

УДК 539.4

А.Р. ЛЕПЕШКИН¹, Н.Г. БЫЧКОВ¹, А.В. ПЕРШИН¹, А.Д. РЕКИН¹, В.П. ЛУКАШ¹,
С.А. МУБОЯДЖЯН², Ю.И. ГОЛОВКИН²

¹Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия

²Всероссийский институт авиационных материалов, Россия

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ И ОЦЕНКА ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ ЖАРОВЫХ ТРУБ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД С ТЕПЛОЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Разработана методика термоциклических испытаний моделей жаровых труб камер сгорания ГТД с теплозащитными покрытиями с использованием высокочастотного индукционного нагрева. Приведены результаты исследований нестационарного теплового состояния с применением тепловизора и термоциклической долговечности моделей жаровых труб с теплозащитными покрытиями.

термоциклическая долговечность, высокочастотный индукционный нагрев, модели, теплозащитное покрытие, моделирование, тепловизор, управление температурой, испытания, охлаждение

1. Формулирование проблемы

1.1. Постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами

Для обеспечения работоспособности высокоэффективных двигателей новых поколений необходима разработка более совершенных систем охлаждения, создание новых жаропрочных материалов, а также совершенствование методов защиты деталей высокотемпературного тракта ГТД с помощью теплозащитных и жаростойких покрытий.

Совершенствование системы внутреннего теплоотвода превращает детали в теплообменники и сопровождается ростом термонапряженности и снижением термоциклического ресурса. Широко используемые в настоящее время жаропрочные материалы на никелевой основе обычно работают в ГТД на предельно допустимых температурах. Повышение температуры газа можно допустить только в случае принятия мер по ограничению тепловых потоков через стенку детали. Существенного снижения тепловых потоков от газа к стенке основного материала детали можно добиться либо хорошо организованным заградительным охлаждением без эжектирования, либо нанесением на поверхность

наиболее нагреваемых участков детали теплозащитных покрытий (ТЗП).

Среди множества технологий нанесения покрытий заметное место занимают и широко применяются различные методы газотермического напыления [1, 2].

Наиболее эффективная защита материала детали от теплового потока с помощью ТЗП происходит в случае использования покрытий [3] на основе диоксида циркония. Однако весьма проблематичны вопросы термоциклической долговечности, поскольку сопротивление разрушению этих покрытий при растяжении очень низкое, а при термоциклировании обычно возникают знакопеременные термоциклические нагрузки [4].

1.2. Постановка задачи исследования

В настоящее время для исследования циклической долговечности ТЗП в процессе их разработки применяется радиационный нагрев с малой скоростью (менее 20 °С/с), что не соответствует реальным рабочим условиям. При таких малых скоростях нагрева термические напряжения практически отсутствуют, а основным повреждающим фактором является окисление подслоя, ведущее к сколу покрытия.

Фактически эти испытания представляют собой испытания на жаростойкость.

В реальных условиях скорость изменения температуры детали составляет 100 ... 200 °С/с. При этом возникают циклические деформации основного материала, сопровождаемые знакопеременными нагрузками. Результаты испытаний деталей с ТЗП на термоусталость могут значительно отличаться от результатов испытаний на циклическую жаростойкость, которые были получены разработчиками при малой скорости изменения температуры. Поэтому при создании ТЗП необходимо проводить исследования его термостойкости в паре с защищаемым материалом в условиях высокой скорости нагрева и охлаждения. Испытания в газодинамическом потоке дороги и длительны. Существенно дешевле и оперативнее использовать высокочастотный (ВЧ) индукционный нагрев [5].

Существует мнение, что высокочастотный нагрев не позволяет имитировать нагрев деталей с теплозащитными керамическими покрытиями в газовом потоке, поскольку керамика является диэлектриком, а тепловыделение происходит в металле, лежащем под ТЗП, что нарушает температурное распределение и тепловой поток идет не от керамики к металлу, а наоборот. Это приводит к неправильному распределению термонапряжений между металлом и керамикой, следовательно результаты испытаний на термоусталость при индукционном нагреве неадекватны испытаниям, проведенным при нагреве в газовом потоке.

Однако процесс высокочастотного нагрева [6] включает не только индукционный нагрев токопроводящих материалов, но также осуществляет и конденсаторный (диэлектрический) нагрев диэлектриков. Динамика нагрева покрытия и основного материала зависит от электрофизических и теплофизических свойств материала, его объема, условий охлаждения, интенсивности нагрева объекта, диэлектрических свойств керамического покрытия и час-

тоты тока, на которой производится нагрев. Расчетное моделирование условий нагрева детали с керамическим ТЗП проработано недостаточно по сравнению с тепловыми расчетами деталей, работающих в газодинамическом потоке.

