

На правах рукописи

Оспенникова Ольга Геннадиевна

**Разработка научных основ создания нового поколения литейных
жаропрочных наноструктурированных никелевых сплавов
пониженной плотности с требуемым комплексом механических свойств**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ»)

Официальные оппоненты: **Шмотин Юрий Николаевич**
доктор технических наук, доцент, заместитель
генерального директора – генеральный конструктор АО «ОДК»
Поварова Кира Борисовна
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник лаборатории «Физико-химии
и механики металлических материалов» ФГУБН
«ИМЕТ РАН» им. А.А. Байкова
Голубовский Евгений Ростиславович
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник отделения «Динамика
и прочность» ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Защита диссертации состоится _____ 2018 г. в 14-30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru

Телефон для справок: +7(499)267 09 63

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

А.И. Плохих

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важнейшей задачей государственной промышленной политики Российской Федерации является создание и производство конкурентоспособной техники гражданского и военного назначения, в том числе газотурбинных двигателей (ГТД) для самолетов и вертолетов, разработка которых должна базироваться на основе отечественных материалов нового поколения, энергоэффективных, ресурсосберегающих, в том числе цифровых технологий их производства и переработки.

На совещании 22 ноября 2013 года по вопросу развития авиационного двигателестроения Президент Российской Федерации отметил, что «...один из наших ключевых приоритетов – новый среднемагистральный пассажирский самолет МС-21..., что демонстрационный двигатель для этой машины готов, проходит испытания. Важно не затягивать его сертификацию, чтобы в запланированные сроки приступить к серийному производству...».

Руководством страны была выделена отдельная подпрограмма по двигателестроению в рамках единой государственной программы развития оборонно-промышленного комплекса. Одним из приоритетных направлений реализации указанной подпрограммы является создание перспективного вертолетного двигателя и двигателя с тягой 35 тонн (ПД-35). Двигатели будут создаваться в широкой кооперации предприятий АО «ОДК», в том числе с использованием технологий, полученных в ходе реализации проекта ПД-14 для МС-21.

Одним из основных направлений реализации Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации №642 от 01.12.2016 г. является создание материалов нового поколения. С этой целью Постановлением Правительства Российской Федерации от 19.09.2016 г. ФГУП «ВИАМ» определен организацией, ответственной за реализацию приоритетного технологического направления «Технологии материаловедения».

Для определения приоритетных направлений исследований в области разработки материалов нового поколения ФГУП «ВИАМ» совместно с институтами РАН, национальными исследовательскими университетами и конструкторскими бюро на основании анализа программ инновационного развития государственных корпораций (ГК Росатом, ГК Роскосмос, ГК Ростех), ПАО ОАК», ОАО «РЖД», АО «Корпорация «МИТ», АО «КТРВ», АО «ОДК», АО «Вертолеты России» и др. разработал и реализует «Стратегические направления развития материалов и технологий их производства на период до 2030 года».

В настоящее время в Российской Федерации практически отсутствует полномасштабное производство вертолетных двигателей. По существу, все модификации вертолетных двигателей производятся в кооперации с зарубежными

разработчиками и поставщиками. Перспективным вертолетным двигателем является турбовальный двигатель ТВЗ-117ВМА-СБМ1В, разработанный и сертифицированный за рубежом, который определен в качестве коммерческого двигателя для российских вертолетов семейства Ми-8, в частности, Ми-171/172, а также для перспективных машин.

Для обеспечения технологической независимости Российской Федерации особенно остро стоит вопрос создания конкурентоспособных вертолетных двигателей с обязательным применением отечественных материалов и технологий нового поколения. Однако работы в данном направлении практически не проводятся. В конструкции единственного на сегодняшний день отечественного вертолетного двигателя ВК-2500 применяются материалы и технологии, разработанные более двадцати лет назад.

На совещании по проблемным вопросам внедрения и квалификации авиационных материалов для авиационных ГТД, в том числе вертолетных, было сформулировано поручение (протокол № 57-ДМ/18 от 08 декабря 2011 г.) – разработать комплексную программу и план работ по разработке и внедрению новых материалов и технологий для создания и модернизации перспективных авиационных двигателей нового поколения, включая двигатель ВК 2500 и его модификаций.

Основными направлениями повышения эффективности ГТД можно считать повышение термического к.п.д. (за счет увеличения температуры газа перед турбиной и степени сжатия) и улучшение удельных характеристик (за счет уменьшения габаритных размеров, массы, сокращения количества ступеней и деталей). При этом удельная масса ГТД является комплексным показателем, который характеризует параметрическое, конструктивное и технологическое их совершенство. Существенный вклад в улучшение удельных характеристик может обеспечить разработка и применение нового поколения жаропрочных сплавов пониженной плотности (снижение до 15 %) для рабочих и сопловых лопаток газотурбинных двигателей.

Масса двигательной установки одна из ключевых характеристик, которая определяет её конкурентоспособность. Наиболее материалоемкая часть авиационного двигателя – это турбина. Масса турбины, в первую очередь, определяется массой рабочих лопаток, так как они определяют контурную нагрузку на диски и, соответственно, их массу. Также масса рабочих лопаток определяет толщину корпусов, которые должны удерживать лопатки в случае их обрыва.

По экспертным оценкам конструкторов АО «ОДК-Авиадвигатель» снижение массы лопаток на 1 % дает возможность снизить массу турбин на 0,45 %. То есть, снизив массу лопаток на 15 %, за счет применения жаропрочных сплавов с пониженной плотностью, можно уменьшить вес турбин на 6,75 %. Для

перспективного двигателя ПД-14, исходя из суммарной массы турбин 750 кг это составит примерно 50 кг.

В соответствии с вышесказанным, а также учитывая отказ зарубежных компаний в продаже Российской Федерации материалов (компонентов), технологий и оборудования, можно сделать вывод о том, что только применение новых отечественных материалов, в том числе супержаропрочных материалов пониженной плотности, и энергоэффективных ресурсосберегающих технологий позволит создать российские конкурентоспособные вертолетные двигатели, превосходящие по всем техническим и экономическим характеристикам вертолетные двигатели фирмы АО «Мотор Сич» (Украина) и других моторостроительных компаний, что обеспечит технологическую независимость и безопасность Российской Федерации.

Выполнение основных разделов данной работы проходило в рамках НИР, выполненных за счет средств федерального бюджета Федеральной целевой программы «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002-2010 годы и на период до 2015 года» (шифры «Перспектива», «Ресурс», «Альтаир», «Авантаж», «Импульс»).

В связи с изложенным тема работы является актуальной, представляет собой крупную научную проблему, имеющую важное практическое значение для развития отечественного авиадвигателестроения.

Цель работы. Создание и внедрение с использованием цифровых технологий нового поколения литейных жаропрочных наноструктурированных никелевых сплавов пониженной плотности с повышенными механическими свойствами для газотурбинных двигателей перспективных вертолётов и других изделий авиационной техники, а также разработка технологии их получения ресурсосберегающими прогрессивными методами при помощи новых модельных композиций.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

- с применением компьютерного конструирования определить концентрационные области легирования фазово-стабильных жаропрочных никелевых сплавов пониженной плотности с поли- и монокристаллической структурами, а также монокристаллического интерметаллидного жаропрочного сплава на основе γ' -фазы;
- исследовать технологические факторы, определяющие образование наноструктурных составляющих жаропрочных никелевых сплавов пониженной плотности при литье методами равноосной и направленной кристаллизации, термической и газостатической обработках;

- исследовать фазовую стабильность новых сплавов при длительных высокотемпературных механических испытаниях;
- с применением цифровых технологий определить технологические параметры литья из жаропрочного никелевого сплава пониженной плотности турбинных рабочих лопаток с поликристаллической структурой для вертолетных двигателей;
- с применением цифровых технологий определить технологические параметры литья из жаропрочного никелевого сплава пониженной плотности турбинных рабочих лопаток с монокристаллической структурой с заданной аксиальной кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$ для вертолетных двигателей;
- с применением цифровых технологий разработать технологические параметры литья из жаропрочного никелевого сплава пониженной плотности турбинных сопловых лопаток с монокристаллической структурой с заданной аксиальной кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$ для вертолетных двигателей;
- разработать специальные режимы термической обработки и горячего изостатического прессования (ГИП) рабочих и сопловых лопаток из жаропрочных никелевых сплавов пониженной плотности, обеспечивающих формирование наноструктурного состояния, отсутствие ликвационной неоднородности и снижение объемной микропористости;
- исследовать влияние различных видов наполнителей, в том числе синтетических восков, на свойства модельных композиций, установить концентрационные зависимости компонентов и разработать модельные композиции нового поколения с повышенной геометрической точностью и стабильностью формы модели применительно к литью рабочих и сопловых лопаток ГТД из литейных жаропрочных наноструктурированных никелевых сплавов пониженной плотности;
- провести общую квалификацию (паспортизацию) литейных жаропрочных наноструктурированных никелевых сплавов пониженной плотности с повышенными характеристиками и обеспечить внедрение в производство ресурсосберегающих технологий получения монокристаллических и поликристаллических лопаток вертолетных ГТД.

Сформулированные цель и задачи данной диссертационной работы полностью отвечают требованиям стратегий развития основных двигателестроительных предприятий с учетом Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации и критических технологий развития науки, техники и технологий Российской Федерации, приоритетов их развития. Также они соответствуют паспорту научной специальности 05.16.09.

Научная новизна работы

1. Впервые предложены и реализованы значимые научно обоснованные технические и технологические решения по разработке с применением компьютерного конструирования нового поколения литейных жаропрочных наноструктурированных никелевых сплавов пониженной плотности с повышенными характеристиками и технологий изготовления из них монокристаллических и поликристаллических лопаток ГТД, которые внесли существенный вклад в создание научно-технического задела в области материалов для авиационного двигателестроения.

2. Уточнена и реализована применительно к разработке литейных жаропрочных никелевых сплавов пониженной плотности с повышенными характеристиками методика компьютерного конструирования, заключающаяся в определении точного химического состава в пределах традиционной схемы легирования сплавов данного класса. Указанный метод может быть успешно применен к широкому кругу вновь разрабатываемых литейных жаропрочных никелевых сплавов пониженной плотности.

3. С помощью метода компьютерного конструирования и на основе результатов комплексных исследований физико-химических свойств, микроструктуры, фазового и химического состава, механических испытаний разработаны литейные жаропрочные наноструктурированные никелевые сплавы нового поколения, обладающие пониженной плотностью, высокой фазовой стабильностью и повышенными значениями кратковременной прочности, пластичности, выносливости и длительной прочности, следующих марок:

- поликристаллический сплав ВЖЛ21 ($d = 8,105 \text{ г/см}^3$, $\sigma_B^{20} = 1000 \text{ МПа}$, $\delta^{20} = 7,5 \%$, $\sigma_{-1}^{20} = 360 \text{ МПа}$ на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, $\sigma_{100}^{900} = 350 \text{ МПа}$);

- монокристаллический сплав ВЖМ7 ($d = 8,393 \text{ г/см}^3$, $\sigma_B^{20} = 1040 \text{ МПа}$, $\delta^{20} = 22 \%$, $\sigma_{-1}^{20} = 510 \text{ МПа}$ на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, $\sigma_{100}^{1000} = 220 \text{ МПа}$);

- монокристаллический интерметаллидный сплав ВИН3 ($d = 8,247 \text{ г/см}^3$, $\sigma_B^{20} = 810 \text{ МПа}$, $\delta^{20} = 23,5 \%$, $\sigma_B^{1200} = 290 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1}^{20} = 215 \text{ МПа}$ на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, $\sigma_{100}^{1200} = 50 \text{ МПа}$);

4. Разработаны и обоснованы технологические параметры, обуславливающие управление структурообразованием при литье рабочих и сопловых лопаток методами равноосной (из сплава ВЖЛ21) и направленной (из сплавов ВЖМ7 и ВИН3) кристаллизации и последующих многоступенчатой термической и баротермической обработках, обеспечивающих достижение высокого уровня свойств.

