

На правах рукописи

РОМАШОВ АНТОН СЕРГЕЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА СВОЙСТВА
ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ДИСПЕРСНОМ
УПРОЧНЕНИИ НИТРИДАМИ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность: 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов
и сплавов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА – 2015

Диссертационная работа выполнена в филиале «Научно-исследовательского института технологии и организации производства двигателей» акционерного общества «Научно-производственный центр газотурбостроения «Салют» (филиал «НИИД» АО «НПЦ газотурбостроения «Салют»).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Фарнасов Геннадий Алексеевич

Официальные оппоненты: Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, доцент, декан механического факультета, федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», заведующий кафедрой авиатопливообеспечения и ремонта ЛА

Овчинников Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, академик Международной академии информатизации, открытое акционерное общество «Российская самолётостроительная корпорация «МиГ», ведущий специалист

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского»

Защита состоится «_____» _____ года в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.08 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (ФГАОУ ВПО «НИТУ «МИСиС») по адресу: 119049, г. Москва, Ленинградский проспект, д.6, стр.2, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «НИТУ «МИСиС» и на сайте www.misis.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 20____ г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.132.08,

проф., д.ф.-м.н.

С.И. Мухин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Создание современных авиационных газотурбинных двигателей неизбежно связано с повышением КПД и ресурса работы двигателя за счёт увеличения рабочих температур и снижения веса теплонагруженных деталей двигателя. Современные свариваемые деформируемые сплавы на никелевой и никель-кобальтовой основах для деталей высокотемпературной зоны газотурбинных двигателей (ГТД) обеспечивают температуру металла не выше 1050-1100°C, что для перспективных ГТД является недостаточным.

В дисперсионно-твердеющих сплавах, в которых высокая жаропрочность достигается комплексным легированием тугоплавкими элементами твердого раствора и выделениями частиц упрочняющей γ' -фазы, при рабочей температуре выше 1150 °C происходит интенсивное разупрочнение сплавов, связанное с коагуляцией и растворением дисперсных частиц упрочняющей γ' -фазы. Жаропрочные никелевые сплавы ограничены пределом легирования твердого раствора, выше которого происходит выделение фаз охрупчивающих сплавы, а также повышение доли тугоплавких элементов в никелевой основе приводит к существенному росту плотности сплава.

Другой возможный путь – повышение жаропрочности путем дисперсного упрочнения тугоплавкими частицами нитридов легирующих элементов с помощью высокотемпературного объёмного (внутреннего) азотирования. Применение легирования сплава азотом путем химико-термической обработки неизбежно сопровождается изменением механических свойств и технологичности изготовления деталей, прежде всего ухудшением технологической пластичности, свариваемости, необходимостью отработки способов защиты от газовой коррозии.

В связи с этим актуальной является задача комплексного исследования изменений состава, структуры и свойств никелевых сплавов при дисперсном упрочнении нитридами легирующих элементов для решения проблем надежности и ресурса высокотемпературных деталей современных и перспективных ГТД.

Цель работы. Повышение долговечности высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать структурные изменения в жаропрочных никелевых сплавах при воздействии газовой среды.
2. Исследовать влияние технологических факторов на процесс изготовления высокотемпературных деталей реактивного сопла и форсажной камеры авиационных ГТД из сплавов с нитридным упрочнением.
3. Исследовать влияние нитридов легирующих элементов на характеристики жаростойкости при изотермическом окислении.

4. Исследовать структуру и свойства сварных швов при сварке сплавов с нитридным упрочнением.

5. Изготовить опытные образцы деталей газотурбинных двигателей из сплавов с нитридным упрочнением и провести испытания в натурных условиях на работающем двигателе.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

1. Установлено влияние химического состава никелевых сплавов и жаростойких покрытий на скорость азотирования. Алюминий в покрытиях на основе алюминидов никеля является ускорителем азотирования, причем скорость насыщения азотом возрастает при увеличении содержания алюминия в покрытиях на никелевых сплавах.

2. Установлено положительное влияние азотирования на закономерности высокотемпературного окисления никелевых сплавов, обеспечивающее двукратное уменьшение скорости коррозии при температуре 1050°C без защитного покрытия и почти 30-кратное при температуре 1200°C при наличии алюмосилицидного покрытия.

3. Установлены характеристики напряженного состояния азотированного сплава ХН60ВТ дополнительно легированного кобальтом и титаном. Величина остаточных сжимающих напряжений зависит от толщины листа, а именно в толстых листах остаточные напряжения существенно выше, чем в тонких. Расчетным путем установлено, что в системе γ -Ni тв.р.-TiN основная упрочняющая фаза TiN находится в состоянии растяжения, а окружающий γ -никелевый твердый раствор в состоянии сжатия.

Обоснованность научных результатов подтверждается корректностью принимаемых допущений, результатами исследования кинетики окисления, использованием современных методов исследования и оборудования, совпадением теоретических и экспериментальных данных.

Практическая ценность результатов работы заключается в следующем:

1. Разработан способ изготовления трех деталей сопла и форсажной камеры перспективного авиационного двигателя из листового проката никелевого сплава с дисперсным упрочнением нитридами легирующих элементов, в частности отработаны технологические процессы аргоно-дуговой сварки и шликерного алюмосилицирования, которые внедрены в производстве опытных образцов. Рекомендовано объемное азотирование деталей проводить после нанесения защитных алюминидных покрытий (алитирования, хромоалитирования, алюмосилицирования).

2. Проведены стендовые испытания деталей с дисперсным упрочнением нитридами в составе двигателя АЛ31Ф, которые подтвердили работоспособность деталей в условиях воздействия высоких температур и нагрузок.

Достоверность полученных результатов. Степень достоверности полученных результатов определяется использованием современных методов и приборов контроля и диагностики, аттестованных по международным стандартам,

а также проверкой результатов исследований в промышленных условиях (стендовые испытания) с получением удовлетворительных данных. Текст диссертации и автореферат проверен на отсутствие плагиата.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVII международном конгрессе двигателестроителей (Украина, АР Крым, пос. Рыбачье, 2012 г.), на научно-технических совещаниях филиала «НИИД» АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» (2011 – 2014 гг.), на заседании кафедры металлургии стали и ферросплавов НИТУ «МИСиС» (2014 г.), на заседании кафедры металловедения и физики прочности НИТУ «МИСиС» (2015 г.), на заседании кафедры материаловедения и нанотехнологий ФГБОУ ВПО «МГИУ» (2014 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 6 статьях, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, перечень которых приведен в конце автореферата.

