

УДК 666.293.52.

В.Е. ВЕДЬ¹, Ю.А. ГУСЕВ², Н.И. ГУСЕВА¹, КАМБИЗ КАХРАИ²¹ *Национальный технический университет ХПИ Харьков, Украина*² *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ЖАРОСТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ГТД

Показаны преимущества применения материалов на основе фосфатных связующих перед другими типами керамических высокотемпературных материалов, разрабатываемых для защиты элементов ГТД от воздействия высокотемпературного, химически агрессивного газового потока. Рассматривается применение керамических материалов фосфатного твердения в качестве изолятора - подложки высокотемпературных тензорезисторов, применяемых при исследовании вибронпряженного состояния лопаток турбин ГТД. Приведен состав высокотемпературного покрытия, технология его нанесения и режим тепловой обработки. Рассматривается явление увеличения прочности покрытия, содержащего стеклофазу, которое объясняется скруглением кончика трещин в связи с вязким течением силикатной стеклофазы. Около температуры образования пика прочности покрытия пластическое течение размягченной стеклофазы приводит к туплению трещин. Приведены экспериментальные зависимости, подтверждающие это явление. Приведен экспериментальный метод определения температурной зависимости модуля упругости покрытия.

Ключевые слова: *фосфатное связующее, изолятор – подложка, тензорезистор, лопатка турбины, вибронпряжение, газотурбинный двигатель, стеклофаза, модуль упругости.*

Введение

Основные направления развития работ по созданию теплозащитных керамических покрытий для авиационных ГТД были сформулированы в конце 80-х годов [1]. Общим требованием для них является обеспечение надежной работоспособности в условиях воздействия скоростных потоков газов при температурах до 1600 К.

Рассматриваемые жаростойкие покрытия могут быть также использованы в качестве изолятора – подложки в высокотемпературных тензометрах, применяемых при исследовании вибронпряженного состояния высоконагретых элементов газотурбинного двигателя (ГТД). В этом случае жаростойкое покрытие должно обладать удовлетворительным удельным электросопротивлением при температуре 1000 °С (не менее $10^4 - 10^6$ Ом см).

Главенствующей задачей является получение материалов покрытий, испытывающих минимальные термические напряжения в процессе эксплуатации во всем интервале изменения температур. Решение ее зависит от создания керамических материалов, температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) которых максимально приближались бы к таковым металла. ТКЛР металлов, применяемых в двигателестроении, изменяется в весьма широких пределах - от $\approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ для сплавов на

основе титана, и до $\approx 14 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, значениями которых обладают жаропрочные сплавы на основе никеля. При этом, поскольку детали двигателей в процессе эксплуатации подвержены различного рода механическим воздействиям, например, рабочие лопатки турбин находятся в растянутом состоянии вследствие влияния центробежных сил вращения ротора, необходимым является также обеспечение возможности разрабатываемым материалам для покрытий отслеживать структурной податливостью изменения размеров деталей, на которые они нанесены. Поскольку технически невозможно получить полное соответствие температурных зависимостей относительных расширений металлов и покрытий, необходимо ТКЛР покрытий создавать так, чтобы покрытия практически во всем диапазоне изменения температур находились в состоянии сжатия, а не растяжения, так как керамика более чем на порядок эффективнее сопротивляется сжимающим усилиям, чем растягивающим. Задачей не менее важной следует считать создание высокой степени адгезии покрытий к защищаемым металлам.

Перечисленным требованиям в большей мере удовлетворяют жаростойкие безобжиговые покрытия на основе фосфатных связующих. Предлагается состав жаростойкого покрытия, практически повторяющий температурные зависимости относительно удлинения жаропрочных сплавов.

1. Безобжиговая керамика и ее аномальное разрушение

Эрозионную стойкость и прочность при высоких температурах обеспечивает покрытие, содержащее в весовых процентах: двуокись кремния 10-30; гидроокись алюминия 3-15; оксид алюминия 15-28; оксид бора 1-4; оксид кальция 1-3; оксид бария 1,5-3,5; оксид хрома 1,0-5,0; оксид титана 0,5 3,0; оксид магния 0,5 1,2 алюмофосфатное связующее (АФС) – остальное.

Связующее готовят по известной технологии, заключающейся в растворении гидроокиси алюминия в разбавленной ортофосфорной кислоте при нагревании.

Технология нанесения покрытия описываемого состава следующая .

