

Перспективы совершенствования конструкций теплозащитных покрытий для лопаток газотурбинных установок

В. А. Осокин, П. А. Шпак, Е. Л. Пилюк

На основе проведенного анализа используемых в настоящее время типов теплозащитных покрытий для лопаток газотурбинных установок и перспектив их развития предложена конструкция трехслойного теплозащитного покрытия, получаемого за один технологический цикл.

Введение

В настоящее время учеными, конструкторами и технологами по всему миру широко развернуты исследования по разработке методов и средств тепловой защиты деталей газотурбинных двигателей (ГТД), в первую очередь, лопаток турбин, путем нанесения на их тепловоспринимающую поверхность защитного покрытия (слоя материала) с низким коэффициентом теплопроводности. Накопленные к настоящему времени экспериментальные данные подтверждают возможность получения из паровой фазы способом электронно-лучевого осаждения (Electron Beam Physical Vapor and Deposition, EB-PVD) покрытий (теплозащитные — ТЗП и термобарьерные — ТБП (Thermal Barrier Coating, TBC) заданной структуры и состава, которые эффективно защищают металлическую основу лопаток ГТД от высокотемпературных перегрузок, окисляющего, эрозионного и коррозионного воздействия агрессивной среды (газов), образующейся в процессе сгорания топлива. В настоящей работе проведен анализ современного состояния развития защитных покрытий и рассмотрены пути совершенствования конструкций перспективных покрытий.

Цель исследования

На основании анализа литературных данных [1 – 23, 27 – 32] и собственных исследований [24 – 26, 33] авторы настоящей работы поставили целью

проанализировать современное состояние и конструкции теплозащитных покрытий (структура, химический и фазовый состав) и предложить перспективные направления их совершенствования.

Элементы конструкции, структура и свойства теплозащитных покрытий

Как правило, традиционные ТЗП состоят из двух слоев: внутреннего — жаростойкого связующего металлического слоя (bond coat, СМС) $MCrAlY$, где M — Ni , Co , Fe или их комплекс, и внешнего керамического слоя (ВКС), чаще всего на основе системы $ZrO_2 - Y_2O_3$ (Yttrium Stabilized Zirconium Oxide, YSZ) (рис. 1).

Связующий металлический слой

В качестве материала связующего металлического слоя используют специальные жаростойкие сплавы (superalloy) на основе никеля или кобальта в различных соотношениях с добавками хрома от 14 до 22 % и алюминия от 5 до 14 %. Толщина СМС может изменяться от 30 до 200 мкм. Внутренний связующий слой наносится на поверхности рабочих и направляющих лопаток газовых турбин различными методами: плазменным напылением в вакууме (Vacuum Plasma Spray, VPS), в камерах пониженного давления (Low Pressure Plasma Spray, LPPS) или на воздухе (Air Plasma Spray, APS), а также электронно-лучевым осаждением в вакууме (EB-PVD) [3, 24 – 26].

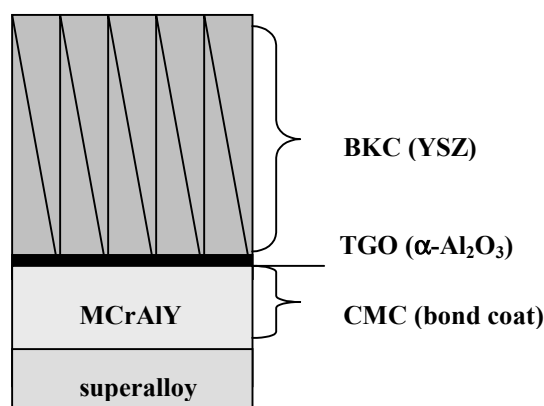


Рис. 1. Схема традиционного двухслойного ТЗП.

Основная задача связующего металлического слоя — защита жаропрочного сплава лопатки от высокотемпературного окисления. Керамический слой в чистом виде (самостоятельно, без внутреннего металлического слоя) эту функцию выполнить не может, так как при нанесении керамического слоя непосредственно на жаропрочный сплав лопаток при высоких температурах наблюдается интенсивная диффузия никеля в ВКС. Взаимодействуя с кислородом, никель образует оксид NiO, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) которого в диапазоне рабочих температур деталей горячего тракта ГТД (400 – 1100 °С) в 2,0 – 2,5 раза превышает аналогичные значения для диоксида циркония, что является основной причиной отслаивания керамики от защищаемого сплава и разрушения покрытия в целом.

Нанесение жаростойкого металлического слоя состава NiCrAlY при содержании в нем 10 – 14% Al позволяет получить в процессе эксплуатации на границе металлического и керамического слоев тонкую пленку оксида алюминия α -Al₂O₃ (Thermally Grow Oxide, TGO), значение ТКЛР которого близко к ТКЛР диоксида циркония, вследствие чего заметно повышаются адгезионные характеристики и теплоустойчивость внешнего керамического слоя. Поэтому длительное обеспечение стабильности тонкой пленки на основе α -Al₂O₃ между СМС и ВКС является одним из важных факторов стойкости теплозащитных систем.

