

На правах рукописи

ЕЛЮТИН ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ
V И VI ПОКОЛЕНИЙ С ПОВЫШЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ
ПРОЧНОСТЬЮ ДЛЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛОПАТОК
ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВИАЦИОННЫХ ГТД**

Специальность 2.6.1

Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Научный руководитель: **Петрушин Николай Васильевич**
доктор технических наук,
главный научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Официальные оппоненты: **Поварова Кира Борисовна**
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник лаборатории «Физико-химии и
механики металлических материалов»
ФГУБН ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН

Тихомирова Елена Александровна
кандидат технических наук,
начальник испытательной лаборатории по
исследованию деталей и узлов ИЦЗЛ службы
главного металлурга АО «ОДК–Климов»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2023 года в ___:___ часов на заседании диссертационного совета 31.1.002.01 при НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ по адресу: 105005, Россия, г. Москва, ул. Радио, д. 17. Тел.: +7 (499) 261-86-77. Факс: +7 (499) 267-86-09. E-mail: admin@viam.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и на сайте www.viam.ru.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

М.А. Горбовец

© НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023

© Елютин Е.С., 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Начало XXI века ознаменовало доминирующее положение ГТД в качестве силовых установок гражданской и военной авиационной техники. Это позволило совершить качественный скачок в развитии авиации: освоить большие высоты полета и сверхзвуковые скорости с числом Маха до 3,3, значительно повысить грузоподъемность и дальность полета.

Эксплуатационные характеристики ГТД определяются температурой газа на входе в турбину, повышение которой позволяет увеличить тягу двигателя и снизить удельный расход топлива. Создание перспективных авиационных двигателей V и VI поколений требует применения рабочих лопаток газовых турбин, способных противостоять одновременному воздействию температуры свыше 1950 К, а также высоких статических и циклических механических напряжений, активной коррозионно-окислительной среды. В этой связи разработка более жаропрочных материалов для турбинных рабочих лопаток ГТД имеет наибольшую актуальность.

Цель работы

Разработка с использованием цифровых технологий нового поколения литейных жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов (сплавов V и VI поколений) с повышенными характеристиками длительной прочности и рабочей температурой до 1200 °С для монокристаллических рабочих лопаток турбин перспективных газотурбинных двигателей вертолетов, самолетов и других изделий авиационной техники.

Задачи работы

- определить технологические параметры направленной кристаллизации с плоским фронтом никелевых γ/γ' -сплавов систем Ni–Al–Re–Ru и Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru, получить образцы с переменным по длине химическим составом (образцы с макросегрегацией) и на этой основе определить растворимость рения и рутения в γ' -фазе никелевых сплавов, а также разработать регрессионные модели для прогнозирования температур γ' -сольвус, солидус и ликвидус жаропрочных никелевых сплавов в зависимости от содержания алюминия, тантала, рения и рутения в концентрационной области, соответствующей монокристаллическим жаропрочным никелевым сплавам V и VI поколений;
- исследовать влияние знака γ/γ' -мисфита на γ/γ' -микроструктуру и длительную прочность монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов;
- с применением метода компьютерного конструирования определить концентрационные области легирования новых монокристаллических жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов V и VI поколений с повышенными характеристиками длительной прочности и температурной работоспособности;

- разработать специальные режимы термической обработки, включающие операцию горячего изостатического прессования (ГИП), монокристаллических отливок образцов и рабочих лопаток из новых жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов V и VI поколений, обеспечивающие достижение требуемых характеристик длительной прочности путем формирования кубоидных частиц γ' -фазы заданного размера, снижения ликвационной химической неоднородности и объемной микропористости;

- исследовать механические свойства монокристаллов с заданной кристаллографической ориентацией из новых жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов V и VI поколений в связи с их общей квалификацией (паспортизацией).

Научная новизна работы

1 Впервые получены значимые научно обоснованные технические решения в области разработки нового поколения жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов для монокристаллических рабочих лопаток перспективных авиационных ГТД. С помощью метода компьютерного конструирования и на основе результатов экспериментальных исследований структурно-фазовых характеристик, физико-химических свойств и механических испытаний разработаны монокристаллические жаропрочные рений-рутенийсодержащие никелевые сплавы нового поколения, обладающие повышенными характеристиками длительной прочности и рабочей температуры, следующих марок:

- монокристаллический сплав V поколения марки ВЖМ8 с рабочей температурой до 1170 °С (для $\langle 001 \rangle$ монокристаллов сплава $\sigma_B^{20} = 1365$ МПа, $\sigma_{0,2}^{20} = 940$ МПа, $\delta^{20} = 16$ %, $\sigma_B^{1200} = 260$ МПа, $\sigma_{0,2}^{1200} = 230$ МПа, $\delta^{1200} = 45$ %, $\sigma_{100}^{900} = 580$ МПа, $\sigma_{100}^{1000} = 320$ МПа, $\sigma_{100}^{1100} = 185$ МПа, $\sigma_{1000}^{1100} = 140$ МПа, $\sigma_{100}^{1170} = 110$ МПа, средние значения);

- монокристаллический сплав VI поколения марки ВЖМ10 с рабочей температурой до 1200 °С (для $\langle 001 \rangle$ монокристаллов сплава $\sigma_B^{20} = 1350$ МПа, $\sigma_{0,2}^{20} = 980$ МПа, $\delta^{20} = 11,5$ %, $\sigma_B^{1200} = 255$ МПа, $\sigma_{0,2}^{1200} = 235$ МПа, $\delta^{1200} = 34$ %, $\sigma_B^{1250} = 135$ МПа, $\sigma_{0,2}^{1250} = 110$ МПа, $\delta^{1250} = 41$ %, $\sigma_{100}^{900} = 620$ МПа, $\sigma_{100}^{1000} = 360$ МПа, $\sigma_{100}^{1100} = 200$ МПа, $\sigma_{100}^{1200} = 80$ МПа, $\sigma_{10}^{1250} = 55$ МПа, средние значения).

2 Показано, что в никелевых сплавах четырехкомпонентной системы Ni–Al–Re–Ru при кристаллизации γ' -фаза образуется по перитектической $L + \gamma \rightarrow \gamma'$ при температуре 1374 °С и эвтектической $L \rightarrow \gamma' + \beta$ при температуре 1372 °С реакциях, так как это установлено в новой версии фрагмента диаграммы состояния двойной системы Ni–Al в области составов, соответствующих γ' -фазе.

3 В никелевых сплавах четырехкомпонентной системы Ni–Al–Re–Ru определена растворимость Re и Ru в γ' -фазе, составляющая в сплавах $\gamma+\gamma' - 1,1$ и $1,5$ % (атомн.), в сплаве на основе γ' -фазы – $0,5$ и $1,9$ % (атомн.), в сплавах $\gamma'+\beta - 0,5$ и $1,4$ % (атомн.) соответственно; растворимость Ru в β -фазе составляет $7,1$ % (атомн.); наличие Re в β -фазе не установлено. По сравнению с трехкомпонентными никелевыми сплавами систем Ni–Al–X (где X = Ru, Re) одновременное взаимодействие рения и рутения уменьшает их растворимость в γ' -фазе четырехкомпонентных никелевых сплавов Ni–Al–Re–Ru.

4 Установлено, что в системе Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru, отвечающей монокристаллическим жаропрочным никелевым сплавам IV и V поколений (типа ВЖМ4), легирование рением приводит к значительному повышению температур солидус и ликвидус, снижению температуры γ' -сольвус, а рутением – к небольшому повышению температур этих фазовых превращений.

5 Разработаны и апробированы регрессионные модели, позволяющие прогнозировать температуры γ' -сольвус, солидус и ликвидус монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов в зависимости от концентраций алюминия, тантала, рения и рутения в концентрационной области, соответствующей перспективным монокристаллическим жаропрочным никелевым сплавам V и VI поколений.

6 Установлены закономерности влияния знака γ/γ' -мисфита на микроструктуру и длительную прочность монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов системы Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co: наибольшей длительной прочностью при температурах 800 и 1000 °C обладают монокристаллы сплава с отрицательным γ/γ' -мисфитом (период решетки γ' -фазы меньше, чем γ -твердого раствора) и образовавшимся N-рафтингом, наименьшую – монокристаллы сплава с нулевым мисфитом (рафт-структура не образуется), промежуточные значения длительной прочности обнаруживают монокристаллы сплава с положительным γ/γ' -мисфитом (период решетки γ' -фазы больше, чем γ -твердого раствора) и P-рафтингом.

Практическая значимость результатов исследований

1 Внедрение разработанных и паспортизованных жаропрочных никелевых рений-рутение-содержащих сплавов новых поколений обеспечивает достижение следующих эксплуатационных параметров монокристаллических рабочих лопаток ТВД авиационных газотурбинных двигателей:

- применение сплава V поколения ВЖМ8 и разработанных режимов многоступенчатой термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием (ГИП), обеспечит длительную прочность при температуре 1100 °C $\sigma_{1000}^{1100} = 140$ МПа (среднее значение), что превосходит сплавы-аналоги ЖС32 в $1,5$ – $2,0$ раза и ВЖМ4 на 9 – 17 %; применение сплава ВЖМ8 взамен существующего серийного жаропрочного сплава ЖС32 для производства рабочих лопаток ТВД обеспечит повышения в 2 – 3 раза ресурса работы турбинных лопаток и увеличение

рабочей температуры материала лопаток длительно до 1170 °С и кратковременно до 1200 °С;

- применение сплава VI поколения ВЖМ10 и разработанных режимов многоступенчатой термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием (ГИП), обеспечит следующие характеристики длительной прочности сплава (средние значения): $\sigma_{100}^{900} = 620$ МПа, $\sigma_{100}^{1000} = 360$ МПа, $\sigma_{100}^{1100} = 200$ МПа, $\sigma_{100}^{1200} = 80$ МПа, $\sigma_{10}^{1250} = 55$ МПа, что превосходит сплав-аналог ВЖМ4 в интервале температур от 900 до 1100 °С на 9–18 %, при температуре 1200 °С – в 1,5 раза, при температуре 1250 °С – в 2 раза; применение сплава ВЖМ10 взамен сплава ВЖМ4 для производства монокристаллических рабочих лопаток ТВД двигателя большой тяги ПД-35 обеспечит увеличение рабочей температуры материала лопаток длительно до 1200 °С и кратковременно до 1250 °С.

2 В условиях опытно-промышленного производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведено технологическое опробование с положительным результатом разработанных сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10 при литье монокристаллических рабочих лопаток газовых турбин перспективных авиационных двигателей для вертолетов и самолетов.