Механическую смесь предварительно взвешенных компонентов гомогенизируют двухразовой протиркой через сито № 006 и наносят на поверхность детали. Детали с покрытием сушатся на воздухе, затем в сушильном шкафу при подъеме температуры от комнатной до 300⁰С со скоростью 1-1,5⁰С в минуту. Выдержка при конечной температуре сушки составляет 2 часа.

Покрытие предлагаемого состава обеспечивает продолжительную работу в потоке газа с температурой 1490⁰С, что объясняется наличием стеклофазы в покрытии. При жидкофазном спекании в некоторых случаях стеклофаза способствует уплотнению материала, но при критическом ее количестве она разрушает керамику.

При исследованиях высокотемпературного поведения покрытия, содержащего стеклофазу, отмечалось аномальное повышение прочности и вязкости разрушения. Это явление получило название пика прочности. Наблюдавшиеся явления увеличения прочности керамики, содержащей стеклофазу, объясняют скруглением кончика трещин. Davidge и Evans [2] предположили, что "...пик прочности сопровождается вязким течением в силикатной стеклофазе. Около температуры образования пика пластическое течение размягченной стеклофазы приводит к тушению трещин...". Частичное залечивание кончика трещины является следствием критического течения вязкостной составляющей. При этом рекомендовано увеличивать содержание стеклофазы до определенного предела для благоприятного влияния на прочность материала из-за инициации процесса "тушения" трещины.

Предложено рассматривать стеклофазу как уплотняющий клей в условиях экстремального повышения вязкости разрушения. Поэтому пик вязкости разрушения можно рассматривать как проявление процесса скольжения по границам зерен вследствие

размягчения стеклофазы, ветвления трещин и вторичного растрескивания.

Cheesemann и Groves [3] предложили механизм возникновения пика прочности, сопровождающегося повышением вязкости разрушения, основанный на вязком течении стеклофазы, при котором приложенная энергия рассеивается вследствие вязкостного вытягивания перемычек аморфного тела, соединяющих противоположные поверхности трещин во время их роста.

2. Исследования прочностных характеристик жаростойкого покрытия

Проведено исследование температурной зависимости деформации образцов системы корунд – алюмофосфатное связующее при приложении постоянных изгибающих нагрузок.

Исследования выполнены на образцах размером 30,0×8,0×0,5мм, полученных отливкой во фторпластовые формы с термообработкой при 300⁰С. Посредством высокотемпературной установки изучался прогиб образцов при приложении нагрузки и предел прочности при чистом изгибе. Для этого образцы устанавливали на опорах в объеме высокотемпературной печи, температуру в которой поднимали до заданной с постоянной скоростью 5 град/мин. Затем к образцам последовательно прилагали фиксированные удельные нагрузки, соответствующие 2,5; 3,3; 5,0 и 8,0МПа и измеряли их прогиб при каждом значении приложенного напряжения. Дальнейшим нагружением образцы доводили до разрушения. При каждой температурной остановке испытывали не менее шести образцов.

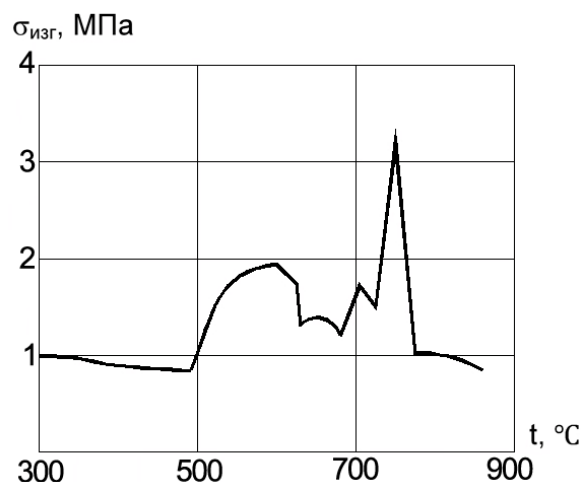


Рис. 1. Температурная зависимость предела прочности при изгибе образцов системы корунд – АФС

В отличие от вышеупомянутых работ, экспериментальная зависимость предела прочности об-

разцов от температуры испытаний в рассматриваемом нами случае отличается достаточной сложностью и указывает на «пик прочности» образцов в районе 750°C смотри рис. 1.

Характер изменения деформации образцов при фиксированной изгибающей нагрузке приведен на рис. 2.

