

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Диссертационная работа Ахмедзянова Максима Вадимовича посвящена решению важнейшей научно-технической задачи – разработке новых жаропрочных свариваемых материалов для горячих узлов газотурбинных двигателей. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения рабочих температур и прочностных характеристик материалов для тонкостенных деталей газоздушного тракта ГТД.

Особую значимость работе придает то, что традиционные жаропрочные свариваемые сплавы имеют температурный предел эксплуатации не выше 1100 °С, в то время как разработанный соискателем материал демонстрирует превосходство по длительной прочности в 2-3 раза и возможность работы при температурах до 1250 °С.

Структура и основное содержание работы

Диссертационная работа Ахмедзянова Максима Вадимовича состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 121 источник. Диссертация изложена на 148 страницах и содержит 24 таблицы, 63 рисунка.

Диссертационное исследование построено логично и последовательно. Во введении автор обосновал актуальность темы, сформулировал цель и задачи работы, обозначил научную новизну исследований, практическую значимость результатов и положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит глубокий аналитический обзор современного состояния проблемы, где детально рассмотрены существующие жаропрочные свариваемые никелевые и кобальтовые сплавы и их ограничения. Рассмотрена высокотемпературная химико-термическая обработка жаропрочных сплавов в среде азота, в процессе которой происходит внутреннее азотирование обрабатываемого сплава – формируются дисперсные частицы нитридов. Автор отметил, что изучению комплексного влияния на свойства азотируемых сплавов переходных металлов 4 и 5 групп периодической системы Д.И. Менделеева (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta) посвящено малое количество исследований или они отсутствуют вовсе, чем подтвердил актуальность и перспективность темы диссертации.

Вторая глава посвящена методологии исследования, даны описания рассматриваемых экспериментальных композиций на основе Co и Ni, способ проведения высокотемпературного азотирования, методов исследования микроструктуры и свойств.

В третьей главе представлены результаты исследования кинетики азотирования сплава ВЖ171, выбранного в качестве прототипа нового жаропрочного сплава, установлены закономерности формирования нитридной фазы и её влияние на свойства материала. На основании полученных результатов выбран оптимальные режимы азотирования и последующего вакуумного отжига для улучшения структуры и механических свойств сплава ВЖ171.

Четвёртая глава содержит результаты разработки нового состава жаропрочного свариваемого сплава, где автор провёл многокритериальную оптимизацию состава, исследовал влияние легирующих элементов, в том числе выбранных для получения нитридов и карбонитридов, на структуру и свойства экспериментальных композиций, разработал режим химико-термической обработки нового состава и подтвердил эффективность предложенного решения.

Пятая глава посвящена промышленному освоению сплавов, упрочняемых высокотемпературным азотированием, и технологий их изготовления и обработки.

В заключении 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

Разработаны технологический процесс производства листового проката и режим химико-термической обработки сплава ВЖ171, позволяющие

изготавливать сплав и изделия из него на существующем оборудовании металлургических предприятий.

Разработан состав нового жаропрочного свариваемого сплава с рабочей температурой до 1250 °С и повышенным значением длительной прочности (в 2-3 раза) по сравнению с серийными аналогами. Получен патент на изобретение.

Опробование технологий проведено на предприятиях АО «ОДК-Климов» и филиала АО «ОДК» «ОДК-Салют», где изготовлены детали управляемого сопла и прототип жаровой трубы ГТД.

Полученный в работе результат может в дальнейшем использоваться для разработки нового жаропрочного деформируемого свариваемого сплава, упрочняемого внутренним азотированием, с повышенным уровнем прочностных свойств и изготовления из него изделий и узлов авиационных ГТД.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность полученных результатов Ахмедзянова М.В. обеспечивается применением современных методов исследования микроструктуры, использованием сертифицированного оборудования, проведением статистической обработки данных и многократной проверкой результатов.