3 По результатам исследований на сплав ВЖМ8 выпущена нормативная научно-техническая документация, в том числе:

- ТР 1.2.2367-2014 «Термообработка, совмещенная с ГИП, монокристаллических отливок образцов и рабочих лопаток из высокожаропрочного сплава ВЖМ8»;

- атлас эталонных структур сплава ВЖМ8.

По результатам исследований на сплав ВЖМ10 выпущена следующая нормативная научно-техническая документация:

- паспорт № 2011 на жаропрочный монокристаллический сплав марки ВЖМ10;

- ТУ 1-595-3-1811-2019 «Литые прутковые (шихтовые) заготовки из жаропрочного сплава марки ВЖМ10-ВИ»;

- ТИ 1.595-3-1167-2018 «Выплавка жаропрочного монокристаллического сплава»;

- ТР 1.2.2744-2019 «Литье монокристаллических отливок образцов и рабочих лопаток из жаропрочного сплава ВЖМ10-ВИ с заданной КГО»;

- ТР 1.2.2728-2019 «Термическая обработка, совмещенная с горячим изостатическим прессованием, монокристаллических отливок образцов и рабочих лопаток из жаропрочного сплава ВЖМ10».

Личный вклад автора

Автором лично был выбран режим и проведены нормальная направленная кристаллизация и дифференциальный термический анализ экспериментальных никелевых сплавов систем Ni–Al–Re–Ru и Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru.

Автором выполнен расчет параметров структуры, фазового состава, механических и теплофизических свойств при компьютерном конструировании сплавов V и VI поколений ВЖМ8 и ВЖМ10, а также экспериментальных сплавов системы Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co. Автором выполнен анализ данных по результатам исследования химического состава, структуры и фазового состава, механических и теплофизических свойств. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач, обсуждении полученных результатов, а также написании статей и тезисов докладов.

Апробация работы

Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию юбилею НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (г. Москва, 2007 г.); научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 120-летию со дня рождения И.И. Сидорина (г. Москва, 2008 г.); V Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников, аспирантов и студентов старших курсов (г. Москва, 2008 г.); 6-й Международной молодежной научно-технической конференции «Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии» (г. Алушта, 2012 г.); 9-й Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (г. Москва, 2012 г.); международной научно-практической конференции «Рений. Научные исследования, технологические разработки, промышленное применение» (г. Москва, 2013 г.); симпозиуме «Новые материалы, перспективные технологии металлургии» (г. Москва, 2014 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД» (г. Москва, 2017 г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ в рецензируемых журналах, из которых 5 включены в перечень ВАК и 4 включены в международные базы данных Scopus и Web of Science, и получено 2 патента РФ, отражающих основное содержание работы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, перечня сокращений и обозначений, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 200 страниц, включая 68 рисунков, 43 таблицы, 19 формул и список цитируемой литературы из 204 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *первой главе* представлен аналитический обзор отечественных и зарубежных публикаций по теме диссертации. Приведены общие сведения о структуре и механических свойствах монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС). Рассмотрены механизмы положительного влияния рения и рутения на высокотемпературные механические свойства. Показана возможность достижения высоких значений физико-химических (температуры сольвус, солидус и ликвидус) и структурно-фазовых (размерное несоответствие периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фаз – γ/γ' -мисфит) характеристик при легировании рением и рутением. Отмечено отсутствие системных исследований влияния знака γ/γ' -мисфита (отрицательный и положительный) на прочностные свойства. Приведены сведения о ограниченной растворимости рения и рутения в γ' - и γ -фазах и указана склонность ренийсодержащих сплавов к образованию нежелательных ТПУ фаз. Представлены результаты работ по исследованию влияния рутения на фазовую стабильность ренийсодержащих монокристаллических ЖНС.

Сделан вывод о том, что решение проблемы создания материалов для турбинных рабочих лопаток для перспективных ГТД связано с разработкой монокристаллических жаропрочных никелевых рений-рутениеосодержащих сплавов с повышенными характеристиками длительной прочности и рабочими температурами, осуществляемой при помощи цифровых технологий (различных методов компьютерного конструирования).

Во *второй главе* описаны используемые методы изготовления, проведения испытаний и исследований.

Выплавка слитков экспериментальных композиций сплавов проводилась в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002. Выплавку слитков опытно-промышленных партий разработанных сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10 проводили в промышленной вакуумной индукционной печи ИСВ-016.

Методом медленной ($R \approx 0,6$ см/ч) направленной кристаллизации на лабораторной установке УНК-1 из слитков экспериментальных никелевых сплавов систем Ni–Al–Re–Ru и Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru в условиях высокого градиента температур ($G \approx 150$ °C/см) на фронте роста получены отливки с переменным по длине химическим составом.

Методом направленной кристаллизации в промышленной вакуумной установке УВНК-9А при скорости кристаллизации $R = 0,7$ см/мин и осевом градиенте температуры перед фронтом роста $G \approx 60$ °C/см получены монокристаллические отливки экспериментальных сплавов системы Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co и сплава ВЖМ10 с аксиальной кристаллографической ориентацией (КГО) $\langle 001 \rangle$, а также сплава ВЖМ8 с аксиальными КГО $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$.

Из отливок экспериментальных и разработанных сплавов изготовили образцы для дальнейших исследований и испытаний. Температуры фазовых превращений (полного растворения γ' -фазы в γ -твердом растворе – сольвус γ' $T_{п.р.}$, растворения

эвтектической фазы $T_{\text{эвт.}}$, солидус T_S , ликвидус T_L) исследовали методом дифференциального термического анализа (ДТА). Для исследований макроструктуры образцов применялся метод оптической микроскопии. Микроструктуру образцов исследовали методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), электронно-зондового микроанализа (ЭЗМА) и рентгеноструктурного анализа (РСА) и определяли характеристики: химический состав фаз c_i , локальные концентрации легирующих элементов в материале междендритных областей и осей дендритов и значения коэффициентов микросегрегации K_i , объемную долю γ' -фазы F_0 и эвтектики $F_{\text{эвт.}}$, периоды кристаллических решеток γ -твердого раствора a_γ и γ' -фазы $a_{\gamma'}$ и их размерное несоответствие γ/γ' -мисфит Δa . Для исследования механических свойств проводили испытания цилиндрических образцов на кратковременную (предел прочности σ_B , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ_5 и сужение ψ , модуль упругости (Юнга) E) и длительную прочность σ_T^T , ползучесть $\sigma_{\varepsilon/\tau}^T$, малоцикловую усталость (МЦУ) $\Delta \varepsilon^T$ и многоцикловую усталость (МнЦУ) σ_{-1}^T .

В *третьей главе* представлены результаты исследований влияния легирующих элементов на физико-химические и структурно-фазовые характеристики никелевых γ/γ' -сплавов.

По причине ограниченной растворимости рения и рутения в γ' -фазе трехкомпонентных систем Ni–Al–X (где X = Re, Ru) исследована их растворимость в γ' -фазе четырехкомпонентных никелевых сплавов системы Ni–Al–Re–Ru. Для исследования выбран химический состав исходного (первичного) никелевого сплава Ni–11Al–3Re–3Ru (% мас.) или Ni–21,8Al–0,9Re–1,6Ru (% атомн.). Содержание рения и рутения соответствует типичным монокристаллическим ЖНС IV поколения.

Методом высокоградиентной направленной кристаллизации из исходного сплава получена отливка, состоящая из столбчатых зерен (рисунок 1а), с переменным по длине химическим составом (градиентная отливка) (рисунок 1б). В результате макросегрегации алюминий оттесняется в расплав, рений – в твердую фазу. Рутений не сегрегирует.

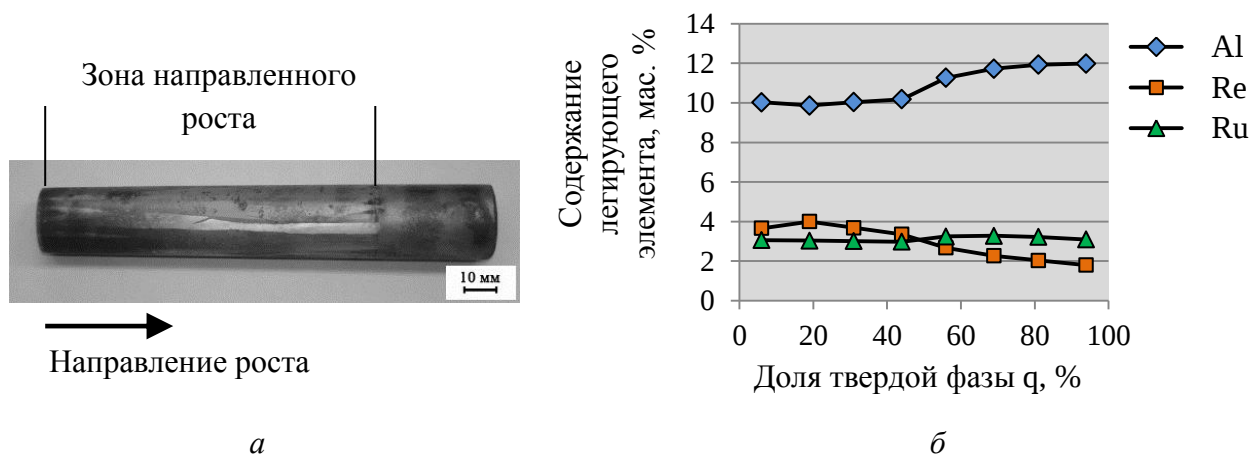
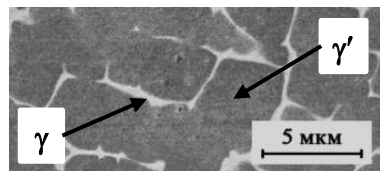
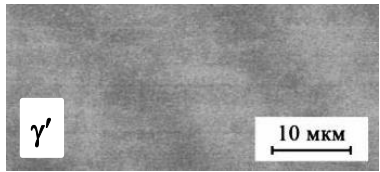
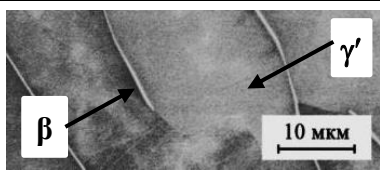


Рисунок 1 – Отливка, полученная методом направленной кристаллизации с плоским фронтом (а) и распределение легирующих элементов по длине зоны направленного роста отливки в зависимости от доли твердой фазы q (б)

Согласно результатам исследования методами РЭМ, ЭЗМА и ДТА градиентная отливка имела переменные по длине микроструктуру, фазовый состав и физико-химические свойства. В отливке последовательно формировались никелевые сплавы со структурами $\gamma+\gamma'$, γ' , $\gamma'+\beta$ (таблица 1). Растворимость в γ' -фазе Re составляет от 0,5 до 1,1 % (атомн.), и Ru – от 1,4 до 1,9 % (атомн.). Растворимость в β -фазе Ru составляет 7,1 % (атомн.), наличие Re в β -фазе не установлено. Сопоставление приведенных данных с диаграммами состояния трехкомпонентных систем Ni–Al–Re и Ni–Al–Ru показало, что одновременное взаимодействие Re и Ru уменьшает их растворимость в γ' -фазе четырехкомпонентных сплавов Ni–Al–Re–Ru.

