

УДК 539.4

А.Р. ЛЕПЕШКИН, Н.Г. БЫЧКОВ, П.А. ВАГАНОВ

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

## НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ СТОЛБЧАТОЙ СТРУКТУРЫ В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

Разработана новая методика расчета напряженного состояния теплозащитных керамических покрытий столбчатой структуры лопатки турбины ГТД в поле действия центробежных сил. В методике используются полученные расчетные формулы для определения напряжений в столбиках покрытия с учетом разных случаев их закрепления под действием изгиба в поле центробежных сил. Рассмотрены два расчетных случая. В первом случае НДС одиночного столбика рассматривалось с закреплением его ножки консольно. Во втором случае расчет НДС столбика в блоке проводился при закреплении его ножки в основании блока, а его верхней части в сплошной поверхности блока с учетом гипотезы плоскопараллельного движения. Приведены результаты расчетного моделирования напряженного состояния столбиков с учетом конусности. Получены распределения напряжений по высоте одиночных столбиков и столбиков, находящихся в блоках, керамического покрытия при воздействии центробежных сил. Анализ распределения напряжений по высоте столбика показывает, что напряжение в основании столбика в блоке значительно меньше, чем в основании одиночного столбика. Приводится оценка допустимой толщины керамического покрытия лопатки турбины ГТД в условиях воздействия центробежных сил.

**Ключевые слова:** теплозащитное керамическое покрытие, лопатка, столбчатая структура, центробежные силы, распределение напряжений.

### Введение

Для обеспечения работоспособности высокоэффективных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) новых поколений необходимо создание новых жаропрочных материалов, а также улучшение защиты деталей высокотемпературного тракта ГТД с помощью теплозащитных и жаростойких покрытий [1-5].

В последние годы активизировались работы по внедрению керамических теплозащитных покрытий (ТЗП) на лопатках турбин [2-4 и др.].

Наиболее эффективная защита материала детали от теплового потока происходит в случае использования керамических покрытий на основе диоксида циркония  $ZrO_2$ . Однако весьма проблематичны вопросы долговечности, поскольку сопротивление разрушению этих покрытий при растяжении очень низкое, а в условиях эксплуатации в покрытиях возникают напряжения от воздействия центробежных сил и знакопеременных термических напряжений.

Эффективность теплозащиты покрытий и их долговечность зависит не только от теплофизических свойств, химического состава, но и от технологии нанесения покрытия.

### 1. Методика расчета

Среди различных технологий нанесения покрытий лучшую теплозащиту при высоком сопротивлении термомеханической усталости обеспечивает электронно-лучевой метод [1-3]. С помощью указанного метода образуется керамическое покрытие столбчатой структуры на поверхности металлического подслоя (промежуточного жаростойкого покрытия) рабочей лопатки турбины. Указанное керамическое покрытие сформировано в виде столбиков (рис. 1, а, б), направленных перпендикулярно поверхности, на которую оно наносится. Столбики керамики обладают низкой теплопроводностью и обеспечивают требуемую долговечность при термоциклировании. Существенное значение имеет то, что прочностные характеристики керамики при растяжении невысокие.

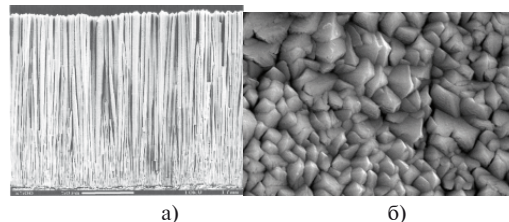


Рис. 1. Столбчатое керамическое покрытие: вид по толщине (а), вид поверхности (б)

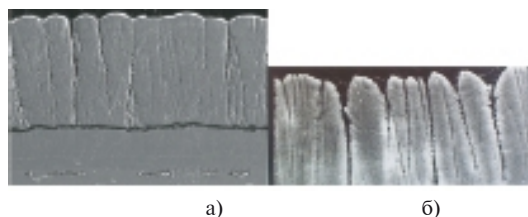


Рис. 2. Развитие трещин в покрытии приводит к возникновению блоков (а), верхняя часть покрытия (б)

В данной работе приведена разработанная методика расчета, получены формулы и выведены основные аналитические соотношения. С использованием разработанной методики проведены расчетные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) столбчатого керамического покрытия лопатки ГТД с учетом того, что в условиях эксплуатации материалы лопатки и керамического ТЗП нагружены центробежными силами. Деформация подслоя под действием центробежных сил совместно с температурной деформацией сопровождается увеличением расстояния между ножками столбчатого покрытия, сходящаяся поверхность которого при этом растрескивается на блоки и одиночные столбики (рис. 2, а, б).

Под действием центробежных сил столбики ТЗП подвергаются изгибу. Низкая прочность керамики при растяжении ( $\sigma_B \leq 50-200$  МПа) приводит к обламыванию столбиков во время изгиба. Поэтому расчет максимально допустимой толщины «столбчатого» ТЗП должен проводиться с учетом эксплуатационных нагрузок, а также конфигурации столбиков ТЗП с учетом металлизированного нижнего керамического слоя покрытия толщиной 10-15 мкм. На рис. 3 показано разрушение (выкрашивание) покрытия на высоте 10-20 мкм под воздействием эксплуатационных нагрузок.

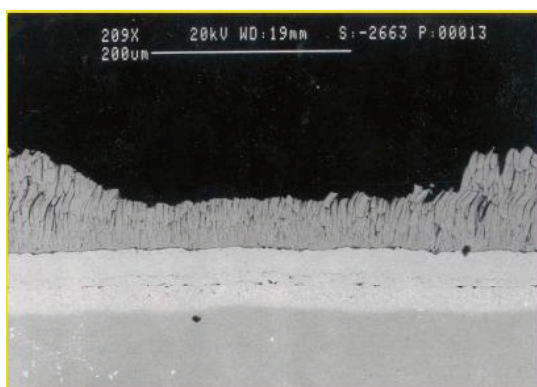


Рис. 3. Разрушение покрытия

В аналитических расчетах НДС столбиков керамического покрытия лопатки турбины задавались основные условия: частота вращения

– на стационарном режиме, радиус – от оси вращения, плотность покрытия, параметры столбиков:  $d_1$  – мкм – диаметр основания столбика,  $d_2$  – диаметр верхней части столбика,  $l$  – высота столбика (толщина покрытия). Рассматривались два расчетных случая. В первом случае НДС одиночного столбика рассматривалось с закреплением его ножки консольно. Во втором случае расчет НДС столбика в блоке проводился при закреплении его ножки в основании блока, а его верхней части в сплошной поверхности блока с учетом гипотезы плоскопараллельного движения. Положения данной гипотезы заключаются в следующем. Верхняя часть блока покрытия образована соединением верхних частей столбиков и представляет собой сплошную поверхность (крышу). Под воздействием центробежных сил на блок его крыша начинает перемещаться параллельно основанию блока. С учетом указанных условий рассчитывается НДС столбика в блоке в поле действия центробежных сил. Расчетные схемы определения НДС столбиков керамического покрытия приведены на рис. 4. Из рис. 1, а следует, что столбики имеют конусную форму, что также отражено в схемах на рис. 4.

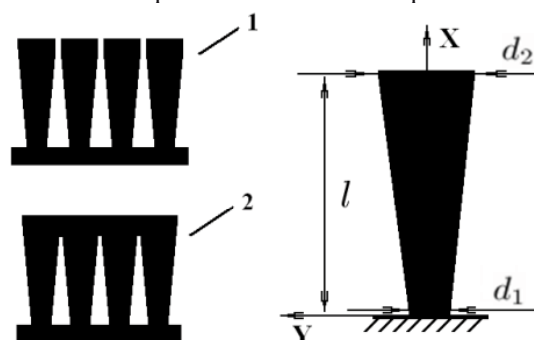


Рис. 4. Расчетные схемы определения НДС: 1 – одиночные столбики; 2 – столбики в блоках;  $d_1$  – диаметр основания столбика,  $d_2$  – диаметр верхней части столбика,  $l$  – длина высоты столбика

Методика расчета напряженного состояния столбиков теплозащитного керамического покрытия в разных случаях закрепления в поле центробежных сил приведена ниже.

Изгибающий момент под воздействием центробежных сил по длине (высоте) столбика  $x$  с учетом его изменяемого сечения:

$$M(x) = M_B + \int_x^l \rho \omega^2 r(v-x) S(v) dv, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала (керамики) столбца,  
 $\omega$  – угловая частота вращения,  
 $r$  – расстояние от столбика до оси вращения,

$S$  – изменение сечения столбика по координате  $v$ ,

$M_B$  – момент действия внешних сил в верхней части блока покрытия,

$v$  – текущая координата.

