

На правах рукописи



НИКИТИН ЯНИС ЮРЬЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ УДАЛЕНИЯ
УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ФИЗИКО-
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА
VT20**

Специальность

05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение и технология обработки материалов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Ночовная Надежда Алексеевна**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: – **Помельникова Алла Сергеевна**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский
государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)», профессор

– **Кудрявцев Егор Алексеевич**,
кандидат технических наук, ФГАОУ ВО
«Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет», техник-проектировщик

Ведущее предприятие: – ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»

Защита диссертации состоится 20 декабря 2018 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.125.15 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 Светлане Владимировне и по электронной почте skvorcovasv@mat.i.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте https://mai.ru/upload/iblock/87e/Dissertatsiya_Nikitin.pdf

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) и газотурбинные установки (ГТУ) используются в самых разных отраслях промышленности. Условия их эксплуатации существенно влияют на эксплуатационные характеристики и надежность ГТД, приводят к необратимой потере мощности и снижению коэффициента полезного действия (КПД). Одной из причин этого является образование загрязнений на деталях проточной части компрессора ГТД или ГТУ. Даже при благоприятных условиях эксплуатации забираемый двигателем воздух содержит пыль, соли, органические примеси и т.п. В результате неудовлетворительной работы уплотнительных элементов может происходить заброс масла из подшипников. Попадая в проточную часть, частички загрязняющих примесей при высоких температурах (до 650°C) «налипают» на поверхность лопаток компрессора, со временем образуя слой углеродсодержащих загрязнений.

Для очистки от углеродсодержащих загрязнений, а также повышения характеристик ГТД/ГТУ и снижения расхода топлива в процессе эксплуатации применяют промежуточные промывки их проточной части моющими растворами, как на работающем агрегате, так и на остановленном.

Для изготовления деталей компрессора в настоящее время все более широко применяют титановые сплавы. Благодаря высокому комплексу механических свойств (в том числе при повышенных температурах), низкой плотности, высокой коррозионной стойкости титановые сплавы занимают одно из лидирующих мест в двигателестроении. В современном авиационном двигателе доля титановых сплавов составляет более 30%. Из титановых сплавов изготавливают диски, лопатки ротора и статора компрессора низкого давления (КНД), компрессора высокого давления (КВД), а также лопатки турбины низкого давления ГТД.

В литературе описано достаточно много способов и технологий очистки деталей от различных эксплуатационных загрязнений в заводских условиях, но

при этом практически не представлено экспериментальных данных по исследованию качества (эффективности) очистки поверхности от углеродсодержащих загрязнений, данных по влиянию технологий удаления загрязнений на свойства очищаемого материала: прочность, пластичность, микротвердость, шероховатость и потенциал поверхности и другие. Большинство публикуемых по данному вопросу работ носят обзорный характер. Отсутствие такого рода информации затрудняет выбор наиболее эффективных и безопасных способов очистки деталей и узлов компрессора ГТД.

Таким образом, исследование влияния технологий очистки лопаток и других деталей проточной части ГТД из титановых сплавов от эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений на физико-механические свойства материала при заводском ремонте двигателя, а также разработка безопасных и высокоэффективных способов очистки, является актуальной научной и практической задачей.

Цель работы:

Оценка влияния химических технологий удаления углеродсодержащих загрязнений на физико-механические свойства образцов титанового сплава BT20 и разработка на этой основе технологических рекомендаций по очистке поверхности деталей ГТД при ремонтно-восстановительных мероприятиях.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать эффективность очистки поверхности титанового сплава BT20 от углеродсодержащих загрязнений растворами отечественного и зарубежного производства;
2. Исследовать влияние воздействия химических растворов на структуру и свойства поверхности титанового сплава BT20 после удаления углеродсодержащих загрязнений;
3. Изучить возможность ремонта деталей ГТД из титанового сплава BT20

методом пайки после удаления углеродсодержащих загрязнений химическим способом;

4. Исследовать влияние технологий химического удаления углеродсодержащих загрязнений на механические свойства и характер разрушения титанового сплава BT20;

5. Разработать рекомендации по технологии химической очистки углеродсодержащих загрязнений с поверхности деталей ГТД из титановых сплавов.

Научная новизна

1. Показано, что химическая очистка поверхности образцов титанового сплава BT20 приводит к снижению поверхностного потенциала. Установлено, что наименьшую степень снижения потенциала (на 24%) обеспечивает очищающий раствор на водной основе OP1. Показано, что обработка в исследуемых растворах не приводит к ухудшению смачивания поверхности припоем ВПр16.

2. Установлено, что в результате химической очистки поверхности при повышенных температурах увеличение микротвердости за счет газонасыщения поверхности продуктами химических реакций не превышает 5%. Микрорентгеноспектральным анализом не обнаружено увеличение содержания углерода, кислорода, серы и их соединений в поверхностном слое.

3. Установлено, что удаление углеродсодержащих загрязнений не приводит к ухудшению микрогеометрии поверхности образцов, что свидетельствует об отсутствии растворения в исследованных растворах основного материала.

Практическая значимость

Разработаны рекомендации по технологии химического удаления загрязнений с поверхности деталей проточной части компрессора газотурбинных двигателей и установок, изготовленных из титанового сплава

BT20, включающие обработку загрязненных деталей и узлов методом погружения в водный очищающий раствор, разработанный в ВИАМ, при температуре 50-60°C, выдержку в течение 2 часов с последующей промывкой в горячей и холодной воде с использованием ультразвуковой установки. Технология обеспечивает полную очистку от углеродсодержащих загрязнений без потери массы основного металла, изменения макроструктуры, микрогеометрии поверхности и ухудшения физико-механических свойств, в том числе при длительном нагружении при повышенных температурах.

Методология и методы исследования

В качестве методологической основы исследований был использован собственный опыт ранее проводимых работ, а также работы зарубежных и российских ученых в области очистки деталей ГТД от эксплуатационных загрязнений.

При проведении работы были использованы следующие методы исследований: визуальный и гравиметрический методы, металлографический и рентгеноспектральный анализ, растровая электронная микроскопия, измерение микротвердости, шероховатости, контактной разности потенциалов, определение смачивания поверхности припоем, испытания на растяжение и длительную прочность.

Положения, выносимые на защиту

1. Влияние вида и технологических параметров раствора на значения поверхностного потенциала, шероховатости и микротвердости образцов из титанового сплава BT20 после удаления углеродсодержащих загрязнений.

2. Влияние технологий химической очистки углеродсодержащих загрязнений на изменение механических свойств титанового сплава BT20.

3. Влияние химического воздействия на изменение содержания углерода, кислорода и серы на поверхности титанового сплава BT20 при удалении углеродсодержащих загрязнений.

4. Влияние химического способа очистки титанового сплава ВТ20 от углеродсодержащих загрязнений на изменение характеристик смачивания поверхности припоем ВПр16.

Степень достоверности

Исследования проведены с использованием современного оборудования, поверенного (откалиброванного) метрологическими службами и имеющего действующие свидетельства (клейма). Стандартные испытания и исследования выполнены с соблюдением требованиями научно-технической документации, действующей на территории Российской Федерации (государственные стандарты, стандарты организации).

Апробация результатов

О результатах диссертационной работы доложено на 3 конференциях: «XVII международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов - молодых ученых» (Екатеринбург 2016 г.); XLIII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 2017 г.); XLIV Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 2018 г.)

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 6 работах, из них 3 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК. Список опубликованных работ приведен в конце автореферата.

Объём диссертации и ее структура. Диссертация состоит из введения, шести разделов, выводов, списка сокращений и условных обозначений и списка используемых источников из 80 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов. Диссертация изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Раздел 1. Аналитический обзор литературы

В данном разделе представлена информация об основных видах повреждений проточной части компрессора, встречающихся при дефектации ГТД, причинах образования углеродсодержащих загрязнений в проточной части компрессора, составе и свойствах загрязнений, о влиянии загрязнений проточной части компрессора на параметры работы двигателя и технологиях очистки деталей проточной части компрессора в процессе эксплуатации и при заводском ремонте.

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время представлено достаточное количество способов удаления загрязнений, в том числе углеродсодержащих, с поверхности различных деталей и материалов в заводских условиях. Каждый из представленных способов обладает определенным рядом преимуществ и недостатков. В большинстве рассмотренных литературных источниках не приводятся данные по эффективности очистки деталей, материалов с применением той или иной технологии удаления углеродсодержащих загрязнений, отсутствуют экспериментальные данные по исследованию влияния технологии очистки на работоспособность деталей или критически важные свойства материалов.

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

Раздел 2. Объекты и методы исследований

Для исследований был выбран жаропрочный титановый сплав ВТ20, как наиболее широко распространённый сплав, применяемый для изготовления узлов и деталей компрессоров ГТД различного назначения. Из листового полуфабриката данного сплава были изготовлены образцы-пластины 30x50 мм для оценки эффективности очистки поверхности, металлографических исследований и оценки свойств поверхности, а также стандартные плоские

образцы для определения механических свойств.

На часть образцов, по технологии, разработанной ФГУП «ВИАМ», были нанесены углеродсодержащие загрязнения, имитирующие эксплуатационные.

В работе были использованы две титановые компрессорные лопатки ГТД: лопатка № 1 (маленькая) после эксплуатации с небольшим количеством загрязнений на поверхности и лопатка № 2 (большая), на которую были нанесены загрязнения, имитирующие эксплуатационные.

В качестве способов очистки углеродсодержащих загрязнений были выбраны восемь растворов зарубежного и отечественного производства: очищающий раствор на водной основе OP1 (РФ), щелочной и кислотный растворы («рыхление + травление») (РФ), моющий раствор на водной основе TSP-3030 (РФ), моющий раствор на основе растворителя TSP-5050 (РФ), очиститель на водной основе ZOK-27 (США, Великобритания), очиститель на водной основе See Vee EPC 1 (США, Великобритания), кислотный очиститель AP 954 (Канада) и щелочной очиститель HDL 202 (Канада).

В ходе исследований были изучены: изменение внешнего вида, в том числе с применением металлографических методов исследования, изменение массы, качественный химический состав поверхности, рельеф поверхности, микротвердость поверхностного слоя, активность поверхности, технологические свойства припоя, механические свойства при длительном и кратковременном статическом нагружении, характер разрушения.

Оценку изменения внешнего вида образцов проводили невооруженным взглядом и с использованием оптического микроскопа Olympus SXZ7 с увеличением x12-114, оптического микроскопа Olympus GX51 с увеличением x50-1000 и растрового электронного микроскопа Zeiss EVO MA 10. Взвешивание образцов проводили на аналитических весах Ohaus Discovery DV215CD.

Рентгеноспектральный микроанализ проводили на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10, оснащённом энергодисперсионным спектрометром «X-Max» (Oxford Instruments). Планарную съемку поверхности

образцов и измерение параметров шероховатости (R_a и R_z) по ГОСТ 2789-73 проводили методом конфокальной микроскопии на 3D оптическом профилометре Plu Neox Sensofar-Tech с увеличением $\times 10-150$. Микротвердость поверхности определяли по методу Виккерса на приборе Emcotest Durascan путем определения величины площади отпечатка внедряемого индентора при заданной и постоянной нагрузке 0,981 Н в течение 15 с. В качестве индентора применялась четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине, равным 136° . Активность поверхности определяли по контактной разности потенциалов с помощью прибора «Поверхность».

Технологические свойства припоя ВПр16 определяли в соответствии с ГОСТ 23904-79. Угол смачивания определяли металлографическим методом на микрошлифе. Растекаемость определяли по площади растекшейся капли припоя.

Механические испытания на растяжение проводили на электромеханической машине Walter+Bai LFM-50 по ГОСТ 1497-84 при комнатной температуре и по ГОСТ 9651-84 при повышенной температуре (450°C). Испытания на длительную прочность проводили на испытательной машине Zwick Карра 50 LA в соответствии с ГОСТ 10145-81 при заданных напряжениях 620 МПа и температуре 450°C .

Раздел 3. Исследование влияния химических технологий удаления углеродсодержащих загрязнений на свойства поверхности титанового сплава ВТ20

В данном разделе приведены данные по оценке эффективности очистки поверхности образцов титанового сплава ВТ20 зарубежными и отечественными растворами. Установлено, что растворы TSP-5050, TSP-3030, ZOK-27, See Bee EPC 1 и AP 954 не обеспечивает полного очищения поверхности от углеродсодержащих загрязнений, в то время как обработка в растворе OP1, растворе HDL 202 и щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление») позволяет полностью удалить загрязнения с поверхности

титанового сплава ВТ20. Однако при использовании щелочного и кислотного растворов («рыхление + травление») и раствора HDL 202 наблюдается убыль массы основного металла (0,14 г/м² и 0,17 г/м² соответственно).

