

ВЛАСОВ ИВАН ИГОРЕВИЧ

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

Научная специальность 2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» научно - исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)

Научный руководитель: **Севальнёв Герман Сергеевич**
кандидат технических наук,
начальник сектора лаборатории
«Конструкционные и специальные стали»
НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ

Официальные оппоненты: **Винтайкин Борис Евгеньевич**
доктор физико-математических наук, профессор
профессор кафедры «Физика»,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)»
Иванников Александр Юрьевич
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

Ведущая организация: Акционерное общество "Корпорация "Московский институт теплотехники" (АО "Корпорация МИТ")

Защита состоится «__» _____ 2025 г. в __:00 часов на заседании диссертационного совета 31.1.002.01 при НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д.17. Тел. 8 (499) 267-86-77, e-mail: admin@viam.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и на сайте www.viam.ru

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д.17, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, учёному секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

М.А. Горбовец

© НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2025 г.

© Власов И.И., 2025 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в материаловедении ставятся задачи связанные с разработкой и внедрением новых классов материалов, обладающих уникальными физико-химическими свойствами. Одним из таких перспективных направлений является создание энтропийных сплавов (ЭС), которые получили свое название благодаря различной степени энтропии смешения, играющей ключевую роль в формировании их структуры и свойств, а также в поведении при эксплуатационных нагрузках.

В частности, высокоэнтропийные сплавы представляют собой многокомпонентные системы, содержащие пять и более основных элементов в эквимолярных или близких к этому соотношениях. Такой подход контрастирует с традиционными сплавами, где один или два элемента доминируют в составе. Высокая энтропия смешения стабилизирует простые кристаллические структуры, такие как ОЦК, ГЦК и ГПУ, и предотвращает образование сложных интерметаллидов, что открывает новые возможности для создания материалов с улучшенными механическими, термическими и коррозионными характеристиками.

Энтропийные сплавы 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 в условиях эксплуатации.

Среди энтропийных сплавов система Ni-Co-Cr представляет особый интерес из-за уникального сочетания различных свойств, в том числе высокой прочности, пластичности и устойчивости к окислению, что делает её перспективной для эксплуатации в экстремальных условиях (при различных температурах и динамическом нагружении) и применения в аэрокосмической и других высокотехнологичных отраслях.

Исследований в этом направлении до настоящего времени проведено очень мало.

Целью диссертационной работы является 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.

Для достижения поставленной цели в рамках диссертационной работы решены следующие задачи:

1) Проведение расчетов и разработка состава энтропийного сплава на базе NiCoCr с высокой энтропией смешения;

2) Выбор технологических параметров и отработка технологических процессов выплавки, горячей деформации, атомизации, селективного лазерного сплавления и термической обработки многокомпонентного высокоэнтропийного сплава;

3) Исследование микроструктуры, фазового состава и свойств многокомпонентного высокоэнтروпийного сплава и установление взаимосвязи формирования структуры и свойств;

4) Определение потенциальных областей применения разработанного многокомпонентного высокоэнтропийного сплава.

Научная новизна исследования

В результате выполненных экспериментальных исследований в рамках настоящей работы получены следующие новые результаты:

1) Разработан многокомпонентный высокоэнтропийный сплав NiCoCrWNbAlTiCRe, обладающий деформационным упрочнением и возможностью эксплуатации при криогенных температурах без значительного снижения уровня свойств.

2) Установлено, что получение многокомпонентного энтروпийного 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.

Возможность применения многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe в качестве материала для резистивных элементов подтверждена актом о промышленном внедрении в АО «Оptron».

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Обоснование выбора термической обработки для оценки изменения структуры и свойств многокомпонентного высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiCRe;
- 2) Взаимосвязь формирования структуры и свойств в зависимости от способа получения и термической обработки многокомпонентного высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiCRe;
- 3) Механизм формирования износостойкости многокомпонентного высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiCRe.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов и выводов в диссертационной работе обеспечена комплексным применением современных методов и оборудования для исследования структуры и свойств материалов, проведением испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ и международных стандартов, систематическим характером проведенных исследований в рамках академических научных школ, согласованностью полученных результатов с литературными данными, а также апробацией результатов работы с получением положительных результатов.

Личный вклад автора. Личный вклад соискателя состоит в выполнении всех этапов диссертационного исследования, включающих анализ научно-технической литературы, участия в разработке экспериментальных композиций, выборе состава высокоэнтропийного сплава системы Ni-Co-Cr, участия в выборе технологических параметров, технологическом сопровождении выплавки слитков, разработке режима термической обработки, выборе технологических параметров горячей пластической деформации, выборе параметров синтеза, обработке и анализе полученных экспериментальных данных, в том числе в разработке необходимой научно-технической документации, написании научных публикаций и выступлениях с докладами на научных конференциях.

Результаты исследований были представлены на 11 всероссийских конференциях:

1. XVII Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат»
2. 51-я Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения»
3. Всероссийская конференция «Студенческая научная весна», посвящённой 85-летию со дня рождения академика И.Б. Федорова
4. 21-я конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» КМУС-2024

5. 22-я конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» КМУС-2025

6. XXI Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов»

7. XVII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»

8. XI Международная научно-практическая конференция «Молодой учёный»

9. II Международная научно-практическая конференция «Современные научные исследования: теория, методология, практика»

10. XIX Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современной науки»

11. 8-я Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении»

Основные публикации по теме диссертационной работы. По результатам проведенных исследований опубликовано 11 работ, в том числе 3 статьи в российских журналах, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки России. Общий объем работ по теме диссертации составляет 4,1875 печатных листа.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка используемой литературы из 132 наименований, содержит 162 машинописных листов текста, включая 79 рисунков, 20 таблиц и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы.

В Главе 1 на основе анализа иностранной научно-технической литературы определены современные представления по классификации, термодинамике и областям применения энтропийных сплавов. Формирование свойств зависит от следующих показателей: средний атомный радиус; параметр δ (характеризует меру неоднородности атомных радиусов в многокомпонентных сплавах); энтальпия смешивания ΔH_{mix} ; энтропия смешивания ΔS_{conf} ; параметр Ω (объединяет энтропийные и энтальпийные факторы, отражая баланс между тенденцией к упорядочиванию (под влиянием энтальпии смешивания) и разупорядочиванию; средняя электроотрицательность; отклонение электроотрицательности; средняя температура плавления; максимальная разница атомных радиусов; количество компонентов; отношение модулей упругости. Варьируя вышеизложенные параметры, можно получить энтропийные сплавы с уникальными эффектами.

На основе многочисленных исследований высокоэнтропийные сплавы за счет высокой конфигурационной энтропии смешения и формирования

многокомпонентного твердого раствора демонстрируют высокие показатели по прочностным и пластическим характеристикам, высокие показатели жаропрочности, биосовместимости и т. д. (Таблица 1). Высокоэнтропийными называют сплавы в составе которых находится пять или более элементов в эквиатомном соотношении и конфигурационная энтропия смешивания больше универсальной газовой постоянной умноженной на 1,5. В таких сплавах высокая конфигурационная энтропия смешения подавляет образование интерметаллидов и способствует формированию достаточно стабильных твердых растворов. При этом образование карбидов элементов не приводит к значительному снижению энтропии системы.

Таблица 1. Системы энтропийных сплавов и формируемые свойства

Сплав	Состав, ат. %	Структура	Отличительные свойства
NiCoCrFeMn	20/20/20/20/20	ГЦК	$\sigma_B = 500$ МПа; $\delta > 60\%$
NiCoCrFeAl	20/20/20/20/20	ОЦК	$HV = 650$
MoNbTaW	25/25/25/25	ОЦК	$T_{пл} = 2600^\circ\text{C}$
TiZrNbTa	25/25/25/25	ОЦК	Биосовместимость

В рамках обзора научно-технической литературы особое внимание уделено высокоэнтропийному зарубежному сплаву GRX-810, детали из которого изготавливаются преимущественно аддитивными технологиями. Сплав разработан на основе системы NiCoCr и показывает достаточно высокие прочностные и пластические характеристики наряду с высокой жаропрочностью и жаростойкостью. Анализ компонентной системы сплава на основе научно-технической литературы показывает следующее: добавление Ti и Nb замедляет рекристаллизацию и рост зерен при температурах до 900°C в следствии чего увеличивается сопротивление термическому воздействию; добавление W, C замедляет рост зерен и увеличивает прочностные характеристики сплава при повышенных температурах за счет образования стабильной карбидной фазы; легирование твердого раствора Re замедляет рост зерен при высоких температурах, увеличивает жаропрочность и жаростойкость; добавление Al обусловлено повышением прочностных показателей за счет деформационного упрочнения.