5. Разработаны и обоснованы применительно к литью по выплавляемым моделям рабочих и сопловых лопаток из литейных жаропрочных нанострукту-

рированных никелевых сплавов пониженной плотности методики построения модельных композиций нового поколения (на примере Салют-7, ВИАМ МК-1, ВИАМ МК-2 и ВИАМ МК-Л) на основе синтетических восков с повышенной на 20 % геометрической точностью и стабильностью формы модели, не уступающие по свойствам импортным аналогам.

Практическая значимость и реализация результатов исследований

Внедрение разработанных жаропрочных наноструктурированных никелевых сплавов пониженной плотности обеспечивает достижение следующих эксплуатационных параметров вертолетных двигателей:

- применение сплава ВЖЛ21 и разработанной технология литья поликристаллических отливок образцов и рабочих лопаток 2-ой ступени с выходом годного при контроле макроструктуры по заданному конструктором размеру зерна 85-90 % с режимом термообработки, совмещенным с ГИП, обеспечивающими формирование наноструктуры, обеспечит длительную прочность при температуре 900 °С $\sigma_{100}^{900} \geq 340$ МПа (среднее значение) и относительное удлинение при растяжении при комнатной температуре $\delta \geq 7$ %. По среднему значению удельной длительной прочности сплав превосходит серийный сплав ЖС6У на 10 %, по среднему значению относительного удлинения – в 2 раза.

- применение сплава ВЖЛ21 для литья лопаток и деталей с поликристаллической структурой с повышенными физико-механическими характеристиками обеспечит увеличение в 1,5-2 раза ресурса работы деталей турбин высокого и низкого давления.

- применение сплава ВЖМ7 и разработанной технологии литья монокристаллических отливок лопаток с высокой степенью структурного совершенства, с заданной кристаллографической ориентацией (КГО) (аксиальное отклонение не более 10°) и выходом годного по монокристаллической структуре 90 %; режимом термообработки, совмещенным с газостатической обработкой, обеспечивающими формирование наноструктуры, обеспечит длительную прочность сплава при температуре 1000 °С $\sigma_{100}^{1000} \geq 215$ МПа (среднее значение), что превосходит сплавы-аналоги ВЖЛ20 на 20 % и LEK94 на 10 %.

- применение сплава ВЖМ7 взамен существующих серийных сплавов ВЖЛ-20 и ЖС26 для производства рабочих и сопловых лопаток ТНД обеспечит повышение надежности работы вертолетных ГТД и увеличение в 2-3 раза ресурса работы турбинных лопаток.

- применение сплава ВИНЗ и разработанного режима термообработки отливок образцов и сопловых лопаток с КГО [001], обеспечит длительную прочность при температуре 1150 °С $\sigma_{100}^{1150} \geq 60$ МПа (среднее значение), что превосходит на 15 % интерметаллидный сплав-аналог ВКНА-1В с $\sigma_{100}^{1150} \geq 52$ МПа.

- применение сплава ВИНЗ взамен сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 для производства сопловых лопаток обеспечит повышение надежности работы вертолетных ГТД и увеличение на 20-30 % ресурса работы сопловых лопаток.

- применение разработанных модельных композиций на основе синтетических восков (не уступающих по свойствам импортным аналогам (Paramelt (USA), BLAYSON (UK), REMET (UK), Deumex (EC) и др.), позволит обеспечить повышение на 20 % геометрической точности и стабильности формы модели (Салют-7, ВИАМ МК-1, ВИАМ МК-2, ВИАМ МК-Л) по сравнению с применяемой модельной массой Салют-4, при этом не потребуются доработка технологической оснастки, а также обеспечить импортозамещение и технологическую независимость Российской Федерации от зарубежных модельных композиций, поставка которых на предприятия авиадвигателестроения в настоящее время прекращена.

В целом внедрение результатов работы вносит значительный вклад в развитие современного отечественного двигателестроения для вертолетов гражданского и военного назначения, что позволило осуществить модернизацию отечественного вертолетного двигателя ВК-2500 с повышенными тактико-техническими характеристиками, а также создание двигателя нового поколения для скоростного вертолета, что обеспечивает импортозамещение в сегменте рынка производства вертолетных двигателей.

Модернизация и создание нового вертолетного двигателя позволит за счет применения разработанных материалов и технологий добиться повышения показателей надёжности вертолетных двигателей в 2-3 раза, снижения до 20 % прямых эксплуатационных расходов по двигателю, повышения грузоподъемности вертолётa на ~ 25-30 %, улучшения топливной экономичности на 20-30 %, что в конечном итоге обеспечит выполнение прямого поручения Президента Российской Федерации.

По экспертным оценкам специалистов АО «ОДК-Климов» и АО «ОДК-Авиадвигатель» экономический эффект от внедрения разработок составит: по прямым эксплуатационным расходам: 56 000 000 \$ / год или 1,680 млрд. руб./год, по эксплуатационным расходам с учетом потребления топлива – 201 600 000 \$ / год или 6,048 млрд. руб./год. Учитывая, что согласно прогнозным оценкам, производство перспективных вертолетов до 2030 года составит 200-250 штук в год (400-500 двигателей в год), ориентировочный объем продаж двигателей для вертолетов составит в среднем 600-750 млн. долларов в год.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается использованием современных аналитических методов анализа химического состава и структуры сплавов, сертифицированного оборудования для проведения

механических испытаний и значительным объемом выполненных экспериментов.

Основные положения, полученные лично автором и выносимые на защиту. Значимые научно обоснованные технические и технологические решения, завершившиеся разработкой материалов и технологий их переработки при производстве ответственных деталей вертолетных двигателей:

1. Разработка и обоснование технологических параметров, управляющих структурообразованием при литье рабочих и сопловых лопаток методами равноосной (из сплава ВЖЛ21) и направленной (из сплавов ВЖМ7 и ВИН3) кристаллизации и последующих многоступенчатой термической и баротермической обработках, обеспечивающих достижение высокого уровня физико-механических и эксплуатационных характеристик.

2. Разработка нового фазово-стабильного литейного поликристаллического жаропрочного наноструктурированного никелевого сплава пониженной плотности ВЖЛ21 и технологических параметров литья лопаток вертолетных ГТД из нового сплава.

3. Разработка нового фазово-стабильного монокристаллического жаропрочного наноструктурированного никелевого сплава пониженной плотности ВЖМ7 и технологических параметров литья лопаток вертолетных ГТД из нового сплава.

4. Разработка нового фазово-стабильного монокристаллического интерметаллидного (на основе γ' -фазы) жаропрочного наноструктурированного сплава ВИН3 и технологических параметров литья лопаток вертолетных ГТД из нового сплава.

5. Разработка модельных композиций нового поколения на основе синтетических восков с повышенной геометрической стабильностью Салют-7, ВИАМ МК-1, ВИАМ МК-2, ВИАМ МК-Л и технологических параметров изготовления моделей применительно к литью рабочих и сопловых лопаток из литейных жаропрочных наноструктурированных никелевых сплавов пониженной плотности.

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты исследований, выполненных самим автором или под его непосредственным руководством. Личный вклад автора состоит в теоретическом и научном обосновании поставленных целей и задач, проведении экспериментальных исследований по разработке наноструктурированных жаропрочных сплавов пониженной плотности, разработке технологических параметров литья лопаток и составов модельных композиций нового поколения и их апробации на производственных предприятиях, анализе полученных результатов и их обобщении, оформлении результатов в виде научных публикаций, докладов и патентов.

Апробация работы. Результаты и основные положения диссертационной работы лично представлены автором в виде устных докладов на следующих научно-технических конференциях: Международной конференции «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее». Киев, 2013; научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». Екатеринбург, 2011; III Международной научно-практической конференции. Москва, 2005; конференции «Современные литейные высокожаропрочные и специальные сплавы, технологии их выплавки и литья монокристаллических рабочих лопаток газотурбинных двигателей». Москва, 2014; конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники». Москва, 2013; Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Самара, 2014; VI Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». Москва, 2015; конференции «Современные жаропрочные деформируемые никелевые и интерметаллидные сплавы, методы их обработки», Москва, 2015; Международной научно-технической конференции. Москва, 2007 и др.

Публикации. По результатам работы опубликовано 57 научных работ, из них 33 в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получено 12 патентов РФ на сплавы, модельные композиции и технические решения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 8 глав, общих выводов по работе и списка литературы. Диссертация изложена на 308 страницах машинописного текста и содержит 81 рисунок, 65 таблиц, библиографический список из 269 литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

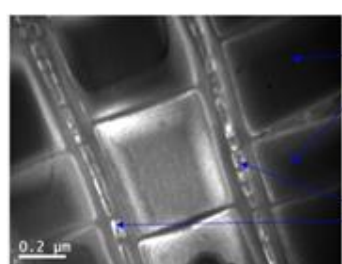
Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая ценность, приведены результаты работы, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу состояния исследований в области жаропрочных сплавов. На основе рассмотренных научно-практических достижений научных школ академиков С.Т. Кишкина и Е.Н. Каблова определены комплексные подходы к созданию жаропрочных сплавов нового поколения с пониженной плотностью, технологиям их производства и переработки с применением разработанного им принципа неразрывности «материал – технология – оборудование – конструкция», включающего реализацию полного жизненного цикла (с использованием IT технологий) – от создания материала до его эксплуатации в изделии, в том числе диагностику, ремонт, продление ресурса и утилизацию.

Показано, что важным аспектом повышения свойств жаропрочных никелевых сплавов для решения поставленных в работе задач является получение наноструктурного состояния за счет сбалансированного легирования и микролегирования РЗМ и технологических параметров кристаллизации, термической и баротермической обработок.

Основными фазами, образующими жаропрочные сплавы являются две фазы: γ и γ' . γ -фаза – это твердый раствор на основе никеля с ближним порядком в расположении атомов компонентов в ГЦК-кристаллической решетке, γ' -фаза – это твердый раствор с дальним порядком в расположении атомов компонентов на базе интерметаллического соединения Ni_3Al (сверхструктура L_{12}).

