

ОТЗЫВ

официального оппонента

кандидата технических наук Смирнова Андрея Евгеньевича

на диссертационную работу Ахмедзянова Максима Вадимовича

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

Актуальность темы диссертации

В современных условиях развития авиационной промышленности остро стоит вопрос совершенствования материалов для газотурбинных двигателей. Существующие жаропрочные сплавы не удовлетворяют растущим требованиям к температурным режимам работы деталей газоздушного тракта.

Особую значимость приобретает разработка новых материалов с повышенной жаропрочностью. Традиционные сплавы работают при температурах не выше 1100 °С, в то время как материалы с внутренним азотированием демонстрируют превосходство по длительной прочности в 1,4-2,6 раза и возможность эксплуатации при более высоких температурах. Это делает тему исследования диссертационной работы Ахмедзянова Максима Вадимовича крайне актуальной для развития отечественного двигателестроения.

Структура и основное содержание работы

Диссертационная работа Ахмедзянова Максима Вадимовича состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего источник. Диссертация изложена на 148 страницах и содержит 24 таблицы, рисунка.

Диссертационное исследование выстроено логично и последовательно. Во введении автор обосновал актуальность темы, сформулировал цель и задачи исследования.

В первой главе дано описание современных жаропрочных свариваемых материалов, использующихся для тонкостенных деталей газотурбинных двигателей. Их рабочая температура ограничена 1100 °С. Разработки в области сплавов, упрочняемых внутренним азотированием, позволили увеличить температуру работы до 1250 °С и повысить длительную прочность в 1,4-2,6 раза. Среди таких сплавов ВЖ171 выделяется наиболее высокими характеристиками.

При этом автор акцентирует внимание на свойстве некоторых элементов (Ti, Ta, Zr, Hf, Nb), проявляющих высокое сродство как к азоту, так и к углероду, что открывает новые возможности для оптимизации состава сплавов. Отмечены пробелы в существующих исследованиях: недостаточное количество систематических работ по комплексному влиянию переходных металлов 4-й и 5-й групп периодической системы на свойства азотируемых сплавов, а также отсутствие данных об углероде как легирующей добавки.

Вторая глава посвящена методологии исследования. Приведено описание экспериментальных композиций на основе Co и Ni, высокотемпературного азотирования и комплексного исследования микроструктуры и свойств материалов.

В третьей главе описаны исследования формирования структуры, фазового состава и упрочнения при внутреннем азотировании и последующей термообработке жаропрочного деформируемого свариваемого сплава ВЖ171. В исходном состоянии содержание азота в сплаве составляет 0,0014 масс. %. При внутреннем азотировании в объеме образуются нитридные частицы до 4 мкм; по толщине листа выделяются три зоны с различной формой, размером и типом нитридов.

Показано, что качественный и количественный состав нитридов варьируется от поверхности к центру в соответствии с кинетикой диффузии азота: у поверхности преобладают TiN с повышенным содержанием Cr или Cr₂N, реже соотношение: толщина азотированного слоя пропорциональна времени ХТО в степени 1/2, а размер нитридных частиц – времени в степени 1/3. Концентрация

азота растет по степенному закону до выделения нитридов по всему сечению; через 8 часов скорость роста концентрации азота значительно замедляется. Полученная формула зависимости толщины нитридного слоя от времени проверена экспериментально ($R^2 = 0,99$) и пригодна для планирования режимов обработки деталей различной геометрии.

Установлено, что внутреннее азотирование повышает температуру солидуса сплава более чем на 100 °С, увеличивает твердость более чем в два раза и заметно повышает длительную прочность. Азотирование также улучшает жаростойкость. Предложен вакуумный отжиг после азотирования: он растворяет нестабильные нитриды на основе хрома, выравнивает фазовый состав, повышает пластичность при 20 °С до 2 раз и увеличивает время до разрушения при 1000 °С на 30 %.

На основе полученных результатов разработаны оптимальные режимы ХТО сплава ВЖ171.

