

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ СТОЛБЧАТОЙ СТРУКТУРЫ НА СОПЛОВЫХ ЛОПАТКАХ ТУРБИН И СЕГМЕНТАХ ЖАРОВЫХ ТРУБ КАМЕР СГОРАНИЯ С УЧЕТОМ СИЛ ТРЕНИЯ МЕЖДУ КЕРАМИЧЕСКИМ СЛОЕМ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПОТОКОМ

©2011 Н. Г. Бычков, А. Ш. Хамидуллин, А. В. Першин

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

Предложена модель разрушения керамического теплозащитного покрытия столбчатой структуры, полученной электронно-лучевым методом. Проведена оценка напряженного состояния столбчатого теплозащитного покрытия на сопловых лопатках турбины и сегментах жаровых труб камер сгорания с учетом условий их работы.

Теплозащитные покрытия, керамика, электронно-лучевая технология.

Использование керамических теплозащитных покрытий (ТЗП) является одной из ключевых технологий совершенствования газовых турбин и камер сгорания авиационных двигателей. Низкая теплопроводность и высокая рабочая температура этих покрытий позволяют снизить температуру основного материала на 100...150°C, значительно увеличить долговечность детали.

В настоящее время наиболее часто применяются ТЗП на основе двуоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия ($ZrO_2 + 5-9\%Y_2O_3$). Покрытия такого состава обладают относительно низким коэффициентом теплопроводности (рис. 1). Для обеспечения требуемой адгезии керамического покрытия, на поверхность детали предварительно наносят соединительный жаростойкий подслоя в основном на основе Ni, Cr, Al и Y. Широко применяемым методом нанесения керамических ТЗП на «горячие» детали двигателя является электронно-лучевая технология, которая позволяет получать структуру покрытия, состоящую из керамических столбиков диаметрами от 0,5 до 2 мкм (рис. 2). В отличие от наиболее распространенной методики плазменного напыления, столбчатые керамические ТЗП обладают наибольшей термоциклической долговечностью при сопоставимых значениях теплопроводности [2].

Однако в эксплуатации наблюдается выкрашивание столбчатого ТЗП на высоте 10...15 мкм от основания волокон [3]. Часто такое разрушение объясняется ударным воздействием посторонних частиц [4]. Многочисленность и размеры таких зон свидетель-

ствуют о необходимости рассмотрения и других возможных механизмов повреждения ТЗП.

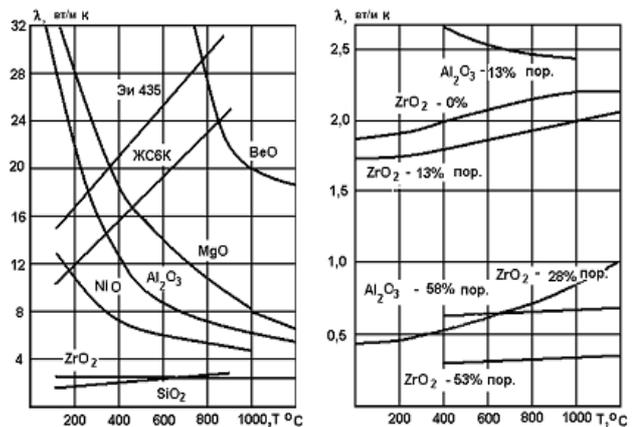
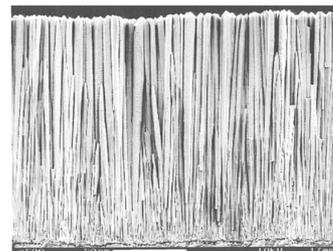
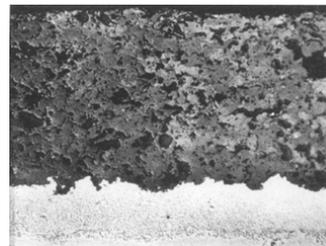


Рис. 1. Теплопроводность плотных и пористых оксидов [1]



а



б

Рис. 2. Структура ТЗП, нанесенного по электронно-лучевой (а) и плазменной (б) технологиям

Существует модель разрушения столбчатого ТЗП от горячей коррозии [5]. Она за-

ключается в том, что при температурах выше 1240°C расплавленные соединения Ca-Mg-Al-Si проникают вглубь покрытия, а при остывании затвердевают, образуя плотный стекловидный слой, разрушающий покрытие. Однако этот механизм пока изучен недостаточно. Наиболее исследованной причиной отслоения ТЗП является окисление подслоя [6]. Рост оксидной пленки на границе «керамика-подслой» способствует увеличению напряжений отрыва, которые, превысив предел адгезионной прочности, приводят к отслоению ТЗП. Однако это не объясняет наблюдаемое в эксплуатации разрушение столчатого ТЗП на высоте 10-15 мкм от основания волокон.

