

# Экспериментальные исследования прочностных характеристик слоев теплозащитных покрытий при рабочих температурах

**Бычков Н.Г., Хамидуллин А.Ш., Першин А.В., Авруцкий В.В.**

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

e-mail: khamidullin@rtc.ciam.ru

Рассмотрены методы определения прочностных свойств отдельных слоев теплозащитных покрытий, в том числе наиболее распространенный метод нормального отрыва покрытия при комнатной температуре по ASTM-C633. Описаны разработанные в ЦИАМе методы, конструкции образцов и оснастки для экспериментального определения когезионной и адгезионной прочности отдельных слоев керамических теплозащитных покрытий при рабочих температурах. Представлены результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик отдельных слоев покрытий (металлического подслоя и керамического слоя) при рабочих температурах до 1150°C на втулочных образцах с металлическим подслоем и кольцевых образцах с комплексным теплозащитным покрытием.

**Ключевые слова:** теплозащитное покрытие, прочностные свойства, адгезионная прочность, когезионная прочность, стабилизированный оксидом иттрия диоксид циркония.

## Experimental investigations of the strength properties of the thermal barrier coatings layers at working temperatures

**Bychkov N.G., Khamidullin A.S., Pershin A.V., Avrutsky V.V.**

*CIAM, Moscow*

The methods of determination of the strength properties of separate layers of thermal barrier coatings are considered. The most distribution was gained by the method of a normal separation of the coating at room temperature according to ASTM-C633. The methods, designs of samples and equipment developed in CIAM for the experimental determination of the cohesive and adhesive durability of separate layers of ceramic thermal barrier coating at working temperatures are described. The results of experimental studies of the strength characteristics of separate layers of coating (bond coat and ceramic top coat) at working temperatures up to 1150°C are presented on sleeve samples with a metal bond coat and ring samples with a complex thermal barrier coating.

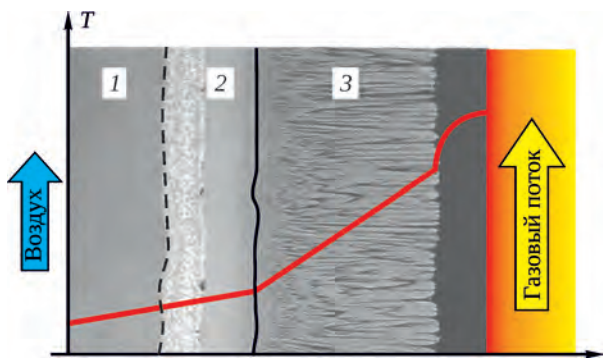
**Keywords:** thermal barrier coating, strength properties, adhesion strength, cohesion strength, yttria stabilized zirconia.

### Введение

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) невозможно представить без керамических теплозащитных покрытий (ТЗП), используемых для защиты деталей горячего тракта (рабочих и сопловых лопаток турбин, элементов камеры сгорания и др.) от высоких температур и агрессивного газового потока. Как правило,

покрытия состоят из промежуточного металлического подслоя, внешнего керамического слоя и тонкой (толщиной в несколько микрон) оксидной пленки  $Al_2O_3$ , формируемой на границе керамика/подслой (рис. 1).

Внешний керамический слой, обладающий низким коэффициентом теплопроводности, предназначен для снижения температуры поверхности охлаждаемой детали. Наиболее распространенным материалом



**Рис. 1.** Принципиальная схема многослойного ТЗП:  
1 – суперсплав; 2 – металлический подслой толщиной  $\delta = 50 \dots 100$  мкм; 3 – керамический слой толщиной  $\delta = 100 \dots 150$  мкм

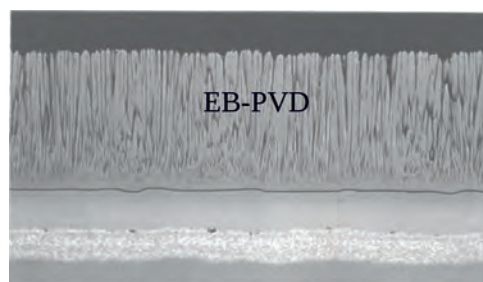
для нанесения керамического слоя является двуокись циркония, стабилизированная 6...9% (по массе) оксидом иттрия (YSZ). Такое покрытие обладает на данный момент оптимальным, относительно «конкурирующих» оксидов, сочетанием физико-механических свойств – низким коэффициентом теплопроводности, высоким температурным коэффициентом линейного расширения, фазово-структурной стабильностью при температурах до 1200°C.

