

DOI: 10.20310/1810-0198-2018-23-122p-162-165
УДК 539.4

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ СО СТОЛБЧАТОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ГТД В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

© А.Р. Лепешкин¹⁾, А.С. Картавец²⁾, В.В. Назаров³⁾, О.И. Ильинская²⁾

¹⁾ Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,
г. Москва, Российская Федерация, e-mail: lepeskin.ar@gmail.com

²⁾ Московский авиационный институт (научно-исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация, e-mail: kartavcevartem@ya.ru

³⁾ Институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация, e-mail: inmec130@mail.ru

Проведен расчет напряженного состояния теплозащитных керамических покрытий со столбчатой микроструктурой лопатки турбины ГТД в поле действия центробежных сил. В расчете определяются напряжения в столбиках покрытия с учетом разных случаев их закрепления под действием изгиба в поле центробежных сил. Приведены результаты расчета напряженного состояния столбиков с учетом конусности. Получены распределения напряжений по высоте одиночных столбиков и столбиков, находящихся в блоках керамического покрытия при воздействии центробежных сил. Приводится оценка допустимой толщины керамического покрытия лопатки турбины ГТД в условиях воздействия центробежных сил.

Ключевые слова: расчет; керамическое покрытие; лопатка турбины; центробежные силы

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 [1–7].

В последние годы активизировались работы по внедрению керамических теплозащитных покрытий (ТЗП) на лопатках турбин [2–7 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.

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ И СХЕМЫ РАСЧЕТА

Среди различных технологий нанесения покрытий лучшую теплозащиту при высоком сопротивлении термомеханической усталости обеспечивает электрон-

но-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. 1а, 1б), 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.

С использованием разработанной методики [7] проведены расчетные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) столбчатого керамического покрытия рабочей лопатки турбины ГТД с учетом того, что в условиях эксплуатации материалы лопатки и керамического ТЗП нагружены центробежными

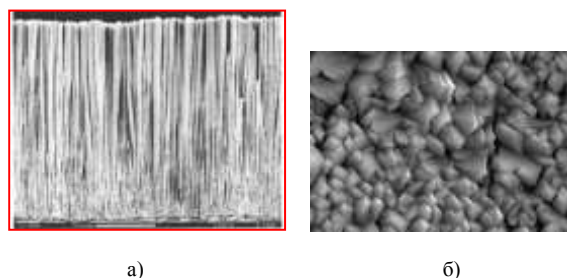


Рис. 1. Столбчатое керамическое покрытие: вид по толщине (а), вид поверхности (б)

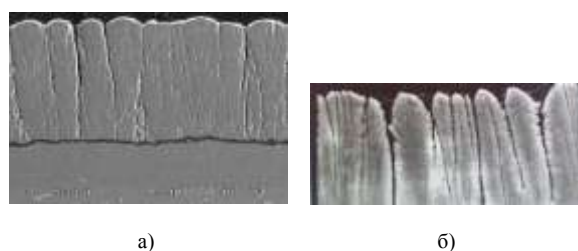


Рис. 2. Развитие трещин в покрытии приводит к возникновению блоков (а), верхняя часть покрытия (б)

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. 2а, 2б).

Под действием центробежных сил столбики ТЗП подвергаются изгибу. Низкая прочность керамики при растяжении ($\sigma_B \leq 50\text{--}200$ 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.

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 плоско-параллельного движения.

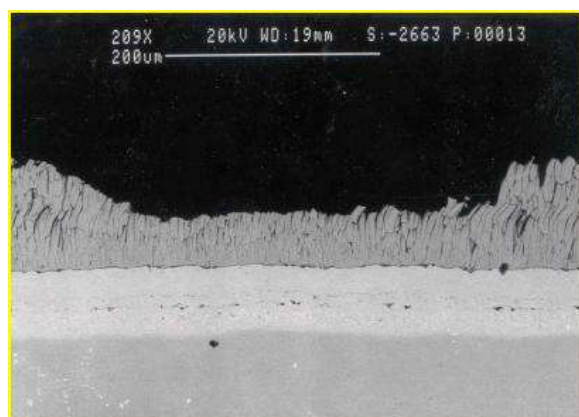


Рис. 3. Разрушение покрытия

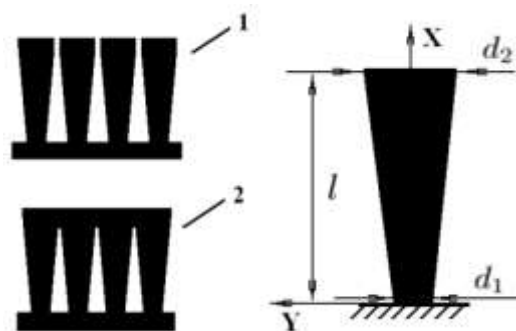


Рис. 4. Расчетные схемы определения НДС: 1 – одиночные столбики; 2 – столбики в блоках; d_1 – диаметр основания столбика, d_2 – диаметр верхней части столбика, l – длина высоты столбика

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. 1а следует, что столбики имеют конусную форму, что также отражено в схемах на рис. 4.

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 – $4,45 \text{ г/см}^3$, параметры столбиков: $d_1 = 0,5$ мкм – диаметр основания столбика, $d_2 = 0,5 \div 5,0$ 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. 5–9).

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.

Зависимость напряжений в основании столбика от его длины представлена на рис. 9.

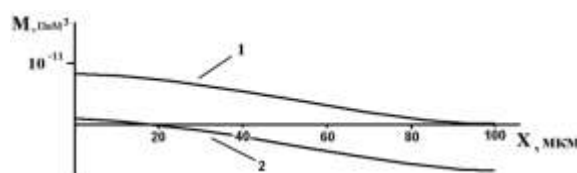


Рис. 5. Распределение изгибающего момента по длине столбика высотой 100 мкм ($d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 2,0$ мкм): 1 – одиночный столбик; 2 – столбик в блоке

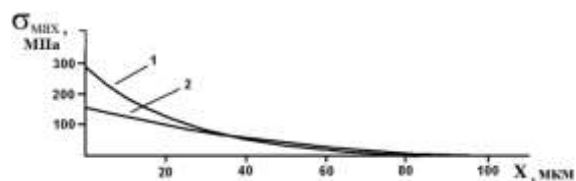


Рис. 6. Распределение напряжений по длине одиночного столбика высотой 100 мкм, имеющего разные поперечные размеры: 1 – $d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 5,0$ мкм; 2 – $d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 2,0$ мкм

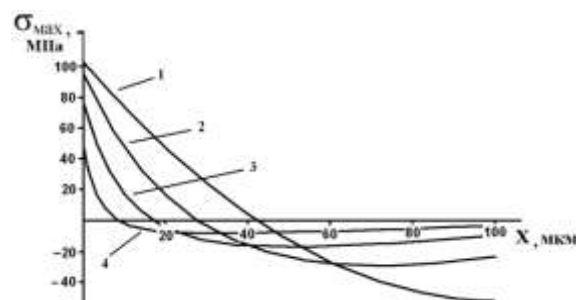


Рис. 7. Распределение напряжений по длине столбика высотой 100 мкм (в блоке), имеющего разные поперечные размеры: 1 – $d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 0,5$ мкм; 2 – $d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 1,0$ мкм; 3 – $d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 2,0$ мкм; 4 – $d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 5,0$ мкм

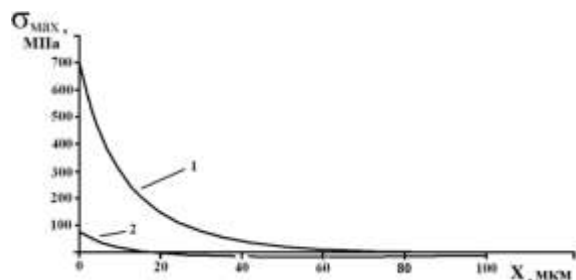


Рис. 8. Распределение напряжений по длине столбика высотой 100 мкм ($d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 2,0$ мкм): 1 – одиночный столбик; 2 – столбик в блоке

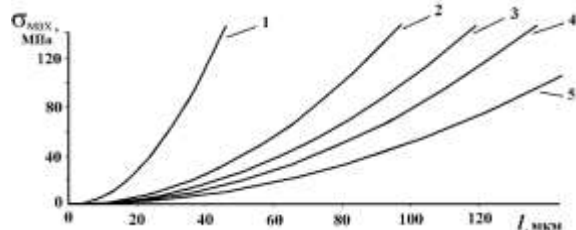


Рис. 9. Напряжения в основании в зависимости от его длины: одиночный столбик: 1 – $d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 2,0$ мкм; 2 – $d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 0,5$ мкм; столбик в блоке: 3 – $d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 0,5$ мкм; 4 – $d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 2,0$ мкм; 5 – $d_1 = 0,5$ мкм, $d_2 = 5,0$ мкм

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. 9 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. 9 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.

ВЫВОДЫ

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. М.: Высш. шк., 1999. 544 с.
2. Мубояджян С.А., Головкин Ю.И., Горлов Д.С., Бычков Н.Г., Лепешкин А.Р., Перишин А.В., Рекин А.Д. Теплозащитные покрытия для деталей перспективных газотурбинных двигателей // 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 // Новые технологические процессы и надежность ГТД. Научно-технический сборник статей. Вып. 7. М.: ЦИАМ, 2008. С. 125–143.
4. Лепешкин А.Р., Бычков Н.Г., Перишин 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. Lepeshkin A.R., Feng Shi et al. Ceramic Coatings – Applications in Engineering. Intech, 2012. 320 p.
6. Lepeshkin A.R., Bichkov N.G. Investigations of thermal barrier coatings of turbine parts using gas flame heating // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 899. P. 072002.
7. Лепешкин А.Р., Бычков Н.Г. Расчетное моделирование НДС керамических ТЗП при воздействии центробежных и газодинамических сил // Авиадвигатели XXI век: сборник тезисов докладов Всерос. науч.-техн. конф. М.: ЦИАМ, 2015. С. 650–651.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-00014а).

Поступила в редакцию 20 апреля 2018 г.

DOI: 10.20310/1810-0198-2018-23-122p-162-165

CALCULATION OF STRESS STATE OF HEAT-PROTECTIVE CERAMIC COATINGS WITH A COLUMNAR MICROSTRUCTURE OF THE GTE TURBINE BLADE IN THE CENTRIFUGAL FORCE FIELD

A.R. Lepeshkin¹⁾, A.S. Kartavtsev²⁾, V.V. Nazarov³⁾, O.I. Ilinskaja²⁾

¹⁾ Baranov Central Institute of Aviation Motors Development, Moscow, Russian Federation,
e-mail: lepeshkin.ar@gmail.com

²⁾ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation,
e-mail: kartavcevartem@ya.ru

³⁾ Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation,
e-mail: inmec130@mail.ru

The stress state of heat-protective ceramic coatings with a columnar microstructure of the GTE turbine blade in the centrifugal force field is calculated. In the calculation, the stresses in the cover columns are determined, taking into account the different cases of their fixation under the influence of bending in the field of centrifugal forces. The results of the calculation of the stressed state of the columns are given taking into account the conicity. The stress distributions have been obtained for the height of a single columns and columns in blocks of the ceramic coatings under the action of centrifugal forces. The estimation of admissible thickness of a ceramic coating of a blade of a turbine GTE in conditions of influence of centrifugal forces is resulted.

Keywords: calculation; ceramic coating; turbine blade; centrifugal forces

ACKNOWLEDGEMENTS: The work is fulfilled under financial support of Russian Foundation for Basic Research (grant no. 16-08-00014a).

Received 20 April 2018

Лепешкин Александр Роальдович, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва, Российская Федерация, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник сектора отделения прочности, e-mail: lepeshkin.ar@gmail.com

Lepeshkin Alexander Roaldovich, Baranov Central Institute of Aviation Motors Development, Moscow, Russian Federation, Doctor of Technics, Senior Research Worker, Head of Sector of Strength Department, e-mail: lepeshkin.ar@gmail.com

Картавцев Артем Сергеевич, Московский авиационный институт (научно-исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация, инженер, e-mail: kartavcevartem@ya.ru

Kartavtsev Artem Sergeevich, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation, Engineer, e-mail: kartavcevartem@ya.ru

Назаров Владлен Витальевич, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация, научный сотрудник Института механики, e-mail: inmec130@mail.ru

Nazarov Vladlen Vitalevich, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, Research Worker of Institute of Mechanics, e-mail: inmec130@mail.ru

Ильинская Ольга Игоревна, Московский авиационный институт (научно-исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация, кандидат технических наук, доцент, e-mail: madam.ilinskaya@yandex.ru

Ilinskaja Olga Igorevna, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation, Candidate of Technics, Associate Professor, e-mail: madam.ilinskaya@yandex.ru