

На правах рукописи

УДК 669.245.018.44:620.193

ГРНТИ 55.09.33



Махорин Владимир Владимирович

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОСТИ И
КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА МАРКИ СЛЖС5-ВИ ДЛЯ МОРСКИХ ГТД**

Специальность 2.6.17. – Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии
«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов
«Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Оленин Михаил Иванович

Официальные оппоненты: **Атрошенко Светлана Алексеевна** – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН), ведущий научный сотрудник лаборатории физики разрушения

Вологжанина Светлана Антониновна – доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», профессор кафедры материаловедения и технологии художественных изделий

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования **«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС)**

Защита диссертации состоится **« 26 » марта 2025 г. в 11⁰⁰ ч.** на заседании Диссертационного совета 75.1.018.01, созданного на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте: <http://dissovet.cris-m-prometey.ru/Theses.aspx?type=46>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета 75.1.018.01
д-р техн. наук, профессор



Е.И. Хлусова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В наши дни газотурбинное двигателестроение проходит этап интенсивного развития. Чтобы повысить КПД газотурбинных двигателей, в том числе морского назначения, необходимо добиться повышения температуры в горячем тракте. В связи с этим важнейшей актуальной задачей является разработка новых материалов морского назначения, способных работать при высоких температурах (до 900°C) под нагрузкой в коррозионно-агрессивной среде, и технологий их изготовления. Применение материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками позволит повысить ресурс газотурбинного двигателя при сохранении прежнего значения температуры в горячем тракте.

Наиболее нагруженным элементом газотурбинного двигателя морского назначения является рабочая лопатка, работающая при температуре до 900°C в коррозионно-агрессивной среде сгорающего, загрязненного серой топлива, и морской атмосфере, насыщенной ионами хлора и сульфат-ионами. Рабочие лопатки газотурбинного двигателя должны обладать высокой жаропрочностью и сопротивлением солевой коррозии, именно поэтому в качестве материала лопаток применяются коррозионно-стойкие жаропрочные никелевые сплавы.

Оптимизационные методы, основанные на применении регрессионных уравнений зависимости эксплуатационных характеристик жаропрочных никелевых сплавов от их химического состава, позволили разработать жаропрочные никелевые сплавы с повышенными эксплуатационными характеристиками, такими как жаропрочность и сопротивление солевой коррозии. В частности, в ПАО «ОДК-Сатурн» был предложен химический состав никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ с повышенным содержанием хрома (до 12,7 мас.%), основными легирующими элементами являются кобальт, вольфрам, молибден, титан, тантал, гафний и рений. Для данного материала остаются актуальными вопросы повышения длительной прочности, долговечности при длительном нагружении, сопротивления ползучести и солевой коррозии в связи с необходимостью повышения КПД и ресурса газотурбинного двигателя.

Улучшению прочностных свойств и жаропрочности материалов способствуют такие виды механотермической обработки, как программное нагружение и старение под напряжением, обеспечивающие снижение микропористости, изменение морфологии упрочняющей фазы, дислокационной структуры и кинетики распада твердого раствора. В ряде работ показано положительное влияние программного нагружения и старения под напряжением на свойства мартенситных и мартенситно-старяющихся сталей, а также аустенитных сталей. Применение данных методов для

монокристаллического никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ ранее не осуществлялось. Таким образом, целесообразно разработать способ повышения жаропрочности монокристаллического сплава марки СЛЖС5-ВИ за счет проведения программного нагружения в процессе старения под напряжением. Применение способа, основанного на методах программного нагружения и старения под напряжением (термомеханического нагружения сжатием), положительно скажется на повышении характеристик жаропрочности металла лопаток, что в области турбостроения является весьма важной задачей современного материаловедения.

Высокое сопротивление материала рабочей лопатки солевой коррозии может быть достигнуто за счет образования поверхностного слоя, легированного алюминием, хромом, кремнием или титаном. Для сплава марки СЛЖС5-ВИ, обогащенного хромом (по сравнению с авиационными сплавами), наиболее подходящим элементом для легирования поверхностного слоя является алюминий. Применение алюминия в качестве элемента для легирования поверхности приводит к формированию гетерофазной оксидной пленки, обеспечивающей наибольшую защиту от солевой коррозии, состоящей из оксидов алюминия, хрома и их шпинелей, а также поверхностных слоев, содержащих интерметаллиды и твердый раствор алюминия в никелевой основе.

Легирование поверхности данного сплава другими химическими элементами может сопровождаться следующими отрицательными явлениями: хром образует хрупкие фазы (стабильных нитридов хрома), кремний – легкоплавкие эвтектики, происходит снижение пластичности и значений температур фазовых превращений, а также ускорение процессов коагуляции упрочняющей γ' -фазы, титан – идет выделение оксидов с повышенной проницаемостью кислорода и сульфидов титана с большим значением коэффициента объема, приводящих к растрескиванию защитного слоя.

С учетом того, что конструкция лопаток сложной конфигурации поляя, наиболее приемлемой технологией получения защитного слоя, обладающего повышенным сопротивлением солевой коррозии, как с наружной, так и с внутренней стороны лопатки, является насыщение поверхности через газовую фазу, в частности, термодиффузионная химико-термическая обработка (термодиффузионное алитирование), что позволяет получить диффузионный слой равномерной толщины с коэффициентом линейного расширения, близким к подложке металла, при этом снижается риск развития трещин и разрушения защитного слоя.

О термодиффузионном алитировании никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ сведений не было обнаружено. Применение же данного способа должно привести к повышению сопротивления солевой коррозии металла лопаток, что и является

значимой целью работы современных инженеров-материаловедов в области турбостроения.

Итак, необходимо разработать способ повышения сопротивления солевой коррозии для монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ, а также провести исследования по влиянию применения способа термодиффузионного алитирования на сопротивление солевой коррозии сплава марки СЛЖС5-ВИ.

Из анализа литературных источников можно сделать предположение, что применение методов механотермической обработки (термомеханического нагружения сжатием) и химико-термической обработки поверхностного слоя (термодиффузионного алитирования) приведет к повышению длительной прочности, долговечности при длительном нагружении, сопротивления ползучести и солевой коррозии в среде с повышенным содержанием ионов хлора и серы жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ.

Цель работы: разработка 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.

Для достижения заявленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработка способа 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.

2. Исследование влияния термомеханического нагружения сжатием на микроструктуру, пористость и характеристики жаропрочности сплава марки СЛЖС5-ВИ.

3. Разработка способа термодиффузионного алитирования для повышения сопротивления солевой коррозии монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ.

4. Проведение сравнительного анализа сопротивления солевой коррозии (величины скорости коррозии и исследования поверхностных слоев) 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.

5. Анализ возможности применения термомеханического нагружения сжатием для рабочих лопаток газотурбинных двигателей.

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

Объектами исследования являются:

- при разработке способа термомеханического нагружения: монокристаллический жаропрочный никелевый сплав марки СЛЖС5-ВИ;
- при разработке способа термодиффузионного алитирования: монокристаллический жаропрочный никелевый сплав марки СЛЖС5-ВИ (до и после термодиффузионного алитирования), а также сплавы-аналоги с повышенным сопротивлением солевой коррозии – поликристаллические жаропрочные никелевые сплавы 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, используемые для проведения сравнительного анализа сопротивления солевой коррозии данных сплавов и сплава марки СЛЖС5-ВИ после термодиффузионного алитирования.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись современные методы исследования структуры и свойств материалов: оптическая и электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, рентгеноструктурный анализ, испытания для определения механических свойств, коррозионные испытания в среде, насыщенной ионами хлора и сульфат-ионами, при высоких температурах.

Достоверность результатов, основных положений и выводов доказана большим объемом экспериментальных исследований, выполненных в обоснование основных теоретических положений, представленных в диссертации, с применением современных методов исследования характеристик материалов и обработки экспериментальных данных, проверкой технических решений в лабораторных и промышленных условиях.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Способ повышения долговечности при длительном нагружении растяжением и снижения скорости ползучести монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ за счет применения метода термомеханического нагружения сжатием.
2. Влияние применения термомеханического нагружения сжатием на микропористость и характеристики жаропрочности монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ.
3. Способ повышения сопротивления солевой коррозии при температурах (800–900)°С жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ за счет применения метода термодиффузионного алитирования.

4. Результаты сравнительного анализа сопротивления солевой коррозии сплава марки СЛЖС5-ВИ после термодиффузионного алитирования с сопротивлением жаропрочных никелевых сплавов марок СЛЖС5-ВИ (без защитного слоя), ЧС70-ВИ, ЧС88У-ВИ, ВЖЛ2-ВИ, ЭП742-ИД, ЭП648-ВИ с металлическим покрытием (подслоем) ПВ-НХ16Ю6Ит и керамическим покрытием ЦрОИ-7.

5. Методика консервативной оценки напряжений и скорости деформации изделия в оправке в ходе проведения термомеханического нагружения сжатием.

Личный вклад автора заключается в следующем:

- постановка задач исследования;
- выдвижение основных идей, их научное обоснование и разработка программ научно-технических исследований;
- получение основных экспериментальных данных по работе, анализ, интерпретация полученных результатов;
- публикация результатов научных исследований.

Научная новизна:

1. Установлено, что термомеханическое нагружение сжатием в условиях длительного нагрева жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ приводит к увеличению сопротивления деформированию и разрушению, в частности, снижается скорость ползучести более чем в 2,5 раза, при длительном нагружении растяжением образцов увеличивается долговечность более чем в 2 раза, увеличивается пластичность (относительное удлинение после разрыва и относительное сужение после разрыва) при испытании на растяжение более чем в 1,5 раза, увеличивается доля вязкой составляющей более чем в 2 раза в изломах образцов, подвергнутых испытанию на длительную прочность.