В связи с этим авторами статьи была предложена модель разрушения столчатого керамического ТЗП [7]. Суть этой модели состоит в том, что керамические столбики ТЗП подвержены изгибу (рис. 3) от действия эксплуатационных нагрузок. На неподвижных деталях газового тракта столбики изги-

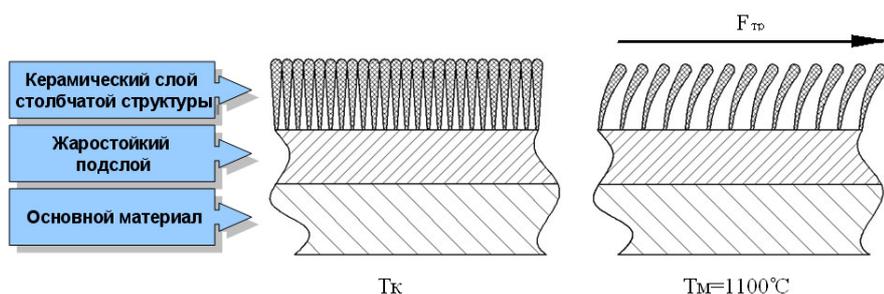


Рис. 3. Схема изгиба керамического столчатого ТЗП от действия эксплуатационных нагрузок:
 T_k и T_m — климатическая и рабочая температура основного материала детали, F — сила трения между покрытием и газодинамическим потоком, действующая на столбик

Согласно разработанной модели, была произведена расчетная оценка напряженного состояния столчатого керамического ТЗП на высоте 10 мкм от основания волокон для сопловых лопаток турбин и сегментов жаровых труб камер сгорания (КС) с учетом действия сил трения, возникающих между покрытием и газовым потоком. Из результатов ранее проведенных работ [9,10] по оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) промежуточного слоя ТЗП можно сделать вывод, что в эксплуатации происходит значительное удаление столбиков друг от друга. Поэтому в данной работе рассматривался наиболее опасный случай свободного изгиба волокон.

баются силами трения от высокотемпературного газодинамического потока.

При работе двигателя происходит разбиение покрытия на блоки (рис. 4) и увеличение расстояния между отдельными столбиками как за счет деформации основного материала детали от эксплуатационных нагрузок, так и при нагреве вследствие значительной разности в коэффициентах термического расширения керамического слоя ТЗП и основного материала детали. Возникающие изгибные напряжения в керамическом столбике могут превышать значение предела прочности керамики при растяжении ($\sigma_b=150$ МПа) и приводить к сколу ТЗП на ранней стадии эксплуатации детали. Наблюдаемое выкрашивание покрытия на высоте 10...15 мкм от основания волокон может быть объяснено тем, что при нанесении керамического слоя элементы подслоя диффундируют в столбики [8], повышая у основания волокон их предел прочности.

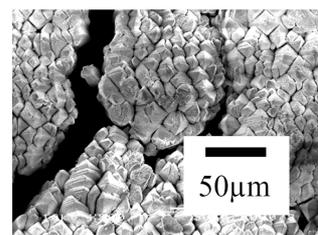


Рис. 4. Поверхность столчатого ТЗП, разделенная на блоки и одиночные столбики

Расчеты были проведены для условий нагружения, соответствующих режимам работы деталей перспективного ТРДД: для сопловой лопатки турбины — $T_{CA}=1850$ К, $P_{CA}=35$ атм, $V_{п}=600$ м/с; для жаровой трубы — $T_{жт}=2300$ К, $P_{жт}=40$ атм, $V_{п}=150$ м/с. Так как при конденсации керамического покрытия возможно формирование как цилиндрических, так и конических столбиков [8], то расчетные оценки напряженного состояния были произведены для обоих видов столбиков.