В наноструктурированном состоянии (после вакуумной выплавки, направленной кристаллизации и термической обработки) в сплаве присутствуют только две фазы – γ' и γ в объемном соотношении ($\gamma' : \gamma$), как 3 : 1 со следующим взаимным расположением фаз (Рис. 1): квазикубоиды микрокристаллов γ' фазы (объемная доля ~65%) с достаточно четкой огранкой и средним размером ~400 нм разделены нанопрослойками γ фазы с поперечным размером 50-90 нм. В прослойках фазы γ присутствуют в небольшом количестве (~2%) квазикубоиды, квазипараллелепипеды и квазисфероиды нанокристаллов γ' фазы с недостаточно четкой огранкой и средним размером ~30 нм.



фазы – γ' и γ в объемном соотношении ($\gamma' : \gamma$), как 3 : 1

квазикубоиды, квазипараллелепипеды и квазисфероиды нанокристаллов γ' фазы с недостаточно четкой огранкой и средним размером ~30 нм

Рис. 1. Типичная структура жаропрочного наноструктурированного сплава

Рассмотренное строение наноструктурированных жаропрочных сплавов сформировано на основе фундаментальных принципов сбалансированного легирования и микролегирования жаропрочных сплавов РЗМ и высокоэффективных технологий вакуумной индукционной выплавки, высокоградиентной направленной кристаллизации и многоступенчатой термической обработкой. Совокупность этих факторов позволит обеспечить в разработанных жаропрочных сплавах пониженной плотности характеристики на уровне мировых достижений в области жаропрочных материалов для авиационной техники.

В первой главе также сформулированы основные принципы и определены комплексные подходы к созданию модельных композиций нового поколения на основе синтетических смол и восков.

Рассмотрены результаты систематического анализа отечественного и зарубежного опыта по разработке и тенденциям легирования литейных поли- и

монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов для лопаток ГТД. Научно обосновано с применением компьютерного конструирования, что для решения основной задачи диссертации – создание нового поколения литейных жаропрочных никелевых сплавов с требуемыми свойствами и пониженной плотностью, необходимо провести исследования по следующим направлениям повышения уровня основных характеристик сплавов: жаропрочности – за счёт легирования тугоплавкими (Mo, W, Re, Ta) элементами; жаростойкости и коррозионной стойкости – за счёт повышения содержания хрома и титана, а также микролегирования редкоземельными элементами (La, Ce, Nd); пластичности – за счет сбалансированного содержания карбидообразующих элементов (Ti, Ta, Hf, Cr, Mo, W); фазовой стабильности – за счет сбалансированного содержания тугоплавких (Mo, W, Re) и γ' -образующих (Al, Ti, Ta) элементов; прочностных и усталостных характеристик – за счет формирования наноструктурных составляющих в процессе термической и баротермической обработки.

Таким образом, решение поставленных и научно обоснованных задач и целей исследований диссертационной работы обеспечит разработку жаропрочных наноструктурированных сплавов пониженной плотности и технологий литья рабочих и сопловых лопаток, что позволит создать российские конкурентоспособные вертолетные двигатели, превосходящие по всем техническим и экономическим характеристикам двигатели зарубежного производства.

Вторая глава содержит описание методик изготовления исходных сплавов и образцов для проведения исследований, методик проведения исследований химического и фазового состава, совершенства структуры и кристаллографической ориентации методами растровой электронной микроскопии, микро-рентгеноспектрального анализа и рентгеновской дифрактометрии, испытаний полного спектра физико-механических характеристик.

Выполненные исследования на современных мирового уровня автоматизированных исследовательских и испытательных установках позволили в полном объеме оценить уровень физико-механических и технологических характеристик, разрабатываемых жаропрочных никелевых сплавов с пониженной плотностью и модельных композиций нового поколения на основе синтетических восков с повышенной геометрической стабильностью.

Третья глава посвящена описанию метода компьютерного конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов, разработанного академиком РАН Кабловым Е.Н. и д.т.н. Петрушиным Н.В. Методология базируется на принципах сбалансированного легирования и моделях (уравнения регрессии), описывающих зависимости физико-химических, структурно-фазовых характеристик, механических и жаропрочных свойств сплавов от химического состава. Представлены научно обоснованные исследования, позволившие за счет при-

менения этого метода выбрать и установить концентрационные области оптимального легирования фазово-стабильных поликристаллических и монокристаллических сплавов нового поколения с пониженной плотностью.

Поиск оптимального легирования нового поликристаллического сплава пониженной плотности (на базе никелевой системы Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co-Ti-C-B-Zr-La) осуществляли сведя к минимуму сбалансированное суммарное содержание тяжелых тугоплавких (Mo, Ta, W) металлов, повышая содержание легких γ' -образующих (Al, Ti) металлов, а также, исключая Nb, Hf и V из системы легирования. В настоящей работе химический состав сплава считали сбалансированным, если для него выполнялось условие – $0,04 \leq \Delta E$. С учетом достигнутых расчетом требуемых характеристик для экспериментального исследования был выбран сплав пониженной плотности, содержащий (% масс.) 5,4 % Al; 3,8 % Mo; 2,5 % Ta; 3,5 % Ti; 0,12 % C, а также Cr, W, Co, La, B, Zr.

Поиск оптимального легирования нового монокристаллического сплава пониженной плотности (на базе никелевой системы Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co-Re-Ti) осуществляли, сведя к минимуму сбалансированное суммарное содержание тяжелых тугоплавких (Re, Mo, Ta, W) металлов, повышая содержание легких γ' -образующих (Al, Ti) металлов, а также исключая из системы легирования Nb, Hf и V. С учетом достигнутых расчетом требуемых характеристик для экспериментального исследования был выбран сплав пониженной плотности содержащий (% масс.) 6,2 % Al; 2,6 % Re; 4 % Mo; 3,8 % Ta, а также Cr, W, Co, Ti, La.

Поиск экспериментальных составов жаропрочного интерметаллидного сплава осуществляли на базе никелевой системы Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta. Выбор составов сплава для экспериментального исследования проводили по результатам расчёта физико-химических, структурно-фазовых и механических характеристик сплавов фазового состава ($\gamma+\gamma'$) указанной системы легирования. В результате для экспериментального исследования была выбрана композиция опытного интерметаллидного сплава на основе Ni_3Al , содержащего (% масс.) 8,3 % Al; 0,4 Re; 4,5 % Mo; 6,0 % Ta, а также Cr, W, Co, La. По сравнению с ранее паспортизованными интерметаллидными сплавами типа ВКНА опытный сплав дополнительно содержит тантал для повышения фазовой стабильности, кратковременной и длительной прочности и коррозионной стойкости. Кроме того, для повышения начальной температуры плавления из системы легирования нового сплава выведен титан, а также понижено содержание хрома и молибдена.

Таким образом, применение метода компьютерного конструирования позволило установить концентрационные области оптимального легирования фазово-стабильных жаропрочных сплавов нового поколения с пониженной плотностью и выбрать оптимальные составы сплавов для последующего экспериментального исследования.

Глава четвертая посвящена разработке нового литейного поликристаллического жаропрочного никелевого сплава пониженной плотности. На основе данных компьютерного конструирования, подтвержденных экспериментами, определены концентрационные области оптимального легирования системы (Ni-Al-Cr-Mo-Co-W-Ta-Ti-C-B-Zr-La) с поликристаллической равноосной структурой с γ' -интерметаллидным и MeC-карбидным упрочнением, позволившие разработать новый литейный жаропрочный наноструктурированный никелевый сплав ВЖЛ21 пониженной плотности ($d = 8,105 \text{ г/см}^3$).

Микроструктура поликристаллических отливок равноосной кристаллизации из ЖНС пониженной плотности после литья представлена на Рис. 2. После литья поликристаллическая структура сплава состоит из крупных равноосных зерен дендритно-ячеистого строения (Рис. 2, а). В междендритных областях зерен наблюдаются выделения карбидной фазы и эвтектики γ - γ' (Рис. 2, б). Также в междендритных участках вблизи эвтектики γ - γ' обнаружены литейные поры размером до 20 мкм. Измеренное объемное содержание эвтектики γ - γ' и микропор составляет 2,24 % и 0,22 % соответственно, что типично для литейных жаропрочных никелевых сплавов равноосной кристаллизации. Карбидные частицы располагаются как в объеме зерен, так и по межзеренным границам. Здесь следует отметить, что после литья по выбранным технологическим параметрам карбидная фаза в объеме зерен (Рис. 2, в) состоит из крупных удлиненных ($\sim 20 \text{ мкм}$) частиц и мелких ($< 3 \text{ мкм}$) частиц полиэдрической формы, по границам зерен она имеет пластинчатую форму. Кроме того, границы зерен оторочены дисперсными частицами γ' -фазы и выделениями эвтектической γ' -фазы.

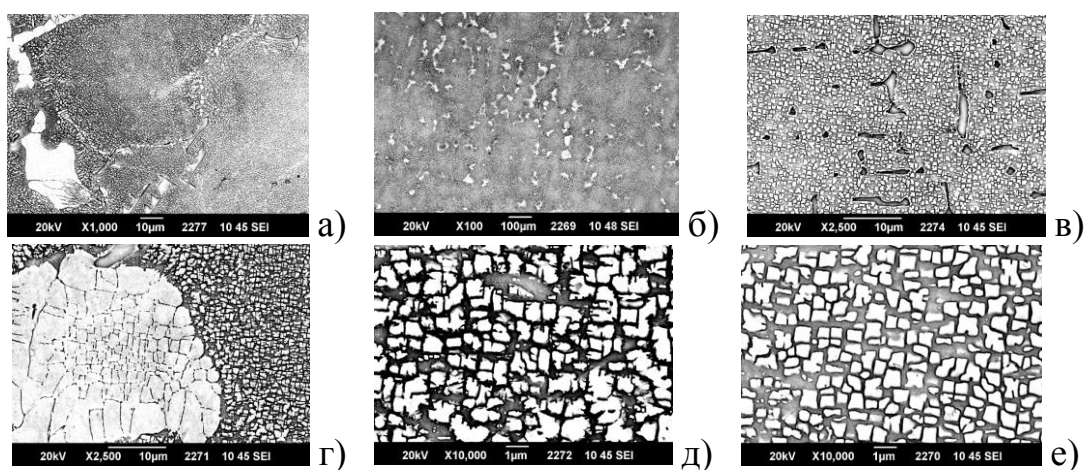


Рис. 2. Микроструктура поликристаллических отливок равноосной кристаллизации из ЖНС пониженной плотности после литья: а – распределение эвтектических выделений по междендритным участкам; б – эвтектика γ - γ' и карбиды на межзеренных границах; в – карбиды в объеме зерна; г – эвтектическая γ' -фаза в междендритном участке; д – γ' -фаза в оси дендрита; е – γ' -фаза в междендритном участке

Установлено, что частицы γ' -фазы в матричном γ -твердом растворе дендритов и междендритных областей в литых отливках образцов сплава заметно различаются по размеру (Рис. 2, г, д, е). Указанная химическая неоднородность, а также размерная неоднородность частиц γ' -фазы по дендритной ячейке обусловлены микроликвацией легирующих элементов в процессе равноосной кристаллизации отливок из сплава. В результате легирующие элементы рений, вольфрам и кобальт обогащают оси дендритов, а алюминий, титан, тантал, хром и молибден – междендритные области, что типично для литых поликристаллических жаропрочных никелевых сплавов.