2. Показано, что повышение характеристик жаропрочности сплава марки СЛЖС5-ВИ, происходящее при сжимающих напряжениях и высоких температурах, обусловлено:

- снижением усадочной микропористости не менее чем в 2 раза за счет направленного протекания диффузионных процессов;
- выравниванием химического состава (снижением коэффициента дендритной ликвации для рения и вольфрама) за счет активации диффузии.

3. 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. В частности, снижается скорость солевой коррозии (определенная по убыли массы) сплава марки СЛЖС5-ВИ при температуре 900°С по сравнению со сплавом марки СЛЖС5-ВИ, не

подвергнутым термодиффузионному алитированию, на 2 порядка и на 2–4 порядка по сравнению с сплавами-аналогами.

Практическая значимость работы:

1. Разработан способ термомеханического нагружения, заключающийся в нагружении сжатием вдоль кристаллографического направления [001], проводимого при температурах до 900°C, пониженной скорости деформации (не более 10⁻⁴%/с) и уровне напряжений, не превышающем 0,7 σ_T (T). Данный способ обеспечивает повышение более чем в 2 раза долговечности при длительном нагружении растяжением и снижение более чем в 2,5 раза скорости ползучести при температуре 900°C монокристаллического никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ по сравнению с методом термической обработки без термомеханического нагружения сжатием. Разработана и внедрена в СПбГТИ(ТУ) технологическая инструкция (№ ТИ.25221.00001-2023) «Программное нагружение изделий из монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ» (акт об использовании в СПбГТИ(ТУ) результатов диссертационной работы).

2. Разработан способ термодиффузионного алитирования сплава марки СЛЖС5-ВИ, обеспечивающий снижение скорости солевой коррозии сплава марки СЛЖС5-ВИ, определенной по убыли массы, на 2–4 порядка при температуре 900°C по сравнению со сплавом марки СЛЖС5-ВИ без защитного слоя и сплавами-аналогами (другими жаропрочными никелевыми сплавами газотурбинных двигателей морского назначения): 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.

3. Способ термодиффузионного алитирования сплава марки СЛЖС5-ВИ внедрен при проведении термодиффузионного алитирования опытных монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей морского назначения из жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ на предприятии-изготовителе рабочих лопаток из данного сплава – ПАО «ОДК-Сатурн» (акт внедрения ПАО «ОДК-Сатурн»).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались: на XVII, XVIII, XIX, XX, XXI конференциях молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2018 г., 2019 г., 2022 г., 2023 г., 2024 г.); научной конференции «Неделя науки СПбПУ» (г. Санкт-Петербург, 2018 г., 2019 г.); Международной научной конференции «Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2021)» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); VIII Всероссийском молодежном научном форуме «Open Science 2021» (г. Гатчина, 2021 г.), научной конференции Неделя науки СПбГМТУ (г. Санкт-

Санкт-Петербург, 2022 г.), 22-й научно-технической конференции «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения» (г. Москва, 2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из них 4 в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, получен 1 патент РФ. В изданиях, входящих в международную базу научного цитирования WEB of SCIENCE и SCOPUS, опубликована 1 статья.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе 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 и сопротивления солевой коррозии монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для лопаток газотурбинных двигателей морского назначения.

В частности, рассмотрены метод программного упрочнения, обеспечивающий залечивание микропор и микротрещин, а также метод старения под напряжением, обеспечивающий изменение морфологии упрочняющей фазы в дисперсионно-твердеющих сплавах. Совмещенное применение данных методов (термомеханическое нагружение сжатием) может обеспечить снижение скорости ползучести и увеличение длительной прочности.

Кроме того, был рассмотрен метод термодиффузионного алитирования, позволяющий осуществить получение защитного слоя, стойкого к солевой коррозии, на поверхности высокохромистого жаропрочного никелевого сплава, включающего в себя гетерофазную оксидную пленку на поверхности внешнего слоя, состоящей из оксидов алюминия, хрома и их сложных оксидов (шпинелей), а также образованию внутренней зоны внешнего слоя, содержащей интерметаллиды и твердый раствор алюминия в никелевой основе, как с наружной, так и внутренней стороны лопаток сложной конфигурации.

Во второй главе рассмотрены материалы и методики исследования.

При разработке способа термомеханического нагружения сжатием и способа термодиффузионного алитирования проводились исследования на образцах из монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ, изготовленных по методу Бриджмена – Стокбаргера в печи направленной кристаллизации.

Для разработки способа термомеханического нагружения сжатием определялся температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) до температуры 900°C сплава марки СЛЖС5-ВИ и стали марки 07X15H4M2T на dilatометре DIL 402 C.

Оценка значений напряжений (возникающих в оправке и образце в ходе проведения термомеханического нагружения сжатием), а также скорости деформации, осуществлялась путем фиксации образца из стали марки 07X15H4M2T в деформационной системе (корундовые пуансоны) dilatометра DIL 805 за счет запрета изменения деформации, устанавливаемого в программе испытания на dilatометре, и последующей фиксации температурно-временной зависимости напряжений на образце при нагреве. Консервативность оценки обеспечивалась за счет определения максимальных напряжений, которые образец из стали марки 07X15H4M2T может «выдержать» (оказать ответное воздействие на пуансоны деформационной системы, препятствующие расширению стального образца).

Измерение модуля нормальной упругости сплава марки СЛЖС5-ВИ и стали марки 07X15H4M2T осуществлялось в температурном диапазоне от 20°C до 540°C по методу динамического-механического анализа (методу вынужденных нерезонансных колебаний при изгибе).

Характеристики кратковременной прочности и пластичности определяли на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z050. Испытания на длительную прочность и ползучесть проводились на машинах модели АИМА-5-2 при температурах 850°C, 900°C и 950°C с планируемыми временем до разрушения до 1000 ч.

При разработке способа термодиффузионного алитирования объектами исследования являлись монокристаллический жаропрочный никелевый сплав марки СЛЖС5-ВИ (до и после термодиффузионного алитирования), а также сплавы-аналоги с повышенным сопротивлением солевой коррозии – поликристаллические жаропрочные никелевые сплавы 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. Исследование сопротивления солевой коррозии сплава марки СЛЖС5-ВИ проводилось путем проведения ускоренных сравнительных тигельных испытаний,

имитирующих процесс солевой коррозии, при температурах 800 и 900°C в расплаве солей 75% Na₂SO₄-25% NaCl в течение 24 часов.

С целью определения влияния термомеханического нагружения сжатием на микропористость сплава марки СЛЖС5-ВИ при комнатной температуре было проведено измерение удельного электрического сопротивления с использованием Омметра специализированного типа МСЗ-ИФМ, измерение плотности с использованием электронных лабораторных весов ХР 204S производства фирмы Mettler Toledo AG, а также измерение методом физической сорбции с использованием автоматического анализатора площади поверхности и пористости Tristar 3020, производства Micromeritics Instrument Corporation.

Резка, шлифование и полировка образцов с целью получения микрошлифов проводились на оборудовании пробоподготовки марки АТМ-1. С целью устранения возможности термического влияния на поверхность исследуемого жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ в процессе изготовления шлифов обеспечивали ограничение скорости резки и непрерывную подачу охлаждающей жидкости. Электрохимическое травление образцов из сплава марки СЛЖС5-ВИ осуществлялось в водном растворе азотной кислоты (с объемной долей азотной кислоты в воде, равной 9%) при плотности тока, равной 0,1 А/см².

Исследования микроструктуры (микропористости, неметаллических включений, дендритов и междендритных участков, фрактографические исследования) образцов жаропрочных никелевых сплавов методом растровой электронной микроскопии, а также локальный рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) элементного состава структурных элементов материалов проводились на базе сканирующего металлографического микроскопа Tescan Vega, оснащенного рентгеновским энергодисперсным спектрометром INCA X-MaX-50. Исследование микроструктуры сплава марки СЛЖС5-ВИ методом оптической микроскопии проводилось на инвертированном оптическом микроскопе AxioObserver.3.

Изображения, полученные при помощи сканирующего микроскопа, подвергались цифровой обработке в свободном ПО ImageJ, разработанном сотрудниками National Institutes of Health, а также в Thixomet.

В третьей главе рассмотрены разработка способа повышения жаропрочности и исследование его влияния на служебные характеристики жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ.

Образцы из сплава марки СЛЖС5-ВИ с целью выравнивания химического состава, образования однофазного твердого никелевого раствора (γ -фазы) и последующего выделения упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы в матрице

твердого γ -раствора, были подвергнуты термической обработке по режиму: гомогенизационный отжиг, совмещенный с закалкой, и двухступенчатое старение.

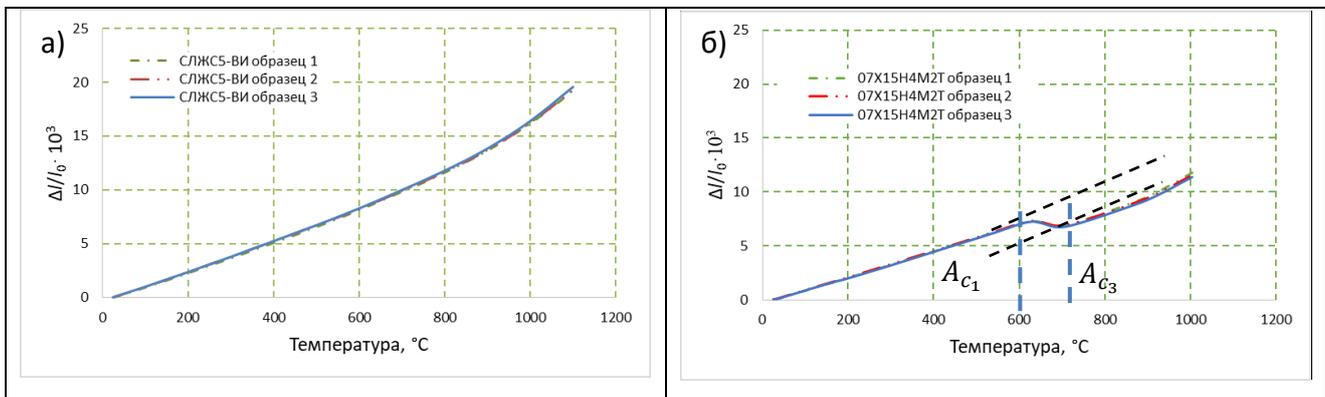
Вторая ступень старения образцов осуществлялась при нагреве до температуры 900°C со скоростью $80^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ и последующей выдержке в течение 16 ч на воздухе двумя различными путями:

- без нагрузки;
- под сжимающим напряжением вдоль оси $[001]$ (соответствующей оси лопатки турбины).