Монотонное падение предела прочности и линейный характер деформируемости образцов (см. рис. 1), наблюдаемый до 500°C, свидетельствуют о стабильности структуры материала при таких температурах. Наиболее слабым, подверженным разрушению в первую очередь элементом структуры является стекловидная фаза, которая при таких температурах находится в твердом состоянии и поэтому упруго деформируется.

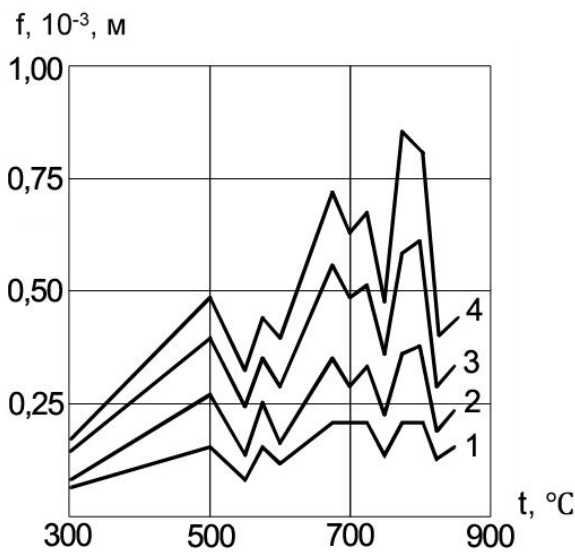


Рис. 2. Температурная зависимость деформации образцов системы корунд – алюмофосфатное связующее при приложении постоянных изгибающих нагрузок кривая 1 – 0,25 МПа; кривая 2 – 0,33 МПа; кривая 3 – 0,5 МПа; кривая 4 – 0,8 МПа

От 500 до 550°C материал линейно теряет упругость структуры, выразившуюся в уменьшении прогиба образцов, с последующим восстановлением упругих свойств к 575°C, но с дальнейшим падением при 600°C (см. рис. 2). На этом температурном участке предел прочности увеличивается в полтора раза (см. рис. 1). Наблюдаемое падение при 550°C величины прогиба образцов можно связать с дегидратацией водных алюмофосфатов (возможно находящихся в аморфном состоянии), которые присутствуют в образцах. Тогда наблюдаемую потерю величины деформации при 600°C (см. рис. 2) также следует связать с предполагаемым механизмом частичной кристаллизации размягченной фазы.

Значительную величину пластической дефор-

мации образцы испытывают при нагревании их до 775°C (см. рис. 2). При этом прочность материала падает вдвое (см. рис. 1). Это, по-видимому, обусловлено вновь трансформацией структуры материала – аморфной фазы становится больше и она обволакивает практически все зерна корунда и вторичных новообразований алюмофосфатов.

Совокупность рассмотренного позволяет сделать вывод о том, что известные модели разрушения керамических материалов, содержащих аморфную фазу, в данном случае применимы лишь к отдельным температурным интервалам, в которых происходит разрушение, а сам процесс разрушения предопределен структурой материала, соотношением и свойствами фаз, его составляющих.

Эрозионную стойкостью и прочностью при высоких температурах покрытия, представленного в разделе 1, следует связывать с наличием в нем стеклофазы, которая приводит к туплению трещины, возникающей при его разрушении.

Рассмотрение конечно-элементной модели деформирования рассматриваемого жаростойкого покрытия ставит задачу определения его модуля упругости.

2.1. Расчетно-экспериментальный метод определения модуля упругости покрытия

В основе эксперимента лежит метод совместного прогиба двухслойной пластины, состоящей из покрытия и легкодеформируемого металла [4]. При нагреве такой пластины из-за разницы ТКЛР металла и покрытия происходит прогиб конструкции, который экспериментально определяется при заданной температуре рис. 3.

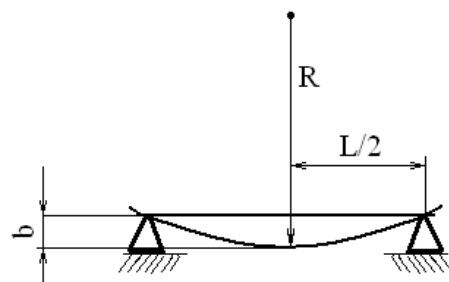


Рис. 3. Схема деформирования двухслойной пластины на опорах при температурном воздействии

Связь между прогибом двухслойной пластины b с ее радиусом определяется выражением:

$$b = L / 8R . \tag{1}$$

При этом необходимо учитывать рекомендации: - длина L должна быть больше ее ширины, а

радиус изгиба R не зависит от ширины полосы.

