

ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО



Акционерное общество

**«КОРПОРАЦИЯ
«МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕПЛОТЕХНИКИ»**

Березовая аллея, д. 10, Москва, Россия, 127273

Телетайп: 113160, 114270 КРУЧА

Телефон: (499) 907-37-74, Телефакс: (499) 907-37-29 ;

E-mail: mitemail@umail.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «Корпорация «МИТ»



С.А. Пономарев

19 «__» 11 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

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

Диссертация Власова И.И. посвящена актуальной научно-технической проблеме разработки и исследования высокоэнтропийных сплавов нового поколения на основе системы NiCoCr, предназначенных для применения в авиакосмической и машиностроительной отраслях промышленности.

Учитывая современные стратегические задачи импортозамещения новых конструкционных материалов и развития отечественного материаловедения, тема диссертации является актуальной и практически значимой.

Энтропийные сплавы со средней и высокой энтропией смешения проявляют уникальные свойства, такие как высокая твердость, стойкость к износу, коррозии и окислению, а также отличные механические характеристики при высоких и низких температурах. Эти материалы привлекают внимание не только фундаментальной науки, но и различных отраслей промышленности, включая авиакосмическую, энергетическую и медицинскую, где требуются материалы с высокой надежностью и долговечностью.

Исследования в области энтропийных сплавов открывают новые горизонты в материаловедении, предлагая инновационные решения для создания новых конструкционных с уникальным комплексом характеристик. Данная работа по исследованию закономерностей формирования структуры и физико-механических свойств высокоэнтропийного многокомпонентного сплава на базе системы NiCoCr, полученного методами литья и аддитивных технологий как с точки зрения фундаментальных исследований, так и по прикладной части по применению новых сплавов в тяжелом аэрокосмическом машиностроении является актуальной.

Общая характеристики диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 132 наименований. Текст диссертации включает 162 страницы, 79 рисунков и 20 таблиц. Цель работы: «Выявление особенностей формирования структуры и физико-механических свойств многокомпонентного высокоэнтропийного сплава на базе системы NiCoCr, полученного методами литья с применением дополнительных обработок и аддитивных технологий» обоснована литературным обзором и анализом современного состояния проблемы.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан многокомпонентный высокоэнтропийный сплав NiCoCrWNbAlTiCRe с высокой конфигурационной энтропией смешивания, обладающий деформационным упрочнением и возможностью эксплуатации при криогенных температурах без значительного снижения уровня свойств.
2. Установлено, что получение многокомпонентного энтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe методом селективного лазерного сплавления позволяет формировать наиболее высокий комплекс характеристик за счет формирования гомогенной мелкозернистой структуры. Термическая обработка на твердый раствор приводит к снижению прочностных и увеличению пластических характеристик за счет увеличения размера зерна.
3. Впервые показано, что при триботехническом контактно-деформационном воздействии формирование износостойкости

многокомпонентного энтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe происходит за счет интенсивного деформационного упрочнения при соотношении параметров по модели Джонсона-Кука $B/A > 1$.

4. Показано, что снижение $\Delta\epsilon$ с 1,4 до 0,9% при жестком цикле нагружения при испытании на усталость приводит к активному перестроению структуры под действием усталостной нагрузки.

Практическая значимость работы:

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

2. За счет математических расчетов параметров в соответствии с моделью Джонсона-Кука, а также экспериментальных исследований в условиях динамического воздействия определены возможные механизмы повышения свойств многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe.

3. Определены потенциальные области применения разработанного сплава:

- элементы конструкций, работающих в агрессивных средах;
- детали и узлы, работающие в условиях динамических (триботехнических и усталостных) нагрузок;
- элементы, работающие в условиях криогенных температур;
- резистивные элементы.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и результатов

Достоверность экспериментальных результатов и выводов диссертации Власова И.И. обеспечена согласованностью результатов, полученных с использованием разнообразных стандартных методов исследования структуры, фазового состава и свойств, сертифицированного аналитического и испытательного оборудования и подтверждена результатами статистической обработки результатов экспериментов.

Основные результаты диссертации Власова И.И. изложены на 10 российских и международных конференциях, опубликованы в 11 статьях в рецензируемых научных изданиях, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования результатов кандидатских диссертаций.

