

ЖАРОСТОЙКИЕ И ТУГОПЛАВКИЕ ПОКРЫТИЯ

УДК 629.7.023.2

*С.А. Мубояджян, Л.П. Егорова,
Д.С. Горлов, А.А. Косьмин*

ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГОРЯЧЕГО ТРАКТА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящее время теплозащитные покрытия (ТЗП) рассматриваются как основной вид покрытий для деталей горячего тракта ГТД. Применение ТЗП для охлаждаемых деталей горячего тракта ГТД при характерных тепловых потоках $\sim 10^6$ Вт/м², реализуемых в двигателях, позволяет снизить температуру основы – конструкционного материала, из которого изготовлена деталь, – на 50–100°C и более. В свою очередь, снижение температуры несущего материала позволяет повысить температуру рабочего газа и увеличить ресурс детали [1, 2]. Теплозащитные покрытия, предназначенные для увеличения ресурса элементов камеры сгорания ГТД, позволяют одновременно снизить уровень эмиссии выхлопных газов. Снижение уровня эмиссии в камере сгорания ГТД достигается путем уменьшения расхода воздуха, подаваемого для охлаждения стенок жаровых труб и самой камеры сгорания. При этом имеет место повышение температуры в жаровых трубах стенок камеры сгорания до 1100–1200°C. Для обеспечения работоспособности камеры сгорания при снижении уровня эмиссии на 30–40%, требуется разработка нового жаропрочного деформируемого сплава и теплозащитного покрытия, обеспечивающих в комплексе работу камеры сгорания при повышенном уровне температур.

Конструктивно ТЗП содержит одно- или многослойный соединительный слой, контактирующий с материалом основы, и внешний керамический слой из материала, имеющего в области рабочих температур покрытия низкую теплопроводность. В зависимости от технологии нанесения различают ТЗП, наносимые газотермическим способом (плазменное нанесение при атмосферном давлении, нанесение в динамическом вакууме и др.), ТЗП, получаемые физическим осаждением в вакууме (в основном электронно-лучевым осаждением), и ТЗП, при нанесении которых используется комплексная технология, когда слои покрытия получают по различным технологиям. ТЗП, наносимые газотермическим способом, используются в основном для защиты крупногабаритных деталей горячего тракта ГТД (камера сгорания, жаровая труба, блок сопловых лопаток турбины, головки форсунок, створки сопла и т. д.).

Соединительный слой ТЗП должен отвечать следующим основным требованиям:

- обладать высокой жаростойкостью и минимальной скоростью роста оксидной пленки на границе с керамическим слоем ТЗП;
- обеспечивать высокую плотность и когезионную прочность оксидной пленки, разделяющей соединительный слой и внешние керамические слои покрытия;
- обеспечивать высокую (>10 МПа) адгезионную прочность этой пленки к керамическому и соединительному слоям ТЗП;
- иметь ТКЛР, совместимый с температурным коэффициентом расширения керамического слоя ТЗП и жаропрочного сплава (ЖС) основы.

Соединительный слой ТЗП должен выбираться из условий обеспечения максимального ресурса покрытия и обеспечения работоспособности и ресурса изделия с покрытием при возможных сколах керамического слоя ТЗП, что накладывает определенные ограничения при выборе состава и конструкции этого слоя. Поэтому соединитель-

ный слой ТЗП должен содержать достаточный запас основных легирующих элементов (Al, Cr и др.), обеспечивающих работоспособность этого слоя при высоких температурах (свыше 1050°C).

Керамический слой ТЗП должен отвечать следующим основным требованиям:

- обладать фазовой и структурной стабильностью при температурах до 1200–1250°C;
- иметь минимальный коэффициент теплопроводности в области рабочих температур 1000–1200°C;
- иметь высокую (>10 МПа) адгезию к соединительному слою ТЗП;
- обладать высокой когезионной прочностью.

