



МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»
(НИТУ МИСИС)**

Ленинский проспект, 4, стр.1, Москва, 119049
Тел. (495)955-00-32; Факс: (499)236-21-05

<http://www.misis.ru>

E-mail: kancela@misis.ru

ОКПО 02066500 ОГРН 1027739439749

ИНН/КПП 7706019535/ 770601001

№

На №

30/13-42 ОТ 03.12.2024

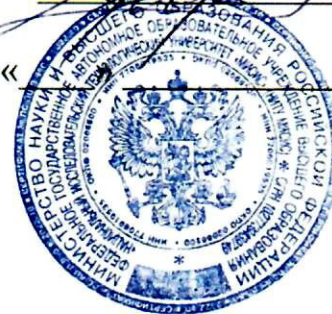
Отзыв ведущей организации

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям,
д.т.н., профессор

М.Р. Филонов

2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Махорина Владимира Владимировича на тему «Разработка способов повышения жаропрочности и коррозионной стойкости монокристаллического никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ для морских ГТД», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. – «Материаловедение (технические науки)»

Актуальность темы исследования

Одним из направлений развития морского газотурбинного двигателестроения является продление ресурса газотурбинного двигателя. Возможность длительной эксплуатации газотурбинного двигателя напрямую связана с качеством материала рабочей лопатки, как наиболее ответственного элемента, эксплуатирующего при высоких температурах в среде с повышенным содержанием хлора и сульфат-ионов. В связи с этим есть потребность в разработке новых научно-технических подходов к обработке материала рабочих лопаток газотурбинного двигателя морского назначения. Эти обстоятельства и определили актуальность постановки диссертационной работы.

НИЦ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»		
ДОУ	Вх. № 776/17	в ДЕЛО
	« 5 » 03 2025 г.	№ _____
	Осн. 7 л.	подп. _____
	Прил. _____ л.	

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов по главам и основных выводов, списка литературы и приложений, содержит 203 страницы машинописного текста, включая 78 рисунков, 10 таблиц, 228 библиографических ссылок.

Во введении рассмотрены основные проблемы, посвященные жаропрочности и сопротивлению солевой коррозии никелевых сплавов, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе диссертации рассмотрены основные причины выхода из строя лопаток газотурбинных двигателей. Показано, что снижение ресурса лопаток газотурбинных двигателей связано с низкими характеристиками жаропрочности, обусловленными усадочной микропористостью, и сопротивлением солевой коррозии материала. Рассмотрены способы повышения характеристик жаропрочности (в частности, программное упрочнение, на основании которого предложен способ термомеханического нагружения сжатием) и сопротивления солевой коррозии (термодиффузионное алитирование) монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для лопаток газотурбинных двигателей морского назначения.

Во второй главе диссертации приведены объекты исследования, методики исследования и используемое оборудование. Исследования проводились на образцах из сплава марки СЛЖС5-ВИ, заготовки которого были получены методом направленной кристаллизации. Для оценки скорости солевой коррозии были рассмотрены следующие жаропрочные никелевые сплавы: ЧС70-ВИ, ЧС88У-ВИ, ВЖЛ2-ВИ, ЭП742-ИД, ЭП648-ВИ с металлическим покрытием ПВ-НХ16Ю6Ит и ЭП648-ВИ с металлическим покрытием (подслоем) ПВ-НХ16Ю6Ит и керамическим покрытием ЦрОИ-7. В своей работе автор использовал различные методы исследования структуры и свойств материалов.

В третьей главе диссертации рассмотрен способ термомеханического нагружения сжатием сплава марки СЛЖС5-ВИ, позволяющий за счет залечивания усадочной микропористости и снижения дендритной ликвации

повысить при температуре 900 °С более чем в 2 раза жаропрочность (время до разрушения) при испытаниях на длительную прочность и снизить более чем в 2,5 раза скорость ползучести на установившейся стадии при испытаниях на ползучесть.

В четвертой главе диссертации представлен способ термодиффузионного алитирования сплава марки СЛЖС5-ВИ, позволяющий за счет образования плотного интерметаллидного подслоя значительно повысить сопротивление солевой коррозии. Проведен сравнительный анализ сопротивления солевой коррозии сплава марки СЛЖС5-ВИ и других жаропрочных никелевых сплавов («сплавов-аналогов»). Показано, что термодиффузионное алитирование позволяет на два порядка снизить скорость солевой коррозии по сравнению со сплавом марки СЛЖС5-ВИ без защитного слоя и на 2-4 порядка снизить скорость солевой коррозии по сравнению со сплавами-аналогами.

В пятой главе диссертации рассматриваются вопросы, связанные с оценкой возможности применения термомеханического нагружения сжатием для реальных изделий (рабочих лопаток), а также возможность одновременного проведения термодиффузионного алитирования и термомеханического нагружения сжатием.

Научная новизна

Полученные результаты обладают научной новизной. К наиболее значимым из них стоит отнести:

1. Установлено, что термомеханическое нагружение сжатием в условиях длительного нагрева жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ приводит к увеличению сопротивления деформированию и разрушению (снижению скорости ползучести, повышению долговечности, пластичности, а также увеличению доли вязкой составляющей в изломах образцов), что обусловлено снижением усадочной микропористости за счет направленного протекания диффузионных процессов, а также выравниванием химического состава за счет активации диффузии.