Более достоверные результаты о температурном состоянии деталей с керамическим ТЗП при нагреве их в высокочастотном электромагнитном поле и их термостойкости могут быть получены путем проведения экспериментальных исследований. Для создания задела, необходимого для разработки расчетных методов определения теплонапряженного состояния деталей с ТЗП, при их нагреве в высокочастотном электромагнитном поле и определения экспериментальной оценки термоциклической долговечности деталей с ТЗП, в данной работе поставлена задача по разработке методики испытаний модели жаровых труб с ТЗП на основе двуокиси циркония.

1.3. Цель исследований

Цель работы: проведение экспериментальных исследований по определению температурного состояния моделей жаровых труб с ТЗП из диоксида циркония при высокочастотном нагреве и сравнение термоциклической долговечности моделей с теплозащитным покрытием и без него.

2. Методика и результаты исследований

Испытания на термоусталость моделей жаровых труб проводились при индукционном высокочастотном нагреве объекта на частоте 440 кГц по разработанной методике на установке [7] с высокочастотным ламповым генератором (ВЧГ).

С целью проведения сравнительных термоциклических испытаний рабочая поверхность образцов из листового сплава ВЖ159 толщиной 1,0 мм и с предварительно проделанными перфорационными отверстиями подвергались пескоструйной обработке

электрокорундом и последующему нанесению двух вариантов теплозащитного покрытия (ТЗП), отличающихся между собой жаростойким соединительным слоем.

В первом варианте жаростойкий соединительный слой ТЗП наносился плазменным напылением в открытой атмосфере на установке УПУ-3Д. Жаростойкий слой наносился из порошка системы NiCo-CrAlY (марка порошка ПНХ20К20Ю13) толщиной 140 – 170 мкм (удельное накопление массы образцов от подслоя $\Delta M_{\text{п}} = 900 - 1100 \text{ г/м}^2$).

Во втором варианте на поверхности жаростойкого слоя из порошка системы NiCoCrAlY формировался по шликерной технологии алитированный слой с $\Delta M_{\text{и}} = 20 \text{ г/м}^2$.

Керамический слой ТЗП наносился плазменным напылением в открытой атмосфере на установке УПУ-3Д из порошка $\text{ZrO}_2\text{7Y}_2\text{O}_3$ (% масс). Толщина керамического слоя варьировалась в пределах 220 – 260 мкм.

Внутри образца подается воздух с заданным расходом и давлением. Такая схема обеспечивает возможность воспроизведения на модели эксплуатационных температурных полей и экспериментального определения термоциклической долговечности моделей секции жаровой трубы с различными вариантами теплозащитных покрытий и без них.

Расход охлаждающего воздуха контролировался с помощью расходомера и составлял 12 г/с.

Управление температурой осуществляется с помощью хромель-алюмелевой (ХА) термопары $\varnothing 0,2 \text{ мм}$. Контроль за температурным состоянием рабочего участка осуществлялся тепловизором.

При частоте 440 кГц распределение высокочастотной электромагнитной энергии на образце из сплава на никелевой основе с ТЗП из диоксида циркония, с учетом соотношений разогреваемых масс основного материала из сплава ВЖ159 и покрытия, а также их электро- и теплофизических свойств и условий охлаждения, составляет примерно 80 и 20%

соответственно. По результатам расчетов в этих условиях при скорости разогрева $100 \text{ }^\circ\text{C/с}$ можно ожидать на наружной поверхности модели жаровой трубы с ТЗП, контактирующей с окружающей средой, температуру примерно на 60 ... 80 $^\circ\text{C}$ выше, чем на границе перехода металл – ТЗП, т.е. будет имитироваться температурное состояние объекта.

Для экспериментальной проверки этого положения проводилось бесконтактное измерение температуры поверхности образца с теплозащитным покрытием на основе ZrO_2 с помощью тепловизора «Агента 782 SW», работающего в спектральном диапазоне 3 ... 5,6 мкм. Предварительно при нагреве модели в печи были получены опытные данные о степени черноты образца с ТЗП и без него (рис. 1).

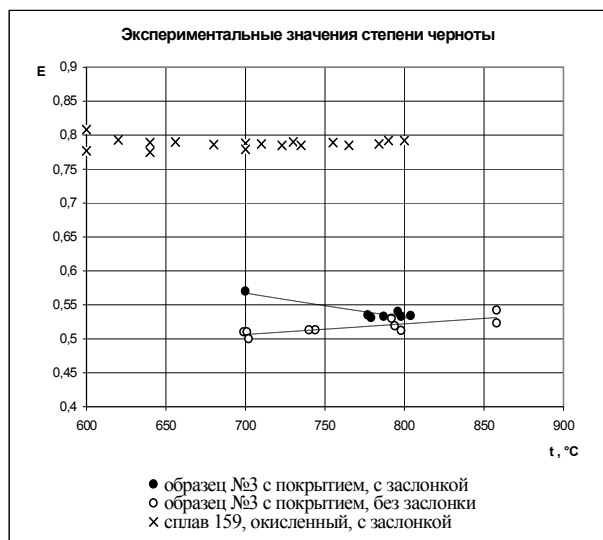


Рис. 1. Значения степени черноты образцов с ТЗП и без него

Значения степени черноты для образца с покрытием, при температурах примерно 850 – 900 $^\circ\text{C}$, близких к пиковым в цикле, равны примерно 0,55 и примерно 0,8 для образца из сплава ВЖ-159 без покрытия.

При исследованиях температурного состояния образца с покрытием в течение термоцикла, оптическая доступность объекта обеспечивалась небольшим отверстием, просверленным в индукторе, через которое сканировался участок поверхности.

Запись термоизображений при циклических испытаниях производилась на ПК типа "Pentium-3" с частотой 3 – 5 кадров в секунду (рис.2). Для оцифровки аналогового сигнала тепловизора использова-

лась плата АЦП фирмы L-card модель L-783. Записывался полный цикл (от начала разогрева образца до остывания), но в обработке использовались кадры вблизи пикового значения температуры.

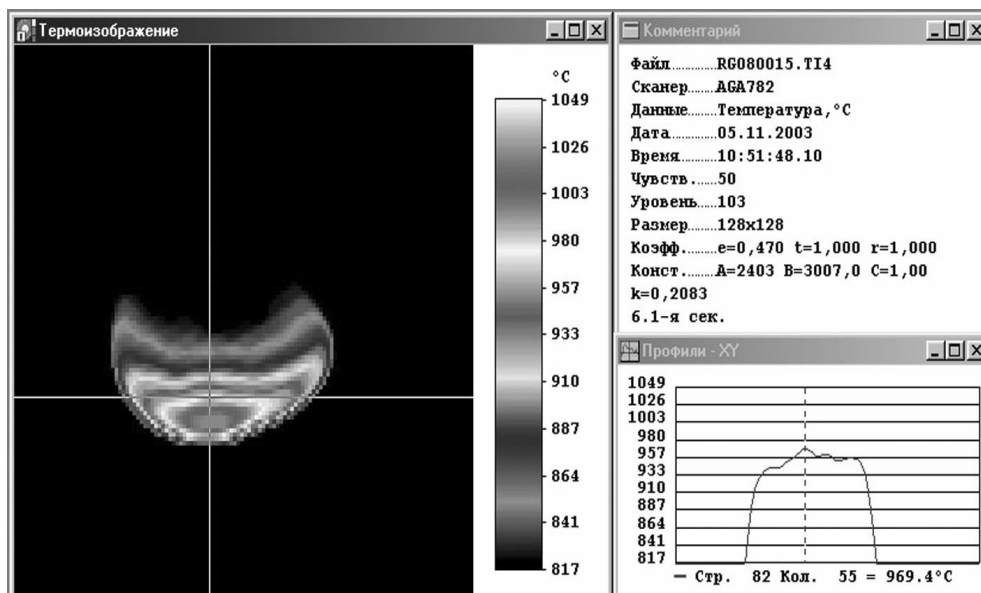


Рис. 2. Термоизображение образца с ТЗП при высокочастотном нагреве в момент максимальной температуры

В момент реализации пиковой температуры по показанию контрольной термопары на образце (расположенной по нижней кромке термоизображения) примерно на 50 ... 70 °С ниже, чем температура наружного слоя покрытия (вблизи термопары), регистрируемого тепловизором. Выполненные экспериментальные исследования и измерения температуры детали с ТЗП с помощью тепловизора при термоциклировании подтвердили расчетную величину перепада температуры по толщине покрытия.