При металлографическом анализе поверхности образцов после обработки раствором ОР1 повреждения поверхности (растравы) не наблюдаются, остатки загрязнений отсутствуют. В спектрограммах, полученных с типичных участков поверхности образцов отсутствуют такие элементы как углерод, кислород и сера, свидетельствующие о наличии углеродсодержащих загрязнений, и присутствуют только элементы, входящие в химический состав сплава. Аналогичные результаты получены и при очистке образцов в щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление») – растравы поверхности не наблюдаются. Обработка в растворе HDL 202 обеспечивает полную очистку поверхности. Данные РЭМ и РСМА подтверждают отсутствие остатков загрязнений на поверхности. Однако стоит отметить, что в отличие от удаления загрязнений в растворе ОР1 и в щелочном и кислотном растворах, макроструктура поверхности после удаления загрязнений в растворе HDL 202 несколько отличается от макроструктуры поверхности исходного образца, что свидетельствует о воздействии очищающего раствора на основной материал и легком травлении поверхности (рисунок 1).

Также в разделе представлены данные по оценке изменения рельефа, активности и микротвердости поверхности. Значения шероховатости поверхности (Ra, Rz) титанового сплава ВТ20 после удаления загрязнений изменяются незначительно (таблица 1). Рельеф и профили очищенных поверхностей имеют вид, схожий с поверхностью исходных образцов.

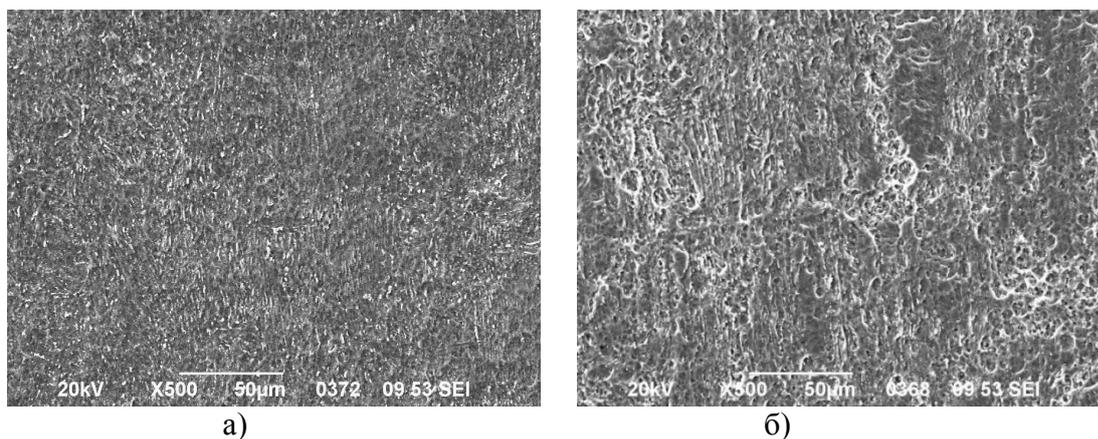


Рисунок 1 - Макроструктура поверхности титанового сплава BT20: а) исходный образец (без обработки), x500; б) образец после удаления загрязнений раствором HDL 202, x500

Таблица 1 - Значения шероховатости поверхности титанового сплава BT20 после удаления углеродсодержащих загрязнений различными растворами

Название раствора	Ra, мкм	Rz, мкм
OP1	0,50±0,80	6,3±10
«рыхление + травление»	0,63±0,80	8±10
HDL 202	0,63±0,80	8±10
без обработки (исходное состояние)	0,63±0,80	6,3±10

Примечание: приведены минимальные и максимальные значения.

Данные по измерению микротвердости поверхности после удаления загрязнений приведены в таблице 2. Полученные результаты показывают, что средние значения микротвердости образцов, очищенных с использованием раствора OP1 и раствора HDL 202, незначительно (до 5%) превышают таковые для исходных образцов. Микротвердость образцов, очищенных в щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление») не изменяется.

В процессе ремонта ГТД после удаления эксплуатационных загрязнений на детали могут наноситься защитные покрытия или производиться пайка с целью восстановления геометрии детали.

С точки зрения нанесения покрытий очень важно обеспечить отсутствие загрязнений и активность очищенной поверхности для получения

максимальной адгезии покрытий. Мерой активности поверхности может служить контактная разность потенциалов. Активность очищенных поверхностей определяли по величине контактной разности потенциалов с помощью прибора «Поверхность».