В качестве соединительного слоя ТЗП в основном используют диффузионный Pt–Al слой, а также конденсированные слои из сплавов системы Me–Cr–Al–R–Y (где R: Ta, Si и др.), Me–Ni, Ni–Co. Для внешнего слоя ТЗП используется керамика на основе ZrO₂, стабилизированная 7–8% (по массе) Y₂O₃, или новая керамика на основе оксидов редкоземельных элементов, имеющая более низкий коэффициент теплопроводности, чем ZrO₂·Y₂O₃.

Для керамического слоя, наносимого плазменным газотермическим способом, характерна пористость ~ (5–20)% и низкая теплопроводность ($\lambda \leq 1–1,5$ Вт/(м·К)) в области рабочих температур 1050–1200°C, что обеспечивает теплоперепад на керамическом слое покрытия ~100°C при толщине керамического слоя покрытия 100–150 мкм. Работоспособность плазменных ТЗП зависит от многих физических и технологических факторов. Так, увеличение толщины керамического слоя покрытия приводит к снижению когезионной прочности этого слоя. Адгезия керамического слоя ТЗП (уровень ~2 МПа) определяется шероховатостью поверхности соединительного слоя покрытия и с увеличением шероховатости улучшается (сцепление слоев ТЗП носит механический характер). При этом повышение шероховатости соединительного слоя ТЗП приводит к увеличению его поверхности и формированию рыхлого оксидного слоя на этой поверхности, что снижает когезионную прочность покрытия на границе слоев. Увеличение пористости керамического слоя ТЗП, которое достигается изменением режима нанесения покрытия, приводит к снижению коэффициента теплопроводности этого слоя и одновременно – к ускорению процесса окисления поверхности соединительного слоя покрытия (из-за повышения доступа кислорода к этой поверхности) и ускоренному разрушению керамического слоя ТЗП. Повышение жаростойкости соединительного слоя покрытия достигается либо повышением его плотности при достаточном запасе в слое таких легирующих элементов, как Al (>10% по массе) и Cr (>8% по массе), либо путем нанесения на поверхность плазменного слоя более жаростойкого шликерного алюминидного слоя с содержанием Al до 28–30%. При этом шликерный слой снижает или устраняет пористость соединительного слоя ТЗП и повышает его твердость, что затрудняет создание требуемой шероховатости для сцепления керамического слоя ТЗП.

Как видим, создание ТЗП с высоким ресурсом требует оптимизации материалов для покрытия, толщин слоев и режимов их нанесения, методов обработки поверхности перед нанесением слоев покрытия и представляет собой сложную научно-техническую задачу. Освоение таких покрытий промышленностью возможно при наличии автоматизированного оборудования для плазменного напыления, позволяющего получать воспроизводимые по толщине и составу покрытия, а также качественных исходных по-

рошковых материалов для нанесения соединительного и керамического слоев покрытия.

Испытания изделий с ТЗП в условиях, приближенных к натурным, позволяют значительно ускорить разработку покрытий с высоким ресурсом. В ЦИАМ были исследованы на термоусталость коробчатые образцы, имеющие охлаждающие отверстия $\varnothing 1$ мм, одна стенка которых (коробов) выполнена из материала ВЖ159 толщиной 1 мм с теплозащитным покрытием, нанесенным в ВИАМ, и образцы без покрытия. Было нанесено два варианта ТЗП, отличающихся между собой составом и конструкцией соединительного слоя. На образцы № 1÷6 с ТЗП был нанесен плазменный жаростойкий соединительный слой системы Ni–Co–Cr–Al–Y из порошка ПНХ20К20Ю13. На образцах № 1÷3 на поверхности жаростойкого слоя из порошка системы Ni–Co–Cr–Al–Y формировался по шликерной технологии алитированный слой системы Ni–Al–Co–Cr–Y. Затем на все образцы № 1÷6 наносился плазменным напылением в открытой атмосфере на установке УПУ-3Д керамический слой ТЗП из порошка $ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3$ (% по массе). Испытания на термоусталость моделей жаровых труб из сплава ВЖ159 проводились на разработанной и изготовленной в ЦИАМ установке Т14-184 с высокочастотным генератором ВЧГ4-25/0,44, при индукционном высокочастотном разогреве объекта на частоте 440 кГц.

Термоциклирование проводилось по режиму: нагрев от 350 до 900°C за 10 с, выдержка при 900°C в течение 7 с, охлаждение до 350°C за 10 с. Микроструктура образцов в области перфорационных отверстий после испытаний показана на рис. 1, а результаты испытаний на термоусталость при термоциклировании приведены в табл. 1.

а)

б)

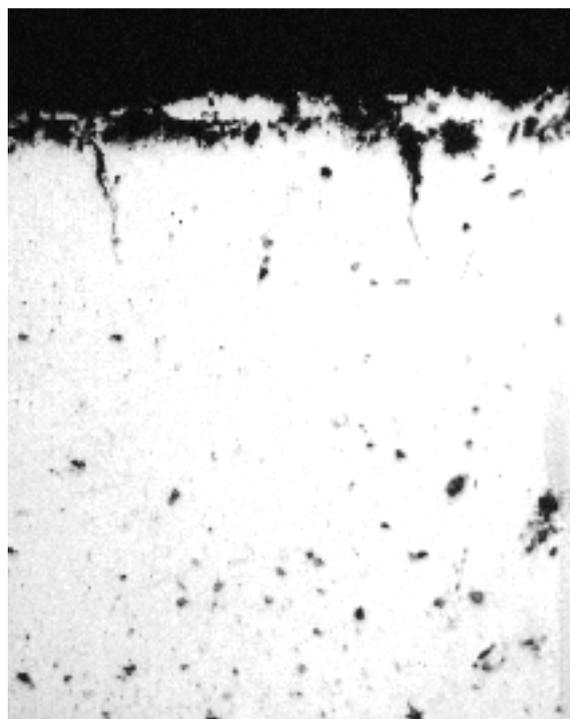
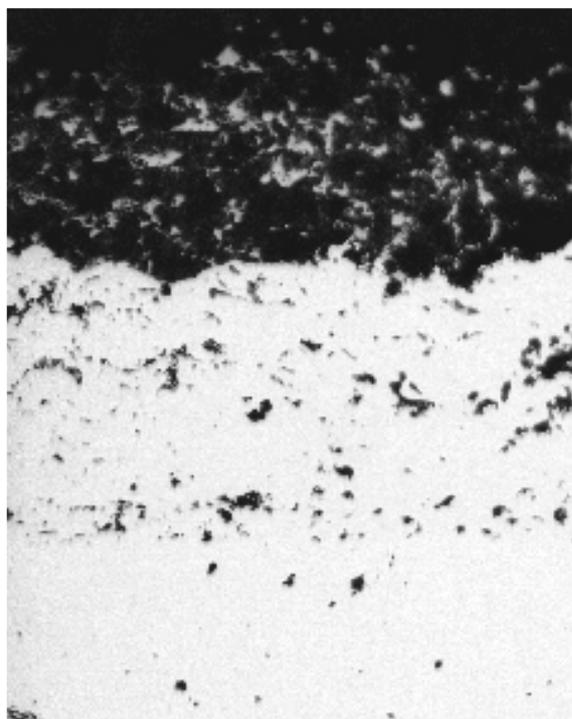


Рис. 1. Микроструктура ($\times 200$) коробчатых образцов из сплава ВЖ159 в области перфорационных отверстий после испытаний на термоциклирование:

а – образец с ТЗП типа Ni–Co–Cr–Al–Y + Ni–Al–Co–Cr–Y + $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ (7% по массе);
б – образец без покрытия (микротрещины в области перфорационных отверстий)

