

«УТВЕРЖДАЮ»

№ Первый проректор –
проректор по научно-исследовательской
работе
Самарского национального
исследовательского университета
имени академика С.П. Королева



/Прокофьев А.Б./

23.10.2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Громова Алексея Николаевича
«Разработка и внедрение методов ускоренных испытаний лопаток ГТД
с покрытиями на термостабильность и адгезию в условиях термоциклирования с
применением сильноточных импульсных электронных пучков»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.07.05 - «Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов».

Актуальность темы диссертационной работы

В последние 20 лет была доказана актуальность работ по развитию технологии обработки поверхности сильноточными импульсными электронными пучками, что обеспечивает повышение уровня важнейших свойств лопаток ГТД: усталостной прочности до 40%, жаростойкости в 4 раза, сопротивление пылевой эрозии в 2 раза и солевой коррозии до 6 раз. Все это может быть получено при облучении поверхности лопаток при плотностях энергии в импульсе от 18 до 55 Дж/см², когда в поверхностном слое реализуются процессы перекристаллизации и абляции. Если же использовать облучение при низких значениях плотности энергии, то можно проводить процесс термообработки (быстрый нагрев и охлаждение). Такое использование сильноточных импульсных электронных пучков представляется особо актуальным, поскольку расширяются области применения ускорителей и удается проводить ускоренные испытания, так как длительность импульса составляет всего 40 мкс, а их скважность до 30 с. Поэтому диссертационная работа Громова А.Н. является актуальной.

Научная новизна

Научная новизна состоит в предложенной автором методике проведения испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования и испытаний на адгезию защитных покрытий на лопатках компрессора и турбины ГТД из жаропрочных материалов с применением концентрированных потоков энергии.

Впервые были получены экспериментальные результаты о влиянии режимов обработки облучения СИЭП на физико-химическое состояние материала поверхностных слоев при термоциклировании и определены значения адгезионной прочности защитных покрытий

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. №

30 10 2019

лопатках двигателя, изготовленных из титановых и никелевых сплавов, а также жаростойких сталей.

Впервые получены данные о характере распределения напряжений, сформированных в поверхностных слоях материала в результате обработки СИЭП. Эта часть работы является одной из важнейших составляющих задачи определения значений адгезионной прочности покрытий.

Практическая значимость работы

Предложенные автором методики проведения испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования и определения адгезии покрытий на поверхности лопаток ГТД, применялись при реализации программы работ по внедрению электронно-пучковой обработки деталей ГТД на АО «ММП имени В.В. Чернышева» и могут быть использованы на ведущих предприятия аэрокосмической отрасли для проведения ускоренных испытаний различных деталей и контроля адгезии покрытий.

Достоверность положений, выносимых на защиту

Диссертант в своей работе предлагает для решения поставленной задачи использовать обработку сильноточным импульсным электронным пучком с последующей термообработкой. Однако для достижения основной цели автору необходимо было решить сразу несколько задач, обусловленных требованиями к материалам лопаток из никелевых и $\alpha+\beta$ -титановых сплавов, а также жаропрочных сталей и к покрытиям на этих лопатках по прочностным характеристикам и адгезии. Все это предполагало проведение очень большого объема научно-исследовательских работ, направленных на определение влияния режимов облучения и финишной термообработки на химический состав, фазовый состав и структурные характеристики материала поверхностного слоя с привлечением самых современных методов анализа, таких как, электронная Оже-спектроскопия, рентгеноструктурный анализ, сканирующая электронная микроскопия, экзoeлектронная эмиссия, рентгеновский микроанализ, просвечивающая электронная микроскопия, оптическая металлография в поляризованном свете, измерение шероховатости поверхности и др. В этой части диссертанту пришлось разрабатывать уникальные методики рентгеноструктурного анализа со снятием тонких поверхностных слоев и просвечивающей электронной микроскопии с приготовлением тонких фольг для сплавов ВТ6, ВТ8, ВТ9 и стали ЭП866Ш, а также выполнить уникальные и показательные измерения интенсивности экзoeлектронной эмиссии по поверхности лопаток. Все это, наряду с результатами исследований и испытаний, полученными расчетными данными термодинамического анализа и их сравнением с экспериментальными результатами, определило оригинальность и научную новизну использованных автором подходов при решении основных задач, направленных на разработку и внедрение технологических процессов изготовления лопаток турбины, а также 3 и 7 ступеней ротора компрессора двигателей РД33.

Общие сведения о диссертационной работе

Диссертация оформлена в соответствие со всеми требованиями ВАК к кандидатским диссертациям и содержит введение, изложение основных методик и результатов исследования в 1-6 главах, выводы и список цитируемой литературы (118 наименований) при общем объеме 121 стр. машинописного текста, 82 рисунка и 7 таблиц.

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, сформулированы цель, изложены задачи исследований, их теоретическая и практическая значимость.

В первых трех главах приведены данные по теории взаимодействия электронов с твердым телом, описано оборудование для облучения и исследования, методики анализа

состояния материала в поверхностных слоях лопаток. Кроме того, здесь проанализированы особенности использования методики термодинамического анализа к деталям из титановых сплавов, подвергнутым электронно-лучевой обработке. На основании полученных в этих главах данных А.Н. Громов выполнил оценку профилей распределения температур и напряжений в поверхностных слоях, развиваемых при различных режимах облучения, что позволило ему в дальнейшем существенно сократить время и средства, которые пришлось бы затратить на экспериментальные исследования.

Выбранный и модернизированный комплекс современных методов исследования и испытаний, а также сравнение их результатов с теоретическими данными, обеспечили безусловную надежность и достоверность всех приведенных экспериментальных результатов работы. Особое внимание в этих главах было уделено анализу отечественной и зарубежной периодики по материаловедению $\alpha+\beta$ -титановых сплавов и поверхностной инженерии изделий из жаропрочных титановых сплавов, используемых в авиационном двигателестроении.

Во второй и третьей главах описано влияние облучения на физико-химическое состояние материала поверхностного слоя и свойства лопаток (усталостная прочность, жаростойкость и эрозионная стойкость). Показано, что электронный пучок является высокоэффективным инструментом для повышения уровня служебных свойств лопаток ГТД

В четвертой главе приводятся методики проведения испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования.

Известные методы испытаний материалов на термостабильность в условиях термоциклирования основаны на нагреве до температуры эксплуатации и охлаждения до комнатной температуры деталей и модельных образцов. Реализация этих испытаний заключается в использовании различных способов нагрева и охлаждения, а также различных видов воздействия окружающей среды. Например, такие испытания очень часто проводят на воздухе при нагреве модельного образца в муфельной печи или токами высокой частоты с последующим охлаждением на воздухе или в воде. Здесь после нагрева до требуемой температуры скорость охлаждения достигает $10-100$ °С в секунду, а на цикл испытаний затрачивается 3 и более минут.

В отличие от известных способов в предлагаемом нагрев материала в поверхностном слое обеспечивается термализацией ускоренных электронов за время действия импульса $20-40$ мкс, а охлаждение теплопроводностью материала, когда тепло отводится в матричный объем за $10^{-5}-10^{-6}$ секунды. Таким образом, продолжительность одного цикла складывается из времени термализации $20-40$ мкс, времени теплоотвода (охлаждения) $10^{-5}-10^{-6}$ секунды и времени зарядки генератора импульсных напряжений от 10 до 30 секунд.

Термостабильность материала обычно проверяют визуально или металлографически. С помощью такого контроля фиксируются трещинообразование, изменения фазового состава и модификация структурных характеристик. Более информативен рентгеноструктурный анализ, методика которого подробно описана в четвертой главе.

Способ испытаний деталей машин на термостабильность в условиях термоциклирования включает: облучение поверхности детали сильноточным импульсным электронным пучком микросекундной длительности с плотностью энергии в импульсе $w=10-90$ Дж/см² при энергии электронов $E=100-120$ кэВ и числе импульсов, необходимом для первого появления изменений физико-химического состояния материала поверхностного слоя (химический состав, фазовый состав, структурные характеристики); определение физико-химического состояния материала поверхностного слоя методами оптической металлографии, рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии; определение

температурного поля в поверхностном слое при облучении с использованием программы «Betain», разработанной А.А. Яловцом.

В пятой главе приводятся методики испытаний жаростойких покрытий на адгезионную прочность с применением сильноточных импульсных электронных пучков. Приведенные здесь данные позволили впервые определить критическую силу адгезии, при которой начинает протекать процесс отслаивания покрытия, в этой связи строится зависимость «плотность энергии при облучении – температура, развиваемая в зоне адгезии – напряжения, формируемые в этой зоне – формирование несплошностей на границе покрытие-матрица или скол покрытия». Видно, что зафиксированные здесь данные свидетельствуют о хороших адгезионных свойствах покрытий, используемых в авиационном двигателестроении.

В шестой главе приведено описание установки «Геза-ММП». После проведения апробации установки проявилось снижение эффективности работы катода за счет абляционных процессов и конденсации продуктов распыления на поверхности острий диода. Был изготовлен новый катод с защитными колпачками на каждом острие, что позволило повысить продолжительность эксплуатации катода. Для полного устранения загрязнений поверхности катода продуктами разлета компонентов, рекомендовано выносить мишени в другой объем установки для чего необходимо повернуть электронный пучок.

В заключении диссертации сформулированы основные выводы по работе.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертации Громова А.Н. могут быть рекомендованы к использованию на всех предприятиях, занимающихся проектированием и изготовлением авиационных ГТД, включая АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «ОДК-Сатурн», «НПЦ газотурбостроения «Салют», ПАО «Кузнецов», ПАО «ОДК-УМПО», АО «ОДК-Климов».

Недостатки работы:

1. В диссертации остались без внимания вопросы сравнения методики ускоренных испытаний с помощью сильноточного электронного пучка и классической методики нагрев – выдержка на воздухе. Это особенно важно, так как эксплуатация изделий проходит в воздушной среде, а предлагаемый способ испытаний реализуется в вакууме;

2. Автором не предложены рекомендации о проведении испытаний на адгезию покрытий на поверхности деталей широкой номенклатуры, которые используются в других областях промышленности.

Отмеченные недостатки не затрагивают основного содержания работы, ее выводов и не снижают общей высокой оценки рецензируемой диссертации.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа посвящена методам ускоренных испытаний лопаток ГТД с покрытиями на термостабильность и адгезию в условиях термоциклирования с применением сильноточных импульсных электронных пучков и соответствует специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Диссертация Громова А.Н. является законченной и самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, в которой решена задача по разработке методов ускоренных испытаний лопаток ГТД на термостабильность и адгезию в условиях термоциклирования. Диссертация изложена технически грамотным языком, логически структурирована по главам. Публикации и автореферат в полном объеме отражают содержание и основные результаты выполненной работы.

Считаем, что представленная диссертационная работа Громова А.Н. соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства РФ от 24.09.2013 №842, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв обсужден на заседании кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов (протокол № 3 от 23 октября 2019г.).

Заведующий кафедрой конструкции и проектирования
двигателей летательных аппаратов,
д.т.н., профессор

Фалалеев С.В.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» 443086, Приволжский федеральный округ, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

Тел.: +7 (846) 267-43-00

e-mail: ssau@ssau.ru

Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <https://ssau.ru/>