Изгибающий момент от действия центробежных сил в столбике

$$M(0) = M_B + \int_0^l \rho \omega^2 r v S(v) dv \quad (4)$$

Некоторые вспомогательные параметры:  
площадь сечения столбика по длине  $x$

$$S(x) = \pi \frac{d(x)^2}{4} \quad (5)$$

момент инерции сечения по длине  $x$

$$J(x) = \pi \frac{d(x)^4}{64} \quad (6)$$

диаметр круглого сечения по длине по длине  $x$

$$d(x) = d_0 + \frac{d_2 - d_0}{l} x \quad (7)$$

Затем

$$y'' = \frac{M(x)}{EJ(x)} \quad (8)$$

Если верхняя часть свободна:

$$M(0) = \int_0^l \rho \omega^2 r v S(v) dv \quad (9)$$

Условия закрепления столбиков в верхней части (плоскопараллельное движение)

$$d(x) = d_0 + \frac{d_2 - d_0}{l} x \quad (10)$$

$$y'(l) = 0 \quad (11)$$

Так как  $y'(0) = 0$  (жесткое закрепление в основании), то

$$\int_0^l y''(v) dv = y'(l) - y'(0) = 0 \quad (12)$$

и условие для момента

$$\int_0^l \frac{M(v) dv}{EJ(v)} = 0 \quad (13)$$

Подставляя в (10) формулы (1) мы получаем момент действия внешних сил в верхней части колонны:

$$M_B = - \frac{\int_0^l \int_0^1 (u-v) S^2(u) du \rho \omega^2 r \int_0^v \frac{dv}{d(v)^4}}{\int_0^l \frac{dv}{d(v)^4}} \quad (14)$$

Таким образом, получим  $M(x)$ :

$$M(x) = - \frac{\int_0^l \int_0^1 (u-v) S^2(u) du \rho \omega^2 r \int_0^v \frac{dv}{d(v)^4}}{\int_0^l \frac{dv}{d(v)^4}} + \int_x^l \rho \omega^2 r (v-x) S(v) dv \quad (15)$$

Зная  $M(x)$  можно найти максимальное растягивающее напряжение в сечении столбика:

$$\sigma_{\max}(x) = \frac{M(x)d(x)}{2J(x)} \quad (16)$$

## 2. Анализ полученных результатов

Аналитические расчеты НДС столбиков керамического покрытия лопатки турбины проводились при следующих условиях: частота вращения – 10000 об/мин на стационарном режиме, радиус – 400 мм от оси вращения, плотность покрытия – 4,45 г/см<sup>3</sup>, параметры столбиков:  $d_1 = 0,5$  мкм – диаметр основания столбика,  $d_2 = 0,5...5,0$  мкм – диаметр верхней части столбика,  $l$  – высота столбика (толщина покрытия).

На основе проведенных расчетов НДС получены распределения напряжений по длине (высоте) одиночных столбиков и столбиков, находящихся в блоках, керамического покрытия высотой 100 мкм при воздействии центробежных сил (как показано на рис. 5, 6, 7, 8, 9).

Зависимость напряжений в основании столбика от его длины представлена на рис. 10.

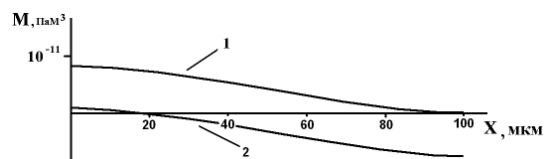


Рис. 6. Распределение изгибающего момента по длине столбика высотой 100 мкм ( $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 2,0$  мк):  
1 – одиночный столбик, 2 – столбик в блоке

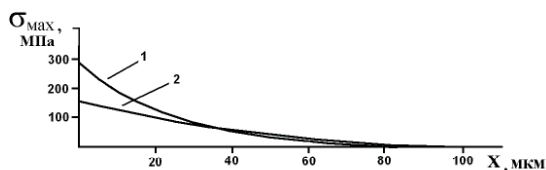


Рис. 7. Распределение напряжений по длине одиночного столбика высотой 100 мкм, имеющего разные поперечные размеры:  
1 –  $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 5,0$  мк;  
2 –  $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 2,0$  мк

Конусность столбиков определяется соотношением  $d_2/d_1$ . Из рис. 8 следует, что при увеличении соотношения  $d_2/d_1$  с 1 до 10 напряжения в основании столбика, находящегося в блоке, снижаются в два раза.