Результаты измерений активности поверхности (таблица 2) свидетельствуют о том, что вне зависимости от применяемой технологии очистки загрязнений происходит снижение значений поверхностного потенциала на 24% при обработке раствором OP1 и на 47 и 54% при использовании щелочного и кислотного растворов («рыхление + травление») и раствора HDL 202 соответственно. Таким образом удаление загрязнений с использованием очищающего раствора на водной основе OP1 обеспечивает наиболее близкое значение поверхностного потенциала к исходному состоянию.

Таблица 2 - Значения микротвердости и активности поверхности титанового сплава BT20 после удаления углеродсодержащих загрязнений различными растворами

Название раствора	HV	Потенциал поверхности, В
OP1	$\frac{374 + 446^*}{404}$	$\frac{0,18 + 0,28^*}{0,23}$
«рыхление + травление»	$\frac{372 + 408}{386}$	$\frac{0,12 + 0,20}{0,16}$
HDL 202	$\frac{380 + 426}{400}$	$\frac{0,11 + 0,23}{0,14}$
без обработки (исходное состояние)	$\frac{376 + 397}{386}$	$\frac{0,28 + 0,34}{0,30}$

*Примечание: в числителе дроби приведены минимальное и максимальное значения, в знаменателе - среднее.

Раздел 4. Исследование технологических характеристик припоя ВПр16 применительно к титановому сплаву ВТ20

При проведении ремонта может производиться пайка деталей с целью восстановления их целостности и геометрических параметров. При проведении пайки деталей важными технологическими характеристиками является растекаемость припоев и угол смачивания материала припоями. В данном разделе приведены данные по оценке указанных характеристик для припоя ВПр16 на поверхности образцов титанового сплава ВТ20, очищенных от углеродсодержащих загрязнений раствором ОР1, раствором HDL 202, щелочным и кислотным растворами («рыхление + травление»). Результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Технологические характеристики припоя ВПр16 на поверхности титанового сплава ВТ20, очищенной от загрязнений различными растворами

Название раствора	Площадь растекания, мм ²	Краевой угол смачивания $\theta_{гр}, ^\circ$
ОР1	81÷87	10÷11
«рыхление + травление»	78÷84	10÷11
HDL 202	80÷81	10÷11
без обработки (исходное состояние)	81÷83	10÷11

Примечание: приведены минимальные и максимальные значения.

Полученные данные показывают, что все указанные технологии очистки обеспечивают примерно одинаковые значения по площади растекания и краевому углу смачивания припоя ВПр16 и находятся на уровне, характерном для поверхности исходных образцов.

Раздел 5. Исследование изменения механических свойств титанового сплава VT20 после химического удаления углеродсодержащих загрязнений

В данном разделе приведены данные по исследованию влияния химического удаления углеродсодержащих загрязнений на кратковременную и длительную прочность, а также характер разрушения титанового сплава VT20. После удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности образцов титанового сплава VT20 при помощи раствора OP1, щелочного и кислотного растворов («рыхление + травление») и раствора HDL 202 были проведены испытания на растяжение при комнатной температуре и при температуре 450°C с определением предела прочности (σ_B), условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительного удлинения (δ).

Полученные в работе данные свидетельствуют о том, что как на образцах с загрязнениями, так и на очищенных образцах, вне зависимости от применяемого раствора, не наблюдаются значительные изменения предела прочности, условного предела текучести и относительного удлинения. Изменения по каждому показателю не превышают 1-2 %. Все полученные значения находятся в пределах паспортных характеристик сплава.

После испытаний на растяжение с целью установления характера разрушения и возможного его изменения, связанного с химической обработкой, были проведены фрактографические исследования изломов образцов титанового сплава VT20.

Различия в микростроении изломов исходных образцов (без обработки), образцов с загрязнениями и образцов очищенных от загрязнений с использованием раствора OP1, раствора HDL 202 и щелочного и кислотного растворов («рыхление + травление») не выявлены. При малых увеличениях на изломах образцов наблюдается структурно-зависимый характер разрушения, как на исходных и очищенных образцах, так и на образцах с загрязнениями. При больших увеличениях поверхность разрушения представлена пластичным мелкоямочным рельефом характерным для данного материала.

Также были проведены испытания на длительную прочность при заданных напряжении 620 МПа и температуре 450°C, по результатам которых было установлено время до разрушения (t_p) и относительное удлинение (δ) образцов (таблица 4), а также получены кривые ползучести.