Реализация результатов работы. Основные результаты работы использованы в практике работы АО «НПЦ газотурбостроения «Салют».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 90 наименований, одного приложения. Общий объем работы составляет 137 страниц машинописного текста, включая 90 рисунков, 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы. Там же изложена общая характеристика изучаемых проблем, сформулированы основные цели работы, изложены научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе выполнен анализ жаропрочных сплавов, применяемых при изготовлении деталей, работающих в высокотемпературном газовом потоке. Показано, что рост термомеханической напряженности деталей камеры сгорания, турбины и сопла является основной причиной малых ресурсов высокотемпературных двигателей, что вызывает необходимость разработки новых жаростойких и жаропрочных сплавов, надежных методов защиты от газовой коррозии, а также уменьшения массы элементов конструкции. Рассмотрены методы легирования никелевых сплавов. Показано, что жаропрочность сплавов можно повысить путем высокотемпературного азотирования.

Применение защитных покрытий, как одно из важнейших средств обеспечения необходимого ресурса работы газотурбинных двигателей (ГТД), стало общепризнанной необходимостью, в связи с этим были проанализированы защитные покрытия, как основное средство защиты от газовой коррозии деталей ГТД. Выявлены основные характеристики способов повышения долговечности деталей. Установлено, что из-за простоты получения и высокой ремонтпригодности, в настоящее время продолжают широко использоваться диффузион-

ные защитные покрытия, получаемые по технологиям порошкового или газового алитирования, хромоалитирования, алюмосилицирования. Однако, шликерные покрытия нередко содержат рассеянные поры, которые несколько снижают эрозионную стойкость. Поэтому, в настоящее время широкое распространение получили конденсационные покрытия. Для улучшения структурного состояния могут использоваться методы термомеханической обработки покрытий, а также совместное использование различных методов, позволяющее получать многослойные композиции покрытий. Сформулированы основные требования к защитным покрытиям.

Рассмотрены особенности сварки никелевых сплавов. Выяснено что к числу главных задач, возникающих при сварке никеля плавлением, относятся обеспечение надежной защиты зоны сварки от газов атмосферы, применение сварочных материалов высокой чистоты, а также раскисление и дегазация сварочной ванны.

С целью повышения долговечности деталей машин широко используются способы поверхностного упрочнения: цементация, нитроцементация, азотирование. Показано, что среди многих способов упрочняющей химико-термической обработки (ХТО) сталей и сплавов одним из наиболее эффективных, перспективных и дешевых является высокотемпературное азотирование.

Во второй главе представлен химический состав исследуемых сплавов и методики проведения исследований. Для оценки влияния газовой среды на состояние поверхностного слоя деталей работающих в газотурбинном двигателе использовались сплавы марок ЖС6У, ЖС6ФНК, ВЖЛ12У, ХН60ВТ, ЧС88У. На часть образцов наносили защитное покрытие. После этого, образцы с покрытием и без покрытия загружали и нагревали в трубчатой печи. Для сравнения эксперименты проводили в вакууме, в токе азота и в токе воздуха. Помимо этого, исследования были проведены на серийных лопатках из сплавов ВЖЛ12У и ЖС6ФНК с нанесенными на них защитными покрытиями.

При исследовании влияния структурных изменений на свойства жаропрочных сплавов при дисперсном упрочнении нитридами легирующих элементов использовался сплав ХН60ВТ и сплав ХН60ВТ дополнительно легированный кобальтом и титаном.

Согласно классическим работам Таммана, Пилмента и Бедворта кинетику окисления металлов и сплавов определяли из термогравиметрической зависимости, описываемой параболической кривой:

$$\left(\frac{\Delta m}{S}\right)^2 = K_p \cdot \tau, \quad (1)$$

где Δm – величина изменения массы приходящаяся на единицу площади окисления поверхности S ,

τ – время,

K_p – параболическая константа скорости окисления.

Исследование характеристик жаростойкости при изотермическом окислении проводилось на образцах в следующих состояниях:

- до азотирования;
- в азотированном состоянии;
- в азотированном состоянии с защитным покрытием.

Испытания проводились в корундовых тиглях в воздушной среде при температурах 1050°C и 1200°C в электропечи сопротивления С.0,1-1400.1Ф. Оценку результатов проводили по изменению удельной массы образцов ($\frac{\Delta m}{S}$, г/м²), по внешнему виду, по изменению структуры поверхностного слоя, глубины коррозионных повреждений, а также рентгеноструктурным анализом фазового состава поверхностного слоя образцов. Образцы с тиглями взвешивали на аналитических весах после 5, 10, 20, 35, 55, 75 и 100 часов испытаний. Время окисления отсчитывалось с момента достижения образцами заданной температуры.

Образцы для механических испытаний изготавливались в соответствии с ГОСТ 11701-84 и ГОСТ 9651-84. Заготовки под образцы отрезались от листов на гильотинных ножницах с их последующим фрезерованием. Испытания проводились на разрывных машинах LFMZ и LFM, откалиброванных по стандартам EN-ISO 7500-1, ISO EN 9513, с высокотемпературными печами STE-12 Н/1350С, с точностью регулирования температуры $\pm 2^\circ\text{C}$. Расчет прочности и пластичности проводился в автоматическом режиме.

Замер микротвердости проводили по ГОСТ 2999-75. Исследования проводили на установке LEICA MHT-10 при нагрузке 100г. Расчет микротвердости проходило в автоматическом режиме.

Определение остаточных напряжений проводилось механически по методу высвобождения деформации на измерительно-вычислительном комплексе МерКулОн «Тензор-3» при непрерывном травлении металла с исследуемой поверхности образцов в условиях постоянства скорости травления и автоматическом расчете результатов исследования в реальном масштабе времени.

Металлографические исследования были проведены на оптическом микроскопе LEICA MD IRM и электронном растровом микроскопе JEOL JSM 5600 в первичных и обратноотраженных электронах при различных увеличениях, а также с использованием микрорентгеноспектрального анализа микроструктуры.

Параметры решетки твердого раствора и частиц нитрида титана определяли на дифрактометре ДРОН-6 рентгенографическим методом.

Для определения элементного состава покрытия проводили микрорентгеноспектральный анализ на приборе Camebax.

Исследование свариваемости проводили с помощью электронно-лучевой сварочной установки ЭЛУ-20 с использованием электрического блока БЭП-60/15к с прямонакальной пушкой ЭПК-60/30 в вакууме; волоконного иттербиевого лазера ЛС-5 в автоматическом режиме без присадочного материала в среде защитного газа; автоматической аргоно-дуговой сварки с присадочной проволокой ЭП533, а также ручной аргоно-дуговой сварки. Сварка проводилась в

форме проплава образца (холостой шов) и с использованием технологических подкладок.

