

На правах рукописи

Данилов Денис Викторович

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО
СПЛАВА С ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ В
УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОРСКОЙ СОЛЕВОЙ СРЕДЫ ДЛЯ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛОПАТОК ГТУ

Специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка
металлов

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования – «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Научный руководитель:

Шатульский Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, РГАТУ имени П.А.Соловьева, зав. кафедрой «Материаловедение, литье и сварка»

Официальные оппоненты:

Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет гражданской авиации, декан механического факультета;

Гадалов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроительных технологий и оборудования», Юго-западный государственный университет.

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской федерации федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей".

Защита диссертации состоится 24.06.2015 в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования – «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославской области, ул. Пушкина, 53, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования – «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», адрес www.rsatu.ru.

Автореферат разослан «23» апреля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Каляева Н.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ведущими мировыми производителями энергетических установок и правительствами высокоразвитых западных стран в настоящее время выделяется огромное финансирование на работы по повышению эффективности и топливной экономичности газотурбинных установок (ГТУ). Эксплуатируются ГТУ мощностью свыше 480 МВт, что сравнимо с показателями крупной гидроэлектростанции. Температура рабочих газов на входе в турбину современных агрегатов перешла за отметку 1500°C, что на 150-200°C выше чем на установках, выпускаемых в 80-90-е годы прошлого столетия.

Возросшие требования к современным газотурбинным установкам указывают на экономическую оправданность использования авиа-космических технологий и материалов при проектировании и производстве современных ГТУ, в частности, применение монокристаллических жаропрочных сплавов, легированных рением в качестве материала для лопаток турбин. Такой подход подтверждается тем, что мировыми лидерами в производстве ГТУ - General Electric, Pratt & Whitney, Siemens, Rolls Royce, ведутся активные работы по созданию специальных высокохромистых монокристаллических сплавов, легированных рением с повышенными требованиями по жаропрочности.

Однако в России в настоящее время имеется отставание в области создания и применения высокоэффективных, мощных и экологически «чистых» ГТУ, что в значительной мере определяется отсутствием разработок специальных жаропрочных сплавов с повышенной коррозионной стойкостью, предназначенных для работы в условиях воздействия морской среды. Проблема отсутствия отечественных специальных жаропрочных сплавов наиболее актуальна для военно-морской техники, применение импортных материалов в которой недопустимо.

Попытка временного устранения отставания в создании нового поколения морских газотурбинных двигателей и конкурентоспособных газотурбинных энергетических установок за счет использования авиационных материалов не увенчалась успехом, прежде всего из-за активного коррозионного воздействия морской солевой среды, а также низкого качества топлива, загрязненного серой, ванадием и другими веществами, негативно влияющими на долговечность жаропрочных материалов. Таким образом, создание высоконагруженных ГТУ, отвечающих современным требованиям, возможно только при условии разработки и промышленного применения новых специальных высокожаропрочных отечественных сплавов, одновременно обладающих повышенной стойкостью к солевой коррозии, в частности для деталей горячего тракта «морских» турбин.

Целью диссертационной работы является создание никелевого жаропрочного сплава для монокристаллических лопаток газовых турбин морских

ГТУ, эксплуатируемых в условиях сульфидной и солевой коррозии при температурах до 1050°C на основе использования разработанного автором метода конструирования жаропрочных никелевых сплавов.

Для достижения вышеуказанной цели необходимо решить следующие задачи:

1) выполнить анализ влияния комплекса легирующих элементов на жаростойкие, жаропрочные, прочностные, термодинамические и структурные параметры литейных никелевых сплавов, предназначенных для работы в условиях воздействия солевой и сульфидной коррозии;

2) разработать метод расчета химического состава никелевого жаропрочного сплава, удовлетворяющего требованиям по обеспечению прочностных, химических, термодинамических, структурных и фазовых характеристик материала, который включает в себя: определение доли упрочняющей γ' -фазы; комплексный расчет распределения легирующих элементов между упрочняющей γ' -фазой и γ -твердым раствором; оценку структурно-фазовой стабильности сплава во всем объеме с учетом дендритной ликвации; определение параметров кристаллических решеток упрочняющей γ' -фазы и γ -твердого раствора, а также величины их размерного несоответствия; расчет критических температур фазовых превращений; определение прочностных характеристик сплава; определение критериев соотношения концентраций легирующих элементов, обеспечивающих стойкость сплава к сульфидной и солевой коррозии;

3) провести экспериментальную оценку адекватности использования метода конструирования жаропрочных сплавов, предназначенных для эксплуатации в условиях солевой и сульфидной коррозии путем сравнения расчетных и реальных значений параметров на разработанных сплавах;

4) разработать технологию выплавки шихтовых заготовок сплавов и технологию монокристаллического литья лопаток ГТУ морского назначения;

5) разработать режим термической обработки для сплава, обеспечивающий получение наилучшего комплекса свойств, провести анализ микроструктуры, фазового состава и определить механические и эксплуатационные свойства сплава на образцах, включая оценку стойкости к солевой и сульфидной коррозии.

Научная новизна

1 Предложен и реализован комплексный подход к конструированию жаропрочных никелевых сплавов для работы в условиях солевой и сульфидной коррозии в составе морских ГТУ, включающий в себя одновременное выполнение требований по обеспечению прочностных, химических, термодинамических, структурных и фазовых характеристик материала.