Полученные данные микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) литых отливок из сплава позволяют заключить, что MeC-карбидная фаза разрабатываемого сплава формируется на основе монокарбида TaC. В отдельных участках структуры отливок вблизи выделений эвтектики γ - γ' обнаружены карбидные частицы, с повышенным содержанием Cr, Mo и W.

Таким образом, установлено, что микроструктура поликристаллических экспериментальных образцов исследуемого сплава пониженной плотности после литья характеризуется химической и структурной неоднородностью в пределах дендритной ячейки, которая обусловлена микроликвацией легирующих элементов в процессе кристаллизации, наличием карбидной фазы и выделений эвтектики γ - γ' . Размер дисперсных частиц γ' -фазы междендритных участков в крупнее, чем в центре дендрита.

Сплав ВЖЛ21 по повышенным характеристикам (Таблица 1) прочности ($\sigma_B^{20} = 1000$ МПа), пластичности ($\delta^{20} = 7,5$ %) и длительной прочности ($\sigma_{100}^{900} = 350$ МПа) является конкурентоспособным по отношению к сплавам-аналогам отечественными ВЖЛ12У, ЖС6К, ЖС6У и зарубежными IN-100 и Rene-125, по длительной прочности в интервале рабочих температур 800-1050 °С превосходит сплавы-аналоги ВЖЛ12У на 13,5-30 %, ЖС6У на 5-20 %, IN-100 (США) на 13-29 %, Rene-125 (США) – на 6-16 %. По удельной длительной прочности σ_{100}^{1000}/d сплав ВЖЛ21 превосходит сплавы ВЖЛ12У ($d = 7,93$ г/см³, $\sigma_{100}^{1000} = 140$ МПа) на 26 %, ЖС6У ($d = 8,42$ г/см³, $\sigma_{100}^{1000} = 170$ МПа) на 10 % и конкурентоспособен с зарубежными сплавами-аналогами IN-100 и Rene-125 (США).

Существенное повышение жаропрочных свойств и эксплуатационных характеристик жаропрочных сплавов с поликристаллической структурой было достигнуто за счет применения многокомпонентного легирования, обеспечивающего получение высоких структурно-фазовых характеристик сплавов ($T_{п.р}^{\gamma'}$, γ/γ' -мисфит и др.), повышенной стабильности γ/γ' -матрицы и карбидной фазы, и границ зерен, а также формирования наноструктурированного состояния материала, посредством применения разработанных технологий высокотемператур-

ного вакуумного рафинирования и микролегирования, а также специальных режимов многоступенчатой термической обработки сплавов. В результате на микроскопическом, атомном уровне получаемая структура γ/γ' -матрицы жаропрочных сплавов представляет собой сложно легированный никелевый твёрдый раствор замещения (γ -фаза) с ближним порядком расположения атомов компонентов сплава в ГЦК решетке, в котором равномерно рассеяны высокодисперсные кубовидные частицы γ' -фазы, формирующейся на основе интерметаллического соединения Ni_3Al – упорядоченная ГЦК структура. Кубовидные микрочастицы γ' -фазы (объемная доля $\sim 70\%$) с достаточно четкой огранкой и средним размером ~ 400 нм разделены нанопрослойками γ -фазы с поперечным размером 50-90 нм (Рис. 3). В прослойках фазы γ присутствуют квазикубоиды нанокристаллов γ' -фазы размером ~ 30 нм. При такой структуре материала упрочнение сплава обусловлено сопротивлением, которое оказывают микро- и наночастицы частицы γ' -фазы движущимся дислокациям. Особенности микроструктуры и фазового состава характеризуются высокой структурной и химической однородностью; ликвация легирующих элементов выровнялась, частицы γ' -фазы размером 0,4-0,5 мкм, приобрели кубоидную форму и их распределение по дендритной ячейке приняло псевдорегулярный характер, γ/γ' -мисфит составляет 0,16 %.

Разработаны технологические параметры литья отливок образцов из сплава пониженной плотности ВЖЛ21 с высоким металлургическим качеством на установках для равноосной кристаллизации типа УППФ. Методом ДТА проведены исследования и определены температуры фазовых превращений в литых поликристаллических образцах сплава ВЖЛ21: температура полного растворения γ' -фазы $T_{\text{п.р.}}^{\gamma'} = 1259$ °С, температура начального плавления неравновесной эвтектики (неравновесный солидус) $T_{\gamma-\gamma'} = 1270$ °С. На основании полученных данных разработан режим термической обработки, совмещенной с ГИП при давлении аргона 180 МПа, гомогенизацию при 1250 °С и двухступенчатое старение при 1030 °С и 870 °С.

В соответствии с программой паспортизации изготовлена опытно-промышленная партия сплава ВЖЛ21 паспортного состава. Материал плавки по содержанию легирующих и микролегирующих элементов соответствует расчетному составу и отвечает требованиям повышенной чистоты по примесям и газам (O_2 , N_2 , $\text{S} \leq 0,001\%$ каждого). По результатам выполненных исследований определен комплекс паспортных характеристик, составлен и выпущен паспорт № 1859 на жаропрочный литейный сплав марки ВЖЛ21.

Таблица 1.

Сравнительные показатели физико-механических свойств литейных жаропрочных сплавов

Марка сплава	Виды полуфабрикатов	Вид термической обработки	Т, °С	d, кг/м ³	σ, МПа			σ ₋₁ ^{гл} , МПа на базе 2·10 ⁷ ц.	σ _В , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %
					100 ч	500 ч	1000 ч				
ВЖЛ21	Заготовки с поликристаллической структурой	ГИП + гомогенизация (1220-1250) °С/4,5 ч, старение 1030 °С/4 ч + 870 °С/16 ч	20	8105	-	-	-	360	1000	930	7,5
			800	-	590	515	480	-	1000	810	6
			900	-	350	270	240	300	780	540	4,5
			1000	-	180	130	110	-	580	475	4,5
			1050	-	120	80	60	-	460	390	3,5
			1100	-	-	-	-	-	360	305	2,5
ВЖЛ12У	Заготовки с поликристаллической структурой	Гомогенизация 1210 °С/4 ч	20	7930	-	-	-	185	1000	850	10
			800	-	520	440	410	-	980	805	9
			900	-	300	230	200	260	745	685	8,5
			1000	-	140	100	85	-	505	455	11
			1050	-	-	-	-	-	385	325	9,5
ЖС6У	Заготовки с поликристаллической структурой	Гомогенизация 1220 °С/4 ч	20	8420	-	-	-	140	1030	930	3
			800	-	549	481	441	-	961	873	2
			900	-	343	275	245	280	853	746	1,5
			1000	-	167	118	98	-	608	510	2
			1050	-	103	69	59	-	392	-	2,5
			1100	-	-	-	-	-	338	298	4,5
IN-100	Заготовки с поликристаллической структурой	Гомогенизация 1080 °С/4 ч, 870 °С /12 ч	20	7750	-	-	-	-	1010	850	9
			900	-	310	-	205	-	800	610	6
			1000	-	150	-	85	-	520	330	6
			1050	-	95	-	-	-	440	280	-
Rene-125	Заготовки с поликристаллической структурой	Гомогенизация 1177 °С/2 ч, старение 1079 °С/4 ч + 816 °С/16 ч	20	8460	-	-	-	-	-	-	-
			900	-	330	250	225	-	-	-	-
			1000	-	155	-	-	-	-	-	-
			1093	-	-	-	-	-	550	345	12

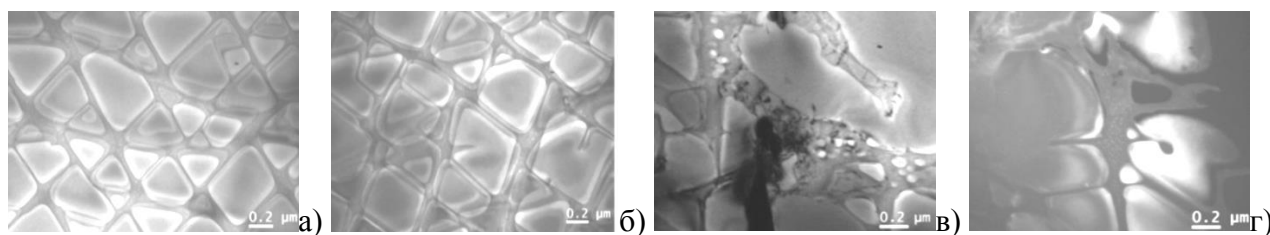


Рис. 3. Микроструктура сплава ВЖЛ21 после термообработки и ГИП (просвечивающая электронная микроскопия): а, б – светлопольное изображение γ' -фазы и γ -прослоек с выделениями нанодисперсной γ' -фазы; в, г – выделения нанодисперсной γ' -фазы в γ -прослойках: в – светлопольное изображение; г – темнопольное изображение в сверхструктурном рефлексе

Сплав марки ВЖЛ21 рекомендован к опробованию в производственных условиях для изготовления турбинных лопаток с поликристаллической структурой, работающих длительно при температурах до 1050 °С. Допускаются кратковременные забросы температуры до 1100 °С.

Потенциальными потребителями нового жаропрочного сплава ВЖЛ21 являются ведущие предприятия авиационной отрасли ОАО «Авиадвигатель» (семейство двигателей в классе тяги от 9 до 18 т для ближне-среднемагистральных самолетов), АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют», АО «ММП им. В.В. Чернышева», АО «ОДК-Климов» (перспективный двигатель скоростного вертолета), ПАО «ОДК-УМПО». По результатам положительного опробования на АО «ОДК-Климов» разработанных технологий изготовления рабочих лопаток из сплава ВЖЛ21 принято решение об их внедрении в серийное производство. Внедрение жаропрочного сплава ВЖЛ21 для производства рабочих лопаток позволит уменьшить на 2,5 % массу и увеличить в 1,5-2 раза ресурс лопаток по сравнению с серийными жаропрочными сплавами ЖС6К и ЖС6У и обеспечит повышение надежности работы перспективных авиационных двигателей.

На основе данных компьютерного конструирования, подтвержденных экспериментами, определена концентрационная область оптимального легирования и разработан новый литейный жаропрочный наноструктурированный никелевый сплав ВЖЛ21 пониженной плотности ($d = 8,105 \text{ г/см}^3$) системы Ni-Al-Cr-Mo-Co-W-Ta-Ti-C-B-Zr-La с поликристаллической равноосной структурой с γ' -интерметаллидным и MeC-карбидным упрочнением. Разработанный новый наноструктурированный жаропрочный литейный сплав пониженной плотности ВЖЛ21, технологии литья и термической обработки, совмещенной с ГИП, отливок с поликристаллической структурой из этого сплава могут быть использованы для изготовления рабочих и сопловых лопаток, эксплуатирующихся длительно при температурах до 1050 °С на высокоресурсных ГТД.

Глава пятая посвящена разработке нового литейного монокристаллического жаропрочного никелевого сплава пониженной плотности. На основе данных компьютерного конструирования, подтвержденных экспериментами, определены концентрационные области оптимального легирования системы (Ni-Al-Re-Mo-Ta-Ti-Cr) фазово-стабильного монокристаллического жаропрочного сплава, и разработан новый жаропрочный монокристаллический наноструктурированный никелевый сплав ВЖМ7 пониженной плотности ($d = 8,393 \text{ г/см}^3$) с аксиальной кристаллографической ориентацией КГО [001].