Третья глава посвящена исследованию структурных изменений в жаропрочных никелевых сплавах при воздействии газовой среды. Для оценки влияния газовой среды на состояние поверхностного слоя деталей из сплавов ЖС6У, ВЖЛ12У, ЖС6ФНК, ХН60ВТ проводили насыщение образцов из указанных сплавов алюминием и хромом в вакууме в порошковой смеси, содержащей 40% Cr, 8% Al, Al_2O_3 – остальное, при температуре 1200°C в течение 1ч 20мин. Образцы из сплава ХН60ВТ оставались без покрытия. Хромоалитирование проводили в печи СЭВ 5,5/11,5И2. Затем образцы с покрытием и без покрытия загружали в трубчатую печь и нагревали до температуры 1050°C в течение 30 часов. Для сравнения эксперименты проводили в вакууме, в токе воздуха и в токе азота. Часть образцов из сплавов ЖС6У, ЖС6ФНК и ВЖЛ12У нагревались в состоянии без покрытия. Установлено, что химический состав сплавов оказывает существенное влияние на степень азотирования как на сплавах с покрытием, так и без покрытия (рис.1).

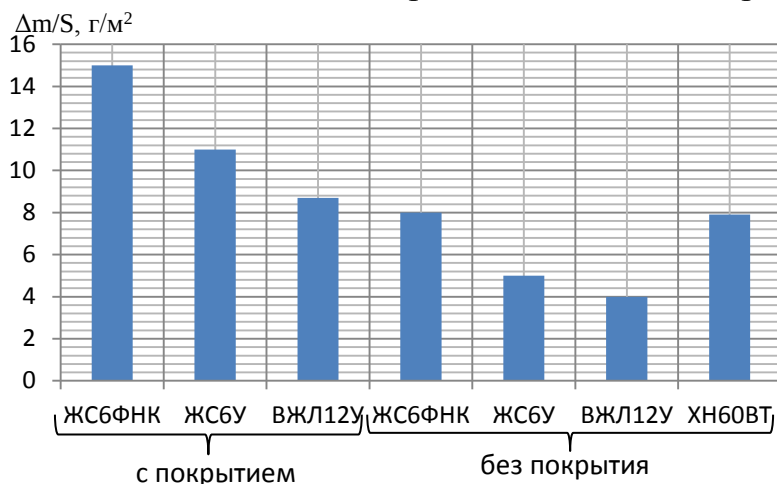


Рис. 1. Влияние химического состава на степень азотирования сплавов при температуре 1050°C в течение 30ч

С увеличением содержания элементов, образующих нитриды степень азотирования возрастает. Это отражается и на кинетических характеристиках процесса (рис.2, 3).

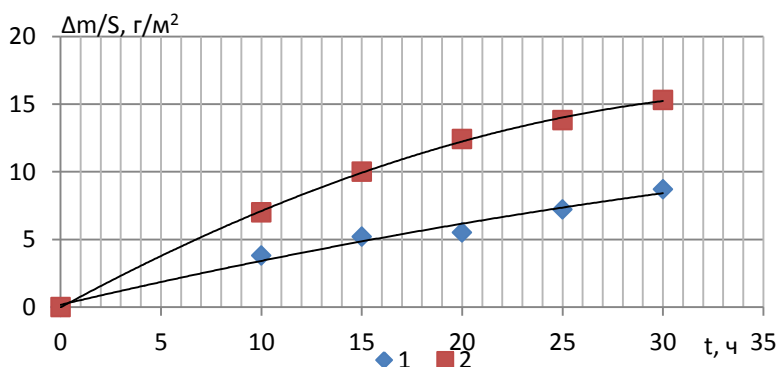


Рис. 2. Изменение удельной массы ($\frac{\Delta m}{S}$) сплавов ВЖЛ12У (1) и ЖС6ФНК (2) с покрытием NiCrAl при температуре азотирования 1050°C

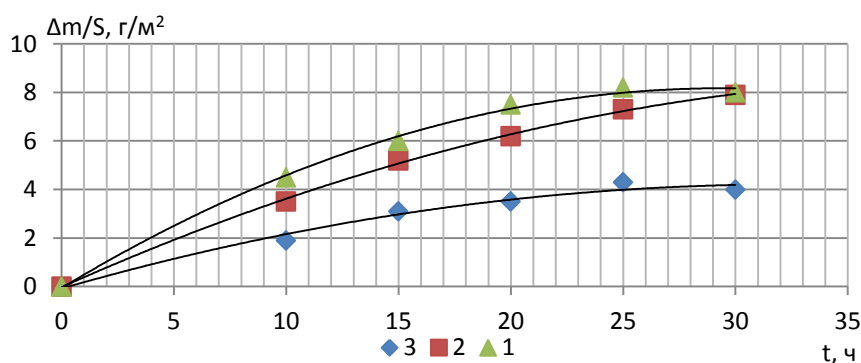


Рис. 3. Изменение удельной массы ($\frac{\Delta m}{S}$) образцов без покрытия из сплавов ЖС6ФНК (1), ХН60ВТ (2), ВЖЛ12У (3) при температуре азотирования 1050°C

Как видно из рис. 2, 3 отсутствие алюминидного покрытия на сплавах существенно уменьшает скорость насыщения азотом. Так, например, у сплава ЖС6ФНК константа скорости азотирования при отсутствии покрытия составляет $0,82 \frac{\text{г}^2}{\text{м}^4 \cdot \text{ч}}$, а с покрытием $3,2 \frac{\text{г}^2}{\text{м}^4 \cdot \text{ч}}$. Поэтому следует отметить роль алюминия в поверхностном слое покрытия. При содержании алюминия примерно 24-26% в слое покрытия, скорость насыщения азотом существенно возрастает. Непокрытые образцы насыщаются азотом значительно медленнее. Это хорошо согласуется с теорией активности элементов к азоту.

В сплаве нитриды образуются, прежде всего, на границах зерен (рис.4). Механизм формирования устойчивых частиц нитридов в сплавах с покрытием протекает с образованием направленных игольчатых структур (рис. 5).

