

УДК 621.452.3.01.03

Оценка оптимальной толщины теплозащитных покрытий столбчатой структуры на рабочих лопатках турбин с учетом действия центробежных нагрузок

Бычков Н.Г., Климов Д.А., Мыктыбеков Б., Низовцев В.Е.

Аннотация

В представленной работе предложена оригинальная модель разрушения столбчатых керамических теплозащитных покрытий (ТЗП) от действия эксплуатационных нагрузок. Представлены результаты впервые проведенных расчетов максимальных напряжений, возникающих при изгибе цилиндрического керамического столбика, консольно-закрепленного на лопатке турбины, от действия центробежных сил.

Ключевые слова

теплозащитные покрытия (ТЗП); вакуумно-плазменное напыление; электронно-лучевое осаждение; оксидная керамика; столбчатая структура.

Введение

Для увеличения ресурса и повышения надежности охлаждаемых лопаток ТВД используются теплозащитные покрытия из керамических материалов. Они позволяют уменьшить термические напряжения и, следовательно, увеличить их долговечность и повысить температуру газа перед турбиной.

В настоящее время широкое распространение в авиационном двигателестроении получили теплозащитные покрытия (ТЗП), получаемые двумя способами – вакуумно-плазменным напылением и электронно-лучевым осаждением. Такие ТЗП в основном изготавливаются из оксидных керамик, так как они обладают наилучшим соотношением низкой теплопроводности (рис.1) и рабочей температурой

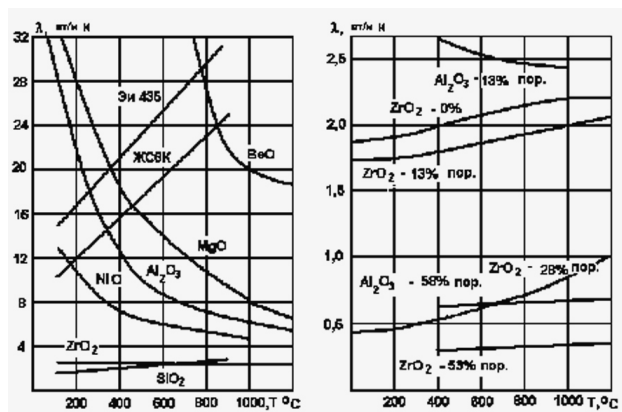


Рис. 1. Теплопроводность плотных и пористых окислов [1]

Сведения о влиянии технологии нанесения ТЗП на теплопроводность противоречивы [1],[2], что вероятно связано с особенностями методик определения теплопроводности покрытий. Для рабочих условий эксплуатации деталей турбин и камер сгорания в ЦИАМ была разработана оригинальная методика определения эффективности теплозащиты деталей с различными покрытиями при газопламенном разогреве [3]. Исследованиями, проведенными в ходе выполнения данного цикла работ на моделях с ТЗП, нанесенными по плазменной и электроннолучевой технологиям, установлено, что наилучшими теплозащитными свойствами в условиях газопламенного разогрева обладает ТЗП столбчатой структуры, получаемое электронно-лучевым осаждением рис. 2 [4].

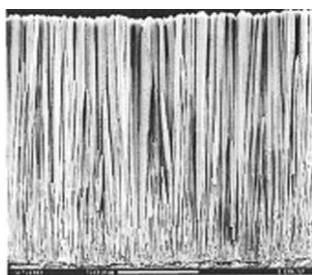


Рис 2. Структура керамического ТЗП, нанесенного по электроннолучевой технологии.

ТЗП этого типа в настоящее время внедряются на передовых фирмах в России и за рубежом. Ведущими предприятиями по нанесению покрытия являются фирмы ООО “Pratt&Whitney-Paton” и НПО “Сатурн”.

Постановка задачи

Используемая для нанесения покрытия из ZrO_2 электронно-лучевая технология (ЭЛТ) обеспечивает получение керамических столбиков диаметром 0,5...2 мкм. Коэффициент заполнения объема составляет примерно 50%. Столбчатая структура обеспечивает высокое сопротивление термоусталости покрытия [5].

Вместе с тем, из докладов сотрудников “ P&W-P ”, известно, что в эксплуатации происходит выкрашивание покрытия толщиной $\approx 120...140$ мкм. Разрушение происходит на высоте 10...15 мкм от основания столбика керамики. Подобное разрушение трактуется как результат попадания посторонних предметов, однако многочисленность и размеры таких зон ставят под сомнение это предположение. Иной механизм разрушения предлагается в работе [6]. Предполагается проникновение в керамику из газового потока кальция, магния, алюминия и кремния (CMAS). При понижении температуры ниже $1240^{\circ}C$ CMAS затвердевает нагружая покрытие. Однако, механизм объясняющий выкрашивание покрытия по этой схеме не изучен. Кроме этого широко исследуется механизм с образованием окисного слоя, вызывающего сдвиг и отслоение ТЗП от сплава на который оно нанесено. Этот механизм реален, но он не объясняет, почему разрушение происходит на высоте 10...15 мкм от поверхности.

В ЦИАМ предложена оригинальная модель работы и разрушения покрытия столбчатой структуры на рабочих лопатках [5], которая объясняет наблюдаемое выкрашивание действием эксплуатационных нагрузок.

Суть ее состоит в том, что столбики керамики, образующие покрытие, нагружены изгибающим моментом от действия центробежных сил и сил трения газового потока высокого давления. Керамика из ZrO_2 обладает высокой прочностью при работе на сжатие и низкой на растяжение. При изгибе столбиков керамики, высотой 140 мкм на растянутой стороне напряжения могут превышать предел прочности керамики, что вызывает их обламывание. Следует иметь в виду, что при формировании столбиков в процессе нанесения покрытия происходит диффузия металла подслоя в керамику столбика, в результате чего ее прочность при растяжении значительно возрастает. Глубина диффузии в керамический слой составляет 10...15 мкм. По представленным “ P&W-P ” данным на этой высоте и происходит выкрашивание покрытия.

Безоглядное стремление конструкторов улучшить теплозащиту за счет наращивания толщины покрытия бесперспективно, т.к. при этом будет возрастать изгибающий момент от действия центробежных сил и происходить досрочное выкрашивание покрытия.

Необходимо разработать методику расчетного определения предельной толщины столбчатого керамического покрытия, последующее увеличение которого было бы нецелесообразно из-за прочностных и эксплуатационных ограничений.

Поведение ТЗП при работе и возникающие нагрузки

В процессе нанесения покрытия лопатка не нагружена, а вершины волокон обычно имеют местное сращивание.

В условиях эксплуатации под действием центробежной нагрузок рабочая лопатка вытягивается и ножки столбиков, выращенных на металлическом подслое удаляются друг от друга. Кроме того, термическое расширение при разогреве лопатки так же приводят к удалению столбиков друг от друга, поскольку $\alpha_{ZrO_2} \ll \alpha_{л}$. Происходит разделение сросшихся участков поверхности ТЗП на блоки и одиночные столбики (рис.3), которые могут изгибаться в поле действия центробежных сил.

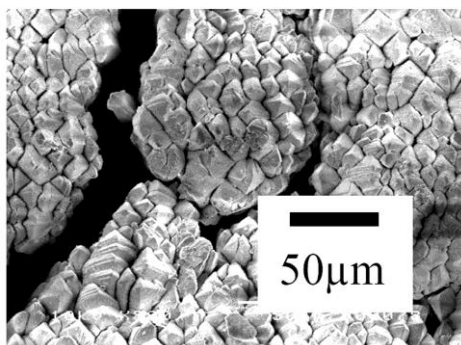


Рис 3. Поверхность ТЗП разделенная на блоки

Было рассчитано максимальное напряжение, возникающее при изгибе керамического, консольно закрепленного на поверхности лопатки цилиндрического столбика от действия центробежных нагрузок.