Сплав ВЖМ7 обладает повышенными характеристиками кратковременной прочности ($\sigma_B^{20} = 1040 \text{ МПа}$) и жаропрочности ($\sigma_{100}^{1000} = 220 \text{ МПа}$) и является конкурентоспособным по отношению к сплавам-аналогам отечественным ВЖЛ20, ЖС26, ЖС36 и зарубежным LEK94 (Германия) и LDS-1101 (США), по длительной прочности в интервале рабочих температур 900-1100 °С превосходит сплавы ВЖЛ20 на 10-24,5 %, ЖС26 до 45 % LEK94 на 10-12 %. По удельной длительной прочности σ_{100}^{1000}/d сплав ВЖМ7 превосходит сплавы ВЖЛ20 ($d = 8,04 \text{ г/см}^3$, $\sigma_{100}^{1000} = 190 \text{ МПа}$) на 11 % и ЖС26 ($d = 8,57 \text{ г/см}^3$, $\sigma_{100}^{1000} = 190 \text{ МПа}$) на 18 % (Таблица 2).

Существенное повышение жаропрочных свойств и эксплуатационных характеристик жаропрочных сплавов с монокристаллической структурой было достигнуто за счет минимального сбалансированного суммарного содержания тяжелых тугоплавких (Re, Mo, Ta, W) металлов, с повышением содержания легких γ' -образующих (Al, Ti) металлов, и исключением из системы легирования Nb, Hf и V, а также формирования наноструктурированного состояния материала, посредством применения разработанных технологий высокотемпературного вакуумного рафинирования и микролегирования, и специальных режимов термической обработки сплавов, совмещенной с горячим изостатическим прессованием (высокотемпературный нагрев для перекристаллизации γ' -фазы и последующее двухступенчатое старение). В результате микроструктура монокристаллического сплава пониженной плотности ВЖМ7 состоит из наноразмерных (10-15 нм) частиц γ' -фазы, которая имеет кристаллографическую структуру $L1_2$ подобно крупным ($\sim 0,5 \text{ мкм}$) микрочастицам γ' -фазы (Рис. 4). В микроструктуре также встречаются участки γ -нанопрослоек, содержащие упорядочено расположенные наночастицы γ' -фазы кубоидной формы, размер которых не превышает 50 нм.

Таблица 2.

Сравнительные показатели физико-механических свойств монокристаллических жаропрочных сплавов

Марка сплава	Виды полуфабрикатов	Вид термической обработки	Т, °С	d, кг/м ³	σ, МПа			σ ₋₁ ^{гп} на базе 2·10 ⁷ ц, МПа	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %
					100 ч	500 ч	1000 ч				
ВЖМ7	Заготовки с монокристаллической структурой ориентации <001>	ГИП + гомогенизация (1280-1300) °С/8 ч, старение 1030 °С /4 ч + 870 °С /24 ч	20	8393	-	-	-	270	1040	820	22
			700	-	-	-	-	-	1040	810	14
			800	-	-	-	-	-	1120	970	21
			900	-	430	330	290	340	905	800	33
			1000	-	220	160	140		670	620	24
			1100	-	120	90	80	-	410	290	45
			1150	-	-	-	-	-	300	285	30
ВЖЛ20	Заготовки с монокристаллической структурой ориентации <001>	Гомогенизация 1230 °С/4 ч, старение 1030 °С /4 ч + 870 °С /16 ч	20	8040	-	-	-	290	1130	950	7,5
			700	-	-	-	-	-	1255	1070	6
			800	-	-	-	-	-	1220	1190	12
			900	-	345	270	-	260	930	770	15,5
			1000	-	190	140	-	-	670	640	24
ЖС26	Заготовки с монокристаллической структурой ориентации <001>	Гомогенизация 1280 °С/4 ч, старение (1000-1030) °С /(3-4) ч	20	8567	-	-	-	220	910	775	16
			800	-	-	-	-	-	1010	870	18
			900	-	405	300	255	310	860	820	21
			1000	-	190	130	110	-	680	500	20
			1100	-	80	53	44	-	420	410	21
			1150	-	-	-	-	-	330	265	35
ЖС36	Заготовки с монокристаллической структурой ориентации <001>	Гомогенизация 1320 °С/7 ч, старение 1030 °С /4 ч + 870 °С /32 ч	20	8720	-	-	-	300	1085	945	19,5
			700	-	-	-	-	-	1200	960	10,5
			900	-	485	390	350	350	1010	940	27
			1000	-	250	185	160	-	860	680	19
			1100	-	140	100	85	170	600	495	22
			1150	-	-	-	-	-	440	380	21,5
ЛЕК-94 Германия	Заготовки с монокристаллической структурой ориент. <001>	-	20	8250	-	-	-	-	-	-	-
			1000	-	200	140	125	-	-	-	-
LDS-1101 (США)	Заготовки с монокристаллической структурой ориентации <001>	Гомогенизация 1315 °С/6 ч, старение 1079 °С /4 ч + 871 °С /12 ч	20	8560	-	-	-	-	-	-	-
			1000	-	245	180	198	-	-	-	-

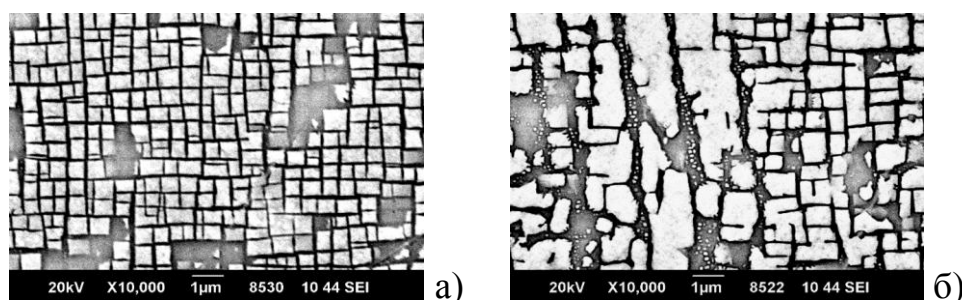


Рис. 4. Микроструктура монокристаллического сплава ВЖМ7 после термообработки, совмещенной с ГИП: а – форма, размеры и распределение микрочастиц γ' -фазы в матричном γ -твердом растворе; б – выделения наночастиц γ' -фазы в матричном γ -твердом растворе материала на границе субзерен

Разработаны технологические параметры монокристаллического литья отливок образцов из сплава пониженной плотности ВЖМ7 на автоматизированной промышленной установке УВНК-9А для литья лопаток с монокристаллической и направленной структурой. Методом ДТА проведены исследования и определены температуры фазовых превращений в литых монокристаллических образцах сплава ВЖМ7: температура полного растворения γ' -фазы $T_{п.р} = 1290$ °С, температура плавления неравновесной эвтектики $\gamma + \gamma'$ $T_{эвт} = 1312$ °С, температура солидус $T_S = 1323$ °С, температура ликвидус $T_L = 1387$ °С.

В соответствии с программой паспортизации изготовлена опытно-промышленная партия нового наноструктурированного монокристаллического сплава пониженной плотности ВЖМ7 паспортного состава. Материал плавки по содержанию легирующих и микролегирующих элементов соответствует расчетному составу и отвечает требованиям повышенной чистоты по примесям и газам (O_2 , N_2 , $S \leq 0,001$ % каждого), более 80 % заготовок образцов имеют монокристаллическую структуру с отклонением КГО [001] не более 10° . По результатам выполненных исследований определен комплекс паспортных характеристик, составлен и выпущен паспорт № 1857 на жаропрочный монокристаллический сплав марки ВЖМ7.

Сплав марки ВЖМ7 рекомендован к опробованию в производственных условиях для изготовления турбинных лопаток с монокристаллической структурой с кристаллографической ориентацией [001], работающих длительно при температурах до 1100 °С. Допускаются кратковременные забросы температуры до 1150 °С.

Потенциальными потребителями нового жаропрочного сплава ВЖМ7 являются ведущие предприятия авиационной отрасли АО «ОДК-Авиадвигатель» (семейство двигателей в классе тяги от 9 до 18 т для ближне-среднемагистральных самолетов), АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют», АО «ММП им. В.В. Чернышева», АО «ОДК-Климов» (перспективный двигатель скоростного вертолета), ПАО «ОДК-УМПО». По результатам положи-

тельного опробования на АО «ОДК-Климов» разработанных технологий изготовления рабочих лопаток из сплава ВЖМ7 принято решение об их внедрении в серийное производство. Внедрение жаропрочного сплава ВЖМ7 для производства рабочих лопаток позволит уменьшить на 1,5-2 % массу и увеличить в 1,5-2 раза ресурс лопаток по сравнению с серийным жаропрочным сплавом ЖС26 и обеспечит повышение надежности работы перспективных авиационных двигателей.

На основе данных компьютерного конструирования, подтвержденных экспериментами, выбрана система легирования (Ni-Al-Re-Mo-W-Ta-Ti-Cr-Co), определена концентрационная область оптимального легирования и разработан новый фазово-стабильный жаропрочный монокристаллический наноструктурированный никелевый сплав ВЖМ7 пониженной плотности ($d = 8,393 \text{ г/см}^3$). Разработанные новый наноструктурированный жаропрочный литейный сплав пониженной плотности ВЖМ7, технологии литья и термической обработки, совмещенной с ГИП, отливок с монокристаллической структурой из этого сплава могут быть использованы для изготовления рабочих и сопловых лопаток с кристаллографической ориентацией [001], длительно работающих при температурах до 1100 °С (допускаются кратковременные забросы температуры до 1150 °С).

Глава шестая посвящена разработке нового монокристаллического интерметаллидного (на основе γ' -фазы) жаропрочного сплава. На основе данных компьютерного конструирования, подтвержденных экспериментами, установлены концентрационные области оптимального легирования фазово-стабильного монокристаллического интерметаллидного (на основе γ' -фазы) жаропрочного сплава, содержащего (% масс.) 8,4 % Al, 3,5 % Cr, 4,5 % Mo, 2,5 % W, 6,0 % Ta, 5,0 % Co, а также Re, La и разработан новый фазово-стабильный монокристаллический интерметаллидный (на основе γ' -фазы) жаропрочный сплав ВИНЗ.

Экспериментальная оценка характеристик кратковременной прочности при температурах 20 и 1200 °С, длительной прочности при температурах 1150 и 1200 °С литых монокристаллических образцов с КГО [001] из сплава ВИНЗ показала, что полученные значения предела прочности $\sigma_B^{1200} = 225\text{-}256 \text{ МПа}$ соответствуют заданным требованиям ($\sigma_B^{1200} = 200\text{-}250 \text{ МПа}$).