2. Выявлено, что термодиффузионное алитирование, приводящее к образованию подслоя, состоящего из интерметаллидов типа Ni(Al, Ti) и Ni₃(Al, Ti), а также твердого раствора, насыщенного алюминием, обеспечивает эффективную коррозионную защиту поверхности сплава марки СЛЖС5-ВИ.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Основные результаты работы внедрены:

- в СПбГТИ(ТУ) (технологическая инструкция (№ ТИ.25221.00001-2023) «Программное нагружение изделий из монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ»), что подтверждается актом об использовании в СПбГТИ(ТУ) результатов диссертационной работы);
- на ПАО «ОДК-Сатурн» при проведении термодиффузионного алитирования опытных монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей морского назначения из жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ, что подтверждается актом внедрения ПАО «ОДК-Сатурн».

Результаты работы представляют несомненный интерес для предприятий газотурбинного двигателестроения, на которых изготавливаются рабочие лопатки турбины, таких как ПАО «ОДК-Сатурн».

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Основные научные положения и выводы работы, сделанные автором, представляются обоснованными. Обоснованность выводов основана на большом объеме экспериментального материала, полученного с применением современных методов эксперимента, проверкой технических решений в лабораторных и промышленных условиях, внедрением результатов работы на ПАО «ОДК-Сатурн» и в СПбГТИ(ТУ).

Достоверность выводов обеспечивается также воспроизводимостью и согласованностью полученных результатов и их соответствием известным научным представлениям.

Автореферат полностью соответствует основным положениям диссертации. Основные результаты опубликованы в открытой печати в 17 научных работах, из них 4 в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ,

получен 1 патент РФ. В изданиях, входящих в международную базу научного цитирования WoS и SCOPUS, опубликована 1 статья.

Замечания по диссертационной работе

1. Автором была сформулирована гипотеза, согласно которой термомеханическое нагружение сжатием может привести к изменению морфологии упрочняющей γ' . Последующие исследования микроструктуры высокого разрешения, проведенные автором, не подтвердили данную гипотезу, что требует пояснений.

2. При измерении морфологии структур (рис. 3.30) следовало уточнить какие были применены критерии бинаризации, проводилась ли фильтрация шумов, каково разрешение изображения. Данная информация полезна для оценки воспроизводимости и сопоставимости полученных результатов оценки геометрии структурных составляющих.

3. Интересные результаты получены при оценке количественных параметров структуры сплава СЛЖС5-ВИ (табл.3). Однако отсутствие дополнительной информации затрудняет оценку значимости полученных результатов, например, в какой мере при определении фрактальной размерности было учтено то обстоятельство, что, как и всякое представление в терминах бесконечно малых, модель фракталов полезна при изменении шага сглаживания b_k на несколько порядков.

4. Внимание, уделенное механизмам разрушения сплава, вполне оправдано. Однако по изображениям изломов, представленным в работе (например, 3.16; 3.17) не всегда можно оценить сделанные на их основе заключения об элементарных актах разрушения и их взаимодействии при разрушении. Может следовало бы дать изображения выделенных элементарных актов разрушения при большем увеличении? Есть необходимость в уточнении некоторых выводов, например, о том, что «большой размер ямок в изломах термомеханически нагруженных сжатием образцов, свидетельствует, в том числе, о том, что неметаллические включения отделились от матрицы сплава значительно позже» (стр. 92). Однако большой размер ямок может быть признаком большего развития микропластической деформации,

предшествующей слиянию пор при вязком разрушении, на повышенную пластичность указывают экспериментальные результаты (см. табл. 3.1, стр. 97).

5. В работе не была проведена оценка влияния термомеханического нагружения при одновременном термодиффузионном алитировании на глубину алитированного слоя.

6. Есть отдельные терминологические неточности, например, неудачное название раздела 3.6.1 «Фрактографические исследования изломов» (с учетом того обстоятельства, что «фрактография», англ. fractography от лат. fractis — излом) или выражение «В качестве объектов были рассмотрены как пиксели пор, неметаллических включений и карбидов, так и их центры масс» (стр. 69).

Заключение

Отмеченные недостатки существенно не снижают теоретической и практической значимости выполненных исследований, а полученные в диссертации результаты соответствуют поставленным цели и задачам.

Диссертация В.В. Махорина представляет собой законченное исследование, в котором разработаны новые научно-технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие морского газотурбинного двигателестроения – в области технологий и способов обработки ответственных изделий (рабочих лопаток газотурбинных двигателей).

Работа обладает всеми основными качествами кандидатской диссертации: актуальностью решаемой проблемы, новизной методов решения, интересными и важными научными результатами, практической ценностью разработанных способов их получения, и последующей возможностью применения для изделий ответственного назначения морского газотурбинного двигателестроения. Важно, что сформулированные подходы и представления интересны для дальнейшего развития, как в рамках научного исследования, так и практического применения.

Выполненная работа соответствует п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства

РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями, утвержденными Постановлениями Правительства РФ, а её автор Махорин Владимир Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. – «Материаловедение (технические науки)».

Диссертация была заслушана и обсуждена на заседании кафедры металловедения и физики прочности НИТУ МИСИС 24 февраля 2025 года (Протокол № 7).

Заведующий кафедрой
металловедения и физики прочности,
д.т.н., профессор



Сергей Анатольевич Никулин

(05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов)

Ученый секретарь кафедры,
к.т.н., доцент



Вероника Юрьевна Турилина

(05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов)

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС), 119049, г. Москва, Ленинский проспект, дом 4, стр. 1 Тел.: + 7 (495) 955-00-32. Факс: + 7 (499) 236-21-05.
E-mail: kancela@misis.ru



06.03.2025