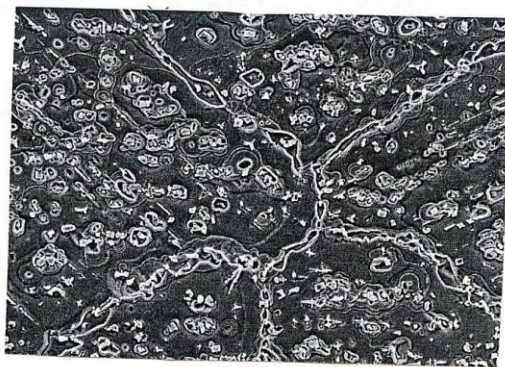


Рис. 4. Структура сплава ХН60ВТ+Со+Тi после азотирования при температуре 1200°C в течение 30 часов (x1000)



Рис. 5. Структура хромоалитированного покрытия на сплаве ЧС88У после окисления на воздухе при температуре 1050°C в течении 50 часов (x500)

Анализ алитированных лопаток турбины двигателя после 250 часов эксплуатации показал, что азот неравномерно распределяется по глубине слоя. Максимальное содержание азота наблюдается во внешней зоне покрытия, представленной фазой β -NiAl (рис.6). Углерод содержится главным образом в отложениях нагара на поверхности покрытия, а кислород в оксидной пленке на основе Al_2O_3 .

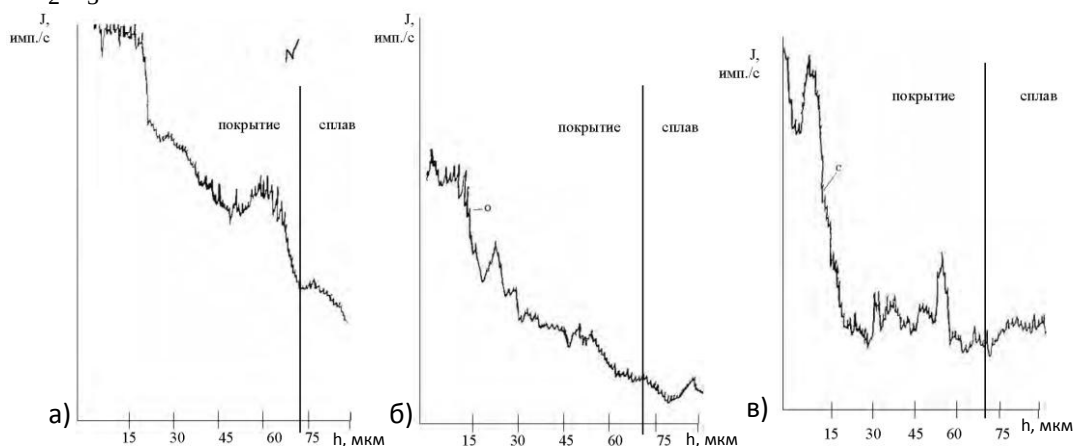


Рис. 6. Интенсивность (J) распределения N (а), О (б), С (в) по глубине слоя алуминидного покрытия на лопатке турбины двигателя Р29-300 (наработка 250 часов, сплав ВЖЛ12У)

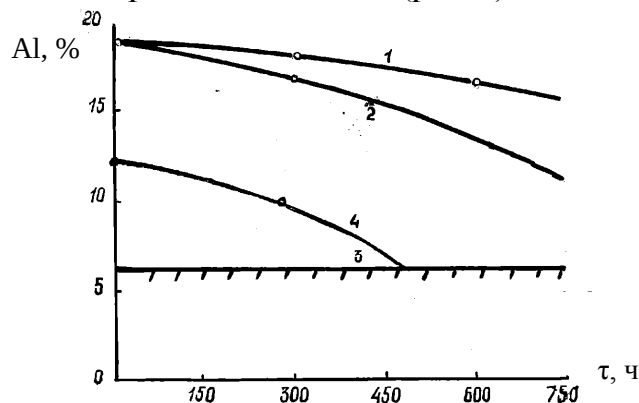
При нагреве в вакууме образцов с покрытием игольчатые фазы не образуются (рис.7).



Рис. 7. Структура сплава ЖС6ФНК с покрытием системы NiCrAl после вакуумного отжига при температуре 1050°C в течении 30 часов (x500)

В азоте при температуре 1050°C игольчатые структуры под покрытием образуются через 8-10 часов, а на воздухе через 70-80 часов.

В связи с тем, что при эксплуатации деталей с алюминидными покрытиями содержание алюминия уменьшается (рис.8), так как алюминий в основном расходуется на формирование защитной оксидной пленки, то одновременно снижается и скорость азотирования деталей (рис.9).



1 – порошковое покрытие системы NiCrAl, окисление 1100°C; 2 – порошковое покрытие системы NiCrAl, испытания на ГТУ; 3 – уровень Al в сплаве; 4 – напыленное покрытие системы NiCrAl, испытания на ГТУ

Рис. 8. Кинетика изменения содержания алюминия в покрытиях на сплаве ЖС6У

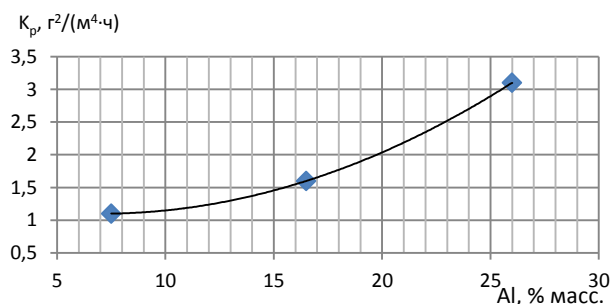


Рис. 9. Влияние содержания алюминия в алюминидном покрытии NiCrAl на константу скорости азотирования сплава ЖС6ФНК при температуре 1050°C в токе молекулярного азота

Поскольку содержание алюминия в покрытии по мере наработки на газотурбинных двигателях снижается, то легко понять причину уменьшения скорости насыщения поверхностного слоя сплавов азотом по мере выработки ресурса покрытиями.

Изменение константы скорости азотирования K_p сплава ЖС6ФНК с алюминидным покрытием можно описать следующим уравнением:

$$K_p = K_{p0} + a \cdot \text{Al}_{\text{п}}^n, \quad (2)$$

где K_{p0} – константа скорости азотирования сплава,

$\text{Al}_{\text{п}}$ – содержание алюминия в покрытии,

n – показатель степени,

a – коэффициент.