Направление и знак напряжения, реализуемого в процессе термомеханического нагружения, выбраны на основании проведенного исследования состояния вопроса и исходя из следующих предположений:

- образование упрочняющей γ' -фазы в процессе старения их с вытянутой вдоль вертикальной оси образца формой (было сделано предположение, что за счет изменения морфологии γ' -фазы и образования «текстуры проката» можно замедлить рафтирование γ' -фазы при дальнейшем проведении испытаний на длительную прочность и снизить скорость ползучести);
- растворение пор и залечивание микротрещин.

Термомеханическое нагружение сжатием осуществлялось при помощи оправки, изготовленной из стали марки 07X15H4M2T с более низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), по сравнению с исследуемым материалом образцов (рисунок 1).



Δl – изменение длины при нагреве, мм; l_0 – начальная длина образца, мм

Рисунок 1 – Дилатометрические кривые сплава марки СЛЖС5-ВИ (а) и стали марки 07X15H4M2T (б), полученные без нагружения

В соответствии с консервативной оценкой напряжений образца в оправке при проведении термомеханического нагружения сжатием величина максимальных напряжений в рабочей части образца в ходе старения, совмещенного с термомеханическим нагружением под сжимающим напряжением, достигает максимума при температуре окончания обратного мартенситного превращения

(500 МПа, что соответствует $0,7\sigma_T(900^\circ\text{C})$), понижается в ходе дальнейшего нагрева под старение (до 270 МПа, что соответствует $0,37\sigma_T(900^\circ\text{C})$) и снижается до нуля за счет релаксации в ходе выдержки при температуре старения (рисунок 2).

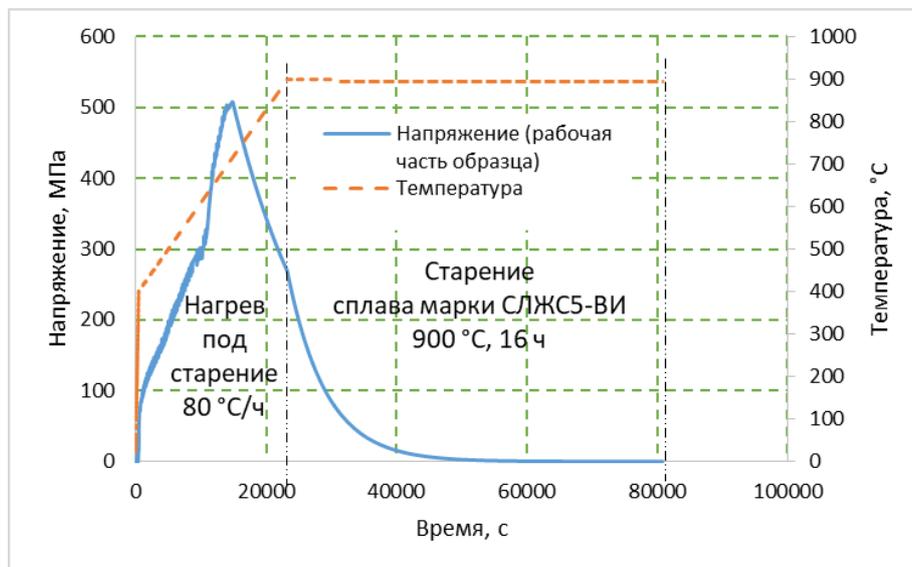


Рисунок 2 – Максимальное напряжение в рабочей части образца из сплава марки СЛЖС5-ВИ

Значения скоростей нагружения и деформации сплава марки СЛЖС5-ВИ при проведении термомеханического нагружения сжатием в процессе старения, определенные на основании полученных зависимостей на рисунке 2 и при скорости нагрева печи под старение – $80^\circ\text{C}/\text{ч}$, составили не более $0,1 \text{ МПа}/\text{с}$ и $1 \cdot 10^{-4}\%/\text{с}$ соответственно.

Исходя из вышеизложенного, предлагаемый способ термомеханического нагружения сжатием сплава марки СЛЖС5-ВИ полностью соответствует рекомендованному условию проведения программного нагружения – напряжения ограничиваются диапазоном не более $0,7\sigma_T(T)$, а скорость деформации не превышает $10^{-4}\%/\text{с}$.

Механические свойства образцов из сплава марки СЛЖС5-ВИ при температурах 20°C и 900°C после старения без напряжения и термомеханического нагружения сжатием представлены в таблице 1. Для сплава марки СЛЖС5-ВИ наблюдается значительное повышение пластических характеристик (относительного удлинения δ_5 – более чем в 1,7 раза, относительного сужения ψ – более чем в 1,6 раза при температурах 20°C и 900°C), с сохранением, в пределах погрешности, прочностных характеристик (временного сопротивления σ_b , предела текучести σ_T) за счет применения термомеханического нагружения.

Кроме того, отмечено, что старение сплава марки СЛЖС5-ВИ, совмещенное с термомеханическим нагружением сжатием, приводит к увеличению разности между временным сопротивлением и пределом текучести сплава марки СЛЖС5-ВИ на (60–

70) МПа, что указывает на повышение надежности металла (данное соотношение является важным показателем, характеризующим запас пластичности, его высокое значение способствует повышению коэффициента запаса прочности) после проведения термомеханического нагружения сжатием.

Таблица 1 – Механические свойства монокристаллического никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ после старения без напряжения и термомеханического нагружения сжатием*

Вид термической обработки	t	σ_T	σ_B	δ_5	ψ	$\sigma_B - \sigma_T$
	°С	МПа		%		МПа
Старение без напряжения при температуре 900°С	20	1058	1102	10,0	10	44
	900	720	788	14,0	33	68
Термомеханическое нагружение сжатием при температуре 900°С	20	932	1046	17,6	20	114
	900	736	813	23,5	54	108

* – средние значения на основании результатов испытаний 3-х образцов.

С целью определения возможности повышения жаропрочности и работоспособности материала рабочих лопаток турбин из сплава СЛЖС5-ВИ при их длительной эксплуатации за счет термомеханического нагружения сжатием были проведены испытания на длительную прочность и ползучесть.

В результате исследования установлено значительное превосходство сплава марки СЛЖС5-ВИ, подвергнутого термомеханическому нагружению сжатием, по сравнению с тем же сплавом, состаренным без напряжения (рисунок 3). Для прогнозирования величин напряжений, необходимых для разрушения сплава СЛЖС5-ВИ, состаренного без напряжения и подвергнутого термомеханическому нагружению сжатием, на оси абсцисс были построены проекции линий, полученных по результатам испытаний на длительную прочность (обработка экспериментальных данных проводилась методом наименьших квадратов) при напряжении 175 МПа (минимальном напряжении, используемом при проведении испытаний).

С учетом того, что для двигателя М70ФРУ-2 межремонтный период составляет 4000 ч, а рабочая температура материала рабочих лопаток турбины двигателей семейства М70 составляет 900°С, необходимо, по крайней мере, достижение значения параметра Ларсона – Миллера $LMP_p = 27,685$, чтобы иметь возможность применения сплава в качестве материала рабочих лопаток для двигателя М70ФРУ-2. Величина параметра Ларсона – Миллера при напряжении 175 МПа составила для сплава, состаренного без напряжения, $LMP_{BH} = 27,404$, что соответствует времени до разрушения 2302 ч при температуре испытания 900°С и действующем напряжении 175 МПа, тогда как для сплава, подвергнутого термомеханическому нагружению сжатием – $LMP_{ПУ} = 27,847$, что соответствует времени до разрушения 5498 ч при тех же условиях испытаний.