2 Разработана математическая модель, позволившая на основе сформулированных требований по комплексу механических и эксплуатационных

свойств рассчитать химический состав никелевого жаропрочного сплава для лопаток морских ГТУ.

3 Предложен и обоснован критерий оценки стабильности γ -твердого раствора, обеспечивающий исключение возможности образования в нем нежелательных фаз, как в междендритных объемах, так и в осях дендритов.

4 Установлен механизм влияния тугоплавких элементов W, Mo, Re, Ta на формирование оксидных плен и снижение толщины обезлегированной диффузионной зоны на поверхности деталей в процессе эксплуатации в условиях воздействия солевой среды.

Практическая значимость

1 Разработан метод конструирования химического состава никелевых жаропрочных сплавов, удовлетворяющих требованиям по обеспечению прочностных, химических, термодинамических, структурных и фазовых характеристик материала.

2 Предложен химический состав литейного монокристаллического жаропрочного никелевого сплава с повышенной стойкостью к солевой и сульфидной коррозии, имеющего прочностные характеристики на уровне сплавов авиационных ГТД до температур 1050°C. Состав сплава защищен патентом РФ № 2520934.

3 Разработана технология выплавки шихтовых заготовок никелевого жаропрочного сплава и технология монокристаллического литья, которые обеспечивают получение годных отливок типа "Лопатка".

4 Разработана технология термической обработки литейного сплава, обеспечивающая устранение ликвационной неоднородности в пределах дендритной ячейки монокристаллической отливки, а также получение заданной микроструктуры и фазового состава.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1 Метод конструирования жаропрочных никелевых сплавов для работы в условиях солевой и сульфидной коррозии в составе морских ГТУ, базирующийся на одновременном выполнении требований по обеспечению прочностных, химических, термодинамических, структурных и фазовых характеристик материала.

2 Результаты анализа влияния легирующих элементов на формирование микроструктуры, фазового состава и коррозионные свойства никелевых жаропрочных сплавов, предназначенных для эксплуатации в условиях высоких температур, солевой и сульфидной коррозии на морских ГТУ.

3 Критерий оценки стабильности γ -твердого раствора, обеспечивающий структурную и термодинамическую стабильность монокристаллических никелевых сплавов.

4 Результаты анализа структуры, фазового состава, прочностных и коррозионных свойств никелевого сплава с повышенной жаропрочностью, предназначенного для изготовления рабочих и сопловых лопаток турбин морских ГТУ.

Объектами исследования являлись опытные составы коррозионностойкого жаропрочного никелевого сплава для монокристаллического литья СЛЖС5, а также широко используемые в промышленности коррозионностойкие жаропрочные никелевые сплавы с равноосной структурой ЧС-70 и ЧС-88У.

Методы исследования

Выплавка опытных сплавов выполнялась с использованием лабораторно-промышленной вакуумно-индукционной плавильной установки при $P=10^{-1}$ Па. Испытания на длительную прочность выполнялись на цилиндрических образцах согласно ГОСТ 10145-81, испытания на кратковременную прочность проводились согласно ГОСТ 18299-72. Для исследований микроструктуры применялись методы растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа. Сравнительные испытания на коррозионную стойкость в агрессивной солевой среде выполнялись при температуре 900°C.

Достоверность результатов работы обеспечивается корректным применением положений физического металловедения, использованием современных методов исследований и обработки экспериментальных данных и подтверждается хорошим совпадением расчетных данных с результатами производственного опробования.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы обсуждались на техническом совещании ОАО «НПО «Сатурн» протокол № 76 от 26.12.2011, на совместном техническом совещании представителей ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» и ОАО «НПО «Сатурн», протокол № 726/012 – 009 от 25.01.2012 г.; на заседании научно - технического совета ОАО «НПО «Сатурн», протокол № 39 от 10.12.2014 г.; на XXXIII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий 2013, г. Миасс; на 4й международной конференции "HighMatTech 2013", г. Киев; на саммите TMS-2014, г. Сан-Диего; на X международной научной конференции по гидроавиации "Гидроавиасалон-2014", г. Геленджик. В 2014 г. автор был награжден серебряной медалью лауреата международной выставки «Металл-Экспо».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ в научно - технических журналах, входящих в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней и 3 работы в сборниках трудов научных конференций. На разработанный сплав получен патент РФ № 2520934 от 27.06.2014 г.

Личный вклад автора

Автор непосредственно участвовал в проведении экспериментов в процессе всего цикла исследований. Разработал математическую модель и метод для расчета химических составов сплавов для ГТУ, рекомендации по их проектированию, технологические режимы изготовления образцов из сплава, а также участвовал в проведении апробации созданного сплава на предприятии ОАО «НПО «Сатурн».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка использованных источников. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц, 59 рисунков, библиографический список содержит 116 литературных источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены основные проблемы разработки никелевых жаропрочных сплавов для монокристаллических лопаток газовых турбин морских ГТУ, эксплуатируемых в условиях активного воздействия солевой среды. Определен перечень задач, которые необходимо решить для создания никелевого сплава, одновременно обладающего высоким уровнем жаропрочности при рабочих температурах до 1050°C и повышенной стойкостью к солевой коррозии.

