

На правах рукописи



ЗОЛОТАРЕВА Анна Юрьевна

**МНОГОСЛОЙНЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОКРЫТИЯ
ДЛЯ ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ И
ТЕХНОЛОГИИ ИХ НАНЕСЕНИЯ**

Специальность: 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные
материалы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в лаборатории «Функциональных покрытий» филиала АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» «Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей» и на кафедре «Материаловедение и технология обработки материалов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Абраимов Николай Васильевич

– доктор технических наук, профессор
Скворцова Светлана Владимировна

Официальные оппоненты: – **Логачёва Алла Игоревна**
доктор технических наук, АО «Композит», начальник
отделения металлических материалов и металлургических
технологий

– **Кудря Александр Викторович**
доктор технических наук, профессор, ФГБАУ ВО
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС», профессор кафедры
металловедения и физики прочности

Ведущая организация: – федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт металлургии и материаловедения им.
А.А. Байкова Российской академии наук

Защита диссертации состоится 12 декабря 2019 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.15 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой С.В. и по электронной почте skvorcovasv@mati.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте <https://mai.ru/upload/iblock/1dc/Dissertatsiya-Zolotareva-A.YU..pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
доктор технических наук

Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Повышение эффективности и надёжности элементов турбины и компрессора авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) при необходимости снижения удельной массы двигателей и повышения их экономичности представляет одну из актуальных проблем современного двигателестроения.

Применение титановых сплавов вместо сталей и никелевых сплавов в авиастроении позволяет существенно уменьшить массу конструктивных элементов и узлов, однако, в настоящее время традиционные жаропрочные α - и $(\alpha+\beta)$ -титановые сплавы не могут удовлетворить требованиям 30%-ого снижения удельной массы конструкции в связи с ограничением максимально допустимой температуры нагрева в процессе эксплуатации перспективных ГТД. Создание новых технологий стало приоритетным направлением при разработке двигателей с высокими характеристиками эксплуатационной надёжности. Технологии изготовления лопаток компрессора и турбины оказывают решающее влияние на надёжность и ресурс ГТД.

Разработка высокотемпературных покрытий тесно связана с разработкой новых жаропрочных сплавов. Интерметаллиды титана на основе систем Ti-Al и Ti-Al-Nb являются одними из самых перспективных материалов, превосходящих по многим своим свойствам сплавы на основе никеля. Их применение для лопаток компрессора высокого давления (КВД) и турбины низкого давления (ТНД) позволит существенно снизить массу конструкции двигателя и повысить рабочую температуру деталей из титановых сплавов до 650-700°C. Поскольку титановые интерметаллидные сплавы обладают недостаточной стойкостью к высокотемпературному окислению, для обеспечения заданного ресурса необходима разработка эффективных защитных покрытий. Этот фактор определяет высокую актуальность выполненной работы.

Не менее актуальной проблемой является обеспечение надёжности и долговечности лопаток ротора турбины высокого давления (ТВД) из жаропрочных никелевых сплавов, которые нередко оказывают решающее влияние на ресурс ГТД.

Стойкость к окислению роторных лопаток из современных никелевых жаропрочных сплавов недостаточна, поскольку их состав и структура оптимизированы, прежде всего, из условия достижения максимальной жаропрочности как путём введения тугоплавких элементов (Ta, W, Mo, Nb, Re, Ru), так и путём увеличения объёмного содержания упрочняющей γ' -фазы. Для предотвращения разрушения лопаток ТВД газовой коррозией широко применяются жаростойкие защитные покрытия. В особо сложных условиях эксплуатации работают лопатки ТВД, конструкция которых содержит бандажные полки, работающие при одновременном воздействии виброударных нагрузок и фреттинг-коррозии. Повреждение бандажных полок является одним из факторов, ограничивающих ресурс двигателей.

Для защиты от износа контактирующих поверхностей бандажных полок лопаток газовых турбин разработано достаточно большое количество износостойких сплавов, например, сплавы на основе кобальта системы «твёрдый раствор кобальта + карбиды», сплавы на никелевой основе системы γ/γ' . Сплавы на основе интерметаллида Ni_3Al обладают повышенной рабочей температурой, причём при температуре 1100-1150°C их износостойкость выше, чем у традиционных износостойких сплавов. При эксплуатации, помимо высокотемпературного разрушения покрытия, происходит разрушение основного металла контактных поверхностей бандажных полок, что приводит к изменению их геометрических размеров, поэтому весьма актуальна проблема своевременного восстановления геометрических размеров бандажных полок наплавкой жаростойких и жаропрочных материалов с последующим восстановлением износостойкого покрытия. При этом традиционно применяемая в серийном производстве напайка, предполагающая нагрев всей детали практически до температуры гомогенизации сплава, при ремонте может привести к рекристаллизации замков лопаток, снижению характеристик жаропрочности сплавов, а также жаростойкости покрытий, нанесённых при серийном производстве лопаток.

В связи с большой стоимостью авиационных ГТД решению проблемы увеличения их долговечности придаётся очень большое значение. Актуальность диссертации подтверждается и тем, что основные исследования проводились в рамках решений, включающих: ежегодные Послания Президента РФ по федеральным целевым программам; «Приоритетные

направления развития науки и техники РФ»; «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2007-2010 годы и на период до 2015 года»; «Развитие национальной технической базы на 2007-2011 гг.»; «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002-2010 годы и на период до 2015 года». Выполненные исследования соответствуют научно-прикладным задачам, решаемым Акционерным Обществом «Объединенная Двигателестроительная Корпорация».

Цель работы:

Создание и исследование многослойных жаростойких покрытий для защиты лопаток турбины и компрессора авиационных ГТД, восстановление их геометрических размеров при ремонте и исследование их структуры и свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие научные задачи:

1. Разработать жаростойкое покрытие для деталей из интерметаллидных орто- и γ -TiAl сплавов.
2. Исследовать физико-химические и механические свойства разработанного защитного покрытия на интерметаллидных титановых орто- и γ -TiAl сплавах.
3. Разработать способ восстановления геометрических размеров и износостойких покрытий бандажных полок лопаток ротора ТВД из жаропрочного никелевого сплава ЖС26 при ремонте.
4. Разработать способ нанесения интерметаллидного износостойкого покрытия ВКНА-2М на бандажные полки лопаток ротора ТВД из жаропрочного никелевого сплава ЖС26.

Научная новизна

1. Разработано новое высокотемпературное двухслойное покрытие для лопаток компрессора и турбины из интерметаллидных титановых сплавов. Показано, что в покрытии Ni – 20%Cr – 12%Al – 0,3%Y происходит формирование алюминий содержащих фаз TiAl₃, Ni₃Al и NiAl, которые обеспечивают длительную защиту деталей от высокотемпературного окисления при температуре 700°C. Покрытие Al – 0,6%Si играет роль диффузионного барьера, образующиеся в нем фазы TiAl₃, TiSi₂ и Ti₅Si₃ тормозят диффузию титана к границе раздела с газовой средой и исключают формирование оксидов титана на поверхности покрытия.