Во введении показана степень разработанности темы диссертации и уровень развития материаловедения в области высокоэнтропийных сплавов, обоснована актуальность диссертационной работы. Приведены цель и задачи исследования, научная новизна, а также теоретическая и практическая

значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов. Описан личный вклад автора диссертации Власова И.И.

В первой главе диссертации проведен анализ литературных источников и выполнен обзор имеющихся на сегодняшний день сведений о классификации энтропийных сплавов, термодинамике и условиях образования высокоэнтропийных сплавов, областях их применения. Рассмотрено влияние легирующих элементов (W, Nb, Al, Ti, C, Re, Ta) на структуру и фазовый состав энтропийных сплавов системы Ni-Co-Cr. Проанализированы методы выплавки высокоэнтропийных сплавов (вакуумно-дуговая плавка, вакуумная индукционная плавка, электронно-лучевая плавка, плазменная плавка) и особенности их получения. Обоснована целесообразность разработки многокомпонентного энтропийного сплава на базе эквиатомного состава системы Ni-Co-Cr с дополнительным легированием. Логически выстроен подход к формулированию цели и задач диссертационного исследования.

Во второй главе подробно описаны использованные в работе методы исследований, оборудование, на котором проводили эксперименты, и материалы, из которых изготавливали экспериментальные образцы. Детально представлены методики выплавки слитков (вакуумно-индукционная плавка), горячей деформации, газовой атомизации для получения металлопорошковой композиции и селективного лазерного сплавления. Подробно описаны особенности применения аттестованных методов, реализованных на поверенном оборудовании, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Представлены методы моделирования фазовых превращений с применением программного обеспечения на основе алгоритма CALPHAD, теплофизических исследований (ДСК, измерение плотности, ТКЛР), механических испытаний (растяжение при различных температурах, длительная прочность, твердость, осадка), металлографических исследований (световая и электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ), трибологических испытаний по схеме «шарик-диск», а также методика оценки степени деформационного упрочнения с применением модели Джонсона-Кука.

В третьей главе представлены результаты исследования структуры и фазового состава энтропийных сплавов после различных способов получения и обработки.

Проведено математическое моделирование трехкомпонентной системы Ni-Co-Cr и расчет конфигурационной энтропии смешивания по уравнению Больцмана. Установлено, что эквиатомный состав ($\Delta S_{\text{conf}} = 9,13$ Дж/К) и эквимассовый состав ($\Delta S_{\text{conf}} = 9,11$ Дж/К) являются среднеэнтропийными сплавами. На основе сравнительного анализа структуры и свойств обоснован выбор эквиатомного соотношения элементов основы для дальнейших исследований.

С использованием термодинамического моделирования и расчетов разработан состав многокомпонентного высокоэнтروпийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe с конфигурационной энтропией $\Delta S_{\text{conf}} = 18,3$ Дж/К. Металлографическими исследованиями с применением оптической и электронной микроскопии установлено, что в литом состоянии формируется дендритная структура с равномерным распределением легирующих элементов и комплексными карбидами (Nb,Ti)C и (Cr,W)₂₃C₆.

Рассмотрена возможность замены рения на тантал (1, 1,5 и 3 масс. %) с целью снижения стоимости сплава. Показано, что все составы с танталом формируют однофазную ГЦК структуру с карбидами (Nb,Ta)C.

Исследовано влияние температурно-временных режимов термической обработки (800-1200 °С) на структуру и фазовый состав. Установлена термостабильность сплава – твердость практически не изменяется в зависимости от температуры отпуска.

Разработаны режимы горячей деформации (температурный интервал 1000-1200°С) на основе испытаний на осадку. Получены прутки размером 14×14 мм. Показано, что после горячей деформации формируется зеренная структура со средним размером зерна 35,5 мкм (5-6 балл) и карбидами, ориентированными в направлении деформации.

Отработаны режимы газовой атомизации с выходом годной фракции 10-63 мкм не менее 70%. Установлено, что металлопорошковая композиция имеет сферическую форму частиц и состоит из ГЦК твердого раствора без избыточных фаз благодаря высокой скорости кристаллизации.

Разработаны оптимальные режимы синтеза методом селективного лазерного сплавления с плотностью энергии 99,67 Дж/мм³, обеспечивающие минимальную пористость (0,01%) и отсутствие трещин. Исследована микроструктура после СЛС (трековая структура) и после термической обработки (зеренная структура с выделением карбидов хрома по границам зерен).