Т а б л и ц а 1 – Химический состав сплавов, их фаз и коэффициенты распределения элементов между фазами в различных сечениях* отливки после направленной кристаллизации с плоским фронтом первичного сплава Ni–11Al–3Re–3Ru

q, %	Микроструктура в поперечном сечении	Параметр	Легирующий элемент		
			Al	Re	Ru
11		C_i , % атомн.	19,9	1,2	1,7
		$c_i^{\gamma'}$, % атомн.	20,3	1,1	1,5
		C_i^{γ} , % атомн.	12,0	1,7	3,5
63		C_i , % атомн.	22,7	0,7	1,7
		$c_i^{\gamma'}$, % атомн.	22,9	0,5	1,9
94		C_i , % атомн.	23,4	0,5	1,6
		$c_i^{\gamma'}$, % атомн.	23,6	0,5	1,4
		C_i^{β} , % атомн.	34,2	0	7,1
* Сечения отливки характеризовали долей твердой фазы q.					

В таблице 2 приведены результаты исследования температур фазовых превращений, сопоставляя которые с диаграммой состояния системы Ni–Al, можно заключить, что при легировании рением и рутением сохраняется последовательность взаимодействия фаз при эвтектической реакции при температуре 1372 °С и перитектической реакции при температуре 1374 °С.

Т а б л и ц а 2 – Температуры фазовых превращений в никелевых сплавах различных сечений отливки образца после направленной кристаллизации с плоским фронтом первичного сплава Ni–11Al–3Re–3Ru

q , %	Структура сплава	T_s , °С	T_L , °С
40	$\gamma+\gamma'$	1380	1427
63	γ'	1374	1404
75	$\gamma'+\beta$	1372	1404

Проведено исследование влияния рения и рутения на температуры фазовых превращений многокомпонентных γ/γ' -сплавов. Для исследования выбран химический состав исходного никелевого сплава Ni–5,4Al–2,3Cr–1,9Mo–1,2W–8,2Ta–10,3Co–8,7Re–6,6Ru (% мас.) или Ni–12,9Al–2,9Cr–1,3Mo–0,4W–2,9Ta–11,3Co–3,0Re–4,2Ru (% атомн.), который по международной классификации может быть отнесен к монокристаллическим ЖНС V поколения.

Методом медленной высокоградиентной направленной кристаллизации изготовлена отливка с переменным по длине химическим составом (рисунок 2а). В результате сегрегации алюминий и тантал оттеснялись в расплав, рений – в твердую фазу.

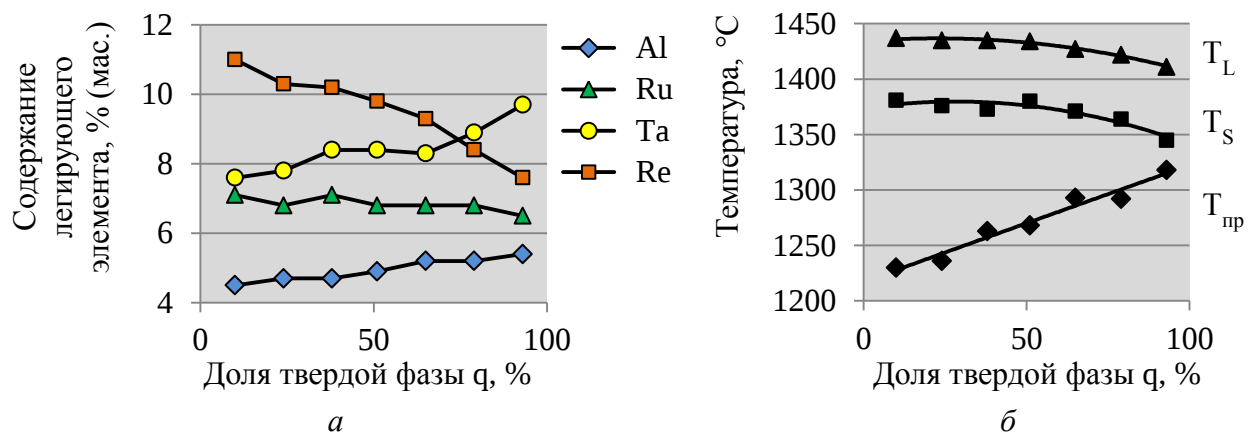


Рисунок 2 – Распределение легирующих элементов (а) и изменение температур фазовых превращений (б) по длине зоны направленного роста отливки из многокомпонентного γ/γ' -сплава (в зависимости от доли твердой фазы q)

После направленной кристаллизации отливка состояла из длинных столбчатых зерен. Каждое зерно имело ячеисто-дендритную структуру (рисунок 3а, б) и фазовый состав $\gamma+\gamma'$. При этом в γ -матрице междендритных участков частицы γ' -фазы, значительно более крупные, чем в осях дендритов, где они имеют неправильную форму (рисунок 3в, г).

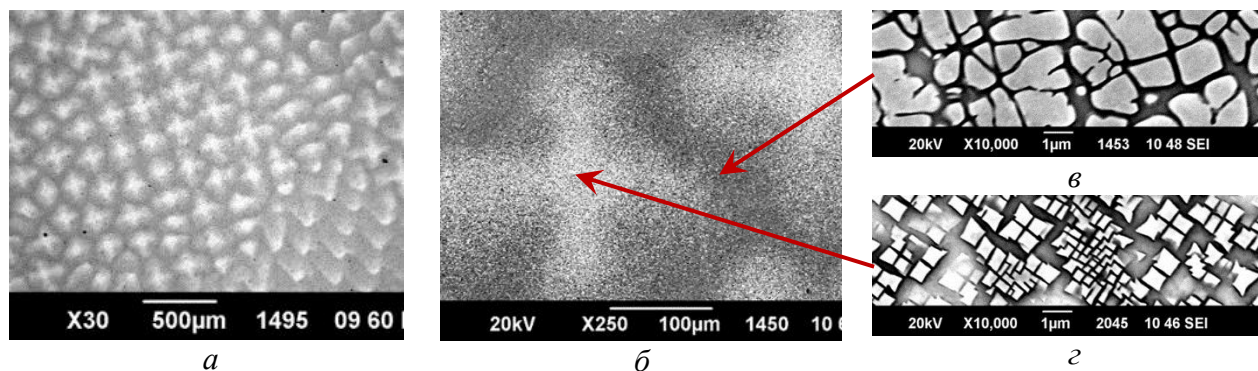


Рисунок 3 – Микроструктура рений-рутенийсодержащего никелевого сплава γ/γ' в отливке ($q = 24$ %, поперечное сечение) после медленной высокоградиентной направленной кристаллизации: а, б – ячеисто-дендритная структура; частицы γ' -фазы в γ -матрице междендритного участка (в) и дендрита первого порядка (г)

С использованием данных химического (рисунок 2а) и термического (рисунок 2б) анализов различных сечений отливки разработаны и апробированы регрессионные модели (формулы 1–3), позволяющие прогнозировать температуры γ' -сольвус, солидус и ликвидус монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов в зависимости от концентраций Al, Ta, Re и Ru в концентрационной области, соответствующей перспективным монокристаллическим жаропрочным никелевым сплавам V и VI поколений.

$$T_{\text{пр}} = 1263 + 29,7C_{\text{Al}} - 17,3C_{\text{Re}} + 1,2C_{\text{Ta}} + 2,5C_{\text{Ru}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad R^2 = 0,773 \quad (1)$$

$$T_{\text{S}} = 1160 + 21,9C_{\text{Al}} + 11,7C_{\text{Re}} - 5,5C_{\text{Ta}} + 5,5C_{\text{Ru}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad R^2 = 0,865 \quad (2)$$

$$T_{\text{L}} = 1291 + 5,8C_{\text{Al}} + 9,2C_{\text{Re}} + 0,4C_{\text{Ta}} + 2,7C_{\text{Ru}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad R^2 = 0,941 \quad (3)$$

Регрессионные модели показывают, что легирование рением приводит к значительному повышению температур солидус и ликвидус и снижению температуры γ' -сольвус, а рутением – к небольшому повышению этих температур фазовых превращений.

Проведены исследования синергического влияния рения и рутения на длительную прочность монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. Объектами исследований являлись монокристаллические образцы с КГО $\langle 001 \rangle$ ренийсодержащего сплава ВЖМ1 (9,3 мас. % Re) и рений-рутенийсодержащего сплава ВЖМ4 (6,0 мас. % Re, 4,0 мас. % Ru). При этом исходная γ/γ' -микроструктура обоих сплавов после полного цикла термической обработки одинакова как в отношении морфологии и размеров γ' -частиц, так и объемных долей (рисунок 4а, б).

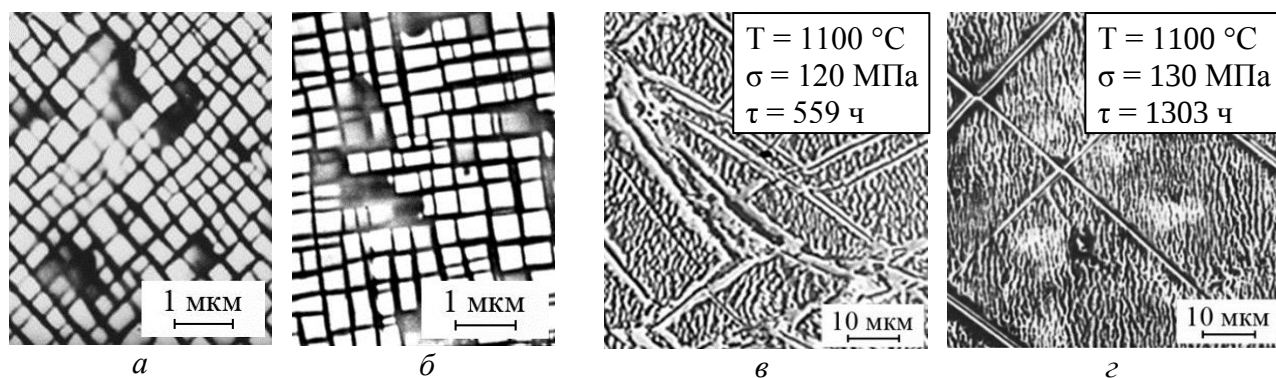


Рисунок 4 – Микроструктура монокристаллов сплавов ВЖМ1 (а, в) и ВЖМ4 (б, г) после полного цикла термической обработки (а, б) и длительных высокотемпературных испытаний (в, г)

На рисунке 5 представлены кривые длительной прочности $\langle 001 \rangle$ монокристаллов сплавов ВЖМ1 и ВЖМ4 в интервале температур от 850 до 1150 °С. При температуре 850 °С сплавы имеют практически одинаковую длительную прочность вплоть до значений долговечностей в 1000 ч. В интервале температур 1000–1150 °С при определенных долговечностях кривые длительной прочности сплавов пересекаются, то есть имеет место инверсия длительной прочности сплавов

(линия а–а). В результате в данном интервале температур при малых долговечностях сплав ВЖМ1 по длительной прочности превосходит сплав ВЖМ4, а при больших – длительная прочность сплава ВЖМ4 значительно выше таковой сплава ВЖМ1.