Результаты испытаний на термоусталость модельных образцов из сплава ВЖ159

Условный номер образца (см. текст)	Толщина ТЗП, мкм	Толщина керамического слоя ТЗП, мкм	Наработка до образования трещины N , цикл	$N_{ср}$, цикл
Трехслойное ТЗП:				
1	320	140	2571	2807
2	380	230	3127	
3	520	340	2723	
Двухслойное ТЗП:				
4	360	220	5127	4552
5	400	260	4325	
6	390	220	4205	
Без покрытия			1618	1036
			1341	
685				
890				
644				
			440 – образец перегрет	

Испытания показали, что термоциклическая долговечность моделей с двух- и трехслойным ТЗП возросла в среднем соответственно в 4,4 и 2,7 раза по сравнению с образцами из сплава ВЖ159 без покрытия.

Полученные результаты показывают, что применение ТЗП на элементах камеры сгорания ГТД позволит увеличить либо ресурс (в 2 раза и более) при неизменном тепловом режиме работы, либо температуру рабочего газа в ГТД (на 100–150°C).

Исследование микроструктуры материала гильз (ЭИ417) жаровых труб агрегата ГТК-10И после наработки в течение 4900 ч и 22 пусков агрегата показало наличие изменений в структуре по толщине стенки материала гильз. Наибольшие изменения наблюдались в материале гильзы, не имевшей ТЗП: рост номера (балла) зерна до 2–3 (в состоянии поставки термообработанный лист имеет зерно 7–10 баллов) и максимальная деформация и повреждения (по сравнению с гильзами, имеющими ТЗП). На рис. 2 показана микроструктура материала гильз до и после испытаний в составе агрегата ГТК-10И (с указанием свойств – кратковременной прочности материала и удлинения – в исходном состоянии и после испытаний гильз). Видно, что наличие ТЗП на внутренней поверхности гильзы привело к снижению температуры стенки гильзы и частично предохранило материал от перегрева (зерно материала гильзы: 5–6 балл), имевшего место при эксплуатации агрегата ГТК-10И.

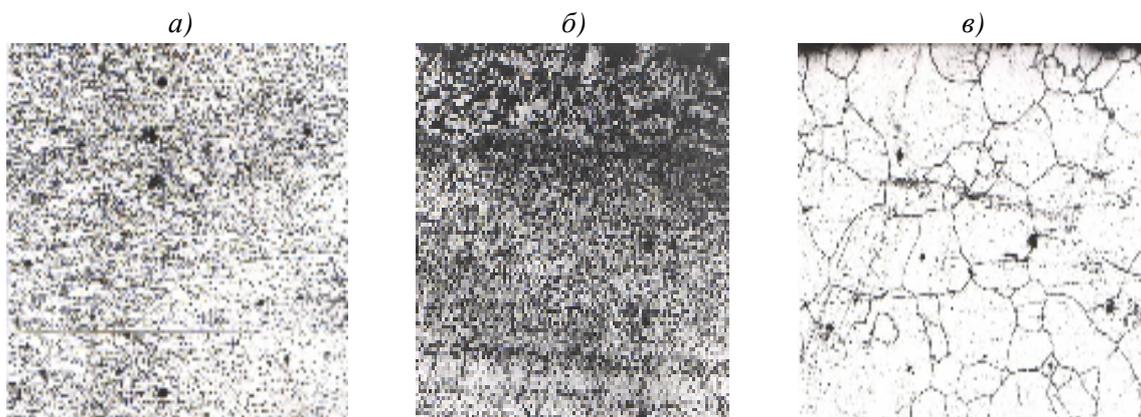


Рис. 2. Микроструктура ($\times 100$) материала гильз (ЭИ417) до и после испытаний в течение 4900 ч в составе агрегата ГТК-10И:

a – в исходном состоянии материала гильз ($\sigma_{\text{в}}=660$ МПа, $\delta=50\%$); *б* – после наработки с ТЗП ($\sigma_{\text{в}}=650$ МПа, $\delta=47\%$); *в* – после наработки без покрытия ($\sigma_{\text{в}}=590$ МПа, $\delta=42\%$)

На основании проведенных исследований показано, что применение теплозащитного покрытия на гильзах жаровых труб при расчетных режимах эксплуатации агрегата ГТК-10И позволит увеличить их ресурс более чем в 2 раза.

Отметим также, что в отечественной практике в серийном производстве на ФГПЦ ММПП «Салют» на створках сопла применяется газотермическое покрытие «Рубин» на основе оксида алюминия (разработка ВИАМ), которое можно также отнести к классу теплозащитных покрытий.

С целью повышения служебных характеристик ТЗП был проведен анализ и выбраны оксидные системы для керамического слоя ТЗП, определяющего основные параметры покрытия. Для предотвращения полиморфных превращений диоксид циркония стабилизируют путем введения оксидов, образующих устойчивые твердые растворы с кристаллической структурой. В качестве стабилизаторов используют оксиды Y_2O_3 , CeO_2 , TbO_2 , Yb_2O_3 , Sc_2O_3 , HfO_2 , образующие с диоксидом циркония твердые растворы. Компонентами для стабилизации оксида циркония были выбраны оксиды церия, гафния, скандия, кремния, никеля, иттербия, эрбия, алюминия, хрома с различной температурой плавления – от 1728 до 2777°C. Для сравнительной оценки свойств керамического слоя ТЗП с указанными стабилизаторами был выбран оксид циркония (ZrO_2), стабилизированный 7% (по массе) оксида иттрия (Y_2O_3) с температурой плавления 2677°C. Были рассмотрены следующие оксидные системы для нанесения керамического слоя ТЗП.

1. Порошки, изготовленные методом химического синтеза в ОГУП «Урал Моноцит Техно», с размерами частиц 50–100 мкм и с условным наименованием О-1, О-2 и т. д.:

- О-1: $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2$;
- О-2: $ZrO_2-Y_2O_3-HfO_2$;
- О-3: $ZrO_2-Sc_2O_3$;
- О-4: $ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3$;
- О-5: $ZrO_2 \cdot Yb_2O_3$;
- О-6: $(ZrO_2 \cdot HfO_2)-Yb_2O_3$;
- О-7: $ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3$ (с округлыми частицами).

2. Плавленная керамика, легированная стабилизирующими оксидами металлов (составы К-1, К-2, К-3, К-4, К-5, К-6):

- К-1: $ZrO_2-SiO_2-HfO_2$;
- К-2: $(ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3)-NiO-SiO_2$;
- К-3: $(ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3)-HfO_2$;
- К-4: $(ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3)-Y_2O_3-7\% Sc_2O_3$;
- К-5: $(ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3)-Y_2O_3-Yb_2O_3$;
- К-6: $(ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3)-Y_2O_3-Er_2O_3$.

Порошковые составляющие указанных систем перемешивались в смесителе с эксцентриковой осью в течение двух часов перед выплавкой. Составы К-1÷К-6 плавилась в коржи в печи ДМК. Затем из полученных коржей методом последовательного дробления, измельчения и отсева готовились порошки с фракцией 60–120 мкм для плазменного напыления.

В качестве соединительного жаростойкого слоя ТЗП использовались слои, полученные плазменным напылением из порошка ПНХ20К20Ю13 без шликерного алитирования, а также слои из этого же порошка ПНХ20К20Ю13 (или ПНХ16Ю7) с внешним шликерным алюминидным слоем. Шликер на основе водного раствора алюмохромфосфатного связующего и мелкодисперсных металлических наполнителей наносился на образцы с плазменным подслоем и после сушки по режиму 350°C, 1 ч образцы подвергались вакуумному диффузионному отжигу при температуре 1050°C, 4 ч (вакуум $1 \cdot 10^{-2}$ Па). В процессе вакуумного диффузионного отжига имеет место «сращивание» плазменного и шликерного слоев с образованием на поверхности плазменного покрытия слоя жаростойкой β -фазы (NiAl), легированной элементами подслоя (Cr, Y) и кремнием из внешнего шликерного слоя, что обеспечивает формирование металлического соединительного слоя теплозащитного покрытия.