В четвертой главе представлены результаты комплексного исследования механических характеристик энтропийных сплавов.

Исследованы физические свойства (плотность 8,0-8,2 г/см³, ТКЛР в диапазоне 20-1200°С). Проведено сравнение трехкомпонентных сплавов в эквиатомном и эквимассовом соотношениях при комнатной температуре: установлено, что оба состава демонстрируют высокую пластичность ($\delta_5 = 55-57\%$), при этом разрушение происходит без образования шейки, что характерно для сплавов с деформационным упрочнением.

Для многокомпонентного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe в литом состоянии определены свойства при различных температурах испытаний:

- при 20°С: $\sigma_B = 595$ МПа, $\sigma_{0,2} = 300$ МПа, $\delta_5 = 57\%$
- при 900°С: $\sigma_B = 230$ МПа, $\sigma_{0,2} = 136$ МПа, $\delta_5 = 48\%$
- при 1000°С: $\sigma_B = 141$ МПа, $\sigma_{0,2} = 126$ МПа, $\delta_5 = 43\%$
- при 1100°С: $\sigma_B = 85$ МПа, $\sigma_{0,2} = 79$ МПа, $\delta_5 = 32\%$

Установлено, что при температуре испытания 1100°C предел длительной прочности на базе 100 часов составляет 10 МПа.

Показано влияние термической обработки (1200°C) на свойства литого сплава: σ_B увеличивается до 650 МПа, $\sigma_{0,2}$ до 330 МПа, при этом δ_5 сохраняется на уровне 55%.

После горячей деформации получен значительный прирост свойств при комнатной температуре: $\sigma_B = 1210$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1150$ МПа, $\delta_5 = 40\%$. Термическая обработка приводит к снижению прочности ($\sigma_B = 985$ МПа, $\sigma_{0,2} = 535$ МПа) и повышению пластичности ($\delta_5 = 55\%$). Важным результатом является сохранение высоких свойств при криогенных температурах (-70 °C): $\sigma_B = 1020$ МПа, $\sigma_{0,2} = 485$ МПа, $\delta_5 = 57\%$.

Для образцов после селективного лазерного сплавления (направление ХУ) получены: $\sigma_B = 1180$ МПа, $\sigma_{0,2} = 835$ МПа, $\delta_5 = 33,5\%$. Горячее изостатическое прессование приводит к снижению свойств за счет роста зерна и выделения карбидов.

Установлено влияние скорости деформации на механические свойства. С увеличением скорости движения траверсы с 0,25 до 10 мм/мин σ_B увеличивается с 650 до 690 МПа, $\sigma_{0,2}$ с 300 до 350 МПа, а δ_5 снижается с 57 до 40%, что подтверждает склонность к деформационному упрочнению.

Проведена оценка коррозионной стойкости в 3,5% растворе NaCl. Минимальная скорость коррозии ($27 \cdot 10^{-10}$ мм/год) наблюдается для литого состояния. Горячая деформация и термическая обработка снижают коррозионную стойкость. Исследована жаростойкость при 1100°C в течение 100 часов: наименьшая потеря массы ($2,57 \cdot 10^{-3}$ г/м²) наблюдается после СЛС.

Для составов с танталом получены механические свойства: $\sigma_B = 630-655$ МПа, $\sigma_{0,2} = 285-295$ МПа, $\delta_5 = 52-72\%$, что несколько выше показателей состава с рением.

В пятой главе проведена оценка степени деформационного упрочнения с применением модели Джонсона-Кука и выявлены перспективные области применения.

Рассчитаны параметры модели Джонсона-Кука (A, B, n, C, m) для различных состояний сплава. Установлено, что для обеспечения эффективного деформационного упрочнения необходимо соблюдение условий: $n \geq 0,1$, $B/A \geq 0,5$, $B > 100$ МПа. Наибольшее деформационное упрочнение ($B/A > 1$) наблюдается для сплава после СЛС с термической обработкой (относительный вклад до 91,8% при пластической деформации 50%) и после горячей деформации с термической обработкой.

Проведены триботехнические испытания по схеме «шарик-диск» с контртелом из Al₂O₃. Установлена линейная зависимость ($R = 0,972$) между интенсивностью изнашивания и степенью упрочнения при контактной деформации. Минимальная интенсивность изнашивания ($0,19 \cdot 10^{-3}$ мм³/(Н·м)) получена для образцов после СЛС со степенью упрочнения 154%. Показано, что гомогенность структуры и соотношение $B/A > 1$ приводит к повышению износостойкости.