В первой главе выполнен анализ перспективных зарубежных программ развития промышленной энергетики и ГТД морского назначения. Рассмотрена общая характеристика никелевых жаропрочных сплавов их структура и фазовый состав, проанализированы особенности легирования и термической обработки литейных жаропрочных никелевых сплавов. Определены особенности эксплуатации рабочих лопаток морских ГТУ, а также механизм протекания солевой коррозии материалов ГТУ и ее влияние на прочность.

Выполненный анализ литературных источников и производственных данных позволил сделать следующие выводы:

- в мире прослеживается четкая тенденция по переходу энергетики на природный газ как основной вид топлива и газотурбинные установки как основной вид силовых агрегатов для привода электрогенераторов;

- применительно к использованию в морском судостроении главными преимуществами ГТУ перед широко применяемыми дизельными двигателями являются: компактность, высокая габаритная мощность, а также пониженный уровень шума и вибраций, однако сдерживающим фактором является высокий расход топлива и стоимость деталей и компонентов турбины;

- возросшие требования к современным газотурбинным установкам указывают на экономическую оправданность использования авиа-космических технологий и материалов для проектирования и постройки современных ГТУ.

В том числе применение монокристаллических жаропрочных сплавов, легированных рением;

- ключевой особенностью работы жаропрочных сплавов для стационарных и морских ГТУ является длительный (десятки тысяч часов) ресурс в сочетании с невысокими по сравнению с авиационными сплавами температурами эксплуатации (до 900°С) в условиях активного воздействия продуктов сгорания топлива и «солевого тумана»;

- закономерности сульфидно-оксидной коррозии жаропрочных сплавов в корне отличаются от закономерностей высокотемпературного окисления. Это касается механизма процесса, характера температурной зависимости, особенностей влияния тех или иных легирующих элементов в сплаве;

- в России в настоящий момент отсутствуют сплавы, удовлетворяющие требованиям к материалам рабочих лопаток турбин морских ГТУ.

Поэтому необходимо создание сплава нового поколения, одновременно обладающего уровнем рабочих температур, соответствующим авиационным материалам, и высокой стойкостью к солевой коррозии. Основные требования к такому материалу можно сформулировать следующим образом:

- сплав должен обладать комплексом легирования, направленным на получение монокристаллической структуры;

- рабочая температура сплава должна составлять 1050°С;

- уровень жаропрочности сплава должен превышать лучшие мировые показатели, т.е. $\sigma_{100}^{1000} \geq 184$ МПа;

- для обеспечения уровня жаропрочности допустимо и экономически оправдано введение рения в количестве до 5 вес.%, не превышающем концентрацию этого элемента в широко используемом отечественном ренийсодержащем сплаве ЖС-32;

- для обеспечения удовлетворительной стойкости к высокотемпературной солевой коррозии концентрация хрома в сплаве должна быть не менее 12%;

- уровень стойкости к высокотемпературной солевой и сульфидной коррозии должен соответствовать существующим серийным "морским" сплавам, таким как ЧС-70 и ЧС-88У;

- сплав должен быть стабильным и свободным от ТПУ-фаз.

Во второй главе диссертационной работы выполнен выбор и обоснование критериев, определяющих работоспособность жаропрочных никелевых сплавов. Выделено пять групп параметров сплава – термодинамические, структурные, прочностные, концентрационные и факторы, влияющие на стойкость сплавов к солевой коррозии.

На основе анализа тройной диаграммы состояния Ni – W – Re был предложен критерий – оценка предельного содержания в γ -твердом растворе

(Al+Ti+W+Mo+Re+Ta+Nb+Ru), которое не должно превышать 30 мас.%(1), анализ диаграммы представляется наиболее удобным, поскольку в γ -твердом растворе современных сплавов присутствуют взаимно растворяющиеся друг в друге (Ni – Co – Cr) – один угол тройной диаграммы. Два других угла представляют рений и вольфрам – наиболее важные легирующие элементы современных высокожаропрочных никелевых сплавов. Остальные элементы, (Al, Mo, Ti, Nb, Hf, Ta и др.) присутствуют в γ -твердом растворе в малых количествах и их суммарная концентрация сужает область гомогенности твердого раствора на основе Ni на такую же малую величину.

$$\sum_{i=1}^n C_i \leq 30, \quad (1)$$

где $C_{i\gamma}$ – концентрация легирующих элементов в γ -твердом растворе масс. %.

Если условие (1) не выполняется, то из γ -твердого раствора будут выделяться фазы на основе Ni_4W (β -фаза), NiW (δ -фаза), W_2Re_3 (σ -фаза), $\alpha-Re$ и другие, включая комбинации из этих фаз.