Плазменные слои из порошков наносились на установке УПУ-3Д по режиму: $I=400$ А, $U=60$ В. Покрытия из вышеприведенных керамических оксидных систем были нанесены на партию образцов из сплава ВЖ145 для проведения высокотемпературных испытаний. Толщина плазменного соединительного слоя из порошков ПНХ20К20Ю13 и ПНХ16Ю7 составляла 80–100 мкм, толщина керамики 150–250 мкм. Следует отметить, что установка УПУ-3Д не обеспечивает требуемой точности нанесения слоев по толщине, пористости, когезионной прочности и не обеспечивает повторяемости параметров наносимых покрытий, что не позволяет однозначно интерпретировать полученные результаты.

Для ряда составов керамического слоя ТЗП (ОСТ1 90371–87) определена плотность и пористость слоев покрытия. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетная плотность и пористость ряда керамических составов

Состав (условная маркировка – см. текст)	Аддитивная плотность, г/см ³	Плотность керамического слоя, г/см ³	Пористость слоя, %
О-2	5,70	4,34	23,8
О-3	5,39	4,19	22,2
О-4	5,51	3,97	28,0
К-1	5,11	2,95	57,8
К-2	5,25	3,04	42,1
К-3	5,93	2,78	53,0
К-6	5,81	2,44	58,1

Как показывают приведенные данные (см. табл. 2), пористость керамических слоев (О-2÷О-4), нанесенных из порошков, полученных методом химического синтеза, составляет ~25%, в то время как слои, полученные из плавленной керамики, имеют пористость на уровне 50%.

Испытания на жаростойкость образцов с различными керамическими слоями ТЗП в спокойной атмосфере печи при температуре 1150°С в течение 800 ч показали, что керамические слои из порошков, полученных методом химического синтеза, обладают более высокими защитными свойствами по сравнению с керамическими слоями, нанесенными из порошков плавленной керамики. Жаростойкость (привес) образцов с ТЗП с керамическими слоями О-4, О-5, О-6, О-7 составила 40–70 г/м². Лучшие результаты показали ТЗП на сплаве ВЖ155 с керамическим слоем на основе составов О-5 и О-7 и двухстадийным (плазменный подслоя + шликерное алюмосилицирование) соединительным слоем ТЗП. При этом привес образцов из сплава ВЖ155 с ТЗП составил 40–50 г/м². Для образцов с керамическим слоем ТЗП на основе плавленных керамик наблюдается убыль массы, что связано с частичным отслоением керамического слоя покрытия, возможно, из-за высокой пористости этого слоя.

Определение теплозащитного эффекта проводили при испытании специальных образцов, с встроенными термопарами под слоем ТЗП, а также на обратной стороне образцов из жаропрочных сплавов типа ВЖ. Образец нагревался в пламени водородно-кислородной струи со стороны ТЗП. Температура поверхности образца также контролировалась термопарой. С обратной стороны образец охлаждался струей сжатого воздуха, что позволяло создать градиент температур по толщине образца и определить тепловой поток, а также величину теплозащитного эффекта (ΔT , °С) от покрытия. Было показано, что при тепловых потоках на уровне $(2,5–3,5) \cdot 10^6$ Вт/м², близких по значениям к потоку, реализуемому в камерах сгорания ГТД, теплозащитный эффект для керамических композиций на основе ZrO₂, стабилизированного 7% Y₂O₃, и на основе ZrO₂, стабилизированного Yb₂O₃, составил от 110 до 180°С на 100 мкм толщины керамического слоя.