Разработана технология литья из интерметаллидного сплава ВИНЗ охлаждаемых монокристаллических с заданной кристаллографической ориентацией [001] с отклонением не более 10° и выходом годного по монокристаллической структуре не менее 80 % сопловых лопаток двигателя ВК-2500М на установке высокоградиентной направленной кристаллизации УВНК-9А. Разработан режим термообработки (высокотемпературная гомогенизация в вакуумной элек-

тропечи при температуре 1280 °С в течение 4 ч) и выпущена технологическая документация на термическую обработку монокристаллических отливок образцов и сопловых лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава ВИНЗ. Режим термообработки обеспечивает механические свойства сплава ВИНЗ с КГО [001]: $\sigma_B^{1200} = 255$ МПа и $\sigma_{130\pm 266}^{1150} = 60$ МПа.

Микроструктура монокристаллических заготовок образцов из ВИНЗ после термической обработки (гомогенизирующий отжиг при 1280 °С, 4 ч) представлена на Рис. 5. Дендритно-ячеистая структура сплава ВИНЗ состоит из матричной γ -фазы – никелевый твердый раствор и выделений (объемная доля 85-90 %) γ' -фазы на основе интерметаллического соединения Ni_3Al . После термической обработки частицы γ' -фазы в структуре материала дендритных ветвей приобрели форму близкую к кубоидам и параллелепипедам. Эвтектическая (перитектическая) γ' -фаза сохранила свою форму и распределение вокруг дендритных ветвей второго порядка.

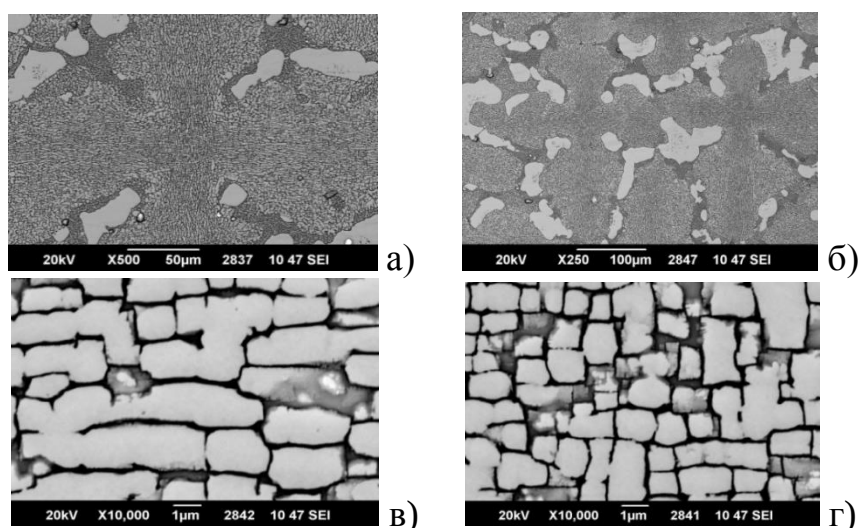


Рис. 5. Микроструктура сплава ВИНЗ в термически обработанном состоянии

По результатам выполненных исследований составлен паспорт № 1852 на жаропрочный монокристаллический интерметаллидный сплав марки ВИНЗ. Сплав ВИНЗ с кристаллографической ориентацией [001] с уровнем свойств $\sigma_B^{20} = 810$ МПа, $\sigma_{0,2}^{20} = 555$ МПа, $\delta^{20} = 23$ %; $\sigma_B^{1200} = 290$ МПа, $\sigma_{0,2}^{1200} = 280$ МПа, $\delta^{20} = 44$ %; $\sigma_{100}^{1150} = 65$ МПа, $\sigma_{100}^{1200} = 50$ МПа; плотность 8,25 г/см³ обладает высокой фазовой стабильностью (таблица 3).

Сплав ВИНЗ рекомендуется к применению в общеклиматических условиях для изготовления турбинных лопаток с монокристаллической структурой с кристаллографической ориентацией [001]. Материал может эксплуатироваться при температурах до 1200 °С, допускаются кратковременные забросы температуры до 1250 °С.

Таблица 3.

Сравнительные показатели физико-механических свойств жаропрочных интерметаллидных сплавов

Марка сплава	Виды полуфабрикатов	ρ , кг/м ³	Вид ТО	$T_{\text{исп}}$, °C	σ_T^T , МПа		E, ГПа	$\sigma_{-1}^{\text{ГЛ}}$ на базе $2 \cdot 10^7$ цикл, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
					100 ч	500 ч					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ВИНЗ	Заготовки с монокристаллической структурой ориентации <001>, отлитые методом направленной кристаллизации	8247	Отжиг 1280 °C/ 4 ч, охлаждение со скоростью 50-60 °C/мин	20	-	-	126	220	810	550	23,5
				700	-	-	104	-	1070	950	11
				800	-	-	98	-	1080	1040	13
				900	330	225	89	320	910	915	31
				1000	160	110	80	-	650	645	38
				1100	85	60	70	-	490	480	53
				1150	65	45	-	-	380	360	50
				1200	50	35	-	-	290	280	44
ВКНА-1В	Заготовки с монокристаллической структурой ориентации <111>, отлитые методом направленной кристаллизации	7938	Отжиг 1150°C/ 1 ч, охлаждение на воздухе	20	-	-	220	-	1350	620	14
				700	-	-	-	-	1090	750	26
				800	-	-	215	-	890	670	26
				900	360	290		-	760	570	25
				1000	200	150	155	-	520	430	30
				1100	100	75	-	-	410	340	22
				1150	70	50	-	-	-	-	-
				1200	50	30	-	-	230	220	24
ВКНА-1В	Заготовки с монокристаллической структурой ориентации <001>, отлитые методом направленной кристаллизации	7938	Отжиг 1150°C/ 1 ч, охлаждение на воздухе	20	-	-	-	130**	550	330	55
				800	480	420		-	840	760	14
				900	-	-		240**	-	-	-
				1000	150	94		-	550	540	44
				1100	90	62		-	440	430	31
				1200	48	38		-	180	170	20

Таблица 3 – продолжение

Марка сплава	Виды полуфабрикатов	ρ , кг/м ³	Вид ТО	$T_{\text{исп}}$, °C	σ_{τ}^T , МПа		Е, ГПа	$\sigma_{-1}^{\text{пл}}$ на базе $2 \cdot 10^7$ цикл, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
					100 ч	500 ч					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ВКНА25 (ВИН1)	Заготовки с монокристаллической структурой ориентации <001>, отлитые методом направленной кристаллизации	8105	Без термообработки	20	-	-		240	1015	545	21
				900	310	185		370	860	850	29
				1000	-	-		-	580	570	32
				1100	90	70		-	450	440	40
				1200	40	30		-	170	165	29,5
IC-438	Заготовки с поликристаллической структурой		Без термообработки	20	-		-	-	1010	610	19
				760	$\sigma=413,8$ МПа, $\tau=773,1$ ч		-	-	-	-	-
				800	-		-	-	890	780	5
				1000	-		-	-	630	600	7
				1040	$\sigma=137,9$ МПа, $\tau=11,9$ ч		-	-	-	-	-
				1100	-		-	-	410	400	3
				1200	-		-	-	130	127	1

Примечания.

Значения пределов кратковременной и длительной прочности, пределов выносливости: средние, соответствующие вероятности не разрушения $l = 0,5$.

**Для образцов с направленной (столбчатой) структурой.

Проведено положительное опробование технологии литья лопаток из сплава ВИНЗ в условиях АО «ОДК-Климов», выход годных по монокристаллической структуре лопаток составил 88 %. Показано, что уровень термоусталостных свойств сплава ВИНЗ при 1050 °С близок к уровню свойств сплава ЖС32 [001]; свойства сплава ВИНЗ при коррозионных испытаниях (СОК) близки к свойствам сплава ЖС26-ВИ с направленной структурой, что характеризует сплав и технологию, как перспективную для изготовления сопловых лопаток.

На основе данных компьютерного конструирования, подтвержденных экспериментами, установлена концентрационная область оптимального легирования и разработан новый фазово-стабильный монокристаллический интерметаллидный (на основе γ' -фазы) жаропрочный сплав ВИНЗ для литья турбинных лопаток с кристаллографической ориентацией [001]. Разработанный новый наноструктурированный жаропрочный литейный сплав пониженной плотности ВИНЗ, технологии литья и термической обработки, совмещенной с ГИП, отливок с монокристаллической структурой из этого сплава могут быть использованы для изготовления рабочих и сопловых лопаток с кристаллографической ориентацией [001], длительно работающих при температурах до 1200 °С (допускаются кратковременные забросы температуры до 1250 °С).

Глава седьмая посвящена разработке модельных композиций нового поколения на основе синтетических восков с повышенной геометрической стабильностью и ремонтных восковых составов.

В работе предложена классификация модельных композиций в зависимости от природы входящих в ее состав компонентов и разработаны основные требования к модельным композициям, обеспечивающие качество отливок лопаток с монокристаллической и поликристаллической структурой из жаропрочных никелевых сплавов нового поколения.

Усовершенствована методика определения текучести для изучения модельных композиций, так как текучесть является одним из основных свойств, определяющих выбор технологических параметров изготовления моделей. Данная методика определения текучести модельных композиций позволяет осуществлять подбор технологических параметров изготовления моделей в зависимости от показателя текучести расплава композиций.

По результатам исследований определены концентрационные зависимости и разработан базовый состав модельной композиции, содержащий в составе: парафин (марки П1, П2, В2, В3, В4) – 40 %, воск полиэтиленовый (марки ПВ-300) – 10 %, сэвилен (сополимер этилена с винилацетатом марки 11306–075) – 5 %, смола нефтеполимерная лакокрасочная (марки «Б») или термополимерная (марки «Политер») – 45 %. В качестве наполнителя принято решение

использовать терефталевую кислоту в количестве от 30 до 50 % (вводится сверх 100 %). Разработанной новой модельной композиции присвоена марка Салют-7.

Разработанная модельная композиция «Салют-7» превосходит по прочностным характеристикам применяемые зарубежные композиции КС2683К (США) и ЗГВ-101 (Белоруссия) в среднем на 15-20 % и по технологичности обеспечивает все основные требования, предъявляемые к модельным композициям нового поколения, сформулированным в настоящей работе.

Разработаны составы модельных композиций нового поколения ВИАМ МК-1, ВИАМ МК-2, ВИАМ МК-Л характеризующиеся повышенной прочностью, твердостью, трещиностойкостью и теплоустойчивостью, снижением зольности, улучшением качества поверхности моделей и более стабильными характеристиками по сравнению с существующими отечественными и зарубежными аналогами (Таблица 4).

Таблица 4.

Основные физико-механические характеристики модельных композиций

Наименование композиции	Свойства			
	Температура каплепадения, °С	Теплоустойчивость, °С	Предел прочности при статическом изгибе, МПа	Массовая доля золы, %
ВИАМ МК-1	89,0	45	7,45	0,011
ВИАМ МК-2	91	45	8,12	0,02
ВИАМ МК-Л (для ЛПС)	59,0	35	6,2	0,008
САЛЮТ-7	80-90	48	7,5	0,01
GTW (REMET)	89	40	5,91	0,05
A7-FR/70 (BLAYSON)	77	48	4,5	0,03

Разработан технологический процесс изготовления модельных композиций марок «Салют-7», ВИАМ МК-1, ВИАМ МК-2, ВИАМ МК-Л с различным содержанием наполнителя, включающий в себя три основные стадии:

- приготовление пластификатора на основе парафина с различным содержанием сополимера этилена с винилацетатом;
- приготовление собственно модельной композиции, т.е. смешивание пластификатора с синтетической смолой и восками в нужном соотношении;
- введение наполнителя в нужном соотношении.