Исследованы усталостные характеристики при жестком цикле нагружения. Установлено, что при $\Delta\varepsilon = 0,9\%$ сплав обеспечивает работоспособность на базе 10^4 циклов. Снижение $\Delta\varepsilon$ с 1,4 до 0,9% приводит к активному перестроению дислокационной структуры под действием усталостной нагрузки.

Измерено удельное электросопротивление ($\rho \approx 1$ мкОм·м при 20°C), которое сохраняет стабильность после термической обработки в диапазоне 200-1100°C. Определены магнитные характеристики: при напряженности магнитного поля 240 кА/м сплав является парамагнитным с малой магнитной проницаемостью.

На основе комплекса проведенных исследований определены потенциальные области применения: элементы конструкций, работающих в агрессивных средах; детали и узлы, работающие в условиях динамических (триботехнических и усталостных) нагрузок; элементы, работающие при криогенных температурах; резистивные элементы.

В выводах по диссертации Власова И.И. отражены основные результаты работы. Диссертация имеет практическую значимость. Работа оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертационным работам, обладает внутренним единством. Материал изложен логично, иллюстрирован рисунками и таблицами. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

По содержанию и оформлению диссертационной работы имеются **следующие замечания и вопросы:**

1. В работе приведены обширные экспериментальные данные, однако в ряде случаев не акцентируется степень статистической обработки результатов (число повторов, доверительные интервалы), что ограничивает возможность количественной оценки разброса свойств;

2. По энтропийным сплавам существуют разные методики по оценке степени энтропии системы, однако в работе приведена только конфигурационная энтропия смешивания;

3. Для разработанного состава NiCoCrWNbAlTiCRe указана конфигурационная энтропия смешивания, однако не приведено сравнение по энтропии смешивания по зарубежным аналогам, в частности по сплаву GRX-810;

4. В рамках работы проведены исследования по длительной прочности сплава при температуре испытания 1100 °C, однако не приведены результаты испытаний для температурного интервала 800-1000 °C;

5. В главе 5 приведены результаты испытаний образцов на малоцикловую усталость. В соответствии с моделью Джонсона-Кука было определено, что сплав обладает деформационным упрочнением, что может положительно сказываться на усталостных характеристиках. Целесообразно провести испытания для области многоциклового усталости, где деформационное упрочнение может оказывать значительное влияние на долговечность сплава;

6. В заключительной части диссертации логично сформулированы основные выводы, однако перспективы дальнейшего применения полученных материалов могли бы быть обозначены более конкретно с указанием потенциальных областей промышленной реализации.

Однако указанные замечания не снижают научной и практической ценности выполненной диссертационной работы.

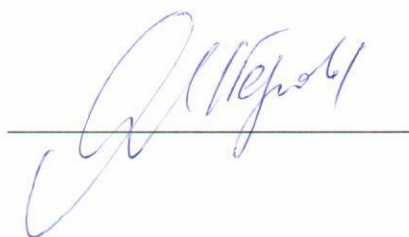
Диссертация Власова Ивана Игоревича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача разработки и исследования многокомпонентного высокоэнтропийного сплава, обладающего высоким комплексом механических свойств в различных технологических состояниях.

Работа полностью соответствует паспорту специальности 2.6.17. «Материаловедение», требованиям пункта 9 Положения о присуждении учёных степеней (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., ред. 2021 г.) к кандидатским диссертациям, а её автор, Власов Иван Игоревич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Дата рассмотрения и утверждения отзыва

Работа заслушана на НТС отделения специальных технологий в Акционерном обществе "Корпорация "Московский институт теплотехники" (АО "Корпорация МИТ"), 127273, город Москва, Берёзовая ал., д.10 (протокол № 3 от «19» ноября 2025 г.).

Заместитель начальника
отделения и главного
технолога – начальник отдела,
к.т.н.



М.В. Геров

«19» ноября 2025 г.

Акционерное общество "Корпорация "Московский институт теплотехники"
(АО "Корпорация МИТ"), 127273, город Москва, Берёзовая ал., д.10.

Тел.: +7 (499) 907-37-74, Факс: +7 (499) 907-37-29, E-mail: info@corp-mit.ru