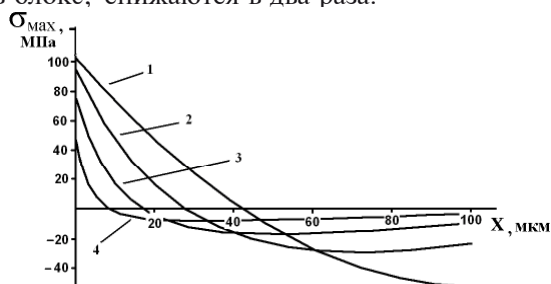


Рис. 8. Распределение напряжений по длине столбика высотой 100 мкм (в блоке), имеющего разные поперечные размеры:  
1 –  $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 0,5$  мк;  
2 –  $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 1,0$  мк;  
3 –  $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 2,0$  мк;  
4 –  $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 5,0$  мк

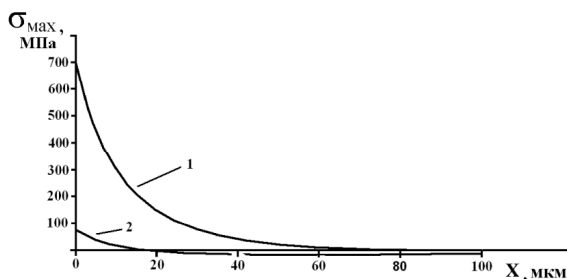


Рис. 9. Распределение напряжений по длине столбика высотой 100 мкм ( $d_1 = 0,5$  мкм,  $d_2 = 2,0$  мкм):  
1 – одиночный столбик, 2 – столбик в блоке

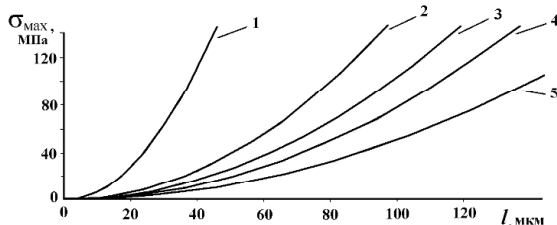


Рис. 10. Напряжения в основании в зависимости от его длины:  
одиночный столбик:  
1 –  $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 2,0$  мк;  
2 –  $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 0,5$  мк;  
столбик в блоке:  
3 –  $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 0,5$  мк;  
4 –  $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 2,0$  мк;  
5 –  $d_1 = 0,5$  мк,  $d_2 = 5,0$  мк

Анализ распределения напряжений по длине столбика высотой 100 мкм с поперечными размерами  $d_1 = 0,5$  мкм,  $d_2 = 2,0$  мкм на рис. 9 показывает, что напряжение в основании столбика в блоке меньше, чем в основании одиночного столбика в 7 раз.

На рис. 10 для сравнения напряжений в основании столбика в разных случаях показаны кривые 1 и 2 с соотношениями  $d_2/d_1$  от 1 до 2 для одиночного столбика и кривые 3, 4 и 5 с соотношениями  $d_2/d_1$  от 1 до 10 столбика в блоке при увеличении высоты столбика.

Из анализа рис. 10 следует, что имеются следующие ограничения по высоте столбика с учетом напряжений в основании: более высоты 120 мкм при  $d_2/d_1 = 10$  и 100 мкм при  $d_2/d_1 = 4$  и 80 мкм при  $d_2/d_1 = 1$  для длины столбика в блоке и 80 мкм при  $d_2/d_1 = 10$ , 40 мкм при  $d_2/d_1 = 4$  для одиночных столбиков.

### Заключение

В условиях эксплуатации при растрескивании покрытия образовавшиеся одиночные столбики подвергаются изгибу под воздействием центробежных сил и при их длине по высоте более 40-100 мкм могут сломаться. В образованных блоках столбики нагружаются в поле действия центробежных сил и при их высоте не более 120-140 мкм могут сохраниться без разрушения. Причем вероятность разрушения столбиков в блоке уменьшается при повышении конусности (соотношения  $d_2/d_1$ ). На основании проведенных исследований показано, что при проектировании столбчатых керамических покрытий их допустимая толщина должна составлять не более 140 мкм в условиях воздействия центробежных сил.