Кинетическая зависимость будет выглядеть следующим образом:

$$K_p = K_{p0} + a \cdot (Al_0 - k \cdot \sqrt{\tau}). \quad (3)$$

Наличие алюминидного покрытия на поверхности сплавов способствует созданию повышенного градиента концентрации азота в поверхностном слое, который является движущей силой диффузионного процесса. При уменьшении расстояний между атомами, по которым осуществляются «перескакивание» атомов азота, в кристаллической решетке фазы β -NiAl происходит уменьшение диффузионной подвижности атомов азота и уменьшение градиента концентрации азота в поверхностном слое.

Таким образом, установлено, что алюминий в покрытиях фактически является ускорителем азотирования, причем скорость насыщения деталей азотом по мере роста наработки высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей значительно уменьшается.

Четвертая глава посвящена отработке технологии упрочнения деталей нитридами легирующих элементов. Для этого использовали сплав ХН60ВТ (ВЖ98) – сплав №1 и сплав №2, в который дополнительно вводили кобальт для улучшения пластичности и титан для увеличения объемного содержания частиц нитрида TiN и повышения эффективности упрочнения.

В таблицах 1 и 2 представлены результаты испытаний образцов из листа толщиной 0,8мм.

Таблица 1

Механические свойства сплава № 2 при температуре 20, 1000, 1200°C (лист 0,8мм)

Объект исследования	Направление волокна	Т исп., °C	Механические свойства			
			$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %
лист из сплава № 2	продольное	20	733,6	1192,7	43,5	34,4
			738,0	1183,7	42,4	35,5
		1000	104,7	108,8	165,8	89,5
			109,1	113,8	166,7	92,8
		1200	40,4	44,7	57,7	39,8
			41,5	44,8	54,6	35,6
лист из сплава № 2	поперечное	20	721,5	1150,6	42,9	43,5
			709,7	1146,9	44,1	38,8
		1000	112,2	116,4	143,4	84,9
		1200	41,9	46,6	57,4	35,4

Таблица 2

Длительная прочность сплава № 2 (лист 0,8мм)

Объект исследования	Направление волокна	Длительная прочность		
		Т исп., °C	Напряжение, МПа	Кол-во час
лист из сплава № 2	продольное	1000	64	0-19 сломался 0-20 сломался
	поперечное	1000	64	0-20 сломался

У полученного материала, до азотирования, предел прочности при 1000°C на порядок меньше комнатного значения σ_B , а длительная прочность при температуре 1000°C и нагрузке 64МПа близка к нулевому уровню. После проведе-

ния азотирования предел прочности σ_b и предел текучести $\sigma_{0,2}$ увеличились в два раза, а также увеличилась длительная прочность (табл.3, 4).

Таблица 3

Результаты механических испытаний образцов сплавов № 1 и № 2 после азотирования

Объект исследования	Т исп., °С	Механические свойства			
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %
лист из сплава № 1, толщ. 0,8мм	20	414,9	558,3	1,4	3,2
		427,1	602,7	2,2	3,6
	1000	169,8	193,7	38,3	33,0
		169,1	193,1	38,4	36,3
лист из сплава № 2, толщ. 0,8мм	20	626,1	946,1	3,6	9,6
		629,3	952,0	4,0	9,4
	1000	223,7	256,8	10,4	15,5
		234,7	259,9	9,8	14,6
	1200	88,5	102,7	27,9	24,2
		87,5	102,1	24,7	20,6
лист из сплава № 2, толщ. 1,0мм	20	602,5	913,2	6,1	9,9
	1000	224,5	250,5	8,4	13,2
		230,7	257,0	7,5	19,5
лист из сплава № 2, толщ. 1,5мм	20	522,3	800,1	7,7	10,3
	1000	199,2	218,2	20,6	21,0
лист из сплава № 2, толщ. 3,0мм	20	362,3	640,0	10,2	14,6
		377,6	653,2	10,5	13,6
	1000	182,2	191,6	13,3	12,9
		181,9	194,8	15,2	12,9

Таблица 4

Результаты испытаний длительной жаропрочности

Объект исследования	Длительная прочность		
	Т исп., °С	Напряжение, МПа	Кол-во час.
Образцы из сплава № 1, толщ. 0,8мм	1000	64	5-45
			5-56
Образцы из сплава № 2, толщ. 0,8мм	1000	64	133-40
			150-12
Образцы из сплава № 2, толщ. 1,5мм	1000	64	66-59
Образцы из сплава № 2, толщ. 3,0мм	1000	64	8-34
			22-38

Испытаниями на длительную жаропрочность сплава № 2 после азотирования при температуре 1200°C установлено, что длительная жаропрочность находится на уровне 17...19МПа (табл.6).

Таблица 6

Результаты испытаний на длительную жаропрочность

объект исследования	Длительная прочность		
	Т исп., °С	Напряжение, МПа	Кол-во час.
Образец толщиной 0,8мм	1200	12	186-00 сломался
		15	144-00 сломался
		23	17-09 сломался
			16-17 сломался
Образец толщиной 1,2мм	1200	23	22-21 сломался
			21-18 сломался
Образец толщиной 3,0мм	1200	23	12-02 сломался

Металлографическими исследованиями было установлено, что сквозное азотирование прошло только на листах толщиной 0,8мм и 1,0мм (рис.10...13).

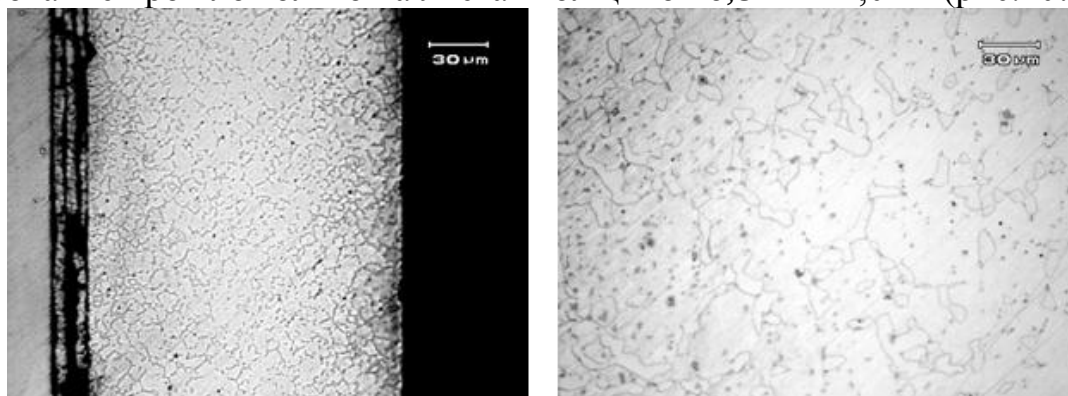


Рис. 10. Глубина азотированного слоя листа из сплава № 1, толщина листа 0,8мм (сквозное азотирование)