На основе экспериментальных и литературных данных по более чем 200 жаропрочных никелевых сплавов методами регрессионного анализа получены математические зависимости вида (2), позволяющие исходя из химического состава определять расчетным путем основные параметры сплава, в том числе коэффициенты распределения девяти легирующих элементов между γ -матрицей и упрочняющей γ' -фазой, объемную долю упрочняющей γ' -фазы, критические температуры фазовых превращений, длительную прочность, плотность материала.

$$A(C_i) = f \sum_{i=1}^n A_i C_i \quad (2)$$

Оценка склонности сплава к образованию топологически плотноупакованных фаз выполнялась по методу New Phascomp, основанному на расчете концентрации валентных электронов в γ -матрице сплава. При этом принято считать, что рассчитываемый для γ -твердого раствора сплава критический параметр $M(\bar{d})_\gamma$ должен быть меньше значения 0,93. Показано, что для сложнолегированных сплавов этот показатель должен быть значительно ниже, поскольку в монокристаллических сплавах ТПУ-фазы образуются в основном в осях дендритов, и это достаточно хорошо видно на рисунке 1. Причиной тому является характерная для монокристаллических сплавов дендритная ликвация, в результате которой оси дендритов становятся более легированными вольфрамом, кобальтом, рением и рутением, а междендритное пространство – алюминием, танталом и молибденом. С целью поиска решения по способу корректировки критического значения $M(\bar{d})_\gamma$ и учета реальных изменений составов осей дендритов и междендритных областей был проведен анализ литературных данных по характеру дендритной ликвации легирующих элементов различных монокристал-

лических никелевых жаропрочных сплавов после литья на установках УВНК-8П, используемых предприятиями отрасли для изготовления лопаток ГТД.

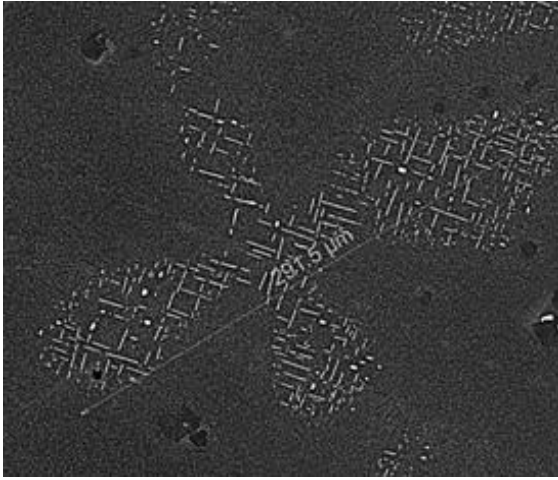


Рисунок 1 – Скопление пластинчатых ТПУ-фаз в осях дендритов монокристаллического жаропрочного никелевого сплава

На основании исходных данных химического состава и коэффициентов ликвации промышленных никелевых монокристаллических сплавов были рассчитаны значения $M(\bar{d})_{\gamma}$ составов в осях дендритов и в междендритных пространствах после термической обработки.

Таким образом, были построены регрессионные зависимости параметров $M(\bar{d})_{\gamma_{од}}$ для состава сплава в осях дендритов и $M(\bar{d})_{\gamma_{мдо}}$ для междендритных областей от среднего состава сплава.

Очевидно, что $M(\bar{d})_{\gamma_{крит}}$ необходимо рассчитывать не по среднему составу сплава, а по составу наиболее опасной области (в междендритных пространствах или осях дендритов) по формулам (3÷7).

$$M(\bar{d})_{\gamma_{крит}} = 0,93 - \Delta M d(\bar{d})_{\gamma_{ликв}}, \quad (3)$$

где $M(\bar{d})_{\gamma_{крит}}$ – критическая величина, при превышении которой образуются ТПУ-фазы.

$$M(\bar{d})_{\gamma_{ликв\ од}} = -0,00297 + 0,002033C_W - 0,0018C_{Al} + 0,00035C_{Ta} + 0,00782C_{Re}, \quad (4)$$

$$M(\bar{d})_{\gamma_{ликв\ мдо}} = -0,06755 - 0,00205C_W + 0,01063C_{Al} - 0,00059C_{Ta} - 0,001758C_{Re}, \quad (5)$$

где C_i – концентрация легирующего элемента в сплаве (масс. %).

Тогда критические значения параметра $Md(\bar{d})_{\gamma}$ для составов в осях дендритов и в междендритном пространстве соответственно равны:

$$M(\bar{d})_{\gamma_{крит\ ликв\ од}} = 0,933 - 0,002C_W + 0,0018C_{Al} - 0,00035C_{Ta} - 0,0078C_{Re}, \quad (6)$$

$$M(\bar{d})_{\gamma_{крит\ ликв\ мдо}} = 0,997 + 0,002C_W - 0,011C_{Al} + 0,0006C_{Ta} + 0,0016C_{Re}. \quad (7)$$

Сам параметр $Md(\bar{d})_{\gamma}$ сплава определялся по формуле Карона (8):

$$M(\bar{d})\gamma = 0,717C_{Ni} + 1,9 C_{Al} + 1,142 C_{Cr} + 1,55 C_{Mo} + 1,655 C_W + \\ + 2,224 C_{Ta} + 0,777C_{Co} + 2,117C_{Nb} + 2,27 C_{Ti} + 3,02 C_{Hf} + \\ + 1,267 C_{Re} + 1,006 C_{Ru} \quad (8)$$

где C_j – атомные доли химических элементов в γ -твердом растворе сплава.

На основе разработанных зависимостей, а также уже известных и описанных в литературе была создана математическая модель «состав-свойства», разработан алгоритм (см. рисунок 2) и программа КМО ЖС (компьютерный метод оптимизации жаропрочных сплавов), позволяющая определить влияние каждого легирующего элемента (или комплексное влияние групп элементов) на изменение важнейших характеристик и параметров проектируемых сплавов.