Однако данные в научно-технической литературе по формированию уровня свойств в значительной степени разнятся. В работах китайских ученых среднеэнтропийные сплавы на базе NiCoCr изначально демонстрируют высокий уровень механических свойств при различных температурах без необходимости дополнительного легирования системы, при этом в работах американских исследователей обусловлена именно необходимость применения легирования сплава, который при этом дополнительно может быть упрочнен путем горячего изостатического прессования, в результате которого растут как прочностные так и пластические характеристики, что во многом противоречит известным механизмам упрочнения сплавов с основным матричным компонентом. Исследования сплавов на основе данной системы элементов в части понимания закономерности формирования структуры и свойств является актуальным направлением исследований в современном материаловедении.

В Главе 2 представлено описание материалов, методик исследований и проведения испытаний.

Объектом исследований в данной работе являлся высокоэнтروпийный многокомпонентный сплав NiCoCrWNbAlTiCrRe. Разработку сплава проводили с использованием трехкомпонентной системы NiCoCr в эквиатомном соотношении и последующее введение дополнительных элементов для обеспечения высокой энтропии смешения системы. Термодинамические расчеты при разработке химического состава сплава проводили на базе ядра ThermoCad с применением метода CalPhaD (Calculation Phase Diagrams).

Для оценки формирования структуры изначально проведены исследования трехкомпонентных среднеэнтропийных сплавов в литом состоянии с эквимассовым и эквиатомным соотношением компонентов. Многокомпонентный высокоэнтропийный сплав исследовали в литом состоянии, после горячей пластической деформации, атомизации, селективного лазерного сплавления, а также после термической обработки. Получение литых трехкомпонентных составов проводили методом вакуумно-индукционной выплавки с разливом в подогретый до 200 °С тигель для исключения образования металлургических дефектов. Полученная масса слитков составляла 1 кг. Выплавку многокомпонентного состава проводили в вакуумно-индукционной печи при нагреве в температурном диапазоне 1400–1600 °С. Масса слитка составляла 50 кг. Разлив жидкого расплава проводили в стальную трубу, нагретую до температуры 200 °С.

Для подбора режима горячей деформации высокоэнтропийного многокомпонентного сплава NiCoCrWNbAlTiCrRe выполняли испытание на горячее осаждение согласно регламентированной методике ГОСТ 8817–82. В процессе испытания проводили определение способности сплава выдерживать заданную относительную степень деформации, а также выявляли формирование поверхностных дефектов при статическом сжатии.

Подбор режимов атомизации проводили опытным путем на основе режимов атомизации жаропрочных никелевых сплавов. Выбор режима селективного лазерного сплавления проводили в зависимости формирования дефектов от удельной плотности энергии.

Металлографические исследования проводили по известным методикам. Исследование твердости проводили по методу Виккерса в соответствии с ГОСТ 2999-75. Фазовый состав определяли методом рентгеноструктурного анализа. Исследования дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) образцов Ø 5мм высотой 1 мм выполняли согласно ГОСТ Р 56754–2015. Измерения проводили в температурном интервале от 20°С до 1300°С при скорости нагрева 10 К/мин в атмосфере высокочистого аргона.

Испытание на статическое растяжение образцов проводили на универсальной электромеханической машине при скоростях растяжения 0,1...10 мм/мин в соответствии с ГОСТ 1497-2023. Для оценки механического поведения высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в условиях статического нагружения использовали метод корреляции цифровых изображений (КЦИ).

Исследования износостойкости проводили путем испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения по схеме «стержень-диск» в паре трения со сталью мартенситного класса ШХ15-ШД и оксидной керамикой Al_2O_3 на трибометре. Интенсивность изнашивания определяли по глубине износа и ширине дорожки скольжения в соответствии с методикой ASTM G99-2023.

Исследование коррозионных характеристик сплавов проводили с помощью потенциостата с программным обеспечением, трехэлектродной ячейки, состоящей из рабочего электрода, электрода сравнения и вспомогательного электрода. Испытания проводили в среде соленого раствора 3,5 % NaCl. Для испытания использовался образец площадью поперечного сечений 1 см^2 . Перед испытанием образец полировали, обезжиривали в ацетоне и промывали дистиллированной водой. Во время испытания происходила фиксация зависимости потенциала E от логарифма плотности тока $\ln j$. Анодный и катодный наклоны (b_a, b_k) определялись как тангенс угла наклона анодной и соответственно катодной ветви.

Для исследования жаростойкости сплавов использовались стандартные образцы геометрическими размерами $10 \times 10 \times 2 \text{ мм}$. Перед проведением испытания образцы подвергались полировке, обезжириванию в ацетоне и промывкой дистиллированной водой. После промывки каждый образец взвешивался на аналитических весах с точностью $\pm 0,1 \text{ мг}$. Проводилась замеры геометрических размеров каждого образца для расчета площади поверхности. Выдержку проводили в муфельной печи в среде воздуха. Образцы помещались в керамические тигли, проводился нагрев до заданной температуры, выдержка и охлаждения на воздухе. После каждого цикла образцы взвешивались для построения кинетической кривой. По полученным результатам проводили расчет привеса/убыли массы $(\frac{\Delta m}{S}, \frac{\text{г}}{\text{м}^2})$ в зависимости от времени. Расчет жаростойкости сплавов проводили по следующей формуле:

$$k_p = \frac{(\frac{\Delta m}{S})^2}{t}$$

Где: Δm – разность между начальной и конечной массой образца, г; S – площадь поверхности, м^2 ; t – время экспонирования образца.

Для оценки степени деформационного упрочнения многокомпонентного высокоэнтропийного сплава использовали математическую модель Джонсона-Кука:

$$\sigma = (A + B * \varepsilon^n) * (1 + C * \ln(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0})) * (1 - (\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0})^m)$$

где: σ – напряжение материала, МПа; A – предел текучести материала, МПа; B – коэффициент упругости материала, характеризующий его способность сопротивляться деформации, МПа; C – коэффициент вязкости материала, характеризующий его поведение при высоких скоростях деформации, МПа; m – показатель степени скорости деформации, характеризующий влияние скорости деформации на поведение материала; n – показатель степени упругости материала, характеризующий его поведение при больших деформациях;

T_{melt}, T_0, T – температура плавления материала, температура окружающей среды и температура материала, соответственно, °K; ε – эффективная пластическая деформация; $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ – эффективная скорость пластической деформации.

В Главе 3 было проведено исследование закономерности формирования структуры в трёхкомпонентных энтропийных сплавах системы NiCoCr в эквиатомном и эквимассовом соотношениях, а также многокомпонентного высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiReC после литья, горячей пластической деформации, атомизации, селективного лазерного сплавления и термической обработки.

Результаты расчетов степени энтропии в программном комплексе на базе ядра ThermoCad показали, что наибольшая энтропия бинарной системы Ni-Cr достигается в результате эквиатомного соотношения компонентов системы (Рисунок 1).