Таким образом результаты подтвердили возможность моделирования в лабораторных условиях на установке с высокочастотным нагревом термонапряженного состояния деталей горячей части газового тракта ГТД (камер сгорания, лопаток турбины и т.д.), наблюдаемого при омывании их высокотемпературным газовым потоком в условиях эксплуатации.

Варьируя расход воздуха, подаваемого для охлаждения, мощность ВЧГ и толщину стенки можно

изменять температурный перепад на керамическом покрытии в широких пределах.

Результаты испытаний на термоусталость модельных жаровых труб при термоциклировании по режиму $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$ 350 °С \leftrightarrow 900 °С представлены в табл. 1 – 4, где $N_{ц}$ – количество циклов до образования трещины, $N_{ср.ц}$ – среднее количество циклов до образования трещины.

Таблица 1

Результаты испытаний на термоусталость модельных образцов секции жаровой трубы 1-го варианта

№ п/п	Образцы с трехслойным покрытием		
	1	2	3
$N_{ц}$	2571	3127	2723

Таблица 2

Результаты испытаний на термоусталость модельных образцов секции жаровой трубы 2-го варианта

№ п/п	Образцы с двухслойным покрытием		
	4	5	6
$N_{ц}$	5127	4325	4205

Таблица 3

Результаты испытаний на термоусталость модельных образцов секции жаровой трубы 3-го варианта

№ п/п	Образцы без покрытия					
	7	8	9	10	11	12
N _ц	1618	2571	685	890	644	440

Таблица 4

Результаты испытаний на термоусталость модельных образцов секции жаровой трубы по вариантам

№ п/п	Варианты образцов		
	1	2	3
N _{ср.ц}	2817	4552	1035

Испытания показали, что термоциклическая долговечность моделей с двухслойным покрытием толщиной $h = 360...400$ мкм возросла в среднем в 4,4 раза по сравнению с моделями из сплава ВЖ-159 без покрытия.

Для образцов с трехслойным покрытием толщиной $h = 320...520$ мкм термоциклическая долговечность возросла приблизительно в 2,7 раза, по сравнению с образцами без покрытия.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Проведенные исследования показали возможности воспроизведения при ВЧ нагреве температурного состояния моделей жаровых труб с ТЗП, соответствующего условиям эксплуатации. Проведенные термоциклические испытания деталей и их моделей с теплозащитными керамическими покрытиями с использованием индукционного нагрева позволили быстро и экономично получить экспериментальную оценку их долговечности.

Разработанную методику испытаний можно применить для оценки термоциклической долговечности деталей с ТЗП в различных отраслях машиностроения. Направлениями дальнейших исследований являются: сравнение результатов оценки термоциклической долговечности моделей жаровых труб

при газовом и высокочастотном нагревах и разработка комплексной математической модели определения теплового состояния деталей с ТЗП с учетом физических особенностей индукционного и диэлектрического нагрева и верификации ее экспериментом.

Литература

1. Износо- и жаростойкие керамические композиционные покрытия, нанесенные методом высокоскоростного газопламенного напыления // Вестник двигателестроения. – 2003. – № 2. – С. 159 – 163.
2. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия. – М.: Мир, 2000. – 516 с.
3. Зеленый Ю.А., Придорожный Р.П., Борисов В.С. Оценка эффективности теплозащитного покрытия на лопатке соплового аппарата турбины // Вестник двигателестроения. – 2003. – № 2. – С. 88 – 91.
4. Кравчук Л.В., Куриат Р.И., Буйских К.П. Термоциклическая долговечность элементов конструкций ГТД с защитными покрытиями // Вестник двигателестроения. – 2002. – С. 52 – 56.
5. Лепешкин А.Р., Безносенкова В.Н. Моделирование нестационарного теплового и термонапряженного состояния дисков и рабочих колес ГТД на разгонном стенде с использованием индукционного нагрева при неизотермических циклических испытаниях // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научных тр. – Х.: ХАИ. – 2001. – Вып. 23. Двигатели и энергоустановки. – С. 144 – 146.
6. Бычков Н.Г., Лепешкин А.Р., Першин А.В., Лепешкин С.А. Устройство для термоциклических испытаний деталей с теплозащитным покрытием. Патент РФ № 37829 на полезную модель. – 2003.
7. Кувалдин А.Б. Теория индукционного и диэлектрического нагрева. – М.: МЭИ, 1999. – 78 с.

Поступила в редакцию 15.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Фишгойт, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва.