

На правах рукописи

АХМЕДЗЯНОВ МАКСИМ ВАДИМОВИЧ

РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НОВОГО
ЖАРОПРОЧНОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО СВАРИВАЕМОГО СО-NI СПЛАВА
ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Специальность 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и
сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва 2026

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

Научный руководитель: Овсепян Сергей Вячеславович
кандидат технических наук,
заместитель начальника лаборатории «Жаропрочные сплавы на никелевой основе» по науке
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Официальные оппоненты: Банных Игорь Олегович
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией конструкционных сталей и сплавов им. академика Н.Т. Гудцова (ИМЕТ РАН)

Смирнов Андрей Евгеньевич
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Материаловедение»,
заведующий лабораторией «Термическая и химико-термическая обработка» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» (ФГБОУ ВО «МАДИ»)

Защита диссертации состоится «03» сентября 2026 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 31.1.002.01 при НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ по адресу: 105005, Россия, г. Москва, ул. Радио, д. 17. Тел.: +7 (499) 261-86-77. Факс: +7 (499) 267-86-09. E-mail: admin@viam.ru.

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

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

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

М.А. Горбовец

© НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2026

© Ахмедзянов М.В., 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Создание перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) предполагает использование материалов с более высокими прочностными характеристиками и рабочей температурой для статорных деталей газоздушного тракта.

В настоящее время для жаровых труб, сопел, экранов и других тонкостенных высокотемпературных деталей и узлов ГТД используются серийные жаропрочные деформируемые свариваемые сплавы на никелевой и кобальтовой основах, гомогенные или упрочняемые интерметаллидными фазами. При этом их рабочая температура не превышает 1100 °С.

По сравнению с серийными материалами, сплавы, упрочняемые внутренним азотированием, имеют значительные преимущества. Так, у сплава ВЖ171 температура работы выше на 100–150 °С, длительная прочность в интервале температур от 900 до 1250 °С в 1,4–2,6 раза выше. Это обеспечивается образованием в процессе высокотемпературной химико-термической обработки (ХТО) мелкодисперсных частиц нитрида титана, распределенных по всему объему материала и стабильных вплоть до температуры его плавления. Однако закономерности формирования структуры и свойств сплавов данного класса, необходимые для промышленного освоения, не исследованы в полной мере; недостаточно изучены и возможности легирования для повышения механических свойств.

В связи с вышесказанным, исследования жаропрочных деформируемых свариваемых сплавов, упрочняемых внутренним азотированием, результаты которых позволят разработать и использовать материалы с повышенными прочностными характеристиками и рабочей температурой для тонкостенных деталей ГТД летательных аппаратов, являются весьма актуальными.

Цель работы – разработка состава и химико-термической обработки нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава с рабочей температурой до 1250 °С и повышенными характеристиками длительной и кратковременной прочности для тонкостенных деталей газотурбинных двигателей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Исследовано влияние параметров высокотемпературной химико-термической и термической обработок на формирование структуры и фазового состава;
- Исследована кинетика процесса внутреннего азотирования;
- Определено влияние легирующих элементов (углерода, титана, ниобия, гафния, тантала, циркония, молибдена, вольфрама, кобальта) на структуру, фазовый состав и свойства (длительную и кратковременную прочность, жаростойкость);
- Изучено влияние внутреннего азотирования на свойства сплавов;
- Разработан состав сплава, упрочняемого внутренним азотированием, с более высокими по сравнению со сплавом ВЖ171 прочностными характеристиками;
- Разработаны и опробованы технологические процессы производства сплава, упрочняемого внутренним азотированием; производства заготовок и деталей камеры сгорания и управляемого сопла ГТД в условиях промышленных предприятий АО «ОДК-Климов» и филиала АО ОДК «ОДК-Салют».

Научная новизна. Установлены ранее не описанные кинетические зависимости образования нитридов титана и хрома в жаропрочном деформируемом свариваемом Ni-Co сплаве ВЖ171 при высокотемпературной химико-термической обработке в среде азота. Глубина зоны выделения и размер частиц нитридов пропорциональны времени

азотирования в степени 1/2 и 1/3 соответственно, что объясняется диффузионным ростом частиц за счет градиента концентрации азота и последующей коалесценцией по теории Лифшица-Слезова.

Впервые для повышения длительной прочности и жаростойкости упрочняемых внутренним азотированием сплавов на основе Ni и Co использовано легирование углеродом (0,1–0,2 масс. %), приводящее к формированию дополнительной упрочняющей фазы – карбонитридов.

Впервые для сплавов на Co-Ni основе, упрочняемых внутренним азотированием, установлено синергическое влияние добавок переходных металлов 4 и 5 групп периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева – Ti, Hf, Ta – на значительное повышение длительной и кратковременной прочности.

На основе выявленных закономерностей влияния легирования на прочностные характеристики разработан состав нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава, упрочняемого внутренним азотированием, с рабочей температурой до 1250 °С, обеспечивающего более высокие по сравнению с материалами аналогичного применения характеристики: $\sigma_b^{20} = 1003$ МПа, долговечность при температуре 1000 °С – 120 часов при напряжении $\sigma = 80$ МПа и 550 часов при $\sigma = 64$ МПа.

Практическая значимость работы. Для жаропрочного деформируемого свариваемого Ni-Co сплава ВЖ171 установлена зависимость, позволяющая прогнозировать толщину нитридного слоя и планировать оптимальные режимы обработки для получения требуемой структуры и свойств деталей и узлов с коротким и длительным ресурсом работы.

На основе полученных результатов разработан состав (патент RU 2601720) и технология производства нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава, упрочняемого внутренним азотированием, обеспечивающего рабочую температуру до 1250 °С и повышенные характеристики: $\sigma_b^{20} = 1003$ МПа, долговечность при температуре 1000 °С – 120 часов при напряжении $\sigma = 80$ МПа и 550 часов при $\sigma = 64$ МПа, что выше, чем у наиболее жаропрочного сплава аналогичного назначения – ВЖ171 – по кратковременной прочности на 19 % и долговечности при 1000 °С в 4 раза, и чем у серийных сплавов ВЖ145, ВЖ159 по длительной прочности на 200–300 %. Применение нового сплава для тонкостенных статорных деталей и узлов перспективных газотурбинных двигателей позволит повысить весовую отдачу и ресурс ГТД, снизить эмиссию.

По результатам исследований разработаны и опробованы технологии производства листового проката, химико-термической и термической обработок сварных узлов ГТД из сплава ВЖ171 (оформлены ТИ 1.595-3-730-2014 «Химико-термическая обработка (азотирование) сплава ВЖ171», изменение № 2 к ТР 1.595-3-833-2009 «Изготовление полуфабрикатов из свариваемого сплава типа ВЖ171-ВИ»), выпущена документация на поставку ТУ 1-595-3-781-2013 «Прокат листовой холоднокатаный из жаропрочного сплава марки ХН29К28ВМТ (ВЖ171)».

Личный вклад автора состоит в выполнении всех этапов диссертационного исследования, включающих анализ научно-технической литературы по теме работы, проведение исследований и оценку влияния параметров высокотемпературной химико-термической и термической обработок на формирование структуры и фазового состава сплавов на основе Co и Ni, обработку и анализ полученных экспериментальных данных, разработку состава нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава, разработку научно-технической документации, написание статей и выступление на научных конференциях с докладами.

Апробация работы: Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: XVIII международный симпозиум имени А.Г. Горшкова «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», 13–17 февраля 2012 г., г. Ярополец; Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии», 4–6 апреля 2012 г., Москва; Международная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России», 25–27 июня 2012 г., Москва; Всероссийская научно-техническая конференция «Современные технологии химико-термической обработки конструкционных материалов», 30 января 2013 г., Москва; Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении», 26–28 мая 2015 г., Москва; Конференция «Современные жаропрочные деформируемые никелевые и интерметаллидные сплавы, методы их обработки», 13 ноября 2015 г., Москва; Всероссийская научно-техническая конференция «АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА», 24–27 ноября 2015 г., Москва; Девятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», 05–08 октября 2016 г., Москва; Научно-техническая конференция «Климовские чтения – 2016: перспективные направления развития авиадвигателестроения», 20 октября 2016 г., Москва; VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», 07–10 ноября 2017 г., Москва; XXV международный симпозиум имени А.Г. Горшкова «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», 18–22 марта 2019 г., г. Ярополец; Всероссийская научно-техническая конференция «Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства», 24 сентября 2021 г., Москва.

Публикации: По результатам диссертации опубликовано 20 научных работ, из которых 7 статей включены в перечень ВАК при Минобрнауки России и отражают основное содержание работы, 12 работ в сборниках трудов научных конференций, 1 патент Российской Федерации.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 121 источник. Диссертация изложена на 148 страницах и содержит 24 таблицы, 63 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту. Представлена научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по современным жаропрочным деформируемым свариваемым никелевым и кобальтовым сплавам для статорных, тонкостенных деталей и узлов ГТД, работающих в газовом потоке при температурах выше 850 °С. Приведены их химические и фазовые составы, механические свойства. Сплавы рассматриваемого класса развиваются в направлении: повышения рабочей температуры, кратковременной и длительной прочности, фазовой и структурной стабильности, жаростойкости, сохраняя приемлемую технологичность при производстве полуфабрикатов и сварке. Показано, что сплавы, упрочняемые внутренним азотированием, существенно превосходят традиционные материалы по жаропрочности и рабочей температуре. Установлено, что тот же уровень длительной

прочности они обеспечивают при температурах на 100–150 °С выше (вплоть до 1250 °С). Всего известно 3 марки: ВЖ155, ВЖ171 (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ) и NS-163 (Haynes International, Inc.). Наиболее высокими характеристиками обладает сплав ВЖ171. Однако в литературе нет сведений о промышленном применении таких материалов.

Рассмотрена высокотемпературная ХТО в среде азота, в процессе которой происходит внутреннее азотирование обрабатываемого сплава – формируются дисперсные частицы нитридов. В отличие от широко применяемого азотирования поверхности деталей, данный процесс обеспечивает упрочнение и высокую термическую стабильность структуры по всему объему материала. Проанализирована термодинамика и кинетика процесса. Для описания азотирования приведена схема, предложенная L.E. Kindlimann и объясняющая движение зоны выделения нитридных частиц от поверхности вглубь образца. Последовательность образования нитридов, их термическая стабильность зависит от величины свободной энергии соединения азота с легирующим элементом сплава – энергии Гиббса (ΔG). Если в сплаве на основе Fe или Ni содержатся Ti и Cr, первыми образуются нитриды с наименьшей свободной энергией – TiN, затем, после связывания всего Ti выделяются частицы на основе Cr – CrN и/или Cr₂N. Сопоставление диаграмм Эллингема показывает, что одни и те же элементы, например Ti, Ta, Zr, Hf, Nb, имеют сильное сродство как к азоту, так и к углероду.

Отмечено недостаточное количество систематических исследований по комплексному влиянию на свойства азотируемых сплавов переходных металлов 4 и 5 групп периодической системы Д.И. Менделеева (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta) с высоким сродством к азоту и углероду, а также отсутствие данных о влиянии углерода на свойства азотируемых никелевых сплавов и его использования в качестве легирующей добавки.

Проведенный анализ литературы подтвердил актуальность и перспективность темы диссертации и явился основанием для определения ее задач.

Во второй главе приведены сведения об объекте исследования, используемом оборудовании и методиках экспериментальных исследований.

В качестве объекта исследования использованы экспериментальные композиции на основе Co и Ni, легированные Cr, Mo, W и C, а также сильными нитридообразующими элементами: Ti, Nb, Hf, Zr, Ta. За основу был выбран состав азотируемого никелевого высокожаропрочного деформируемого свариваемого сплава ВЖ171.

Выплавку сплавов осуществляли в вакуумно-индукционной печи с разливкой в металлические изложницы. Слитки подвергали горячей деформации на сутунку. Далее проводили горячую и холодную прокатку до толщины листа 0,8–3,0 мм. Параметры деформации определяли с использованием расчетов напряженно-деформированного состояния и температурных полей.

Высокотемпературное внутреннее азотирование проводили в атмосфере газообразного азота высокой чистоты с контролируемой подачей газа. Последующую термическую обработку (отжиг) выполняли в вакуумных печах.

Микроструктуру исследовали методами оптической и электронной растровой (РЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) микроскопии. Локальный химический состав определяли количественным электронно-зондовым микроанализом (ЭЗМА). Размер, форму, доли фазы определяли с помощью специализированной программы обработки изображения. Для статистической достоверности проводили измерения на более чем трех образцах. Для каждой точки считали от 150 до 300 частиц. Фазовые превращения исследовали методом дифференциального термического анализа.

Испытания на кратковременную и длительную прочность проводили на плоских образцах толщиной 1,2-1,5 мм с шириной рабочей части 10 мм. Дополнительно определяли микротвердость, жаростойкость (до 1200 °С), технологические свойства листов (выдавка, гибка, критическая скорость деформации при сварке) и прочность сварных соединений.

В третьей главе описаны исследования закономерностей формирования структуры, фазового состава и упрочнения при внутреннем азотировании и последующей термической обработке, проведенных на образцах наиболее жаропрочного деформируемого свариваемого Ni-Co сплава марки ВЖ171.

В исходном состоянии после прокатки и рекристаллизационного отжига структура сплава состоит из зерен матрицы размером 10–25 мкм с отдельными частицами карбидов типа M_6C по их границам. Содержание азота в сплаве составляет 0,0014 масс. %. В процессе азотирования в объеме материала формируются нитридные частицы размером до 4 мкм. По мере удаления от поверхности листа различаются три зоны с разной формой, размером и типом нитридной фазы – рисунок 1. Количество частиц варьируется от ~10,5 % с края образца до ~5,5 % в центре.

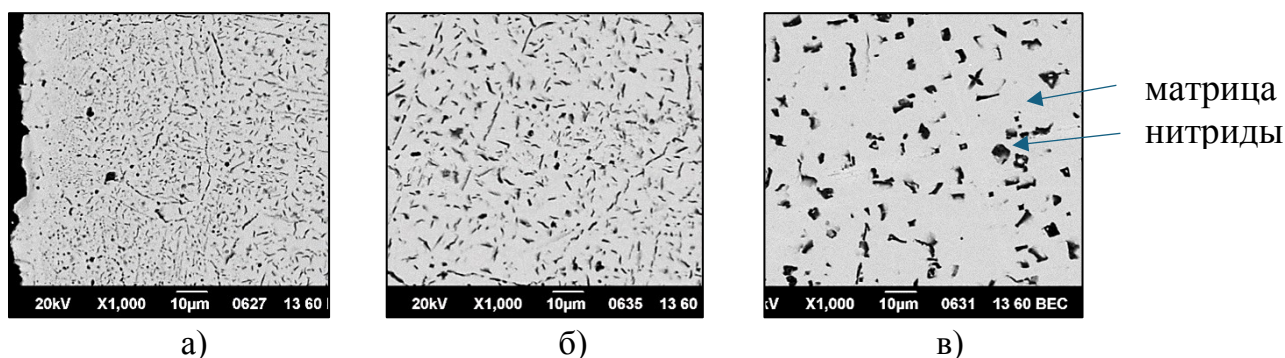


Рисунок 1 – Микроструктура сплава ВЖ171 после азотирования, РЭМ:
а) зона вблизи поверхности образца, б) переходная зона, в) центральная зона

В нитридных частицах в сплаве ВЖ171, помимо Ti и Cr, обнаружены и другие компоненты: Ni, Co, W и Mo. Состав нитридов закономерно изменяется от поверхности к центру образца, отражая кинетику процесса внутреннего азотирования. Вблизи поверхности преобладают нитриды TiN с повышенным содержанием хрома или на его основе – Cr_2N , редко $(W, Mo)_2N$, в центре – в основном нитриды на основе титана TiN. Встречаются частицы разной формы: вытянутые, кубические, округлые, конгломераты, дендриты.

Установлено влияние времени ХТО на толщину азотированного слоя, размер частиц нитридов, концентрации азота в сплаве ВЖ171 (рисунок 2).

Видно, что толщина азотированного слоя пропорциональна времени ХТО в степени $\frac{1}{2}$. Размер частиц, как в центральной, так и в поверхностной зоне – времени в степени $\frac{1}{3}$. По полученным закономерностям можно говорить о кинетической модели процесса азотирования, в которой происходит гетерогенное зарождение нитридов с увеличением числа частиц и диффузионным ростом за счет градиента концентрации азота. Далее идет процесс диффузионной коалесценции согласно теории Лифшица-Слезова. Концентрация азота на начальных стадиях процесса растет по степенному закону от времени обработки до выделения нитридов по всему объему металла. Примерно через 8 часов после встречи фронтов образования нитридов с

противоположных сторон образца скорость роста концентрации азота значительно, в ~ 27 раз, замедляется.

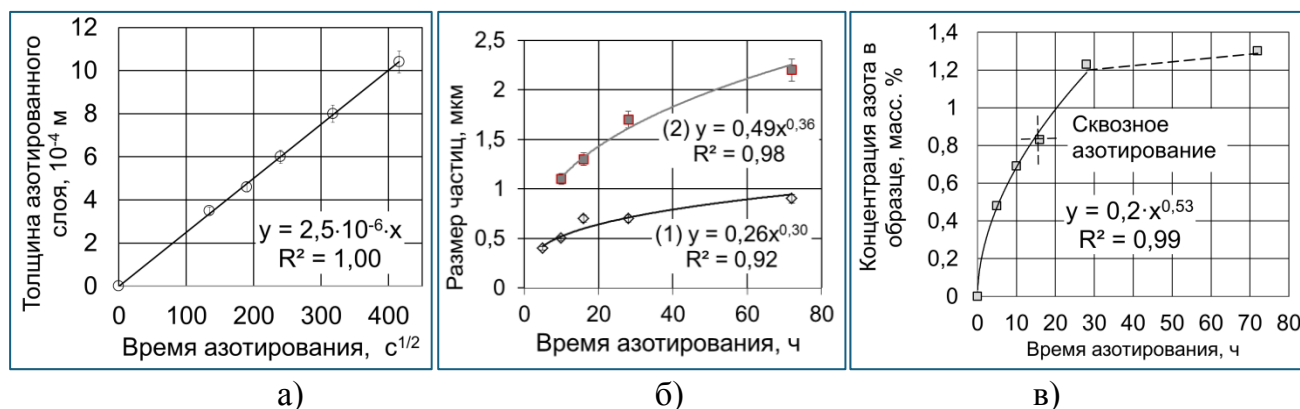


Рисунок 2 – Влияние времени ХТО сплава ВЖ171 на: а) толщину азотированного слоя; б) размер частиц нитридов (1 – в зоне у поверхности, 2 – в центральной зоне); в) концентрацию азота; (толщина образцов: а) – 3 мм, б) и в) – 1,2 мм)

Для сплава ВЖ171 толщина нитридного слоя от времени азотирования может быть определена по формуле:

$$H = k_N \cdot \tau^{1/2} = 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot (\tau)^{1/2},$$

где k_N – константа скорости параболического роста ($м/с^{1/2}$),
 τ – время азотирования (с).

Для её верификации проведено шесть процессов ХТО образцов разной толщины. Соотношение экспериментальных и рассчитанных значений с $R^2=0,99$ подтверждает возможность использования формулы для планирования оптимальных режимов обработки деталей разной геометрии из сплава ВЖ171.

Внутреннее азотирование повышает температуру солидуса сплава ВЖ171 более чем на 100 °С (с 1261 до 1377 °С), что обеспечивает расширение температурного интервала работы материала. Полученные данные показывают значительное повышение длительной прочности после ХТО, твердость металла возрастает более чем в 2 раза. Однако при длительной обработке снижается пластичность – таблица 1.

Таблица 1 – Механические свойства образцов толщиной 1,2 мм из сплава ВЖ171 (средние значения)

Время азотирования	σ_B^{20}	δ^{20}	σ_B^{1000}	δ^{1000}	τ^{1000} при $\sigma=64$ МПа	$\delta_{длит.}^{1000}$
ч	МПа	%	МПа	%	ч	%
0	835	90,0	-	-	1,5	115
5	624	9,7	171	38	29	33,5
10	711	10,0	189	31	81	25,0
16*	812	11,4	206	28	142	20,0
28*	842	9,1	231	32	121	22,5
40*	845	8,4	225	13	59	21,0
72*	770	4,8	229	20	80	20,0

* сквозное азотирование

Установлено, что оптимальная продолжительность ХТО, обеспечивающая высокую длительную и кратковременную прочность, и приемлемую технологичность образцов толщиной 1,2 мм из сплава ВЖ171 составляет 16–20 часов.

Наличие нитридной фазы повышает сопротивление окислению, снижая привес массы более чем в два раза. При 1000 °С формируется плотный оксидный слой. При температуре 1100 °С скорость окисления уменьшается от значений 0,67 до 0,36 г/м²·ч, а затем выходит на квазистационарный уровень вплоть до 500 часов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что процесс окисления сплава ВЖ171 происходит стабильно и прогнозируемо. Значения жаростойкости при 1100 °С – 0,49 и 0,36 г/м²·ч после 100 ч и 500 ч, что соответствует среднему значению для жаропрочных деформируемых свариваемых никелевых сплавов аналогичного применения (рисунок 3 а). Однако толщины коррозионного слоя азотируемых сплавов, как ВЖ171, так и NS-163, выше, чем у сплавов, упрочняемых за счет твердого раствора (рисунок 3 б).

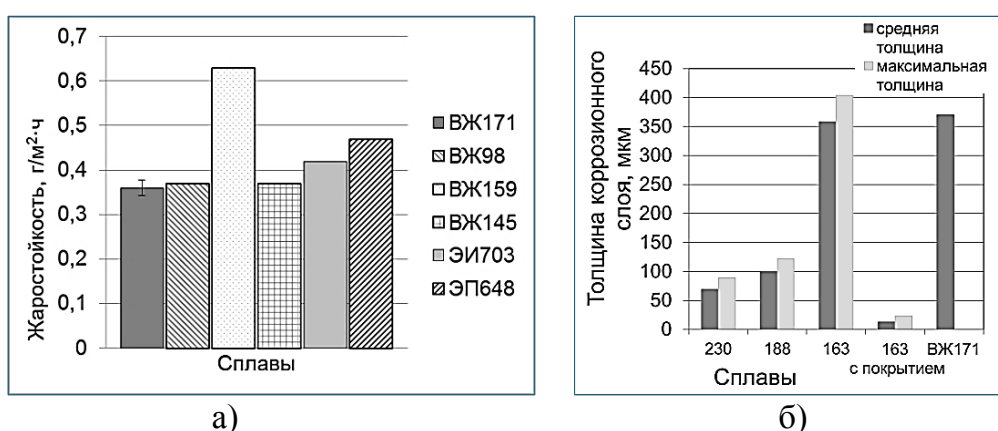


Рисунок 3 – Характеристики сопротивления окислению жаропрочных никелевых сплавов для горячих узлов ГТД: а) жаростойкость при температуре 1100 °С; б) толщина коррозионного слоя (выдержка 1000 ч) при 1093 °С сплавов Haynes 230, Haynes 188, NS-163 и при 1100 °С сплава ВЖ171

Полученные данные показывают необходимость применения защитных покрытий для внутренне азотируемых сплавов, работающих длительное время при высоких температурах, в то время как для коротких ресурсов использование сплава ВЖ171 возможно без покрытия.

Для повышения пластичности и структурной однородности после азотирования предложено применение вакуумного отжига. Он способствует растворению нестабильных нитридов хрома и снижению доли хрома в нитридах, выравниванию фазового состава по сечению и повышению пластичности сплава при 20 °С в 1,2–2 раза, а также времени до разрушения на 30 % при 1000 °С и 64 МПа. Методом ПЭМ впервые для сплавов данного класса выявили формирование ультрадисперсных выделений размером 10–20 нм при вакуумном отжиге рядом с крупными нитридами. Их образование, наряду с возникновением микродвойников, способствует релаксации локальных напряжений и более равномерному движению дислокаций при деформации.

На основе проведенных исследований разработаны оптимальные режимы химико-термической и вакуумной термической обработок сплава ВЖ171 и выпущена технологическая инструкция 1.595-3-730-2014 «Химико-термическая обработка (азотирование) сплава ВЖ171».

В четвертой главе представлены результаты разработки состава нового жаропрочного деформируемого свариваемого сплава, упрочняемого внутренним

азотированием, с более высоким комплексом свойств и его химико-термической обработки. Решалась задача многокритериальной оптимизации состава с учетом кратковременной и длительной прочности, жаростойкости, технологичности (свариваемости и деформируемости), фазовой стабильности и особенностей формирования структуры на стадиях получения листового проката, термической и химико-термической обработок. За основу экспериментальных составов была выбрана система легирования сплава с наиболее высокой жаропрочностью – ВЖ171 (Ni-Co-Cr-W-Mo). Для формирования упрочняющей фазы исследовали добавки сильных нитридо- и карбидообразующих переходных металлов 4 и 5 групп периодической системы (Ti, Ta, Hf, Zr, Nb) и углерода. Для предварительной оценки составов выполнены расчеты CALPHAD и New-PhacomP. Установлено, что CALPHAD не описывает в полной мере реальный процесс фазообразования при внутреннем азотировании. Окончательный отбор составов осуществляли на основании экспериментальных исследований.

Анализ ранее проведенных экспериментов и составов известных марок сплавов (ВЖ155, ВЖ171, NS-163) показал, что для упрочнения внутренним азотированием наиболее эффективно легирование нитридообразующими элементами (Ti либо Ti+Nb) в количестве не выше 2,3 масс. %. Использование же компонентов основы сплава, например хрома, для образования дополнительного количества нитридов не может быть успешным из-за их низкой термической устойчивости. В данной работе и впервые для повышения характеристик прочности азотируемых сплавов были использованы карбиды. Сильное сродство Ti, Ta, Hf, Zr, Nb как к азоту, так и к углероду, позволяет при добавке углерода получать стабильные при высокой температуре карбонитриды, увеличивающие объем упрочняющих частиц, а значит и повышающие механические свойства. Содержание и соотношение легирующих элементов при этом должно быть выбрано с учетом сохранения технологичности при деформации и образования нитридов при ХТО.

Для проверки данной гипотезы был выплавлен сплав ВЖ171 с более высоким содержанием углерода (0,2 масс. % вместо 0,02 %) и титана (3 масс. % вместо 2 %). Хорошая технологичность такого сплава была подтверждена в процессе изготовления листового проката. При проведении ХТО обнаружено замедление формирования нитридов: фронт азотирования не доходил до центра образца после стандартной для сплава ВЖ171 обработки – рисунок 4 а. Частицы размером до 4 мкм в азотированной части шлифа представляют собой нитриды и карбонитриды, равномерно распределенные по границам и внутри зерен (рисунок 4 б).

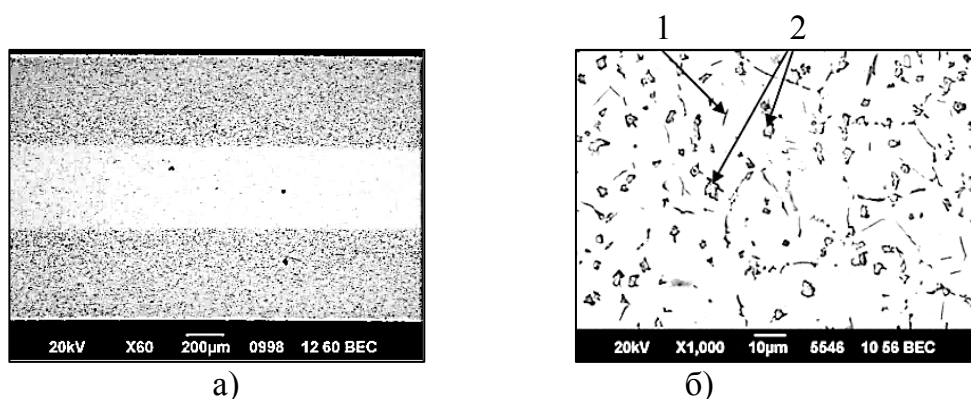


Рисунок 4 – Микроструктура сплава ВЖ171 с 0,2 % С после ХТО: а) общий вид; б) проазотированная зона (1 – нитриды, 2 – карбонитриды)

Установлено, что если рост азотированного слоя при ХТО сплава ВЖ171 происходит по зависимости $\delta = k_N \cdot \tau^n$ с $n = 0,5$, то для состава с добавкой 0,2 масс. % С $n = 0,45$ – рисунок 5. Введение дополнительно углерода и наличие второй фазы (карбидов) изменяет вид модели. Происходит замедление процесса диффузии азота вглубь сплава.

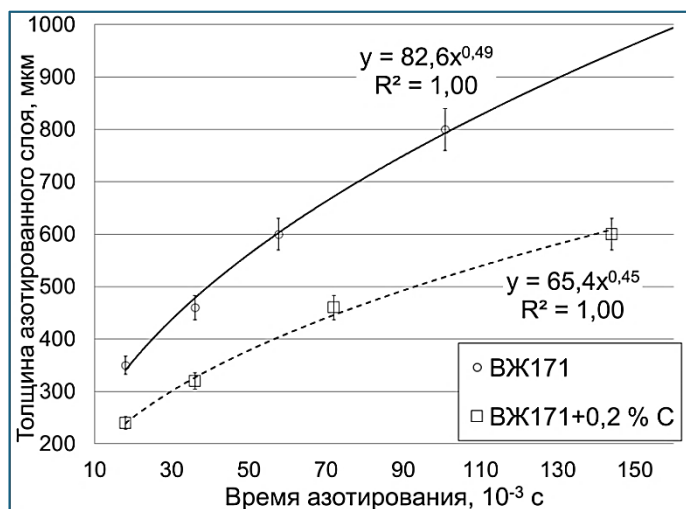


Рисунок 5 – Зависимость толщины азотированного слоя от времени ХТО

Установленные закономерности кинетики внутреннего азотирования позволили подобрать режим, обеспечивающий получение азотированного слоя по всей толщине листового образца, что, как было показано в главе 3, оказывает значительное влияние на свойства.

Сравнительные испытания жаростойкости при температурах 1000 °С и 1200 °С с выдержкой 100 часов и длительной прочности при 1000 °С и напряжении 64 МПа показали, что состав с повышенным углеродом после ХТО по оптимальному режиму по сравнению со сплавом ВЖ171 показывает меньший привес на 25-30 % и большее, в 1,5 раза, время до разрушения.

С учетом анализа литературных данных, термодинамических расчетов и установленных закономерностей влияния углерода была сформирована база эксперимента для построения модели нового сплава из 24 композиций, содержащих элементы, упрочняющие твердый раствор, более высокий, чем в сплаве ВЖ171 углерод, а также по одному и совместно добавленные нитридо- и карбидообразующие металлы 4 и 5 группы периодической системы (Ti+Nb, Ti+Nb+Hf, Ti+Ta, Ti+Hf, Ti+Ta+Hf, Ti+Zr), и сплавов ВЖ155 и ВЖ171.

Концентрации Ti, Hf, Nb, Zr, Ta должны быть такие, чтобы после ХТО они находились в составе только упрочняющих частиц и не оставались в γ матрице. Предполагая, что содержание (в атомных процентах) металлов в частицах больше или равно азоту с углеродом, сумма Ti, Hf, Nb, Zr, Ta в сплаве выбиралась меньше или равной сумме углерода и азота. С другой стороны, в составах с 0,2 масс. % С (~1 ат. %) недостаток этих элементов ведет к появлению карбидов и карбонитридов на основе хрома.

С учетом названных ограничений композиции были выбраны, и параметр Md_γ показал, что все они фазово стабильны.

Содержание легирующих элементов в составах базы эксперимента следующее:

Ni от 18,0 до 48,0 масс. %;

Co от 14,0 до 40,7 масс. %;

Cr от 20,0 до 27,0 масс. %;
 W от 0 до 11,0 масс. %;
 Mo от 0 до 12,0 масс. %;
 Ta от 0 до 4,0 масс. %;
 Ti от 0 до 4,0 масс. %;
 Hf от 0 до 2,0 масс. %;
 Nb от 0 до 2,0 масс. %;
 Zr от 0 до 2,0 масс. %;
 C от 0,02 до 0,22 масс. %.

Исследования листовых образцов выбранных составов позволили установить закономерности формирования упрочняющих фаз, влияние легирующих элементов на микроструктуру, кинетику азотирования и свойства материала.

Рассмотрены особенности микроструктуры сплавов с Ti, Hf, Nb, Zr и Ta после ХТО.

В составе с гафнием, после ХТО по режиму для сплава ВЖ171, карбиды превращаются в округлые карбонитриды средним размером 0,8 мкм, равномерно распределенные по сечению листа (рисунок 6 а), при этом весь гафний входит в состав частиц и отсутствует в матрице. Объемная доля фазы в центральной зоне образца составляет 2,2 %. В структуре также видны крупные, до ~10 мкм, угловатой формы частицы на основе хрома, содержащие азот и углерод.

серая фаза – карбонитриды хрома

белая фаза – карбонитриды гафния

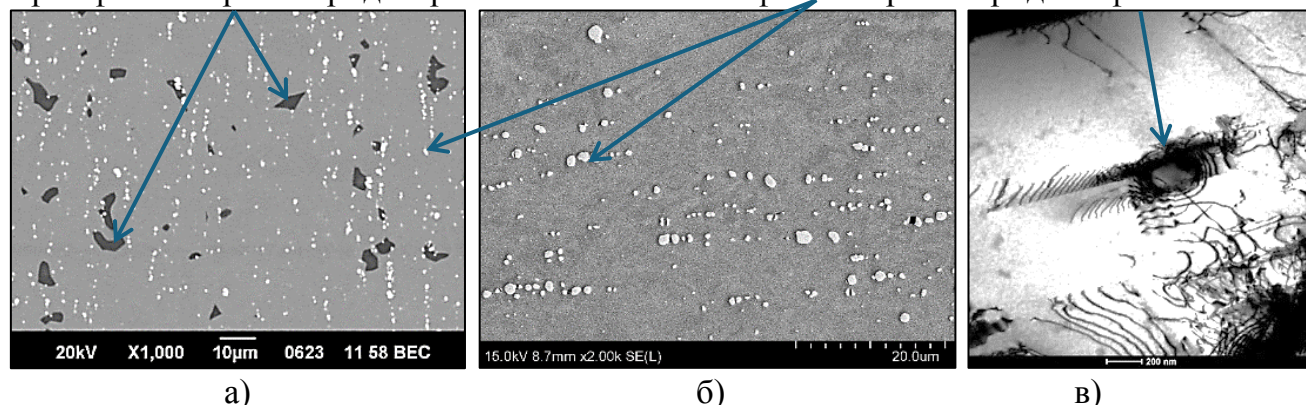


Рисунок 6 – Микроструктура состава, содержащего гафний, РЭМ: а) после ХТО, применяемой для сплава ВЖ171; б) после ХТО при температуре на 20 °С выше стандартной для ВЖ171; в) образец после испытаний, ПЭМ, светлопольное изображение

При повышении температуры ХТО на 20 °С крупные частицы на основе хрома растворяются (рисунок 6 б) и его количество в матрице возрастает (25,1 против 23,6 масс. %). Карбонитриды в сплаве содержат до 60 масс. % Hf. Их средний размер равен 0,56 мкм, объемная доля увеличивается до 2,8 %. После испытания на кратковременную прочность дислокационная структура, как и для сплава ВЖ171, имеет вид равномерных сеток различных конфигураций (рисунок 6 в). Расстояние между дислокациями, составляющими фронт, уменьшается при приближении к карбонитридам, что говорит об их торможении частицами.

