

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ МИКРОНАНОРАЗМЕРНЫХ
КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ГТД С УЧЕТОМ РАЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
НАНЕСЕНИЯ**

А. Р. Лепешкин, Н.Г. Бычков

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,
111116, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, д.2, e-mail: lepehkin.ar@gmail.com*

Эффективность теплозащиты покрытий зависит не только от теплофизических свойств, химического состава, но и от технологии нанесения покрытия. В настоящее время данных по свойствам керамических покрытий деталей турбин недостаточно для оценки эффективности их теплозащиты в газовом потоке. Получены результаты расчетных исследований влияния различных факторов на снижение температуры охлаждаемых лопаток и оценки теплозащитного эффекта керамических покрытий охлаждаемых деталей. Проводились сравнительные исследования эффективности тепловой защиты керамических покрытий на моделях лопаток турбин авиационных двигателей. Покрытия были нанесены по плазменной и электронно-лучевой технологиям. Приводится разработанная методика по оценке эффективности теплозащиты металла с помощью микронаноразмерных покрытий, нанесенных по плазменной и электронно-лучевой технологиям при газопламенном нагреве объекта на разработанной установке. Результаты исследований показывают, что при газопламенном нагреве моделей микронаноразмерные покрытия столбчатой структуры (по электронно-лучевой технологии) лучше защищают металл, чем покрытия (по плазменной технологии). Разработанный оригинальный метод экспериментальной оценки эффективности тепловой защиты деталей с помощью покрытий при газопламенном нагреве обеспечивает получение

более точных данных о параметрах и свойств керамики в условиях эксплуатации деталей турбин авиационных газотурбинных двигателей.

Введение

Для обеспечения работоспособности высокоэффективных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) новых поколений необходима разработка совершенствование теплозащитных покрытий (ТЗП) [1, 2]. Применение теплозащитных керамических и жаростойких покрытий для охлаждаемых лопаток является актуальным направлением совершенствования авиационных и энергетических газовых турбин. ТЗП защищают не только поверхность лопаток от высокотемпературной коррозии, но и материал лопатки от разупрочнения в результате воздействия высоких температур. Основную сложность в создании микронаноструктурного ТЗП для лопаток турбин представляет сочетание свойств керамики со свойствами промежуточного жаростойкого металлическим слоя, нанесенного на поверхность лопатки.

Для обеспечения конкурентоспособности авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) приходится повышать температуру газа перед турбиной свыше 1700 К. Сохранить работоспособность деталей высокотемпературного газового тракта при этом возможно лишь при совершенствовании их теплозащиты. В настоящее в мировой практике широко используются керамические теплозащитные покрытия (ТЗП) на основе ZrO_2 . Вместе с тем, сведения об эффективности теплозащиты деталей с помощью ТЗП при нагреве их в газовом потоке весьма ограничены. Характеристики ТЗП, полученные при использовании различных известных лабораторных методов, противоречивы. В некоторых работах при использовании лазерного импульсного нагрева было получено, что теплопроводность плазменных покрытий примерно в 3 раза ниже, чем у покрытий, нанесенных по электроннолучевой технологии (ЭЛТ). Лазерный импульсный метод нецелесообразно использовать при определении температуры частично прозрачных ТЗП, так как часть лучевого потока разогревает непосредственно металл, на который нанесено ТЗП. Защитный тонкий металлический экран, толщиной 10-15 мкм, наносимый исследователями на поверхность ТЗП со стороны лазера при нагреве, сам начинает

испускать лучевой поток. В основном предпочтение отдается ТЗП, нанесенное по плазменной технологии (ПТ). В реальных условиях лопатки турбин и стенки камер сгорания нагреваются газовым потоком.

В последние годы активизировались работы по практическому использованию микронаноразмерных теплозащитных керамических покрытий, нанесенных и по электронно-лучевой технологии (ЭЛТ), на деталях высокотемпературной системы газовых турбин ГТД.

Анализ свойств теплозащитных покрытий

Теплозащитный эффект керамических покрытий достигает 100-120 °С в условиях эксплуатационных режимов. Он зависит от толщины, характеристик керамического покрытия и тепловых потоков. Значения тепловых потоков на рабочих лопатках турбин ГТД находятся в диапазоне от 1,0 до $(2 \div 2,5) \times 10^6$ Вт/(м²×К). В некоторых случаях тепловой поток составляет 3×10^6 Вт/(м²×К) и более [3].

В данной работе с использованием программного комплекса ANSYS проведены расчетные исследования влияния указанных факторов на снижение температуры охлаждаемых лопаток и оценки теплозащитного эффекта керамических покрытий охлаждаемых деталей были получены.

Значения снижения температуры основного металла охлаждаемых лопаток в зависимости от тепловых потоков по толщине $h = 0,14$ мм керамических покрытий и различной их теплопроводности показаны на рис. 1.

Значения снижения температуры основного металла охлаждаемых лопаток в зависимости от толщины керамических покрытий при газовом тепловом потоке $q = 1,8 \times 10^6$ Вт/м² и различной их теплопроводности показаны на рис. 2.

Современные охлаждаемые лопатки высокотемпературных турбин имеют направленную или монокристаллическую структуры, тонкие стенки, и высокую охлаждающую эффективность.

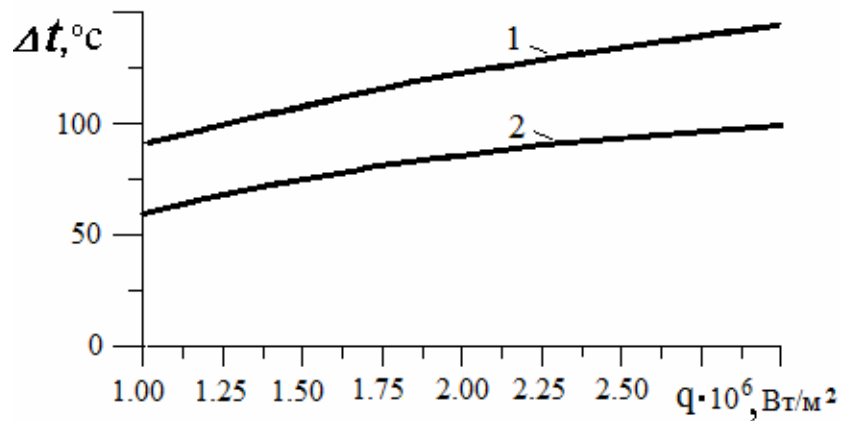


Рис. 1. Снижения температуры металла на поверхности охлаждаемых лопаток ГТД в зависимости от тепловых потоков при толщине ТЗП $h=0,14$ мм: 1 - $\lambda = 1,5$ Вт/(м·К), 2 - $\lambda=0,8$ Вт/(м·К).

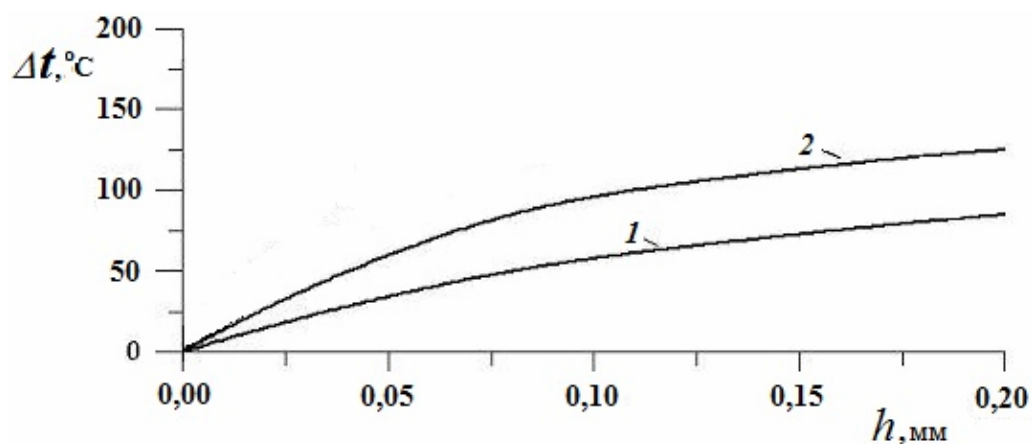


Рис. 2. Снижения температуры металла на поверхности охлаждаемых лопаток ГТД в зависимости от толщины керамического покрытия: 1 - $\lambda = 1,5$ Вт/(м·К), 2 - $\lambda=0,8$ Вт/(м·К).

В условиях эксплуатации высокие термические напряжения и деформации возникают в данных лопатках, особенно, в их поверхностных слоях. Именно поэтому характеристики термомеханической усталости столь же важны в выборе состава композиции промежуточного покрытия, как и его жаростойкость. В процессе термоциклирования промежуточное

жаростойкое покрытие не должно испытывать значительной пластической деформации. Например, эффект "коробления" поверхности лопатки всегда влечет за собой растрескивание керамического слоя. Внешняя ZrO_2 - Y_2O_3 система основного керамический покрытия может быть сформирована с использованием двух методов (рис. 3 и рис. 4): плазменное распыление порошков (ПТ-технология) или паровая конденсация при электронно-лучевом испарении керамических тремплетов (ЭЛТ-технология) [4]. Для этой системы срок службы керамического покрытия зависит от содержания Y_2O_3 . Композиции ZrO_2 -(6-9%) Y_2O_3 обычно применяются, потому что они демонстрировали максимальные сроки службы в проводимых испытаниях [5]. Однако нужно принять во внимание тот факт, что срок службы покрытия зависит не только от его химического состава, но также и от его структуры и адгезионной прочности между керамическим и промежуточным жаростойким покрытием, которое зависит от технологии нанесения.

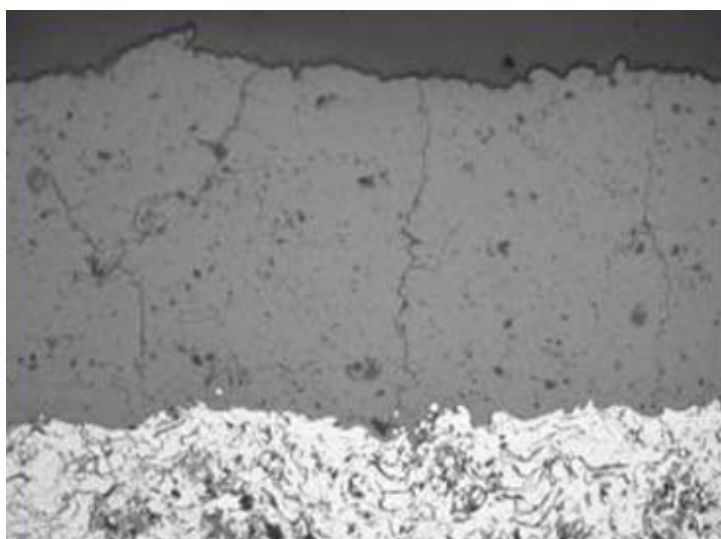


Рис. 3. Теплозащитное керамическое покрытие ZrO_2 - Y_2O_3 (APS-технология)

Путь к успеху в разработке ТЗП находится в получении требуемой адгезионной прочности керамического покрытия с жаростойким промежуточным покрытием, которая обеспечивает сохранение керамики на поверхности лопатки в течение всего срока ее службы.

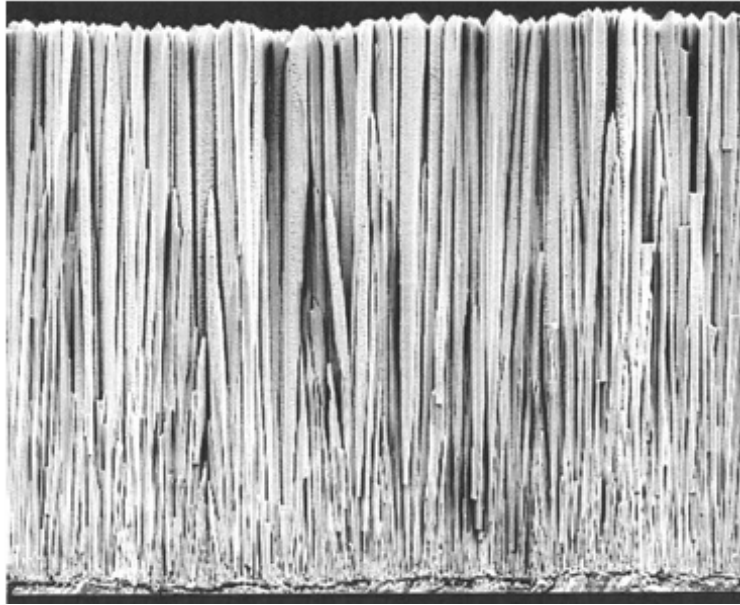


Рис. 4. Теплозащитное керамическое покрытие $ZrO_2-Y_2O_3$ (EB-технология)

Как правило, при изготовлении авиационного двигателя технология плазменного нанесения используется для лопаток сопловых аппаратов и жаровых труб камер сгорания; для рабочих лопаток турбин использование электронно-лучевой технологии является более предпочтительной в нанесении микронаноструктурного керамического ТЗП (рис. 4).

Результаты исследований

В данной работе приводится разработанная методика по объективной оценке эффективности теплозащиты металла с помощью покрытий микронаноразмерных ПТ и ЭЛТ при газопламенном нагреве объекта на разработанной установке. Суть данной оригинальной методики ЦИАМ, защищенной патентом РФ, состоит в том, что через разъемный образец, собираемый из двух половинок пропускается высокотемпературный газовый поток (рис. 5).