Исходные данные для расчета:

- столбики консольно закреплены у своего основания;
- диаметр цилиндрических столбиков — 0,5 мкм;

- диаметр конических столбиков: у основания – 0,5 мкм, на периферии – 2 мкм;
- высота столбчатого ТЗП: 80, 100, 120, 140 и 160 мкм.

Механические свойства ТЗП [8]:

$\rho = 4,6 \text{ г/см}^3$, $E=40 \text{ ГПа}$, $\sigma_g=15 \text{ кг/мм}^2$, $\mu=0,3$, $\alpha_T=8,0 \times 10^{-6} \text{ 1/град}$, теплофизические свойства ТЗП приведены в табл. 1.

Плотность газового потока ρ , динамическая вязкость μ и коэффициент трения C_{xf} между керамическим слоем и вязким потоком рассчитывались по формулам (1)-(3) соответственно [11]:

$$\rho = 2,7568 \frac{p}{T} \quad (1)$$

$$\mu = ((324 - 1,5(T - 273))10^{-3} p + 16,81 + 0,0484(T - 273))10^{-6} \quad (2)$$

Таблица 1. Теплофизические свойства столбчатого керамического ТЗП [8]

	Образец	Свойство	Температура, °С					
			200	400	600	800	1000	1100
		Ср, Дж/г · К	0,56	0,62	0,65	0,70	0,70	0,70
1	ZrO ₂ -8%Y ₂ O ₃	λ , Вт/м·К	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

В связи с тем что распределение напряжений по высоте конических столбиков, в отличие от цилиндрических, носит нелинейный характер, расчет напряженного состояния конических столбиков ТЗП осуществлялся с использованием комплекса ANSYS. На рис. 5 представлена конечно-элементная модель конического столбчатого ТЗП.

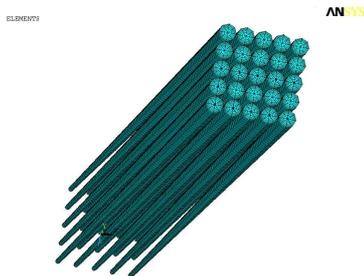


Рис. 5. Конечно-элементная модель конического столбчатого ТЗП

Проведенные расчеты напряженно-деформированного состояния ТЗП (рис. 6,7) показали, что на высоте 10 мкм от основания волокон возникающие изгибные напряжения от сил трения между керамическим слоем и газовым потоком в конических столбиках ТЗП значительно превышают (примерно в 13

$$C_{xf} = \frac{0,455}{(\lg Re)^{2,58}} - 1700 \frac{1}{Re} \quad (3)$$

где p и T – соответственно давление (МПа) и температура (К) газа, Re – число Рейнольдса.

Для расчета напряженного состояния цилиндрических столбиков ТЗП было использовано стандартное выражение [12]

$$\sigma_{изг} = \frac{F_1 \cdot h}{W}$$

где $F_1 = p \cdot S_1 \cdot C_{xf}$ - сила трения, возникающая между газодинамическим потоком и керамическим ТЗП, действующая на 1 столбик, кг; h – высота столбика, мм; S_1 – площадь поверхности одного столбика, мм²; W – момент сопротивления, мм³.

раз) аналогичные напряжения в цилиндрических столбиках ТЗП.

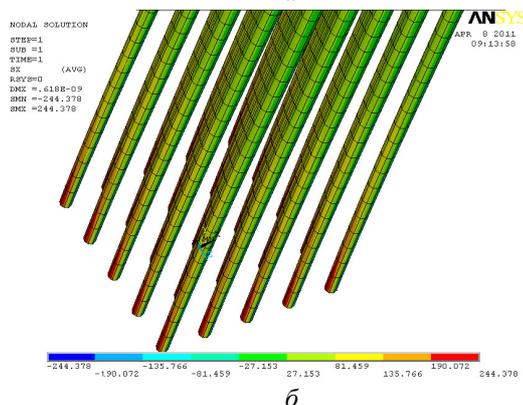
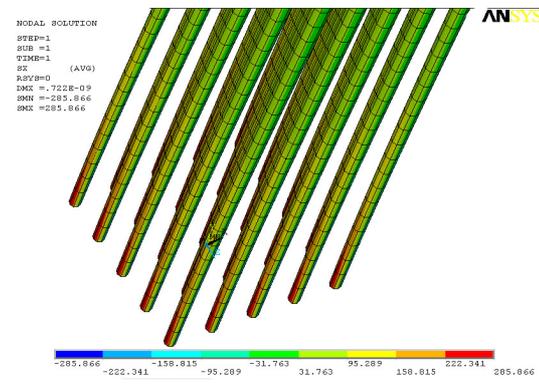