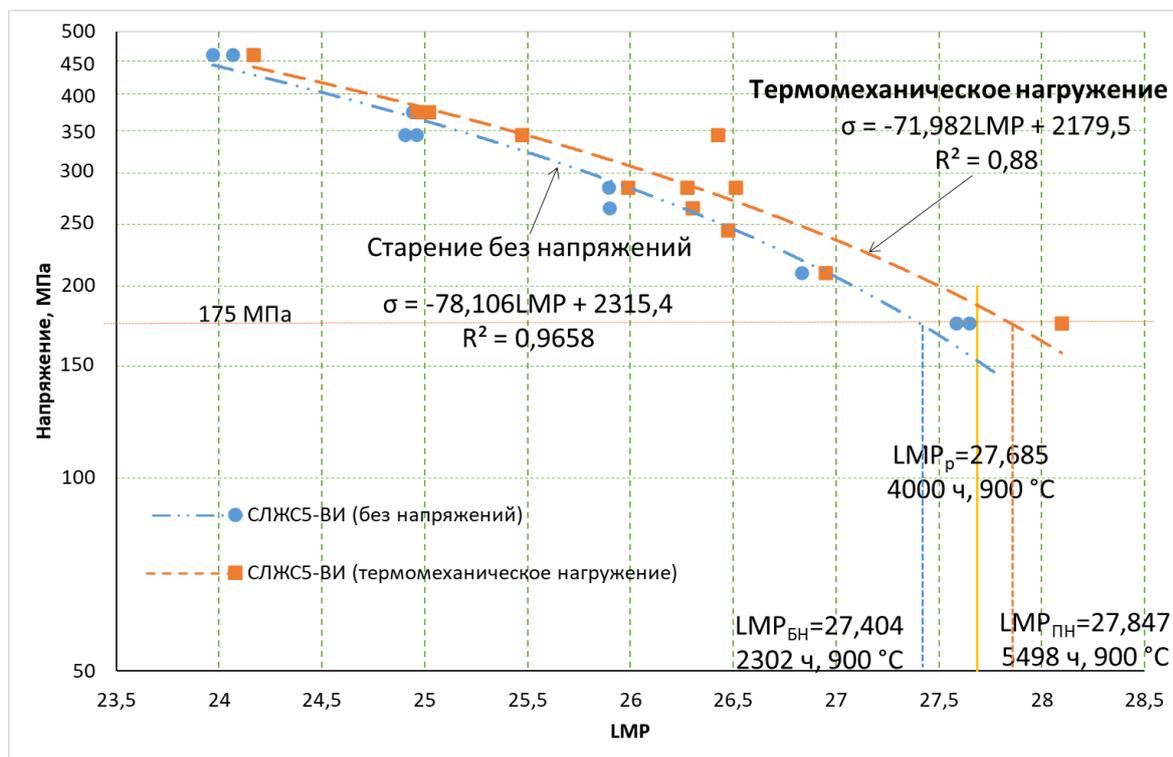


Рисунок 3 – Параметрические кривые Ларсона – Миллера для сплава марки СЛЖС5-ВИ

При проведении испытаний на ползучесть было установлено снижение в 2,5 раза скорости ползучести (на установившейся стадии) сплава марки СЛЖС5-ВИ, подвергнутого термомеханическому нагружению сжатием при температуре испытания 900°C и действующем напряжении 285 МПа по сравнению с образцом из того же сплава, не подвергнутого термомеханическому нагружению сжатием. Так, для образца, подвергнутого термомеханическому нагружению сжатием и разрушившегося после 252 ч, скорость ползучести на установившейся стадии оказалась равной 0,06%/ч, а для образца, состаренного без напряжения и разрушившегося после 119 ч – 0,153%/ч. Кроме того, было установлено более чем пятикратное снижение скорости ползучести (на установившейся стадии) сплава марки СЛЖС5-ВИ при температуре 950°C и действующем напряжении 175 МПа, подвергнутого термомеханическому нагружению сжатием, по сравнению с образцами, не подвергнутыми термомеханическому нагружению сжатием в процессе старения (рисунок 4). Долговечность при длительном нагружении (время до разрушения) при данных условиях проведения испытаний также увеличилась более чем в 2 раза для сплава марки СЛЖС5-ВИ после проведения термомеханического нагружения.

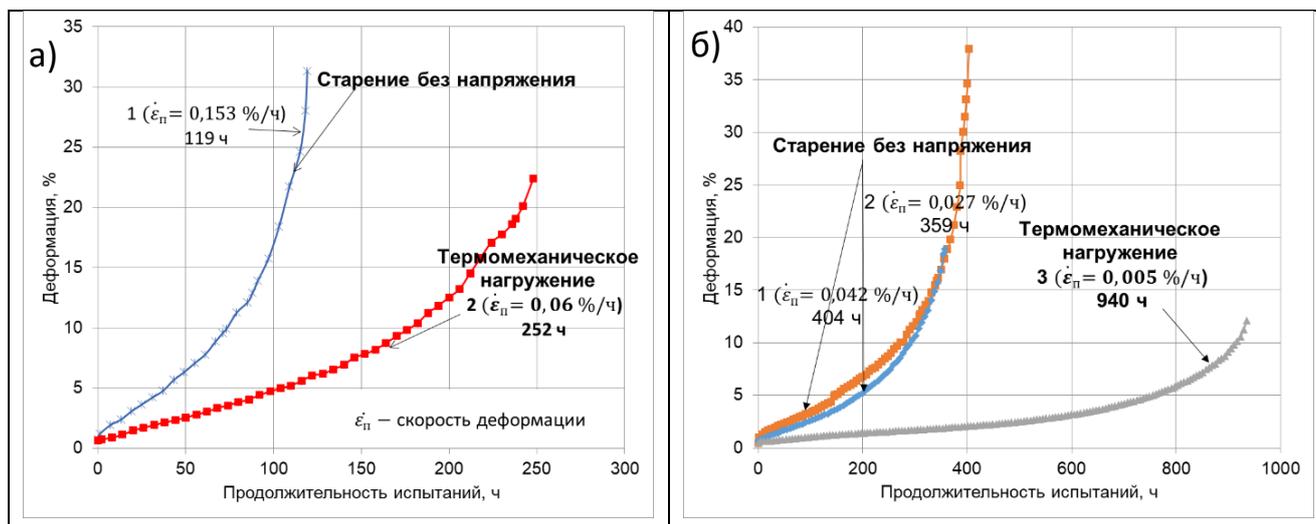


Рисунок 4 – Кривые ползучести сплава марки СЛЖС5-ВИ

а) при температуре 900°C и напряжении 285 МПа

б) при температуре 950°C и напряжении 175 МПа

С целью установления причин повышения длительной прочности, долговечности при длительном нагружении растяжением, снижения скорости ползучести и повышения пластических характеристик после применения термомеханического нагружения сжатием при старении монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ были проведены исследования микроструктуры и фрактографические исследования.

Фрактографический анализ образцов из сплава марки СЛЖС5-ВИ показал (рисунок 5), что очагами разрушения выступают «ямки» (вскрытые поверхности микропустот, образующиеся в процессе пластического течения металла, а также при отделении неметаллических включений от металлической матрицы, о чем свидетельствуют рубцы деформации, расходящиеся от очага зарождения к границе дендритной ячейки, а также визуально различимые включения у некоторых ямок), зона инициации разрушения переходит в зону квазискола, ограниченную междендритным пространством. При этом было установлено, что термомеханическое нагружение сжатием приводит к образованию значительного количества вязкой составляющей (до 13,2%, рисунок 5б) в междендритном пространстве в изломах образцов, подвергнутых испытанию на длительную прочность при температуре 900°C и напряжении 345 МПа, по сравнению с образцами, состаренными без напряжения (доля вязкой составляющей – до 5,3%, рисунок 5а) в сплаве марки СЛЖС5-ВИ, микропористость в междендритном пространстве которого приводит к локализации деформации на границах дендритных ячеек, и как следствие, снижению характеристик жаропрочности.

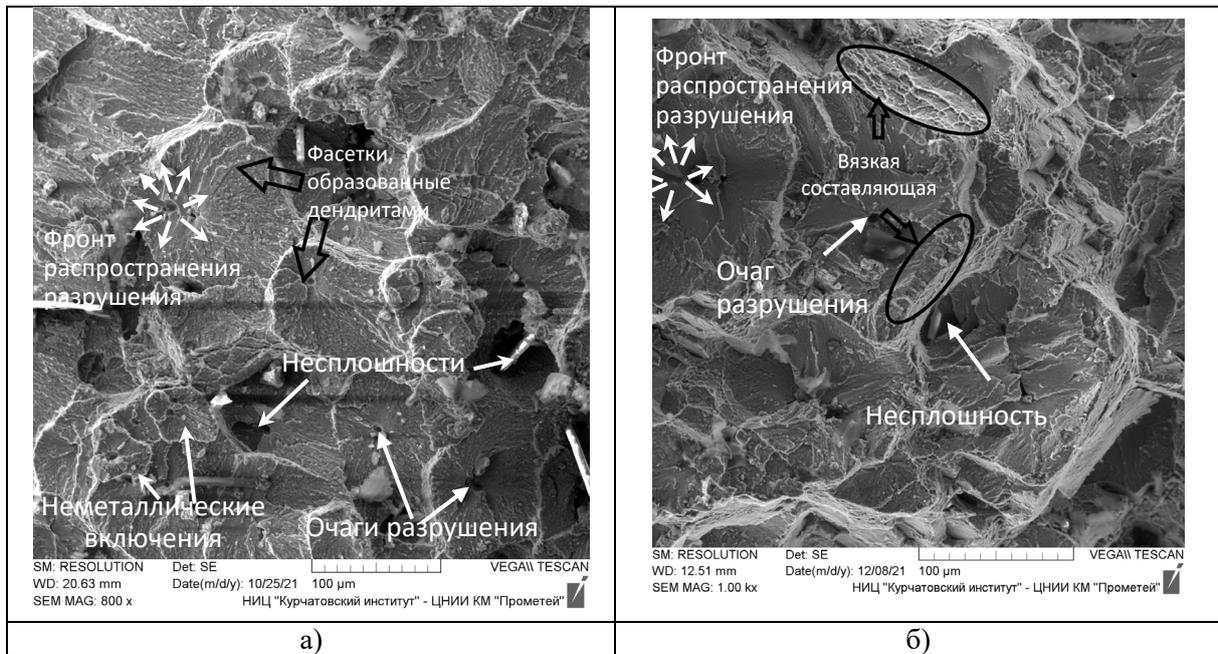


Рисунок 5 – Вид поверхности излома образцов сплава марки СЛЖС5-ВИ после испытания на длительную прочность при температуре 900°C и напряжении 345 МПа
 а) старение без напряжений; б) термомеханическое нагружение сжатием

Последующее исследование микроструктуры сплава марки СЛЖС5-ВИ позволило установить, что термомеханическое нагружение сжатием приводит к снижению микропористости не менее чем в 2 раза (рисунок 6) и, как следствие, повышению разупорядоченности таких структурных элементов, как микропоры, карбиды и неметаллические включения в совокупности.