Однако в жаростойком металлическом слое при термоциклировании образуются усталостные трещины, которые являются следствием различия ТКЛР жаропрочного сплава лопаток и металлического слоя. Во многих случаях указанные трещины распространяются и в керамический слой. Снижение содержания алюминия в связующем металлическом слое до 5 – 8% замедляет процесс образования

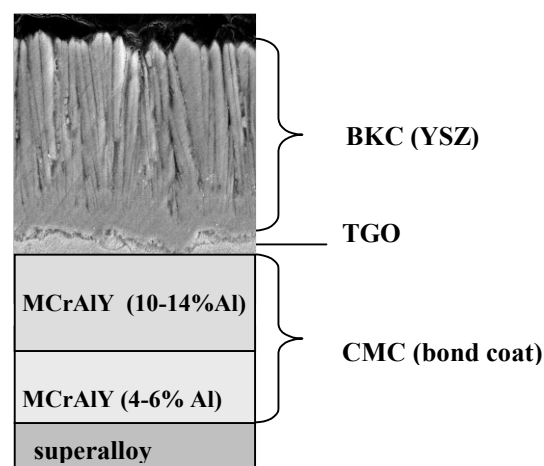


Рис. 2. Схема трехслойного ТЗП.

усталостных трещин, но, одновременно, приводит к изменению фазового состава диффузионной зоны на границе раздела слоев. При этом наряду с формированием пленки Al₂O₃ образуется также Cr₂O₃, являющийся летучим оксидом, что также приводит к отслаиванию теплозащитного слоя.

Таким образом, наличие алюминия в количестве 10 – 14% в жаростойком металлическом слое благоприятно влияет на приемлемый состав диффузионной зоны по границам раздела слоев, но пластичность такого слоя низкая, и в нем при эксплуатации образуются термоусталостные трещины. Относительное снижение содержания алюминия до 5 – 8% в металлическом слое повышает сопротивление термоусталостному разрушению покрытия в целом, но при этом ухудшается фазовый состав диффузионной зоны. Поэтому связующий металлический слой на никелевой основе часто выполняют в виде двухслойной композиции, при котором слой, контактирующий с основой, пластичен и служит для релаксации термических напряжений (содержит алюминий в пределах 4 – 6%) и жаростойкий слой, примыкающий к керамике, обеспечивает окалиностойкость системы (10 – 12% Al) [6] (рис. 2).

Результаты исследований долговечности двухслойных покрытий CoCrAlY / ZrO₂ – Y₂O₃ с содержанием 10 – 12% Al в СМС при комнатной температуре свидетельствуют, что стойкость указанных покрытий определяется уровнем остаточных термических напряжений на межфазной поверхности из-за несоответствия ТКЛР керамики и связующего слоя [1, 2, 6]. Например, одной из причин снижения уровня циклической прочности жаропрочного литейного сплава ЧС70ВИ (на 150 – 170 МПа), используемого для изготовления лопаток судовых

турбин, является ограниченная низкотемпературная пластичность покрытий CoCrAlY , что приводит к их микрорастрескиванию по границам твердого раствора и фазы $\beta\text{-CoAl}$ при испытаниях и последующему развитию усталостных микротрещин. Вводя пластичный слой $\text{Co} - 26 - 27\% \text{Cr} - 4,5 - 5,0\% \text{Al} - \text{Y}$ между защищаемым сплавом и жаростойким покрытием, удастся увеличить долговечность системы металл – керамика благодаря торможению распространения микротрещин из покрытия в жаропрочный сплав при вибрационных нагрузках и блокировке развитию микротрещин из основного металла в жаростойкое покрытие при теплосменах [2, 3, 7]. Таким образом, в двухслойном металлическом покрытии на кобальтовой основе внутренний пластичный слой $\text{Co} - 26 - 27\% \text{Cr} - 4,5 - 5,0\% \text{Al} - \text{Y}$ служит барьером для распространения усталостных микротрещин, развивающихся с поверхности в основу, а внешний жаростойкий слой $\text{Co} - 21 - 23\% \text{Cr} - 10,0 - 11,5\% \text{Al} - \text{Y}$ — обеспечивает защиту от коррозии и окисления. Повышение релаксационных свойств металлического подслоя на основе кобальта достигается созданием трехслойного покрытия металл – керамика, в котором металлическое покрытие выполняется двухслойным:

внутренний связующий слой толщиной 30–40 мкм содержит не более 5% алюминия и имеет удовлетворительную пластичность 4 – 10% при комнатной температуре;

наружный, толщиной 60 – 80 мкм, содержащий 10 – 11,5% алюминия, который контактирует с внешним керамическим слоем и является жаростойким (коррозионностойким).

Указанное покрытие по термостойкости в 1,2 – 1,4 раза превосходит традиционное двухслойное теплозащитное покрытие $\text{Co} - 26 - 28\% \text{Cr} - 10,0 - 11,5\% \text{Al/ZrO}_2 - 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$, благодаря более высокой жаростойкости, термической стабильности и возможности снижения остаточных термических напряжений в трехслойном покрытии [2 – 4].