Во всех составах, содержащих Zr, выделяются частицы игольчатой формы на его основе, длиной до 25 мкм, равномерно распределенные по сечению (рисунок 7 а).

При совместном легировании титаном и ниобием соотношение между ними определяет состав нитридов. При $Nb > Ti$ образуются частицы игольчатой формы на основе Nb и Ti, содержащие Cr (рисунок 7 б); при $Nb < Ti$ образуются в основном нитриды титана, легированные Nb, компактной формы (рисунок 7 в).

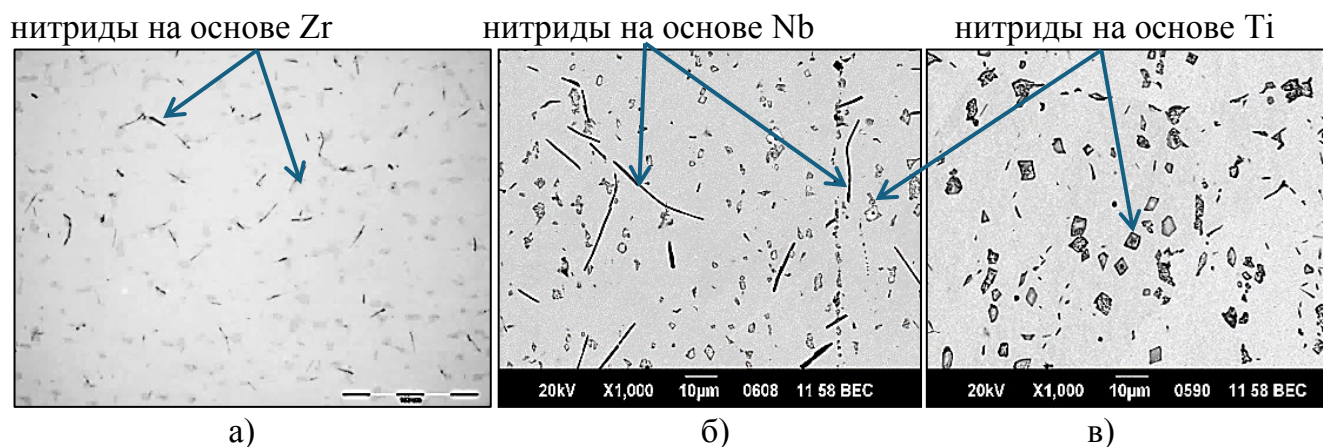


Рисунок 7 – Микроструктура образцов после ХТО:
а) составы с Zr; б) $Nb > Ti$; в) $Nb < Ti$

В составе с Ti и Ta с 0,02 % C микроструктура после ХТО визуально такая же, как и в сплаве ВЖ171. Ta входит в состав нитридов на основе титана в количестве ~4 масс. %. При 0,2 % C по всему сечению металла равномерно расположены карбонитриды, в состав которых входит весь тантал (в матрице и нитридах Ta не обнаружен).

Микроструктура экспериментальных составов, содержащих Ti, Ta и Hf в сумме 6–7 масс. % в разных соотношениях, представлена на рисунке 8.

При $Ta > Hf > Ti$ обнаружены строчки карбонитридных фаз на основе гафния и тантала (рисунок 8 а). Весь титан входит в их состав и отдельных нитридов не образует. При $Ta = Hf = Ti$ также обнаружены только карбонитриды (рисунок 8 б), однако нитридообразующие элементы распределены в них примерно в равных количествах. При большем содержании Ti по сравнению с Ta и Hf структура существенно меняется: выявлены карбонитриды на основе гафния и нитриды на основе титана (рисунок 8 в). В состав упрочняющих фаз входят все три элемента.

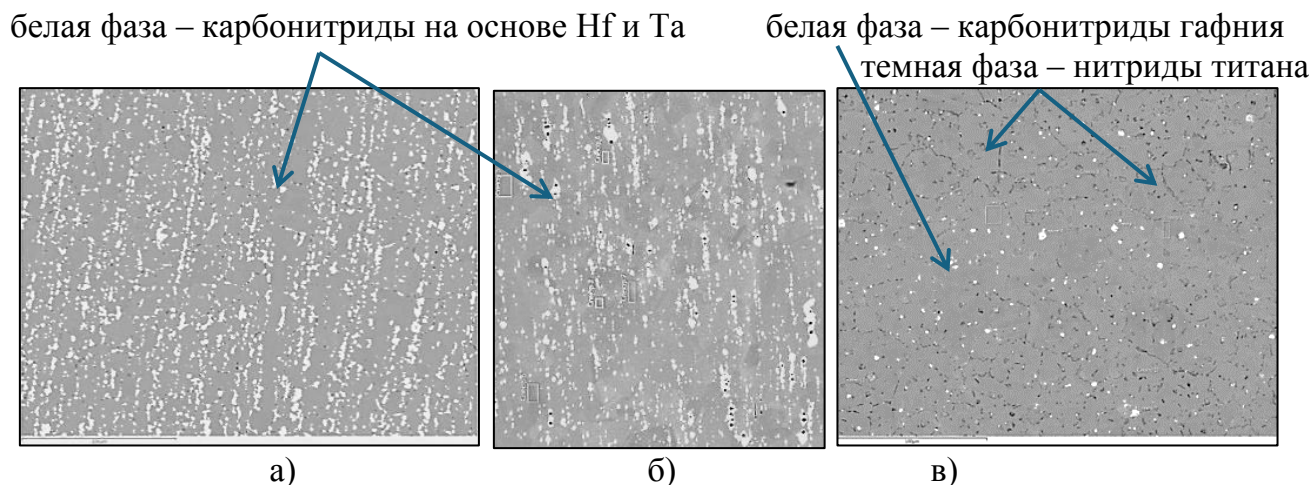


Рисунок 8 – Микроструктура составов после азотирования, x1000:
а) $Ta > Hf > Ti$; б) $Ta = Hf = Ti$; в) $Ti > Hf, Ta$ (все масс. %)

Повышение температуры ХТО на 20 °С в исследованных составах с более высоким углеродом благоприятно сказывается на структуре, крупных и нестабильных частиц фаз на основе хрома не образуется.

Влияние легирующих элементов на кинетику азотирования в сравнении со сплавом ВЖ171 при одинаковом режиме ХТО представлено на рисунке 9.

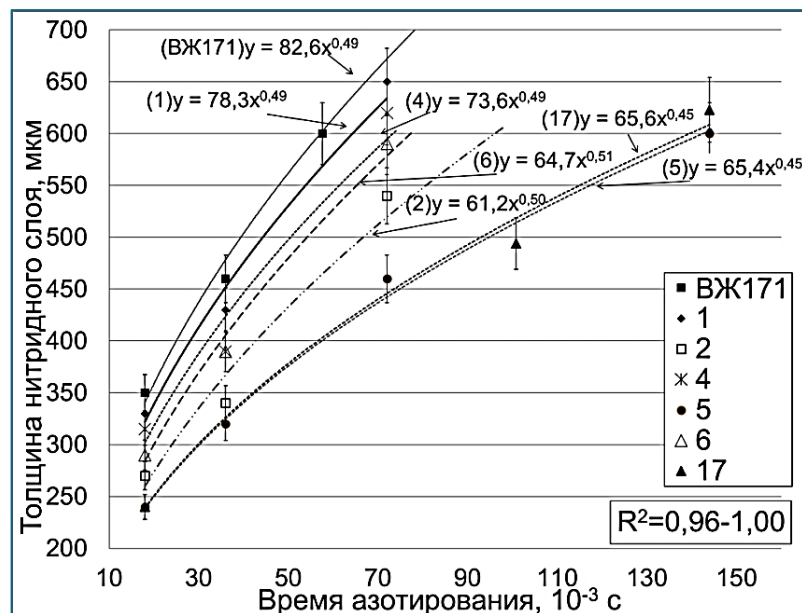


Рисунок 9 – Зависимость толщины нитридного слоя от времени азотирования (числами обозначены составы на основе сплава ВЖ171, содержащие, масс. %: 1 – 12 % Мо без W; 2 – 20 % Cr; 4 – 2 % (Ti+Zr); 5 – 3 % Ti + 0,2 % C; 6 – 37 % Co; 17 – 37 % Co + 4 % Ti + 0,2 % C)

Видно, что толщина азотированного слоя от времени выдержки для всех составов описывается степенной зависимостью $\delta = k_N \cdot \tau^n$, как и на рисунке 5. Независимо от легирования у сплавов с 0,02 % углерода $n = (0,49-0,51)$, а при 0,2 % C n близко к 0,45. Снижение содержания Cr на 6 % (состав 2) уменьшает подвижность легирующих компонентов сплава и азота; увеличение Мо за счет W или Co за счет Ni (составы 1 и 6), как и добавки Zr (состав 4), слабо влияют на скорость азотирования.