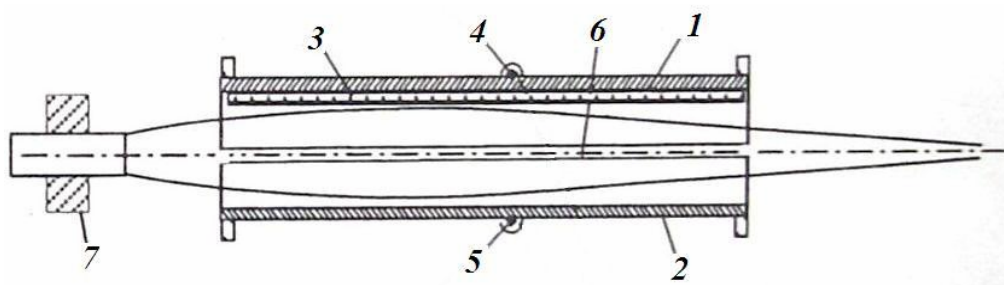


Рис. 5. Схема образца на установке: 1 – половинка образца с ТЗП; 2 – половинка образца без ТЗП; 3 – покрытие; 4 – термопара; 5 – термопара; 6 – ось образца; 7 – горелка.

На наружной поверхности половинок составного образца (рис. 5) приваривают ХА термопары диаметром 0,2 мм, которые подключаются к регистрирующей системе на базе компьютера. Половинка образца, защищенная от продуктов сгорания покрытием, разогревается меньше, чем незащищенная. Разность температур Δt стенок защищенной и незащищенной ТЗП характеризует эффективность и теплозащиты ТЗП.

Модели с керамическим ТЗП $ZrO_2 + 8\%Y_2O_3$, нанесенные по ПТ технологии, изготавливались из сплава ВХ-4А. Другие модели с микронаноразмерным ТЗП столбчатой структуры, нанесенными по ЭЛТ технологии, изготавливались из сплава ВЖ-98. Незащищенные ТЗП половинки каждой модели изготавливались из того же материала, что и половинки с ТЗП.

Для обеспечения надежности определения теплозащитной эффективности испытания на каждой модели повторялись несколько раз. При повторных испытаниях модель разворачивалась вокруг своей оси на 180° . Различия температуры при повторных замерах не превышало $10^\circ C$. Максимальная температура на "холодной" стороне стенки - $900^\circ C$. Температура газового потока - $1773 K$.

После поджига горючего газа начинается разогрев внутренних стенок обеих половинок модели. Разность температур на наружной стороне растет до тех пор, пока теплопередача от горячей поверхности стенки к холодной меньше, чем теплоотвод от наружной поверхности в окружающую среду.

При отсутствии организованного охлаждения наружной стороны стенки максимальная разность температур Δt_{\max} снаружи обеих половинок соответствует градиенту температур на ТЗП при этих условиях. В эксперименте Δt_{\max} достигается при температуре холодной стенки 600 °С.

Результаты исследований приведены на рис. 6 и рис. 7.

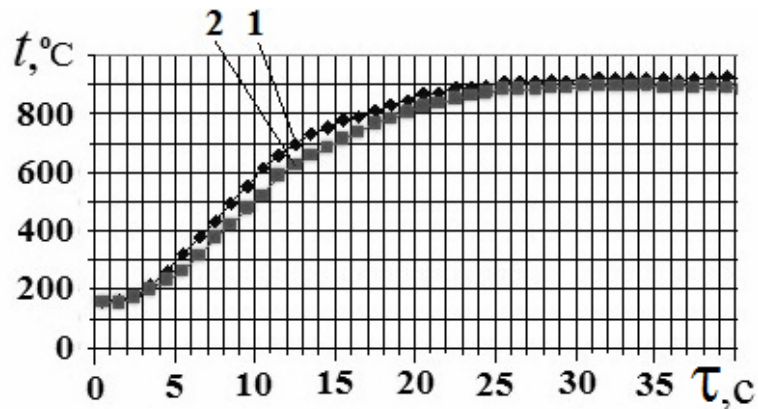


Рис. 6. Изменение температуры на наружной (холодной) поверхности образца при исследовании теплозащиты с использованием ТЗП, нанесенного по плазменной технологии: 1 – без ТЗП; 2 – с ТЗП.