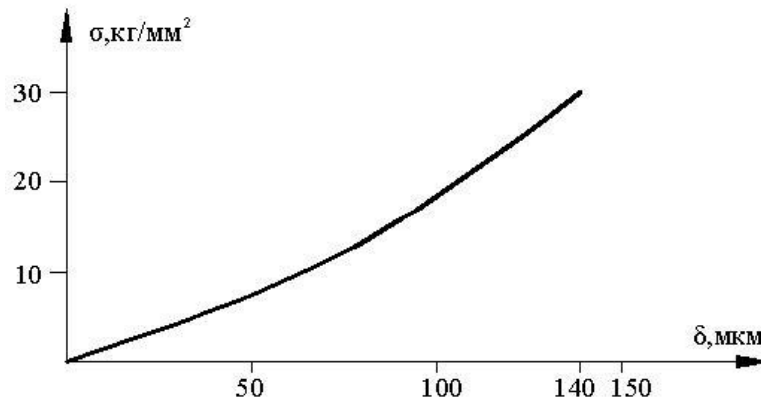


Рис. 4. Напряжения в корневом сечении столбика покрытия в зависимости от высоты при действии центробежных сил

Максимальные растягивающие напряжения при изгибе в поле действия центробежных сил освобожденного от боковой связи столбика существенно превышают предел прочности керамики. В реальных условиях изгиб столбиков ограничивается размером образовавшихся между ними зазоров и необходимо выполнять расчет с учётом температурного напряженно-деформированного состояния самой лопатки.

В большинстве работ, например [7], [8], ТЗП представляются в виде сплошной среды с приведенными механическими характеристиками. Этот подход, позволяя определить общие напряжения в покрытии, не дают возможности учесть структурные особенности ТЗП столбчатой структуры. Кроме того, отдельные столбики ТЗП не связаны между собой и в целом образуют пористый материал. Поэтому используемые модели деформирования не позволяют выявить влияние внешних нагрузок на отдельные структурные составляющие ТЗП. Для решения задачи предлагается использовать многоуровневую иерархическую систему математических моделей. Суть этого подхода состоит в применении двух математических моделей, соответствующих макро и микро уровням. Вначале решается задача на уровне макромоделей – определяется напряженное состояние лопатки при заданных условиях механического нагружения и температурных воздействий. С учетом условия неразрывности перемещений, полученные в макромоделей перемещения принимаются в качестве граничных условий для решения задачи на уровне микромоделей с учетом структурного строения ТЗП.

Как видно из полученных результатов расчета - наибольшие изгибающие напряжения в радиальном направлении у основания столбцов. Они выше предела прочности σ_b керамики. Это объясняется действием изгибающего столбика момента от центробежных сил. Целесообразно уменьшать высоту столбиков, но при этом термические напряжения будут

возрастать. В поисках оптимального решения были проведены расчеты ТЗП различной толщины, так как уменьшение толщины ТЗП увеличивает градиент температуры и это приводит к повышению влияния температурных напряжений.

Дополнительные расчеты НДС лопаток и покрытий производились для ТЗП толщиной 80, 100 и 120 мкм. Граничные условия всех вариантов оставались неизменными.

Результаты расчета максимальных напряжений в столбике в месте заделки от действия центробежных и термических сил при изменении толщины покрытия представлены на рис. 5.

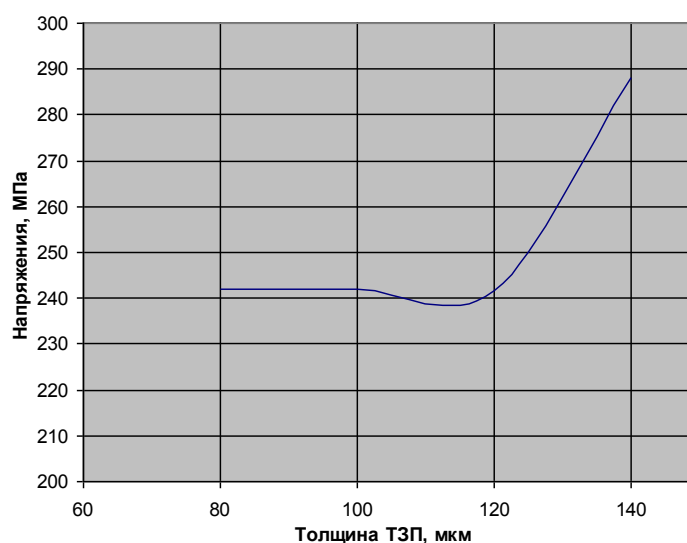


Рис. 5. Зависимость максимальных изгибных напряжений в ТЗП рабочих лопаток ТВД от толщины покрытия.

Из полученных результатов расчета следует, что суммарные изгибные напряжения у основания столбиков ТЗП от действия центробежных сил и температурных градиентов при уменьшении толщины покрытия стабилизируются. Это обусловлено увеличением температурных напряжений одновременно с уменьшением напряжений, вызванных центробежными силами. Увеличение температурных напряжений может привести к образованию трещин на поверхностном слое лопатки турбины, поэтому уменьшение толщины ТЗП менее 120 мкм нецелесообразно.

Выполненные на данном этапе расчеты не учитывали действия сил трения между газодинамическим потоком высокого давления и покрытием.

Для более полной оценки необходимо учитывать воздействие газодинамических сил и свойства материала подложки, на которой выращивается ТЗП. Газодинамические силы из-за

высокой температуры, давление газа, силы трения, эрозионные процессы могут существенно повлиять на ресурс и надежность ТЗП.

Выводы

1. Исследован механизм разрушения столбчатых ТЗП при совместном тепловом и силовом нагружении. Показано, что суммарная изгибная силовая нагрузка, действующая на образец ТЗП, обусловлена сочетанием центробежных сил и термических напряжений. Установлено, что с уменьшением толщины покрытия действие указанных факторов стабилизируются. Последнее обусловлено увеличением температурных напряжений одновременно с уменьшением напряжений, вызванных центробежными силами.
2. Снижение толщины ТЗП ниже 120 мкм не целесообразно ввиду возрастания температурных напряжений в подслое.
3. С целью предотвращения деформации покрытия на ранних стадиях эксплуатации, необходимо на этапе проектирования проводить расчетное определение оптимальной толщины столбчатого керамического ТЗП на рабочих лопатках турбин с учетом условий их работы.

Библиографический список

1. Тамарин Ю.А., Качанов Е.Б. «Свойства ТЗП, наносимых электронно-лучевой технологией»// М.: ЦИАМ, сб. Новые технологические процессы и надежность, №7 2008г., с.125-143.
2. Тамарин Ю.А., Качанов Е.Б. «Электронно-лучевая технология нанесения ТЗП», М. ЦИАМ, сб. «Новые технологические процессы и надежность», №7 2008г., с.144-157.
3. Бычков Н.Г., Першин А.В., Ножницкий Ю.А. «Способ определения эффективности высокотемпературных покрытий», патент РФ №2284514, бил. №27, 2006г.
4. Y. Tamarin "Protective Coatings for Turbine Blades", ASM Press, ISBN 0871707594 (0-87170-759-4)
5. Бычков Н.Г., Першин А.В., Гармонин А.М. «Экспериментальные исследования технологии нанесения и эффективности ТЗП для рабочих лопаток турбин и элементов камеры сгорания» //Т.О. №200-5599, ЦИАМ, 2008г.
6. L. Xie, M.R. Dorfman, A. Cipitria, S. Paul, I.O. Golosnoy, and T.W. Clyne «Properties and Performance of High-Purity Thermal Barrier Coatings» // JTTEE5 16:804–808, ASM International 2007
7. Strangman T.E., Neuman J., A. Liu «Thermal barrier coating life-prediction model development» // final report NASA grant NAS3-23945, 1987, p. 1172
8. Коломыцев П.Т. «Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов», Москва «Металлургия», 1991 г., 239 стр.

9. Тамарин Ю.А., Качанов Е.Б «Теплозащитные покрытия рабочих лопаток турбин» Доклад на конференции к 75- летию ЦИАМ.

Сведения об авторах

Бычков Николай Григорьевич, начальник сектора ФГУП «ЦИАМ» им. П.И. Баранова, кандидат технических наук.

111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, тел.: (495) 362-49-72; e-mail: bahit@ciam.ru

Климов Денис Александрович, ведущий инженер ФГУП «ЦИАМ» им. П.И. Баранова.

111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, тел.: (495) 362-49-72; e-mail: deni333111@mail.ru

Мыктыбеков Бахытжан, начальник сектора ФГУП «ЦИАМ» им. П.И. Баранова, кандидат технических наук.

111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, тел.: (495) 362-49-72; e-mail: bahit@ciam.ru

Низовцев Владимир Евгеньевич, начальник сектора ФГУП «ЦИАМ» им. П.И. Баранова, кандидат технических наук.

111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, тел.: (495) 362-49-72; e-mail: palemu@mail.ru