

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 структуры, механических и теплофизических свойств, а также удельного электрического сопротивления перспективного класса материалов — высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), полученных различными технологическими методами. В своей работе автор рассмотрел многокомпонентный сплав системы NiCoCrWNbAlTiCRe, полученный как методами традиционной металлургии (литьё, горячая деформация), так и с применением аддитивных технологий, что позволяет выявить перспективные области применения и делает исследование актуальным и значимым в научно-практическом плане.

Работа включает теоретические расчеты конфигурационной энтропии смешивания, выбор компонентов для разработки сплава и экспериментальное обоснование влияния технологических факторов и термических воздействий на фазовое состояние, микроструктуру и механические свойства высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe. Тематика исследования соответствует современным тенденциям в области разработки новых конструкционных материалов с улучшенными механическими свойствами, износостойкостью и стабильностью свойств в экстремальных условиях эксплуатации.

Актуальность выбранной темы определена повышенным интересом мировой научной и инженерной общественности к высокоэнтропийным сплавам как перспективному направлению в области разработки современных конструкционных и функциональных материалов. В отличие от классических сплавов, основанных на одном или двух основных элементах, ВЭС представляют собой системы с равновесным содержанием нескольких компонентов, что приводит в некоторых случаях к формированию устойчивых твёрдых растворов с уникальными сочетаниями свойств. Они обладают высокой прочностью, коррозионной стойкостью, жаростойкостью и

стабильностью структуры при воздействии экстремальных температур и напряжений.

Научный интерес вызывает система NiCoCr как одна из наиболее изучаемых среди средне- и высокоэнтروпийных сплавов благодаря комплексному сочетанию прочностных и пластических характеристик. Легирование системы элементами W, Nb, Al, Ti, C и Re позволяет значительно расширить эксплуатационные возможности материала, однако закономерности формирования структуры и фазового состава при различной технологии получения полностью не изучены. Особенно актуальным представляется сравнительное исследование литых и аддитивно полученных состояний, так как аддитивные технологии расширяют возможности создания изделий сложной конфигурации и градиентной структуры, что, в свою очередь, расширяет возможность производства изделий для работы в сложных экстремальных условиях.

Таким образом, работа Власова И.И. соответствует актуальным направлениям развития материаловедения, а её результаты представляют интерес для фундаментальных исследований в области физики металлов и практической реализации высокоэнтропийных сплавов для промышленного применения в серийном производстве.

Научная новизна

1. Разработан многокомпонентный энтروпийный сплав NiCoCrWNbAlTiCRe, 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 контактнодеформационном 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

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

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 энтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe.

пределены 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.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Структура исследования логична, последовательна и соответствует цели и задачам работы.

Первая глава содержит аналитический обзор отечественных и зарубежных исследований в области высокоэнтропийных сплавов. Автор подробно рассматривает принципы их классификации, влияние энтропийных и энтальпийных факторов на формирование структуры, механизмы стабилизации твёрдого раствора и образования интерметаллидных фаз. Уделено внимание критериям ΔS_{mix} , ΔH_{mix} , VEC, δ и параметру Ω , что демонстрирует высокую проработку автором физико-химических основ проектирования ВЭС.

Отдельно анализируется влияние легирующих элементов на свойства системы NiCoCr, что позволяет обосновать выбор исходного химического состава исследуемых сплавов. Приведён обзор методов получения ВЭС с акцентом на сравнении традиционных литейных технологий и аддитивного производства. Обзор выполнен качественно, с использованием более 130 источников литературы, включая современные публикации последних лет.

Во второй главе автор описывает материалы и методики: выплавка слитков, горячая деформация, газовая атомизация, селективное лазерное сплавление. Представлены схемы получения образцов, условия экспериментов и оборудование. Помимо этого, рассмотрена подробная характеристика методов анализа: рентгеноструктурного анализа, оптической

и электронной микроскопии, измерения твёрдости, механических испытаний, трибологических, коррозионных и термических исследований.

Методология исследований выстроена корректно. Описание экспериментальной базы обеспечивает достоверность результатов и сделанных на их основе выводов.

Третья глава содержит результаты структурного анализа исследуемых сплавов в различных технологических состояниях. Показаны особенности формирования дендритной структуры в литом состоянии, выявлено наличие карбидных и интерметаллидных фаз на границах зёрен, рассмотрено влияние легирующих элементов на фазовый состав.

Применение горячей обработки давлением приводит к измельчению зерна и уменьшению неоднородности структуры, что подтверждается результатами оптической микроскопии, измерениями твердости и рентгеноструктурных исследований. Отдельного внимания заслуживает исследование порошков, полученных газовой атомизацией, и структурных характеристик при селективном лазерном плавлении (СЛС). Показано, что СЛС обеспечивает формирование более однородной структуры гомогенного твердого раствора с исключением образования избыточных фаз типа карбидов хрома.

Четвёртая глава содержит результаты испытаний на растяжение и твёрдость при различных температурах, а также оценку свойств при повышенных и криогенных температурах. Автор провёл сравнение свойств сплавов в литом, деформированном и аддитивном состояниях. Показано, что селективное лазерное плавление способствует формированию мелкозернистой структуры, обладающей повышенной прочностью.