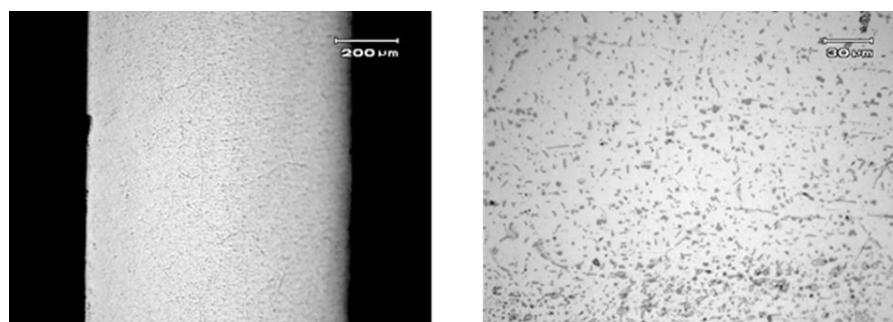


Рис. 11. Глубина азотированного слоя листа из сплава № 2, толщина листа 0,8мм (сквозное азотирование)

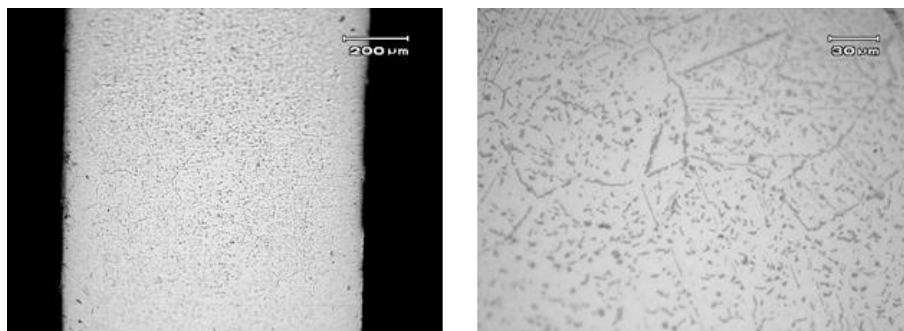


Рис. 12. Глубина азотированного слоя листа из сплава № 2, толщина листа 1,0мм (сквозное азотирование)

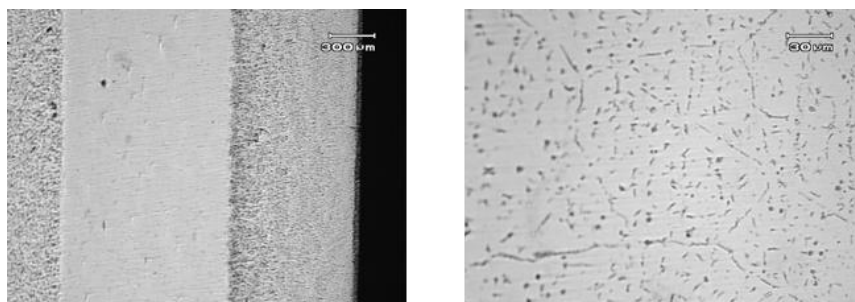


Рис. 13. Глубина азотированного слоя листа из сплава № 2, толщина листа 3,0мм (азотирование на глубину 0,9мм)

На глубину примерно до 45мкм распространяется зона мелкого зерна размером 10-12 шкалы ГОСТ 5639-82, в сердцевине – размером 3-5. Частицы нитридной фазы имеют пластинчатую и глобулярную формы: у поверхности концентрируются частицы пластинчатой формы, в сердцевине образцов частицы имеют в основном глобулярную форму. По результатам исследования была построена зависимость глубины азотированного слоя от толщины листов (рис.14).

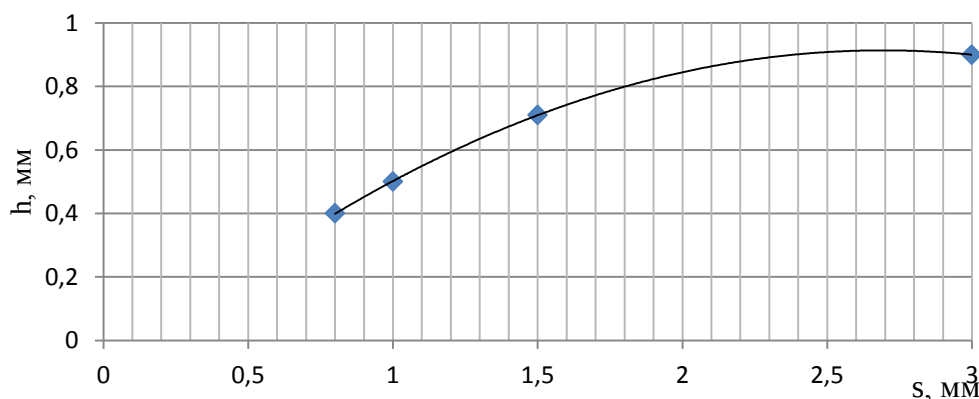


Рис. 14. Зависимость глубины азотированного слоя (h) от толщины листа (s)

Исследованиями остаточных напряжений (рис.15) установлено, что в процессе азотирования в поверхностном слое наводятся остаточные сжимающие напряжения, которые компенсируются растягивающими напряжениями в сердцевине пластины. Поскольку величина остаточных напряжений в толстых

пластинах (3,0мм) по сравнению с тонкими пластинами (0,8мм) составляет, соответственно, -614,5МПа и -83,75МПа, то плотность дефектов структуры сплава существенно возрастает в толстых пластинах в сравнении с тонкими. Такое явление способствует диффузии атомов азота в толстых пластинах на большую глубину.