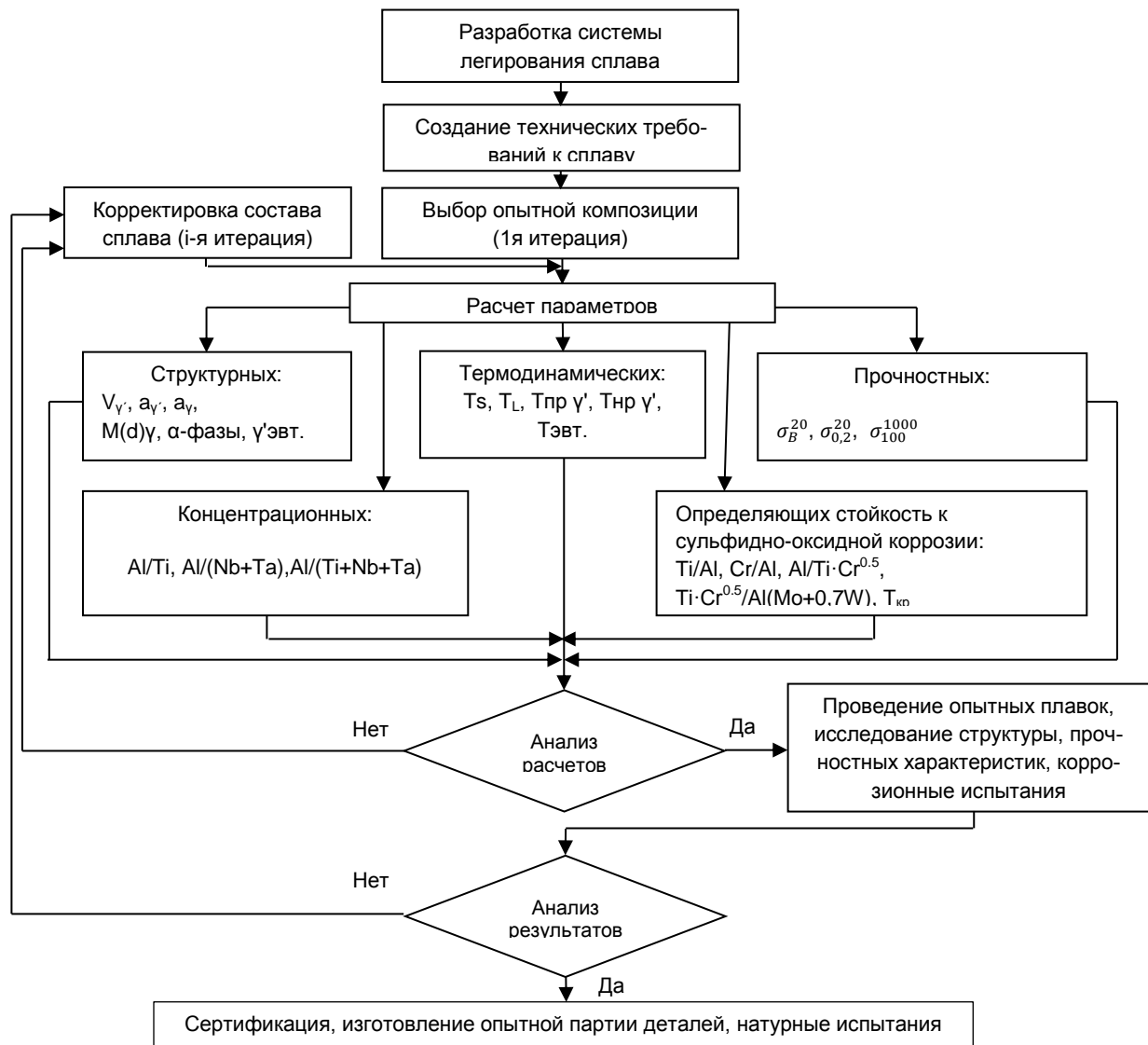


Рисунок 2 – Схема компьютерного метода оптимизации жаропрочных сплавов

В третьей главе описаны методики исследований. Для выплавки опытных сплавов была использована вакуумно-индукционная плавильная установка «УИПВ-0,05». Изготовление и полировка микрошлифов были выполнены на оборудовании металлографической лаборатории марки TegraPol-21. Исследо-

вания микроструктуры производились на растровом электронном микроскопе Inspect S50 с разрешающей способностью 10 нм. Испытания на кратковременную прочность проведены на сервогидравлической машине LFV-100 с применением осевого экстензометра (типа High Temperature Extensometer Series HTV – база 25мм) и с использованием управляющего, регистрирующего и обрабатывающего пакета программ «DION_Stat». Испытания образцов на длительную прочность проведены на испытательной машине АИМА 5-1 с регистрацией деформации ползучести с момента нагружения до момента разрушения образца или до момента достижения деформации ползучести от 1 до 2 %.

Для исследования стойкости сплава к солевой коррозии выполнялись сравнительные тигельные испытания на цилиндрических образцах при температуре 900°C в расплаве солей: 10%NaCl + 90%Na₂SO₄. В качестве эталона сравнения, для оценки коррозионной стойкости опытных сплавов использовались промышленные сплавы ЧС70 и ЧС88У.