2. Установлено, что на стойкость к окислению сплавов на основе интерметаллидов титана существенное влияние оказывает последовательность нанесения слоев покрытия. При нанесении верхним слоем Al – 0,6%Si в процессе изотермической выдержки при 700°C происходит образование оксида алюминия, приводящего к разрушению покрытия.

3. Установлено, что для восстановления геометрических размеров бандажных полок лопаток турбин из сплава ЖС26 необходимо использовать никелевый сплав X20H80-N, имеющий коэффициент линейного расширения в 1,5 раза превосходящий коэффициент линейного расширения основного материала, что исключает появление трещин при последующем нанесении износостойкого и жаростойкого покрытий.

4. Установлено, что при газовом хромировании лопаток турбин из сплава ЖС26 с наплавкой интерметаллида ВКНА-2М происходит восстановление никеля из молекул дихлорида NiCl₂ алюминием из наплавки, что сопровождается образованием пористости.

Практическая значимость

1. Разработано новое защитное покрытие и способ его нанесения на лопатки КВД и ТНД из интерметаллидных титановых сплавов. Двухслойное покрытие позволяет на три порядка повысить стойкость к высокотемпературному окислению деталей перспективных ГТД при температуре эксплуатации до 700°C.

2. Разработан способ восстановления геометрических размеров и защитных покрытий на бандажных полках лопаток ротора ТВД, который реализован на производственном комплексе «Салют» АО «ОДК» на партии лопаток при ремонте.

3. Разработан способ наплавки износостойкого высокотемпературного покрытия из интерметаллида на основе никеля ВКНА-2М, который рекомендован для контактных поверхностей бандажных полок лопаток ротора турбины высокотемпературных ГТД.

4. Разработанные технологии внедрены в опытно-промышленном производстве на производственном комплексе «Салют» АО «ОДК», что подтверждено соответствующим актом.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования нового двухслойного жаростойкого покрытия системы (Al-Si)+(Ni-Cr-Al-Y) в условиях высокотемпературного окисления при температурах 650 и 700°C в течение 500 часов и обоснование его применения для интерметаллидных титановых сплавов.

2. Результаты оценки физико-химических и механических свойств двухслойного покрытия на интерметаллидном титановом сплаве ВИТ1.

3. Сравнительные результаты оценки качества наплавки сплавов ЖС32, ЖС26 и Х20Н80-Н при восстановлении геометрических размеров бандажных полок ГТД с последующей наплавкой износостойкого сплава СМ64 для работы на второй ресурс ГТД.

4. Результаты исследования качества износостойкого покрытия интерметаллидного сплава ВКНА-2М на лопатках ротора турбин из сплава ЖС26.

Личный вклад автора заключается в самостоятельно выполненном анализе состояния вопроса по теме диссертации, формулировании цели и задач работы, проведении экспериментальных исследований, анализе и обобщении полученных данных, формировании выводов, полученных в результате выполнения работы.

Степень достоверности результатов определяется использованием современного сертифицированного оборудования, аттестованного по международным стандартам, применением комплекса современных методов исследования и паспортизированных материалов.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 научных конференциях, проводимых в ПК «Салют» АО «ОДК», ФГУП «ВИАМ», ФГУП «ЦИАМ им. Баранова», ЦВК «Экспоцентр» в 2018-2019 гг., а также на 22-ом международном салоне «Архимед-2019», проведенном в КВЦ «Сокольники».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ в журналах, входящих в перечень ВАК, две из которых были переведены на английский язык и опубликованы в изданиях, индексируемых Scopus, 1 патент на изобретение. Перечень работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 143 страницах, содержит 90 рисунков, 22 таблицы. Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы из 103 наименований и одного приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ состояния исследований жаропрочных сплавов и защитных покрытий лопаток компрессора и турбины современных газотурбинных двигателей

В главе рассмотрены основные свойства интерметаллидных титановых сплавов α_2 -Ti₃Al, γ -TiAl, Ti₂NbAl и способы их производства, а также проведён анализ существующих способов их защиты от газовой коррозии. Установлено, что интерметаллидные титановые сплавы могут успешно заменить никелевые сплавы, в частности лопатки компрессора высокого давления и лопатки последней ступени турбины, работающие при температурах не выше 850°C, однако для интерметаллидных титановых сплавов такие температуры являются высокими, и для защиты от высокотемпературного окисления необходимы надежные жаростойкие покрытия, поскольку от их надёжности зависит ресурс всего газотурбинного двигателя в целом. Отмечено, что среди всех методов защиты интерметаллидных сплавов основными являются формирование жаростойких покрытий на никелевой и никель-кобальтовой основе, а также создание на поверхности сплава коррозионностойких оксидов алюминия, хрома и кремния, препятствующих проникновению кислорода в глубь материала.

Учитывая высокие контактные нагрузки и воздействие высоких температур на бандажные полки лопаток турбины при работе двигателей, отмечена необходимость обеспечения прочности и износостойкости покрытия на контактных поверхностях бандажных полок лопаток турбин ГТД. Повреждение бандажных полок является одним из факторов, ограничивающих ресурс двигателей. Дан анализ существующих покрытий для контактных поверхностей бандажных полок, обоснован выбор сплава типа ВКНА на основе интерметаллида γ' -Ni₃Al для наплавки, который в большей мере соответствует требованиям, предъявляемым к материалам, пригодным для ремонта лопаточных элементов современных двигателей.

Отмечена необходимость восстановления геометрических размеров лопатки и обоснован выбор исследуемых наплавляемых сплавов. При удалении изношенного слоя удаляется тонкий слой основного поврежденного металла лопатки, что сопровождается изменением геометрических размеров. Отмечено, что в настоящее время замене подвергают около 50% вышедших из строя лопаток с изношенными бандажными полками, у которых разрушение полок происходит более, чем на 0,5 мм. Восстановление геометрических размеров и износостойких покрытий бандажных полок позволит снизить эксплуатационные расходы и повысить ресурс работы лопаток.

На основе анализа литературных данных поставлена цель работы и сформулированы задачи исследований

Глава 2. Объекты и методы исследования

Исследования защитных покрытий Al-0,6%Si (ВСП-11Н) и Ni-20%Cr-12%Al-0,3%Y (СП-2) проводили на образцах из титановых сплавов, химический состав которых показан в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, %									
	Ti	Al	V	Mo	Ta	Si	Zr	Sn	W	Nb
ВИТ1	Осн.	11,8	-	0,5	1,4	0,22	2,1	-	0,8	41,0
BT-41	Осн.	6,2	-	1,3	-	0,36	3,4	4,1	0,5	1,1
BT8-M1	Осн.	5,8	-	1,97	Fe 0,37	0,22	0,3	-	-	-
TNM-B1	Осн.	37,9	3,9	1,97	Mn 0,15	0,32	1,3	0,26	1,99	5,14

Покрытие наносили электродуговым вакуумно-плазменным распылением на установке МАП-2.

МДО проводили на образцах из титанового сплава ВИТ1 в электролите, состоящем из KOH, Na₂SiO₃ и дистиллированной воды и из KOH, NaAlO₂ и дистиллированной воды.

Наплавку износостойких покрытий на бандажные полки лопаток турбины проводили на сплавы, химический состав которых показан в таблице 2, в среде аргона ручной сваркой электродами из сплавов, представленных в таблице 3.

Таблица 2 – Химический состав исследуемых сплавов под наплавку

Марка сплава	Содержание элементов, %											
	Ni	Cr	Al	Co	Mo	W	Ti	Nb	V	Ta	Re	C
ЖС26	Осн.	5,2	6,0	9,2	1,2	1,2	1,1	1,5	1,1	-	-	0,15
ЖС32	Осн.	5,5	6,2	9,0	1,2	9,0	-	1,6	-	4,0	4,0	0,16

Таблица 3 – Химический состав исследуемых сплавов под наплавку

Марка сплава	Содержание элементов, %													
	Ni	Cr	Al	Co	Mo	W	Ti	Nb	V	Ta	Re	C	Si	Zr
ВКНА-2М	Осн.	4,25	11,4	-	-	1,54	1,3	-	-	-	-	-	0,91	-
ЖС26	Осн.	5,2	6,0	9,2	1,2	1,2	1,1	1,5	1,1	-	-	0,15	-	-
ЖС32	Осн.	5,5	6,2	9,0	1,2	9,0	-	1,6	-	4,0	4,0	0,16	-	-
X20H80-H	Осн.	22,0	≤0,2	-	-	-	≤0,3	-	-	-	-	0,04	1,0	0,2
СМ64	5	20	-	Осн.	0,5	18,5	-	-	-	-	-	1,5	-	-

Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе GX-51. Исследование химического состава и структуры сплавов и покрытий проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV (Япония) с использованием энергодисперсионного спектрометра INCA-act (США) при напряжении 25 кВ с фоторегистрацией мест анализа.

Рентгеноструктурные исследования поверхностного слоя и окалины проводили на дифрактометре ДРОН-6 в Fe-K α (железном) излучении; щели перед образцом и детектором шириной по 1 мм; напряжение на рентгеновской трубке 25 кВ, ток 15 мА.

Для определения микротвердости использовали микротвердомер EMCO-TEST DuraScan 70 (Австрия).

Испытания на жаростойкость образцов и лопаток компрессора с покрытием ВСДП-11Н+СДП-2 и без покрытия проводили в печи СНОЛ на воздухе при температурах 650 и 700°C в течение 200 ч и 500 ч, а оценку жаростойкости лопаток турбины с износостойким покрытием проводили при температуре 1050°C.

Остаточные напряжения определяли методом Давиденкова на автоматизированном комплексе МерКулОН «Тензор-3» в унифицированном электролите для травления сплавов в управляемом режиме.

Оценку сопротивляемости покрытий растрескиванию при точечной нагрузке проводили на микротвердомере при нагрузке 5 кг на образцах из сплава ВИТ1 с двухстадийным покрытием ВСДП-11Н+СДП-2. Оценку сопротивляемости покрытий растрескиванию определяли по формуле:

$$A = 0,202 \cdot P \cdot d / \sum_{i=1}^n l_{i_{тр}},$$

где A – работа, Дж; $\sum l_{i_{тр}}$ – суммарная длина трещин, м; P – нагрузка, Н; d – диагональ отпечатка, м.

Определение шероховатости проводили бесконтактным методом на лазерном конфокальном микроскопе Olympus Lext 4000 (США) на образцах из сплава ВИТ1 после микродугового оксидирования.

Глава 3. Разработка способов нанесения защитных покрытий на жаропрочные титановые сплавы

Третья глава посвящена исследованию разработанного покрытия Al–0,6%Si (ВСДП-11Н) + Ni–20%Cr–12%Al–0,3%Y (СДП-2) для интерметаллидных титановых орто- и γ -TiAl-сплавов, а также для жаропрочных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов для защиты от высокотемпературного окисления. Рентгеноструктурным анализом установлено, что основными структурными составляющими поверхностного слоя покрытия ВСДП-11Н на сплавах ВТ-41, ВИТ1 и TNM-B1 являются $TiAl_3$, $TiSi_2$, Ti_5Si_3 . Покрытие ВСДП-11Н в двухслойном покрытии ВСДП-11Н+СДП-2 выполняет роль диффузионного барьера, препятствующего проникновению титана на границу с газовой средой и образованию оксидов титана на поверхности покрытия СДП-2. Установлено, что основными структурными составляющими поверхностного слоя двухслойного покрытия ВСДП-11Н+СДП-2 на сплавах ВИТ1, ВТ-41 и TNM-B1 являются фазы NiAl, Ni_3Al , $TiAl_3$, обеспечивающие защиту сплава от окисления при температурах 650 и 700°C.

Двухслойное покрытие позволяет на три порядка снизить скорость окисления сплава ВИТ1. Окисление сплава с покрытием происходит по закону, близкому к логарифмическому, константа скорости окисления покрытия после

50 ч и до 500 ч окисления равна $k_p=5,4 \cdot 10^{-3} \text{ г}^2/(\text{м}^4 \cdot \text{ч})$, тогда как скорость окисления сплава ВИТ1 составляет $0,72 \text{ г}^2/(\text{м}^4 \cdot \text{ч})$.

Установлено отсутствие значительных изменений в структуре и химическом составе покрытия ВСДП-11Н+СДП-2 на сплаве ВИТ1 при толщине слоя покрытия СДП-2 до 20 мкм и до 30 мкм после высокотемпературного окисления в течение 500 ч при температурах 700°C и 650°C. Микроструктура двухслойного покрытия и кинетика окисления сплава ВИТ1 с покрытием представлена на рисунке 1.

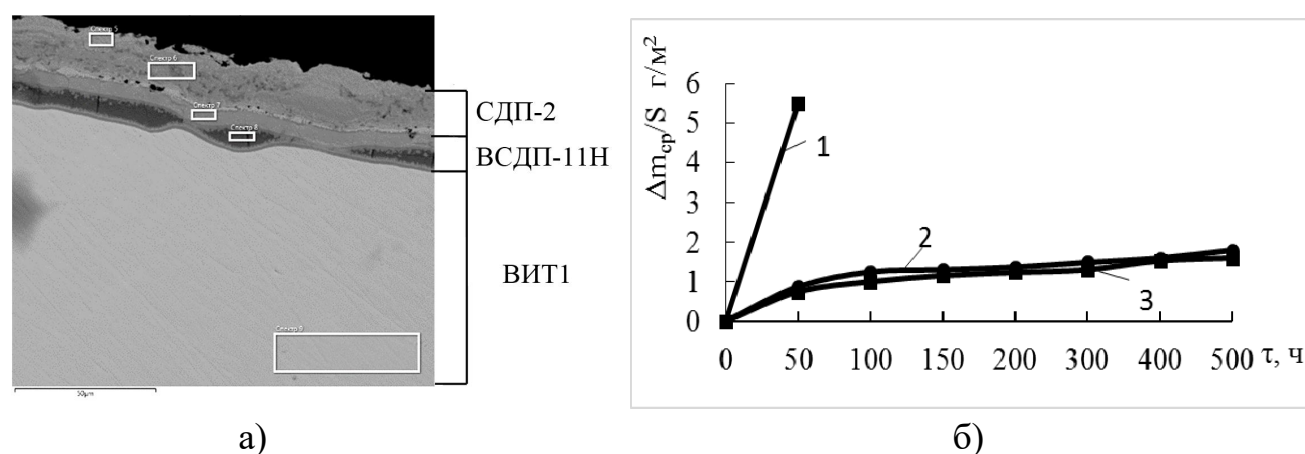


Рисунок 1 – Микроструктура двухслойного покрытия ВСДП-11Н+СДП-2 на сплаве ВИТ1 после окисления в течение 500 ч при температуре 700°C (а) и кинетика окисления сплава ВИТ1 без покрытия (1), сплава ВИТ1 с покрытием ВСДП-11Н+СДП-2 (толщина СДП-2 до 30 мкм) (2), сплава ВИТ1 с покрытием ВСДП-11Н+СДП-2 (толщина СДП-2 до 20 мм) (3) при температуре 700°C на воздухе

Установлено, что микроструктура покрытий и их защитные свойства на сплавах ВТ-41 и ВИТ1 существенно зависят от последовательности нанесения слоёв покрытий СДП-2 и ВСДП-11Н. Отмечено, что в двухслойном покрытии СДП-2+ВСДП-11Н наблюдается разрушение верхнего слоя покрытия при окислении при температуре 700°C. Показано, что уже после 100 ч изотермической выдержки происходит образование частиц оксида алюминия Al_2O_3 в слое ВСДП-11Н по всей глубине покрытия. Однако, на стадии формирования оксидной плёнки константа скорости окисления от 50 до 200 ч сравнительно невелика и составляет $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ г}^2/(\text{м}^4 \cdot \text{ч})$.

Отмечено, что при изотермической выдержке происходит рост диффузионной зоны между покрытиями ВСДП-11Н и СДП-2 до 6 мкм при изотермической выдержке при температуре 700°C, и до 3 мкм при

изотермической выдержке при температуре 650°C в течение 500 ч, при этом активного перемещения элементов между слоями покрытий ВСДП-11Н и СДП-2 не наблюдается.

Отмечена высокая стойкость к высокотемпературному окислению покрытия ВСДП-11Н+СДП-2 на сплаве TNM-B1, микроструктура которого и кинетика его окисления представлены на рисунке 2. Фазовый состав поверхностного слоя представляет собой алюминиды никеля и титана – NiAl, Ni₃Al, TiAl₃. Кинетика окисления имеет логарифмический характер, на установившейся стадии константа скорости окисления покрытия равна $k_p = 6 \cdot 10^{-5} \text{ г}^2/(\text{м}^4 \cdot \text{ч})$. После 50 ч изотермической выдержки преобладает фаза γ' -Ni₃Al, однако, с увеличением времени происходит увеличение содержания наиболее высокотемпературной фазы β -NiAl.

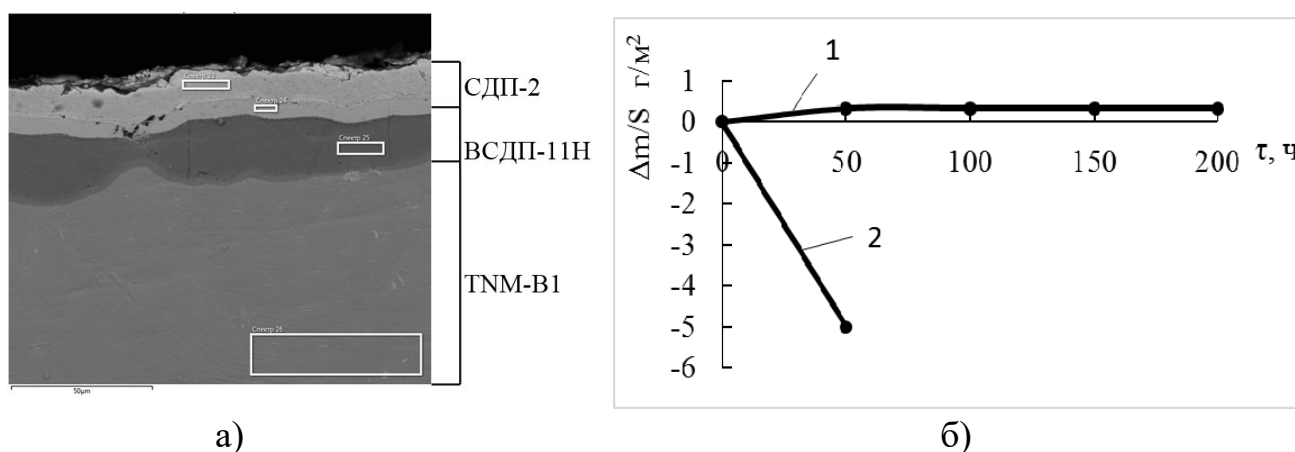


Рисунок 2 – Микроструктура двухслойного покрытия ВСДП-11Н+СДП-2 на сплаве TNM-B1 после окисления в течение 200 ч при температуре 700°C (а) и кинетика окисления сплава TNM-B1 с покрытием ВСДП-11Н+СДП-2 (1) и без покрытия (2) (б)

Проведенные по методу Давиденкова исследования напряжённого состояния покрытия ВСДП-11Н+СДП-2 на сплаве ВИТ1 показали, что в двухслойном покрытии формируются сжимающие остаточные напряжения, величина которых достигает 600-750 МПа. Распределение остаточных напряжений представлено на рисунке 3.