Рис. 6. Напряжения σ_x в конических столбиках ТЗП высотой 120 мкм на сопловой лопатке турбины (а) и жаровой трубе КС (б)

При толщине покрытия 120 мкм максимальные напряжения в конических столбиках на высоте 10 мкм от основания волокон на сопловой лопатке достигают 170 МПа, в сегменте жаровой трубы КС – 157 МПа (рис. 8). Возникающие изгибные напряжения превышают предел прочности керамики на растяжение и могут привести к выкрашиванию столбчатого ТЗП на указанной высоте.

В связи с этим на этапе проектирования необходимо проводить расчетную оценку

напряженного состояния столбчатого керамического теплозащитного покрытия с учетом условий работы детали, а также характеристик самого покрытия. Стоит обратить внимание, что повреждение ТЗП посторонними частицами, содержащимися в высокоскоростном газодинамическом потоке, может привести к многократному увеличению коэффициента трения, что незамедлительно отразится на напряженном состоянии столбчатого ТЗП и его долговечности.

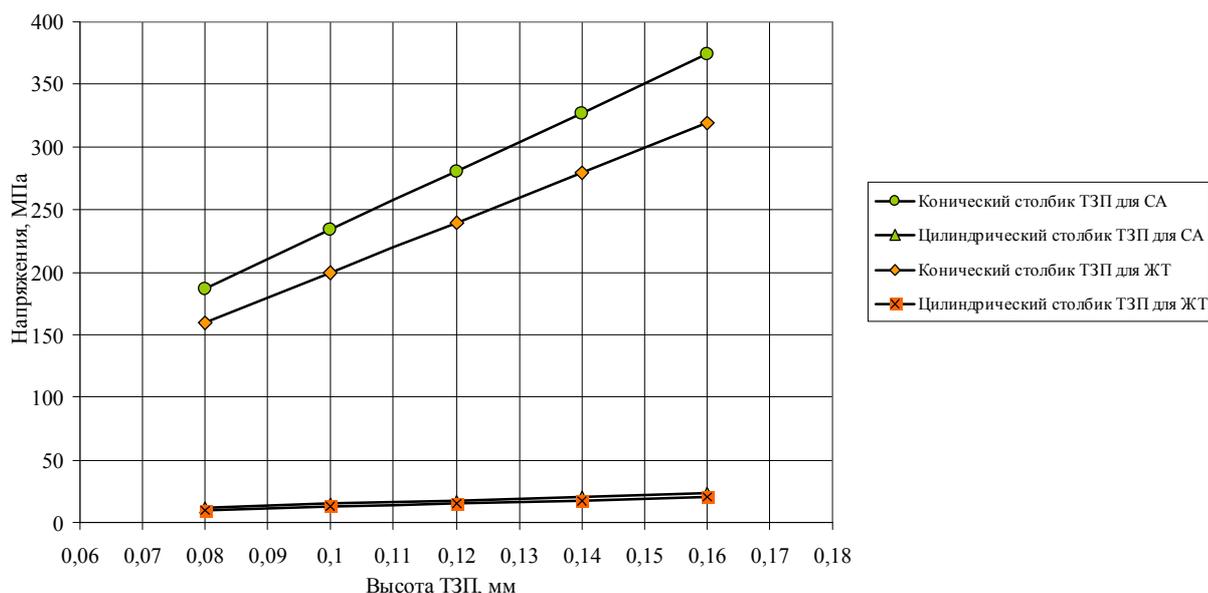


Рис. 7. Зависимость максимальных напряжений в столбиках ТЗП в зависимости от высоты волокон