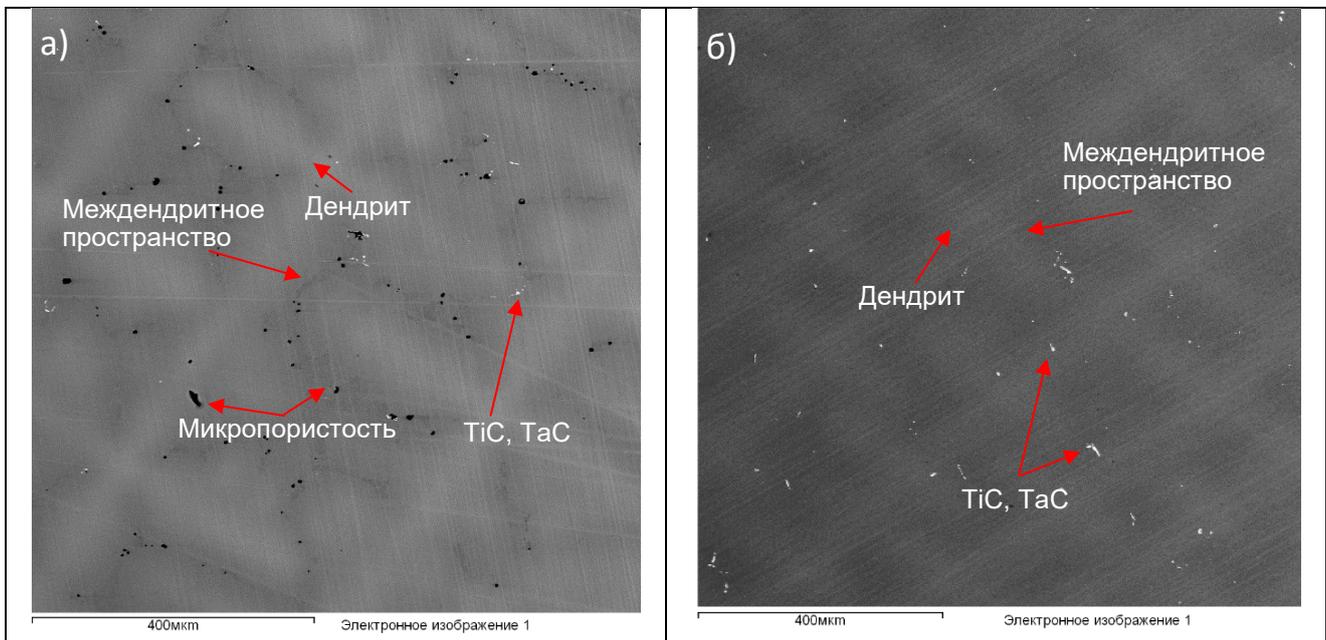


Рисунок 6 – Микроструктура сплава марки СЛЖС5-ВИ, состаренного без напряжений (а) и подвергнутого термомеханическому нагружению сжатием (б)

Кроме того, было установлено, что термомеханическое нагружение сжатием сплава марки СЛЖС5-ВИ приводит к снижению коэффициента дендритной ликвации

для рения с 1,65 до 1,43 (на 13%), а для вольфрама с 1,25 до 1,07 (на 14%) (таблица 2), что позволяет высказать предположение о реализации механизма снижения микропористости за счет протекания диффузионных процессов.

Таблица 2 – Коэффициенты ликвации легирующих элементов сплава марки СЛЖС5-ВИ

Вид термической обработки	Коэффициенты ликвации								
	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	Ta	W	Re
Старение без напряжения	0,90	0,86	1,07	1,02	0,94	1,08	0,89	1,25	1,65
Термомеханическое нагружение	0,93	0,97	1,01	1,03	0,97	1,06	1,00	1,07	1,43

Для проверки гипотезы о влиянии термомеханического нагружения на морфологию упрочняющей γ' -фазы были проведены исследования структур высокого разрешения сплава марки СЛЖС5-ВИ, подвергнутого термомеханическому нагружению сжатием и состаренного без напряжения, представленных на рисунке 7, на котором видна упрочняющая γ' -фаза. Морфология упрочняющей γ' -фазы представляет собой равноосные сфероиды (поверхности вращения в трехмерном пространстве, образованные при вращении эллипса вокруг одной из его главных осей).

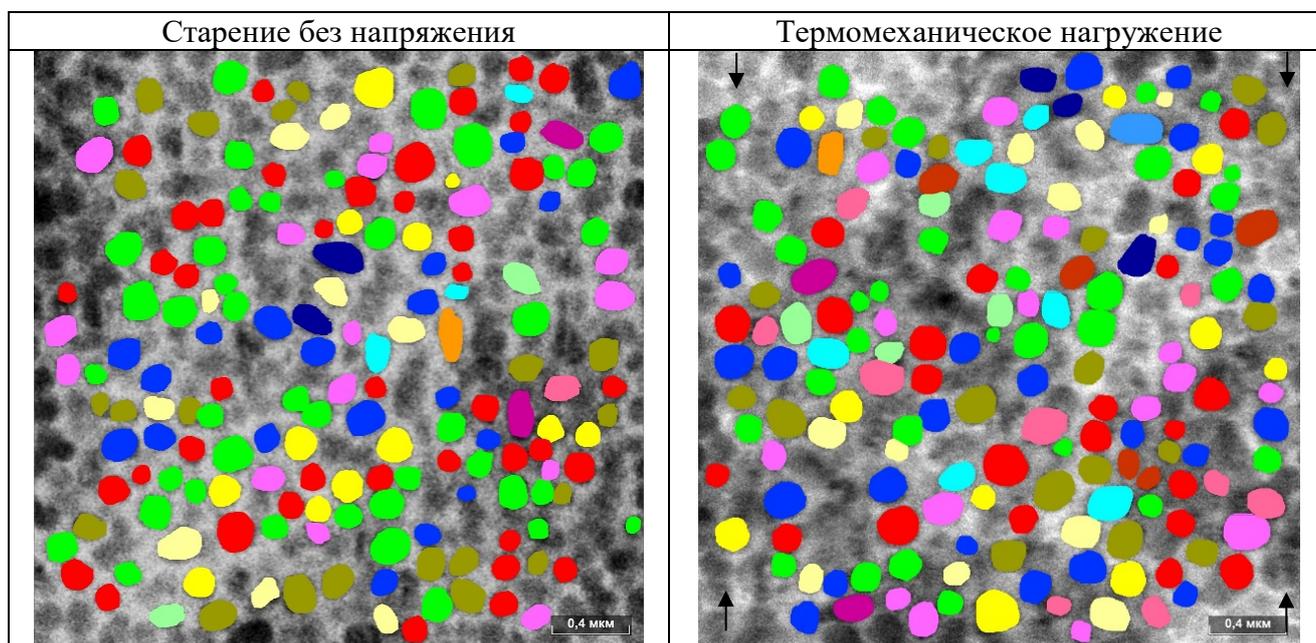


Рисунок 7 – Растровые электронные микроскопические изображения структуры высокого разрешения сплава марки СЛЖС5-ВИ после старения (продольные шлифы, пример выделения γ' -фазы в программе Thixomet)

Цифровая обработка в программе Thixomet изображений, представленных на рисунке 7, позволила установить, что сжимающие напряжения при старении в направлении вдоль оси образца не оказывают влияния на морфологию и размер интерметаллидной γ' -фазы.

В четвертой главе представлена разработка способа повышения сопротивления солевой коррозии и исследование его влияния на сопротивление солевой коррозии сплава марки СЛЖС5-ВИ.

На основании исследования образцов из сплава марки ЭП648-ВИ с защитными покрытиями после коррозионных испытаний в солевом расплаве в течение 24 ч при температурах до 900°C, была подтверждена целесообразность разработки способа повышения сопротивления солевой коррозии для сплава марки СЛЖС5-ВИ, при этом учитывалось, что для жаропрочных никелевых сплавов, применяемых в газотурбинных двигателях морского назначения, при температурах выше 790°C необходимо обеспечение защиты поверхности сплавов от коррозионного воздействия.

По результатам анализа различных методов повышения сопротивления солевой коррозии был предложен способ термодиффузионного алитирования для повышения сопротивления солевой коррозии сплава марки СЛЖС5-ВИ. Термодиффузионное алитирование образцов из сплава марки СЛЖС5-ВИ проводилось в контейнере с шихтой, состоящей из 89% ферроалюминия (50% Fe + 50% Al), 1% йодистого аммония и 10% глинозема. Температура алитирования составляла (900±5)°C. Алитирование проводилось в течение 2 ч после прогрева контейнера (общее время нагрева, с учетом прогрева и последующей выдержки, составило 13 ч).

По результатам ускоренных сравнительных испытаний была построена температурная зависимость скорости коррозии образцов из сплава марки СЛЖС5-ВИ с алитированным слоем и без слоя, а также сплавов-аналогов (жаропрочные никелевые сплавы 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, используемые в качестве материалов узлов газотурбинных двигателей морского назначения, рисунок 8).

Как видно на рисунке 8, при температуре 800°C скорость солевой коррозии, определенная весовым методом, для сплава марки СЛЖС5-ВИ с защитным слоем соизмерима со сплавом без слоя и на 1–3 порядка меньше скорости солевой коррозии сплавов-аналогов, тогда как при рабочей температуре 900°C алитированный слой обеспечивает увеличение сопротивления солевой коррозии на 2 порядка, а также на 2–4 порядка по сравнению с другими жаропрочными никелевыми сплавами, применяемыми в качестве материалов газотурбинных двигателей морского назначения.