**Таблица.** Свойства некоторых исследуемых за рубежом материалов для замены YSZ [1]

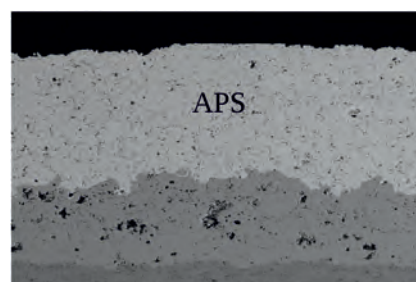
Материал	$T_{пл}, K$	$\lambda, Вт/(м \cdot K)$	$\alpha \cdot 10^{-6}, 1/K$	$E, ГПа$
ZrO <sub>2</sub>	2953	2,17	15,3	21
3YSZ	2973	2,12	11,5	–
8YSZ (APS)	–	–	10,7	40
18YSZ	–	–	10,53	–
5%CaO + ZrO <sub>2</sub>	2558	–	9,91	149,3
3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> × 2SiO <sub>2</sub>	2123	3,3	5,3	30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2323	5,8	9,6	30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (TGO)	–	–	8	360
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	–	–	5,56	–
CeO <sub>2</sub>	2873	2,77	13	172
La <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	2573	1,56	9,1	175
La <sub>2</sub> Ce <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	–	0,6	12,3	–
BaZrO <sub>3</sub>	2963	3,42	8,1	181
SrZrO <sub>3</sub>	2883	2,08	10,9	170
YBa <sub>2</sub> ZrO <sub>6</sub>	1973	0,37	–	120
CaTi <sub>2</sub> ZrO <sub>7</sub>	–	2,1	9,04	–
TiO <sub>2</sub>	2098	3,3	9,4	283
Y <sub>2</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	2173	–	11	–
Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	2243	3,0	9,1	–
LaMgAl <sub>11</sub> O <sub>19</sub>	–	1,7	10,1	–
LaPO <sub>4</sub>	2343	1,8	10,5	133
CePO <sub>4</sub>	2318	–	9...11	–
2MgO × NiO	2573	1,9	–	–
BaNd <sub>2</sub> Ti <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	1800	0,5	11,5	–
NiCoCrAlY	–	–	17	86
IN737	–	–	16	197

Вместе с тем повышение температуры газа перед турбиной, обусловленное современными тенденциями развития двигателей, ведет к увеличению температуры эксплуатации ТЗП, что ограничивает применение материала YSZ в перспективных ГТД. Это обуславливает необходимость поиска более стабильных материалов покрытий для замены YSZ, некоторые из которых представлены в таблице. Рассматриваемые керамические композиции имеют индивидуальные недостатки, такие как низкий температурный коэффициент линейного расширения, высокий коэффициент теплопроводности, нестабильность при повышенных температурах и др., затрудняющие их использование.

Среди технологий нанесения керамического слоя на детали ГТД наибольшее применение получили плазменное напыление на воздухе (APS) и электронно-лучевое осаждение в вакууме (EB-PVD). У каждой из этих технологий есть как достоинства, так и недостатки. APS покрытия обладают невысокой стоимостью и высокой технологичностью, тогда как EB-PVD покрытия за счет своей столбчатой структуры наиболее долговечны в условиях циклического термомеханического деформирования детали, более стойки к эрозии и обладают лучшей прочностью сцепления (адгезионной



Кoeffициент теплопроводности, Вт/(м·К) .... 1,5...1,9  
Шероховатость поверхности, мкм ..... 0,5...1  
Адгезионная прочность, МПа ..... 400  
Модуль упругости, ГПа ..... 90  
Скорость эрозии (отн.) ..... 1



Кoeffициент теплопроводности, Вт/(м·К) .... 0,8...1,1  
Шероховатость поверхности, мкм ..... 4...10  
Адгезионная прочность, МПа ..... 20...40  
Модуль упругости, ГПа ..... 200  
Скорость эрозии (отн.) ..... 7

**Рис. 2.** Структуры и свойства керамического слоя YSZ, нанесенного по технологии EB-PVD и APS [2]

прочностью) с подслоем. На рис. 2 показаны фотографии и ориентировочные характеристики керамического слоя YSZ, нанесенного по технологиям APS и EB-PVD.

Параллельно с поиском оптимального состава для перспективного керамического ТЗП осуществляется совершенствование структуры покрытий. Повышение ресурса плазменных покрытий предложено осуществлять за счет создания микротрещиноватой или многослойной структуры керамического слоя с индивидуальными свойствами его отдельных слоев, что повышает эрозионную и коррозионную защиту ТЗП. Существует оригинальное предложение ЦИАМ по защите керамического слоя ТЗП от механических повреждений и эксплуатационных факторов путем нанесения на его поверхность тонкого металлического экрана из жаростойкого сплава (например, ВКНА или ПХ20Ю6), который повысит ресурс покрытия на время своей работоспособности и уменьшит шероховатость поверхности.