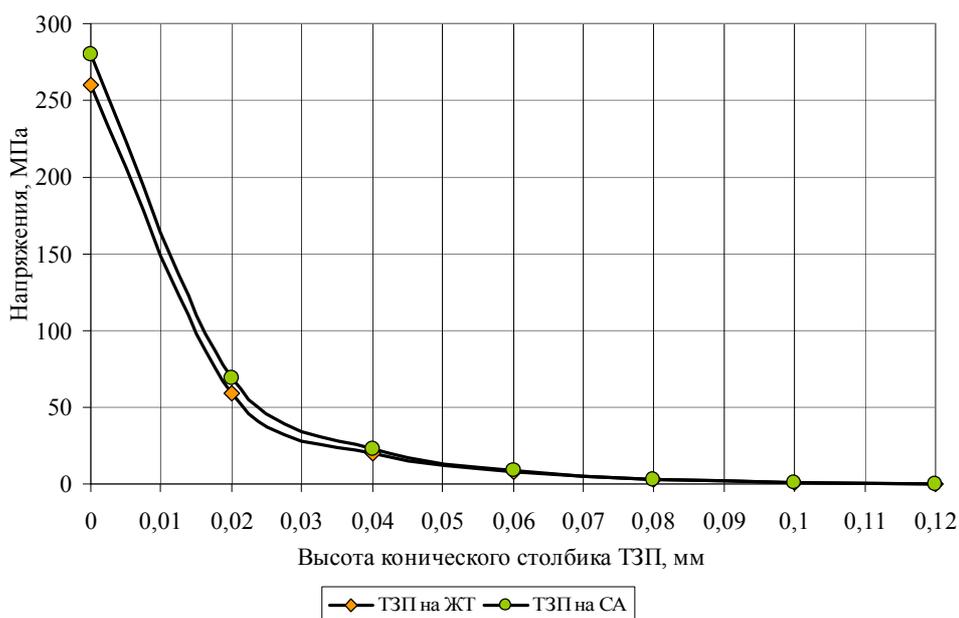


Рис. 8. Максимальные напряжения по высоте конических столбиков ТЗП толщиной 120 мкм

Выводы

1. Расчет напряженного состояния столбчатого ТЗП на сопловых лопатках турбины и сегментах жаровой трубы КС показал, что в конических волокнах максимальные изгибные напряжения от сил трения, возникающих между керамическим слоем и газодинамическим потоком, значительно (примерно в 13 раз) выше, чем в цилиндрических столбиках. При толщине покрытия 120 мкм максимальные напряжения в конических столбиках на высоте 10 мкм от основания волокон на сопловой лопатке и сегменте жаровой трубы КС превышают предел прочности керамики на растяжение.

2. С целью предотвращения выкрашивания столбчатого ТЗП на ранних стадиях эксплуатации необходимо на этапе проектирования проводить расчетную оценку напряженно-деформированного состояния столбчатого керамического ТЗП на деталях «горячего» тракта двигателя с учетом условий их работы.

Библиографический список

1. Properties and Performance of High-Purity Thermal Barrier Coatings / L. Xie, M.R. Dorfman, A. Cipitria [et al.] // JTTEE5 16:804–808, ASM International 2007. - 40p.

2. Абраимов, Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин [Текст] / Н.В. Абраимов - М.: Машиностроение, 1993. - 336с.

3. Белявин, А.Ф. Теплозащитные покрытия лопаток ГТД, получаемые электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме: коммерческое применение и перспективы [Текст] / А.Ф. Белявин, В.И. Топал // Сб. тез. докл. II Междунар. науч.-техн. конф. «Авиадвигатели XXI». –М.: ЦИАМ, 2005. - Т.3.– С. 231-233.

4. Nicholls, J.R. Erosion and Foreign Object Damage of Thermal Barrier Coatings / J.R. Nicholls, R.G Wellman // Cranfield University, Williamsburg, RTO-MP-AVT-109, 2003. - 31p.

5. Mechanisms of cracking and delamination within thick thermal barrier systems in aero-

engines subject to calcium-magnesium-alumino-silicate (CMAS) penetration / S. Kramer, S. Faulhaber, A.G. Evans [et al.]// Materials Science and Engineering, A 490, 2008, - p.26-35.

6. Miller, R.A. Oxidation-based model thermal-barrier coatings life/ R.A. Miller // J. Amer. Ceramic society, 1984, V. 67, №8. - P. 517-521.