### Литература

1. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении / Ю.С.Елисеев, Н.В. Абраимов, В.В.Крымов – М.: – Высшая школа. – 1999. – 544 с.
2. Мубояджян С.А., Теплозащитные покрытия для деталей перспективных газотурбинных двигателей / С.А. Мубояджян, Ю.И. Головкин, Д.С. Горлов, Н.Г. Бычков, А.Р. Лепешкин, А.В., Першин, А.Д. Рекин // Новые технологические процессы и надежность ГТД. Научно-технический сборник. – Вып. 7. – М.: ЦИАМ. 2008. – С. 158-170.
3. Тамарин Ю.А., Качанов Е.Б. Свойства теплозащитных покрытий, наносимых электронно-лучевой технологией // Научно-технический сборник статей «Новые технологические процессы и надежность ГТД». – Вып. 7. М.: ЦИАМ, 2008. – С. 125-143.



4. Лепешкин А.Р., Бычков Н.Г., Першин А.В. Методика испытаний лопаток турбин ГТД и моделей жаровых труб с керамическими ТЗП на термическую усталость // Вестник двигателестроения. – 2008. – №2. – С. 146-150.  
 5. Пат. 2259548 Российская Федерация, МПК G01M13/00. Способ испытания корпуса на непробиваемость и устройство для его реализации /А.Р. Лепешкин, Н.Г. Бычков, А.В. Першин: заявитель и патентообла-

датель ЦИАМ - № 2004107867/28; заявл. 18.03.2004; опубл. 27.08.2005, Бюл. №24.  
 6. Пат. 2259481 Российская Федерация, МПК G01M13/00. Способ испытания корпуса на непробиваемость и устройство для его реализации /А.Р. Лепешкин, Н.Г. Бычков, А.В. Першин, В.П. Почуев: заявитель и патентообладатель ЦИАМ - № 2003133913/06; заявл. 24.11.2003; опубл. 27.08.2005, Бюл. №24.

Поступила в редакцию 01.06.2013

**А.Р. Лепешкин, Н.Г. Бычков, П.А. Ваганов. Нова методика розрахунку напруженого стану теплозахисних керамічних покриттів стовбчастої структури в полі дії відцентрових сил**

*Розроблено нову методику розрахунку напруженого стану теплозахисних керамічних покриттів стовбчастої структури лопатки турбіни ГТД в полі дії відцентрових сил. В методиці використовуються отримані розрахункові формули для визначення напружень в стовпчиках покриття з урахуванням різних випадків їх закріплення під дією згину в полі відцентрових сил. Розглянуто два розрахункових випадки. У першому випадку НДС одиночного стовпчика розглянуто із закріпленням його ніжки консольно. У другому випадку розрахунок НДС стовпчика у блоці проводився за умов закріплення його ніжки в основі блока, а його верхньої частини в суцільній поверхні блока з урахуванням гіпотези плоскопаралельного руху. Наведено результати розрахункового моделювання напруженого стану стовпчиків з урахуванням конусності. Отримано розподіли напружень за висотою одиночних стовпчиків і стовпчиків, що знаходяться в блоках, керамічного покриття за умов впливу відцентрових сил. Аналіз розподілу напружень за висотою стовпчика показує, що напруження в основі стовпчика в блоці значно менше, ніж в основі одиночного стовпчика. Приводиться оцінка припустимої товщини керамічного покриття лопатки турбіни ГТД в умовах дії відцентрових сил.*

**Ключові слова:** теплозахисне керамічне покриття, лопатка, стовбчаста структура, відцентрові сили, розподіл напружень.

**A.R. Lepeshkin, N.G. Bychkov, P.A. Vaganov. New method of calculation of stress state of ceramic thermal barrier coatings of columnar structure in the field of centrifugal**

*A new method of calculating of the stress state of the ceramic thermal barrier coatings of the columnar structure of a GTE turbine blade in the field of centrifugal forces. The method used by developed formulas for calculating the stresses in the coating columns taking into account the different cases of fixing under the influence of a bend in the field of centrifugal forces. The two calculated cases are considered. In the first case, the calculation of the stress state of a single column was conducted with cantilevered fixing his leg. In the second case, the calculation of the stress state of a single column in block was conducted while fixing of the feet in the base of block and in the upper surface of a solid block taking into account of the hypothesis of a plane-parallel movement. The results of numerical simulation of the stress state of the columns with the taper column form. The stress distributions of single columns and columns in blocks of the ceramic coating when exposed to centrifugal forces. The analysis of the stress distribution in height of the column shows that the stress at the base of the column in a block is much less than in the bottom of the single column. The evaluation of the permissible thickness of the ceramic coating of GTE turbine blades under the influence of centrifugal forces is presented.*

**Key words:** ceramic thermal barrier coating, blade, columnar structure, centrifugal forces, stress distribution.