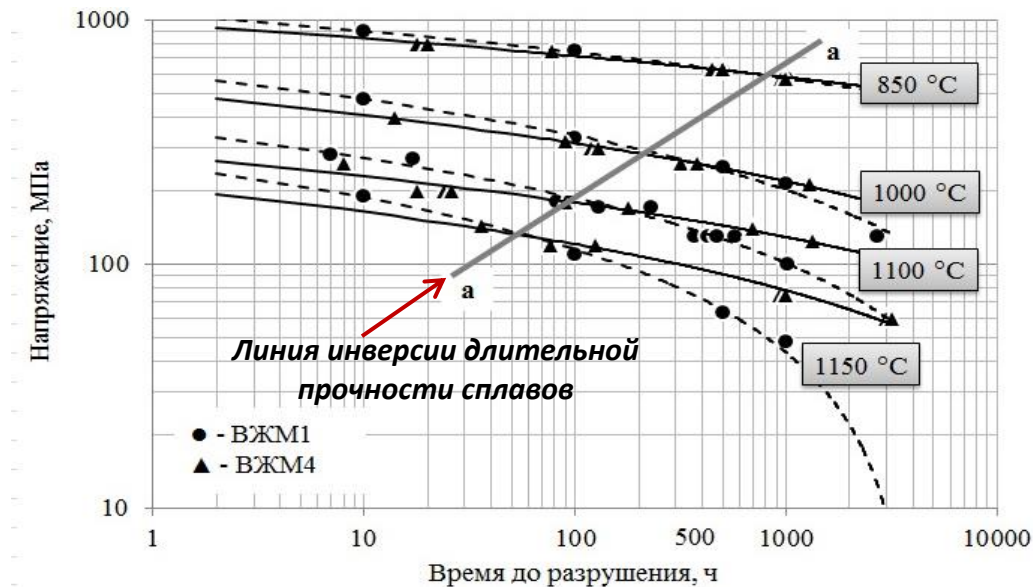


Рисунок 5 – Кривые длительной прочности монокристаллов с КГО <001> сплавов ВЖМ1 (---) и ВЖМ4 (—)

Исследование микроструктуры сплавов после испытаний (рисунок 4в, г) показало, что при испытаниях на длительную прочность при температуре 1100 °C в течение 1303 ч в сплаве ВЖМ4 выделились частицы ТПУ-фаз, поверхностная доля которых составила ~4 %, тогда как в сплаве ВЖМ1 при этой же температуре за 559 ч поверхностная доля выделившихся ТПУ-частиц составила ~28 %. Отсюда приблизительно можно оценить соотношение средних скоростей (V) выделения частиц ТПУ фаз при температуре 1100 °C в этих двух сплавах: $V_{\text{ВЖМ1}}^{\text{ТПУ}} \approx 15V_{\text{ВЖМ4}}^{\text{ТПУ}}$, т.е. скорость выделения ТПУ фаз в сплаве ВЖМ1 превышает таковую в сплаве ВЖМ4 в ~15 раз. Такая высокая фазовая стабильность сплава ВЖМ4 и его столь большое преимущество по длительной прочности обусловлены легированием рутением.

Проведено исследование влияния знака γ/γ' -мисфита на микроструктуру и длительную прочность монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов с использованием экспериментальных сплавов с близким химическим составом в рамках одной системы легирования Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co. Поиск составов сплавов выполнен с помощью метода компьютерного конструирования. Путем замещения никеля хромом выбраны никелевые сплавы с положительным, нулевым и отрицательным значениями γ/γ' -мисфита. При этом другие характеристики сплавов (F_0 , $T_{\text{п.р}}$, T_S) практически идентичны (таблица 3).

Испытания на длительную прочность растяжением при температурах 800 и 1000 °C термически обработанных монокристаллов с КГО <001> экспериментальных сплавов с различным содержанием хрома показали (рисунок 6),

Т а б л и ц а 3 – Расчетные значения характеристик экспериментальных никелевых сплавов с различным содержанием хрома

Характеристика	Сплав, значение характеристики		
	А-4%Cr	А-7%Cr	А-10%Cr
γ/γ' -мисфит Δa (1000 °C), %	+0,22	~ 0	–0,23
F_0 (≤ 850 °C), %	69,4	70,0	69,1
F_0 (1000 °C), %	60,7	61,5	61,0
$T_{п.р}$, °C	1278	1286	1293
T_S , °C	1362	1351	1340

что большей долговечностью обладают монокристаллы сплава А-10Cr с отрицательным значением мисфита. В этом случае период решетки γ -твердого раствора больше, чем γ' -фазы ($a_\gamma > a_{\gamma'}$). При этом под действием растягивающей нагрузки образуется *N*-рафтинг (рисунок 7а). Меньшей долговечностью обладают монокристаллы сплава А-7Cr с близким к нулю значением мисфита ($a_\gamma \approx a_{\gamma'}$). Промежуточное значение долговечности характерно для монокристаллов сплава А-4Cr с положительным мисфитом ($a_\gamma < a_{\gamma'}$) и *P*-рафтингом (рисунок 7в).

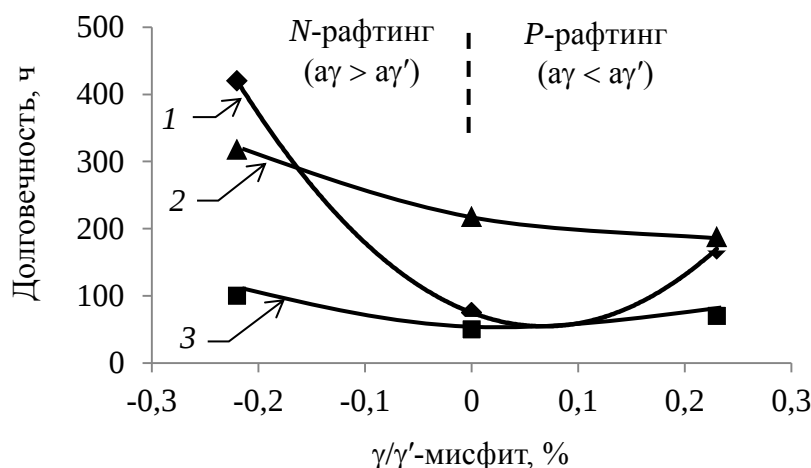


Рисунок 6 – Влияние γ/γ' -мисфита на долговечность при испытании на длительную прочность $\langle 001 \rangle$ монокристаллов экспериментальных сплавов при 800 °C, $\sigma = 600$ МПа (1) и 1000 °C, $\sigma = 150$ МПа (2) и $\sigma = 190$ МПа (3)

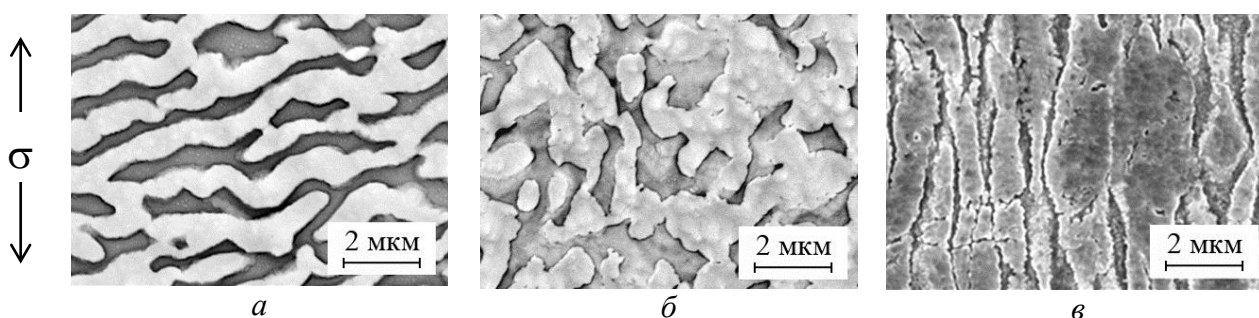


Рисунок 7 – Микроструктуры экспериментальных сплавов А-10Cr (а), А-7Cr (б), и А-4Cr (в) после испытаний на длительную прочность при температуре 1000 °C, $\sigma = 190$ МПа

В *четвертой главе* представлены результаты компьютерного конструирования (метод разработан Е.Н. Кабловым и Н.В. Петрушиным, ВИАМ) новых монокристаллических рений-рутенийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов с заданным повышенным уровнем характеристик длительной прочности:

- сплав V поколения с длительной прочностью (для монокристаллов с КГО $\langle 001 \rangle$) $\sigma_{100}^{1000} \geq 320$ МПа и $\sigma_{1000}^{1100} \geq 140$ МПа;

- сплав VI поколения с длительной прочностью (для монокристаллов с КГО $\langle 001 \rangle$) $\sigma_{100}^{900} \geq 600$ МПа, $\sigma_{100}^{1000} \geq 350$ МПа, $\sigma_{100}^{1100} \geq 200$ МПа и $\sigma_{100}^{1200} \geq 80$ МПа.

Разработка новых сплавов выполнена на базе никелевой системы Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru. С целью обеспечения заданного повышенного уровня характеристик длительной прочности были сформулированы следующие исходные условия конструирования монокристаллических рений-рутенийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов V и VI поколений.

Искомый химический состав нового сплава V поколения должен обеспечить γ/γ' -мисфит не менее 0,5 %, исходную объемную долю высокодисперсных (0,3–0,5 мкм) частиц γ' -фазы не менее 65 %, температуру γ' -сольвус не менее 1290 °С, температуру солидус не менее 1340 °С, объемную долю неравновесной эвтектики ($\gamma+\gamma'$) не более 5 %, «окно» термической обработки не менее 20 °С, плотность не более 9,2 г/см³, приемлемую фазовую стабильность.

Искомый химический состав нового сплава VI поколения должен обеспечить γ/γ' -мисфит не менее 0,5 %, исходную объемную долю высокодисперсных (0,3–0,5 мкм) частиц γ' -фазы не менее 65 %, температуру γ' -сольвус не менее 1320 °С, температуру солидус не менее 1370 °С, объемную долю неравновесной эвтектики ($\gamma+\gamma'$) не более 5 %, «окно» термической обработки не менее 20 °С, плотность не более 9,2 г/см³, приемлемую фазовую стабильность.