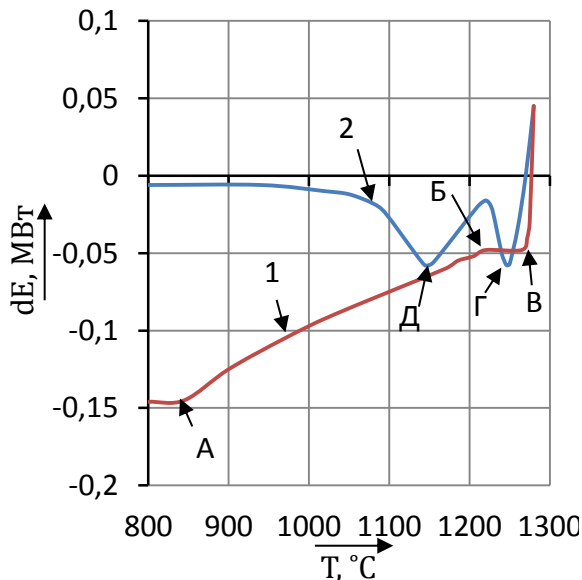


Рисунок 3 – Кривые ДТА образца сплава СЛЖС-5, где 1 – нагрев и 2 – охлаждение, А – температура начала растворения γ' -фазы (845°C), Б – температура полного растворения γ' -фазы (1215°C), В – температура начала плавления эвтектики $\gamma + \gamma'$ (1270°C), Г – температура образования эвтектики (1248°C), Д – температура начала распада пересыщенного γ -твердого раствора (1147°C).

рения, позволяющего получить мелкодисперсную структуру упрочняющей γ' -фазы. Первая ступень предназначалась для выделения основной доли γ' -фазы и выполнялась в течение 2^х часов при рабочей температуре сплава (1050°C), вто-

В четвертой главе с использованием разработанной методики расчета были предложены 13 перспективных композиций сплава, из которых был выбран один, обладающий наивысшими характеристиками высокотемпературной работоспособности в солевой среде и получивший название СЛЖС-5. С целью определения критических температур фазовых превращений данного сплава был выполнен дифференциальный термический анализ (см. рисунок 3), что позволило предложить режим термической обработки монокристаллических заготовок, который состоит из гомогенизирующего отжига, предназначенного для устранения ликвационной неоднородности, в течение 8 часов при температуре 1220°C, (данная температура с одной стороны превышает температуру полного растворения γ' -фазы, а с другой не достигает оплавления эвтектики), и двухступенчатого старения,

рая осуществлялась в течение 24 часов при температуре 850°C и предназначена для полного выделения γ' -фазы при температуре, близкой к началу ее растворения. Перед каждой ступенью старения выполнялось скоростное охлаждение (80-100°C/мин).

Оценка стойкости к высокотемпературной солевой коррозии была выполнена на специально спроектированной установке, в течение 260 часов при температуре 900°C в расплаве солей NaCl и Na₂SO₄, при этом был установлен характер изменения массы образцов (см. рисунок 4), а также выполнен макро- и микроструктурный анализ образцов после испытаний (см. рисунок 5).

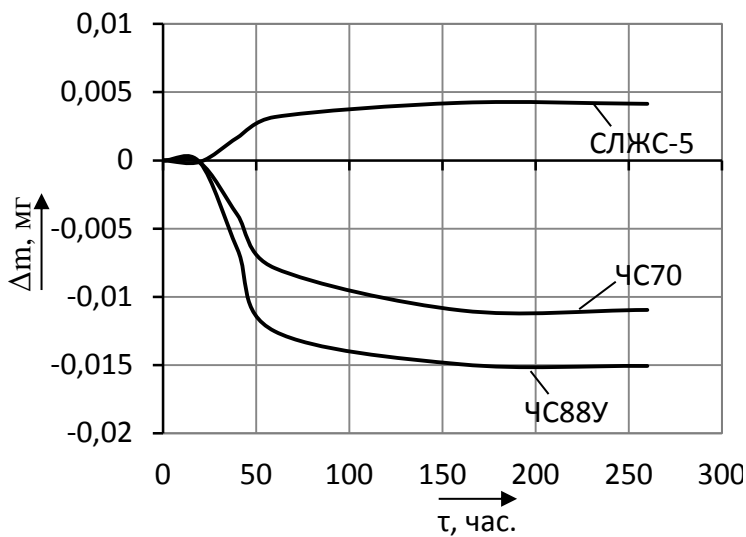
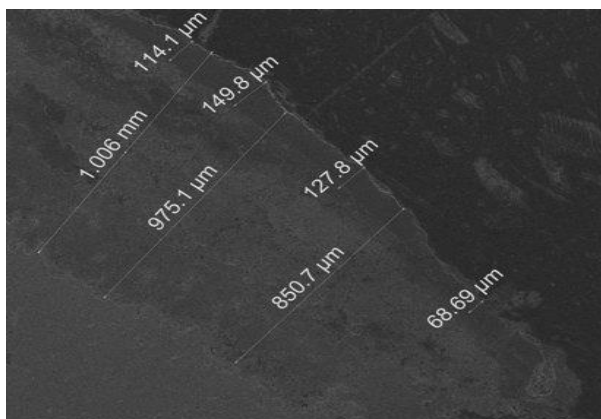