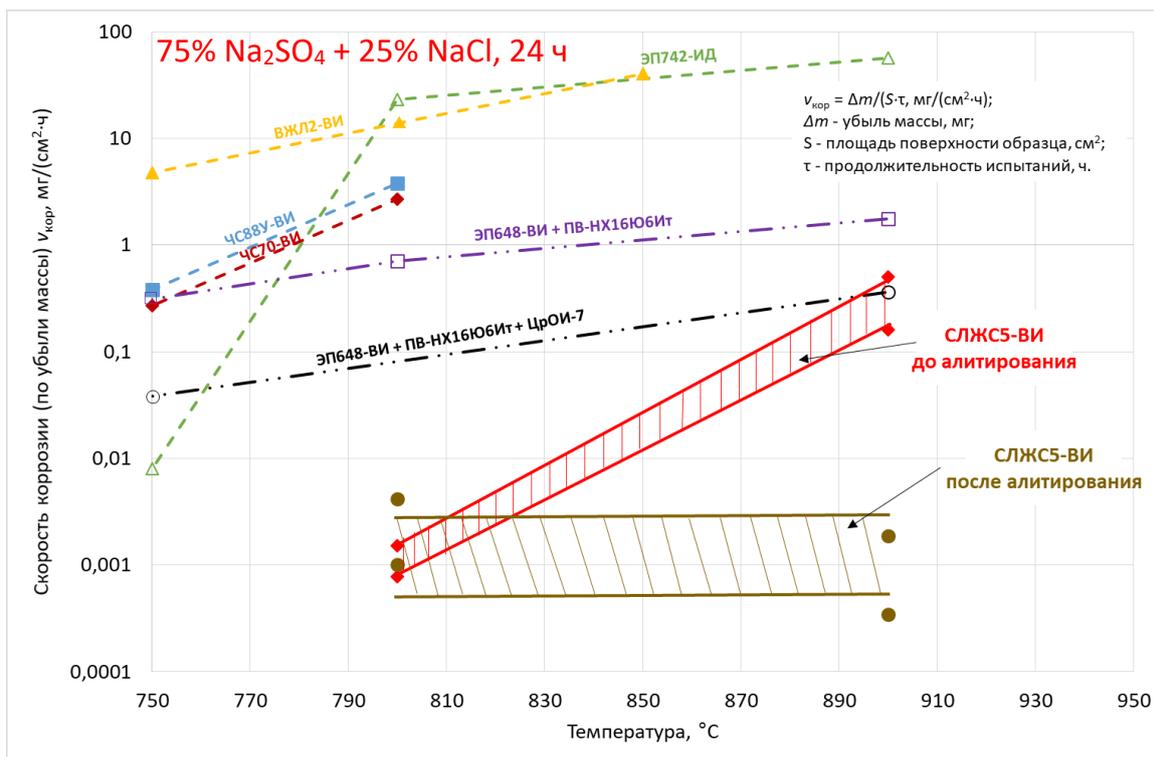


Рисунок 8 – Скорость коррозии (по убыли массы) различных никелевых сплавов в зависимости от температуры ускоренных сравнительных испытаний в расплаве солей

Обнаружено, что основными повреждениями, вызванными солевой коррозией и выявленными при испытании сплава марки СЛЖС5-ВИ без защитного алитированного слоя в солевом расплаве состава 75% Na_2SO_4 + 25% NaCl в течение 24 ч (рисунок 9а), были:

- разлегирование поверхности сплава за счет «ухода» алюминия в продукты коррозии;
- проникновение продуктов коррозии под защитную поверхность по трещинам и диффузионным каналам;
- повреждение оксидной пленки, вызванное большим объемным эффектом образования оксидов и сульфидов;
- локальные коррозионные повреждения.

Повышение температуры испытания с 800°C (рисунок 9а) до 900°C (рисунок 9б) приводило к интенсификации коррозионных процессов, в частности, было отмечено появление диффузионной микропористости (вызванной увеличением скорости диффузии легирующих элементов), повышение глубины дефектного слоя, а также увеличение локализации коррозионных повреждений с проникновением очагов вглубь подложки – все это нашло отражение при определении скорости коррозии.

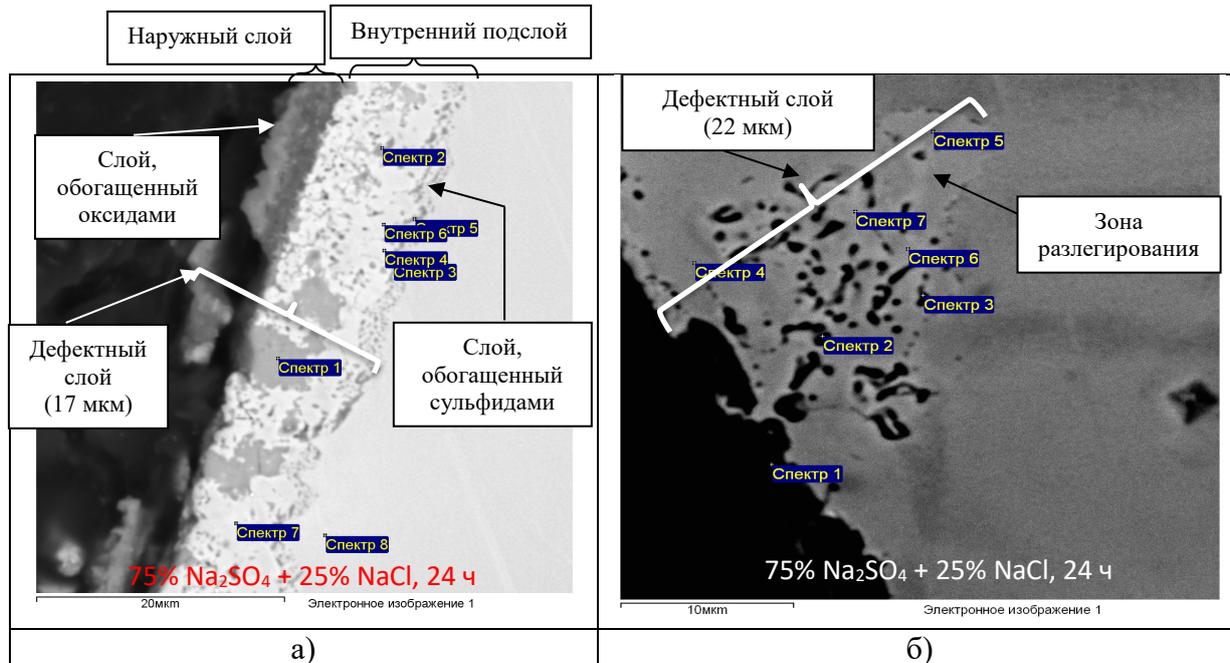


Рисунок 9 – Прокорродировавший слой сплава марки СЛЖС5-ВИ без алитирования после испытаний на солевую коррозию при температурах 800°C (а) и 900°C (б)

На основании анализа поверхностного слоя сплава марки СЛЖС5-ВИ с алитированным диффузионным слоем после коррозионных испытаний при температуре 800°C в солевом расплаве состава 75% Na_2SO_4 + 25% NaCl в течение 24 ч (рисунок 10а) обнаружено:

- снижение степени разлегирования поверхности сплава по сравнению с результатами испытаний при температуре 800°C сплава без алитированного диффузионного слоя;
- сохранение сплошности оксидной пленки по сравнению с результатами испытаний при температуре 800°C сплава без алитированного диффузионного слоя;
- изменение фазового состава поверхностного слоя (по сравнению с результатами испытаний при температуре 800°C сплава без алитированного диффузионного слоя) – в наружном слое помимо оксидов обнаружены интерметаллидные фазы типа $\text{Ni}(\text{Al}, \text{Ti})$ и Ni_2Al_3 , во внутренней зоне внешнего слоя помимо сульфидов и твердого раствора алюминия в никеле обнаружены интерметаллидные фазы типа $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ и $\text{Ni}(\text{Al}, \text{Ti})$.

Повышение температуры испытания до 900°C (рисунок 10б) привело к разрушению оксидной пленки в ее наружных слоях, при этом сплошность подслоя с сульфидами и интерметаллидными фазами типа $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, $\text{Ni}(\text{Al}, \text{Ti})$ и твердым раствором алюминия в никелевом сплаве сохраняется, таким образом обеспечивая защиту подложки металла.

Глубина полученного алитированного слоя превышает не менее чем на 5 мкм глубину дефектного слоя, образовавшегося после испытаний при температурах 800°C

и 900°C в солевом расплаве состава 75% Na₂SO₄ + 25% NaCl в течение 24 ч, что обеспечивает эффективную защиту сплава от солевой коррозии. Соизмеримые значения скорости коррозии, определенные по убыли массы, сплава марки СЛЖС5-ВИ с защитным слоем и без слоя после испытаний при температуре 800°C, объясняются тем, что в обоих случаях на сплаве сохраняется оксидная пленка, обеспечивающая защиту подложки металла, тогда как после испытаний при температуре 900°C сплава марки СЛЖС5-ВИ без алитированного слоя оксидная пленка разрушается, а сопротивление солевой коррозии обеспечивается слоем с интерметаллидными фазами.