Важное место в обеспечении стабильности СМС представляет также модифицирование его состава тугоплавкими металлами Ta, W, Re, Hf, Zr, что приводит к измельчению зерна, упрочнению связующего металлического слоя и уменьшению скорости ползучести. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению релаксации напряжений в ВКС и препятствует возрастанию сжимающих напряжений при охлаждении, которые повышают вероятность скалывания керамики.

Материалом СМС традиционно являются сплавы MeCrAlY , для которых характерно интерметаллидное упрочнение, что дает способность неразупрочняться

до температуры $0,5 - 0,7 T_{\text{пл}}$, то есть до начала интенсивной коагуляции и растворения упрочняющих фаз. В дальнейшем прочность таких сплавов падает настолько интенсивно, что с приближением к температуре плавления становятся даже ниже прочности чистых металлов, вследствие понижения температуры их плавления при легировании. Вместе с тем, совершенно очевидно, что резервы дальнейшего повышения жаропрочности путем дополнительного легирования в настоящее время исчерпывают себя.

Известно, что более термодинамически устойчивыми (до $0,8 - 0,9 T_{\text{пл}}$) являются дисперсно-упрочненные материалы, в которых в качестве упрочняющей добавки служат дисперсные тугоплавкие частицы (оксиды, карбиды, бориды).

Создание жаростойкого слоя перспективного типа СМС явилось решением применения микрослойных материалов (МСМ) (рис. 3).

Микрослойные материалы $\text{Ni} - 19\% \text{Cr} - 10\% \text{Al} - 0,1\% \text{Y} / \text{Ni} - 19\% \text{Cr} - 10\% \text{Al} - 0,1\% \text{Y} + \text{ZrO}_2$ с дисперсно-упрочненными микрослоями при массовой доле диоксида циркония 3 – 5% и толщиной чередующихся слоев 2,0 – 2,5 мкм — превосходят матричные сплавы по прочности, пластичности и термодинамической стабильности, а также не уступают им в жаростойкости [5 – 7]. Введение дисперсных включений оксидов (алюминия или циркония) заметно измельчает β -фазу. Четко выраженная слоистость в структуре МСМ $\text{Ni} - 19\% \text{Cr} - 10\% \text{Al} - 0,1\% \text{Y} / \text{Ni} - 19\% \text{Cr} - 10\% \text{Al} - 0,1\% \text{Y} + \text{ZrO}_2$ отсутствует, в отличие от МСМ с низким (3 – 5 %) содержанием алюминия.

Исследования [5] подтвердили перспективность двухслойных ТЗП с внутренним микрослойным и внешним керамическим слоями. Благодаря присут-

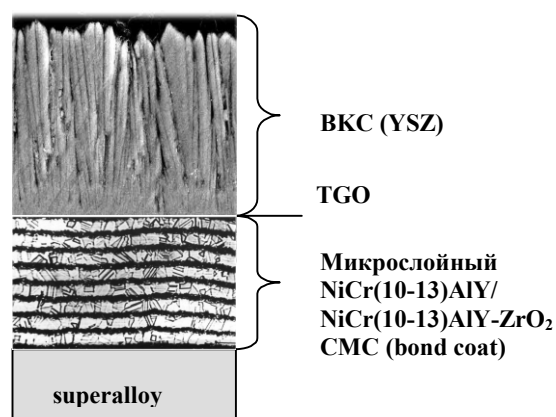


Рис. 3. Схема двухслойного ТЗП с микрослойным связующим слоем.

ствию дисперсных включений в композиционных микрослоях существенно замедлились диффузионные процессы на границе раздела слоев. Образование и рост толщины пленки Al_2O_3 при этом происходит в 2,0 – 2,5 раза медленнее, чем при тех же условиях испытаний в традиционном двухслойном покрытии NiCrAlY/YSZ . Однако, при общем повышении термостойкости материалов $\text{Ni} - 19\% \text{Cr} - 10\% \text{Al} - 0,1\% \text{Y/Ni} - 19\% \text{Cr} - 10\% \text{Al} - 0,1\% \text{Y} + \text{ZrO}_2$, вследствие разницы ТКЛР основы и жаростойкого слоя, в последнем зарождаются термоусталостные трещины, которые инициируют разрушение внешнего керамического слоя.

Проблема зарождения термоусталостных трещин в жаростойком слое была решена созданием трехслойной конструкции ТЗП с образованием демпфирующего слоя на границе раздела материала лопаток и жаростойкого слоя (рис. 4).

В качестве демпфирующего слоя были использованы сплавы NiCrAlY с низкой массовой долей алюминия (5 – 8%). Указанные сплавы, при достаточно высоких механических свойствах, отличаются удовлетворительной пластичностью (2 – 5%), в отличие от сплавов с высоким содержанием алюминия (10 – 13%), удлинение которых не превышает 0,2 – 0,5%. Незначительные отличия по содержанию алюминия в демпфирующем и жаростойком слоях позволили практически согласовать их ТКЛР, который не превышает $(0,2 - 0,5) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, а удовлетворительная пластичность демпфирующего слоя позволяет компенсировать напряжения, возникающие между основой и жаростойким слоем.

Таким образом, образование дополнительного демпфирующего слоя позволило решить задачу компенсации напряжений между основой и жаростойким слоем, а введение дисперсных включений в жаростойкий слой замедлило диффузионные про-

цессы на границе раздела жаростойкий (промежуточный) слой – внешний керамический слой.