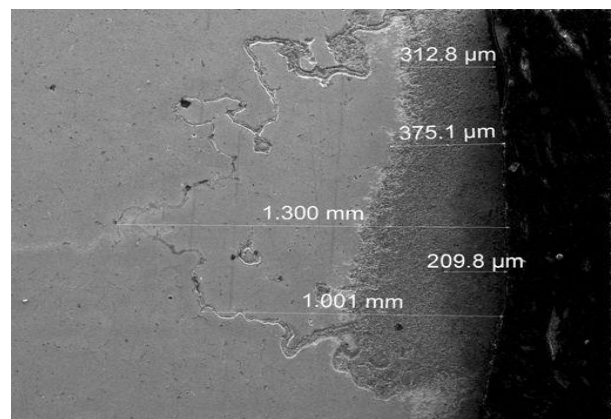
Рисунок 4 – Изменение массы образцов опытного сплава СЛЖС5 и серийных сплавов ЧС70 и ЧС88У

Анализ макро- и микроструктуры и результаты испытаний сплава СЛЖС-5 указывают на его высокую стойкость к солевой коррозии. Благодаря монокристаллической структуре образцы сплава СЛЖС-5, в отличие от сплавов ЧС с равноосной структурой, не склонны к межкристаллитной коррозии, на их поверхности формируется равномерная и плотная окисная пленка, а комплекс тугоплавких элементов эффективно снижает скорость диффузионных процессов, что препятствует «выгоранию» легирующих элементов с их поверхности. Диффузионная зона свободна от вредных фаз, в том числе ТПУ.

Диффузионная зона свободна от вредных фаз, в том числе ТПУ.



а)



б)

Рисунок 5 – Макроструктура ($\times 150$) образцов сплавов СЛЖС-5 (а) и ЧС-88У (б) после испытаний в расплаве солей в течение 260 часов

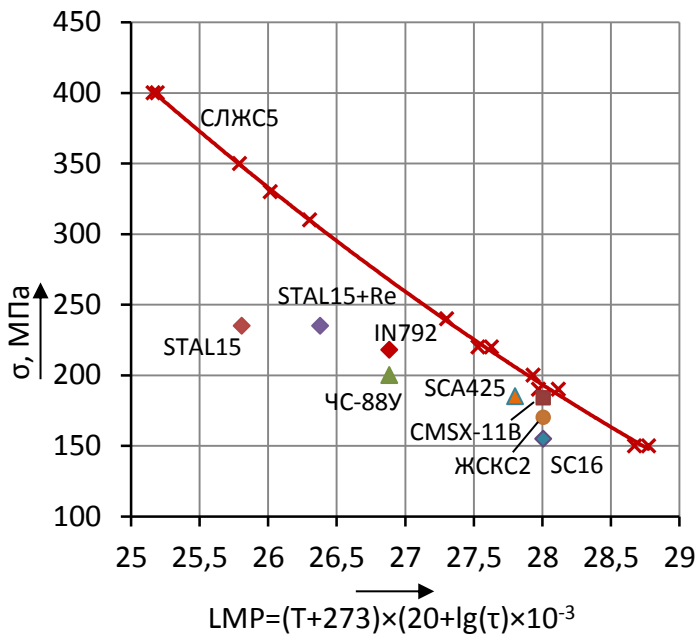


Рисунок 6 – Сравнение уровня жаропрочности сплава СЛЖС-5 с аналогами

Испытания на длительную прочность опытного сплава СЛЖС-5 проводились при температурах 900°C и 1000°C. Результаты испытаний сплава и сравнение его жаропрочности с промышленными отечественными и зарубежными аналогами обобщены с использованием параметра Ларсона-Миллера (LMP) и представлены на рисунке 6, что позволило выполнить комплексную оценку длительной работоспособности материала с учетом температуры и времени испытаний, на основании кото-

рой был определен уровень жаропрочности сплава СЛЖС-5 при температурах 900, 950 и 1000°C для временных интервалов равных 100, 500 и 1000 часам. Результаты анализа кривой параметра Ларсона-Миллера обобщены и представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения длительной прочности σ_T^T (МПа) сплава СЛЖС-5 для стандартных температур испытаний

T, °C	τ, час		
	100	500	1000
900	348	285	259
950	265	208	188
1000	195	144	122
1050	138	90	Н.д.

Анализ результатов испытаний на длительную прочность показал, что разработанный сплав СЛЖС-5 при одинаковых значениях параметра Ларсона-Миллера превосходит все имеющиеся аналоги, в том числе и CMSX-11B, являющийся рекордсменом среди «морских» сплавов по уровню жаропрочности.

Кроме испытаний на длительную прочность сплава СЛЖС-5, были проведены контрольные испытания на кратковременную прочность. Сравнительные результаты испытаний представлены в таблице 2.

Анализ результатов (см. таблица 2) указывает на его превосходство по пределу прочности при высоком относительном удлинении, что является показателем высокой эксплуатационной надежности разработанного сплава.