В четвертой главе приведено описание разработки нового жаропрочного деформируемого свариваемого сплава, упрочняемого внутренним азотированием, и определено его оптимальное легирование и режим ХТО. Показано, что наиболее перспективной оказалась система на основе Co-Ni-Cr-W с добавками Ti, Ta, Hf и углерода: именно она обеспечивает синергический рост кратковременной и длительной прочности при сохранении приемлемой технологичности и свариваемости.

Показано, что введение углерода и переходных металлов 4-5 групп позволило сформировать две упрочняющие фазы – мелкие карбонитриды и более крупные нитриды, при этом для нового состава удалось обеспечить сквозное азотирование. Экспериментально установлено, что у разработанного сплава долговечность при 1000 °С примерно в 4 раза превосходит долговечность сплава ВЖ171 при напряжениях 64-80 МПа; кратковременная прочность при 20 °С также выросла примерно на 19 %.

На основе термодинамических расчетов, исследований кинетики азотирования, структурных исследований и регрессионного анализа был выбран

состав, изготовлен листовой прокат и подтверждено соответствие расчетному прогнозу. На состав получен патент РФ RU 2601720.

Заключительная глава описывает разработку ресурсосберегающей технологии производства холоднокатаного листа из высокожаропрочного сплава ВЖ171, которая не требует модернизации существующего металлургического оборудования. Технология успешно внедрена в производство НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ и адаптирована для состава нового Co-Ni сплава с улучшенными прочностными и жаропрочными характеристиками. На предприятиях АО «ОДК-Климов» и филиала АО ОДК «ОДК-Салют» из сплава ВЖ171 были изготовлены детали управляемого сопла и прототип жаровой трубы. Проведенные стендовые испытания подтвердили высокое качество и надежность полученных изделий.

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;

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 °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 полученных результатов

Результаты исследования имеют существенное прикладное значение. Разработан состав нового жаропрочного сплава с повышенными характеристиками длительной прочности и рабочей температурой до 1250 °С, что существенно расширяет возможности применения материала в авиационной промышленности.

Опробование проведено на ведущих предприятиях отрасли – АО «ОДК-Климов» и филиале АО «ОДК» «ОДК-Салют». Изготовлены опытные образцы деталей управляемого сопла и прототип жаровой трубы авиационных ГТД.

Новый сплав демонстрирует впечатляющие показатели: повышение кратковременной прочности на 19 % и увеличение долговечности в 4 раза по сравнению с самым жаропрочным деформируемым свариваемым сплавом ВЖ171. Получен патент на изобретение, разработаны технологические инструкции и технические условия.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Автор использовал современные методы исследования микроструктуры, сертифицированное оборудование, провел статистическую обработку данных и осуществил проверку результатов.

Обоснованность выводов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, согласованностью результатов различных методов исследования, успешными результатами стендовых испытаний, полученным патентом.

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 опубликованы в сборниках трудов научных конференций и 1 патент РФ.

Замечания по диссертационной работе

1. Не установлены закономерности влияния легирования на физические свойства исследуемых композиций (температуры ликвидуса и солидуса, ТКЛР);
2. Не указаны предельные габариты азотируемых изделий, что может ограничить применение сплавов, упрочняемых азотированием по всему объему;
3. Недостаточно подробно раскрыт выбор температуры азотирования сплава ВЖ171.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Заключение по диссертации

Диссертационная работа Ахмедзянова Максима Вадимовича выполнена на высоком научно-техническом уровне, а ее результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования жаропрочных материалов и технологий их производства в авиационной промышленности.

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».

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

Официальный оппонент,

Кандидат технических наук по специальности 05.16.01 -

Металловедение и термическая обработка металлов,

Доцент кафедры «Материаловедение»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

/Смирнов Андрей Евгеньевич

06.08.2026

г.

МГТУ имени Н.Э. Баумана, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

Контактный телефон: +7(499) 263-68-24

Адрес электронной почты: smirnoff@bmstu.ru

Я, Смирнов Андрей Евгеньевич, даю согласие на обработку своих персональных данных, включение этих сведений в документы, связанные с защитой диссертации Ахмедзянова М.В., и их дальнейшую обработку.

Подпись Смирнова А.Е. заверяю



«ВЕРНО»

СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
ПОВАЛОВА И.О.

ОТДЕЛ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ
ЕДИНОЙ ПРИЁМНОЙ
УКСА
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА