

НИЦ «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ «Прометей»		в ДЕЛО
Вх. № 689/17	«27» 02 2025 г.	№ _____
осн. 5 л.	Прил. — л.	подп. _____

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента на диссертацию**  
**Махорина Владимира Владимировича**

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

Актуальность темы диссертационного исследования

Разработка и научное обоснование способов повышения жаропрочности и коррозионной стойкости монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов является важной задачей современного материаловедения. Связано это с тем, что данные материалы применяются для таких ответственных и, в то же время, наиболее нагруженных изделий газотурбинного двигателя, как рабочая лопатка турбины. Исследования, направленные на разработку способов термомеханического нагружения сжатием и термодиффузионного алитирования сплава марки СЛЖС5-ВИ морского назначения, представляют особый интерес и являются важными и своевременными.

В связи с вышеуказанным, тема рецензируемой работы, в которой решается научная проблема повышения свойств жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ, предназначенного для морских газотурбинных двигателей, является, безусловно, актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертант в своей работе сосредоточился на повышении жаропрочности и коррозионной стойкости жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ посредством разработки соответствующих способов обработки данного материала.

Для достижения поставленной цели автором диссертационной работы решены следующие научные задачи:

- разработан способ термомеханического нагружения (в процессе старения при низких скоростях деформации и сжимающем напряжении) для повышения долговечности при длительном нагружении и снижения скорости ползучести монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ;
- исследовано влияние термомеханического нагружения сжатием на микроструктуру, пористость и характеристики жаропрочности сплава марки СЛЖС5-ВИ;
- разработан способ термодиффузионного алитирования для повышения сопротивления солевой коррозии монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ;
- проведен сравнительный анализ сопротивления солевой коррозии (определена величина скорости коррозии и исследованы поверхностные слои

материала) при температурах (800–900)°С в среде, насыщенной ионами хлора и сульфат-ионами, сплава марки СЛЖС5-ВИ до и после термодиффузионного алитирования со сплавами-аналогами газотурбинных двигателей морского назначения;

– выполнен анализ возможности применения термомеханического нагружения сжатием для рабочих лопаток газотурбинных двигателей;

– разработана методики консервативной оценки напряжений и скорости деформации изделия в оправке в ходе проведения термомеханического нагружения сжатием.

Данные исследования базируются на концепции залечивания усадочной микропористости за счет термомеханического нагружения сжатием и образования защитного интерметаллидного подслоя за счет термодиффузионного алитирования сплава марки СЛЖС5-ВИ. Предлагаемые способы механотермической и химико-термической обработки позволяют значительно повысить жаропрочность и сопротивление солевой коррозии исследуемого сплава.

Разработанные способы повышения жаропрочности и коррозионной стойкости являются новыми для жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ и представляют собой последовательность взаимоувязанных действий и рекомендаций, которая достаточно убедительно обоснована. Целесообразность применения данных способов именно при таких параметрах доказана.

#### Достоверность и новизна научных положений, выводов и практических рекомендаций

Полученные результаты работы, безусловно, отличаются научной новизной, так как для жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ впервые используются предложенные направления повышения жаропрочности и сопротивления солевой коррозии. А перспективность проведения таких исследований достаточно очевидна.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций налицо, так как они основываются на корректном использовании экспериментальных исследований, выполненных с применением апробированных методик, использованием широко применяемых современных методов анализа; проверкой технических решений в лабораторных и промышленных условиях, на тщательном анализе научной литературы и грамотной постановке задачи. Достоверность обеспечивается большим объемом экспериментальных исследований, выполненных в обоснование основных теоретических положений, представленных в диссертации, проверкой технических решений в лабораторных и промышленных условиях.

Технические решения, полученные в ходе диссертационной работы, обладают новизной и защищены патентом.

#### Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Полученные автором результаты представляются значимыми для науки, так как содержат обоснованные предложения, как по концепции повышения

жаропрочности и снижения солевой коррозии за счет залечивания микронесплошностей и снижения диффузионной ликвации, так и в части повышения сопротивления солевой коррозии за счет образования подслоя из интерметаллидов типа  $Ni(Al, Ti)$  и  $Ni_3(Al, Ti)$ , а также твердого никелевого раствора, насыщенного алюминием. Представляется, что полученные результаты могут быть с успехом использованы и для других жаропрочных никелевых сплавов.

Практическая значимость работы состоит в доведении разработанных способов повышения жаропрочности и коррозионной стойкости сплава марки СЛЖС5-ВИ до внедрения:

- разработанный способ программного нагружения сплава марки СЛЖС5-ВИ опробован и внедрен в СПбГТИ (ТУ);
- способ термодиффузионного алитирования сплава марки СЛЖС5-ВИ внедрен в ПАО «ОДК-Сатурн» при химико-термической обработке опытных монокристаллических лопаток.

#### Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы диссертации целесообразно использовать на двигателестроительных предприятиях. Это могут быть, например, ПАО «ОДК-Сатурн», ПАО «ОДК-Климов» и другие.

#### Анализ содержания диссертации

Анализ литературных данных, проведенный в первой главе, позволил автору достаточно убедительно показать причины пониженных свойств монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов и необходимость создания способов для решения этой задачи.