Определенное экспериментально значение R позволяет, используя математическую зависимость С.П. Тимошенко (2), определить модуль упругости покрытия при известном значении модуля упругости материала металлической пластины:

$$\frac{1}{R} = \frac{6(\alpha_2 - \alpha_1)(1+m)^2 T}{h[3(1+m)^2 + (m^2 + 1/mn)(1+mn)]}, \quad (2)$$

где α_1 и α_2 – термические коэффициенты линейного расширения покрытия и металла при температуре T ; m – отношение толщин покрытия и металла (h_1/h_2); h – толщина двухслойной пластины (h_1+h_2); n – отношение модулей упругости покрытия и металла (E_1/E_2).

Решение уравнения (2) относительно модуля упругости покрытия при подстановке в него результатов эксперимента деформирования двухслойной пластины из нихрома толщиной 0,2 мм с покрытием толщиной 0,3 мм на основе корунда и алюмофосфатного связующего при температуре воздействия представлено на рис.4. Для сравнения на этом рисунке приведены данные, полученные при определении модуля упругости статическим методом при изгибе образцов покрытия, отлитых в специальные фторопластовые формы.

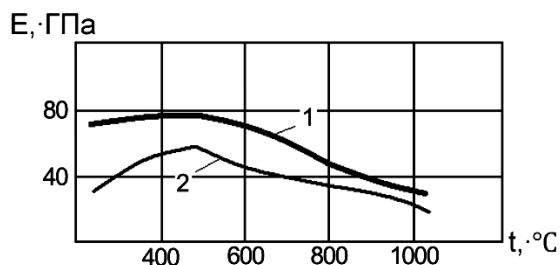


Рис. 4. Температурная зависимость изменения модуля упругости корундового покрытия, полученная методом: 1 – статическим; 2 – деформирования двухслойных пластин

Рис. 4 указывает на достаточное совпадение результатов, полученных двумя различными методами. Отклонение в полученных величинах следует отнести к влиянию на рассматриваемый показатель переходного слоя на границе металл – покрытие, который обладает своими собственными физико-механическими свойствами.

Метод деформирования двухслойной пластины, используемый при определении модуля упругости, отражает структуру формирования конечно-элементной модели деформирования покрытия, так как он позволяет косвенно учитывать механические свойства переходного слоя.

3. Теплопроводность жаростойкого покрытия

Наиболее эффективным способом изоляции теплотехнических объектов от воздействия высоких температур является применение теплоизоляционных покрытий.

Оценка качества такой теплоизоляции опирается на результаты определения теплопроводности теплоизоляционного материала и ее зависимости от температуры.

Теплопроводность рассматриваемого покрытия определялась теплофизическим экспериментом и алгоритмом обработки его результатов, опирающаяся на методологию решения обратных задач теплопроводности. Установка для определения теплопроводности различных типов керамических материалов основана на базе вакуумного универсального поста ВУП-5. Температурная зависимость теплопроводности рассматриваемого покрытия представлена на рис. 5.

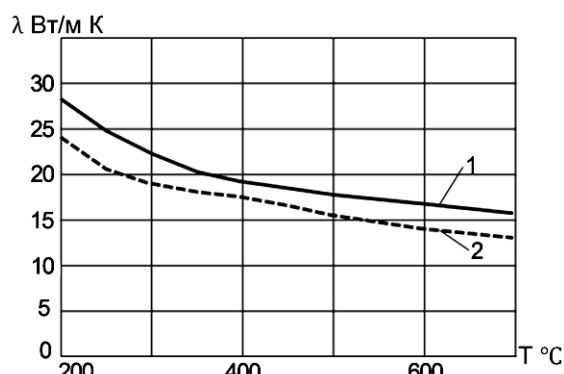


Рис. 5. Температурная зависимость теплопроводности фосфатного покрытия (плотность образцов – 2650 кг/м³, открытая пористость 12%)

Заключение

Таким образом, анализируя результаты экспериментальных исследований, приведенных в данной статье, можно сделать вывод о том, что прочностные и эрозионные свойства предлагаемых жаростойких покрытий позволяют говорить о их использовании для тепловой защиты лопаток турбин, выполненных из сплава типа ЖС6-К.