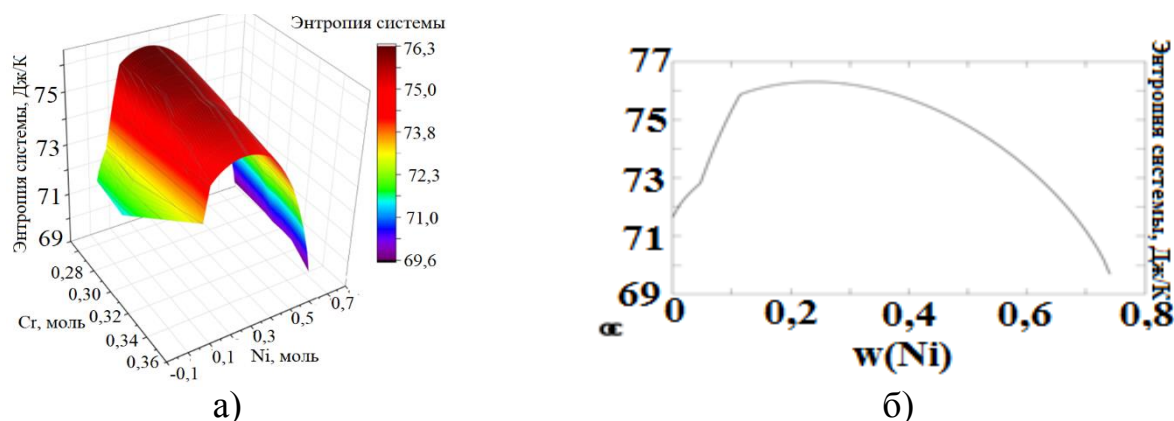


Рисунок 1. Расчеты энтропии трехкомпонентной системы Ni-Co-Cr в программном комплексе (содержание Cr – X, Ni – Y в молях вещества)

По результатам анализа научно-технической литературы по влиянию легирующих элементов на систему NiCoCr и термодинамических расчетов был выбран многокомпонентный состав NiCoCrWNbAlTiReC. Для данного сплава рассчитана конфигурационная энтропия смешения ΔS_{conf} , которая составила 18,3 Дж/К, что свидетельствует о том, что сплав относится к высокоэнтропийному.

Для подобранного состава разработаны режимы литья, горячей пластической деформации, атомизации, селективного лазерного сплавления и термической обработки.

В литом состоянии (Рисунок 2) структура сплава состоит из ГЦК твердого раствора и карбидов (Nb,Ti)C и (Cr,W)₂₃C₆. Карбиды располагаются в основном по границам зерен, что связано с особенностями процесса индукционной выплавки в вакуумной печи, при котором после разлива расплавка происходит охлаждение рабочего пространства печи в вакууме. В результате этого происходит выделение карбидов из твердого раствора.

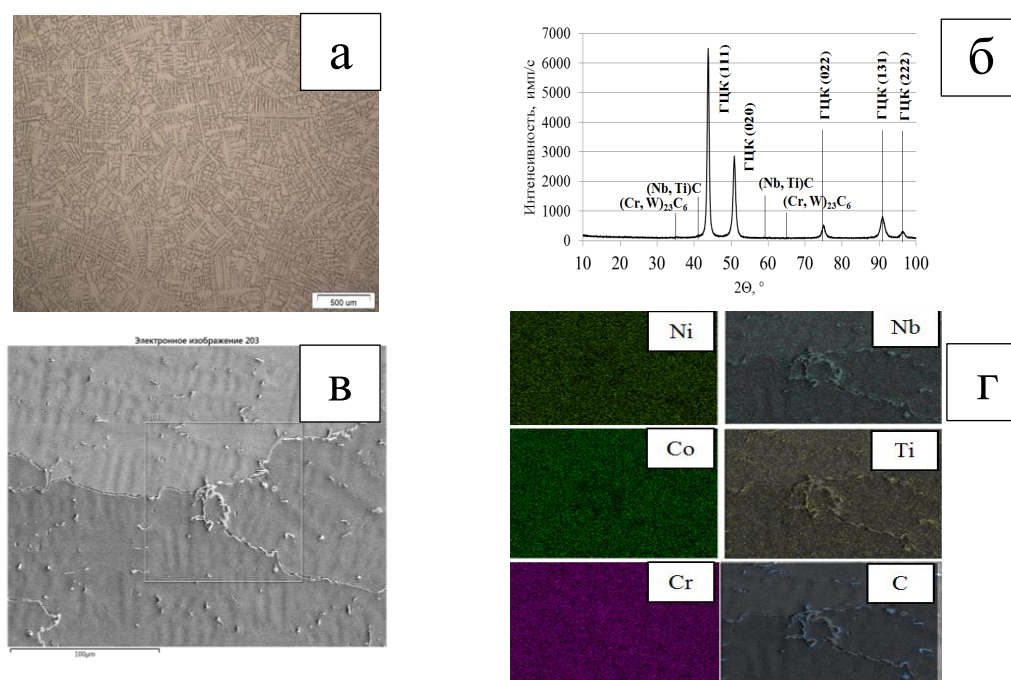


Рисунок 2. Микроструктура многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в литом состоянии (а – оптическая микроскопия, $\times 50$; в – электронная микроскопия, $\times 1500$), дифрактограмма фазового состава (б) и энергодисперсионные карты элементов (г)

Горячая пластическая деформация приводит к формированию структуры с размером зерна, соответствующего 7 баллу в соответствии с ГОСТ 5639. Горячая пластическая деформация привела к увеличению объемной доли карбидов (Рисунок 3), а также сегрегаций карбидов в теле зерна. По результатам рентгенофазового анализа в структуре сохранился ГЦК твердый раствор, присутствуют карбиды (Nb,Ti)C и (Cr,W)₂₃C₆. Помимо этого в структуре были обнаружены карбиды WC. Применение горячей пластической деформации не привело к значительным структурным изменениям многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC.

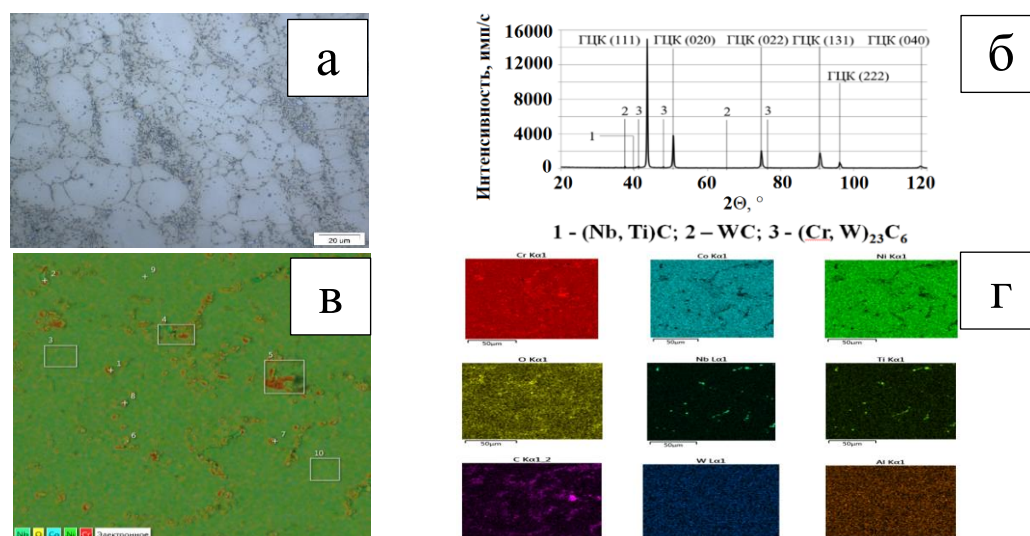


Рисунок 3. Микроструктура многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC (а – оптическая микроскопия, $\times 1000$; в – электронная микроскопия, $\times 1500$), дифрактограмма (б) и энергодисперсионные карты элементов (г)

Гранулы после атомизации слитков из многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC обладали гомогенной дендритной структурной (рисунок 4, а). После селективного лазерного сплавления в заготовках сформировалась трековая структура с низкой пористостью (0,056) без дефектов (трещин и несплавлений), которая по результатам рентгенофазового анализа представляла из себя ГЦК твердый раствор (рисунок 4, б-г). Карбиды в микроструктуре как на стадии атомизации, так и после селективного лазерного сплавления в структуре сплава отсутствовали.