7. Условия работы и разрушения керамических теплозащитных покрытий, нанесенных по электронно-лучевой технологии [Текст] / Н.Г. Бычков, А.В. Першин, Р.Г. Равилов [и др.] // Научные труды. - М.: МАТИ, 2009. - Вып. 15(87). - С. 52-56.

8. Тамарин, Ю.А. Электронно-лучевая технология нанесения ТЗП [Текст] / Ю.А. Тамарин, Е.Б. Качанов. Новые технологические процессы и надежность: сб. - М.: ЦИАМ,; 2008. - №7. - С.144-157.

9. Оценка напряженного состояния теплозащитных покрытий столбчатой структуры на сопловых лопатках турбин с учетом сил трения газодинамического потока [Электронный ресурс] / Н.Г. Бычков, Т.Д. Каримбаев, Б. Мыктыбеков [и др.] // Новые решения и технологии в газотурбостроении: материалы конф.-электрон. дан. – М.: ЦИАМ, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). –Систем. требования: IBM PC, Win2000 и выше.

10. Оптимизация толщины керамического теплозащитного покрытия на рабочих лопатках турбин [Текст] / Н.Г. Бычков, Б. Мыктыбеков, А.В. Першин [и др.]; под ред. Ю.А. Ножницкого, Б.Ф. Шорра, И.Н. Долгополова.// Тр. ЦИАМ №1344, Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей: сб. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. - С. 351-359.

11. Мартынов, А.К. Прикладная аэродинамика [Текст] / А.К. Мартынов - М.: Машиностроение, 1972. - 448с.

12. Биргер, И.А. Сопrotивление материалов: [Текст]: учеб. пособие / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов - М.: Наука, 1986. - 560с.

**ESTIMATION OF A TENSION OF A COLUMNAR THERMAL BARRIER COATINGS
ON NOZZLE TURBINE BLADES AND SEGMENTS OF FLAME PIPES
OF COMBUSTION CHAMBERS SUBJECT TO FRICTIONAL FORCE BETWEEN
A CERAMIC LAYER AND GAS-DYNAMIC FLOW**

©2011 N. G. Bychkov, A. S. Khamidullin, A. V. Pershin

Central Institute of Aviation Motors, Moscow

In the present work the destruction model of columnar ceramic thermal barrier coatings deposited by electron beam technology is proposed. Estimation of a tension of a columnar thermal barrier coatings on nozzle turbine blades and segments of flame pipes of combustion chambers subject to conditions of their work is made.

Thermal barrier coatings, Ceramic, Electron beam physical vapor deposition.

Информация об авторах

Бычков Николай Григорьевич, кандидат технических наук, начальник сектора Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. Тел. (495) 552-90-11. E-mail: bychkov@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: термическая и малоцикловая усталость, длительная прочность, исследования в области теплозащитных покрытий.

Хамидуллин Артем Шамилевич, инженер по испытаниям Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. Тел. (495) 555-90-11. E-mail: dizertir@list.ru. Область научных интересов: термическая и малоцикловая усталость, длительная прочность, исследования в области теплозащитных покрытий.

Першин Алексей Викторович, научный сотрудник Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. Тел. (495) 552-90-11. E-mail: bychkov@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: термическая и малоцикловая усталость, длительная прочность, исследования в области теплозащитных покрытий.

Bychkov Nikolai Grigorievich, candidate of technical science, Chief of sector of Central Institute of Aviation Motors, Moscow. Phone: (495) 552-15-09. E-mail: bychkov@rtc.ciam.ru. Area of research: thermal and low-cycle fatigue, long-term strength, research in the field of thermal barrier coatings.

Khamidullin Artem Shamilevich, test engineer of Central Institute of Aviation Motors, Moscow. Phone: (495) 555 – 58 - 79. E-mail: dizertir@list.ru. Area of research: thermal and low-cycle fatigue, long-term strength, research in the field of thermal barrier coatings.

Pershin Aleksey Viktorovich, research engineer of Central Institute of Aviation Motors, Moscow. Phone: (495) 552-90-11. E-mail: bychkov@rtc.ciam.ru. Area of research: thermal and low-cycle fatigue, long-term strength, research in the field of thermal barrier coatings.