Характерной чертой рассмотренного класса СМС является высокая стойкость к окислению при повышенных температурах, которым подвергаются лопатки ГТД, благодаря их способности формировать тонкую плотно прилегающую защитную внешнюю пленку $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, обеспечивающую химически совместимую поверхность, на которую можно осаждать ВКС. Специалисты считают, что эта система покрытия проявляет улучшенные свойства при термоциклических нагрузках по сравнению с керамическим покрытием, нанесенным прямо на поверхность лопатки, таким образом обеспечивая защиту лопаток на более длительный период.

Другой тип СМС — алюминидное связующее покрытие, полученное путем диффузии, так называемые алюминиды (рис.5).

Обычно алюминиды модифицированные никелем, кобальтом, железом, а также платиной — промежуточные фазы, интерметаллиды с физическими, химическими и механическими свойствами существенно отличаются от обычных СМС MeCrAlY [31, 32]. Системы ТБП, основанные на алюминиде как связующем покрытии для керамических поверхностных покрытий по конструкции подобны системам ТБП, основанным на СМС MeCrAlY , так как связующее покрытие из алюминида сначала формируется на поверхности защищаемого изделия путем обычного процесса диффузии [8]. Изделие, покрытое алюминидом, имеет состав поверхности, легко формирующий защитную пленку Al_2O_3 при окислении, на которую уже осаждается керамическое покрытие обычного состава и структуры.

В настоящее время специалистами разработано перспективное связующее покрытие MAIY , где М — никель, кобальт, железо или их сплавы [9] (рис. 6).

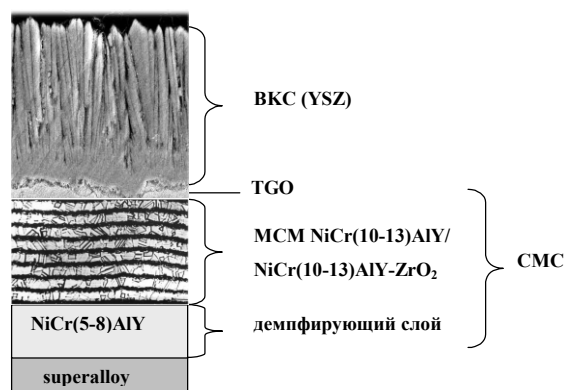


Рис. 4. Схема трехслойного ТЗП с микрослойным и демпфирующим СМС.

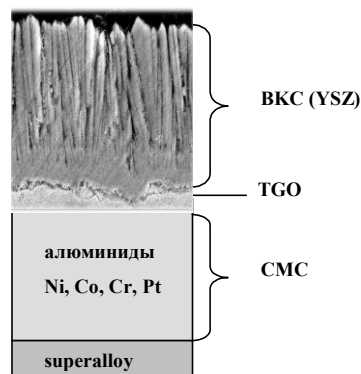


Рис. 5. Схема двухслойного ТЗП с алюминидным СМС.

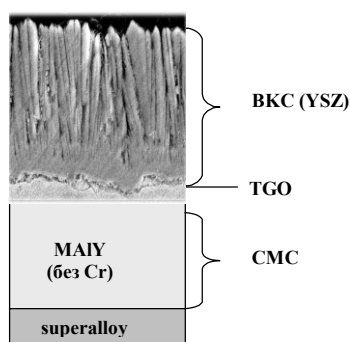


Рис. 6. Схема двухслойного ТЗП с MA1Y CMC.

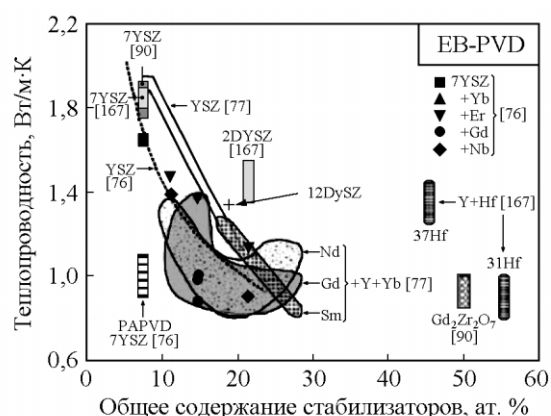
Предполагается, что новый CMC улучшит адгезию между связующим покрытием MA1Y и пленкой Al_2O_3 по сравнению с обычным MeCrAlY и алюминидным связующим покрытием путем управления весовыми процентами составных частей и исключив хром из связующего покрытия. В результате уменьшается диффузия составных частей сплава защищаемого изделия через покрытие MA1Y, а присутствие иттрия уменьшает скорость роста пленки окиси алюминия.

Одним из направлений совершенствования конструкции ТЗП, повышение их термостабильности, может быть создание тонких барьерных слоев на границах раздела демпфирующего и жаростойкого, а также жаростойкого и керамического слоев.

В дальнейшем совершенствование конструкции покрытий металл/керамика на лопатках газовых турбин пошло по пути применения адаптивных слоев на границе контакта связующего металлического слоя и внешнего керамического слоя для обеспечения адгезии между слоями, а также формирование оптимальной структуры для снижения газопроницаемости ВКС.

Барьерный слой TGO (Thermally Grow Oxide)

В качестве барьерных слоев на границе контакта CMC и ВКС используют монослой стехиометрического диоксида циркония [10], платины [11], металлов платиновой группы или сплавов на их основе [12], а также монослой оксидов металлов типа сложной шпинели с образованием пленки $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [13]. При этом тонкий слой $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ толщиной 2 – 3 мкм имеет мелкозернистую равноосную структуру, что объясняет ее высокие механические свойства (прочность, вязкость, пластичность) и высокую адгезию к связующему металлическому слою. С увеличением толщины $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ более 3 – 5 мкм возрастает доля крупнозернистой столбчатой

Рис. 7. Влияние различных стабилизаторов на теплопроводность ТЗП на основе ZrO_2 .

составляющей в структуре ВКС, содержащей более высокую плотность дефектов, которые связаны с перемещением кислорода от наружной поверхности ВКС к связующему металлическому слою. Они могут объединяться в полости, вызывая тем самым отслоение пленки $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ вместе с керамикой ВКС. Для формирования пленки Al_2O_3 , которая обеспечивает адгезионную связь между CMC и ВКС все изделия с покрытиями отжигают в воздушной атмосфере при температуре 1080 – 1100 °С.

Внешний керамический слой

В качестве ВКС обычно применяют системы на основе диоксида циркония ZrO_2 , стабилизированного оксидом иттрия Y_2O_3 , которые также могут осаждаться различными методами (APS, LPPS, VPS, EB-PVD, EB-DVD) [20 – 23]. Одним из путей повышения механических характеристик ВКС системы ZrO_2 – 8% Y_2O_3 является легирование его до 20 масс. % Al_2O_3 , что обеспечивает повышение коэффициента вязкости разрушения K_{IC} от 6,0 до 7,6 МН/м^{3/2} [18], или же введение оксида SiO_2 , обеспечивающее снижение уровня внутренних напряжений с уменьшением вероятности растрескивания керамики. Развитие и усовершенствование керамических систем ВКС типа YSZ идет по пути их сложного легирования различными стабилизирующими добавками (рис. 7) [34]. Так, использование в качестве стабилизирующей добавки Gd, Nb, Hf в диоксиде циркония — снижает теплопроводность системы с 1,8 – 2,0 до 1,4 – 0,9 Вт/(м·К), по сравнению с 7YSZ.

Структура ВКС ZrO_2 – 8% Y_2O_3 имеет столбчатый колоннообразный характер. Каждый отдельный столб состоит из нескольких кристаллитов, направленных обычно нормально к поверхности лопаток. Их

размеры и текстура существенно зависят от технологических параметров процесса осаждения [25]. Столбы и кристаллиты, относительно неупругие в нормальном направлении, имеют неудовлетворительную ударную вязкость. Следовательно, при контакте с движущимися с высокой скоростью инородными частицами (песчинками), засосанными во время работы двигателя, происходит скалывание и разрушение керамического слоя. Так как колоннообразные столбы имеют такую ориентацию, при которой кристаллиты связаны одним концом на малой площади поверхности по сравнению с их объемом, то возможны проблемы с эрозией ВКС. Следовательно, нормальные колоннообразные керамические столбы “слабы” в касательном и параллельном направлениях к поверхности лопатки, что приводит к повреждениям в результате скалывания керамического слоя и разрушению покрытия. Поскольку столбчатые каналы роста и межкристаллитные микротрещины и поры в структуре ВКС представляют многочисленные открытые пути для проникновения вредных примесей продуктов сгорания топлива, то барьерный слой Al_2O_3 , внутренний связующий металлический слой и жаропрочный сплав лопатки также подвергаются воздействию агрессивной окружающей среды.

Увеличение толщины ВКС приводит к незначительному снижению газопроницаемости из-за фрагментации керамики и снижению температуры поверхности защищаемого сплава. Однако при этом увеличивается общая масса лопатки с покрытием, что может быть проблематичным, поскольку вес и баланс лопатки при высокоскоростном вращении являются критичными параметрами надежности работы ГТД. Следовательно, структура ВКС, полученная методом EB-PVD, несмотря на свою выгоду при использовании в ТЗП и ТБП, обладает определенными свойствами, которые ограничивают их эксплуатационные характеристики и срок службы независимо от состава и структуры связующего покрытия.

Совершенствование ВКС путем уменьшения его проницаемости (уплотнение различного вида пор) для предотвращения проникновения к СМС вредных соединений из продуктов сгорания топлива или из атмосферы, которые приводят к разрушению или скалыванию ВКС, является одним из важнейших направлений совершенствования покрытий.

Снижение газопроницаемости ВКС достигается путем введения в него барьерных слоев, имеющих более высокую плотность и меньшую газопроницаемость и нарушающих столбчатое строение кристаллитов керамики. При осаждении керами-

ческого слоя $ZrO_2 - Y_2O_3$ в него вводятся чередующиеся прослойки металлического Zr толщиной 1–3 мкм, которые обеспечивают снижение газопроницаемости ВКС. В зависимости от количества прослоек металлического Zr происходит торможение скорости роста пленки Al_2O_3 , и, в результате, уменьшается толщина обедненной алюминием зоны в жаростойком слое [14]. За счет уплотнения внешнего слоя керамической поверхности более твердым и плотным слоем другого состава, например, оксида гафния HfO_2 толщиной около 30 мкм — повышаются высокотемпературные механические свойства и эрозионная стойкость ВКС [28].

Уплотнение внешней поверхности керамического покрытия осуществляется способом локального перегрева его поверхности, например, лазерным оплавлением [22]. Уплотнение ВКС термобарьерных покрытий можно осуществлять также путем его локального перегрева электронным лучом на завершающей стадии испарения керамики, при этом микротвердость уплотненного керамического слоя увеличивается в два раза (до 12 ГПа), по сравнению с традиционным керамическим слоем $ZrO_2 - Y_2O_3$ [28].

Создание многослойных керамических покрытий, состоящих из квазислоев с направленной столбчатой структурой, расположенных под углом относительно друг к другу (типа “шеврон” или “зиг-заг”), является одним из наиболее перспективных направлений при разработке внешнего керамического слоя [26, 30]. Поскольку квазислои имеют направленную ориентацию столбчатой структуры, образующие острые углы с поверхностью лопатки, то такой ВКС должен обладать повышенной ударной вязкостью, которая приведет к увеличению сопротивления скалывания при контакте с высокоскоростными частицами песка или другими инородными частицами при работе двигателя.

Так как наклонная столбчатая структура в квазислоях имеет большую площадь контактной поверхности с ТГО относительно их объема, то эрозия ВКС типа “шеврон” должна уменьшиться. Соответственно, наклонная столбчатая структура более прочна в параллельном и касательном направлениях к лопатке, что приводит к минимизации повреждений ВКС. При этом барьерный слой ТГО, внутренний связующий металлический слой и жаропрочный сплав лопатки защищены от воздействия вредных примесей продуктов сгорания топлива, поскольку столбчатые каналы роста, межкристаллитные трещины и поры в структуре ВКС представляют извилистый путь типа “шеврон”, тем самым существенно предотвращая проникновение коррозионных солей и других вредных составляющих продуктов сгорания к слою ТГО.

Так как у ВКС с квазислоями типа «шеvron» также снижается теплопроводность на 30% по сравнению с «обычным» столбчатым колоннообразным ВКС [30], то вес керамических покрытий с квазислоистой структурой может быть значительно меньшим при тех же параметрах тепловой защиты. Поэтому можно уменьшить толщину покрытий на 30% с соответствующим снижением их веса и стоимости или иметь сходную толщину покрытий с существенным улучшением термоизоляции.

Обсуждение результатов

Возможность использования связующего металлического слоя двухслойной конструкции (рис. 2), где в качестве жаростойкого слоя применяется микрослойная структура материала, а в качестве демпфирующего слоя использован сплав MCrAlY с малой, в пределах твердого раствора, массовой долей Al (5–8%) — позволяет получить высокую стойкость к окислению при повышенных температурах и согласовать напряжения, возникающие на границе раздела между основой лопатки и жаропрочным слоем. Присутствие дисперсных включений в композиционных микрослоях существенно замедляет диффузионные процессы на границе раздела слоев, а образование слоя окиси алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при этом происходит в 2–2,5 раза медленнее по сравнению с традиционными двухслойными покрытиями. Характерной чертой этого типа СМС является стабильность структуры при повышенных температурах, которым подвергаются лопатки ГТД, что достигается их способностью формировать тонкую, плотно прилегающую пленку алюминиевого оксида $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Формирование микрослойной структуры для повышения термической стабильности связующего металлического жаростойкого слоя позволяет в 2–3 раза увеличить в условиях эксплуатации долговечность указанных композиционных покрытий по сравнению с простыми двухслойными покрытиями металл – керамика, а пленка оксида алюминия обеспечивает химически совместимую поверхность, на которую можно осаждать изолирующее керамическое покрытие.

В качестве внешнего керамического слоя представляет интерес многослойное керамическое покрытие с квазислоистой направленной столбчатой структуры [26, 30]. Колоннообразное керамическое покрытие предпочтительно осаждают методом EB-PVD. Для достижения желаемого многослойного наклонного направления ориентации столбчатой структуры используется точная манипуляция лопаткой определенным образом в ходе осаждения покрытия. ВКС указанного типа (рис. 8) включает

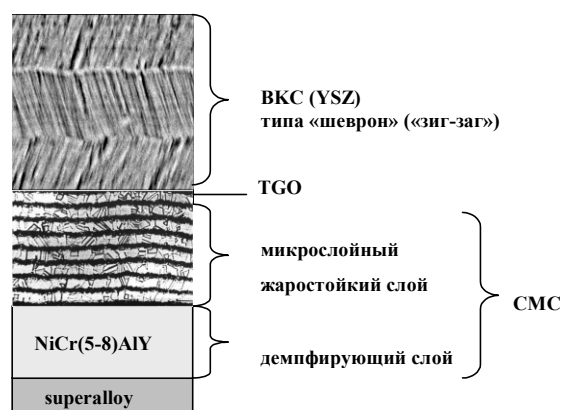


Рис. 8. Схема перспективного трехслойного ТЗП.

первый слой с колоннообразной микроструктурой, с упорядоченным направлением главных осей роста кристаллитов. Каждый такой кристаллит образует острый угол с поверхностью лопатки. Открытые столбчатые кристаллиты образуют пустоты или межкристаллитные зазоры, которые компенсируют напряжения, когда величина сжатия или растяжения керамического покрытия, связующего металлического слоя и основы жаропрочного сплава лопатки ГТД различаются для заданного изменения температуры. Следующий слой, в контакте с первым, включает множество открытых столбчатых кристаллитов, которые являются продолжением кристаллитов первого слоя, так что межкристаллитные зазоры первого слоя продолжают также и через второй слой.

Как видно из рис. 8, второй слой имеет структуру, упорядоченную в направлении ориентации столбчатых кристаллитов, отличную от первого слоя. Представленный вариант ВКС включает также третий слой, который характеризуется множеством открытых пустот и межкристаллитных зазоров, которые могут быть продолжением структуры предыдущего слоя. Указанный слой имеет структуру, упорядоченную в третьем направлении и наклонную под углом ко второму слою. Соответственно, наклонные колоннообразные столбчатые кристаллиты более прочны в параллельном направлении или по касательной к поверхности лопатки, что приводит к минимизации повреждений ВКС в результате скалывания.

Данное техническое решение конструкции трехслойного покрытия, схема которого приведена на рис. 8, особенно эффективно в случае защиты охлаждаемых лопаток ГТД. Прогноз перспективности создания подобной трехслойной конструкции теплозащитных систем основан на возможности получения указанных покрытий методом EB-PVD за

один технологический цикл, с учетом разработки нового класса оборудования для нанесения теплозащитных покрытий.

Выводы

На основе проведенного анализа современного состояния конструкций защитных покрытий для лопаток ГТД предложен перспективный тип трехслойного теплозащитного покрытия, который можно получить электронно-лучевым осаждением исходных материалов за один технологический цикл. При этом внешний керамический слой характеризуется слоистой «шевронной» структурой, а связующий металлический слой является двухслойной конструкцией с микрослойной и демпфирующей составляющими структуры материала покрытия.

Литература

1. Городецкий С.С., Грязнов Б.А., Шестопал Л.Ф. и др. Исследование влияния защитных конденсационных покрытий $\text{Co} - \text{Cr} - \text{Al} - \text{Y/ZrO}_2$ на сопротивление усталости литейного сплава ЧС70ВИ. Проблемы специальной электрометаллургии, 1990, № 4, с. 65 – 70.
2. Малащенко И.С., Осыка А.С., Рыбников А.И., Панков О.Г. Результаты промышленной эксплуатации рабочих лопаток турбины энергетической установки ГТ–100 с конденсационными защитными покрытиями. Проблемы специальной электрометаллургии, 1993, № 1, с. 53 – 66.
3. Мовчан Б.А., Малащенко И.С., Яковчук К.Ю. Двух- и трехслойные покрытия, полученные осаждением в вакууме, для защитных покрытий лопаток газовых турбин. Автоматическая сварка, 1994, № 2, с. 30 – 38.
4. Рыбников А.И., Малащенко И.С., Яковчук К.Ю., Мовчан Б.А. Структурные изменения в двухслойном покрытии $\text{Co} - \text{Cr} - \text{Al} - \text{Y/ZrO}_2 - 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$ на никелевом сплаве ЭИ 929. Проблемы специальной электрометаллургии, 1989, № 2, с. 52 – 56.
5. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита от их окисления. Под ред. Б.Е. Патона. К.: Наукова думка, 1987, 256 с.
6. Яковчук К.А., Корсакевич Н.И., Аксенов В.А., Малащенко И.С. Влияние покрытий металл/керамика на циклическую прочность и жаропрочность никелевых сплавов. Проблемы специальной электрометаллургии, 1992, № 3, с. 48 – 52.
7. Патон Б.Е., Рыжиков В.К., Мовчан Б.А. и др. Конденсационные жаростойкие покрытия в современном газотурбостроении. Труды ЦКТИ, 1990, вып. 260, с. 17 – 25.
8. US Pat. # 5,238,742.
9. US Pat. # 08/597,841.
10. Pat. 4335190 USA ICI.³ B32B15/04. Thermal barrier coating system having improved adhesion. R.C. Bill, J.S. Sovey, Publ. 15.06.82.
11. Takeda H., Baba H., Suzuki T., Shimotori K. Proceeding JIMIS. 1983, no.3, p. 591 – 597.
12. Pat. 4339199 USA ICI.³. I.R. McGill, G.L. Stlman. Publ. 16.08.83.
13. Schmitt-Thomas Kh. G., Dietl U. Thermal barrier coatings with improved oxidation resistance. Surface & Coat. Technology, 1994, v. 68/69, p. 113 – 115.
14. А.с. 1468006 СССР, МКИ⁴ C23C1400. Композиционное жаростойкое покрытие для лопаток газовых турбин. Б.А.Мовчан, К.Ю. Яковчук, И.С. Малащенко и др. Заяв. 15.11.88 г.
15. Jones R., Jones S., Williams C. Sudation of CeO_2 and ZrO_2 relating to hot corrosion. J. Electrochemical Soc., 1985, 132.36, p. 1498 – 1501.
16. Iwamoto N., Umesaki N., Endo S. Characterization of plasmasprayed zirconia coatings by X-ray diffraction and Raman spectroscopy. Trans. of JWRI, 1985, v. 14, no. 1, p. 89 – 95.
17. Miller R., Garlic A., Smialek J. Phase distributions in plasma sprayed zirconia-ytria. Amer. Ceramic Soc. Bull., 1983, v. 62, no. 12, p. 1355 – 1358.
18. Yao-Yong H., Ji-Qiang G., Hong-Tu Z. Effect of Al_2O_3 on retaining particles in Y-PSZ ceramic matrix. J. Mater. Sc. Lett., 1987, v. 6, p. 246 – 248.
19. Мовчан Б.А., Гречанюк Н.И. Структура и некоторые свойства микрослойных конденсированных материалов. Проблемы специальной электрометаллургии, 1984, вып. 20, с. 68 – 73.
20. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в двигателестроении. М.: Высшая школа, 1999, 523 с.
21. Мовчан Б.А., Малащенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. К.: Наукова думка, 1983, 230 с.
22. Мулякаев Л.М. Защитные покрытия деталей газотурбинных двигателей. Технология металлов, 2000, № 9, с. 23 – 35.
23. Мелехов Р.К., Похмурский В.И. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. К.: Наукова думка, 2003, 385 с.
24. Гречанюк Н.И., Кучеренко П.П., Осокин В.А., Шпак П.А. Современное состояние и перспективы создания теплозащитных покрытий (ТЗП) для лопаток газотурбинных установок (ГТУ) и оборудования для их нанесения. Новини енергетики, 2000, № 9, с. 32 – 37.
25. Гречанюк Н.И., Осокин В.А., Шпак П.А., Пилюк Е.Л. Влияние технологических параметров на структуру внешнего керамического слоя в двухслойных покрытиях металл-керамика, полученных электронно-лучевым осаждением за один технологический цикл. Порошковая металлургия, 2005, № 3, с. 41 – 48.
26. Осокин В.О., Шпак П.О., Пилюк Е.Л. Сучасні тенденції конструювання захисних покриттів для лопаток газотурбінних установок. Новини енергетики, 2005, № 8, с. 23 – 25.
27. Малащенко И.С., Марайниссен Г.Х., Белоцерковский В.А. и др. Долговечность конденсационных покрытий $\text{NiCoCrAlY} - \text{ZrO}_2 - 8\text{Y}_2\text{O}_3$ при термодинамическом нагружении. Проблемы специальной электрометаллургии, 1997, № 1, с. 34 – 46.

28. Яковчук К.Ю., Рудой Ю.Э. Одностадийная электронно-лучевая технология осаждения термобарьерных градиентных покрытий. Современная электрометаллургия, 2003, № 2, с. 10 – 16.
29. Мовчан Б.А., Рудой Ю.Э. Градиентные теплозащитные покрытия, получаемые электронно-лучевым осаждением паровой фазы в вакууме. Проблемы специальной электрометаллургии. 1997, № 2, с. 25 – 32.
30. Hass D., Slifka A., Wadley N. Low thermal conductivity vapor deposited zirconia microstructures. Acta mater., 2001, no.49, p. 973 – 983.
31. Brady M.A., Brindley W.J., Smialek J.L., et al. Oxidation and protection of γ -titanium aluminides. JOM, 1996, no. 11, p. 46 – 50.
32. Gauthier V., Dettenwanger F., Schutz M. Oxidation behavior of γ -TiAl coated with zirconia thermal barriers. Intermetallics, 2002, no. 10, p. 667 – 674.
33. Шпак П.А., Гречанюк Н.И., Осокин В.А., Пилюк Е.Л. Двухслойные теплозащитные покрытия металл-керамика, полученные электронно-лучевым осаждением за один технологический цикл. Порошковая металлургия, 2007, № 7/8, с. 100 – 106.
34. Levi C.G. Emerging materials and processes for thermal barrier systems. Solid State and Material Science, 2004, no. 8, p. 77 – 91.

Осокин Валентин Александрович — ООО “Центроэлектроконтакт” (г. Киев, Украина), кандидат технических наук, заместитель директора по науке и производству. Специалист в области электронно-лучевой технологии и материаловедения (композиционные материалы и покрытия, металлы высокой чистоты и специальные сплавы).

Шпак Павел Александрович — ООО “Интек Вакуум Украина” (г. Киев, Украина), кандидат технических наук, технический менеджер. Специалист в области электронно-лучевой технологии и материаловедения (композиционные материалы и покрытия, металлы высокой чистоты и специальные сплавы).

Пилюк Евгений Леонидович — ООО “Центроэлектроконтакт” (г. Киев, Украина), заместитель главного конструктора. Специалист в области электронно-лучевой техники и технологии.