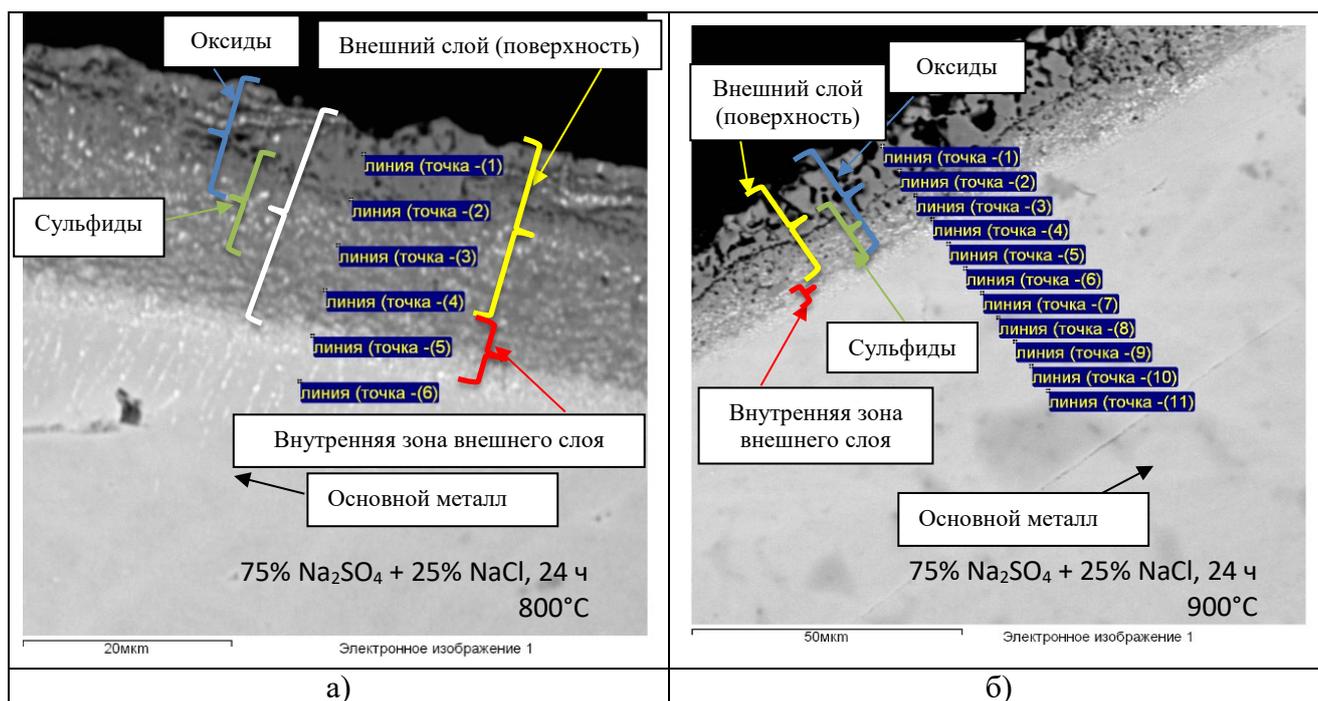


Рисунок 10 – Прокорродировавший слой сплава марки СЛЖС5-ВИ с алитированным слоем после испытаний на солевую коррозию при температурах 800°C (а) и 900°C (б)

В пятой главе рассмотрено применение термомеханического нагружения сжатием и термодиффузионного алитирования для рабочих лопаток.

При проведении моделирования нагружения сжатием в системе ANSYS показана возможность применения термомеханического нагружения сжатием для рабочих лопаток первой ступени турбины газотурбинных двигателей (изделий), эксплуатируемых при наибольших значениях температуры и коррозионной нагрузки, а также сформулированы требования к геометрии лопатки:

– должно выполняться требование (1) к безразмерной величине $I/(S_{сеч.min}l^2)$:

$$\frac{I}{S_{сеч.min}l^2} \geq \frac{\sigma_{кр}\mu^2}{En^2\pi^2} \quad (1),$$

где I – геометрический момент инерции, мм⁴;

$S_{сеч.min}$ – площадь наименьшего сечения лопатки, перпендикулярного направлению сжимающего напряжения, мм²;

l – длина пера лопатки, мм;

$\sigma_{кр}$ – напряжение, при котором происходит потеря устойчивости, МПа;

n – число полувольт;

E – модуль упругости сплава марки СЛЖС5-ВИ, МПа;

μ – коэффициент приведенной длины стержня,

– лопатки должны быть изготовлены без закрутки пера наклона лопатки на корыто, изгиба средней части лопатки в сторону корыта или спинки (необходимым условием является расположение центров масс сечений пера лопатки на общей радиальной оси).

С учетом проведенных исследований в главе 3, посвященных консервативной оценке напряжений и скорости деформации образца в оправке в ходе проведения термомеханического нагружения, была разработана методика консервативной оценки напряжений и скорости деформации изделия в оправке в ходе проведения термомеханического нагружения. Консервативная оценка напряжений σ_{max} в наименьшем сечении изделия $S_{сеч.min}$ в ходе проведения термомеханического нагружения осуществляется в соответствии с формулой (2):

$$\sigma_{изд.max} = \begin{cases} \frac{S_{конт.}}{S_{сеч.min}} (\sigma_{дил.} - \sigma_{фикс.} + \sigma_{нат.}), t \leq A_{c1} \\ \frac{S_{конт.}}{S_{сеч.min}} (2\sigma_{дил.}(A_{c1}) - \sigma_{фикс.} - \sigma_{дил.}(t) + \sigma_{нат.}), A_{c1} \leq t \leq A_{c3} \\ \frac{S_{конт.}}{S_{сеч.min}} \left((\sigma_{дил.}(A_{c3}) - \sigma_{фикс.} + \sigma_{нат.}) e^{-n_1(\tau - \tau(A_{c3}))} \right), A_{c3} \leq t \leq t_{стар.} \\ \frac{S_{конт.}}{S_{сеч.min}} \left((\sigma_{дил.}(t_{стар.}) - \sigma_{фикс.} + \sigma_{нат.}) e^{-n_2(\tau - \tau(t_{стар.}))} \right), t = t_{стар.} \end{cases} \quad (2),$$

где $\sigma_{изд.max}$ – максимальное напряжение в сечении изделия $S_{сеч.min}$, МПа;

$S_{конт.}$ – площадь контакта «изделие-оправка», мм²;

$\sigma_{дил.}$ – напряжение, фиксируемое dilatометром при закреплении образца из сплава марки 07X15H4M2T, МПа;

$\sigma_{фикс.}$ – напряжение, необходимое для закреплении образца деформационной системой dilatометра, равное 10 МПа;

$\sigma_{нат.}$ – напряжения, обусловленные наличием натяга при фиксации изделия в оправке, МПа;

t – температура изделия, °С;

A_{c1} – температура начала обратного мартенситного превращения (для стали марки 07X15H4M2T, равная 615°С при скорости нагрева 80°С/ч);

A_{c3} – температура окончания обратного мартенситного превращения (для стали марки 07X15H4M2T, равная 715°С при скорости нагрева 80°С/ч);

$t_{стар.}$ – температура старения сплава (для сплава СЛЖС5-ВИ равна 900 °С);

n_1 – предэкспоненциальный множитель, равный 0,000076 с⁻¹;

n_2 – предэкспоненциальный множитель, равный $0,00017 \text{ с}^{-1}$.

При этом в случае наличия натяга между изделием и оправкой напряжение $\sigma_{\text{нат}}$ определяется в соответствии с формулой (3):

$$\sigma_{\text{нат}} = \frac{\varepsilon_{\text{нат}} E_{\text{СЛЖС5-ВИ}}}{100} \left(1 - \frac{E_{\text{СЛЖС5-ВИ}}}{E_{\text{СЛЖС5-ВИ}} + E_{07\text{X15H4M2T}}} \right) \quad (3),$$

где $\varepsilon_{\text{нат}}$ – величина натяга, %;

$E_{\text{СЛЖС5-ВИ}}$ – модуль нормальной упругости сплава марки СЛЖС5-ВИ, МПа;

$E_{07\text{X15H4M2T}}$ – модуль нормальной упругости стали марки 07X15H4M2T, МПа (при температуре, превышающей 540°C , модуль нормальной упругости принимается равным 133000 МПа).

В случае наличия зазора между одной из плоскостей изделия и плоскостью оправки вносится соответствующая температурная поправка, определяемая в соответствии с формулой (4):

$$\Delta t_{\text{заз}} = t_{\text{сопр}} - 20 = \frac{\varepsilon_{\text{заз}}}{100(\alpha_{\text{СЛЖС5-ВИ}} - \alpha_{07\text{X15H4M2T}})} \quad (4),$$

где $t_{\text{сопр}}$ – температура, при которой изделие и оправка соприкоснутся при нагреве от комнатной температуры;

$\varepsilon_{\text{заз}}$ – величина зазора, %;

$\alpha_{\text{СЛЖС5-ВИ}}$ – ТКЛР сплава марки СЛЖС5-ВИ в интервале температур от 20°C до $t_{\text{сопр}}$, K^{-1} ;

$\alpha_{07\text{X15H4M2T}}$ – ТКЛР стали марки 07X15H4M2T в интервале температур от 20°C до $t_{\text{сопр}}$, K^{-1} .

Консервативная оценка скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ (%/с) изделия осуществляется в соответствии с формулой (5):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{100}{E_{\text{СЛЖС5-ВИ}}(t)} \cdot \frac{\delta \sigma_{\text{изд.мах}}}{\delta \tau} \quad (5).$$

Разработаны способ и схема установки для проведения термической обработки, которые могут позволить совместить процесс термодиффузионного алитирования с термомеханическим нагружением никелевых сплавов при создании сжимающих напряжений. Способ химико-термической обработки литых монокристаллических лопаток из никелевых сплавов защищен патентом РФ (RU 2772475 от 20.05.2022).

Основные выводы по диссертационной работе

Выполненные исследования позволили разработать способ повышения жаропрочности и сопротивления ползучести (термомеханическое нагружение сжатием), а также способ повышения сопротивления солевой коррозии (термодиффузионное алитирование) монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ, предназначенного для лопаток газовых турбин морского назначения.