Во второй главе представлены материалы и методы исследования. Для разработки способа повышения жаропрочности (термомеханического нагружения сжатием) был исследован монокристаллический жаропрочный никелевый сплав марки СЛЖС5-ВИ, при разработке же способа повышения коррозионной стойкости исследованию были подвергнуты сплав марки СЛЖС5-ВИ (до и после алитирования), а также различные жаропрочные сплавы (в том числе с защитными покрытиями), характеризующиеся повышенным сопротивлением солевой коррозии.

В третьей главе дается экспериментальное подтверждение повышения жаропрочности (по времени до разрушения) и сопротивления высокотемпературной ползучести за счет проведения термомеханического нагружения сжатием, приводящего к залечиванию усадочной микропористости.

В четвертой главе описаны результаты исследований, направленных на разработку способа повышения сопротивления солевой коррозии сплава марки СЛЖС5-ВИ. Разработанный способ позволил значительно, на несколько порядков, снизить скорость солевой коррозии (по убыли массы), сплава марки СЛЖС5-ВИ по сравнению со сплавом, не подвергнутым химико-метрической обработке, а также поликристаллическими жаропрочными никелевыми сплавами марок 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.

Пятая глава посвящена анализу возможности применения термомеханического нагружения сжатием и термодиффузионного алитирования для рабочих лопаток, в том числе совмещенного.

#### Оценка содержания диссертации и её завершенности

Диссертация содержит все разделы, характерные для научной работы. Обзор известных литературных источников, содержащих информацию, как о пониженных эксплуатационных характеристиках жаропрочных никелевых сплавов, так и о имеющихся методах решения данной проблемы. Основная часть диссертации содержит как предложения по достижению цели исследования, так и результаты применения предложенных способов. Отсюда следует, что содержание диссертации отвечает требованиям, предъявляемым к таким работам, и вполне завершено, исходя из цели исследования.

Содержание исследования полностью соответствует паспорту специальности 2.6.17 – Материаловедение (технические науки).

В автореферате в достаточном объеме изложены основные идеи, содержание и выводы диссертации, степень новизны и практическая значимость полученных результатов.

Автор имеет 17 публикаций по теме диссертации, 4 статьи из которых опубликованы в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК РФ, 1 статья опубликована в издании, входящем в международную базу научного цитирования WoS, Scopus и 1 патент. Диссертация прошла хорошую апробацию. Основные результаты докладывались на 11 всероссийских и международных научно-технических конференциях.

#### Достоинства и недостатки диссертации

Достоинством работы является одновременно фундаментальная и практическая ее направленность.

Диссертация выглядит достаточно законченной, так как полученные результаты доведены до конкретных рекомендаций, документов и внедрены на различных предприятиях.

При ознакомлении с работой возник ряд вопросов к соискателю:

1. Трудно понять, почему автор использует в качестве размерности скорости нагружения и скорости деформации - МПа/с и %/с вместо общепринятых м/с и 1/с.

2. Хотелось бы узнать, как определялись коэффициенты дендритной ликвации (таблица 3.5 на стр.116 диссертации).

3. На стр.140 написано, что «Спектр 2 рисунка 4.11 характеризует участок солевой коррозии (язв), содержащий повышенное количество оксидов хрома...», но в спектре 2 вообще отсутствует хром.

4. Плохо понятно, что такое коэффициент объема оксидов и сульфидов легирующих элементов (рис.4.13 на стр.145 диссертации) и как он определяется.

Кроме того, присутствуют и отдельные опечатки: вероятно, нужно исправить ссылку на рис.4.3 на стр. 125 диссертации на рис.4.2; на стр.60

диссертации, вероятно, нужно исправить «...очагами зарождения (вместо разрушения) эксплуатационных трещин...»; в ссылке [39] фамилию автора следует исправить на В.И. Ливанов; а в ссылке [115] фамилию автора нужно исправить на В.А. Старенченко; ссылка [118] дана без года публикации; в ссылке [108] нужно исправить название журнала «Качество в обработке материалов»; в ссылке [204] следует исправить название «...Испытание металлических материалов»

Отмеченные замечания носят уточняющий характер и не влияют на общее очень хорошее впечатление от представленной работы. Диссертация является законченным научным исследованием, выполненным на высоком уровне, и представляет интерес для реального производства.

#### Заключение

Диссертация Махорина Владимира Владимировича представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований предложены новые научно-обоснованные технические и технологические решения (в области материаловедения), внедрение которых может внести существенный вклад в развитие страны.

По высказанным соображениям работа соответствует требованиям 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 присвоения ему искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение (технические науки).

Официальный оппонент,  
Ведущий научный сотрудник лаборатории Физики разрушения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор

Атрошенко Светлана Алексеевна

Научная специальность, по которой защищена диссертация:  
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Адрес: 199178, Санкт-Петербург, В.О., Большой пр., 61  
Телефон: + 7 (812) 321-47-78 Web-сайт: <http://www.ipme.ru>  
e-mail: [ipmash@ipme.ru](mailto:ipmash@ipme.ru)



*Атрошенко С.В.*  
Помощника Директора  
*Андреева С.И.*  
26 февраля 2025 г.

*Одноразовен*  
*Андреева*  
28.02.2025