ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»  
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

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»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель,  
доктор технических наук Петрушин Н.В.

Москва - 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

[ВВЕДЕНИЕ 5](#bookmark2)

ГЛАВА 1 МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ, ЛЕГИРОВАННЫЕ РЕНИЕМ И РУТЕНИЕМ

(обзор) 17

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ 38

1. Методы изготовления исходных сплавов и отливок образцов для

[исследований и испытаний 38](#bookmark11)

1. Получение отливок образцов с переменным по длине химическим

составом 41

1. Методы проведения исследований физико-химических свойств и

[структурно-фазовых характеристик 46](#bookmark17)

1. [Методы испытаний для определения механических свойств 49](#bookmark19)

ГЛАВА 3 ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ФИЗИКО­ХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИКЕЛЕВЫХ у/у'-СПЛАВОВ 52

* 1. Растворимость рения и рутения в у'-фазе никелевых сплавов

четверной системы Ni-Al-Re-Ru 52

* 1. Сегрегация легирующих элементов при направленной

кристаллизации с плоским фронтом и ее влияние на физико­химические свойства и структурно-фазовые характеристики рений­рутенийсодержащих у/у'-сплавов 60

* 1. Синергическое влияние рения и рутения на длительную прочность

монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов 72

* 1. Влияние знака у/у'-мисфита на микроструктуру и длительную

прочность монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов 78

* 1. [Выводы 89](#bookmark39)

ГЛАВА 4 КОМПЬЮТЕРНОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ

МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ

РЕНИЙ-РУТЕНИЙСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ НОВОГО

ПОКОЛЕНИЯ 93

1. [Метод компьютерного конструирования 93](#bookmark42)
2. Применение метода компьютерного конструирования при

разработке монокристаллических жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов V и VI поколений с заданным уровнем свойств 99

1. [Выводы 106](#bookmark45)

ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И

РАЗРАБОТКА НОВОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА V ПОКОЛЕНИЯ [1 0 7](#bookmark48)

1. Микроструктура и структурно-фазовые характеристики

монокристаллов сконструированного жаропрочного сплава после литья и термической обработки 107

1. Оценка длительной прочности монокристаллов экспериментальной

композиции сконструированного сплава 118

1. Структурные превращения в монокристаллах сконструированного

сплава при высокотемпературных испытаниях на длительную прочность 122

1. Исследование физико-механических свойств монокристаллов из

жаропрочного никелевого сплава ВЖМ8 с заданной КГО 127

1. Технологическое опробование сплава ВЖМ8 при литье

монокристаллических рабочих лопаток ТВД перспективного вертолетного двигателя 142

1. [Выводы 146](#bookmark64)

ГЛАВА 6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И

РАЗРАБОТКА НОВОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА VI ПОКОЛЕНИЯ [148](#bookmark67)

* 1. Микроструктура и структурно-фазовые характеристики

монокристаллов сконструированного жаропрочного сплава после литья и термической обработки 148

* 1. Оценка длительной прочности монокристаллов экспериментальной

композиции сконструированного сплава 157

* 1. Структурные превращения в монокристаллах сконструированного

сплава при высокотемпературных испытаниях на длительную прочность 160

* 1. Исследование физико-механических свойств монокристаллов с

КГО <001> из жаропрочного никелевого сплава ВЖМ10 165

* 1. Технологическое опробование сплава ВЖМ10 при литье

монокристаллических рабочих лопаток ТВД перспективного авиационного двигателя большой тяги 173

* 1. [Выводы 176](#bookmark83)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 178](#bookmark84)

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ 182

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Впервые получены значимые научно обоснованные технические решения в области разработки нового поколения жаропрочных никелевых рений­рутенийсодержащих 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 рений­рутенийсодержащие никелевые сплавы нового поколения, обладающие заданными характеристиками длительной прочности и рабочей температуры, следующих марок:

* монокристаллический сплав V поколения ВЖМ8 с рабочей температурой до 1170 °С, с характеристиками длительной прочности 0 = 320 МПа и а^ооо = 140 МПа (средние значения для КГО <001>);
* монокристаллический сплав VI поколения ВЖМ10 с рабочей

температурой до 1200 °С, с характеристиками длительной прочности

aioo = 620 МПа, а^оо 0 = 360 МПа, а^0 = 200 МПа, а^о 0 = 80 МПа (средние значения для КГО <001>);

1. Изготовлены методом направленной кристаллизации с плоским фронтом никелевые у/у'-сплавы систем Ni-Al-Re-Ru и Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co-Re-Ru и получены образцы с переменным по длине химическим составом (образцы с макросегрегацией);
2. Показано, что в никелевых сплавах четырехкомпонентной системы Ni-Al-Re-Ru при кристаллизации у'-фаза образуется по перитектической L+y^y' при температуре 1374 °С и эвтектической L^y'+P при температуре 1372 °С реакциях, так как это установлено в новой версии фрагмента диаграммы состояния двойной системы Ni-Al в области составов, соответствующих у'-фазе;
3. 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 у'-сольвус, а рутением - к небольшому повышению температур этих фазовых превращений;

1. Разработаны и апробированы регрессионные модели, позволяющие прогнозировать температуры у'-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;
2. Установлены закономерности влияния знака у/у'-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 у/у'-мисфитом (период решетки у'-фазы меньше, чем у-твердого раствора) и образовавшимся У-рафтингом, наименьшую - монокристаллы сплава с нулевым мисфитом (рафт-структура не образуется), промежуточные значения длительной прочности обнаруживают монокристаллы сплава с положительным у/у'-мисфитом (период решетки у'-фазы больше, чем у-твердого раствора) и Р-рафтингом;
3. 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;
4. 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 KRe = -1,3), формирование в осях дендритов и междендритных областях кубоидных частиц у'-фазы заданного размера (~0,3 мкм) и низкую объемную микропористость;
5. Исследована анизотропия механических свойств монокристаллов жаропрочного рений-рутенийсодержащего никелевого сплава ВЖМ8 с КГО <001>, <011> и <111>. Установлено, по пределам прочности и текучести в области температур 20-800 °С монокристаллы с КГО <111> имеют значительное преимущество перед монокристаллами с КГО <001> и <011>. При более высоких температурах анизотропия кратковременной прочности практически вырождается. Наибольшую длительную прочность в интервале температур 900-1170 °С имеют монокристаллы сплава ВЖМ8 с КГО <111>, наименьшую - с КГО <011>. Наиболее предпочтительной КГО, 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>;
6. 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;
7. Проведена общая квалификация 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. Выпущен паспорт № 2011 на жаропрочный монокристаллический сплав марки ВЖМ10;
8. 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 %;
9. 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;
10. 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.