленной диффузии и конкуренцию фаз. Подробно рассмотрено влияние легирующих элементов на структуру и фазовый состав системы Ni–Co–Cr, что позволяет обосновать выбор химической системы и направлений легирования. В подразделе, посвящённом методам получения ВЭС, автор проводит сравнительный анализ литейных и аддитивных технологий, аргументирует необходимость их сопоставительного исследования. Обзор выполнен полно и критически, содержит анализ 132 литературных источников, включая современные зарубежные публикации, что свидетельствует о высокой компетентности автора в теме исследования.

Во второй главе приведены сведения о составе и условиях получения исследуемых сплавов, описаны технологические маршруты: выплавка слитков, горячая пластическая деформация, газовая атомизация и

селективное лазерное сплавление. Автором корректно обоснован выбор методов физико-химического анализа: рентгеноструктурный анализ, электронная микроскопия, термический анализ, механические испытания на растяжение и твёрдость, трибологические и коррозионные испытания. Использованные методики в полном объёме соответствуют поставленным задачам и отражают современный уровень экспериментальных исследований в материаловедении. Приведённые экспериментальные схемы и параметры обработки обеспечивают воспроизводимость результатов.

Третья глава содержит результаты исследования структуры литых, деформированных и аддитивно полученных образцов. Автором выявлены закономерности формирования микроструктуры и фазового состава многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe в зависимости от технологии получения. Показано, что переход от литейного состояния к горячей деформации и далее к селективному лазерному сплавлению сопровождается измельчением зерна, изменением распределения карбидов и изменением соотношения твёрдого раствора и интерметаллидных фаз. Особое внимание уделено влиянию термической обработки на фазовые превращения, что позволяет рассматривать предлагаемые технологические решения как инструменты управления структурой. Глава содержит результаты, полученные комплексом взаимнодополняющих методик экспериментальных исследований, что делает выводы более надежными. В этой главе выполнен анализ связи микроструктурных характеристик с условиями получения материала.

В четвёртой главе представлены результаты комплексных испытаний многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe после литья, горячей деформации и селективного лазерного сплавления, а также приведен сравнительный анализ полученных свойств. Диссертантом детально изучено влияние структурных состояний на прочность, пластичность и твёрдость сплава в различных структурных состояниях. Показано, что сплав NiCoCrWNbAlTiCRe, полученный методом селективного лазерного сплавления и подвергнутый термообработке, характеризуется среди изученных наиболее высоким комплексом механических свойств благодаря формированию гомогенной мелкозернистой структуры и упрочняющему влиянию карбидных фаз. Выполненный автором сравнительный анализ состояний после литья, горячей деформации и аддитивного синтеза показывает преимущества и недостатки каждого состояния и метода, что позволяет делать закономерные выводы о механизмах деформационного упрочнения и изменения механических

свойств сплавов. На базе выявленных закономерностей изменения механических свойств при различных температурах определены потенциальные области дополнительного применения сплава помимо изготовления элементов, работающих при повышенных температурах.

Пятая глава посвящена оценке закономерностей изменения механических свойств высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe с использованием модели Джонсона–Кука и исследованию трибологических, усталостных, электро- и магнитных характеристик. Автор обоснованно показывает, что высокий уровень деформационного упрочнения (отношение B/A> 1) обеспечивает устойчивость сплава к износу и повышенную усталостную прочность. Выполненные испытания демонстрируют возможность использования разработанного сплава в узлах, работающих в условиях динамических нагрузок и криогенных температур. Глава логически завершает экспериментальный раздел и показывает высокую прикладную ценность проведённого исследования.

3. Научная новизна и практическая значимость результатов диссертационной работы

К **основным научным результатам** и элементам новизны диссертации следует отнести:

– разработку нового многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe, обладающего дисперсионным и деформационным упрочнением и сохраняющего механические характеристики при криогенных температурах;

– установление влияния методов получения (литья, горячей деформации, селективного лазерного сплавления) на структуру и свойства сплава и обоснование механизмов формирования фазового состава;

– установление механизма формирования износостойкости через соотношение параметров эмпирической модели Джонсона–Кука (B/A > 1);

– разработку технологических режимов выплавки, атомизации и термической обработки для получения высокоэнтропийных полуфабрикатов для получения заданного комплекса свойств.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов при создании высоконадежных деталей и конструкционных элементов, работающих в агрессивных средах и при динамических нагрузках. В рамках работы была достигнута следующие важные для практики результаты:

1. Разработаны технологические режимы выплавки, горячей деформации, атомизации, селективного лазерного сплавления и термической обработки многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe для получения различных полуфабрикатов;

2. С помощью математических расчетов параметров в рамках полуэмпирической модели Джонсона-Кука, и на основании экспериментальных исследований определены возможные механизмы и пути повышения свойств многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe;

3. Предложены потенциальные области применения разработанного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe: в качестве деталей и конструкций, работающих в агрессивных средах, в условиях динамических (триботехнических и усталостных) нагрузок и криогенных температур, а также как резистивные элементы.

Результаты исследований внедрены на АО «Оптрон», что подтверждает акт о промышленном внедрении результатов работы.

4. Достоверность полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений и обеспечивается корректным выбором методологии исследования, использованием современных взаимнодополняющих методов физико-химического анализа и механических испытаний, а также применением статистической обработки экспериментальных данных. Приведённые результаты хорошо согласуются между собой и подтверждаются совокупностью независимых экспериментальных данных.