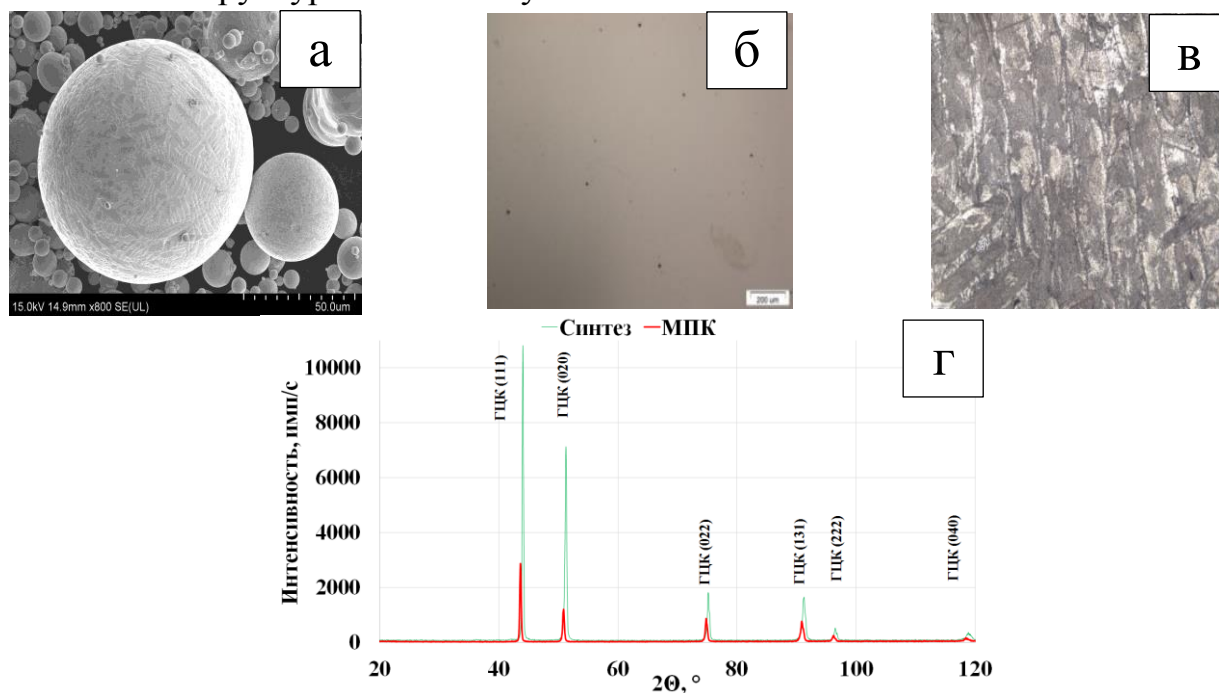


Рисунок 4. Микроструктура многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC (а – оптическая микроскопия, $\times 1000$; в – электронная микроскопия, $\times 1500$), дифрактограмма (б) и энергодисперсионные карты элементов (г)

В Главе 4 проведено исследование свойств многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в широком температурном диапазоне: как при пониженных температурах (при (-70) и (-196) °C), так и при повышенных (от $(+900)$ до $(+1100)$ °C), а также исследовано влияние термической обработки на формирование структуры и свойств.

Согласно научно-технической литературе высокоэнтропийный сплав NiCoCrWNbAlTiReC может эксплуатироваться при повышенных температурах, в связи с чем исследована кинетика изменения механических свойств при температурах 900, 1000 и 1100 °C в сравнении с температурой испытания 20 °C.

По анализу диаграмм (рисунок 5) видно, что с изменением состояния формируется различный вид диаграмм растяжения: для литого состояния и после СЛС реализуется упрочнение в результате пластической деформации, в то время как для деформированного состояния наблюдается протяженный участок зоны упругости. Результаты испытаний (таблица 2) наибольший уровень удлинения при температуре испытания 20 °C формируется для литого состояния, в то время как наиболее высокий комплекс характеристик – для горячедеформированного состояния. При этом структурное состояние, которое реализуется после СЛС

обеспечивает наиболее высокую длительную прочность при температуре испытания 1100 °С – на базе испытания 100 ч напряжение, при котором происходит разрушение составляет 30 МПа (рисунок 5, г).

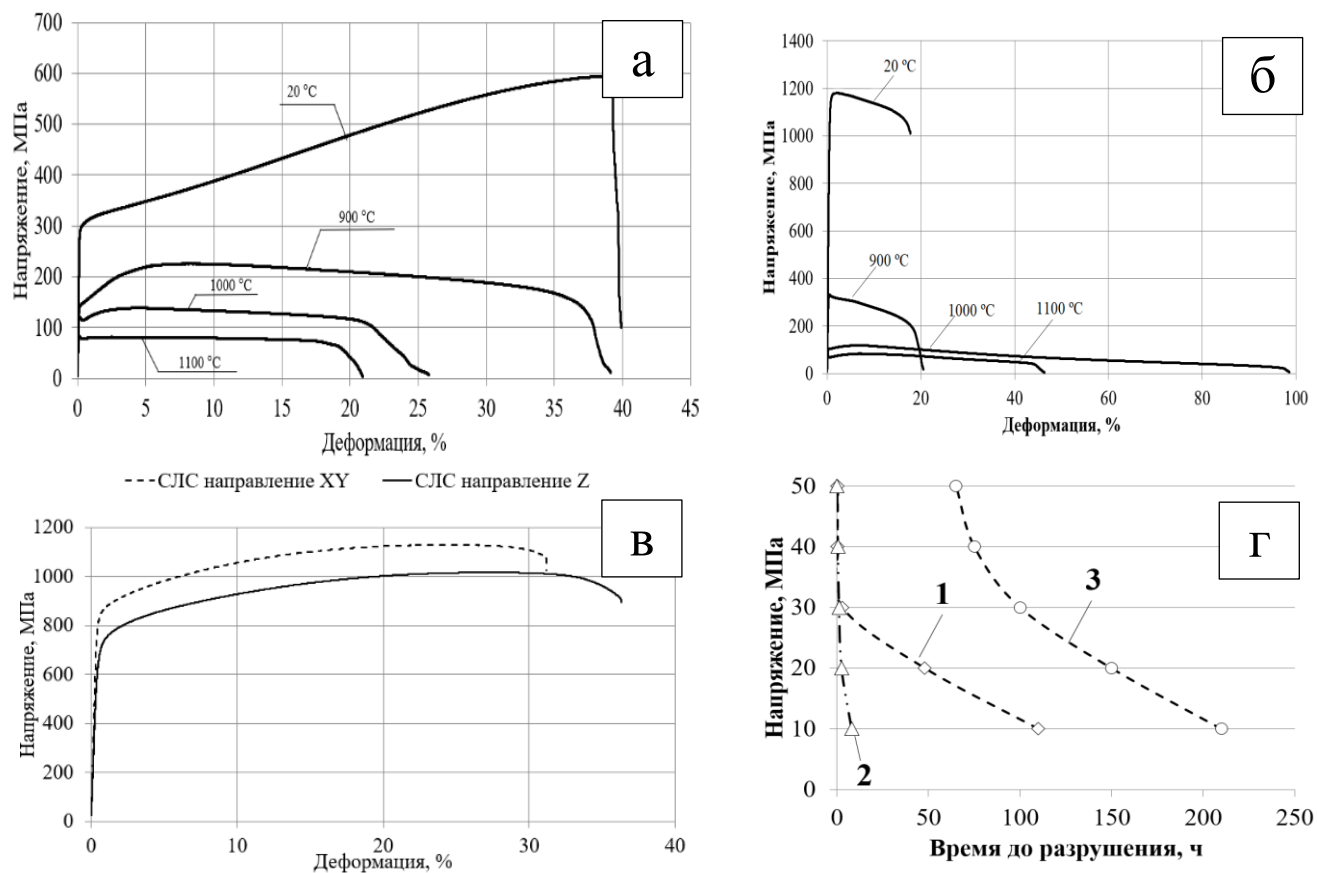


Рисунок 5. Диаграммы растяжения (а-в) при различных температурах и кривые длительной прочности при температуре испытания 1100 °С (г) образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в литом (а, г-1), деформированном (б, г-2) состоянии, после селективного лазерного сплавления (в, г-3)