Соединительный жаростойкий металлический подслоя защищает основной материал детали от окисления и коррозии, а также обеспечивает требуемую прочность сцепления с внешним керамическим слоем. Для его нанесения, как правило, используют материал системы M-Cr-Al-Y (M = Ni, Co, Ni + Co) с различным содержанием дополнительных легирующих элементов (Hf, Re, Ta и др.). Среди технологий нанесения подслоя наибольшее распространение получили методы плазменного напыления на воздухе (APS), в вакууме (VPS), при низком давлении (LPPS), а также высокоскоростное газопламенное напыление (HVOF).

Термически выращенный оксид (ТГО) является продуктом окисления подслоя. Как известно, керамика YSZ не является барьером для кислорода, который через открытую пористость и кристаллическую решетку циркония проникает к поверхности жаростойкого подслоя. Формируемый естественным образом слой

оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) тормозит дальнейшее проникновение кислорода к поверхности подслоя, однако постепенное увеличение толщины оксидной пленки приводит к росту внутренних напряжений в покрытии и снижению его долговечности.

На покрытие в работе действует целый комплекс внутренних и внешних повреждающих факторов, таких как центробежные силы, силы трения от газового потока, попадание посторонних предметов, эрозия, спекание, рост оксидной пленки, деформация подслоя и другие, которые не только стремятся «единолично» разрушить ТЗП, но и, взаимодействуя друг с другом, ускоряют те или иные негативные процессы. В связи с этим к покрытиям предъявляется комплекс требований, среди которых одними из основных являются высокие значения прочностных свойств отдельных слоев ТЗП (когезионной прочности) и прочности сцепления слоев между собой и жаропрочным сплавом. Поэтому при выборе оптимального состава, структуры и толщины ТЗП следует учитывать не только теплофизические, но и прочностные свойства отдельных слоев при рабочих температурах, необходимые для расчетного прогнозирования ресурса деталей с покрытием.

В настоящее время для определения прочностных свойств керамического слоя наибольшее распространение получил клеевой метод, заключающийся в приклеивании захвата к покрытию, нанесенному на поверхность идентичного ответного захвата (рис. 3).

В процессе испытаний при приложении отрывной нагрузки (перпендикулярно поверхности нанесения покрытия) часто возникает смешанное когезионно-адгезионное разрушение или разрушение по клеевому соединению, что затрудняет интерпретацию получаемых результатов. При этом клеевой метод не позволяет проводить испытания при повышенных температурах из-за резко снижающихся прочностных свойств клея.

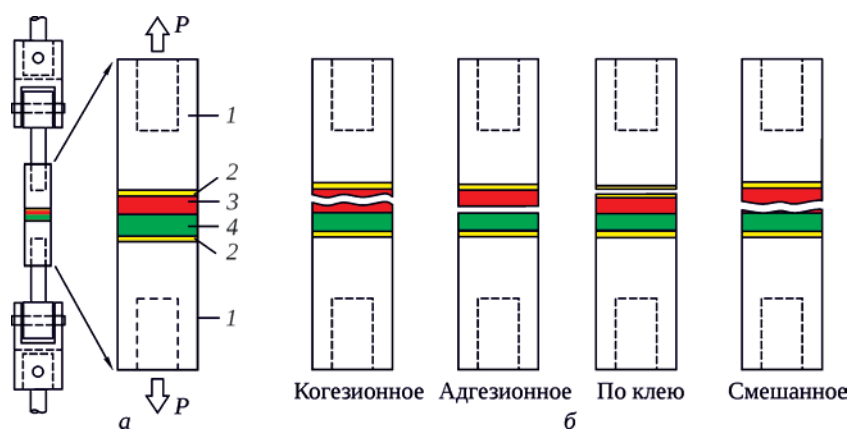
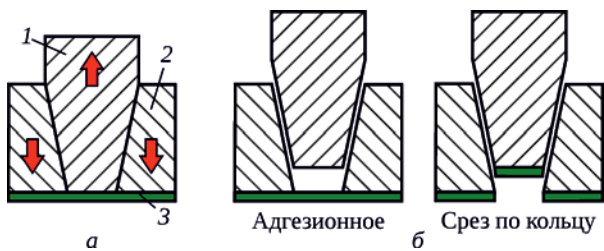


