

НИЦ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»		
ДОУ	Вх. № 677/12	в ДЕЛО
	«26» 02 2025 г.	№ _____
	Осн. 6 л.	подп. _____
	Прил. — л.	

Ученому секретарю диссертационного  
совета 75.1.018.01

Доктору технических наук, профессору  
Е.И. Хлусовой

191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная,  
д. 49

## ОТЗЫВ

### Официального оппонента на диссертационную работу

**МАХОРИНА Владимира Владимировича**

«Разработка способов повышения жаропрочности и коррозионной стойкости монокристаллического никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ для морских ГТД», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 «Материаловедение (технические науки)»

**Актуальность темы исследований.** Направления исследований диссертационной работы Махорина В.В. являются, безусловно, актуальными, поскольку посвящены разработке способов повышения эксплуатационных характеристик материала (жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ) рабочих лопаток газотурбинного двигателя морского назначения. Повышенная сложность и стоимость изготовления рабочих лопаток, а также их статус как изделия ответственного назначения обуславливают необходимость продления их ресурса за счет повышения эксплуатационных характеристик. В работе представлены общие принципы и методология повышения жаропрочности и коррозионной стойкости жаропрочных никелевых сплавов, на примере сплава марки СЛЖС5-ВИ, а также предложения по практической реализации разработанных способов.

**Основная цель** рассматриваемой работы состоит в разработке способов повышения жаропрочности, сопротивления ползучести и сопротивления солевой коррозии при высоких температурах (до 900°C) монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ, применяемого в газотурбинных двигателях морского назначения.

**Задачи исследования,** сформулированные автором диссертации для достижения поставленной цели, предусматривали последовательное и методичное решение проблем в области материаловедения жаропрочных сплавов. Разнообразие задач исследования связано с различными направлениями повышения эксплуатационных характеристик – разработке способа термомеханического нагружения для повышения долговечности и снижения скорости ползучести монокристаллического жаропрочного

никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ и последующем исследовании влияния термомеханического нагружения сжатием на микроструктуру, пористость и характеристики жаропрочности; разработке способа термодиффузионного алитирования для повышения сопротивления солевой коррозии монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ и последующем проведении сравнительного анализа сопротивления солевой коррозии при температурах (800–900)°С в среде, насыщенной ионами хлора и сульфат-ионами, со сплавами-аналогами газотурбинных двигателей морского назначения; разработке методики консервативной оценки напряжений и скорости деформации изделия в оправке, имеющей пониженный по сравнению с материалом изделия температурный коэффициент линейного расширения, в ходе проведения термомеханического нагружения сжатием.

### **Анализ диссертации по главам**

**Первая глава** посвящена анализу основных причин выхода из строя лопаток газотурбинных двигателей. Тщательный анализ литературных источников позволил установить, что снижение ресурса лопаток газотурбинных двигателей связано с низкими характеристиками жаропрочности, обусловленными, в том числе, усадочной микропористостью, и пониженным сопротивлением солевой коррозии материала. Показана необходимость разработки способов повышения характеристик жаропрочности и сопротивления солевой коррозии монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для лопаток газотурбинных двигателей морского назначения.

Литературный обзор характеризуется методичностью рассмотрения различных аспектов проблемы, использованием большого массива современных и классических литературных источников (как отечественных, так и зарубежных), показывая большую глубину проработки материала по рассматриваемым проблемам. С учетом проведенного анализа и на основании собственных исследований автором предложены способ термомеханического нагружения сжатием и способ термодиффузионного алитирования.

**Во второй главе** представлены материалы и методики исследования, а также используемое оборудование. Исследования проводились на образцах из монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ (до и после термодиффузионного алитирования), а также сплавах-аналогах с повышенным сопротивлением солевой коррозии 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. Для достижения поставленных цели и задач автором были проведены всесторонние исследования методами EBSD, физической сорбции, оптической и растровой электронной микроскопии, локального рентгеноспектрального микроанализа,

были определены физические характеристики (ТКЛР, плотность и удельное электрическое сопротивление) и модуль нормальной упругости, проведены испытания на растяжение, длительную прочность и ползучесть, а также коррозионные испытания на солевую коррозию. Для обработки полученных экспериментальных данных было применено современное программное обеспечение: Thixomet, ANSYS, ImageJ.

**В третьей главе** приведены результаты разработки способа повышения жаропрочности и исследование его влияния на служебные характеристики жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ. Диссертант выполнил большой объем работ по исследованию возможности повышения длительной прочности и сопротивления ползучести сплава марки СЛЖС5-ВИ. Показано, что применение способа термомеханического нагружения сжатием позволяет значительно повысить долговечность и снизить скорость ползучести данного сплава.

**Четвертая глава** посвящена разработке способа повышения сопротивления солевой коррозии и исследование влияния его применения на сопротивление солевой коррозии сплава марки СЛЖС5-ВИ. Автором уделено внимание сравнению стойкости к солевой коррозии данного сплава со сплавами с повышенным сопротивлением солевой коррозии. Последующие исследования поверхностного слоя сплава марки СЛЖС5-ВИ позволили установить, что применение способа термодиффузионного алитирования приводит к значительному снижению скорости солевой коррозии.

**В пятой главе** представлены результаты анализа возможности применения термомеханического нагружения сжатием для рабочих лопаток газотурбинных двигателей, а также предложен способ совмещенного применения способа термомеханического нагружения сжатием и термодиффузионного алитирования. Кроме того, автором разработана методика консервативной оценки напряжений и скорости деформации изделия в оправке в ходе проведения термомеханического нагружения сжатием.

**В целом работу Махорина В.В.** отличает последовательность и методичность выполнения исследований. Каждый этап исследования имеет четкую постановку задачи, методическое обеспечение, широкий спектр исследований, анализ полученных результатов, и, как результат, – разработку способов повышения эксплуатационных характеристик сплава марки СЛЖС5-ВИ (способ термомеханического нагружения и способ термодиффузионного алитирования). Такой методичный подход характеризует диссертацию как законченную научную работу.

Положительным аспектом рассматриваемой работы является внедрение разработанных способов на предприятиях (СПбГТИ(ТУ), ПАО «ОДК-

Сатурн»). Представленные в работе материалы были апробированы на многочисленных всероссийских и международных конференциях.

**Достоверность** результатов, основных положений и выводов обусловлена воспроизводимостью и согласованностью полученных данных, доказана значительным объемом разнообразных экспериментальных исследований, выполненных в обоснование основных теоретических положений, представленных в диссертации, с применением современных методов исследования свойств материалов и обработки экспериментальных данных, проверкой технических решений в лабораторных и промышленных условиях. Выводы полностью соответствуют поставленным задачам исследования.

**Научная новизна работы** состоит в том, что было установлено, что протекание диффузионных процессов (снижение усадочной микропористости, а также дендритной ликвации), достигаемое за счет применения способа термомеханического нагружения сжатием, приводит к увеличению сопротивления деформированию (снижению скорости ползучести) и разрушению (повышению долговечности и пластических характеристик) сплава марки СЛЖС5-ВИ. Также, было выявлено, что образование подслоя, состоящего из интерметаллидов типа  $Ni_3Al$ ,  $Ni_3(Al, Ti)$ , а также твердого раствора никеля, насыщенного алюминием, достигаемое за счет применения способа термодиффузионного алитирования, обеспечивает эффективную коррозионную защиту поверхности сплава марки СЛЖС5-ВИ в среде, насыщенной ионами хлора и сульфат-ионами при температуре 900 °С.

**Практическая значимость работы** состоит во внедрении:

– способа термомеханического нагружения изделий из монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ – в СПбГТИ(ТУ);

– способа термодиффузионного алитирования сплава марки СЛЖС5-ВИ при проведении термодиффузионного алитирования опытных монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей морского назначения – на ПАО «ОДК-Сатурн».

### **Замечания по диссертационной работе**

На основании рассмотрения диссертационной работы и автореферата можно сделать следующие замечания:

1. В автореферате диссертационной работы не приведен химический состав исследуемого жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ, что затрудняет восприятие материала.

2. В диссертационной работе проведены исследования влияния термомеханического нагружения сжатием на характеристики сплава марки СЛЖС5-ВИ. Как поведет себя данный материал при термомеханическом нагружении растяжением?

3. В работе отсутствует информация о составе поверхностного слоя сплава СЛЖС5-ВИ без термодиффузионного алитирования.

4. Диссертантом отмечено, что разлегирование поверхности сплава происходит за счет «ухода» алюминия в продукты коррозии. Наблюдалось ли разлегирование по другим легирующим элементам?

5. Не указано как долго и с какой частотой перемешивалась смесь солей 75%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 25%  $\text{NaCl}$  перед проведением испытаний на стойкость против солевой коррозии.

6. Представляет интерес проведение испытаний на много- и малоцикловую усталость сплава марки СЛЖС5-ВИ до и после термомеханического нагружения сжатием, с целью оценки влияния снижения усадочной микропористости на данные характеристики.

7. В диссертации, на странице 79, 164 для скорости нагружения/деформации указана размерность «%/с<sup>-1</sup>», вместо «%/с». Желательно уточнить размерность.

### Заключение

Объем и оформление работы соответствует уровню диссертаций, представленных на соискание ученой степени кандидата технических наук. Стилль изложения материала и автореферата отвечает нормам научной лексики.

Содержание исследования полностью соответствует паспорту специальности 2.6.17 «Материаловедение (технические науки)». В автореферате в достаточном объеме отражены основные идеи, содержание и выводы диссертации. На основании анализа литературных источников в работе корректно сформулированы цель и определены задачи исследования.

Степень научной новизны представленных в диссертационной работе результатов не вызывают сомнений. Результаты достоверны и имеют практическую ценность, на их основе сделаны обоснованные выводы. Автор имеет 17 публикаций, в том числе статьи, опубликованные в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК РФ, а также 1 патент. Основные результаты докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях.

Совокупность полученных соискателем новых знаний, теоретических положений и выводов о путях повышения жаропрочности и сопротивления солевой коррозии имеет существенное значение для материаловедения в области турбостроения, а изложенные в диссертации научно обоснованные технические и технологические решения позволяют повысить ресурс рабочих лопаток жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ и других жаропрочных никелевых сплавов.

Считаю, что диссертационная работа Махорина Владимира Владимировича на тему «Разработка способов повышения жаропрочности и коррозионной стойкости монокристаллического никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ для морских ГТД» представляет собой законченную научно-