Таблица 2 – Результаты испытаний образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в различных состояниях

t испытания, °С	E, ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %
Литье				
20	175	300	595	57
900	130	136	230	48
1000	100	126	141	43
1100	96	79	85	32
Горячая пластическая деформация (ГПД)				
20	175	1150	1210	40
900	175	320	325	43
1000	165	105	120	80
1100	101	70	80	40
Селективное лазерное сплавление (СЛС-XY)				
20	175	835	1180	33
900	150	194	195	92
1000	100	103	105	43
1100	97	66	68	42

Анализ результатов показал, что как увеличение характеристик прочности, так и снижение длительной прочности для образцов после горячей пластической деформации связано с выделением карбидной фазы по всему объему и формированием сегрегаций. В связи с этим были проведены исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термодинамический анализ фазового состава для подбора режим термической обработки. Результаты анализа ДСК (рисунок 6) показали, что в интервале температур 900-1050 °С присутствует незначительное экзотермическое изменение количества теплоты, что свидетельствует о выделении карбидов в объеме материала. Начиная с участка 1150 °С происходит растворение карбидов типа (Nb, Ti)C, относительно данной температуры подобран режим термической обработки.

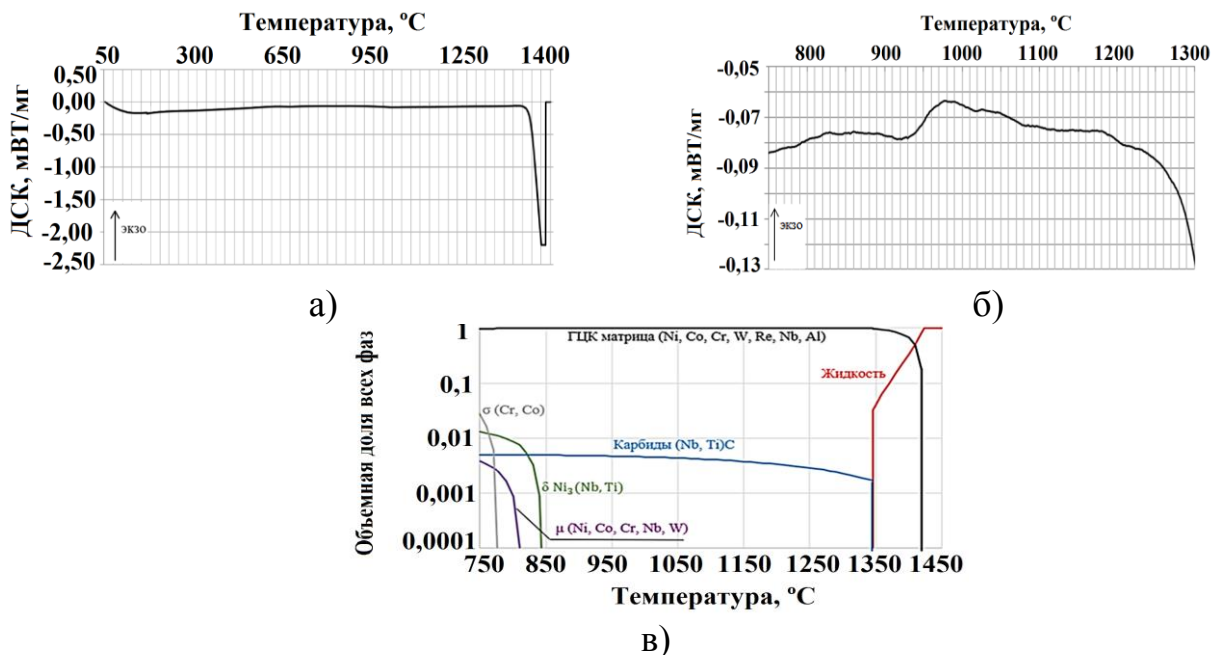


Рисунок 6. Термограмма ДСК (а), участок термограммы «750-1300 °С» (б) и расчетная диаграмма изменения количества фаз высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC

Термическая обработка высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC не проводила к значительным изменениям в структуре: происходила рекристаллизация, а также в случае образцов после горячей пластической деформации – растворение карбидной фазы (рисунок 7). В литом состоянии после термической обработки произошло повышение прочностных характеристик σ_B и $\sigma_{0,2}$ при температуре испытания 20 °С (таблица 3), однако для всех других случаев произошло снижение уровня характеристик. Применение термической обработки способствует снижению пределов прочности и текучести, при этом способствует повышению пластичности. Это связано с растворением карбидной фазы в матрице сплава.

Термическая обработка в свою очередь оказывает негативное влияние на длительную прочность при 1100 °С высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в литом состоянии и после селективного лазерного сплавления (рисунок 8). Образцы после литья и термической обработки не достигали базы испытаний 100 ч при напряжении 10 МПа, а предел длительной

прочности на базе 100 ч после селективного лазерного сплавления и термической обработки снизился с 30 до 20 МПа. При этом для образцов после горячей пластической деформации термическая обработка позволила обеспечить базу испытаний 100 ч при напряжении 20 МПа за счет растворения карбидов упрочнения твердого раствора.

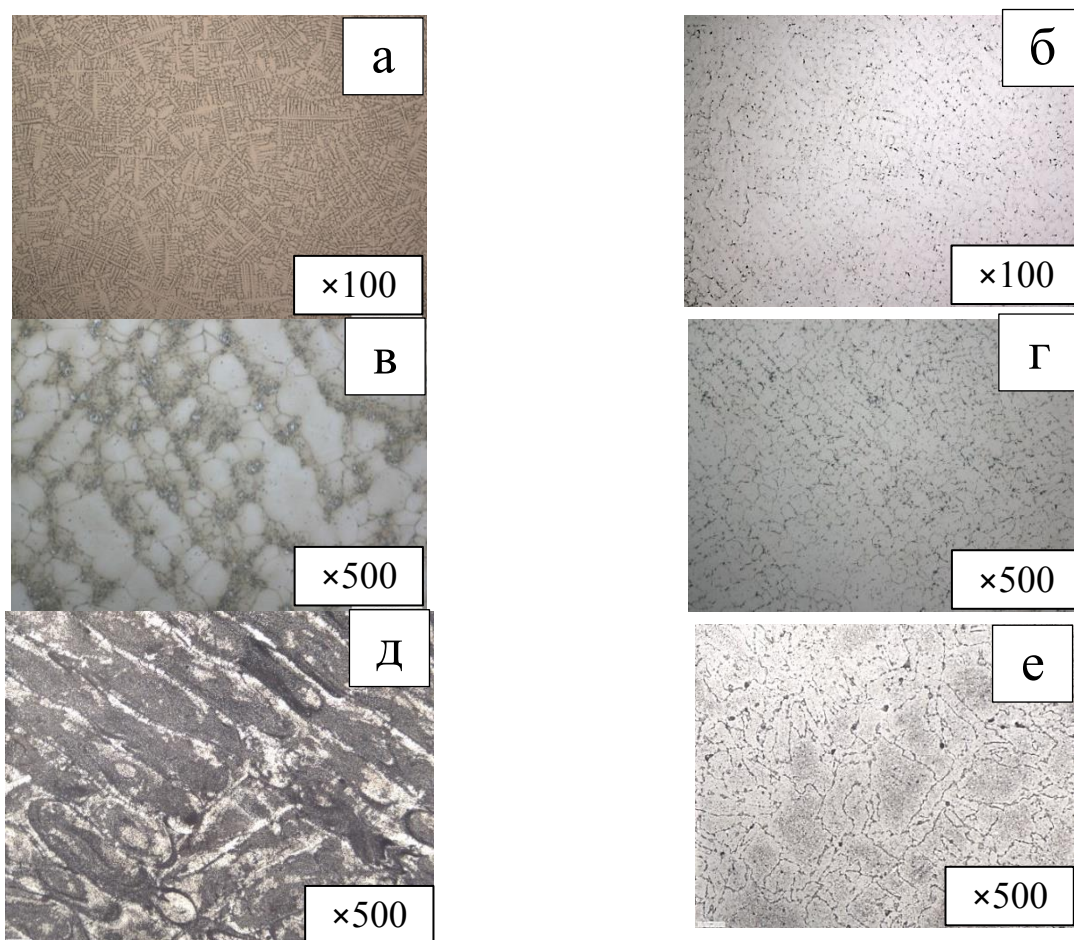


Рисунок 7. Микроструктура высокоэнтروпийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC до (а, в, д) и после (б, г, е) термической обработки в состояниях: а, б – литье; в, г – горячая деформация; д, е – селективное лазерное сплавление