Литература

1. Оксидные покрытия для деталей теплоизолированного двигателя [Текст] / В.Н. Никитин, В.Г. Иванов, С.С. Семенов, С.В. Тахвананин, Л.М. Дудко // Военная бронетанковая техника. – 1991. – № 9. – С. 53-55.

2. Davidge, R.W. *The strength of ceramics* [Text]/ R.W. Davidge, A.G. Evans // *Materials Science and Engineering*. – 1970. – Vol. 6. – P. 281 – 298.

3. Cheeseman, C.R. *The mechanism of the peak in the strength and toughness at elevated temperature in the aluminium containing a glass phase* [Text]/ C.R. Cheeseman, G.W. Groves // *Journal of Materials Science*. – 1985. – Vol. 20, № 11. – P. 2614 – 2622.

4. Ведь, В.Е. *Расчетно-экспериментальный*

метод определения температурной зависимости условного модуля упругости покрытий деформируемых металлов [Текст]/ В.Е. Ведь // *Вестник ХПИУ*. – X.: ХПИУ. – Вып. 47. – С. 77 – 79.

5. *Thermal Conductivity: X, Data for Several Pure Oxide Materials Corrected to Zero Porosity* [Text]/ W.D. Kingery, J. Francl, R.L. Coble, T. Vasilos // *Amer. Ceram. Soc. J.* – 1954. – 37, № 2. – P. 107 – 110.

Поступила в редакцию 12.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, технический директор А.В. Белогуб, ОАО «АВТРАМАТ», Харьков.

ЖАРОСТІЙКЕ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБІН ГТД

В.Е. Ведь, Ю.О. Гусев, Н.І. Гусева, Камбіз Кахраї

Показано переваги застосування матеріалів на основі фосфатних сполучень перед іншими типами керамічних високотемпературних матеріалів, що розробляються для захисту елементів ГТД від впливу високотемпературного, хімічно агресивного газового потоку. Розглядається застосування керамічних матеріалів фосфатного твердіння в якості ізолятора - підкладки високотемпературних тензорезисторів, що застосовуються при дослідженні вібронапруженого стану лопаток турбін ГТД. Наведено склад високотемпературного покриття, технологія його нанесення і режим теплової обробки. Розглядається явище збільшення міцності покриття, що містить склофази, яке пояснюється скругленням кінчика тріщин у зв'язку з в'язкою течією силікатної склофази. Близько температури утворення піку міцності покриття пластична течія розм'якшеної склофази призводить до туплення тріщин. Наведено експериментальні залежності, які підтверджують це явище. Наведено експериментальний метод визначення температурної залежності модуля пружності покриття.

Ключові слова: фосфатне сполучення, ізолятор - підкладка, тензорезистор, лопатка турбіни, вібронапруження, газотурбінний двигун, склофази, модуль пружності.

HEAT-RESISTANT COATING FOR GTE TURBINE BLADES

V.E. Ved, Y.A. Gusev, N.I. Guseva, Kambiz Kahrai

The advantages of using materials based on phosphate binding agents over other types of ceramic high-temperature materials, which are developed to prevent high temperature and chemically aggressive gas stream influence on GTE parts, are shown. The using of phosphate hardening ceramic materials as isolator-padding of high-temperature resistive-strain sensor that is used in the study of GTE turbine blade vibratory stressed condition is considered. The chemical composition of high-temperature coating, the technology of coating and thermal mode are described. The strengthening effect of coating that contains glass phase is considered. Such effect is explained by rounding of crack tip because of viscous flow in silicate phase. Near the temperature of maximum coating strength the plastic flow of softened glass phase leads to blunting of the crack. The experimental data that proves this effect is shown. The experimental method of coating elastic module temperature dependence determination is reported.

Key words: carbon, drilling, tool wear, high temperature damage, roughness, burr.

Ведь Валерий Евгеньевич – д-р техн. наук, профессор кафедры интегральные технологии, процессы и аппараты Национального политехнического университета «ХПИ» Харьков, Украина.

Гусев Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: gusev.ua@mail.ru.

Гусева Надежда Ивановна – научный сотрудник кафедры интегральные технологии, процессы и аппараты Национального политехнического университета «ХПИ» Харьков, Украина.

Кахраи Камбиз – аспирант кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.