Таблица 4 - Длительная прочность образцов титанового сплава ВТ20 (при температуре 450°C) после удаления загрязнений различными растворами

Название раствора	Постоянно приложенное напряжение σ , МПа	Время до разрушения t_p , ч	Относительное удлинение δ , %
ОР1	620	159	35
«рыхление + травление»		150	32
раствор HDL 202		143	33
с загрязнениями		148	30
без обработки (исходное состояние)		153	34

Примечание: приведены средние значения

Данные таблицы 4 показывают, что вне зависимости от вида применяемого раствора не происходит снижение времени до разрушения и пластичности образцов. Аналогичное время до разрушения и пластичность имеют исходные образцы и образцы с загрязнениями. Имеющийся разброс по времени до разрушения незначителен и характерен для данного вида испытаний.

Виды кривых ползучести не имеют принципиальных отличий. На всех полученных кривых ползучести наблюдаются 3 типичных участка, отвечающие трем стадиям развития ползучести: 1 - начальная стадия с уменьшающейся скоростью ползучести; 2 - с постоянной и наименьшей скоростью и 3 - заключительная, с возрастающей скоростью ползучести.

Раздел 6. Исследование качества очистки лопаток компрессора газотурбинного двигателя

Оценка эффективности очистки поверхности образцов титанового сплава BT20 от углеродсодержащих загрязнений зарубежными и отечественными растворами, а также оценка изменения свойств поверхности показали, что наилучшей очищающей способностью обладают очищающий раствор на водной основе OP1, щелочной и кислотный растворы («рыхление + травление») и раствор HDL 202. Указанные технологии не приводят к ухудшению шероховатости, микротвердости поверхности и механических свойств. Однако следует отметить, что после удаления углеродсодержащих загрязнений с использованием данных растворов происходит снижение активности поверхности, наименьшее из которых обеспечивает раствор OP1. Также следует отметить то, что раствор HDL 202, щелочной и кислотный растворы могут приводить к потере массы основного металла при удалении загрязнений. Таким образом, для опробования удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности лопаток компрессора ГТД был выбран раствор OP1.

Для исследования были выбраны две компрессорные лопатки: лопатка № 1 (маленькая) после эксплуатации с небольшим количеством загрязнений на поверхности и лопатка № 2 (большая), на которую были нанесены загрязнения, имитирующие эксплуатационные, в лабораторных условиях.

До и после удаления углеродсодержащих загрязнений был определен качественный химический состав поверхности, микротвердость, шероховатость и активность поверхности. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 3.9.

Значения шероховатости поверхности после очистки не изменяются, как для лопатки №1, так и для лопатки № 2. Обработка в растворе OP1 благоприятно сказывается на активности поверхности лопатки № 1, о чем свидетельствует повышение значений контактной разности потенциалов, однако приводит к небольшому понижению (около 10%) активности поверхности лопатки № 2. Удаление загрязнений с поверхности лопаток № 1 и

№ 2 не приводят к газонасыщению поверхностных слоев, значения микротвердости до и после обработки находятся приблизительно на одном уровне.

Таблица 3.9 - Состояние поверхности титановых лопаток компрессора ГТД после удаления углеродсодержащих загрязнений

Наименование лопатки	Микротвердость (HV)		Шероховатость (Ra), мкм		Потенциал поверхности, В	
	исходное	после очистки	исходное	после очистки	исходное	после очистки
Лопатка №1	382	386	1,00	1,00	0,20	0,28
Лопатка №2	393	384	1,60	1,60	0,27	0,24

Примечание: приведены средние значения.

В спектрограммах, полученных с поверхности лопатки № 1 при РСМА, наблюдается наличие таких элементов как сера, кислород и углерод, свидетельствующие о наличии углеродсодержащих загрязнений. После обработки данной лопатки в растворе ОР1 поверхность лопатки стала более светлая, а в спектрограммах наблюдаются только химические элементы, входящие в состав сплава: титан и алюминий, что свидетельствует о полном удалении эксплуатационных загрязнений. Аналогичные результаты получены и после обработки в указанном растворе лопатки № 2. Результаты исследований, полученные на компрессорных лопатках, хорошо согласовываются с данными исследований, проведенных на образцах.