Таблица 3 - Результаты испытаний образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в различных состояниях после термической обработки

t испытания, °C	E, ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B, МПа	δ_5, %
Литье + термическая обработка				
20	166	330	650	55
900	135	125	210	52
1000	98	110	120	45
1100	95	65	70	40
Горячая пластическая деформация (ГПД) + термическая обработка				
20	173	535	985	55
900	141	192	194	53
1000	105	102	102	45
1100	98	65	67	36
Селективное лазерное сплавление (СЛС-ХУ) + термическая обработка				
20	172	590	1010	40,1
900	149	206	185	62
1000	103	90	100	52
1100	99	58	65	46

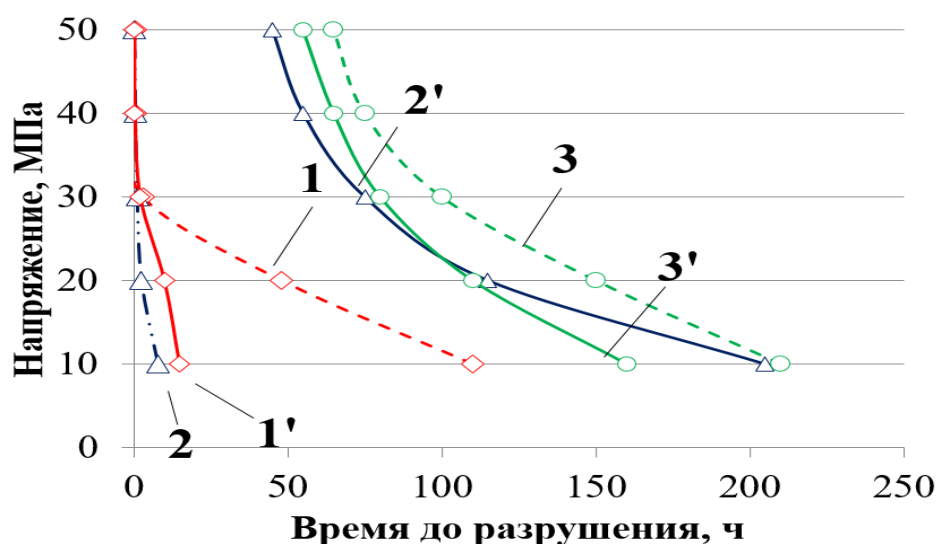


Рисунок 8. Кривые длительной прочности образцов до (1, 2, 3) и после (1', 2', 3') термической обработки образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в состояниях: а, б – литые; в, г – горячая деформация; д, е – селективное лазерное сплавление

Исследование жаростойкости и оценка качественной характеристики коррозионной стойкости высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в литом, горячедеформированном состояниях и после селективного лазерного сплавления позволили установить, что наилучшей жаростойкостью (потеря массы за 100 ч испытания составила около $4 \cdot 10^{-3}$ г/м²) обладают образцы после селективного лазерного сплавления, при этом наилучшей коррозионной стойкостью обладают образцы в литом состоянии (рисунок 9).

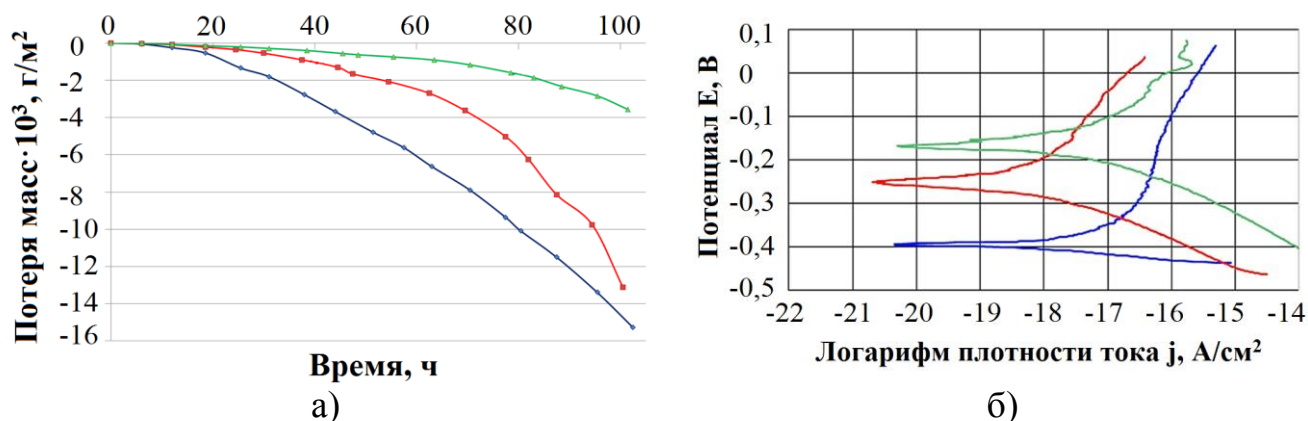


Рисунок 9. Зависимость изменения массы за время испытания на жаростойкость при 1100 °С (а) и тафелевские электрохимические кривые (б) образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в литом (синий), горячедеформированном (красный) состояниях и после селективного лазерного сплавления (зеленый)

Помимо повышенных температур сплав может эффективно работать в условиях отрицательных температур. При испытании на растяжение при -70 °С не происходило снижения свойств, а ударная вязкость KCU составляла от 80 до 110 Дж/см², KCV - от 45 до 70 Дж/см² в зависимости от состояния.

В Главе 5 рассмотрено деформационное упрочнение высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC и дополнительные области его потенциального применения помимо авиационной промышленности при повышенных температурах.

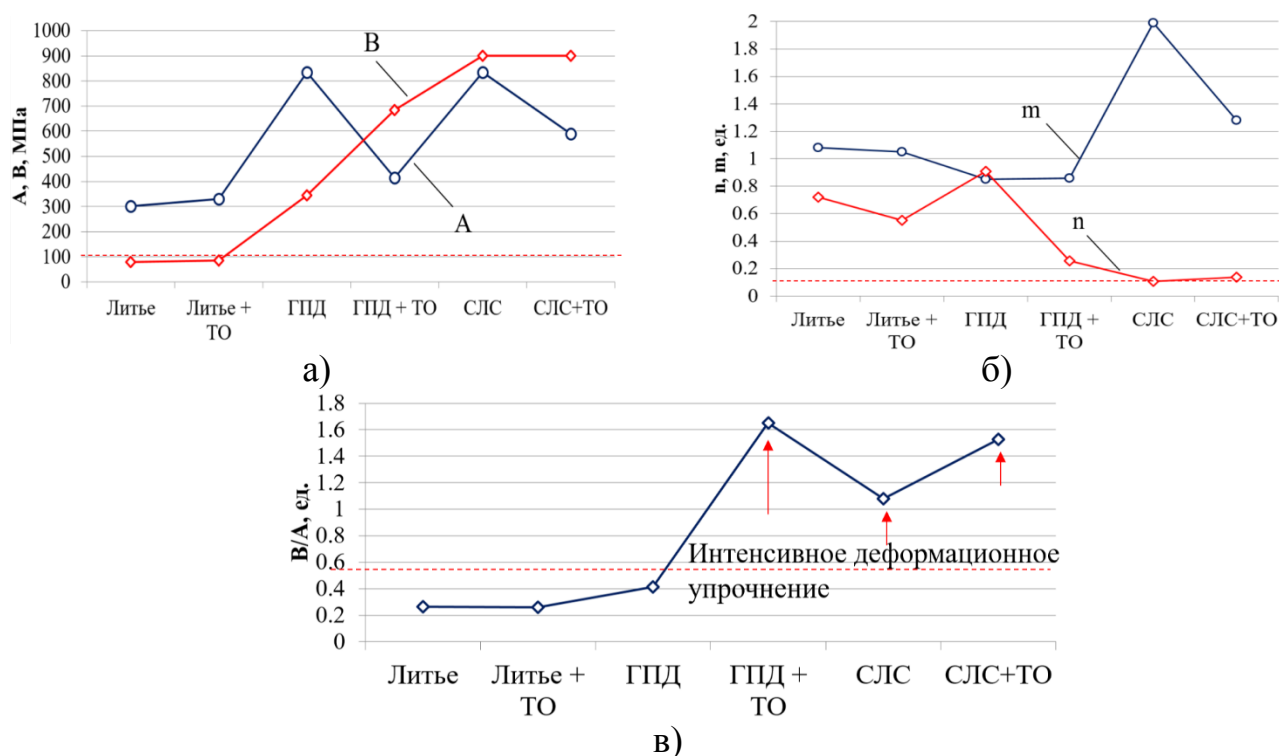


Рисунок 10. Рассчитанные параметры модели Джонсона-Кука высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC

Для оценки степени деформационного упрочнения использовали математическую модель Джонсона-Кука, в соответствии с которой определяли параметры A, B, m, n высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в различных состояниях (рисунок 10). По результатам расчетов было установлено, что сплав обладает деформационным упрочнением, а наиболее интенсивно протекает процесс в состояниях: горячая пластическая деформация (ГПД) с последующей термической обработкой (ТО), селективное лазерное сплавление (СЛС) в состояниях до и после термической обработки. На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы:

1) Для обеспечения эффективного деформационного упрочнения $n \geq 0,1$, $B/A \geq 0,5$, $B > 100$ МПа. По данным параметрам ВЭС в литом состоянии обладает малой эффективностью деформационного упрочнения;

2) Наиболее существенным упрочнением после обработки СЛС + ТО, демонстрируют наиболее высокие характеристики деформационного упрочнения с относительным вкладом до 91,8% при пластической деформации 50%

3) Образцы после ГПД + ТО демонстрируют высокую степень деформационного упрочнения на начальных стадиях за счет гомогенности твердого раствора.

4) Интенсивное деформационное упрочнение позволяет использовать материал при динамическом нагружении: триботехнические и усталостные (циклические) нагрузки.

Исследование триботехнических характеристик сплава проводили по схеме «шарик-диск». По результатам исследований (рисунок 11) было установлено, что наилучшей износостойкостью обладает сплав после селективного лазерного сплавления, а вклад в формирование износостойкости сплава вносит не формируемая твердость сплава, а реализация деформационного упрочнения во время триботехнического нагружения. За счет поверхностной пластической деформации твердость образца увеличивается на 72-154% от изначальной твердости в зависимости от состояния сплава, что оказывает высокое сопротивление интенсивному изнашиванию.

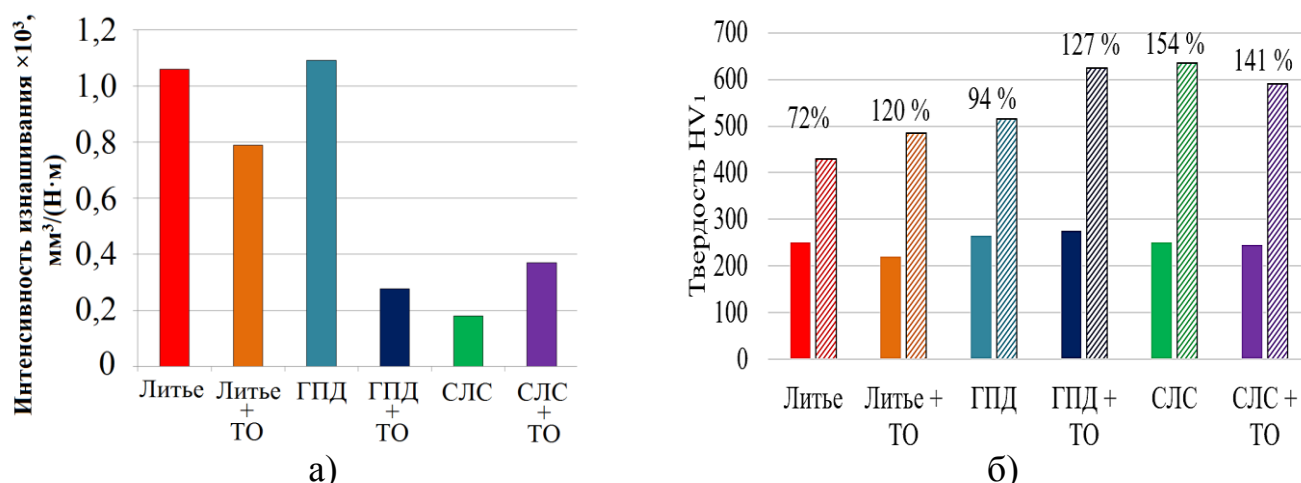


Рисунок 11. Интенсивность изнашивания (а) и твердость (б) до (сплошная заливка) и после (штриховка) испытания образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC в различных состояниях (цифрами в % указано повышение твердости)

Деформационное упрочнение оказывает положительное воздействие при эксплуатации в условиях циклических нагрузок. При испытании образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC после горячей деформации и термической обработки в условиях жесткого цикла позволило установить, что при $\Delta\epsilon = 0,9\%$ сплав обеспечивает работоспособность на базе 10^4 циклов испытаний (рисунок 12).

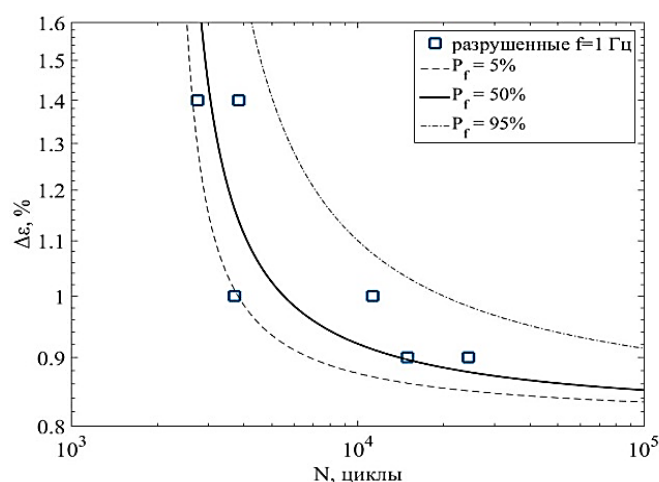


Рисунок 12. Усталостная кривая образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC после горячей деформации и термической обработки при испытании в условиях жесткого цикла

Сплавы на основе системы Ni-Cr широко используются для изготовления резистивных элементов, а наиболее актуальным направлением является изготовление тонкопленочных резисторов. Высокоэнтропийный сплав NiCoCrWNbAlTiReC обладает уровнем сопротивления около $1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ при температуре испытания $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а также высоким относительным удлинением (более 50%), что позволяет использовать его для изготовления резистивных элементов с малой площадью поперечного сечения. При этом при различных температурах обработки (от 200 до $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой в течение 4 часов) сплав показывает высокую стабильность по структуре – удельное электросопротивление практически не изменяется (рисунок 13).