Особый интерес представляют результаты испытаний при повышенных температурах, демонстрирующие сохранение механической прочности и стабильности структуры. Проведён анализ влияния термической обработки на свойства, что имеет высокую практическую ценность. Помимо этого автором проведен анализ изменения коррозионной и жаростойкости сплава в зависимости от структурного состояния, а также выявил пригодность материала для работы при криогенных температурах, что расширяет области его применения.

Пятая глава посвящена оценке механического поведения и деформационного упрочнения на основе модели Джонсона–Кука, исследования три. Автор показал, что сплав NiCoCrWNbAlTiCRe обладает значительным деформационным упрочнением ($B/A > 1$), что объясняет механизм формирования износостойкости при низких значениях твердости гомогенной структуры ВЭС и его устойчивость к интенсивному

изнашиванию в условиях сухого трения скольжения. Дополнительно исследованы усталостные свойства при жестком цикле, коррозионные и электрические свойства.

Особенно интересны результаты трибологических испытаний, подтверждающие перспективность сплава для условий повышенных динамических нагрузок.

Достоверность полученных автором результатов не вызывает сомнений, так как они подтверждены использованием комплекса современных методов анализа и испытаний, включающих рентгеноструктурный анализ, просвечивающую и сканирующую электронную микроскопию, электрохимические и трибологические испытания, термический анализ, механические испытания при статическом и динамическом нагружении. Все методики исследований перечислены и корректно описаны в главе 2, приведены параметры оборудования и условия испытаний, что обеспечивает воспроизводимость экспериментов.

Кроме того, существенной характеристикой достоверности результатов является согласованность выводов, полученных разными методами исследования: например, фазовый состав, выявленный методом рентгеноструктурного анализа, подтверждается исследованиями электронной микроскопии в совокупности с микрорентгеноспектральным анализом; механические свойства согласованы с данными микроструктуры, а трибологические испытания дополнены анализом деформационного упрочнения по модели Джонсона–Кука.

Результаты диссертационной работы апробированы на 10 научных конференциях и опубликованы в 11 научных работах, среди которых 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, что подтверждает их научную значимость и соответствие требованиям для соискания учёной степени кандидата наук. Работа отличается научной обоснованностью и высоким уровнем самостоятельности.

При этом диссертационная работа Власова И.И. не лишена недостатков. Имеются следующие замечания:

1. В работе отсутствует информация о конкретном химическом составе сплава. Возникает вопрос, каким образом рассматриваемый состав согласуется с принятой концепцией, что высокоэнтропийными являются сплавы с соотношением 5 и более компонент при их содержании от 35 до 5 ат.%;

2. В главе 2 нет информации о расчете важных термодинамических показателей, используемых для оценки соответствия сплава к классу высокоэнтропийных: коэффициент валентных электронов и параметр Ω ;

3. В главе 2 не рассмотрена методология оценки удельного электрического сопротивления;

4. Также в главе 2 нет информации об изучении потенциала разомкнутой цепи для оценки потенциала коррозии. Поэтому возникает вопрос, был ли изучен данный параметр для исследуемых сплавов и как он соотносится с потенциалом коррозии в потенциодинамическом исследовании;

5. В методике экспериментов указано, что твердость измерялась по методу Виккерса, а по тексту диссертации появляются графики с измеренными значениями по Бринеллю;

6. На рисунке 8 отсутствует размерный маркер и представлена дендритная структура. Но в тексте указывается, что по данной микроструктуре выявлен твердый раствор, что по определению не свойственно для дендритных участков в слитках из-за химической ликвации;

7. В части исследования механических свойств (глава 4) при различных температурах отсутствует сопоставление характеристик исследуемого сплава с аналогичными высокоэнтروпийными сплавами или сплавами аналогичных систем легирования;

8. По тексту диссертации появляется информация о модуле упругости разработанного сплава, но в методике отсутствует информация о применении экстензометра. Требуется пояснение метода оценки модуля упругости;

9. В разделе, посвящённом деформационному упрочнению (глава 5), следовало бы уточнить температурную зависимость параметров модели Джонсона–Кука, т.к. испытания на растяжение проводились только для температурного интервала от 800 до 1100 °С;

10. При обсуждении результатов исследования трибологических характеристик полезно было бы оценить характер износа (адгезионный, абразивный, окислительный).

11. Исследования усталостных характеристик при жестком цикле испытаний приведены для области малоциклового усталости. В случае формирования интенсивного деформационного упрочнения целесообразно привести такие испытания для областей многоциклового усталости, в которой деформационное упрочнение оказывает положительное влияние.

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 энтروпийного сплава, обладающего

Работа соответствует паспорту специальности 2.6.17., соответствует 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.

Официальный оппонент,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
пластической деформации металлических
материалов, Федеральное государственное
учреждение науки Институт металлургии и
материаловедения им. А.А. Байкова Российской
академии наук


Иванников
Александр Юрьевич
25.11.2025г.

Подпись Иванникова А.Ю. заверяю

Зам.директора ИМЕТ РАН




В. С. Юсупов
25.11.2025г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Адрес: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49

Телефон: +7 (499) 135-20-60

Адрес электронной почты: imet@imet.ac.ru

Сайт: <https://www.imet.ac.ru/>