Жаростойкость экспериментальных композиций более высокая после ХТО в сравнении с исходным состоянием. Полученные данные при температурах 1000, 1100 и 1200 °С свидетельствуют, что для сплавов, упрочняемых внутренним азотированием, добавки Zr или Hf являются эффективным средством повышения жаростойкости за счет модификации свойств окалины и структуры поверхностных слоев.

Испытания на растяжение при 20 и 1000 °С и длительную прочность при 1000 и 1200 °С проводились на образцах всех составов после режима ХТО, обеспечивающего выделение нитридов по всей толщине; средние значения составили базу данных для регрессионного анализа.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что длительная прочность сплавов прямо пропорциональна объемной доле упрочняющих фаз (нитридов и карбонитридов) и их размеру. Наиболее мелкая фаза среди исследованных композиций образуется в составе с гафнием (0,59 мкм), самая крупная – в составе с повышенным содержанием титана (4,24 мкм), время до разрушения при 1000 °С составляет 6 и 396 ч соответственно (рисунок 10).

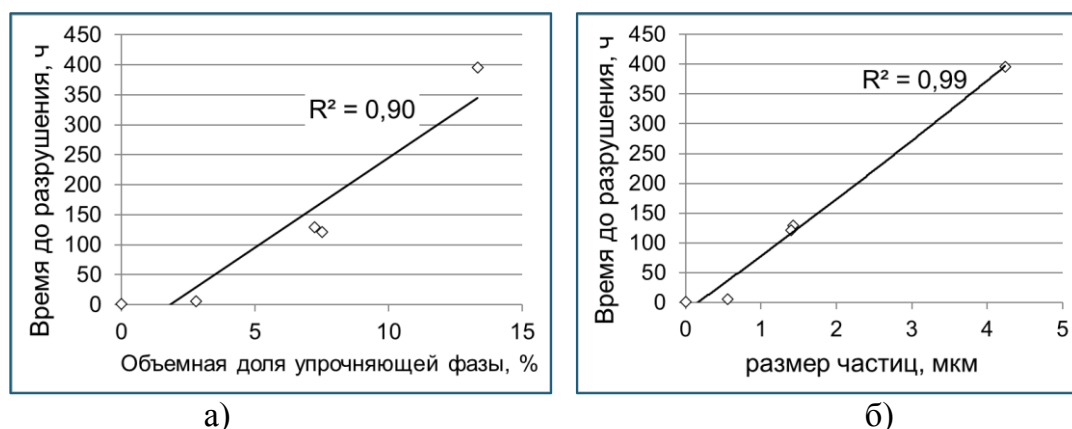


Рисунок 10 – Зависимость времени до разрушения при 1000 °С и напряжении 64 МПа от: а) объемной доли упрочняющих фаз, б) размера упрочняющих фаз

На характеристики прочности при 20 °С размер упрочняющих частиц, при учете среднего значения их величины, практически не влияет. Максимальное повышение прочности происходит при добавке гафния, благодаря образованию большего количества мелкодисперсных частиц, более эффективно тормозящих дислокации.

Влияние на свойства экспериментальных композиций элементов Та, Нf, Тi более наглядно можно представить в координатах “ $\sigma_{\text{в}}^{20} - \tau_p$ (1000 °С, 64 МПа)” – рисунок 11. При совместном легировании этими элементами по мере увеличения доли титана наблюдается снижение кратковременной и повышение длительной прочности; при оптимальных их концентрациях повышается одновременно и длительная, и кратковременная прочность.

Таким образом, раздельное легирование Тi, Та и Нf не обеспечивает такого сочетания механических свойств, как их совместное введение, что говорит о синергическом эффекте данных элементов, связанного с формированием более эффективного фазового состава: мелких карбонитридов на основе Нf и Та и крупных нитридов на основе Тi.

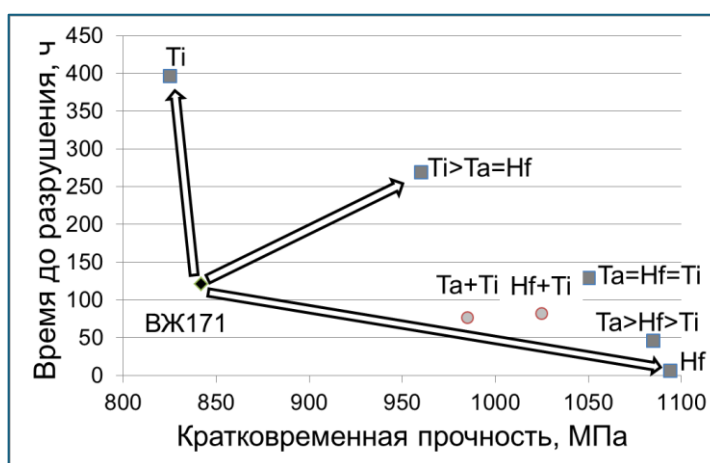


Рисунок 11 – Соотношение кратковременной прочности и времени до разрушения при $\sigma^{1000} = 64$ МПа экспериментальных составов, легированных Та, Нf и Тi (масс. %)

Проведение испытаний на выдавку и гибку, определение критической скорости сварки экспериментальных композиций показало, что увеличение прочности и жаропрочности не сильно влияет на технологичность по сравнению со сплавом ВЖ171, а если сравнивать комплекс характеристик, экспериментальные составы находятся на уровне серийных деформируемых гомогенных сплавов (в частности, ВЖ98).

Полученные данные могут быть использованы для оптимизации производственных режимов и снижения брака при изготовлении сложных изделий.

На основе массива полученных данных экспериментальных композиций были построены регрессионные модели, позволившие определить перспективные направления легирования при разработке нового жаропрочного сплава, упрочняемого внутренним азотированием и достичь более высокого уровня свойств.

Для описания долговечности использовали линейную регрессию для величины $\ln(\tau_p)$, где τ_p – время до разрушения. Прогнозируемые значения времени до разрушения получали обратным преобразованием: $\tau_p = \exp(y)$.

На первом этапе регрессионный анализ применяли к полным уравнениям для выявления статистически незначимых элементов. Статистическую значимость оценивали по t-критерию Стьюдента. Предельную ошибку коэффициента определяли как $\Delta b_i = t_{кр} \cdot s_{b_i}$, где s_{b_i} – стандартная ошибка коэффициента, $t_{кр}$ – критическое значение t-критерия Стьюдента при заданном числе степеней свободы и уровне значимости. Коэффициент считали статистически значимым при выполнении условия $|b_i| > \Delta b_i$.

Анализ статистических показателей выявил, что модели относительного предела текучести ($\sigma_{0,2}^{20}$), кратковременной (σ_b^{20} , σ_b^{1000}) и длительной прочности (τ_p^{1000} , τ_p^{1200}) с высокой точностью описывают экспериментальные данные в пределах исследованной области составов. Модель для пластичности (δ^{20}) описывает экспериментальные данные хуже, хотя в целом остается статистически значимой.

Анализ коэффициентов моделей относительного предела текучести и относительного удлинения показывает отсутствие статистически значимых индивидуальных коэффициентов при заданном уровне значимости. Это свидетельствует о том, что в рамках рассматриваемой выборки вклад отдельных элементов не удастся надежно отделить от экспериментального разброса данных. В текущем виде полученные зависимости могут рассматриваться как предварительные. Для уточнения моделей и оценки вклада отдельных элементов требуются дальнейшие исследования и расширения экспериментальной базы.

После выделения значимых элементов сокращенные модели оценивали повторно по исходным экспериментальным данным. Такой подход обеспечил статистически корректное построение сокращенных моделей (таблица 2).