Автор использует обоснованные методические подходы, включая: рентгеноструктурный анализ, сканирующую и просвечивающую электронную микроскопию, дилатометрический и термический анализ, испытания на растяжение и износостойкость, методы оценки деформационного упрочнения и трибологические испытания. Приведённая совокупность взаимнодополняющих методов является достаточной для решения поставленных задач и подтверждения выводов.

Полученные результаты прошли апробацию на 10 научных конференциях различного уровня. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, включая 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрауки России, что отвечает установленным требованиям.

Диссертация обладает четко выстроенной структурой, логикой подачи материала и высоким уровнем научной аргументации. Каждая глава завершена обоснованными выводами, которые последовательно связаны

между собой и общими выводами по работе, выводы показывают выполнение общей цели исследования.

Текст написан грамотным научным языком, с соблюдением академического стиля и культуры научного изложения. Использованный понятийный аппарат корректен и соответствует терминологии материаловедения и физики металлов. По стилю изложения видно, что автор принимал непосредственное участие на всех этапах работы: в разработке экспериментальных составов высокоэнтропийных сплавов системы NiCoCr, выборе режимов плавки, горячей деформации и селективного лазерного плавления, в проведении металлографических, механических и трибологических испытаний, обработке и анализе экспериментальных данных.

Новизна и практическая значимость результатов, а также публикационная активность подтверждают высокий уровень научной подготовки соискателя и его способность вести самостоятельные исследования в области материаловедения.

5. Замечания по диссертационной работе

Несмотря на высокое научное и практическое значение работы, по диссертации следует сделать ряд замечаний:

1. Вопросы влияния электронной концентрации (VEC) и энергетики поверхностных атомов на фазовую стабильность высокоэнтропийных систем рассмотрены недостаточно полно, хотя они являются важными критериями прогнозирования структуры ВЭС.
2. При обсуждении влияния термической обработки на фазовый состав сплава было бы полезно сопоставить экспериментально полученные данные с термодинамическим моделированием фазовых диаграмм.
3. В разделе по трибологическим испытаниям рекомендуется приводить при сравнении не только результаты относительного износа, но и характеристики фрикционного взаимодействия, включая коэффициент трения и температуру в зоне контакта, а также характер изнашивания.
4. В исследовании жаропрочности отсутствует сравнение с промышленными никелевыми жаропрочными сплавами, что затрудняет оценку конкурентоспособности разработанного материала.
5. Результаты рентгеновских дифракционных исследований представлены неудачно: выбран очень малый размер рисунков (рис. 11; 15; 21; 30 и других), особенно в автореферате, из-за чего дифракционные максимумы важных для выводов работы соединений малой интенсивности

оказались малозаметными; следовало показать хотя бы часть этих максимумов в увеличенном масштабе или увеличить рисунки по размеру.

6. Размер графиков зависимостей на рисунке 23 диссертации выбран очень малым; из-за этого малые пики ДТА, о которых говорится в тексте незаметны. Следовало бы показать важные участки в более крупном масштабе, как это сделано на рис. 6 в автореферате.

7. Формула (16) и значение плотности порошка содержит опечатки.

8. При описании режимов селективного лазерного сплавления отсутствует обсуждение влияния параметров лазерного сканирования на формирование остаточных напряжений, что важно при оценке качества конечных изделий, полученных аддитивными технологиями.

9. Помимо расчета конфигурационной энтропии смешения целесообразно провести оценку искаженности кристаллической решетки по полуширине дифракционных пиков, а также рассмотреть изменение периодов кристаллической решетки в зависимости от термической обработки;

10. В научной новизне указано, что разработан многокомпонентный высокоэнтропийный сплав NiCoCrWNbAlTiCRe, обладающий деформационным упрочнением и возможностью эксплуатации при криогенных температурах без значительного снижения уровня свойств; в тексте диссертации приведена базовая компонентная система $Ni_{33}Co_{33}Cr_{33}$ и интервалы изменения дополнительных элементов, но не указан конкретный состав в диссертации и автореферате.

Заключение

Новизна и практическая значимость результатов, а также публикационная активность подтверждают высокий уровень научной подготовки соискателя и его способность вести самостоятельные исследования в области материаловедения.

Диссертационная работа Власова Ивана Игоревича является завершённым научно-квалификационным исследованием, в котором решена актуальная задача разработки и исследования высокоэнтропийного многокомпонентного сплава на базе системы NiCoCr в различных технологических состояниях. Работа отличается правильной структурой, строгой постановкой цели и задач, корректным выбором методологии и высокой степенью аргументированности выводов.

Полученные автором результаты представляют значительный вклад в развитие материаловедения и науки о конструкционных материалах, а именно — в понимание закономерностей формирования структуры и свойств

высокоэнтропийных сплавов при комбинированном применении методов традиционной и аддитивной металлургии. Научные результаты обладают новизной, практической значимостью и достаточно надежны.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.6.17. Материаловедение, диссертация отвечает требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а её автор, Власов Иван Игоревич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Физика» — Винтайкин Борис Евгеньевич

21.11.2025 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Адрес: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
Тел: +7(916)518-13-40, +7(499)263-63-68
Электронная почта: vintaikb@mail.ru, vintaikb@bmstu.ru

Подпись Винтайкина Б.Е. заверяю

«ВЕРНО»
НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА
ОТДЕЛ КАДРОВ ГЛАВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО РАБОТЫ С ПЕРСОНАЛОМ
ЕДИНОЛИЧНОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА
МГТУ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

21.11.2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ * ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ * МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА * (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ) * ИНН 7701002520 * ОГРН 1027739017179