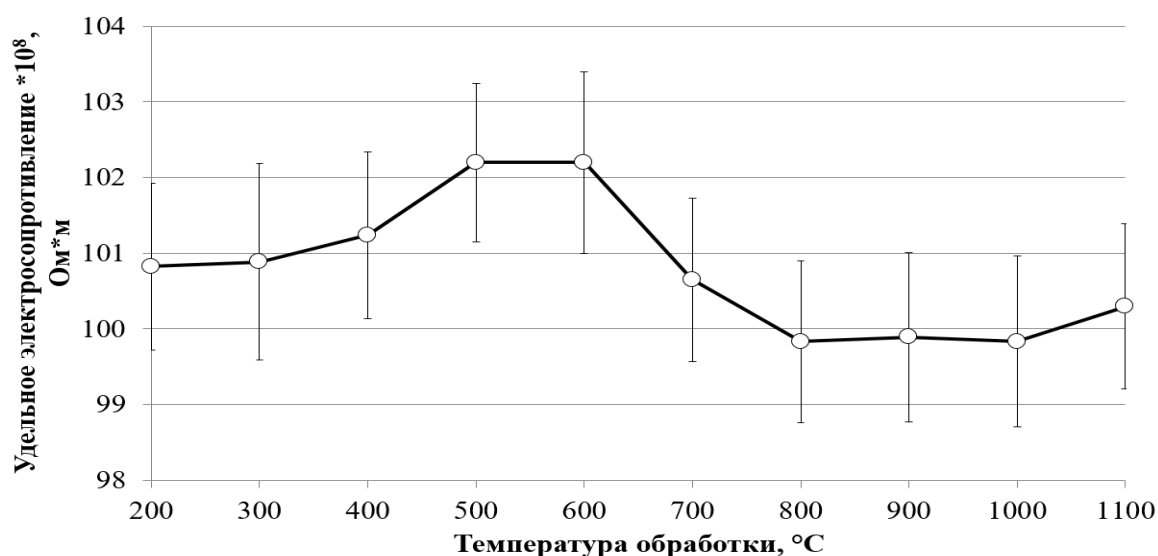


Рисунок 13. Изменение удельного электросопротивления высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC после горячей деформации и термической обработки в зависимости от температуры обработки

Возможность применения многокомпонентного высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiRe в качестве материала для резистивных элементов подтверждена актом о промышленном внедрении в АО «Оptron».

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе расчетов и экспериментальных исследований разработан состав многокомпонентного высокоэнтروпийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiCRe с высокой конфигурационной энтропией смешения ($\Delta S_{conf} = 18,3$ Дж/К), который обеспечивает наилучший комплекс свойств (механических в широком диапазоне температур, триботехнических и жаростойкости) после селективного лазерного сплавления за счет формирования гомогенного многоэлементного ГЦК-твердого раствора.

2. Гомогенность твердого раствора и высокая энтропия смешения после селективного лазерного сплавления высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiCRe обеспечивает $\sigma_b \geq 1180$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 835$ МПа, $\delta_5 \geq 33,5$ %, $\sigma_{100}^{1100} \geq 30$ МПа, потерю массы за 100 ч нагрева при 1100 °С не более 0,004 г/м². Он уступает по жаропрочности современным жаропрочным никелевым сплавам, но при этом за счет однородности структуры может эксплуатироваться в условиях динамических нагрузок и пониженных температур без охрупчивания.

3. Термическая обработка многокомпонентного высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiCRe в литом состоянии и после СЛС снижает уровень свойств за счет увеличения размера зерна, для образцов после горячей пластической деформации приводит к увеличению уровня свойств за счет растворения карбидов в твердом растворе и повышения упрочнения твердого раствора.

4. За счет интенсивного деформационного упрочнения при механическом воздействии многокомпонентный высокоэнтропийный сплав системы NiCoCrWNbAlTiCRe возможно применять при динамическом воздействии: триботехническом и усталостном нагружении. Формирование гомогенного твердого раствора и мелкозернистой микроструктуры при селективном лазерном сплавлении обеспечивает наименьшую интенсивность изнашивания ($0,19 \cdot 10^{-3}$ мм³/(Н·м)) по сравнению с другими состояниями за счет наибольшей степени упрочнения (154%) при контактно-деформационном воздействии, что обеспечивает достаточно высокую износостойкость, а снижение $\Delta \epsilon$ с 1,4 до 0,9 % при жестком цикле нагружения приводит к активному перестроению дислокационной структуры сплава. Повышение свойств сплава можно обеспечить с применением пластической деформации.

5. Гомогенность структуры и реализация соотношения параметров по модели Джонсона-Кука $B/A > 1$ приводит к повышению износостойкости сплава системы NiCoCrWNbAlTiCRe. Соотношение $B/A \geq 1,4$ приводит к увеличению интенсивности изнашивания за счет более интенсивного накопления подповерхностных дефектов.

6. За счет высокой пластичности сплава системы NiCoCrWNbAlTiCRe (δ_5 более 40 %) и удельного электросопротивления $\rho > 100 \cdot 10^{-8}$ Ом*м одним из направлений применений сплава может являться изготовление тонких резистивных элементов, что подтверждается актом о внедрении.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1) **Власов И.И.**, Севальнев Г.С., Климов В.С., Рогалев А.М. Исследование структуры и фазового состава энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co после вакуумной индукционной выплавки // Труды ВИАМ. 2024. № 9 (139). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-3-14.

2) **Власов И.И.**, Севальнев Г.С., Ляхов А.А., Нефедкин Д.Ю. Исследование структуры и механических свойств Ni–Co–Cr энтропийного сплава в литом состоянии // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-18-30.

3) Севальнев Г.С., **Власов И.И.**, Климов В.С., Нефедкин Д.Ю. Оценка сопротивления контактно-деформационному воздействию при интенсивном изнашивании поверхности литых энтропийных сплавов на базе системы Ni–Co–Cr // Труды ВИАМ. 2024. № 11 (141). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-3-13.

Прочие публикации:

4) **Vlasov I.I.**, Valuhova I.V. Study of tantalum alloyed high-entropy Ni-Co-Cr alloys wear resistance// Молодой учёный: сборник статей XI Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2025. С.38-40

5) **Власов И.И.**, Валюхова И.В. Механические свойства высокоэнтропийного сплава на базе Ni–Co–Cr при различных содержаниях тантала // Современные научные исследования: теория, методология, практика. Сборник научных трудов по материалам II Международной научно-практической конференции (г.к. Анапа, 17 января 2025 г.). Анапа: НИЦ ЭСП в ЮФО, 2025 С.63-67

6) **Vlasov I.I.**, Valuhova I.V. Analysis of the effect of tantalum content on the mechanical properties of high-entropy Ni-Co-Cr based alloy // Актуальные вопросы современной науки: сборник статей XIX Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». 2025. С.29-31

7) **Власов И.И.**, Севальнёв Г.С., Валюхова И.В., Дьяченко О.А. Исследования высокоэнтропийного сплава на базе системы Ni–Co–Cr при механическом и тепловом нагружении // Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов: материалы XVII Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (г. Москва, 28 февраля 2025 г.), [Электронный ресурс] / НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. – М.: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2025. С. 438-451

8) Климов В.С., Севальнёв Г.С., Богачев И.А., Сухов Д.И., **Власов И.И.** Структура и свойства высокоэнтропийного сплава на базе системы Ni–Co–Cr // XXI конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» КМУС-2024. 2024. С.30

9) **Власов И.И.**, Севальнёв Г.С., Дьяченко О.А., Нефедкин Д.Ю. Исследование структуры и свойств высокоэнтропийного сплава системы Ni–Co–Cr после различных видов обработок// XXI конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» КМУС-2025. 2025. С.11

10) **Власов И.И.** Исследование закономерностей формирования структуры и свойств высокоэнтропийного сплава на базе системы Ni–Co–Cr // XXI Российская

ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» С. 19-21

11) **Власов И.И.,** Севальнёв Г.С. Влияние структурного состояния энтропийных сплавов на основе Ni-Co-Cr на механические и триботехнические характеристики // 8-я Международная научная конференция "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении". С. 32-34.

Исп. И.И. Власов

Печ. И.И. Власов

Автореферат Власова И.И.

«Особенности формирования структуры и физико-механических свойств высокоэнтропийного многокомпонентного сплава на базе системы NiCoCr, полученного методами литья и аддитивных технологий»

Подписано в печать

Формат бумаги 60х90/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17