Таблица 2 – Основные статистические параметры линейной регрессионной модели

Характеристика	Регрессионная модель характеристики (обозначение элемента соответствует его концентрации в сплаве в ат. %)	Статистические параметры модели				
		R ²	s	F	df	s ²
σ_B^{20}	329,56·Hf+163,46·Ta+75,37·Mo+192,74·W+6,90·Cr	0,99	71,6	1222	34	5128
σ_B^{1000}	115,62·Zr+70,63·Hf+5,40·Cr+1,60·Co	1,0	15,7	728	14	246
τ_p^{1000}	1,18·Ti+0,05·Co	0,99	0,50	1455	41	0,25
τ_p^{1200}	−1,23·C−0,84·Nb+0,95·Ti−0,50·Ta+0,07·Co	0,99	0,45	425	30	0,20
$\sigma_{0,2}^{20*}$	10,4·C−48,3·Zr+120,2·Hf+4,2·Nb+4,2·Ti−34,2·Ta−3,9·Mo−14,6·W+11,8·Cr+9,2·Co	0,99	92,1	96,5	14	8482
δ^{20*}	−1,26·C+4,95·Zr+24,52·Hf−0,50·Nb−2,46·Ti−1,54·Ta+0,86·Mo+2,93·W+0,67·Cr−0,40·Co	0,76	8,35	11,4	37	69,6

* приведена полная регрессионная модель

Полученные регрессионные зависимости позволили более полно обобщить экспериментальные данные, могут быть использованы для оценки влияния химического состава на механические свойства после внутреннего азотирования и для прогноза свойств при проектировании новых композиций.

Используя полученные зависимости, было определено влияние легирующих элементов на свойства нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава, упрочняемого внутренним азотированием. Эффект отдельных элементов различен: одни преимущественно повышают кратковременную или длительную прочность, другие – жаростойкость, а некоторые при определенных соотношениях могут как улучшать, так и ухудшать эти характеристики:

- титан является одним из наиболее значимых элементов сплава для повышения длительной прочности;

- добавка тантала представляется целесообразной в тех случаях, когда приоритетом является повышение прочности при нормальных и высоких температурах. По совокупности эффектов тантал можно считать перспективной добавкой;

- гафний оказывает одно из наиболее благоприятных воздействий на свойства составов: существенно повышает $\sigma_{\text{в}}^{20}$ и δ^{20} , а также жаростойкость. Для компенсации снижения долговечности его нужно добавлять в состав в небольших количествах и вместе с титаном. По совокупности результатов гафний следует считать одной из наиболее эффективных добавок;

- цирконий целесообразно использовать только как средство повышения жаростойкости. Цирконий негативно влияет на механические свойства из-за формирования неблагоприятной структуры; при совместном легировании Zr и Ti с преобладанием последнего положительного влияния не выявлено;

- влияние ниобия в целом следует оценивать как неоднозначное и в большинстве рассмотренных случаев неблагоприятное. Ниобий в количестве, равном или превышающем содержание Ti, приводит к снижению пластичности и длительной прочности из-за вытянутой морфологии упрочняющей фазы. Если ниобия в сплаве меньше титана, время до разрушения при 1000 °C увеличивается;

- углерод – наиболее эффективный элемент для повышения жаростойкости и жаропрочности, также позволил одновременно увеличить кратковременную и длительную прочность;

- замена никелевой основы на кобальтовую оправдана повышением долговечности составов, а снижение жаростойкости нивелируется добавками других элементов;

- повышенное содержание молибдена оказалось неблагоприятным для жаростойкости и жаропрочности. Кроме того, частичная замена вольфрама молибденом также не дала преимуществ. Использование молибдена в больших количествах нецелесообразно.

Наиболее перспективными добавками по совокупности свойств являются переходные металлы 4 и 5 групп (Ta, Hf, Ti). Установлено их синергическое влияние на повышение длительной и кратковременной прочности.

На основании комплекса проведенных исследований, включающих термодинамический анализ, изучение кинетики азотирования, структурные исследования, определение технологичности, испытания на жаростойкость и механические свойства, а также регрессионный анализ, была определена перспективная система легирования: Co-Ni-Cr-W-Ti-Ta-Hf-C. Для проверки моделей был выбран состав, содержащий (ат. %): 35,2 Co – 25,4 Ni – 27,4 Cr – 3,2 W – 3,7 Ti – 0,65 Ta –

0,12 Hf – 0,89 С. Была проведена его выплавка и получен листовой прокат. В таблице 3 показано сравнение прогнозируемых и экспериментальных свойств выбранного состава.

Выбранный состав обладает повышенным уровнем механических свойств, соответствующим прогнозу, полученному на основании регрессионных моделей.

Этот состав будет иметь более высокую жаростойкость и приемлемые технологичность и свариваемость по сравнению со сплавом – прототипом ВЖ171.

Таблица 3 – Механические свойства выбранной композиции (средние значения)

	Кратковременное растяжение			Длительная прочность	
	σ_B , МПа		$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	τ_p , ч
	20 °С	1000 °С	20 °С		$\sigma^{1000} = 64$ МПа $\sigma^{1200} = 18$ МПа
Прогноз	1022	241	690	5,6	490 102
Эксперимент	1003	227	605	5,0	550 103

Долговечность нового состава при 1000 °С в ~4 раза выше при напряжениях $\sigma = 80$ МПа и $\sigma = 64$ МПа, чем у сплава ВЖ171 (120 ч против 30 ч и 550 ч против 121 ч соответственно), кратковременная прочность при 20 °С – на 19 % (1003 МПа против 842 МПа), а по сравнению с серийными сплавами ВЖ145, ВЖ159 длительная прочность выше на 200–300 % – таблица 4.

Таблица 4 – Механические свойства нового сплава и сплавов-аналогов по применению ВЖ145, ВЖ159 и ВЖ171 (средние значения)

Сплав	σ_B^{20} , МПа	τ , ч при $\sigma^{1000} = 64$ МПа	τ , ч при $\sigma^{1000} = 80$ МПа	σ_{100}^{1000} , МПа
Состав по модели	1003	550	120	85*
ВЖ145	880	-		40
ВЖ159	1000			26
ВЖ171	842	121	30	70
* расчетное значение				

Достигнутые характеристики подтвердили правильность выбранного плана эксперимента, установленных принципов легирования и полученных уравнений регрессии.

Таким образом, на основании проведенных исследований разработан химический состав жаропрочного деформируемого свариваемого сплава, упрочняемого внутренним азотированием, для тонкостенных высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей. Сплав на основе кобальта содержит элементы: Ni, Cr, W, Mo, Ti, С, Та или Nb, Hf или Zr, Mg, La, В, Si, обеспечивает рабочую температуру до 1250 °С, высокий уровень технологичности и свариваемости, а после внутреннего азотирования – кратковременной и длительной прочности. На состав сплава получен патент РФ RU 2601720.

Пятая глава посвящена освоению в промышленности сплавов, упрочняемых высокотемпературным азотированием. Результатом исследований стала разработанная ресурсосберегающая технология получения холоднокатаного листа из высокожаропрочного деформируемого свариваемого сплава ВЖ171 (изменение № 2 к ТР 1.595-3-833-2009). Данная технология может применяться на металлургических предприятиях без модернизации существующего оборудования и внедрена в опытно-промышленное производство НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. Технология получения холоднокатаного листа опробована и для новых композиций жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава с более высокими характеристиками длительной и кратковременной прочности и жаростойкости.

В результате применения разработанной технологии на промышленном оборудовании НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ из сплава ВЖ171 был изготовлен листовой прокат, а в условиях филиала АО ОДК «ОДК-Салют» и АО «ОДК-Климов» получены детали управляемого сопла и прототип жаровой трубы авиационных ГТД – рисунок 12. Детали и узлы успешно прошли стендовые испытания.

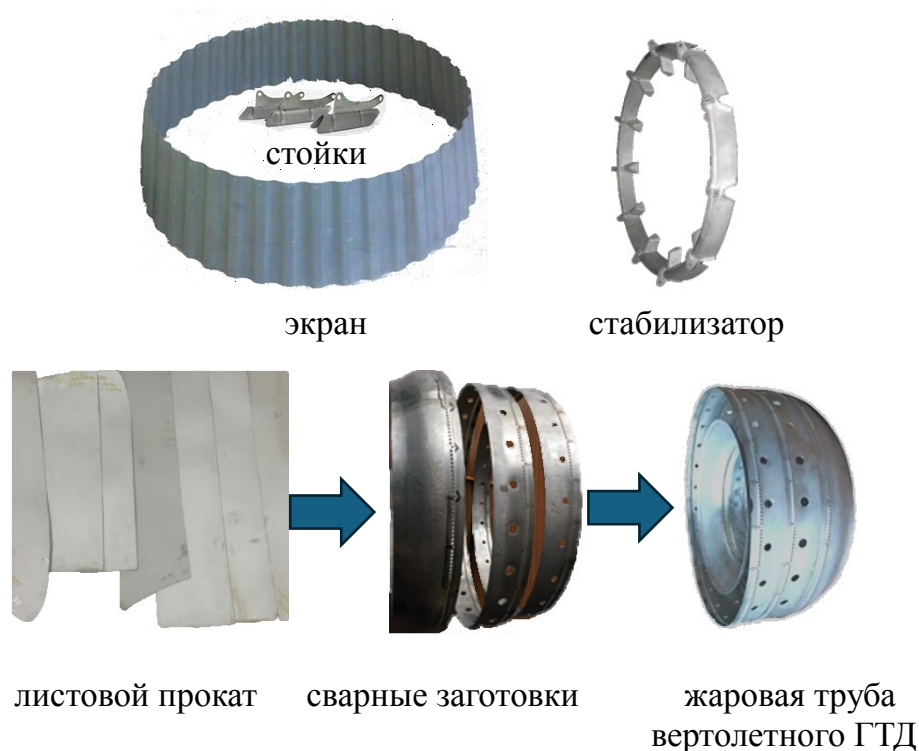


Рисунок 12 – Детали и узлы, изготовленные из сплава ВЖ171

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Установлены кинетические зависимости формирования структуры при высокотемпературной химико-термической обработке в среде азота жаропрочного деформируемого свариваемого Ni-Co сплава ВЖ171.