1. Установлено, что термомеханическое нагружение сжатием никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ по сравнению со старением без напряжения, обеспечивает:

– снижение скорости ползучести при температуре 900°C и напряжении 285 МПа с 0,153%/ч до 0,060%/ч, а при температуре 950°C и напряжении 175 МПа с 0,027%/ч до 0,005%/ч;

– повышение долговечности (прогнозируемого времени до разрушения) при длительном нагружении растяжением при температуре 900°C и напряжении 175 МПа с 2302 до 5498 ч при межремонтном периоде 4000 ч для двигателя М70ФРУ-2;

– при испытаниях на растяжение при температурах 20°C и 900°C – увеличение относительного удлинения с 10,0% до 17,6% и с 14,0% до 23,5% соответственно, относительного сужения с 10% до 20% и с 33% до 54% соответственно, без значительного изменения прочностных свойств.

2. Выявлено, что термомеханическое нагружение сжатием приводит к образованию значительного количества вязкой составляющей (до 13,2%) в междендритном пространстве в изломах образцов, подвергнутых испытанию на длительную прочность при температуре 900°C и напряжении 345 МПа, по сравнению с образцами, состаренными без напряжения (доля вязкой составляющей – до 5,3%), что свидетельствует о снижении влияния микропористости на разрушение сплава марки СЛЖС5-ВИ.

3. Показано, что термомеханическое нагружение сжатием сплава марки СЛЖС5-ВИ приводит к снижению микропористости не менее чем в 2 раза.

4. Установлено, что термомеханическое нагружение сжатием сплава марки СЛЖС5-ВИ приводит к снижению коэффициента дендритной ликвации для рения с 1,65 до 1,43, а для вольфрама с 1,25 до 1,07.

5. Проведена консервативная оценка значений сжимающего напряжения, скорости деформации и скорости нагружения образца из жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ, размеры которого соизмеримы с размерами рабочей лопатки первой ступени турбины, в ходе термомеханического нагружения сжатием в процессе старения сплава марки СЛЖС5-ВИ при нагреве со скоростью 80°C/ч от комнатной температуры до 900°C и последующей выдержке в течение 16 ч:

– величина сжимающего напряжения не превышает $0,7\sigma_T$;

– скорость деформации не превышает $1 \cdot 10^{-4}\%/с$;

– скорость нагружения не превышает 0,1 МПа/с.

6. Показано, что термодиффузионное алитирование сплава марки СЛЖС5-ВИ позволило снизить скорость солевой коррозии в расплаве солей 75% Na₂SO₄ + 25% NaCl, определенную по убыли массы:

6.1. При температуре испытания 800°C – на 1–3 порядка по сравнению со сплавами-аналогами 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 (жаропрочными никелевыми сплавами, применяемыми в качестве материалов газотурбинных двигателей морского назначения);

6.2. При температуре испытания 900°C – на 2 порядка по сравнению со сплавом марки СЛЖС5-ВИ (без диффузионного слоя), а также на 2–4 порядка по сравнению со сплавами-аналогами.

7. Установлено, что защита сплава марки СЛЖС5-ВИ с диффузионным слоем от разлегирования поверхности, проникновения продуктов коррозии к поверхности сплава, локализации коррозионных повреждений, образования диффузионной микропористости, обеспечивается образованием подслоя с интерметаллидами типа Ni(Al, Ti) и Ni₃(Al, Ti), а также твердого раствора, насыщенного алюминием.

8. Показана возможность применения термомеханического нагружения сжатием для рабочих лопаток первой ступени турбины газотурбинных двигателей, эксплуатируемых при наибольших значениях температуры и коррозионной нагрузки.

9. Разработана методика консервативной оценки напряжений и скорости деформации изделия в оправке в ходе проведения термомеханического нагружения сжатием.

Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих публикациях:

1. **Махорин В.В.** Повышение хладостойкости стали марки 09Г2С за счет программного упрочнения, совмещенного с дополнительным среднетемпературным отпуском / **В.В. Махорин, М.И. Оленин, В.И. Горынин** // **Вопросы материаловедения.** – 2020. – № 1 (101). – С. 27–34.

2. **Махорин В.В.** Применение программного упрочнения при отпуске для повышения сопротивления хрупкому разрушению сталей / **В.В. Махорин, М.И. Оленин, В.И. Горынин** // **Металловедение и термическая обработка металлов.** – 2020. – № 1. – С. 85–88.

Makhorin V.V. Use of Programmed Hardening During Tempering in Order to Improve Steel Brittle Fracture Resistance / **V.V. Makhorin, M.I. Olenin, V.I. Gorynin** // **Metal Science and Heat Treatment.** – 2020. – V. 62. – P. 86–89.

3. **Махорин В.В.** Повышение кратковременных механических свойств никелевых сплавов марок СЛЖС5-ВИ и ЖС32-ВИ за счет программного упрочнения,

совмещенного с процессом старения / **В.В. Махорин**, М.И. Оленин, В.И. Горынин, А. Туркбоев // **Вопросы материаловедения**. – 2020. – № 3 (103). – С. 53–60.

4. **Махорин В.В.** Влияние гомогенизирующего отжига на снижение содержания δ -феррита в высокопрочной высокохромистой стали мартенситного класса марки 07X15H5Д4Б, полученной методом селективного лазерного сплавления / **В.В. Махорин**, М.И. Оленин, А.Д. Каштанов, О.Н. Романов // **Вопросы материаловедения**. – 2021. – № 2 (106). – С. 47–54.

5. **Махорин В.В.** Влияние программного упрочнения и термодиффузионного алитирования на жаропрочность и жаростойкость монокристаллического жаропрочного никелевого сплава морского назначения / **В.В. Махорин**, М.И. Оленин // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. – 2022. – № 1-1. – EDN TDZLOE.

6. **Махорин В.В.** Воздействие морской среды при повышенных температурах на сплав СЛЖС5-ВИ // Материалы XVII конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». – СПб.: НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 2018. – С. 46.

7. **Махорин В.В.** Исследование механических свойств жаропрочного никелевого сплава СЛЖС5-ВИ для применения в горячем тракте газотурбинных двигателей морского назначения // Материалы XVII конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» СПб.: НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 2018. – С. 47.

8. **Махорин В.В.** Структура литейного жаропрочного никелевого сплава и ее стабильность / **В.В. Махорин**, С.Н. Петров, А. Туркбоев, В.В. Десницкий // Неделя науки СПбПУ: мат-лы научн. конф.: Институт металлургии, машиностроения и транспорта. – СПб.: Политех-Пресс, 2018. – Ч. 1. – С. 163–165.

9. **Махорин В.В.** Исследование влияния алитирования на коррозионную стойкость жаропрочного никелевого сплава СЛЖС5-ВИ / **В.В. Махорин**, М.И. Оленин, А. Туркбоев, С.А. Суворов // Материалы XVIII конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». – СПб.: НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 2019. – С. 27.

10. **Махорин В.В.** Исследование влияния гомогенизирующего отжига на структуру и свойства стали мартенситного класса, полученной методом селективного лазерного сплавления / **В.В. Махорин**, М.И. Оленин, А.Д. Каштанов, О.Н. Романов // Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТ-2021): Материалы работ Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 21–23 сентября 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021. – С. 279–281.

11. **Махорин В.В.** Проведение гомогенизирующего отжига стали мартенситного класса, полученной методом селективного лазерного сплавления, и его влияние на структуру и свойства / **В.В. Махорин**, М.И. Оленин, А.Д. Каштанов, О.Н. Романов // Материалы работ VIII Всероссийского с международным участием молодежного научного форума «Open Science 2021», г. Гатчина, 17–19 ноября 2021 г. – С. 125–126.
12. **Махорин В.В.** Разработка методов повышения жаропрочности и коррозионной стойкости монокристаллического никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ для лопаток газотурбинных двигателей морского назначения / **В.В. Махорин**, М.И. Оленин // Материалы XIX конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». – СПб.: НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 2019. – С. 54–56.
13. **Махорин В.В.** Структура алитированного слоя жаропрочного никелевого сплава и его влияние на сопротивление сульфидной коррозии // Неделя науки СПбПУ: мат-лы научн. конф.: В 2-х ч. – СПб., 2019. – СПб.: Политех-Пресс, 2020. – С. 218–221.
14. **Махорин В.В.** Исследование стойкости к солевой коррозии сплава марки ЭП648-ВИ с защитными покрытиями / **В.В. Махорин**, М.И. Оленин, А. Туркбоев, С.А. Суворов // Материалы XX конф. молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». – СПб.: НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 2023. – С. 45–46.
15. **Махорин В.В.** Влияние программного нагружения на микропористость монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ / **В.В. Махорин**, М.И. Оленин, С.Н. Петров, М.В. Старицын, Ю.М. Маркова, А.Г. Чекуряев // Материалы XXI конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». СПб.: НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 2024. – С. 36–37.
16. **Махорин В.В.** Пути повышения жаропрочности и стойкости против солевой коррозии монокристаллического жаропрочного никелевого сплава марки СЛЖС5-ВИ // Труды XXVI Конкурса бизнес-идей, научно-технических разработок и научно-исследовательских проектов под девизом «Молодые, дерзкие, перспективные». – СПб.: ИПЦ СЗИУ, 2024. – С. 37–38.
17. Пат. 2772475 Российская Федерация МПК С22F 1/10: Способ химико-термической обработки литых монокристаллических лопаток из никелевых сплавов / **Махорин В.В.**, Оленин М.И., Туркбоев А., Фукс М.Д., Романов О.Н., Горынин В.И.; заявитель и патентообладатель НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей». Заявл. 15.03.2021. Оpubл. 20.05.2022. Бюл. № 14. – 9 с.