Разработанные модельные композиции нового поколения марок Салют-7, ВИАМ МК-1, ВИАМ МК-2, ВИАМ МК-Л с повышенными и более стабильными характеристиками по сравнению с существующими отечественными и зарубежными аналогами рекомендованы для серийного производства лопаток с мо-

нокристаллической и поликристаллической структурой без доработки технологической оснастки. Внедрение их в производство позволит обеспечить импортозамещение и технологическую независимость Российской Федерации от зарубежных модельных композиций, поставка которых на предприятия авиадвигателестроения в настоящее время прекращена.

Глава восьмая посвящена практической реализации результатов работы.

1. Внедрен в производство на АО «ОДК-Климов» сплав ВЖЛ21 и технология литья рабочих лопаток 2-ой ступени ТВД вертолетного двигателя ВК-2500М. При опробовании технологии литья сопловых лопаток из сплава ВЖЛ21 на АО «ОДК-Климов» выход годного отливок рабочих лопаток 2-ой ступени составил 86 % (Рис. 6). В процессе внедрения разработаны технологии и выпущена технологическая документация на литье заготовок образцов и отливок рабочих лопаток с поликристаллической структурой из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ21, обеспечивающая выход годного на отливках лопаток по установленному ($A_{\min} = 0,5$ мм; $A_{\max} = 2$ мм) размеру зерна 100 %, на термическую обработку, совмещенную с ГИП, заготовок образцов и отливок рабочих лопаток с поликристаллической структурой из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ21, обеспечивающая длительную прочность при температуре $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\sigma_{100}^{900} \geq 340$ МПа (среднее значение) и относительное удлинение при растяжении при комнатной температуре $\delta \geq 7$ %. Даны рекомендации по применению поверхностного модифицирования структуры с использованием алюмината кобальта для повышения усталостной прочности лопаток.



Рис. 6. Макроструктура отливок рабочих лопаток из сплава ВЖЛ21

2. Внедрен в производство на АО «ОДК-Климов» сплав ВЖМ7 и технология литья рабочих лопаток свободной турбины вертолетного двигателя ВК-2500М. В процессе внедрения разработан режим термообработки, совмещенный с ГИП, монокристаллических отливок образцов и рабочих лопаток конструкции АО «ОДК-Климов» из сплава ВЖМ7 с заданной КГО, обеспечивающий уровень длительной прочности $\sigma_{100}^{1000} \geq 215$ МПа (среднее значение) и микропористости менее 0,1 %. Выпущена технологическая документация на процесс литья на автоматизированной промышленной установке УВНК-9А монокристаллических отливок образцов и рабочих лопаток конструкции АО «ОДК-Климов» из

жаропрочного сплава ВЖМ7 (Рис. 7) с заданной КГО с отклонением не более 10° и выходом годного по монокристаллической структуре не менее 80 %.

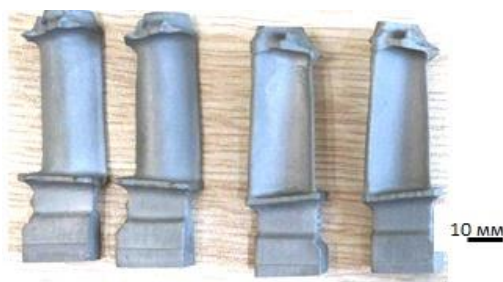


Рис. 7. Монокристаллические малоразмерные неохлаждаемые лопатки из сплава ВЖМ7

3. Внедрен в производство на АО «ОДК-Климов» сплав ВИНЗ и технология литья сопловых лопаток вертолетного двигателя ВК-2500М. При опробовании технологии литья лопаток из сплава ВИНЗ на АО «ОДК-Климов» на установке УВНК-8П, выход годных по структуре лопаток составил 88 %. В процессе внедрения разработан режим термообработки и выпущена технологическая документация на термическую обработку монокристаллических отливок образцов и сопловых лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава ВИНЗ. Режим термообработки обеспечивает механические свойства сплава ВИНЗ с КГО [001]: $\sigma_B^{1200} = 255$ МПа и $\sigma_{130-266}^{1150} = 60$ МПа. Выпущена технологическая документация на процесс литья с заданной кристаллографической ориентацией (отклонение не более 10°) и выходом годного по монокристаллической структуре не менее 80 % охлаждаемых монокристаллических сопловых лопаток из интерметаллидного сплава ВИНЗ (Рис. 8) для двигателя ВК-2500М.

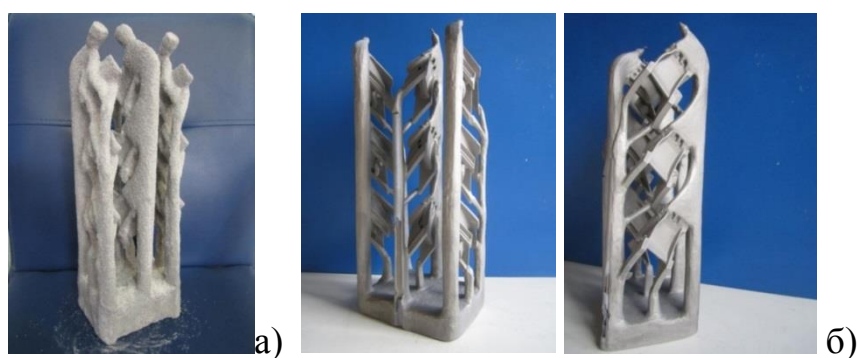


Рис. 8. Литейный блок (а) и полученные отливки сопловых лопаток (б) из сплава ВИНЗ

4. Внедрена в производство АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют» модельная композиция Салют-7. В процессе опробования разработанной модельной композиции Салют – 7 показано, что ее применение для изготовления моделей обеспечивает высокий выход годного литья (85 % для рабочих и сопловых лопаток).

5. По результатам опробования модельных композиций нового поколения ВИАМ МК-1, ВИАМ МК-2, ВИАМ МК-Л принято решение по применению модельных композиций производства ФГУП «ВИАМ» на ЦТК АТ ПАО «ОДК-УМПО». В настоящее время рассматривается возможность заключения договора на поставку модельных композиций в количестве, соответствующем потребностям ЦТК АТ при серийном производстве крупногабаритных изделий мощностью 600 тонн алюминиевого литья и 105 тонн титанового литья в год (Ориентировочная годовая потребность в модельных композициях 20-25 тонн).

Основные выводы

Разработаны научные основы разработки литейных жаропрочных наноструктурированных нового поколения никелевых сплавов пониженной плотности с заданными механическими свойствами. Таким образом, решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное (промышленное) значение, а также изложены новые научно обоснованные технологические и технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие отечественного авиационного и энергетического машиностроения, а именно:

1. Успешно уточнена и реализована применительно к разработке литейных жаропрочных никелевых сплавов пониженной плотности с повышенными характеристиками методика компьютерного конструирования, заключающаяся в определении точного химического состава в пределах традиционной схемы легирования сплавов данного класса.

2. При помощи разработанной методики конструирования получены сплавы нового химического состава, предназначенные для изготовления из них монокристаллических и поликристаллических лопаток газовых турбин, отвечающие повышенным по сравнению с существующими эксплуатационными свойствами.

Так, для поликристаллического сплава суммарное содержание тяжелых переходных металлов Mo, Ta, W сведено к минимуму, с заменой их легкими образующими интерметаллидную фазу с никелем Ti и Al. При этом Nb, Hf и V были исключены полностью. Установлено, что точность содержания введенных легирующих элементов не должна превосходить 0,04 % масс. В сплаве, предназначенном для применения в монокристаллических лопатках, также до минимума сведено содержание остродефицитного тяжелого редкоземельного металла рения, который в последнее время считался важнейшим упрочнителем современных жаропрочных сплавов на базе никеля.

3. С помощью и на основе результатов комплексных исследований физико-химических свойств, микроструктуры, фазового состава и механических испытаний показаны высокая фазовая стабильность и повышенные значения

кратковременной прочности, пластичности, выносливости и длительной прочности, сплавов следующих марок:

- поликристаллический сплав с интерметаллидным и карбидным упрочнением ВЖЛ21 ($d = 8,105 \text{ г/см}^3$, $\sigma_B^{20} = 1000 \text{ МПа}$, $\delta^{20} = 7,5 \%$, $\sigma_{-1}^{20} = 360 \text{ МПа}$ на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, $\sigma_{100}^{900} = 350 \text{ МПа}$), превосходящий по комплексу физико-механических свойств в интервале рабочих температур $800\text{-}1050 \text{ }^\circ\text{C}$ отечественные и зарубежные сплавы-аналоги ВЖЛ12У на 13,5-30 %, ЖС6У на 5-20 %, IN-100 (США) на 13-29 %, Rene-125 (США) на 6-16 %;

- монокристаллический сплав ВЖМ7 ($d = 8,393 \text{ г/см}^3$, $\sigma_B^{20} = 1040 \text{ МПа}$, $\delta^{20} = 22 \%$, $\sigma_{-1}^{20} = 510 \text{ МПа}$ на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, $\sigma_{100}^{1000} = 220 \text{ МПа}$), превосходящий по комплексу физико-механических свойств в интервале рабочих температур $900\text{-}1100 \text{ }^\circ\text{C}$ отечественные и зарубежные сплавы-аналоги ВЖЛ20 на 10-24,5 %, ЖС26 до 45 %, LEK94 (Германия) на 10-12 %.

4. Химический состав перспективного интерметаллидного сплава определен на основе высокопрочного соединения с преимущественно ковалентной связью Ni_3Al , основными легирующими элементами которого являются Re, Mo, Ta, с небольшими добавками Cr, W, Co, Ti, La. Вновь разработанный монокристаллический интерметаллидный сплав ВИН3 ($d = 8,247 \text{ г/см}^3$, $\sigma_B^{20} = 810 \text{ МПа}$, $\delta^{20} = 23,5 \%$, $\sigma_B^{1200} = 290 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1}^{20} = 215 \text{ МПа}$ на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, $\sigma_{100}^{1200} = 50 \text{ МПа}$), превосходящий по характеристикам кратковременной прочности при температурах $900\text{-}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ на 20-60 % жаропрочные интерметаллидные сплавы ВКНА-1В с КГО $\langle 111 \rangle$ и ВКНА-25 (ВИН1) с КГО $\langle 001 \rangle$, по пределам длительной прочности при температуре $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ жаропрочный интерметаллидный сплав ВКНА-25 (ВИН1) с КГО $\langle 001 \rangle$ на 17-25 %. Таким образом, обеспечено сочетание высокой прочности интерметаллидного сплава с удовлетворительной пластичностью.

5. Особые свойства интерметаллидного сплава обеспечены за счет благоприятной кубической формы микрочастиц субмикроскопического размера γ' -фазы с достаточно четкой морфологией, разделенными прослойками γ -фазы (толщина 50-90 нм), которые в свою очередь упрочнены наноразмерными частицами γ -фазы размером порядка 30 нм, которые эффективно препятствуют движению дислокаций.