Рис. 3. Клеевой метод для определения прочностных свойств керамического слоя ТЗП [3]:  
 а – схема нагружения; б – возможные виды разрушений в процессе испытаний;  
 1 – захват; 2 – адгезив; 3 – керамический слой; 4 – металлический подслоя



**Рис. 4.** Штифтовой метод определения адгезионной прочности:

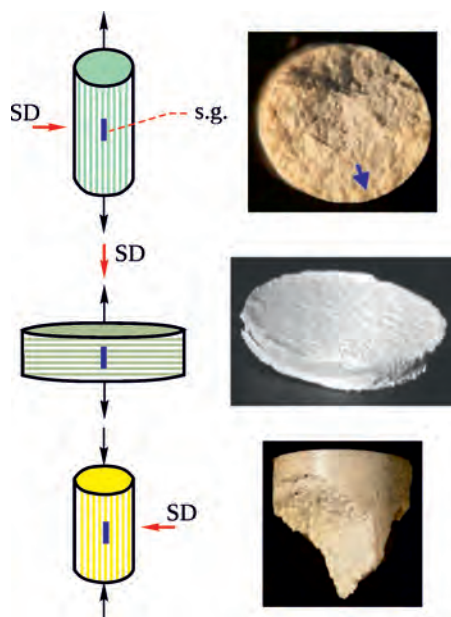
*a* – схема нагружения; *б* – виды разрушений;  
1 – штифт; 2 – матрица; 3 – покрытие

Для определения адгезионной прочности металлического подслоя используется метод штифтов [4], заключающийся в нанесении покрытия на общую плоскую поверхность оправки и штифта, вставленного в ее конусное отверстие, с последующим нагружением образца растягивающей нагрузкой (рис. 4). При таких испытаниях помимо отрыва покрытия от подложки возможен его срез по кольцевому зазору штифта, для исключения которого необходимо значительно

увеличивать толщину слоя ТЗП или формировать на его поверхности дополнительный армирующий слой.

Когезионную прочность керамического слоя ТЗП, помимо описанного выше метода ASTM-C633, определяют путем испытаний габаритных образцов из материала керамического слоя (рис. 5). Образцы для таких испытаний изготавливают путем нанесения слоя покрытия толщиной несколько миллиметров на подложку (например, выполненную из графита) с последующим их разделением. Получение образцов такой толщины возможно только газотермическими методами. При этом механические характеристики, полученные при испытаниях габаритных образцов, могут значительно отличаться от свойств реальных тонких слоев ТЗП из-за масштабного фактора.

Для получения достоверных результатов необходимо проводить испытания отдельных слоев ТЗП при их реальной толщине, соблюдении технологии и режимов нанесения, рабочих условиях нагружения и рабочей температуре.

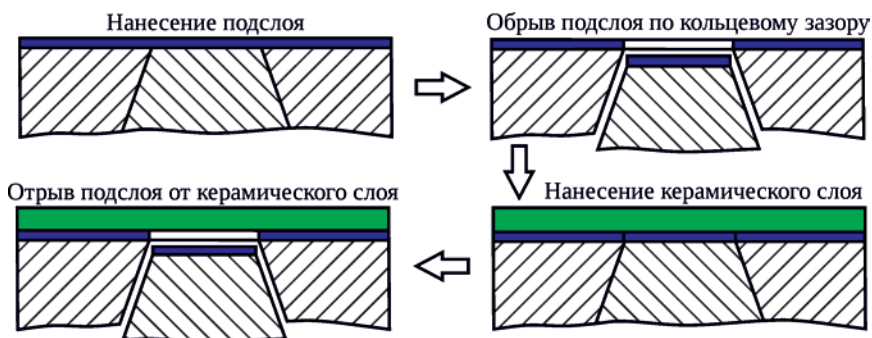


Метод испытаний . . . . . ASTM C1273  
Размер образца, мм . . . . . Ø5×15  
Количество . . . . . 10  
Прочность, МПа . . . . . 15

Метод испытаний . . . . . ASTM C1468  
Размер образца, мм . . . . . Ø5×3  
Количество . . . . . 10  
Прочность, МПа . . . . . 11

Метод испытаний . . . . . ASTM C1424  
Размер образца, мм . . . . . Ø5×10  
Количество . . . . . 10  
Прочность, МПа . . . . . 300

**Рис. 5.** Схемы нагружения и результаты испытаний образцов из материала YSZ при температуре 20°C [5]



**Рис. 6.** Усовершенствованный штифтовой метод для экспериментального определения адгезионной прочности керамического слоя



## Разработка методов прочностных испытаний слоев ТЗП

Авторами статьи предложен усовершенствованный штифтовой метод, позволяющий определять адгезионную прочность керамического слоя ТЗП. Для определения прочности сцепления керамического слоя с металлическим подслоем испытания необходимо проводить в два этапа (рис. 6). На первом этапе на поверхность, образованную матрицей и штифтом, наносится металлический подслой толщиной, достаточной для его гарантированного прорыва по кольцевому зазору в процессе предварительных испытаний. На втором этапе на вновь состыкованный образец (с уже оборванным по кольцу подслоем) наносится керамический слой, при необходимости осуществляется его упрочнение по внешней поверхности во избежание прорыва по кольцевому зазору.

Предложенный метод является более трудоемким, поскольку испытания каждого образца проходят в два этапа. Преимуществами усовершенствованного метода являются: возможность проведения испытаний керамического слоя при рабочих температурах и экономия материала (матрица и штифт могут быть выполнены из любого жаростойкого материала, имеющего достаточную адгезионную прочность с подслоем).

Экономия материала является очень важным аспектом при разработке методов испытаний покрытий. К примеру, для определения адгезионной прочности металлического подслоя к суперсплаву, подложку необходимо изготавливать из материала детали, а с учетом того, что разработка оптимального ТЗП требует испытаний большого числа образцов для каждой технологии, режимов, составов, шероховатостей поверхностей и т.п., возникают значительные затраты как на материал, так и на изготовление образцов на производстве.

В ЦИАМе разработано устройство для определения прочности сцепления отдельных слоев ТЗП при сдвиге (рис. 7), на которое получен патент РФ [6]. Особенность разработанного метода – наличие на внешней цилиндрической поверхности образца кольца, ограничивающего площадь нанесения слоя покрытия на одну из втулок. Таким образом создаются условия, при которых происходит сдвиг покрытия с основного материала, а не его прорыв по кольцевому зазору в месте стыковки втулок. Для определения адгезионной прочности керамического слоя к подслою испытания проводятся в два этапа, схожих с этапами описанного выше усовершенствованного штифтового метода: изначально обеспечивается намеренный обрыв металлического слоя по зазору втулок, а затем на вновь состыкованный образец с ограничительным кольцом наносится керамический слой.

Метод позволяет проводить испытания при высоких рабочих температурах, однако имеет описанный выше недостаток – для исследования прочности сцепления металлического подслоя втулки образца необходимо выполнять из жаропрочного сплава детали ГТД, что повышает себестоимость метода. Однако для исследования адгезии только керамического слоя к металлическому подслою затраты на изготовления образцов значительно снижаются, поскольку может быть использован более дешевый материал для изготовления втулок, обеспечивающий требуемую прочность сцепления с металлическим подслоем.

Для определения адгезионной прочности отдельных слоев ТЗП разработан метод испытания покрытия на сдвиг при сжатии [7], отличающийся простотой образцов и значительной экономией материала. Образцы представляют собой кольца шириной 1 мм, изготавливаемые следующим образом. Изначально из жаропрочного сплава изготавливается трубка с заданными размерами, на внешнюю цилиндрическую поверхность которой по серийной технологии наносится металлический подслои. Из полученной заготовки нарезаются кольца (с нанесенным подслоем), которые затем собираются на оправке через промежуточные тонкие прокладки из материала, имеющего низкую адгезию к керамике. На внешнюю поверхность кольцевых образцов с подслоем по серийной технологии наносится керамический слой необходимой толщины.

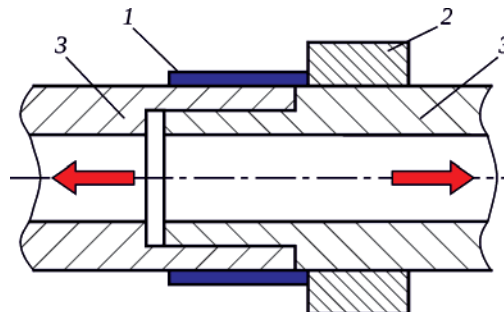


Рис. 7. Схема метода ЦИАМ по определению адгезионной прочности слоев ТЗП при испытаниях на сдвиг [6]:  
1 – металлический подслои; 2 – ограничительное кольцо; 3 – втулка

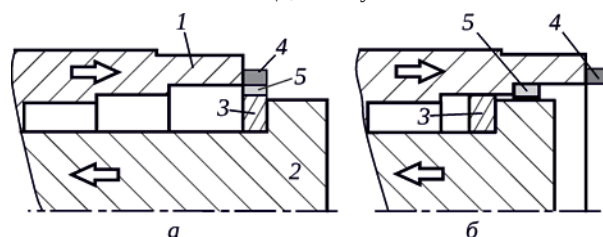


Рис. 8. Схема последовательного нагружения слоев ТЗП сдвигающей нагрузкой:

а – образец до нагружения; б – образец после нагружения;  
1 – пуансон; 2 – палец; 3 – кольцо; 4 – керамический слой;  
5 – металлический подслои

Для последовательного приложения к слоям ТЗП сдвигающей нагрузки разработаны конструкции оснастки, включающей палец, пуансон и переходник. Размеры элементов оснастки, непосредственно осуществляющих нагружение покрытий, устанавливаются исходя из толщин слоев ТЗП и кольцевой заготовки. На рис. 8 представлена схема последовательного нагружения слоев ТЗП по разработанному методу. Для обеспечения требуемой точности позиционирования элементов устройства все посадки выполняются переходными, а материал оснастки идентичен материалу кольцевых образцов.

### Образцы и оснастка для испытаний

Для определения когезионной прочности металлического подслоя в ЦИАМе разработана конструкция составных втулочных образцов (рис. 9), представляющих собой две втулки, одна из которых имеет цилиндрический выступ, а другая – идентичную цилиндрическую впадину. При стыковке по посадке скольжения втулки образуют единую рабочую поверхность для нанесения испытываемого слоя ТЗП.

Втулочный образец имеет резьбовые участки для закрепления в захватах испытательной машины, а также сквозное отверстие для стяжки втулок перед нанесением слоя покрытия с помощью болта, гроверной шайбы и гайки. Изготовленные втулочные образцы из жаростойкого сплава показаны на рис. 10. На рабочую поверхность образцов нанесен металлический подслои ВСДП-3 + ВСДП-16 толщиной 70...75 мкм, определенной на микроскопе ИМЦ-150 с цифровым блоком регистрации (дискретность 1 мкм).

Перед проведением испытаний из втулочных образцов удаляются стягивающие элементы, после чего образец через переходники закрепляется в захватах испытательной машины, осуществляется разогрев до заданной температуры и нагружение образца растягивающей силой. Предел когезионной прочности металлического подслоя при температуре  $T$  определяется из стандартного соотношения:

$$\sigma_b^{МП}(T) = \frac{P}{(d^{МП} + \delta^{МП})\pi\delta^{МП}}, \quad (1)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, кгс;  $d^{МП}$  – внутренний диаметр металлического подслоя, мм;  $\delta^{МП}$  – толщина металлического подслоя, мм.

Для определения адгезионной прочности систем подслои/керамика и подслои/суперсплав изготовлены кольцевые образцы и оснастка для проведения испытаний (рис. 11 и рис. 12). На кольцевые образцы нанесено комплексное ТЗП – металлический подслои ВСДП-3 + ВСДП-16 толщиной 70 мкм и внешний

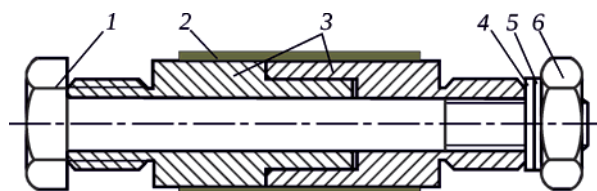


Рис. 9. Принципиальная схема втулочного образца для определения когезионной прочности металлического подслоя [8]:

1 – болт; 2 – покрытие; 3 – втулка; 4 – шайба; 5 – гровер; 6 – гайка



Рис. 10. Втулочные образцы с металлическим подслоем



а



б

Рис. 11. Кольцевые образцы с ТЗП: а – собранные на оправке с промежуточными прокладками; б – снятые с оправки



Рис. 12. Оснастка для проведения испытаний

керамический слой столбчатой структуры YSZ толщиной 140 мкм.

В процессе испытаний кольцевых образцов после выхода на заданный уровень температуры к отдельным слоям ТЗП при движении пуансона по пальцу последовательно прикладывается сдвигающая нагрузка. По результатам определения разрушающих усилий  $P_1$  для керамического слоя и  $P_2$  для металлического подслоя вычисляется предел адгезионной прочности отдельных слоев ТЗП при температуре  $T$ :

$$\sigma_{адг}^{КС(МП)}(T) = \frac{P_{1(2)}}{d^{КС(МП)}\pi s}. \quad (2)$$

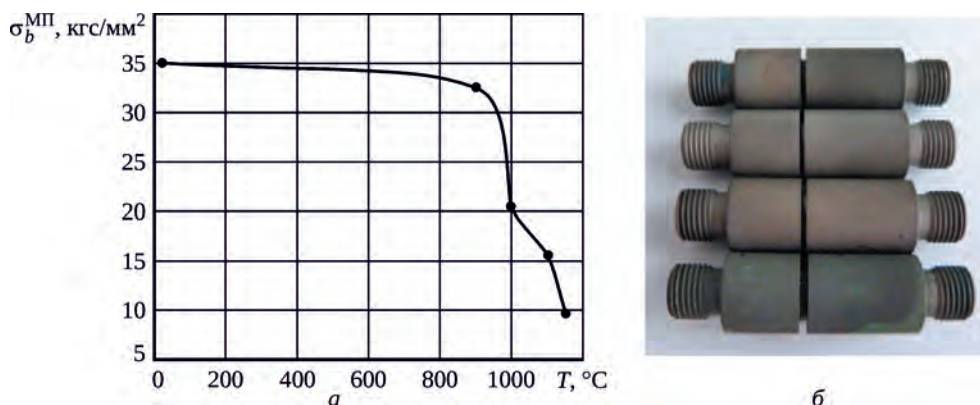


Рис. 13. Результаты испытаний металлического подслоя:

а – изменение предела когезионной прочности металлического подслоя; б – втулочные образцы после испытаний

Здесь  $P_{1(2)}$  – разрушающая нагрузка, кгс;  $d^{КС(МП)}$  – внутренний диаметр керамического слоя (металлического подслоя), мм;  $s$  – ширина керамического слоя (металлического подслоя), мм.

Экспериментальное определение прочностных свойств отдельных слоев ТЗП при рабочих температурах до 1150°C выполнено на установке УМЭ-10ТМ с электромеханическим нагружением. Регистрация разрушающей нагрузки осуществлялась по шкале дина-

мометра с ценой деления 1,6 кгс. Перед проведением испытаний динамометр установки тарирован с использованием образцового динамометра «Дор-5». В процессе разогрева контроль температуры образца осуществлялся с помощью хромель-алюмелевой термопары диаметром 0,3 мм (изолированной каолиновой ватой от излучения нагревателей) и микропроцессорного быстродействующего температурного измерителя-регулятора «Метакон-515» фирмы ООО «КонтрАвт». Средняя скорость разогрева составляла 13°C/мин.

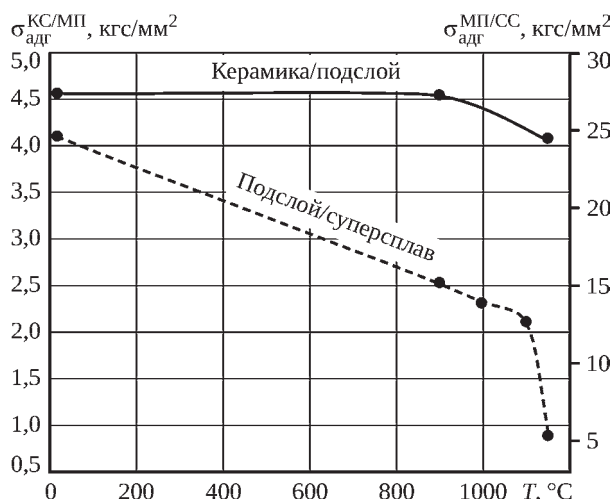


Рис. 14. Адгезионная прочность систем керамический слой / металлический подслей и металлический подслей / сплав БЖНС при различных температурах

### Результаты экспериментальных исследований

Испытания втулочных образцов для определения когезионной прочности нанесенного металлического подслоя выполнены при температурах 20, 900, 1000, 1100 и 1150°C. Результаты испытаний, представленные на рис. 13,а, показывают, что прочность подслоя в диапазоне 20...900°C меняется незначительно (на 7%), тогда как при дальнейшем увеличении температуры наблюдается резкое снижение  $\sigma_b^{МП}$  с 32,66 до 9,75 кгс/мм<sup>2</sup> при 1150°C. На рис. 13,б показан вид втулочных образцов после проведения испытаний.

Значения адгезионной прочности систем керамика/подслей и подслей/суперсплав, определенные на кольцевых образцах при различных температурах испытаний, представлены на рис. 14.

Прочность сцепления металлического подслоя с жаропрочным сплавом БЖНС в диапазоне температур 20...1100°C уменьшается с 24 до 12,5 кгс/мм<sup>2</sup>, при температуре 1150°C наблюдается резкое падение адгезионной прочности. Керамический слой YSZ столбчатой структуры показывает высокий уровень адгезионной прочности с металлическим подслоем, сохраняющийся до температур 900°C, с последующим плавным снижением на 10% при 1150°C. На рис. 15 представлены фотографии металлического подслоя и керамического слоя после их сдвига.



Рис. 15. Подслей и керамический слой после испытаний: а – отделившийся от образца металлический подслей; б – керамический слой, сдвинутый с поверхности подслоя

---

## Заклучение

Разработанные в ЦИАМе методы, конструкции образцов и оснастки позволяют определить когезионную и адгезионную прочность отдельных слоев ТЗП при рабочих температурах.

Экспериментальные исследования прочностных характеристик слоев ТЗП при температурах до 1150°C на втулочных образцах с металлическим подслоем толщиной 70...75 мкм и кольцевых образцах с комплексным теплозащитным покрытием (металлическим подслоем толщиной 70 мкм и внешним керамическим слоем столбчатой структуры YSZ толщиной 140 мкм) показали резкое падение когезионной прочности металлического подслоя при температурах выше 900°C и резкое снижение адгезионной прочности системы металлический подслей / сплав БЖНС при температуре 1150°C. Адгезионная прочность системы

керамический слой / металлический подслей не изменяется при повышении температуры до 900°C с последующим плавным уменьшением на 10% при температуре 1150°C.

Для точного прогнозирования эксплуатационного ресурса ТЗП, а также выполнения достоверных расчетов деталей с покрытиями, необходимо учитывать изменения прочностных свойств керамического слоя и металлического подслоя после их длительной высокотемпературной выдержки, соответствующей режимам эксплуатации, с учетом вклада диффузионных процессов, роста оксидной пленки на границе керамика / подслей, спекания керамического слоя и др. Представляется целесообразным провести экспериментальные исследования прочностных свойств (адгезионной и когезионной прочности) отдельных слоев ТЗП после длительной выдержки при температуре эксплуатации.

## Литература / References

1. Glesson B. Thermal Barrier Coatings for Aeroengine Applications // J. of Propulsion and Power. 2006. Vol. 22. No. 2.
2. Xu H., Guo H. Thermal Barrier Coatings // Woodhead Publishing Limited. 2011.
3. C633-03. Standard Test Method for Adhesion of Cohesive Strength of Flame-Sprayed Coatings [S] // Annual Book of ASTM Standards. 2003.
4. Захарова Б.Н., Новикова Б.Н. Определение свойств газотермических покрытий // Методическое руководство МР1.595-27-001-93. ВИАМ, 1993. 90 с.  
Zakharova B.N., Novikova B.N. Opredelenie svoystv gazotermicheskikh pokrytii [Definition of Properties of Flame-Sprayed Coatings]. Methodical management МР1.595-27-001-93. VIAM, 1993. 90 p.
5. Robert A. Miller et al. Mechanical Properties of Plasma-Sprayed ZrO<sub>2</sub>-8wt%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Thermal Barrier Coatings // NASA TM №2004-213216. 2004.
6. Бычков Н.Г., Першин А.В., Хамидуллин А.Ш. Способ определения адгезионной прочности теплозащитного покрытия на сдвиг и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2548378. 2015. Бюл. № 11.  
Bychkov N.G., Pershin A.V., Khamidullin A.Sh. Sposob opredeleniia adgezionnoi prochnosti teplozashchitnogo pokrytiia na sdvig i ustroystvo dlia ego osushchestvleniia [Procedure for Evaluation of Adhesion Shear Strength of Heat Shielding Coating and Device for its Implementation]. Patent RF No. 2548378. 2015.
7. Бычков Н.Г., Ножницкий Ю.А., Першин А.В., Хамидуллин А.Ш., Авруцкий В.В. Устройство для определения адгезионной прочности многослойного керамического теплозащитного покрытия. Патент РФ № 2643682. 2016. Бюл. № 4.  
Bychkov N.G., Nozhnitskii Yu.A., Pershin A.V., Khamidullin A.Sh., Avrutskiy V.V. Ustroystvo dlia opredeleniia adgezionnoi prochnosti mnogoslainogo keramicheskogo teplozashchitnogo pokrytiia [Device for Determining Adhesion Strength of Multi-Layer Ceramic Thermal-Barrier Coating]. Patent RF No. 2643682. 2016.
8. Бычков Н.Г., Хамидуллин А.Ш., Першин А.В. Устройство для формирования и испытания образцов тонких покрытий. Патент РФ № 2545082. 2015. Бюл. № 9.  
Bychkov N.G., Khamidullin A.Sh., Pershin A.V. Ustroystvo dlia formirovaniia i ispytaniia obraztsov tonkikh pokrytii [Device for Forming and Testing of Samples of Thin Coatings]. Patent RF No. 2545082. 2015.