Испытания образцов из нового азотированного сплава ВЖ155У с ТЗП на длительную прочность при температуре 1100°C и нагрузке $\sigma=35-40$ МПа показали, что продолжительность испытаний образцов с ТЗП увеличивается в 1,5 раза: время до разрушения 13 образцов с ТЗП составило от 70 до 162 ч, а без покрытия – от 55 до 75 ч. Для сплавов ВЖ155 и ВЖ159 с рабочей температурой 1000°C получено увеличение продолжительности испытаний образцов с ТЗП при температуре 1100°C в 1,5 раза. При температуре 1200°C и $\sigma=18-20$ МПа – время до разрушения увеличилось в 1,2 раза.

Испытания образцов из серийных сплавов ВЖ155, ВЖ159, ВЖ155У с ТЗП, имеющим керамический слой на основе керамик О-4, О-5 и О-7, на термостойкость на базе 100 циклов по режиму 1150 \rightleftharpoons 200°C (выдержка 30 мин, охлаждение 30 мин) показали, что сколов и отслоения керамического покрытия не наблюдается, незначительные сколы имелись на торцах образцов толщиной 1,5 мм. На образцах без покрытия имеет место деформация с радиусом изгиба несколько миллиметров. При увеличении числа циклов образцов с покрытием имеет место недопустимая деформация основы, что не позволяет точно оценить термостойкость композиции жаропрочный сплав–ТЗП. Поэтому были проведены испытания образцов в пламени водородно-кислородной струи с температурой 1200–1300°C и с последующим охлаждением образцов с тыльной стороны сжатым воздухом до комнатной температуры. Сколов и отслоения покрытия после 900 циклов не наблюдалось. При этом на образцах без покрытия на кромках наблюдалось оплавление и разгар жаропрочного сплава. Следует отметить, что образцы с двухстадийным соединительным слоем ТЗП, которые имеют на 10–20% более высокую жаростойкость (по гравиметрическим измерениям), по сравнению с образцами с плазменным соединительным слоем имеют по визуальному осмотру несколько более низкую термостойкость (больше мелких сколов керамического слоя на торцах образцов).

На рис. 3, а представлена микроструктура сплава ВЖ155У с ТЗП после испытаний на термостойкость по режиму: 1200 \rightleftharpoons 200°C, 912 циклов – трещин в поверхностном слое сплава не наблюдается. На образцах из сплава ВЖ155У без покрытия после аналогичных испытаний наблюдались изменения в поверхностном слое – разгары основного материала с образованием рыхлой структуры, глубина окисления поверхностного слоя сплава составила 20–30 мкм (рис. 3, б).