6. Установлена совокупность оптимальных технологических параметров структурообразования при литье рабочих и сопловых лопаток методами равноосной (из сплава ВЖЛ21) и направленной (из сплавов ВЖМ7 и ВИН3) кристаллизации и последующих многоступенчатой термической и баротермической обработках, обеспечивающих достижение заданного высокого уровня свойств.

7. Разработаны оптимальные технологические режимы и выпущена технологическая документация: на отливку лопаток из жаропрочного фазово-стабильного наноструктурированного никелевого поликристаллического сплава пониженной плотности ВЖЛ21, обеспечивающего длительную прочность $\sigma_{100}^{900} \geq 350$ МПа (среднее значение) и относительное удлинение при растяжении при комнатной температуре $\delta \geq 7$ %; лопаток из жаропрочного фазово-стабильного наноструктурированного сплава ВЖМ7 с заданной КГО <001> и выходом годного по монокристаллической структуре не менее 80 %, а также на термическую обработку отливок образцов и лопаток из сплава ВЖМ7 с заданной КГО <001>, обеспечивающую уровень длительной прочности $\sigma_{100}^{1000} \geq 215$ МПа и микропористости менее 0,1 %; на литье и термическую обработку монокристаллических с заданной кристаллографической ориентацией <001> охлаждаемых сопловых лопаток из интерметаллидного сплава ВИНЗ, обеспечивающую уровень длительной прочности $\sigma_{100}^{1150} \geq 60$ МПа и кратковременной прочности $\sigma_6^{1200} \geq 255$ МПа.

8. Проведено успешное практическое опробование на машиностроительном предприятии АО «ОДК-Климов» следующих технологий литья рабочих лопаток, предназначенных для: 2-ой ступени двигателя ВК-2500М из сплава ВЖЛ21; 1-ой ступени двигателя ВК-2500М из сплава ВЖМ7, а также сопловых лопаток вертолетного двигателя ВК-2500М из сплава ВИНЗ. При этом выход годных отливок составил от 86 до 88 %, что позволило существенно снизить производственные затраты.

9. Разработаны и обоснованы применительно к литью по выплавляемым моделям рабочих и сопловых лопаток из литейных жаропрочных никелевых сплавов пониженной плотности оригинальные модельные композиции на основе синтетических восков (Салют 7 для литья крупногабаритных лопаток и деталей типа «Створка», ВИАМ МК-1 для литья рабочих лопаток из сплавов ВЖЛ21 и ВЖМ7, ВИАМ МК-2 для литья сопловых лопаток из сплава ВИНЗ, ВИАМ МК-Л для изготовления элементов литниково-питающих систем) с повышенной на 20% геометрической точностью и стабильностью формы модели, не уступающие по свойствам импортным аналогам Paramelt (США), BLAYSON, REMET (Великобритания), Deumex (ЕС) и др., а также применяемой отечественной модельной массой Салют 4.

10. Проведено опробование разработанных модельных композиций нового поколения на моторостроительных предприятиях. В процессе опробования разработанных модельных композиций показано, что их применение для изготовления моделей обеспечивает высокий выход годного литья (не менее 80 - 85 % для рабочих и сопловых лопаток).

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации, рекомендованные ВАК:

1. Оспенникова О.Г. Итоги реализации стратегических направлений по созданию нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей за 2012-2016 гг. // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 17-23. (0,29 п.л./0,29 п.л.)
2. Оспенникова О.Г., Висик Е.М., Герасимов В.В., Колядов Е.В. Пути повышения эксплуатационных характеристик лопаток газотурбинных установок // *Технология металлов*. 2017. № 1. С. 17-24. (0,33 п.л./0,20 п.л.)
3. Оспенникова О.Г. Жаропрочные сплавы нового поколения и модельные композиции для литья по выплавляемым моделям // *Литейное производство*. 2016. № 3. С. 17-20. (0,17 п.л./0,17 п.л.)
4. Оспенникова О.Г. Тенденции создания жаропрочных никелевых сплавов пониженной плотности с поликристаллической и монокристаллической структурой (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 1 (40). С. 3-19. (0,71 п.л./0,71 п.л.)
5. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Висик Е.М., Рассохина Л.И., Тимофеева О.Б. Жаропрочные никелевые сплавы пониженной плотности. // *Литейное производство*. 2012. №6. С. 5–11. (0,25 п.л./0,20 п.л.)
6. Orlov M.R., Ospennikova O.G., Karachevtsev F.N., Nikitin Y.Y. Interaction effects of alkaline and acid electrolytes with intermetallic γ' -phase on surface of nickel superalloys // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. Т. 7. № 4. Р. 458-464. (0,30 п.л./0,20 п.л.)
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки и разлива современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2011. №SP2. С. 68-78. (0,46 п.л./0,20 п.л.)
8. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с пониженной плотностью // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2. С. 105–117. (0,54 п.л./0,30 п.л.)
9. Visik E.M., Petrushin N.V., Gerasimov V.V., Tikhomirova E.A., Ospennikova O.G., Zhivushkin A.A. Production trial of a new heat-resistant alloy with single crystal GTE blade casting // *Metallurgist*. 2017. Т.61. № 1-2. Р. 162-169. (0,33 п.л./0,15 п.л.)
10. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 72-103. (1,33 п.л./0,85 п.л.)
11. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Литейные конструкционные сплавы на основе алюминидов никеля // *Двигатель*. 2010. №4. С. 24–25. (0,10 п.л./0,05 п.л.)
12. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Елютин Е.С. Рений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S5. С. 5-16. (0,46 п.л./0,26 п.л.)

13. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высоко-теплонагруженных газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19. (0,29 п.л./0,10 п.л.)
14. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В. Новый монокристаллический интерметаллидный жаропрочный сплав на основе γ' -фазы для лопаток ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 34–40. (0,29 п.л./0,10 п.л.)
15. Ospennikova O.G., Petrushin N.V., Treninkov I.A., Timofeeva O.B. Phase and structural transformations in heat resistant intermetallide nickel-based alloy. // Inorganic Materials: Applied Research. 2016. Т. 7. № 6. Р. 832-839. (0,33 п.л./0,15 п.л.)
16. Оспенникова О.Г., Калицев В.А., Евгенов А.Г., Базылева О.А. Совмещение процессов гип и термической обработки поликристаллических отливок из сплава на основе интерметаллида Ni_3Al // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 88-97. (0,42 п.л./0,10 п.л.)
17. Оспенникова О.Г. Исследование влияния наполнителей на свойства и стабильность модельных композиций, выбор оптимальных составов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 14–17. (0,17 п.л./0,17 п.л.)
18. Оспенникова О.Г. Исследование и разработка параметров технологического процесса изготовления моделей из модельных композиций на основе синтетических восков // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 18–21. (0,17 п.л./0,17 п.л.)
19. Оспенникова О.Г. Теплофизические и реологические характеристики синтетических смол для модельных композиций // Литейное производство. 2016. № 10. С. 26-28. (0,13 п.л./0,13 п.л.)
20. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54. (0,33 п.л./0,08 п.л.)
21. Логунов А.В., Разумовский И.М., Строганов Г.Б., Рубан А.В., Разумовский В.И., Ларионов В.Н., Оспенникова О.Г., Поклад В.А. Теоретический анализ системы легирования и разработка новых жаропрочных никелевых сплавов // Доклады академии наук. 2008. Т. 421. №5. С. 621–624. (0,20 п.л./0,05 п.л.)
22. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей // Технология легких сплавов. 2013. №4. С.20-25. (0,25 п.л./0,25 п.л.)
23. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 19-36. (0,75 п.л./0,75 п.л.)
24. Оспенникова О.Г. Особенности, основные задачи и тенденции развития специальной металлургии жаропрочных сплавов нового поколения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 4. С. 68-73. (0,25 п.л./0,25 п.л.)
25. Оспенникова О.Г. Исследование влияния процесса газостатирования отливок из жаропрочных сплавов // Двигатель. 2008. № 1. С. 22-23. (0,08 п.л./0,08 п.л.)

Патенты:

1. Способ изготовления ротора турбины из никелевого жаропрочного сплава. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г., Мазалов И.С., Голев Е.В., Быков Ю.Г., Шаронова Н.И. патент на изобретение RUS 2571673 31.07.2014.
2. Композиция для изготовления выплавляемых моделей. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Рассохина Л.И., Парфенович П.И., Китаева Н.С., Ширякина Ю.М., Пикулина Л.В. патент на изобретение RUS 2600468 20.03.2015.
3. Литейный жаропрочный сплав на никелевой основе и изделие, выполненное из него. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Рассохина Л.И., Подкопаева Л.А., Битюцкая О.Н. патент на изобретение RUS 2530932 29.10.2013.
4. Жаропрочный сплав на никелевой основе для монокристаллического литья. Петрушин Н.В., Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ригин В.Е., Герасимов В.В., Висик Е.М. патент на изобретение RUS 2439184 05.10.2010.
5. Композиция для изготовления выплавляемых моделей. Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Пикулина Л.В., Рассохина Л.И. патент на изобретение RUS 2447968 14.12.2010.
6. Литейный жаропрочный сплав на основе никеля. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Митрушкин А.А., Рассохина Л.И. патент на изобретение RUS 2434069 05.10.2010.
7. Способ получения никелевого жаропрочного сплава. Елисеев Ю.С., Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Ларионов В.Н., Логунов А.В., Разумовский И.М., Гаврилюк В.В. патент на изобретение RUS 2344188 12.02.2007.
8. Состав жаропрочного никелевого сплава для монокристалльного литья (варианты). Елисеев Ю.С., Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Ларионов В.Н., Логунов А.В., Разумовский И.М. патент на изобретение RUS 2348724 07.03.2007.
9. Состав жаропрочного никелевого сплава для монокристалльного литья (варианты). Елисеев Ю.С., Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Ларионов В.Н., Логунов А.В., Разумовский И.М. патент на изобретение RUS 2348725 07.03.2007.
10. Сплав на никелевой основе для литья монокристаллических лопаток турбины газотурбинного двигателя. Елисеев Ю.С., Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Андриенко А.Г., Гайдук С.В., Орлов М.Р., Кононов В.В. патент на изобретение RUS 2354733 27.06.2007.
11. Состав жаропрочного никелевого сплава (варианты). Елисеев Ю.С., Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Ларионов В.Н., Логунов А.В., Разумовский И.М. патент на изобретение RUS 2353691 07.03.2007.
12. Способ изготовления монокристаллической отливки рабочей лопатки турбины газотурбинного двигателя с заданными аксиальной и азимутальной ориентацией сплава. Елисеев Ю.С., Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Орлов М.Р. патент на изобретение RUS 2329120 21.02.2007.

Отпечатан 1 экз.

Исп. О.Г. Оспенникова

Печ. О.Г. Оспенникова

Автореферат О.Г. Оспенниковой

Разработка научных основ создания нового поколения литейных жаропрочных наноструктурированных никелевых сплавов пониженной плотности с требуемым комплексом механических свойств

Подписано в печать 10.02.2018 г. Заказ

Формат бумаги 60×90/16. Печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ФГУП «ВИАМ».

105005, г. Москва, ул. Радио, 17.