

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «МАДИ»

Мазлумян Г.С.

«03» 04 2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ахмедзянова Максима Вадимовича
«Разработка состава и химико-термической обработки нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава для тонкостенных деталей газотурбинных двигателей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Ахмедзянова Максима Вадимовича посвящена разработке состава и химико-термической обработки нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава для тонкостенных деталей газотурбинных двигателей.

Создание перспективных газотурбинных двигателей предполагает использование материалов с более высокими прочностными характеристиками и рабочей температурой. 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. 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 этим диссертационная работа Ахмедзянова Максима Вадимовича, посвященная исследованиям влияния легирования и режимов внутреннего азотирования на структуру и свойства жаропрочных сплавов на никелевой и кобальтовой основе, результаты которых позволят разработать новый материал с повышенными прочностными характеристиками и рабочей температурой для тонкостенных деталей ГТД летательных аппаратов, является весьма актуальной.

Структура и основное содержание работы

Представленная диссертационная работа Ахмедзянова М.В. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 121 источник. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста и содержит 24 таблицы, 63 рисунка.

Во введении изложены актуальность темы исследования, цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, выносимые на защиту положения, сведения об апробации работы и публикациях, личный вклад автора, данные, подтверждающие достоверность полученных результатов, структура и объем диссертации.

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. Рассмотрена высокотемпературная химико-термическая обработка в среде азота, в процессе которой происходит внутреннее азотирование сплава – формируются дисперсные частицы нитридов. Проанализирована термодинамика и кинетика процесса. 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.

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

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

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.

В заключении диссертации приведены основные результаты и выводы, полученные в рамках диссертационной работы.

Научная новизна

1 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;

2 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.

3 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.

4 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 °C, обеспечивающего более высокие по сравнению с материалами аналогичного применения характеристики: $\sigma_b^{20} = 1003$ МПа, долговечность при температуре 1000 °C – 120 часов при напряжении $\sigma = 80$ МПа и 550 часов при $\sigma = 64$ МПа.

Практическая значимость полученных результатов

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.

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 °C и повышенные характеристики: $\sigma_b^{20} = 1003$ МПа, долговечность при температуре 1000 °C –

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)».

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность результатов, представленных в диссертации Ахмедзянова М.В., не вызывает сомнений и подтверждается использованием современных методов и приборов для анализа локального химического состава, микроструктуры, физико-химических свойств и структурно-фазовых характеристик сплавов, обработки экспериментальных данных, сертифицированного оборудования для проведения механических испытаний и значительным объемом выполненных экспериментов.

Соответствие результатов диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа Ахмедзянова Максима Вадимовича «Разработка состава и химико-термической обработки нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава для тонкостенных деталей газотурбинных двигателей» по цели, задачам, методам исследования, содержанию, научной новизне и практической значимости соответствует паспорту научной специальности 2.6.1.

«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» в части п. 1, п. 2 и п. 6.

Апробация работы и публикации

Основные результаты подробно изложены в 20 научных работах, из которых 7 включены в перечень ВАК при Минобрнауки России, 12 работ в сборниках трудов научных конференций и 1 патент РФ.

Замечания по диссертационной работе

В работе показано, что образующиеся в процессе азотирования сплава ВЖ171 нестабильные нитриды хрома приводят к снижению прочностных и пластических характеристик, а в процессе предложенной после азотирования операции вакуумного отжига эти нитриды растворяются, характеристики повышаются. В разделе 3.1.1 есть описание, что нитриды хрома обнаружены в поверхностной зоне, но не указано, через какое время они там образуются, как и в центральной и переходной зонах, показанных на рисунке 35. Это затрудняет оценку оптимального времени азотирования сплава ВЖ171.

Из описания к рисунку 22 непонятно, насколько правомерно проведена аппроксимирующая кривая уменьшения объемной доли нитридов ближе к центру образца, не представлен доверительный интервал измерений. Визуально кажется, что на расстоянии 200-400 мкм от края образца есть плато с примерно равным количеством объемной доли нитридов.

В разделе 3.2.1 фраза «видно, что ХТО повышает температуру солидуса более чем на 100 градусов» требует уточнения: либо «при оптимальном режиме ХТО» либо «после получения сквозного азотирования».

В пятой главе указано, что высокотемпературное азотирование проводилось в обычной камерной печи в герметичном муфеле, что позволяет обходиться без приобретения специализированных лабораторных или промышленных печей азотирования. Однако не указаны размеры муфеля и максимальные габариты азотируемых изделий.

Также в пятой главе указано, что разработана технология высокотемпературного азотирования заготовок, деталей и сварных узлов из сплава ВЖ171, но описание использованных видов сварки и влияния ХТО на свойства и структуру сплава отсутствуют.

Автореферат содержит значительный объем исследований, который целесообразно сократить, оставив наиболее существенные результаты, – это позволит усилить акцент на научной новизне и практической значимости полученных результатов.

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку работы, ее научную и практическую значимость. Выводы, сделанные в работе, могут в дальнейшем использоваться для разработки жаропрочного деформируемого свариваемого сплава, упрочняемого внутренним азотированием, с повышенным уровнем прочностных свойств и дальнейшем опробовании изделий из указанного сплава в составе авиационных ГТД.

Заключение по диссертации

Диссертационная работа Ахмедзянова М.В. является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему на высоком научно-техническом уровне, в которой на основе анализа литературных источников и собственных исследований влияния легирующих элементов и внутреннего азотирования на структуру, фазовый состав и свойства композиций на основе никеля и кобальта разработан состав перспективного сплава для тонкостенных деталей газотурбинных двигателей с повышенным уровнем прочностных свойств.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание представленной работы.

Диссертация «Разработка состава и химико-термической обработки нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава для тонкостенных деталей газотурбинных двигателей» по объему, актуальности, научной новизне и практической значимости удовлетворяет всем требованиям п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства

Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Ахмедзянов Максим Вадимович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертационная работа Ахмедзянова Максима Вадимовича «Разработка состава и химико-термической обработки нового жаропрочного деформируемого свариваемого Co-Ni сплава для тонкостенных деталей газотурбинных двигателей» рассмотрена и обсуждена в ФГБОУ ВО «МАДИ» на заседании кафедры «Технологии конструкционных материалов» (03 июля 2026 г., протокол №13).

Отзыв составлен на основании диссертации, автореферата и публикаций М.В. Ахмедзянова.

Председатель заседания кафедры,
Заведующий кафедрой «Технологии
конструкционных материалов»,
доцент, д.т.н.

Фатюхин Д.С.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» (ФГБОУ ВО «МАДИ») Адрес: 125319, город Москва, Ленинградский проспект, д. 64

Телефон: +7 (499) 346-01-68

Адрес электронной почты: info@madi.ru

Сайт: <https://www.madi.ru>