В выбранной системе легирования концентрации компонентов каждого конструируемого сплава задавали в соответствии с матрицей плана полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа $2^n + 1$, где $n = 8$ – количество переменных факторов. В качестве переменных факторов были выбраны легирующие элементы Al, Co, Cr, Ta, W, Mo, Re и Ru. Далее в компьютерном эксперименте проводили оценку сбалансированности химических составов всех (2^n+1) вариантов каждого конструируемого сплава на основе расчета параметров фазовой стабильности ΔE и $(\overline{Md})_\gamma$.

С учётом достигнутых расчетом заданных значений характеристик (таблицы 4 и 5) для экспериментального исследования были выбраны химические составы рений-рутенийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов V поколения Ni–5,7Al–2,9Cr–3,4Mo–4,2W–5,9Ta–5,3Co–6,1Re–6,0Ru (мас. %) (далее ВЖМ8) и VI поколения (далее ВЖМ10).

Т а б л и ц а 4 – Свойства сконструированного сплава ВЖМ8

Показатель свойств	Значение показателя			
	расчет по моделям (1–3)	расчѐт по методу компьютерного конструирования	эксперимент	
			после литья	после термической обработки
Физическо-химические свойства				
d , г/см ³	–	9,158	–	9,080
$T_{п.р}$, °C	1349	1324	1298	1290
$T_{эвт}$, °C	–	1334	1337	–
T_S , °C	1357	1374	1349	1377
T_L , °C	1399	1437	1422	1428
Структурно-фазовые характеристики				
F_0 (850 °C), %	–	67,9	69,6	79,3
$F_{эвт.}$ (850 °C), %	–	3,5	4,0	–
a_γ (20 °C), нм	–	0,3602	0,3607	0,3610
$a_{\gamma'}$ (20 °C), нм	–	0,3584	0,3585– 0,3589	0,3587– 0,3589
Δa (20 °C), %	–	0,5	0,51–0,61	0,55–0,65
Параметры фазовой стабильности (850 °C)				
ΔE	–	–0,096	–	–
$(Md)_{сплав}$, эВ	–	0,974	–	–
$(Md)_\gamma$, эВ	–	0,903	–	–
Длительная прочность, МПа				
σ_{100}^{900}	–	526,7	–	620
σ_{100}^{1000}	–	319,7	–	320
σ_{1000}^{1000}	–	225,3	–	200
σ_{1000}^{1100}	–	141,3	–	140

Т а б л и ц а 5 – Свойства сконструированного сплава ВЖМ10

Показатель свойств	Значение показателя			
	расчет по моделям (1–3)	расчёт по методу компьютерного конструирования	эксперимент	
			после литья	после термической обработки
Физическо-химические свойства				
d , г/см ³	–	9,216	–	9,110
$T_{\text{п.р}}$, °C	1309	1313	1325	1311
$T_{\text{эвт}}$, °C	–	1344	–	–
T_{S} , °C	1364	1382	1362	1384
T_{L} , °C	1416	1458	1437	1444

Продолжение таблицы 5

Структурно-фазовые характеристики				
F_0 (850 °C), %	–	67,7	–	65,2
$F_{\text{эвт.}}$ (850 °C), %	–	4,5	0,95	–
a_γ (20 °C), нм	–	0,3613	0,3605	0,3613
$a_{\gamma'}$ (20 °C), нм	–	0,3589	0,3592– 0,3596	0,3589
Δa (20 °C), %	–	0,68	0,26–0,36	0,68
Параметры фазовой стабильности (850 °C)				
ΔE	–	–0,110	–	–
$(Md)_{\text{сплав}}$, эВ	–	0,980	–	–
$(Md)_\gamma$, эВ	–	0,899	–	–
Длительная прочность, МПа				
σ_{100}^{900}	–	580,9	–	620
σ_{100}^{1000}	–	341,1	–	360
σ_{1000}^{1000}	–	237,4	–	225
σ_{1000}^{1100}	–	148,7	–	140

В *пятой главе* представлены результаты экспериментальных исследований сконструированного нового жаропрочного сплава V поколения ВЖМ8.

Изготовленные монокристаллы сплава ВЖМ8 с кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$ после литья имели характерную для литых монокристаллов ЖНС дендритно-ячеистую структуру (рисунок 8а), выделения неравновесной эвтектики ($\gamma + \gamma'$) и литейные поры в межосных участках дендритов (рисунок 8б), размерную и морфологическую неоднородность дисперсных частиц γ' -фазы в осях и межосных областях дендритов (рисунок 8в, г), обусловленные микросегрегацией легирующих элементов в пределах дендритных ячеек ($K_{Al} = 1,3$, $K_{Ta} = 2,1$, $K_W = -2,3$, $K_{Re} = -3,1$). Для устранения химической и структурной неоднородности монокристаллических отливок сплава разработан режим ГИП и термической обработки со следующей последовательностью операций: 2-х ступенчатый ГИП, вакуумный гомогенизирующий отжиг (ВГО) в интервале температур 1300–1320 °C, 2-х ступенчатое старение. На рисунке 8д, е представлена морфология γ' -фазы в осях и межосных пространствах дендритов после термической обработки. Наибольшую остаточную микросегрегацию имеет рений ($K_{Re} = -1,3$).

Исследования физико-химических свойств, структурно-фазовых характеристик и длительной прочности в интервале температур 900–1100 °C термообработанных монокристаллов сплава ВЖМ8 с КГО $\langle 001 \rangle$ показали достижение заданных расчетных значений этих параметров (таблица 4, рисунок 9). В процессе длительных высокотемпературных испытаний в структуре сплава формируется типичная для ЖНС рафт-структуры γ' -фазы (рисунок 10а), а также образуется небольшое количество пластинчатых выделений ТПУ фазы (рисунок 10б) следующего состава (в % мас.): 15,2Ni–51Re–19,4Ru–5,2Mo–3,1W–1,9Cr–0,4Al.

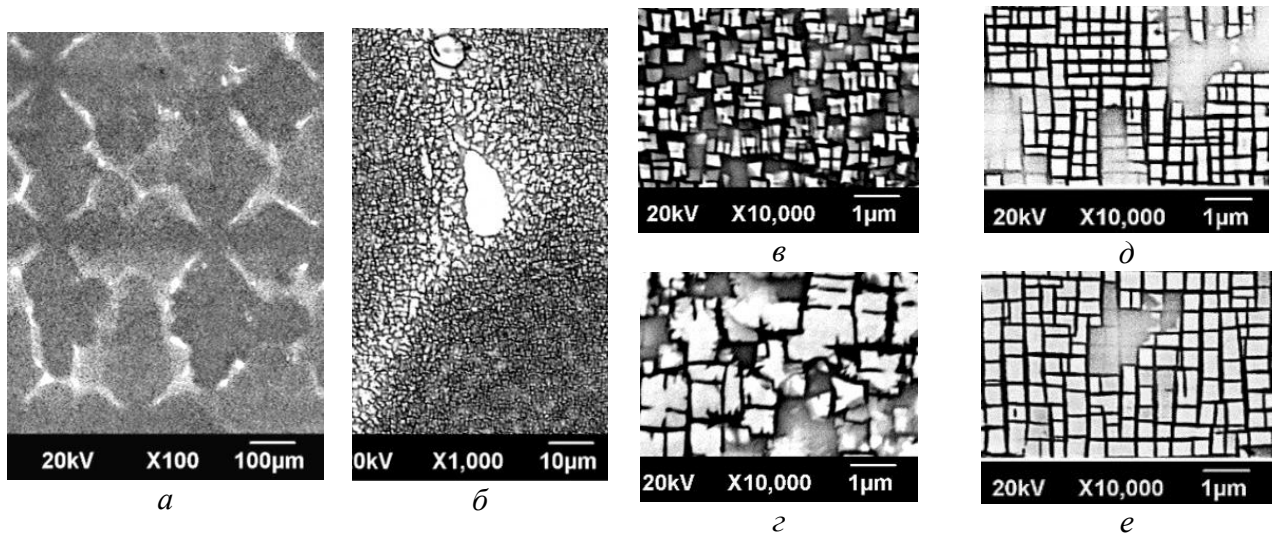


Рисунок 8 – Микроструктура литых (*a–г*) и термически обработанных (*д, е*) монокристаллических заготовок образцов из сплава ВЖМ8 с КГО <001>: *a* – дендритно-ячеистая микроструктура; *б* – неравновесная эвтектика ($\gamma+\gamma'$) и литейная пора; морфология γ' -фазы в центре дендрита первого порядка (*в, д*) и междендритной области (*г, е*)

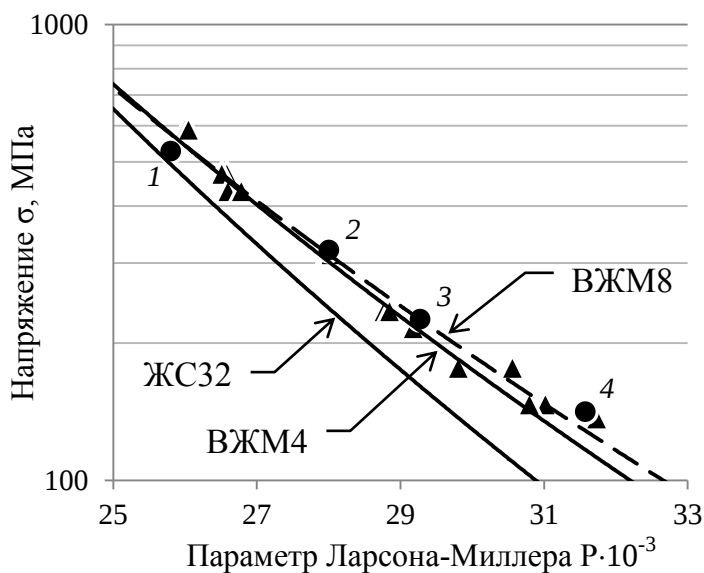


Рисунок 9 – Параметрические зависимости длительной прочности для сконструированного сплава ВЖМ8, серийных сплавов ЖС32 и ВЖМ4 и данных компьютерного конструирования ($\sigma_{100}^{900} = 526,7$ МПа (1), $\sigma_{100}^{1000} = 319,7$ МПа (2), $\sigma_{1000}^{1000} = 225,3$ МПа (3) и $\sigma_{1000}^{1100} = 141,3$ МПа (4))

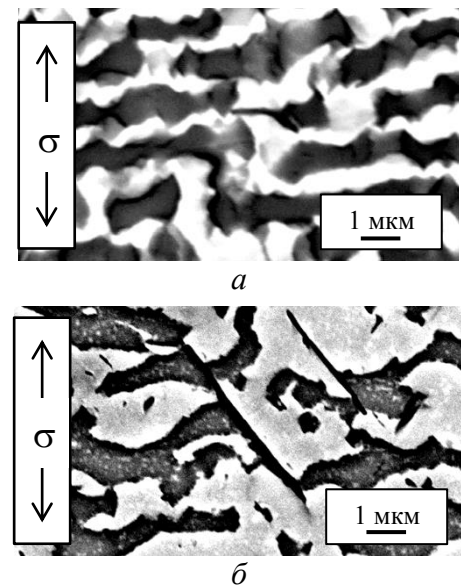


Рисунок 10 – Микроструктура образцов в зоне разрыва (продольное сечение) после испытаний: *a* – рафт структура γ' -фазы, 1000 °С, $\sigma = 216$ МПа, $\tau = 838$ ч, $\delta = 79$ %; *б* – пластинчатые ТПУ выделения, 1100 °С, $\sigma = 137$ МПа, $\tau = 1151$ ч, $\delta = 22$ %

В соответствии с разработанной программой паспортизации проведен комплекс испытаний и определены значения характеристик кратковременной и длительной прочности, ползучести, мало- и многоциклового усталости сплава ВЖМ8 с КГО <001>. Проведены исследования анизотропии механических свойств монокристаллов сплава с аксиальными КГО <001>, <011>, <111>, которая учитывается при расчетах конструкционной прочности монокристаллических

лопаток при ресурсном проектировании ГТД. Результаты этих исследований представлены на рисунке 11 и в таблицах 6 и 7.