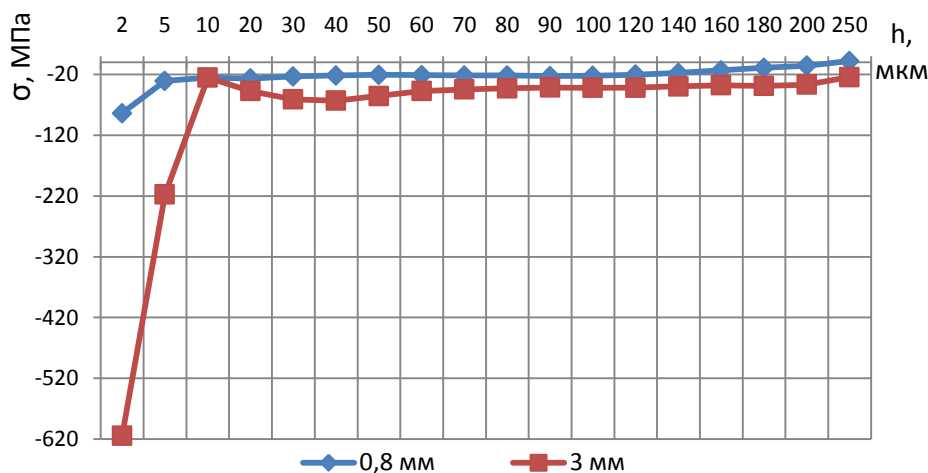


Рис. 15. Эпюра распределения средних остаточных напряжений в образцах из сплава № 2

Исследование микроструктуры азотированного листового материала № 2 после нанесения защитного алюмосилицидного покрытия (АС-1) показало, что технология алюмосилицирования не приводит к изменениям в микроструктуре сплава и может быть использована для повышения сопротивляемости газовой коррозии деталей при высоких температурах.

По результатам исследования свариваемости образцов из сплава № 2, были установлены режимы сварки при аргоно-дуговом, электронно-лучевом и лазерном способах. Показано, что отношение прочности сварного шва к прочности основного материала находится на уровне не менее 0,8 (табл.7), что свидетельствует об удовлетворительной свариваемости.

Таблица 7

Механические испытания сварных соединений

Объект исследования	Механические свойства				
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$K = \sigma_{0,2\text{св.с.}}/\sigma_{0,2\text{ом}}$	$K = \sigma_{B\text{св.с.}}/\sigma_{B\text{ом}}$
До азотирования					
Основной металл	725	1150	43	-	-
АрДЭС с присадкой ЭП533-ИД	587	998,7	17,2	0,81	0,87
После азотирования					
Основной металл	625	950	3,6	-	-
ААрДЭС с присадкой ЭП533-ИД	614	768	1,2	0,99	0,81
АрДЭС с присадкой	552	835	2,6	0,89	0,88

ЭП533-ИД	546	865	2,0	0,88	0,91
	611	870	2,1	0,98	0,92

В пятой главе исследованы характеристики жаростойкости сплава № 2 при изотермическом окислении при температурах 1050°C и 1200°C, которые получены на образцах в следующих состояниях: до азотирования; в азотированном состоянии; в азотированном состоянии с защитным покрытием.

Объёмное азотирование уменьшает глубину коррозионных повреждений, а применение алюмосилицидного покрытия практически исключает повреждение сплава в течение 100 ч окисления при температурах 1050°C и 1200°C (рис.16...18).

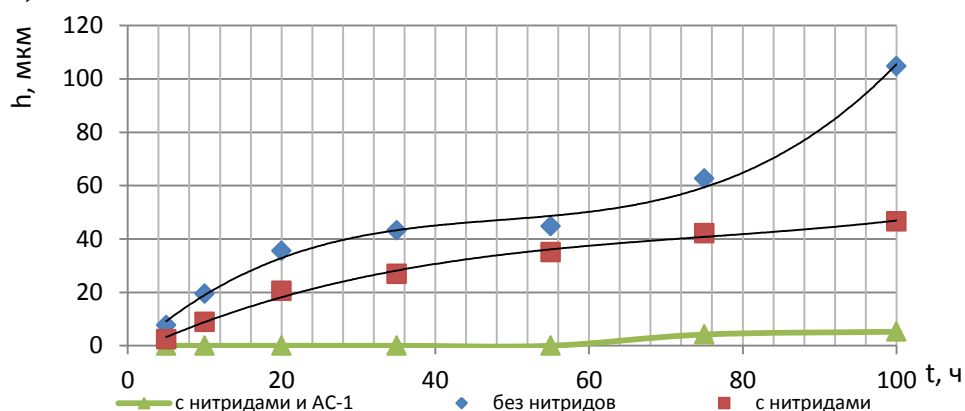


Рис. 16. Изменение глубины коррозионного повреждения (h) поверхностного слоя образцов от времени (t) при температуре испытания 1050°C

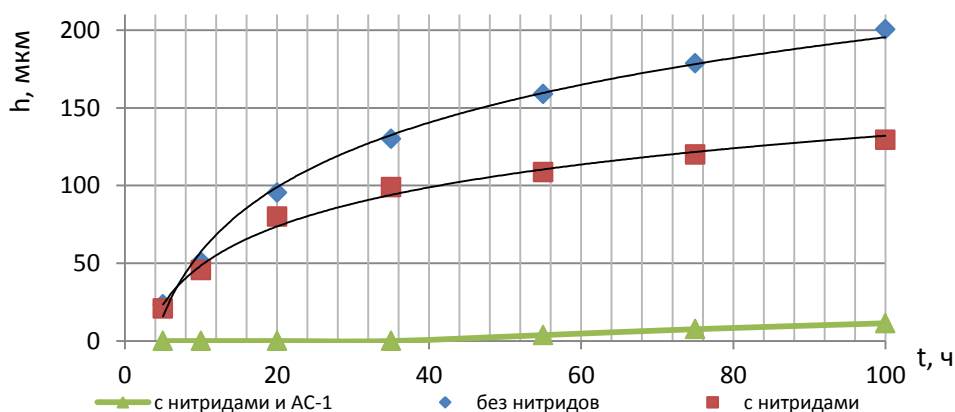
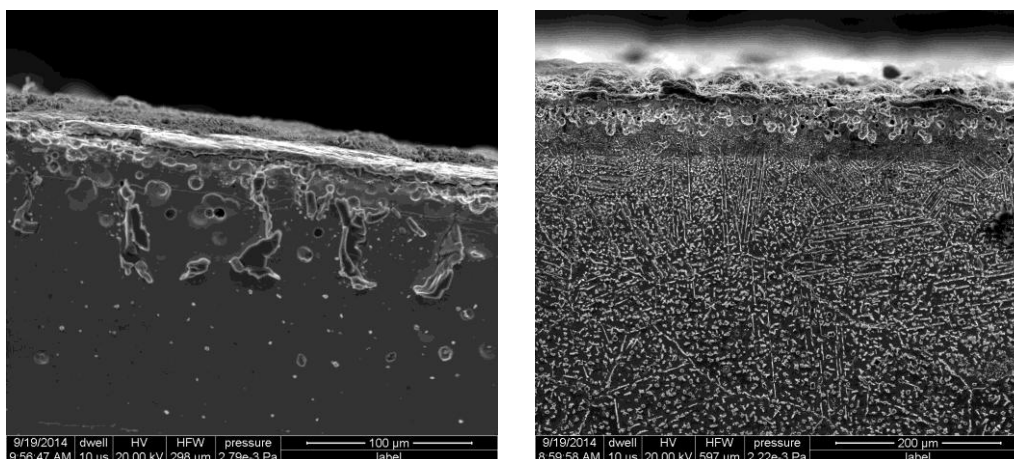