Показано, что толщина зоны выделения частиц нитридов контролируется диффузией азота в твердом растворе и пропорциональна времени обработки в степени $1/2$, а их размер – в степени $1/3$, что объясняется коалесценцией по теории Лифшица-Слезова; при этом рост концентрации азота на начальных стадиях азотирования растет по степенному закону от времени обработки, а после выделения нитридов по всему объему металла многократно (в ~ 27 раз) замедляется.

Показано влияние параметров продолжительности ХТО на образование нитридных частиц в количестве от 10,5 % с края, до 5,5 % в центре листового образца, формирующих зоны, отличающиеся по морфологии, размеру и типу фаз.

Для сплава ВЖ171 определена зависимость толщины нитридного слоя от времени азотирования: $H = 2,5 \cdot 10^{-6} (\tau)^{1/2}$, что позволяет планировать оптимальные режимы обработки для получения требуемой структуры изделий разной геометрии.

2 Установлено влияние отжига в вакууме после азотирования на структуру и свойства сплава ВЖ171. Он способствует росту частиц нитридов, выделению мелкодисперсных, размером 10–20 нм, частиц; в частицах повышается количество титана и снижается хрома. В структуре сплава после отжига выравнивается распределение напряжений, движение дислокаций при растяжении становится более равномерным. Отжиг позволяет повысить пластичность сплава в 1,2–2 раза и время до разрушения при 1000 °С на 30 %.

3 Впервые для повышения длительной прочности и жаростойкости упрочняемых внутренним азотированием сплавов на основе Ni и Co использовано легирование углеродом (0,1–0,2 масс. %), приводящее к формированию дополнительной упрочняющей фазы – карбонитридов. Такое легирование также существенно влияет на скорость азотирования, возможность получения сквозного нитридного слоя и характер распределения нитридных и карбонитридных фаз – показатель степени зависимости толщины нитридного слоя от времени обработки снижается с 0,5 до 0,45. Установленные кинетические закономерности позволили скорректировать режим ХТО и обеспечить формирование однородного нитридного слоя по всей толщине листа из нового сплава.

4 Впервые для сплавов на Co-Ni основе, упрочняемых внутренним азотированием, установлено синергическое влияние добавок переходных металлов 4 и 5 групп периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева – Ti, Hf, Ta – на значительное повышение длительной и кратковременной прочности. Показано, что определенное соотношение ($Ti > Hf, Ta$ (масс. %)) приводит к формированию при ХТО оптимального набора упрочняющих частиц: карбонитридов на основе гафния и тантала, и нитридов на основе титана.

5 По полученным результатам проведен регрессионный анализ, позволивший количественно оценить влияние легирующих элементов на свойства при кратковременном растяжении при 20 °С и 1000 °С, на длительную прочность при 1000 °С и 1200 °С, разработана модель сплава, подтверждена ее адекватность.

6 Разработан состав и получен патент RU 2601720 на новый жаропрочный деформируемый свариваемый Co-Ni сплав, упрочняемый внутренним азотированием, с рабочей температурой до 1250 °С, и режимы изготовления из него листовых заготовок,

химико-термической и термической обработок, обеспечивающие достижение характеристик: $\sigma_b^{20} = 1003$ МПа, долговечность при температуре 1000 °С – 120 часов при напряжении $\sigma = 80$ МПа и 550 часов при $\sigma = 64$ МПа, что выше, чем у наиболее жаропрочного сплава аналогичного назначения – ВЖ171 по кратковременной прочности на 19 % и долговечности в 4 раза. Сплав обладает более высокой, чем у сплавов-аналогов, жаростойкостью и не уступает им в технологичности при обработке давлением и сварке.

7 Исследованы технологические характеристики экспериментальных композиций нового сплава (радиус гибки, коэффициент выдавки) и свариваемость (критическая скорость деформации при сварке). Показано, что технологичность нового сплава по совокупности характеристик не уступает сплаву-прототипу ВЖ171 и находится на уровне промышленного гомогенного сплава ВЖ98.

8 Разработана ресурсосберегающая технология получения листового проката из высокожаропрочного деформируемого свариваемого сплава ВЖ171, упрочняемого внутренним азотированием (изменение № 2 к ТР 1.595-3-833-2009). Технология внедрена в опытно-промышленное производство НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. Проведено ее опробование и для новых композиций жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава с более высокими характеристиками длительной и кратковременной прочности и жаростойкости.

9 Разработаны технологические процессы высокотемпературного азотирования с последующим вакуумным отжигом сплава ВЖ171 и состава нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава, обеспечивающего получение сквозного нитридного слоя на полуфабрикатах из листового проката толщиной до 2 мм и увеличение пластичности – удлинения при кратковременном растяжении – в 1,5 раза. Разработанная технология (ТИ 1.595-3-730-2014) внедрена в опытно-промышленное производство НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. В условиях промышленных предприятий АО «ОДК-Климов» и филиала АО «ОДК» «ОДК-Салют» из сплава ВЖ171 получены элементы сопла и прототип жаровой трубы авиационных ГТД. Детали и узлы успешно прошли стендовые испытания.

10 Применение новых упрочняемых внутренним азотированием сплавов для тонкостенных деталей и узлов горячего тракта за счет более высокой температуры работы и прочности позволит снизить эмиссию, повысить экономичность и весовую отдачу газотурбинных двигателей летательных аппаратов различного назначения.

Основные результаты диссертационной работы представлены в публикациях:

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1 **Ахмедзянов М.В.**, Овсепян С.В., Родин А.О., Ломберг Б.С., Расторгуева О.И. Кинетика высокотемпературного азотирования и свойства сплава системы Ni-Co-Cr-W-Ti // Металловедение и термическая обработка металлов, 2022. № 4. С. 45–49. (№ 167);

2 Овсепян С.В., Колобов Ю.Р., **Ахмедзянов М.В.**, Манохин С.С., Филонова Е.В. Исследование нитридной фазы в жаропрочном сплаве системы Ni-Co-Cr-W-Ti, упрочняемом внутренним азотированием // Физика и химия обработки материалов. 2021. № 2. С. 63–71;

3 Лукина Е.А., Овсепян С.В., Давыдова Е.А., **Ахмедзянов М.В.** Структурные особенности жаропрочного сплава на Ni-Co-Cr основе, упрочняемого внутренним азотированием // Цветные металлы. 2016. № 7. С. 76–82. DOI 10.17580/tsm.2016.07.10;

4 Овсепян С.В., Бокштейн Б.С., **Ахмедзянов М.В.**, Родин А.О., Мазалов И.С. Кинетика роста частиц нитридов в процессе высокотемпературного объемного азотирования деформируемого сплава системы Ni-Co-Cr-W-Ti // Материаловедение. 2014. № 6. С. 21–25;

5 Овсепян С.В., **Ахмедзянов М.В.**, Мазалов И.С., Расторгуева О.И. Легирование углеродом сплава системы Ni-Co-Cr-W-Ti, упрочняемого химико-термической обработкой // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4. С. 21–24.

6 **Ахмедзянов М.В.**, Овсепян С.В., Расторгуева О.И., Давыдова Е.А. Влияние легирующих элементов на жаростойкость деформируемых Ni-Co сплавов с нитридным упрочнением // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 12. С. 21–25.

7 **Ахмедзянов М.В.**, Скугорев А.В., Овсепян С.В., Мазалов И.С. Разработка ресурсосберегающей технологии получения холоднокатаного листа из высокожаропрочного свариваемого сплава ВЖ171 // Производство проката. 2015. № 1. С. 14–17.

Патент Российской Федерации:

1 Жаропрочный свариваемый сплав на основе кобальта и изделие, выполненное из него: пат. RU 2601720, Россия; опубл. 10.11.2016.

Исп. М.В. Ахмедзянов

Печ. М.В. Ахмедзянов

Автореферат Ахмедзянов М.В.

«Разработка состава и химико-термической обработки нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава для тонкостенных деталей газотурбинных двигателей»

Подписано в печать

Заказ №

Формат бумаги 60х90/16. Печ. л. 1,00. Тираж экз.

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17