Установлено, что по пределам прочности и текучести (рисунок 11а, б) до температуры 1000 °С и пределу длительной прочности (таблица 6) в интервале температур 900–1170 °С преимущество имеют монокристаллы сплава с ориентацией <111>. Наиболее предпочтительной ориентацией, оказывающей повышенное сопротивление усталости при испытаниях на МЦУ при температурах 500 и 850 °С, является ориентация <001>, при испытаниях на МнЦУ при температурах 20 и 1000 °С – ориентация <111>. Вместе с тем монокристаллы с ориентацией <001> обладают меньшим модулем упругости, а значит меньшим уровнем термических напряжений в процессе эксплуатации (рисунок 11в).

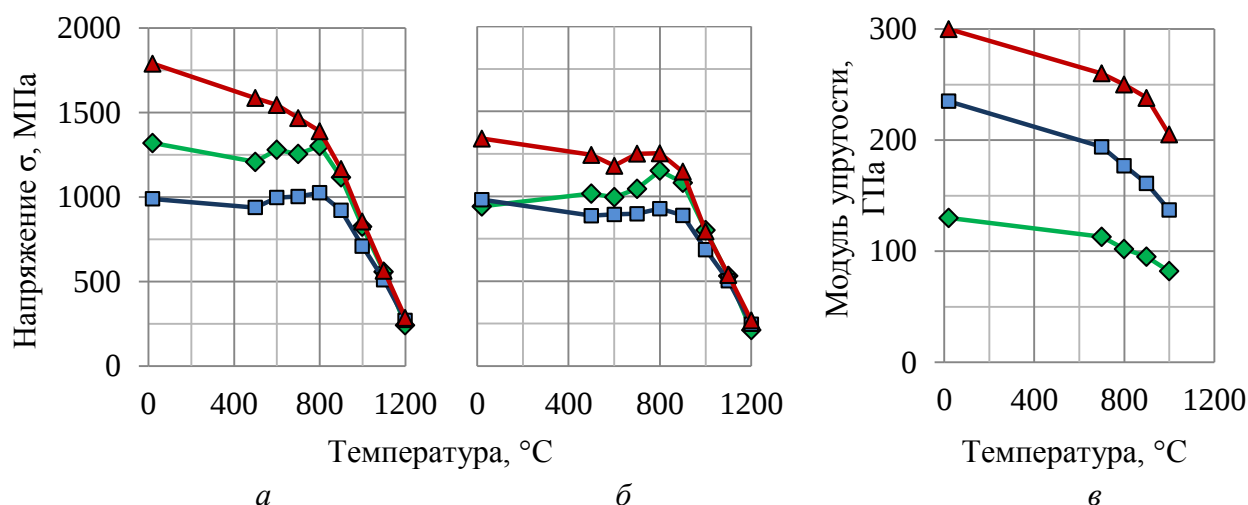


Рисунок 11 – Температурно-ориентационные зависимости предела прочности $\sigma_{\text{в}}$ (а) и предела текучести $\sigma_{0,2}$ (б) и модуля упругости E (в) монокристаллов сплава ВЖМ8 с ориентациями <001> (—◆—), <011> (—■—) и <111> (—▲—)

Т а б л и ц а 6 – Длительная прочность (средние значения) монокристаллов сплава ВЖМ8

T, °C	$\sigma_{100}^{<hkl>}$, МПа			$\sigma_{500}^{<hkl>}$, МПа			$\sigma_{1000}^{<hkl>}$, МПа		
	<001>	<011>	<111>	<001>	<011>	<111>	<001>	<011>	<111>
900	580	435	640	435	385	435	380	360	365
1000	320	300	415	230	250	265	200	220	220
1100	185	200	215	150	150	180	140	130	150
1170	110	100	120	90	75	95	75	65	90

Т а б л и ц а 7 – Характеристики МЦУ и МнЦУ сплава ВЖМ8

Наименование характеристики	T, °C	Значение характеристики при заданной КГО		
		<001>	<011>	<111>
Предел ограниченной выносливости на базе $N = 1 \cdot 10^4$ циклов при $R = 0$ и $f = 0,5$ Гц, $\Delta\epsilon$, %	500	1,3	0,90	0,70
	850	1,3	0,66	0,44
Предел ограниченной выносливости на базе $N = 2 \cdot 10^7$ циклов при $R = -1$ и $f = 50$ Гц, σ_{-1} , МПа	20	500	440	550

Испытания на длительную прочность в интервале температур 900–1170 °С, приближенных к условиям эксплуатации рабочих лопаток ТВД, показали превосходство разработанного сплава ВЖМ8 над серийными сплавами ЖС32 и ВЖМ4 (рисунок 12).

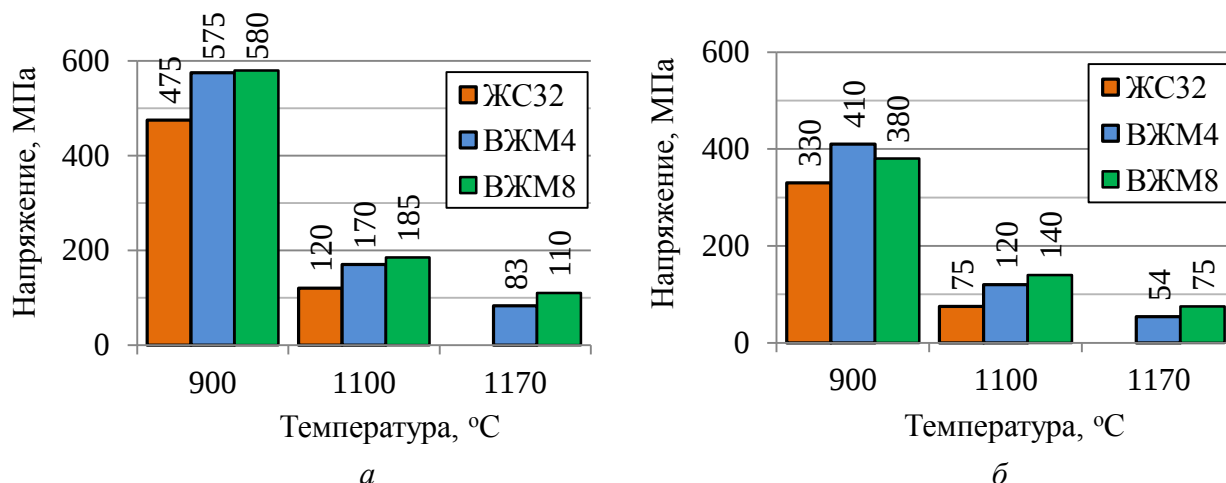


Рисунок 12 – Длительная прочность (средние значения) при температурах 900, 1100 и 1170 °С за 100 (а) и 1000 ч (б) монокристаллов с КГО <001> разработанного сплава ВЖМ8 и серийных сплавов ЖС32 и ВЖМ4

В *шестой главе* представлены результаты экспериментальных исследований сконструированного нового жаропрочного сплава VI поколения ВЖМ10.

Изготовленные монокристаллы сконструированного сплава ВЖМ10 с КГО <001> после литья имели характерную для литых монокристаллов ЖНС дендритно-ячеистую структуру (рисунок 13а), выделения неравновесной эвтектики ($\gamma + \gamma'$) и литейные поры в межосных участках дендритов (рисунок 13б), размерную и морфологическую неоднородность дисперсных частиц γ' -фазы в осях и межосных областях дендритов (рисунок 13в, г), обусловленные микросегрегацией легирующих элементов в пределах дендритных ячеек ($K_{Al} = 1,3$, $K_{Ta} = 1,7$, $K_W = -1,6$, $K_{Re} = -3,1$). Для устранения химической и структурной неоднородности монокристаллических отливок сплава разработан режим ГИП и термической обработки со следующей последовательностью операций: 2-х ступенчатый ГИП, вакуумный гомогенизирующий отжиг (ВГО) в интервале температур 1330–1355 °С, 2-х ступенчатое старение. На рисунке 13д, е представлена морфология γ' -фазы в осях и межосных пространствах дендритов после термической обработки. Наибольшую остаточную микросегрегацию имеет рений ($K_{Re} = -1,3$).

Исследования физико-химических свойств и структурно-фазовых характеристик термообработанных монокристаллов сплава ВЖМ10 показали достижение расчетных заданных значений характеристик (таблица 5). Оценка длительной прочности при испытаниях монокристаллов сплава с КГО <001> в интервале температур 900–1100 °С показала высокий уровень свойств (рисунок 14).

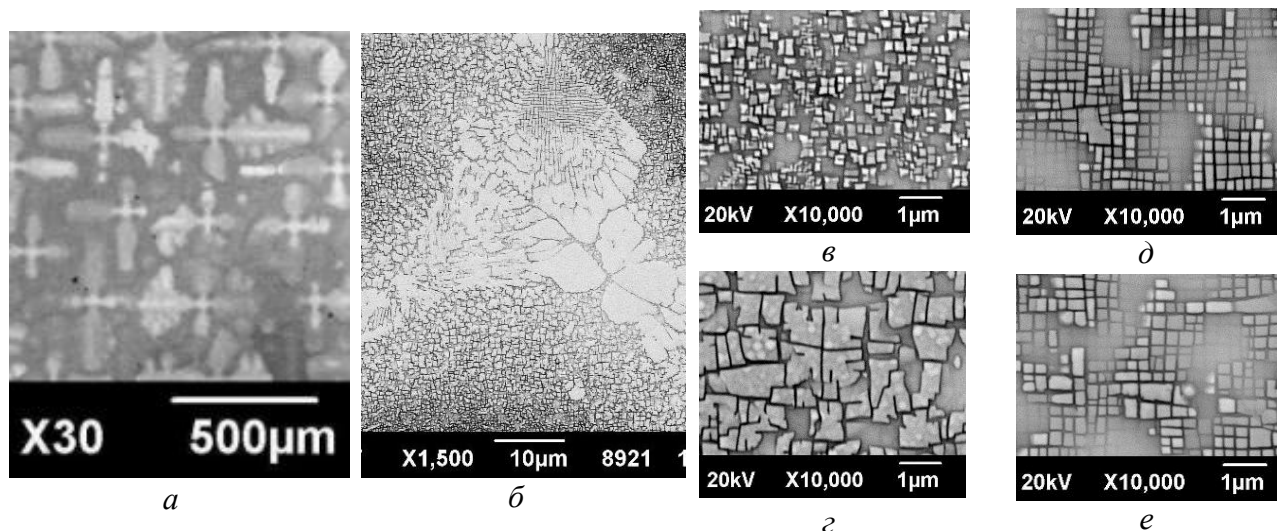


Рисунок 13 – Микроструктура литых (*a–e*) и термически обработанных (*д, е*) монокристаллических заготовок образцов из сплава ВЖМ10 с КГО <001>: *a* – дендритно-ячеистая микроструктура; *б* – неравновесная эвтектика ($\gamma+\gamma'$) и литейная пора; морфология γ' -фазы в центре дендрита первого порядка (*в, д*) и междендритной области (*з, е*)

Исследования структурно-фазового состояния сплава ВЖМ10 после длительных высокотемпературных испытаний показали наличие в его структуре небольшого количества пластинчатых выделений ТПУ фазы (рисунок 15*б*), свидетельствуя о приемлемой фазовой стабильности сплава ВЖМ10. Отмечается формирование типичной для ЖНС рафт-структуры γ' -фазы (рисунок 15*а*).

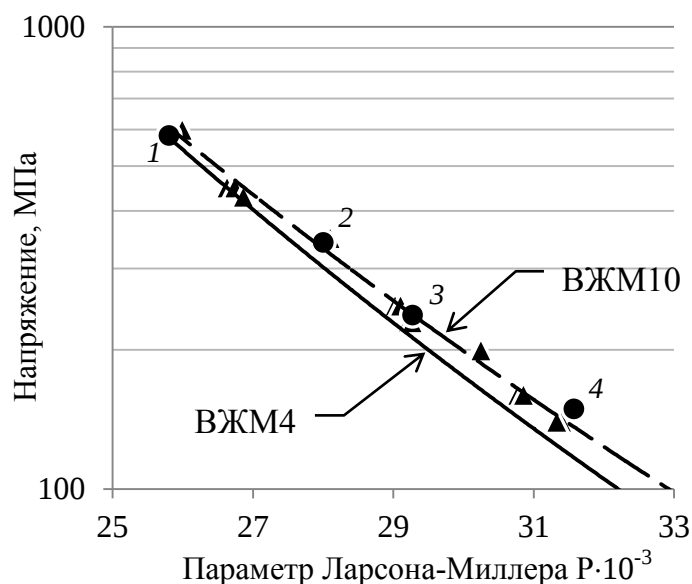


Рисунок 14 – Параметрические зависимости длительной прочности для сконструированного сплава ВЖМ10, серийного сплава ВЖМ4 и данных компьютерного конструирования

($\sigma_{100}^{900} = 580,9$ МПа (1), $\sigma_{100}^{1000} = 341,1$ МПа (2), $\sigma_{1000}^{1000} = 237,4$ МПа (3), $\sigma_{1000}^{1100} = 148,7$ МПа (4))

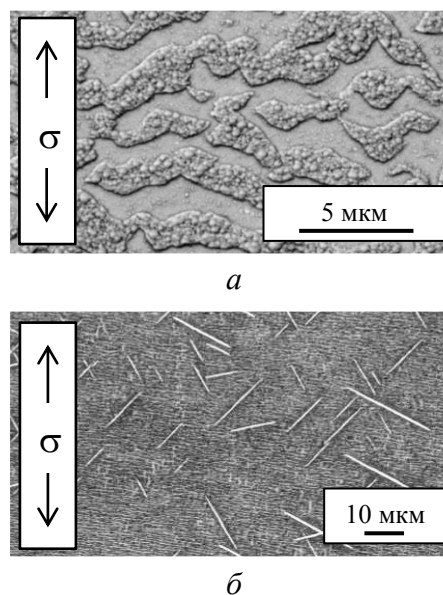


Рисунок 15 – Микроструктура образцов в зоне разрыва (продольное сечение) после испытаний при 1100 °С, $\sigma = 140$ МПа, $\tau = 738$ ч, $\delta = 10$ %; *a* – рафт структура γ' -фазы; *б* – пластинчатые ТПУ выделения

В соответствии с разработанной программой паспортизации проведен комплекс испытаний и определены значения характеристик кратковременной и длительной прочности, ползучести, мало- и многоциклового усталости сплава ВЖМ10 с КГО <001>. Полученные значения некоторых из этих характеристик представлены на рисунке 16 и в таблицах 8, 9 и 10.

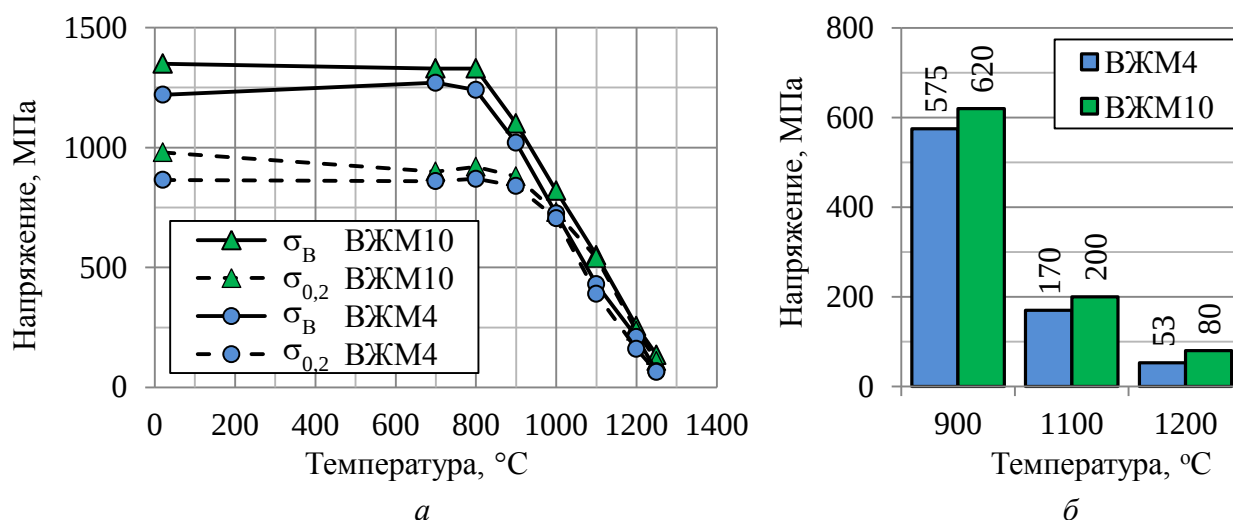


Рисунок 16 – Характеристики кратковременной прочности (а) и длительная прочность на базе 100 ч (б) монокристаллов с КГО <001> разработанного сплава ВЖМ10 и серийного сплава ВЖМ4 (средние значения)

Т а б л и ц а 8 – Характеристики кратковременной прочности (средние значения) монокристаллов сплава ВЖМ10 с КГО <001>

Наименование характеристики	Значение характеристики при заданной температуре, °C							
	20	700	800	900	1000	1100	1200	1250
Предел прочности σ_B , МПа	1350	1330	1330	1100	820	550	255	135
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	980	900	920	880	730	540	235	110
Относительное удлинение δ_5 , %	11,5	6,3	9,1	22,5	31	29	34	41

Т а б л и ц а 9 – Длительная прочность (средние значения) монокристаллов сплава ВЖМ10 с КГО <001>

T, °C	σ_{100} , МПа	σ_{500} , МПа	σ_{1000} , МПа
900	620	470	405
1000	360	260	225
1100	200	140	120
1150	140	95	75
1200	80	—	—

Т а б л и ц а 10 – Предел ползучести (средние значения) монокристаллов сплава ВЖМ10 с КГО <001>

Характеристика	Т, °С	Значение характеристики при заданной базе испытаний τ		
		10 ч	100 ч	500 ч
$\sigma_{0,5/\tau}^T$, МПа	900	670	520	410
	1000	400	270	190
	1100	205	145	110

Разработанный сплав VI поколения ВЖМ10 по характеристикам кратковременной (рисунок 16а) и длительной (рисунок 16б) прочности превосходит жаропрочные сплавы I–IV поколений и не уступает известным рений-рутенийсодержащим жаропрочным сплавам V поколения. В сравнении с серийным сплавом IV поколения ВЖМ4 наибольшее преимущество сплава ВЖМ10 наблюдается на базах испытаний до 100 часов во всем интервале исследуемых температур 900–1250 °С, приближенных к условиям эксплуатации рабочих лопаток ТВД.

В *пятой и шестой* главах представлены результаты технологического опробования сплава ВЖМ8 при монокристалльном литье на промышленной установке для направленной кристаллизации УВНК-9А 66 штук малогабаритных неохлаждаемых рабочих лопаток перспективного вертолетного двигателя ВК-2500П (рисунок 17а) разработки АО «ОДК-Климов» и сплава ВЖМ10 при литье на промышленной установке для направленной кристаллизации УВНК-9А 16 штук охлаждаемых рабочих лопаток ТВД перспективного авиационного двигателя большой тяги ПД-35 (рисунок 17б) разработки АО «ОДК-Авиадвигатель». Рентгеновское исследование структуры изготовленных по разработанным технологиям литья отливок рабочих лопаток показало высокий выход годного по монокристаллической структуре с КГО <001>, который составил 88 % для лопаток из сплава ВЖМ8 и 87 % для лопаток из сплава ВЖМ10.



а



б

Рисунок 17 – Монокристаллические отливки лопаток из сплавов ВЖМ8 (а) и ВЖМ10 (б)

Выводы

1 Впервые получены значимые научно обоснованные технические решения в области разработки нового поколения жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов для монокристаллических рабочих лопаток перспективных авиационных ГТД. С помощью метода компьютерного конструирования и на основе результатов экспериментальных исследований структурно-фазовых характеристик, физико-химических свойств и механических испытаний разработаны монокристаллические жаропрочные рений-рутенийсодержащие никелевые сплавы нового поколения, обладающие заданными характеристиками длительной прочности и рабочей температуры, следующих марок:

- монокристаллический сплав V поколения марки ВЖМ8 с рабочей температурой до 1170 °С, с характеристиками длительной прочности $\sigma_{100}^{1000} = 320$ МПа и $\sigma_{1000}^{1100} = 140$ МПа (средние значения для КГО <001>);

- монокристаллический сплав VI поколения марки ВЖМ10 с рабочей температурой до 1200 °С, с характеристиками длительной прочности $\sigma_{100}^{900} = 620$ МПа, $\sigma_{100}^{1000} = 360$ МПа, $\sigma_{100}^{1100} = 200$ МПа, $\sigma_{100}^{1200} = 80$ МПа (средние значения для КГО <001>).

2 Изготовлены методом направленной кристаллизации с плоским фронтом никелевые γ/γ' -сплавы систем Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru и Ni–Al–Re–Ru и получены образцы с переменным по длине химическим составом (образцы с макросегрегацией).

3 Показано, что в никелевых сплавах четырехкомпонентной системы Ni–Al–Re–Ru при кристаллизации γ' -фаза образуется по перитектической $L + \gamma \rightarrow \gamma'$ при температуре 1374 °С и эвтектической $L \rightarrow \gamma' + \beta$ при температуре 1372 °С реакциях, так как это установлено в новой версии фрагмента диаграммы состояния двойной системы Ni–Al в области составов, соответствующих γ' -фазе.

4 Установлено, что в системе Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru, отвечающей монокристаллическим жаропрочным никелевым сплавам IV и V поколений (типа ВЖМ4), легирование рением приводит к значительному повышению температур солидус и ликвидус, снижению температуры γ' -сольвус, а рутением – к небольшому повышению температур этих фазовых превращений.

5 Разработаны и апробированы регрессионные модели, позволяющие прогнозировать температуры γ' -сольвус, солидус и ликвидус монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов в зависимости от концентраций алюминия, тантала, рения и рутения в концентрационной области, соответствующей перспективным монокристаллическим жаропрочным никелевым сплавам V и VI поколений.

6 Установлены закономерности влияния знака γ/γ' -мисфита на микроструктуру и длительную прочность монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов системы Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co: наибольшей длительной прочностью при

температурах 800 и 1000 °С обладают монокристаллы сплава с отрицательным γ/γ' -мисфитом (период решетки γ' -фазы меньше, чем γ -твердого раствора) и образовавшимся *N*-рафтингом, наименьшую – монокристаллы сплава с нулевым мисфитом (рафт-структура не образуется), промежуточные значения длительной прочности обнаруживают монокристаллы сплава с положительным γ/γ' -мисфитом (период решетки γ' -фазы больше, чем γ -твердого раствора) и *P*-рафтингом.

7 Исследовано влияние ТПУ фаз на длительную прочность с использованием монокристаллов ренийсодержащего сплава ВЖМ1 и рений-рутенийсодержащего сплава ВЖМ4. Обнаружено, что сплав ВЖМ1 обладает преимуществом при средних (850 °С) и высоких (1000–1150 °С) температурах на малых временных базах. Однако при высоких температурах (1000–1150 °С) и продолжительных временах испытаний, типичных для условий эксплуатации лопаток ГТД, сплав ВЖМ4 по длительной прочности значительно превосходит сплав ВЖМ1. При этом скорость выделения ТПУ фаз при температуре 1100 °С в сплаве ВЖМ1 превышает таковую в сплаве ВЖМ4 в 15 раз.

8 Разработаны специальные режимы термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием, монокристаллических отливок образцов и рабочих лопаток из новых жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10, обеспечивающие снижение ликвационной химической неоднородности (коэффициент ликвации рения $K_{Re} = -1,3$), формирование в осях дендритов и междендритных областях кубоидных частиц γ' -фазы заданного размера ($\sim 0,3$ мкм) и низкую объемную микропористость.

9 Исследована анизотропия механических свойств монокристаллов жаропрочного рений-рутенийсодержащего никелевого сплава ВЖМ8 с КГО $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$. Установлено, по пределам прочности и текучести в области температур 20–800 °С монокристаллы с КГО $\langle 111 \rangle$ имеют значительное преимущество перед монокристаллами с КГО $\langle 001 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$. При более высоких температурах анизотропия кратковременной прочности практически вырождается. Наибольшую длительную прочность в интервале температур 900–1170 °С имеют монокристаллы сплава ВЖМ8 с КГО $\langle 111 \rangle$, наименьшую – с КГО $\langle 011 \rangle$. Наиболее предпочтительной КГО, оказывающей повышенное сопротивление усталости при испытаниях на МЦУ при температурах 500 и 850 °С, является ориентация $\langle 001 \rangle$, при испытаниях на МнЦУ при температурах 20 и 1000 °С – ориентация $\langle 111 \rangle$.

10 Разработанные технологии выплавки, литья методом направленной кристаллизации и термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием, монокристаллических отливок образцов и рабочих лопаток из новых жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10 внедрены в опытно-промышленное производство НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Разработаны технические условия на прутковую (шихтовую) заготовку. Выпущен атлас эталонных структур сплава ВЖМ8.

11 Проведена общая квалификация (паспортизация) новых жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10 с монокристаллической структурой, в рамках которой исследованы механические свойства при растяжении, длительная прочность, ползучесть, многоцикловая и малоцикловая усталость, теплофизические свойства, жаростойкость и коррозионная стойкость изготовленных по разработанным технологиям монокристаллических образцов.

12 Выполнено технологическое опробование сплава ВЖМ8 при литье монокристаллических рабочих лопаток ТВД перспективного вертолетного двигателя и сплава ВЖМ10 при литье монокристаллических рабочих лопаток ТВД перспективного авиационного двигателя большой тяги. Исследование изготовленных по разработанным технологиям литья отливок рабочих лопаток показало высокий выход годного по монокристаллической структуре с КГО <001> с отклонением не более 10 град, который для сплава ВЖМ8 составил 88 %, для сплава ВЖМ10 – 87 %.

13 Разработанные сплавы ВЖМ8 и ВЖМ10 внесены в перечень-ограничитель ПО 2-2011 «Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы, рекомендуемые для применения в изделиях авиационной техники» в качестве перспективных литейных сплавов для рабочих лопаток.

14 Применение сплава ВЖМ8 для производства монокристаллических рабочих лопаток ТВД перспективного вертолетного двигателя (ВК-2500П и др.) взамен серийного сплава ЖС32 обеспечит повышение надежности работы вертолетных ГТД и увеличение в 2–3 раза ресурса работы турбинных лопаток. Применение сплава ВЖМ10 для производства монокристаллических рабочих лопаток ТВД перспективного двигателя большой тяги ПД-35 обеспечит увеличение рабочей температуры материала лопаток длительно до 1200 °С и кратковременно до 1250 °С.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1 Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Назаркин Р.М., Пахомкин С.И., Колодочкина В.Г., Фесенко Т.В., Джигоева Е.С. Сегрегация легирующих элементов в направленно закристаллизованных жаропрочных никелевых сплавах, содержащих рений и рутений // Вопросы материаловедения. 2015. № 1 (81). С. 27–37.

2 Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Висик Е.М., Голынец С.А. Разработка монокристаллического жаропрочного никелевого сплава V поколения // Металлы. 2017. № 6. С. 38–51.

3 Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Елютин Е.С. Синергическое влияние рения и рутения на длительную прочность монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов III–IV поколений // Физика металлов и материаловедение. 2022. Т. 123. № 8. С. 888–894. DOI: 10.31857/S0015323022080137.

4 Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Епишин А.И., Нольце Г., **Елютин Е.С.**, Соловьев А.Е. Влияние знака γ/γ' -мисфита на микроструктуру и длительную прочность монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов // Материаловедение. 2022. № 3. С. 17–26. DOI: 10.31044/1684-579X-2022-03-17-26.

5 **Елютин Е.С.**, Петрушин Н.В., Карачевцев Ф.Н., Чабина Е.Б. Растворимость рения и рутения в γ' -фазе и физико-химические свойства никелевых сплавов системы Ni–Al–Re–Ru [Электронный ресурс] // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-3-14.

Другие публикации в изданиях, включенных в международные базы данных Scopus и Web of Science:

6 Petrushin N.V., **Elyutin E.S.**, Nazarkin R.M., Pakhomkin S.I., Kolodochkina V.G., Fesenko T.V., Dzhioeva E.S. Segregation of alloying elements in directionally solidified Re–Ru-containing Ni-based superalloys // Inorganic Materials: Applied Research. 2016. Vol. 7. No. 6. P. 824–831. DOI: 10.1134/S2075113316060149.

7 Petrushin N.V., **Elyutin E.S.**, Visik E.M., Golynets S.A. Development of a single-crystal fifth-generation nickel superalloy // Russian Metallurgy (Metally). 2017. Vol. 2017, No. 11. P. 936–947. DOI: 10.1134/S0036029517110118.

8 Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., **Elyutin E.S.** The synergetic effect of rhenium and ruthenium on the long-term creep strength of single crystals of third- and fourth-generation nickel-based superalloys // Physics of Metals and Metallography. 2022. Vol. 123. No. 8. P. 831–837. DOI: 10.1134/S0031918X22080130.

9 Petrushin N.V., Epishin A.I., Svetlov I. L., Nolze G., **Elyutin E.S.**, Solov'ev A.E. Influence of the sign of the γ/γ' misfit on the structure and strength of single crystals of nickel-based superalloys // Inorganic Materials: Applied Research. 2023. Vol. 14. No. 1. P. 13–22. DOI: 10.1134/S207511332301029X.

Патенты:

- Жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2402624 РФ / Н.В. Петрушин, И.Л. Светлов, Е.Н. Каблов, Сидоров В.В., Герасимов В.В., Висик Е.В., **Е.С. Елютин**, Д.В. Щеголев; заявл. 16.06.2009; опубл. 27.10.2010, Бюл. № 30.

- Жаропрочный сплав на никелевой основе и изделие, выполненное из него: пат. 2710759 РФ / Е.Н. Каблов, Н.В. Петрушин, **Е.С. Елютин**; заявл. 06.03.2019; опубл. 13.01.2020, Бюл. № 2.

Исп. Е.С. Елютин

Печ. Е.С. Елютин

Автореферат Елютин Е.С.

«Разработка жаропрочных никелевых сплавов V и VI поколений с повышенной длительной прочностью для монокристаллических лопаток перспективных авиационных ГТД»

Подписано в печать

Формат бумаги 60х90/16. Печ. л. 1,00. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17