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. На стр. 48 указывается: «Температура обработки – стандартная для сплава ВЖ171, указанная в паспорте на сплав и в действующей на тот момент технологической инструкции ТР 1.595-3-892-2010: на 150–200 °С ниже начала плавления (далее – стандартная температура)». Вместо столь сложной формулировки необходимо просто привести температуру азотирования числом, в градусах цельсия.
2. На рисунке 17 стр. 52 представлена зависимость концентрации легирующих элементов сплава в сложных нитридах в зависимости от концентрации титана. В описании данных зависимостей говорится, что содержание титана и хрома обратно пропорционально друг другу. Это верно для центральной части образца. Однако, в поверхностном слое явно наблюдается прямо пропорциональная зависимость концентраций титана и хрома. Объяснение этому эффекту не даётся.
3. Для определения химического состава применяется метод ЭЗМА – электронно-зондового микроанализа. Данный метод имеет ряд ограничений, в том числе по размеру элементов структуры, состав которых определяется. Так, при определении состава нитридов, с площадью поверхности на шлифе менее 1 мкм² (и даже больших), в нём будут присутствовать элементы матрицы – в том числе кобальт и никель, практически не образующие нитридов. Автор знает об этой особенности метода, однако считает, что эти элементы входят в состав сложных нитридов. Действительно, никель и кобальт могут растворяться в ГЦК решётке TiN. Однако повышение их концентрации приведёт к изменению термодинамических параметров нитрида таким образом, что он будет диссоциировать при температуре азотирования. Отсутствует подтверждение того, что никель и кобальт содержатся в нитриде, а не захвачены из матрицы при проведении анализа.
4. Остаётся неясным поведение углерода при азотировании и его влияние на свойства сплава. Очевидно, что диссоциация карбидов с последующим образованием нитридов, либо замещение углерода азотом с образованием

карбонитридов, приведёт к вытеснению углерода в матрицу, с изменением её структурно-фазового состояния. Следует отметить, что если в сплаве ВЖ171, рассматриваемом в главе 3, содержание углерода невелико, ~0,1 ат.%, то в рассматриваемом в главе 4 новом сплаве его количество увеличено в 10 раз, что уже может заметно влиять на структуру и свойства сплава.

5. На рисунках 49 и 50 (стр. 100 – 101) отчётливо наблюдается строчечность карбонитридных выделений. Целесообразно было бы объяснить причины её возникновения и возможное влияние на свойства сплава.
6. Исходя из приведённых на стр. 65 механических свойств видно, что азотирование даже при минимальной продолжительности приводит к падению пластических характеристик как при комнатной температуре, так и при испытаниях на длительную прочность при 1000°C практически на порядок. Необходимо пояснить, насколько такое падение пластичности критично для реального применения материала. Также в приведённой таблице отсутствуют данные о размере нитридов, хотя в заголовке они обозначены.
7. В работе не использовался такой метод исследования структурно-фазового состояния как рентгено-структурный анализ. С его помощью можно было бы получить информацию о фазовом составе, параметрах решётки, объёмных эффектах фазовых превращений и возникающих вследствие них остаточных напряжениях. Это позволило бы существенно повысить качество и объём экспериментальных данных и более полно и достоверно изложить научные результаты исследования.

Сделанные замечания не снижают качества и научной ценности работы.

Заключение по диссертации

Диссертационная работа Ахмедзянова Максима Вадимовича является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему на высоком научно-техническом уровне.

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,
д.т.н., член-корреспондент РАН



Баных И.О.

10 августа 2026 г.

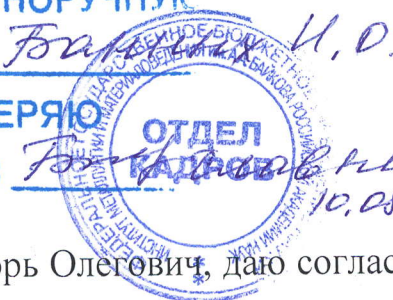
ИМЕТ РАН, Ленинский проспект, 49, телефон 8 (499) 135-2060, электронная почта imet@imet.ac.ru.

СОБСТВЕННОРУЧНУЮ

ПОДПИСЬ

УДОСТОВЕРЯЮ

ОТДЕЛ КАДРОВ



*Игорь Олегович Баных
10.08.2026 О.А. Вурманов*

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