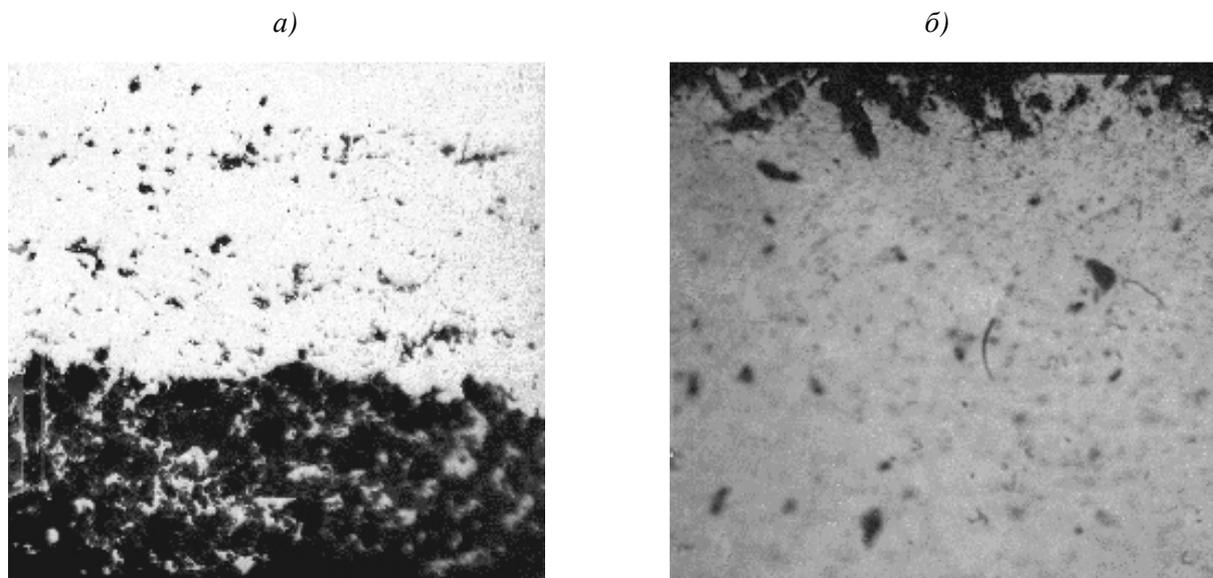


Рис. 3. Микроструктура ($\times 250$) сплава ВЖ155У с ТЗП (а) и без покрытия (б) после испытаний на термостойкость (912 циклов) по режиму 1200 \rightleftharpoons 200°C

В целом проведенные испытания показали высокие защитные свойства ТЗП с соединительным слоем ПНХ20К20Ю13 без шликерного алитирования и ПНХ20К20Ю13 (или ПНХ16Ю7) со шликерным алитированием и внешним керамическим слоем из керамик О-4 ($ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3$; микрогранулированный порошок), О-5 ($ZrO_2 \cdot Yb_2O_3$) и О-7 ($ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3$; порошок с округлыми частицами, сфероидизированный). Эти покрытия обеспечивают длительную защиту сплавов ВЖ155, ВЖ159, ВЖ155У (ВЖ171) в области температур 1100–1200°C, не снижают длительной жаропрочности сплавов, позволяют в 2 раза и более повысить термостойкость сплавов и обеспечивают теплозащитный эффект $>100^\circ C$ при толщине керамического слоя покрытия ~ 120 мкм. Следует отметить, что использование слоя, напыленного из порошка $ZrO_2 \cdot Yb_2O_3$, в качестве внешнего слоя покрытия позволяет на 20–30% снизить коэффициент теплопроводности керамического слоя покрытия (по сравнению со стандартным керамическим слоем из $ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3$). Поэтому целесообразно продолжить исследования ТЗП с керамическим слоем на основе $ZrO_2 \cdot Yb_2O_3$ в условиях, максимально приближенных к натурным испытаниям.

Рассмотренные плазменные и комплексные (плазменные + шликерные) теплозащитные покрытия могут успешно применяться для защиты крупногабаритных деталей горячего тракта ГТД и позволят повысить >2 раза ресурс деталей, а также снизить уровень эмиссии камер сгорания современных газотурбинных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мубояджян С.А. Высокотемпературные ионно-плазменные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Аэрокосмический журнал. Май-июнь 1998, с. 74–75.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Защитные покрытия лопаток турбин перспективных ГТД //ГТТ, 2001, №3(12), с. 30–32.

УДК 620.197

А.Н. Луценко, С.А. Мубояджян, С.А. Будиновский

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Несмотря на значительные успехи в области создания покрытий для лопаток турбин и компрессоров авиационных ГТД, в частности для защиты поверхности конструкционных материалов от окисления или эрозионно-коррозионного повреждения, композиции сплав–покрытие уже не обеспечивают в полной мере необходимого уровня эксплуатационных свойств, что возможно связано с возросшими требованиями по обеспечению надежности ответственных деталей и применением технологии, не решающей поставленной задачи. Поэтому в последнее время появилось большое число работ, направленных на исследование возможности повышения надежности деталей ГТД с использованием поверхностного модифицирования. Ожидаемый прирост служебных свойств материала деталей в этих работах связывают с целенаправленным изменением структурно-фазового состояния поверхности различными, часто конкурирующими между собой методами. К ним можно отнести обработку пучками ускоренных частиц, плазменными потоками, лазерным излучением и ряд других методов, пригодных для легирования тонкого поверхностного слоя, управления напряженным со-