Таблица 2 – Сравнение характеристик кратковременной прочности сплава СЛЖС-5 с аналогами при 20°С

Сплав	E, ГПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Ψ , %	δ , %
ЖСКС-2	13,7	1240	1100	15	11
ЧС-88У	21	940	784	4	3
ЧС-70	21	880	735	5	3
IN738	Н. д.	1100	955	5,5	5
IN792-A	Н. д.	1029	881	10,7	5,8
СЛЖС-5	15,2	1245	1000	14,7	7,2

Выводы по работе

1 Выполнен анализ влияния легирующих элементов, на основе которого реализован комплексный подход к конструированию жаропрочных никелевых сплавов для работы в условиях солевой и сульфидной коррозии, позволивший сформулировать математическую модель, алгоритм и предложить метод расчета химических составов никелевых жаропрочных сплавов для морских ГТУ, удовлетворяющих требованиям по обеспечению прочностных, химических, термодинамических, структурных и фазовых характеристик.

2 Определен механизм влияния тугоплавких элементов W, Mo, Ta, Re на формирование оксидных плен и снижение толщины обезлегированной диффузионной зоны на поверхности деталей в процессе эксплуатации в условиях воздействия солевой среды, что позволило определить допустимые концентрации этих элементов в составе легирующих элементов для обеспечения максимального уровня жаропрочности данной группы сплавов.

3 Предложен химический состав литейного монокристаллического жаропрочного никелевого сплава с повышенной стойкостью к солевой и сульфидной коррозии, имеющего прочностные характеристики на уровне сплавов авиационных ГТД до температур 1050°С.

4 Разработаны технология выплавки шихтовых заготовок созданного никелевого жаропрочного сплава, обеспечивающая получение заданного химического состава, и технология монокристаллитного литья, которая обеспечивает получение требуемой макроструктуры отливок типа "Лопатка".

5 Определены температуры фазовых переходов, что позволило разработать технологию термической обработки, обеспечивающую устранение ликвационной неоднородности в пределах дендритной ячейки монокристаллической отливки, а также получение заданной микроструктуры и фазового состава.

6 С использованием разработанного метода конструирования создан сплав СЛЖС-5, который по коррозионной стойкости и жаропрочности превосходит существующие отечественные и зарубежные аналоги (включая, CMSX-11B: $\sigma_{100}^{1000}=184$ МПа) и на сегодняшний день имеет наилучшие характе-

ристики комплекса «жаропрочность - стойкость к солевой коррозии», что подтверждает адекватность предложенного метода.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1 **Данилов, Д.В.** Влияние многослойного структурно-стабильного жаростойкого покрытия на свойства монокристаллических жаропрочных сплавов [Текст] / Д.В. Данилов, Н.А. Зайцев, И.И. Хрящев, А.А. Шатульский // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева, – 2013, – №3(26), – С. 8-17.

2 **Данилов, Д.В.** Методика выбора присадочных материалов для сварки жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / Д.В. Данилов, Н.А. Зайцев, А.А. Шатульский // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – №9. – С. 10-14.

3 **Данилов, Д.В.** Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе Часть – I [Текст] / Д.В. Данилов, А.В. Логунов, Ю.Н. Шмотин // Технология металлов. – 2014. – №5. – С. 3-9.

4 **Данилов, Д.В.** Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе Часть – II [Текст] / Д.В. Данилов, А.В. Логунов, Ю.Н. Шмотин // Технология металлов. – 2014. – №6. – С. 3-10.

5 **Данилов, Д.В.** Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе Часть – III [Текст] / Д.В. Данилов, А.В. Логунов, Ю.Н. Шмотин // Технология металлов. – 2014. – №7. – С. 3-11.

Публикации в других изданиях

6 **Данилов, Д.В.** Разработка жаропрочного никелевого суперсплава стойкого к высокотемпературной солевой коррозии [Текст] / Д.В. Данилов, Ю.Н. Шмотин, А.В. Логунов, И.А. Лещенко // Сб. трудов X Международной конференции по гидроавиации «Гидроавиаслон-2014». – 2014, – С. 207-213.

7 **Данилов, Д.В.** Компьютерное моделирование жаропрочных никелевых сплавов для монокристаллических лопаток ГТУ, работающих в условиях воздействия морской солевой коррозии: критические параметры [Текст] / Д.В. Данилов, А.В. Логунов, Ю.Н. Шмотин, Э.О. Цатурян, Ю.Н. Захаров // Сб. кратких сообщений XXXIII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. – 2013. – С. 56-60.

8 **Danilov, D.** Development of economically doped heat-resistant nickel single-crystal superalloys for blades of perspective gas turbine engines [Text]/ D. Danilov, A. Logunov, I. Leshcenko, Y. Shmotin // PRICM 8. TMS. – 2013. – P. 327-336.

9 **Пат. 2520934 Российская Федерация, МПК7 C22C19/05.** Жаропрочный никелевый сплав, обладающий высоким сопротивлением к сульфидной коррозии в сочетании с высокой жаропрочностью [Текст] / Данилов Д.В., Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Лещенко И.А., Цатурян Э.О., Логунов А.В., Захаров Ю.Н.; заявитель и патентообладатель ОАО «НПО «Сатурн», ФГБОУ ВПО «МГОУ им. В.С. Черномырдина». – № 2013111611/02, заявл. 15.03.2013, опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 8 с.

Зав. РИО М.А. Салкова

Подписано в печать _____

Формат 60×84 1/16. Уч.-изд. Л. 1. Тираж 100. Заказ _____

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева (РГАТУ имени П.А. Соловьева.)

152934, г. Рыбинск. Ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П.А. Соловьева

152934, г. Рыбинск. Ул. Пушкина, 5