По результатам проведенных в работе исследований была рекомендована следующая химическая технология для удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности деталей проточной части компрессора газотурбинных двигателей и установок, изготовленных из титанового сплава BT20: обработка загрязненных деталей и узлов методом погружения в очищающий раствор на водной основе ОР1 при температуре 50-60°С с

выдержкой до 2 ч и последующей промывкой в горячей и холодной воде с использованием ультразвуковой установки.

Указанная технология обеспечивает полную очистку загрязненных образцов титанового сплава BT20 без потери массы основного металла, изменения макроструктуры, микрогеометрии поверхности и ухудшения механических свойств, а именно увеличения поверхностной микротвердости, снижения прочности и пластичности, в том числе при длительном нагружении при повышенных температурах. Также указанная технология в сравнении с аналогами обеспечивает минимальное снижение потенциала поверхности. Детали, обработанные в очищающем растворе OP1, при проведении ремонтно-восстановительных мероприятий могут беспрепятственно паяться.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что наиболее эффективное удаление углеродсодержащих загрязнений с поверхности титанового сплава BT20 обеспечивают: очищающий раствор на водной основе OP1 (РФ), щелочной и кислотный растворы (РФ) и щелочной раствор HDL 202 (Канада). Растворы TSP-5050, TSP-3030, ZOK-27, See Vee EPC 1 и AP 954 не обеспечивают полного очищения поверхности от загрязнений.

2. Установлено, что при удалении углеродсодержащих загрязнений очищающим раствором OP1, раствором HDL 202, щелочным и кислотным растворами при повышенных температурах увеличение микротвердости за счет газонасыщения поверхности продуктами химических реакций не превышает 5%.

3. Химическая очистка поверхности образцов титанового сплава BT20 приводит к снижению поверхностного потенциала. Установлено, что наименьшую степень снижения потенциала (24%) обеспечивает очищающий раствор OP1, наибольшую (54%) - раствор HDL 202.

4. Удаление углеродсодержащих загрязнений очищающим раствором OP1 и щелочным и кислотным растворами не приводит к ухудшению

микрogeометрии и макроструктуры поверхности образцов, что свидетельствуют об отсутствии растворения в исследуемых растворах основного материала.

5. Установлено, что обработка в растворе HDL 202, растворе OP1, щелочном и кислотном растворах не приводит к ухудшению технологических характеристик припоя ВПр16, что свидетельствует о возможности применения указанных химических технологий очистки при ремонте деталей ГТД методом пайки.

6. Показано, что очистка углеродсодержащих загрязнений исследуемыми в работе растворами не приводит к снижению механических характеристик титанового сплава BT20 и изменению закономерностей его разрушения при комнатной и повышенной температурах.

7. Разработаны рекомендации по удалению углеродсодержащих загрязнений с поверхности деталей из титанового сплава BT20, заключающиеся в обработке загрязненных деталей методом погружения в очищающий раствор на водной основе OP1 при температуре 50-60°C, с выдержкой до 2 часов и последующей промывкой в горячей и холодной воде с использованием ультразвуковой установки. Обработка по указанной технологии не приводит к ухудшению физико-механических характеристик титанового сплава BT20.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю. Современное состояние вопроса в области очистки проточной части компрессора ГТД от эксплуатационных загрязнений (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. № 3. Ст. 5.

2. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю., Григоренко В.Б., Козлов И.А. Изменения свойств поверхности титанового сплава BT20 при химическом удалении эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. № 10. Ст. 5.

3. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю., Гудков С.В., Савушкин А.Н. Оценка свойств титанового сплава BT20 после удаления эксплуатационных

углеродсодержащих загрязнений химическим способом // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 195-202

4. Никитин Я. Ю. Исследование влияния технологий очистки от эксплуатационных загрязнений на свойства поверхности жаропрочного титанового сплав ВТ20 / Я. Ю. Никитин // XVII международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых. Екатеринбург, 5-9 декабря 2016: сборник научных трудов. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. Ч. 1. С. 60-62.

5. Никитин Я.Ю. О влиянии химических технологий очистки эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений на свойства поверхности титанового сплава ВТ20 // Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.: МАИ (НИУ), 2017. С. 284-285.

6. Никитин Я.Ю., Савушкин А.Н. Исследование изменений свойств жаропрочного титанового сплава ВТ20 после химического удаления эксплуатационных загрязнений // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.: МАИ (НИУ), 2018. Т. 3. С. 344-345.