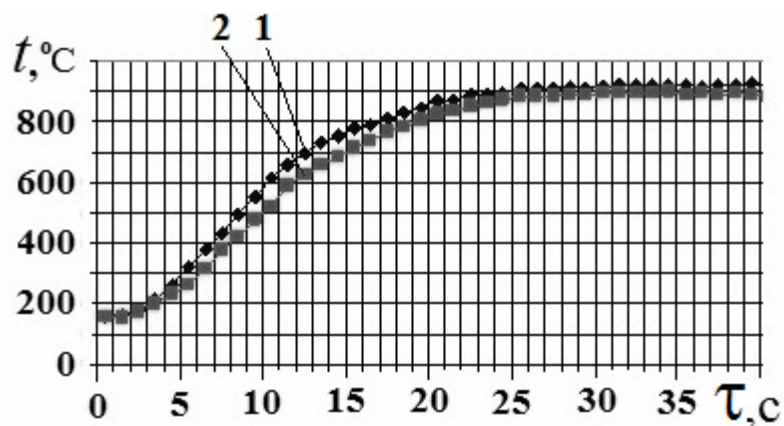


Рис. 7. Изменение температуры на наружной (холодной) поверхности образца при исследовании теплозащиты с использованием ТЗП, нанесенного по электронно-лучевой технологии: 1 – без ТЗП; 2 – с ТЗП.

Экспериментальные исследования показали, что эффективность снижения температуры металла при газопламенном нагреве после нанесения ТЗП толщиной $\delta = 120$ мкм по ПТ и ЭЛТ технологиям составляют: ПТ покрытие - $\Delta t_{\max} = 60-70$ °С; ЭЛТ (столбчатое) покрытие - $\Delta t_{\max} = 100-110$ °С. По полученным результатам можно сделать вывод, что эффективность теплозащиты ЭЛТ керамических покрытий в среднем в 1,5-1,6 раза выше, чем у ПТ покрытий.

Таким образом, полученные результаты экспериментальной оценки теплозащиты (снижения температуры стенки из жаропрочных материалов) после нанесения ТЗП из $ZrO_2 + 8\%Y_2O_3$ толщиной примерно 120 мкм показывают, что при газопламенном нагреве моделей исследованное микронаноразмерное ЭЛТ покрытие столбчатой структуры лучше защищает металл, чем испытанное ПТ покрытие. Разработанный оригинальный метод экспериментальной оценки эффективности тепловой защиты деталей с помощью покрытий при газопламенном нагреве обеспечивает получение более точных данных о параметрах и свойств керамики в условиях эксплуатации деталей турбин авиационных двигателей. Разработано теплозащитное керамическое покрытие переменной толщины для лопаток турбин ГТД, которое позволяет снизить его массу и снизить температурные напряжения в покрытии [6].

Заключение

Получены результаты расчетных исследований влияния различных факторов на снижение температуры охлаждаемых лопаток и оценки теплозащитного эффекта керамических покрытий охлаждаемых деталей. Структура и свойства керамического слоя ТЗП полностью зависят от используемой технологии нанесения.

Разработана методика по оценке эффективности теплозащиты металла с использованием микронаноразмерных покрытий, нанесенных по плазменной и электронно-лучевой технологиям при газопламенном нагреве объекта на разработанной установке. Проведены сравнительные исследования эффективности тепловой защиты керамических покрытий на моделях лопаток турбин авиационных двигателей. Результаты исследований показывают, что

при газопламенном нагреве моделей микронаноразмерные покрытия столбчатой структуры (по электронно-лучевой технологии) лучше защищают металл, чем покрытия (по плазменной технологии). Предложенный оригинальный метод экспериментальной оценки эффективности тепловой защиты деталей с помощью керамических покрытий при газопламенном нагреве можно использовать для получения более точных данных о параметрах и свойствах керамики в условиях эксплуатации деталей турбин авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок.

Литература

1. Lepeshkin A.R., Feng Shi. Ceramic Coatings - Applications in Engineering. Intech. 2012. 286 p.
2. Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. Новосибирск: НГТУ. 2006. 286 с.
3. Ingel R.P., Lewis D., Bender B.A., Rice R.W. Physical, Microstructural and Thermomechanical Properties of ZrO₂ Single Crystals, *Advances in Ceramics*, 1984, Vol.12, pp. 408-414.
4. Тамарин Ю.А., Качанов Е.Б. Электронно-лучевая технология нанесения теплозащитных покрытий // Научно-технический сборник статей “ Новые технологические процессы и надежность ГТД“. вып. 7. М.: ЦИАМ. 2008. С. 145–157.
5. Stecura S. Optimization of the Ni-Cr-Al-Y/ZrO₂-Y₂O₃ Thermal Barrier System, *Adv.Ceram. Mater.*, 1986, Vol.1, pp. 68-76.
6. Лепешкин А.Р., Бычков Н.Г., Першин А.В. Лопатка турбины. Патент РФ № 2259481, 2005.