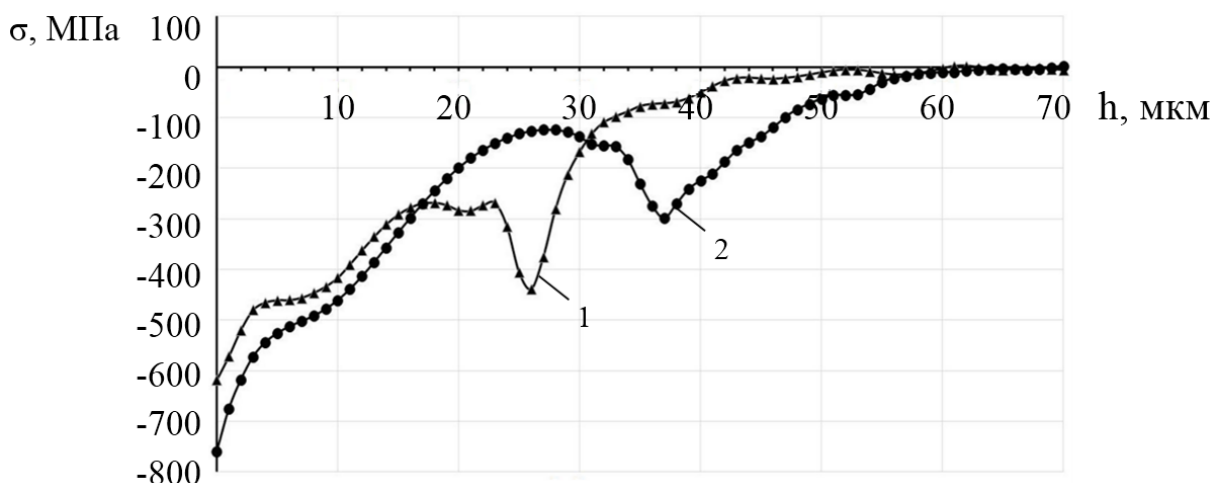


Рисунок 3 – Распределение остаточных напряжений по глубине двухслойного покрытия ВСДП-11Н + СДП-2 при толщине покрытия СДП-2 до 20 мкм (1) и при толщине покрытия СДП-2 до 30 мкм (2)

Установлено, что с увеличением времени изотермической выдержки при температуре 700°С трещиностойкость покрытия уменьшается, что обусловлено протеканием фазового превращения на границе раздела слоев покрытия. Отмечено, что в покрытии ВСДП-11Н+СДП-2 в процессе изотермической выдержки при температуре 700°С происходит постепенное уменьшение количества γ' -Ni₃Al фазы и после выдержки в течение 500 ч наблюдается присутствие преимущественно только β -NiAl фазы. Однако при изотермической выдержке при температуре 650°С не происходит значительного изменения фазового состава в поверхностном слое двухслойного покрытия ВСДП-11Н+СДП-2, состоящего преимущественно из γ' -Ni₃Al и небольшого количества β -NiAl.

Исследования сплава ВИТ1 после проведения микродугового оксидирования (МДО) показали, что при неизменной плотности тока во время проведения микродугового оксидирования толщина формируемого плотного и беспористого покрытия растёт по параболическому закону. Фазовый состав МДО-покрытия толщиной 25 мкм представляет собой оксиды титана TiO₂ (рутил) и алюминия γ -Al₂O₃, а состав покрытий толщиной до 70 мкм – оксиды титана TiO₂ (рутил) и алюминия α -Al₂O₃. При толщине покрытия не более 25 мкм шероховатость не превышает 1,6 мкм, а при толщине 70 мкм - увеличивается до 2,6 мкм. Микроструктура покрытия, сформированного на сплаве ВИТ1 методом МДО, представлена на рисунке 4.

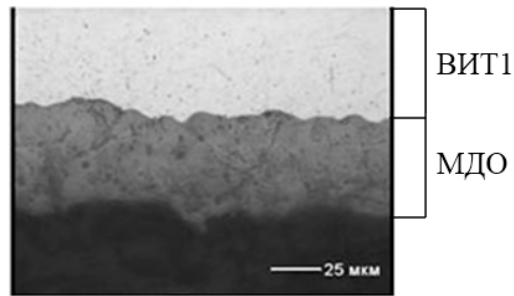


Рисунок 4 – Микроструктура покрытия после МДО на сплаве ВИТ1

Глава 4. Разработка многослойных высокотемпературных покрытий на лопатках ротора газовых турбин

В четвертой главе изложены результаты разработки способа нанесения износостойкого покрытия из интерметаллида ВКНА-2М методом наплавки в среде аргона на контактные поверхности бандажных полок лопаток ротора турбины высокотемпературных ГТД, а также результаты разработки способа восстановления геометрических размеров бандажных полок и износостойких покрытий лопаток ротора турбины высокотемпературных ГТД путём наплавки сплава Х20Н80-Н.

Испытания на жаростойкость при температуре 1050°С широко применяемого в эксплуатации сплава ХТН-61 показали, что на его поверхности образуется легко скалывающаяся окалина, приводящая к выкрашиванию карбидных частиц и разрушению износостойкого покрытия при работе двигателя. Известно, что в отличие от наплавки, для напайки высокотемпературных износостойких материалов, таких как ХТН-61, ХТН-62, СМ64 или ВКНА-2М, требуется нагрев деталей практически до температуры гомогенизации жаропрочных сплавов. В этом случае возможно существенное изменение структуры основного металла, а на замках эти изменения могут сопровождаться образованием равноосных зерен за счет протекания процессов рекристаллизации, а значительные изменения в структуре жаростойких покрытий на пере лопатки и в полости снижают характеристики долговечности покрытий, ухудшая сопротивляемость газовой коррозии. Установлено, что наплавка в среде аргона практически исключает образование неметаллических включений в структуре износостойкого покрытия ВКНА-2М. Следует подчеркнуть, что формирование жаростойких покрытий наплавкой материалов на бандажные полки позволяет сохранить прочностные характеристики лопаток турбины.

Установлено, что алитирование газовым циркуляционным методом деталей после нанесения износостойкого покрытия исключает образование пористости, которая возникает при газовом хромоалитировании вследствие протекания обменных реакций восстановления никеля из молекул дихлорида $NiCl_2$ алюминием, содержащимся в интерметаллидной наплавке ВКНА-2М. Микроструктура покрытий приведена на рисунке 5.

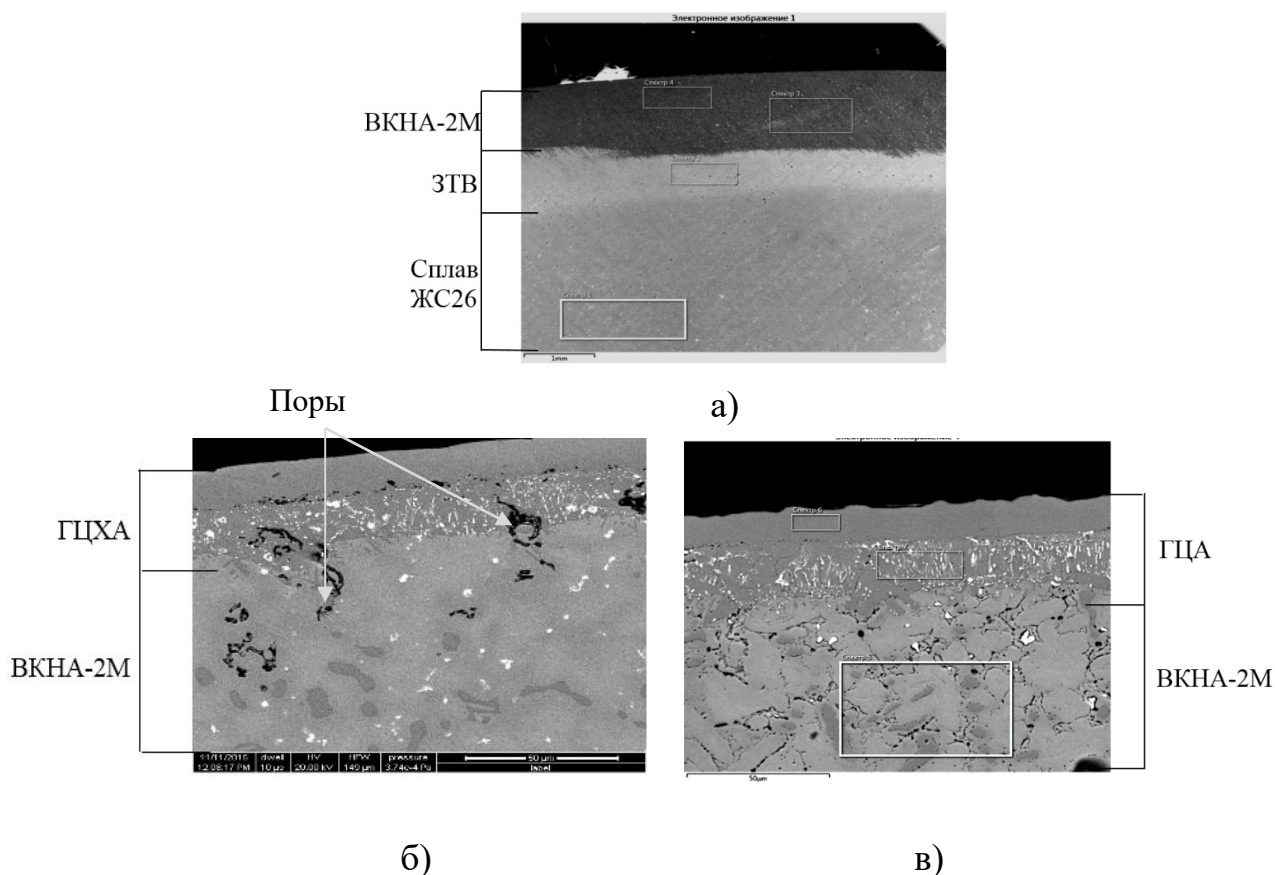


Рисунок 5 – Структура покрытия ВКНА-2М на сплаве ЖС26 (а) с последующим газовым циркуляционным хромоалитированием (ГЦХА) (б) и газовым циркуляционным алитированием (в) на сплаве ЖС26

Разработан способ восстановления геометрических размеров бандажных полок и износостойких покрытий лопаток ротора турбины высокотемпературных ГТД путём наплавки сплава Х20Н80-Н с последующим восстановлением износостойкого покрытия СМ64 и жаростойкого покрытия методом шликерного алюмосилицирования.

Отмечено, что восстановление размеров бандажных полок лопаток турбины путём увеличения толщины износостойких материалов типа ХТН-61, СМ64, ВКНА-2М и других недостаточно эффективно, поскольку прочностные характеристики износостойких материалов невысоки. Установлено, что после

наплавки в равновесном состоянии заметно уменьшается характеристика пластичности сплавов ЖС26 и ЖС32. Показано, что при последующей наплавке износостойких материалов на бандажные полки лопаток турбин, восстановленных наплавкой сплавов ЖС26 и ЖС32, происходит растрескивание наплавки, обусловленное недостаточной их пластичностью. Исследования показали, что при восстановлении геометрических размеров бандажной полки лопатки из сплава ЖС26 наплавкой нихрома марки Х20Н80-Н структура наплавленного металла плотная, не имеет пор и состоит из однородного γ -никелевого твердого раствора дендритного строения. При восстановлении размеров наплавкой Х20Н80-Н в восстановленных бандажных полках трещины отсутствуют, поскольку пластичная наплавка имеет коэффициент линейного расширения в 1,5 раза больше коэффициента линейного расширения жаропрочного сплава ЖС26. Микроструктуры восстановленной бандажной полки представлены на рисунке 6.

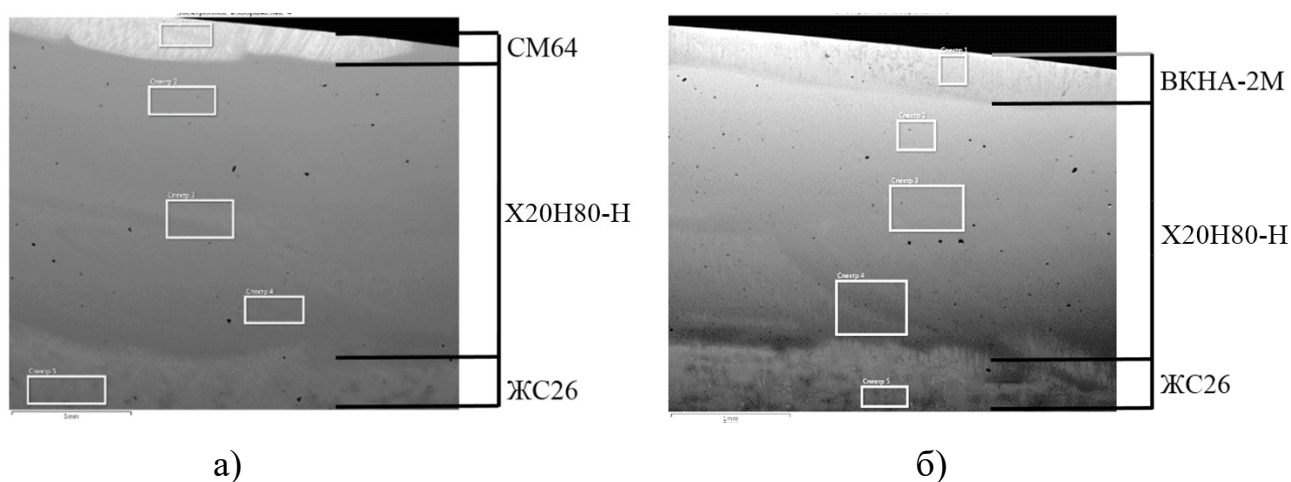


Рисунок 6 – Структура материала восстановленной бандажной полки наплавкой Х20Н80-Н+СМ64 (а) и материала бандажной полки лопатки с наплавкой Х20Н80-Н+ВКНА-2М (б)

Глава 5. Реализация защитных покрытий на лопатках компрессора и турбины ГТД

Пятая глава посвящена реализации защитных покрытий на лопатках компрессора и турбины ГТД. Проведено исследование химического состава покрытия ВСДП-11Н+СДП-2 на лопатке из сплава ВТ8-М1 и его стойкости к окислению при температурах 650 и 700°C в течение 500 ч. Фазовый состав поверхностного слоя на сплаве ВТ8-М1 представляет собой алюминиды никеля

NiAl, Ni₃Al, а также Ti₅Si₃. Внешний вид лопаток компрессора и турбины из титановых сплавов представлены на рисунке 7.

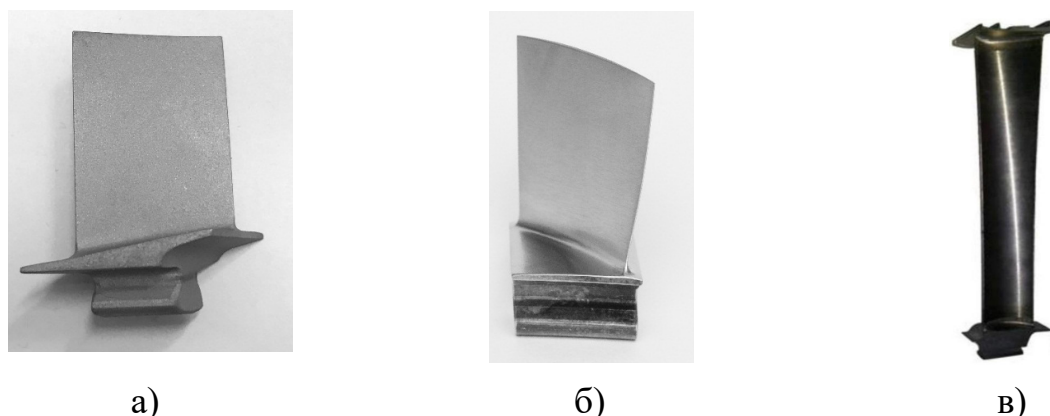


Рисунок 7 – Лопатки компрессора (а, б) и турбины (в) из жаропрочных титановых сплавов BT8-M1(а), ВИТ1 (б) и TNM-B1(в)

Разработан способ нанесения износостойкого покрытия ВКНА-2М наплавкой на контактные поверхности бандажных полок лопаток ротора турбины высокотемпературных ГТД, а также способ восстановления геометрических размеров бандажных полок и покрытий лопаток ротора турбины высокотемпературных ГТД. Внешний вид бандажной полки после наплавки ВКНА-2М и лопатки с наплавкой X20H80-H + ВКНА-2М представлен на рисунке 8.

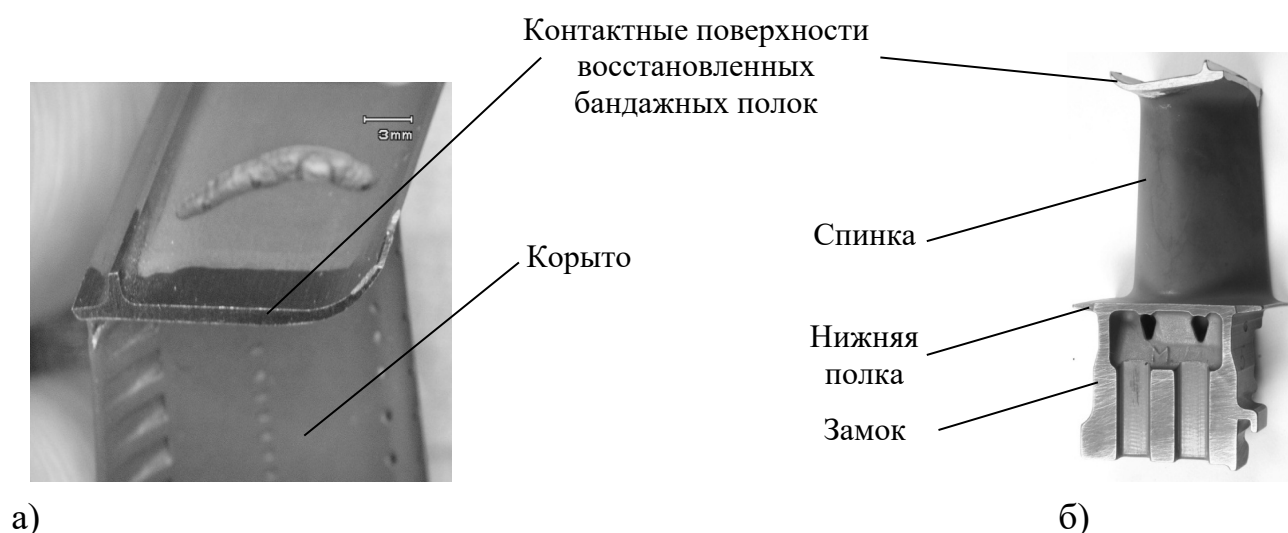


Рисунок 8 – Внешний вид бандажной полки после наплавки ВКНА-2М (а) и лопатки с наплавкой X20H80-H + ВКНА-2М на бандажной полке (б)

Выводы по работе

1. Разработано новое двухслойное покрытие ВСДП-11Н+СДП-2 ($\text{Al}-0,6\%\text{Si}+(\text{Ni}-20\%\text{Cr}-12\%\text{Al}-0,3\%\text{Y})$) и способ его нанесения на лопатки турбокомпрессора из интерметаллидных титановых сплавов типа ВИТ1 и TNM-B1 с орто- и γ -структурой. Установлено, что первый слой ВСДП-11Н, содержащий фазы TiAl_3 , TiSi_2 и Ti_5Si_3 , служит диффузионным барьером для проникновения титана к границе раздела с газовой средой, что исключает формирование оксидов титана на поверхности покрытия, при этом второй слой СДП-2, содержащий фазы TiAl_3 , Ni_3Al и NiAl , обеспечивает длительную защиту деталей от высокотемпературного окисления при температуре 700°C .

2. Доказано, что стойкость к окислению интерметаллидного титанового сплава ВИТ1 существенно зависит от последовательности формирования слоев СДП-2 и ВСДП-11Н. При изотермической выдержке интерметаллидного сплава ВИТ1 с покрытием СДП-2+ВСДП-11Н на поверхности помимо фаз Ni_3Al , NiAl , TiAl_3 , Ti_5Si_3 происходит образование неметаллических включений Al_2O_3 , которые приводят к постепенному разрушению покрытия.

3. Установлено, что окисление интерметаллидных титановых сплавов с покрытием ВСДП-11Н+СДП-2 происходит по логарифмическому закону, константа скорости окисления сплавов ВИТ1 и TNM-B1 с покрытием на установившейся стадии почти на три порядка меньше, чем без покрытия.

4. Изучена стабильность фазового и химического состава двухслойного покрытия на сплаве ВИТ1 при температурах 650 и 700°C в течение 500 ч. Установлено, что в процессе изотермической выдержки при температуре 700°C в покрытии ВСДП-11Н+СДП-2 происходит постепенное уменьшение количества γ' - Ni_3Al фазы, и после выдержки в течение 500 ч в структуре покрытия наблюдается присутствие только β - NiAl фазы. В то же время изотермическая выдержка при температуре 650°C не приводит к изменению фазового состава в поверхностном слое двухслойного покрытия ВСДП-11Н+СДП-2, которое состоит преимущественно из γ' - Ni_3Al и небольшого количества β - NiAl .

5. Проведенные по методу Давиденкова исследования напряжённого состояния покрытия ВСДП-11Н+СДП-2 на сплаве ВИТ1 показали, что в двухслойном покрытии формируются сжимающие остаточные напряжения, достигающие 600-750 МПа. Установлено, что трещиностойкость покрытия уменьшается с увеличением времени изотермической выдержки при температуре 700°C, что обусловлено протеканием фазового превращения на границе раздела слоев покрытия и, в результате, увеличением хрупкой фазы NiAl.

6. На основании изучения структуры, фазового состава и защитных свойств покрытия, сформированного на сплаве ВИТ1 методом МДО, установлено, что основными структурными составляющими поверхностного слоя являются оксиды TiO₂ (рутил) и Al₂O₃ при толщине покрытия до 25 мкм, при увеличении толщины покрытия до 70 мкм происходит изменение его фазового состава, оно содержит α-Al₂O₃ и γ-Al₂O₃. Показано, что использование метода МДО позволяет получить на сплавах на основе интерметаллида титана плотные, беспористые покрытия не зависимо от его толщины, которая влияет только на шероховатость поверхности. При толщине покрытия не более 25 мкм, Rz не превышает 1,6 мкм, а при толщине 70 мкм шероховатость увеличивается до 2,6 мкм.

7. Разработан способ нанесения высокотемпературного износостойкого покрытия из интерметаллида ВКНА-2М методом наплавки в среде аргона на контактные поверхности бандажных полок лопаток ротора турбины высокотемпературных ГТД. Наплавка в среде аргона практически исключает образование неметаллических включений в структуре износостойкого покрытия ВКНА-2М.

8. Установлено, что при газовом хромировании лопаток турбин с наплавкой интерметаллида ВКНА-2М наблюдается восстановление никеля из молекул дихлорида NiCl₂ алюминием из наплавки, сопровождаемое образованием пористости, тогда как газовое алитирование лопаток турбин с наплавкой ВКНА-2М исключает их образование.

9. Разработан способ восстановления геометрических размеров бандажных полок и износостойких покрытий лопаток ротора турбины высокотемпературных ГТД путём наплавки сплава Х20Н80-Н и СМ-64, Х20Н80-Н и ВКНА-2М. Установлено, что в зонах наплавки и в зонах взаимодействия наплавки с основным материалом лопатки из сплава ЖС26 дефекты отсутствуют. Наплавка Х20Н80-Н имеет коэффициент линейного расширения в 1,5 раза превосходящий коэффициент линейного расширения основного материала из жаропрочного сплава ЖС26.

10. Результаты работы были использованы на производственном комплексе «Салют» АО «ОДК» при наплавке высокотемпературного износостойкого покрытия из интерметаллидного сплава ВКНА-2М на контактные поверхности бандажных полок ротора турбины из сплава ЖС26, восстановлении комплекта лопаток ротора ТВД из сплава ЖС26 после 450 ч наработки в эксплуатации наплавкой сплава Х20Н80-Н и износостойкого покрытия СМ64 с последующим нанесением жаростойкого покрытия АС-2, нанесении двухслойного покрытия на лопатки компрессора высокого давления и турбине низкого давления из интерметаллидных сплавов ВИТ1 и ТНМ-В1. Акт №11-0102/09-280 от 13.02.2019г.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Абраимов, Н.В. Высокотемпературные покрытия для жаропрочных титановых сплавов / Абраимов Н.В., *Иванова А.Ю. (Золотарева А.Ю.)* // Электрометаллургия. 2017. №5. С. 20-30.

2. Абраимов, Н.В. Влияние покрытий на жаростойкость сплавов ВТ-41 и ВИТ1 при изотермическом окислении / Абраимов Н.В., *Иванова А.Ю. (Золотарева А.Ю.)* // Электрометаллургия. 2018. №2. С. 23-32.

Abraimov, N. V. Effect of Coatings on the Heat Resistance of VT-41 and VIT1 Alloys during Isothermal Oxidation / N. V. Abraimov, *A. Yu. Ivanova (A. Yu. Zolotareva)* // ISSN 0036-0295, Russian Metallurgy (Metally) Vol. 2018, No. 6, pp. 565–572.

3. Абраимов, Н.В. Исследование состава и структуры покрытий на титановых сплавах ВТ-41 и ВИТ1 / Абраимов Н.В., Иванова А.Ю. (Золотарева А.Ю.), Дегтярева А.Г. // Электротехнология. 2018. №3. С. 28-33.

4. Абраимов, Н.В. Разработка технологий нанесения износостойких покрытий на бандажные полки лопаток турбин ГТД / Абраимов Н.В., Лукина В.В., Иванова А.Ю. (Золотарева А.Ю.) // Электротехнология. 2018. №6. С. 9-18.

Abraimov, N. V. Technology for the Deposition of Wear-Resistant Coatings on the Airfoil Shroud Platforms of GTE Turbine Blades / N. V. Abraimov, V. V. Lukina, A.Yu. Ivanova (A. Yu. Zolotareva) // ISSN 0036-0295, Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2019, No. 6, pp. 608-616

5. Абраимов, Н.В. Влияние окисления покрытий на трещиностойкость и напряжённое состояние поверхностного слоя титанового орто-сплава системы Ti_2NbAl / Абраимов Н.В., Лукина В.В., Иванова А.Ю. (Золотарева А.Ю.) // Коррозия: материалы, защита. 2018. № 9. С. 30-34.

6. Скворцова, С.В. Влияние покрытий на кинетику окисления интерметаллидных титановых сплавов системы Ti_2AlNb и $\gamma-TiAl$ / Скворцова С.В., Золотарева А.Ю. // Коррозия: материалы, защита. 2019. № 5. С.1-7.

7. Абраимов, Н.В. Влияние высокотемпературных покрытий на характеристики надежности лопаточных элементов ГТД / Абраимов Н.В., Золотарева А.Ю. // Электротехнология. 2019. № 6. С. 24-32.

8. Патент № 2667191 (РФ) Способ получения многослойного защитного покрытия лопаток турбомашин из титановых сплавов / Абраимов Н.В., Иванова А.Ю. (Золотарева А.Ю.), Козлов Д.Л., Лукина В.В., Яковлев М.Г.; патентообладатель АО «НПЦГ «Салют»; №20173379 заявл. 28.09.17 г. опубл. 17.09.2018. Бюл. № 26. – 5 с.