Рис. 17. Изменение глубины коррозионного повреждения (h) поверхностного слоя образцов от времени (t) при температуре испытания 1200°C



а) до азотирования (x500)

б) после азотирования (x250)

Рис. 18. Изменение глубины коррозионного повреждения поверхностного слоя образцов из сплава № 2 после изотермического окисления на воздухе при температуре 1200°C в течение 35 ч

По результатам исследований предложен механизм окисления с использованием новых данных по кинетическим кривым.

Установлено, что определяющим фактором в механизме повышения жаростойкости сплава при высоких температурах является поведение Cr, Co, Ni, Ti, минимальное окисление которых может быть достигнуто за счёт образования нитридов легирующих элементов и нанесения защитного покрытия.

Шестая глава посвящена разработке способа изготовления опытных деталей реактивного сопла и форсажной камеры на серийном оборудовании АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» с применением объёмного азотирования.

Внешний вид изготовленных деталей приведен на рисунке 19.



а) экран

б) экран

в) стойка

Рис. 19. Внешний вид изготовленных деталей

После проведения операции внутреннего азотирования, изготовленные детали были переданы на стендовые испытания.

Седьмая глава посвящена промышленной апробации деталей ГТД из сплава № 2 с нитридным упрочнением (стойки и экраны) стендовыми испытаниями в составе серийного двигателя АЛ31Ф.

Проведенные испытания подтвердили эффективность применения сплавов с нитридным упрочнением в конструкции перспективного двигателя.

Общие выводы

1. Установлено влияние химического состава и наличия защитного покрытия на скорость и степень азотирования. Выявлено, что алюминий в покрытиях фактически является ускорителем азотирования, причем скорость насыщения деталей азотом по мере роста наработки высокотемпературных деталей значительно уменьшается. В связи с этим рекомендовано процесс упрочнения нитридами легирующих элементов проводить после предварительного алитирования (хромоалитирования, алюмосилицирования) деталей.

2. Установлены, что нитриды легирующих элементов повышают долговечность сплава ХН60ВТ+Со+Ті при высокотемпературном окислении: без покрытия при температуре 1050°С почти на порядок, а при температуре 1200°С с алюмосилицидным покрытием почти в тридцать раз. Определяющим фактором в механизме повышения жаростойкости сплава при высоких температурах является образование нитридов титана TiN, хрома Cr₂N, CrN, которые тормозят диффузию элементов на границу с газовой средой.

3. Объемное азотирование сплава ХН60ВТ+Со+Ті почти в два раза повышает временное сопротивление σ_B^{1000} и условный предел текучести $\sigma_{0,2}^{1000}$, а долговечность при нагрузке 64 МПа с 0,5 ч до 100 ч. При температуре 1200°С объемное азотирование сплава обеспечивает длительную прочность $\sigma_{100}^{1200} = 17...19$ МПа.

4. Установлено, что в процессе азотирования сквозное насыщение азотом прошло только в листах толщиной 0,8 мм и 1,0 мм. По полученным результатам построены зависимости глубины азотированного слоя от толщины листа сплава. Установлено, что в азотированном слое наводятся остаточные сжимающие напряжения, которые способствуют диффузии атомов азота в толстых пластинах на большую глубину.

5. Установлено, что сплав ХН60ВТ, дополнительно легированный кобальтом и титаном, до азотирования удовлетворительно сваривается способами электронно-лучевой, лазерной и аргоно-дуговой сварки. Отработаны режимы сварки деталей. Сплавы с нитридным упрочнением имеют ограничения по свариваемости лазерной и электронно-лучевой методами сварки. Для сварки сплавов с нитридным упрочнением целесообразнее применять аргоно-дуговую сварку.

6. Разработан способ изготовления трех промышленных типов деталей сопла и форсажной камеры перспективного авиационного двигателя пятого поколения из сплава с дисперсным упрочнением нитридами легирующих элементов и проведены натурные испытания в составе двигателя АЛ31Ф, которые подтвердили высокую работоспособность деталей в условиях воздействия высоких температур и нагрузок.

Основные результаты работы представлены в публикациях:

- статьи в рецензируемых научных журналах:

1. Щербаков С.И. Исследование свариваемости сплава с нитридным упрочнением / С.И. Щербаков, А.С. Ромашов, Г.А. Фарнасов // Электromеталлургия. – 2014. – №8. – С. 24-27.
2. Абраимов Н.В. Влияние газовой среды на строение и свойства жаропрочных никелевых сплавов применяемых в газотурбинных двигателях / Н.В. Абраимов, А.М. Терехин, А.С. Ромашов // Электromеталлургия. – 2015. - №7. – С.35-42.
3. Ромашов А.С. Влияние азотирования на структуру и механические свойства жаростойких никелевых сплавов / А.С. Ромашов, Ю.О. Кабылина, Г.А. Фарнасов // Коррозия: материалы, защита. – 2015. – №7. – С. 35-38.
- статьи в других изданиях:
4. Быков Ю.Г. Применение нового жаропрочного сплава ВЖ171 в конструкции перспективного двигателя / Ю.Г. Быков, С.В. Овсепян, И.С. Мазалов, А.С. Ромашов // Вестник двигателестроения. Научно-технический журнал. Запорожье: АО «Мотор Сич». – 2012. – №2 (27). – С. 246-250.
5. Докашев В.В. Оценка возможности сварки нового жаропрочного сплава ВЖ171 методом электронно-лучевой сварки / В.В. Докашев, А.С. Ромашов, Е.О. Фомичев, А.А. Жигунов // Наука – производству. Научно-технический сборник. - Уфа: Из-во «Вагант», 2013. – №8. – С. 121-126.
6. Мубояджян С.А. Исследование жаростойкости нового свариваемого сплава ВЖ171 с антиокислительными покрытиями / С.А. Мубояджян, Е.Н. Азаровский, А.С. Ромашов, Ю.Г. Быков // Наука и технологии. Сборник научных трудов. – М.: РАН, 2013. – С . 28-30.