

## Конкурсная работа

ГНЦ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

на участие в конкурсе «Авиастроитель года» по итогам 2015 года  
в номинации: За создание новой технологии

Разработка технологии экспериментальных исследований свойств ТЗП и их термоциклической долговечности на образцах и рабочих лопатках турбин

Разработанный комплекс оригинальных технологий позволяет определить прочностные и теплофизические характеристики тонких слоев ТЗП при рабочих температурах, которые необходимы для оценки НДС и ресурса деталей высокотемпературного тракта авиадвигателей. Проведены испытания на термоусталостную долговечность лопаток турбин с учетом реального снижения температуры суперсплава, определенного по методике ЦИАМ в условиях газопламенного разогрева.

В настоящее время керамические теплозащитные покрытия (ТЗП) играют очень важную роль в обеспечении коррозионной и тепловой защиты основного материала деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД). Снижение с их помощью температуры жаропрочного сплава (ЖС) на 100...150°C позволяет повысить как ресурс детали, так и температуру газа перед турбиной. Однако скол покрытия с поверхности изделия в эксплуатации вследствие воздействия комплекса механических и физико-химических факторов приводит к возникновению участков локального перегрева детали и снижению ее ресурса, в связи с чем, острой проблемой является повышения долговечности ТЗП в рабочих условиях. Выбор оптимального состава, структуры и толщины ТЗП, необходимо производить, основываясь на знаниях как теплофизических, так и прочностных свойств его отдельных слоев – керамического слоя (КС) и металлического подслоя (МП). Наиболее важными прочностными свойствами слоев ТЗП являются их когезионная прочность и прочность сцепления (адгезионная прочность) систем ЖС/МП и МП/КС. Коэффициенты температурного расширения (КТР) отдельных слоев ТЗП оказывают значительное влияние на долговечность покрытия в эксплуатации, поскольку их отличные от суперсплава значения приводят к возникновению внутренних напряжений, способствующих сколу ТЗП. В связи с этим, данные КТР подслоя и керамического слоя необходимы для достоверного прогнозирования долговечности покрытия в эксплуатации, а также для выполнения расчетов деталей с ТЗП.

Существуют различные методы определения прочностных характеристик слоев ТЗП. Наиболее распространенным в настоящее время является метод ASTM C633 [1], заключающийся в нанесении ТЗП на плоскую поверхность цилиндрического захвата и приклеивании к покрытию идентичной ответной детали. В процессе нагружения образца растягивающей нагрузкой возможно разрушение по КС (когезионная прочность), по границе КС/МП (адгезионная прочность), а также смешанного когезионно-адгезионного разрушения или обрыва по клеевому соединению. При этом резкое падение прочностных свойств клея с ростом температуры не позволяет проводить испытания образцов при высоких температурах.

Штифтовой метод [2] определения адгезионной прочности МП к суперсплаву заключается в нанесении слоя покрытия на торцевую поверхность конусного штифта, закрепленного в идентичном отверстии ответной детали, и последующем нагружении образца растягивающей нагрузкой. Нагружение покрытия, как и при клеевом методе, осуществляется силой, приложенной перпендикулярно к поверхности, тогда как в эксплуатации нагружение слоев ТЗП от термомеханических деформаций деталей ГТД происходит вдоль поверхности. Также в процессе испытаний штифтовым методом возможен прорыв покрытия по кольцевому зазору штифта, в связи с чем, требуется наносить толстый слой МП, значительно превышающий его реальную толщину в эксплуатации. Адгезионную прочность покрытий также определяют косвенными методами - царапания [3] и индентирования [4].

Когезионную прочность керамического слоя ТЗП, как правило, определяют описанным выше клеевым методом по ASTM-C633 или путем испытаний габаритных образцов [5], изготовленных из материала ТЗП. При этом механические характеристики ТЗП, полученные при

испытаниях габаритных стандартных образцов, могут значительно отличаться от свойств реальных тонких слоев покрытий. В связи с этим, для получения достоверных результатов необходимо проводить испытания отдельных слоев ТЗП при их реальной толщине, соблюдении технологии нанесения, рабочих условиях нагружения и температуре.

В качестве КТР отдельных слоев ТЗП при выполнении расчетов деталей ГТД с покрытиями, как правило, принимают данные, полученные по результатам испытаний габаритных образцов в dilatометрах [6], имеющих ограниченный температурный диапазон. Многообразие методов связано с варьированием способов разогрева образца и регистрации его удлинений. Для получения достоверных результатов, необходимо проводить испытания отдельных слоев ТЗП реальной толщины при температурах до 1200°C (а перспективных ТЗП до 1350°C), причем необходимо исследовать влияние длительной высокотемпературной выдержки на теплофизические свойства покрытий.

### Разработка технологии проведения испытаний ТЗП

В ЦИАМ разработаны экспериментальные методы определения прочностных свойств реальных тонких покрытий в направлении действия эксплуатационных нагрузок (вдоль поверхности) при рабочих температурах. Образец для определения адгезионной прочности систем «ЖС/МП» и «МП/КС», принципиальная схема которого представлена на рис. 1а, состоит из двух втулок, имеющих посадку скольжения (для исключения влияния сил трения на получаемые результаты) и образующих после стыковки единую внешнюю цилиндрическую поверхность [7]. Внутреннее сквозное отверстие необходимо для стяжки образца перед нанесением слоев ТЗП. На рабочей поверхности одной из втулок перед нанесением исследуемого слоя покрытия устанавливается и закрепляется кольцо, имеющее низкую адгезионную прочность с покрытием и необходимое для ограничения площади нанесения слоя ТЗП.

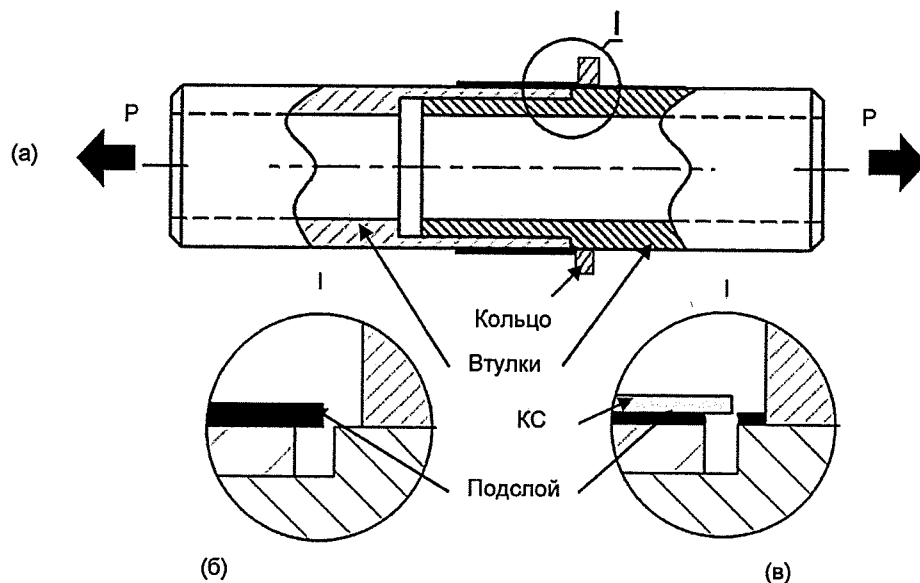


Рис. 1. Принципиальная схема образца для испытания отдельных слоев ТЗП (а) и последовательности определения когезионной прочности МП (б) и КС (в)

При определении адгезионной прочности отдельных слоев ТЗП, соотношение толщины верхнего слоя системы покрытия и ширины сдвигаемого участка должны находиться в соотношении, при котором в процессе нагружения гарантированно не происходит когезионного разрушения слоя ТЗП по месту стыковки втулок (Рис. 1б). Для определения адгезионной прочности системы «КС/МП», подслоя предварительно обрывается по кольцу в месте стыковки втулок. Для этого толщина подслоя должна быть такой величины, при которой происходит его разрыв, а не сдвиг с поверхности втулки (Рис. 1в). Предел адгезионной прочности слоев ТЗП

определяется по стандартному отношению разрушающей нагрузки к площади сдвига покрытия.

Разработанный метод и конструкции образцов позволяют определять прочностные характеристики слоев ТЗП, имеющих сплошную структуру, реальную толщину и нанесенных газотермическими методами по серийным технологиям.

Наиболее перспективные керамические покрытия имеют столбчатую структуру, формируемую, как правило, по электронно-лучевой технологии (ЭЛТ). Наличие в покрытии вертикальной пористости делает не целесообразным проведение испытаний при нагружении ТЗП вдоль поверхности растягивающими нагрузками, в связи с чем, разработана универсальная методика оценки адгезионной прочности слоев ТЗП, имеющих как сплошную, так столбчатую структуру. Образец представляет собой кольцо, выполненное из жаропрочного сплава, с нанесенными слоями ТЗП (Рисунок 2а). На рисунке 2б схематично изображен принцип последовательного определения адгезионной прочности слоев ТЗП. Данный метод позволит проводить прочностные испытания покрытий любой структуры, а простейшая конструкция кольцевых образцов обеспечит повышение технологичности, а также значительную экономию материала.

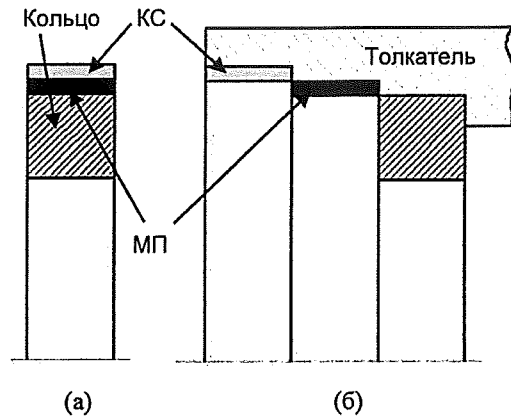


Рис. 2. Образец (а) и последовательность определения адгезионной прочности при приложении сдвиговых нагрузок (б)

Определение когезионной прочности отдельных слоев керамических ТЗП осуществляется последовательно на одном образце по методике, запатентованной в ЦИАМ [8].

Для определения коэффициента теплового расширения покрытий реальной толщины при рабочих температурах, в ЦИАМ разработан и запатентован метод испытаний [9]. Образцы, представляют собой отдельный слой ТЗП (подслой или керамический слой) реальной толщины, полученный путем его нанесения по серийной технологии на графитовую подложку с последующим удалением оправки (рис. 3).

Особенностями данного метода, позволяющего получать более достоверные данные КТР покрытий, является оригинальная конструкция нагревателя, использование высокочастотного разогрева и бесконтактного измерения удлинений образца.



Рис. 3. Образец керамического слоя ТЗП толщиной 50мкм для определения его КТР

Экспериментальная оценка термоциклической долговечности рабочих лопаток турбин проводится при индукционном высокочастотном поверхностном разогреве на машине, разработанной и изготовленной в ЦИАМ на базе унифицированного высокочастотного генератора типа ВЧГ4-25/0,44 и сервогидравлического нагружающего устройства Т14-184 с соблюдением основных положений, изложенных в ОСТ 10970-80 и ГОСТ 25505-85. В состав машины входят: высокочастотный генератор с индуктором, нагружающее устройство, маслонасосная станция, электрогидравлические автоматы пропорционального управления (УЭГГ), системы водо- и воздухообеспечения, система управления термоциклом, синхронизированная с системой управления растягивающей нагрузкой. Индуктор оригинальной конструкции для неравномерного разогрева опасного сечения (с минимальным местным запасом прочности) размещается напротив этого сечения с постоянным зазором.

Система воздушного охлаждения имеет два контура: внутренний контур обеспечивает непрерывное контролируемое охлаждение внутренней полости объекта, наружный контур обеспечивает обдув детали в полувихре охлаждения. При использо-

вании для разогрева лопаток ВЧГ с частотой 440 кГц хорошо моделируется поверхностный разогрев лопаток, происходящий в условиях эксплуатации.

Получение необходимого температурного поля на ее поверхности достигается в основном путем изменения плотности тока в ветвях индуктора по оригинальной методике. Профиль индуктора доводится с учетом подачи охлаждающего воздуха с заданным расходом.

Для определения температурного поля в опасном сечении рабочей лопатки после нанесения керамического ТЗП, необходимо по оригинальной методике определять величину снижения температуры основного материала детали после нанесения покрытия. Для этого в ЦИАМ разработан метод и установка Т14-226 для оценки эффективности тепловой защиты материала детали в условиях газопламенного разогрева с помощью ТЗП.

Основные положения методики заключаются в следующем. Литой образец трубчатой формы, изготовленный из жаропрочного материала, состоит из двух продольных половинок. На внутреннюю поверхность одной половины трубчатого образца, нанесено исследуемое покрытие, другая половина оставлена без покрытия. На наружной поверхности образца к обеим половинкам напротив друг друга привариваются термомпары. Внутри образца, по его оси проходит факел пламени с температурой порядка 1750°К. Параметры высокотемпературного газового потока одинаковы для обеих половинок трубчатого образца и температура наружной стороны половинки, защищенной покрытием, должна быть тем ниже, чем эффективней ТЗП.

#### Результаты экспериментальных исследований.

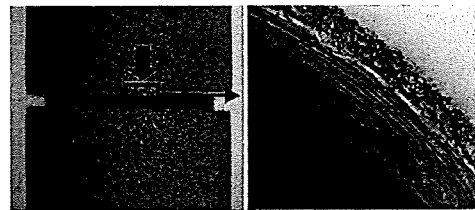
Проведены экспериментальные исследования по определению предела когезионной прочности подслоя и керамического слоя ТЗП, нанесенных плазменным методом на воздухе (APS). Испытания проводились при нормальной температуре. Результаты испытаний металлического подслоя и керамического слоя представлены в табл. 1 и табл.2, а также на рис. 4 - рис.6.

Табл. 1. Когезионная прочность плазменного металлического подслоя

Т, °С	$\delta_{\text{кер}}$ , мкм	$S_{\text{подсл}}$ , мм <sup>2</sup>	$P_{\text{разр}}$ , кг	$\sigma_{\text{б}}$ , кг/мм <sup>2</sup>
20	260	11,54	300	25,9
	270	11,98	318	26,5
	225	9,98	296	29,6

Табл. 2 Когезионная прочность плазменного керамического слоя

№	Т, °С	$\delta_{\text{кер}}$ , мкм	$S_{\text{кер}}$ , мм <sup>2</sup>	$P_{\text{разр}}$ , кг	$\sigma_{\text{б}}$ , кг/мм <sup>2</sup>
1	20	90	3,95	24,6	6,22
2	20	100	4,39	28,8	6,55



(а)

(б)

Рис. 4. Втулочный образец с оборванным подслоем (а) и поверхность разрушения (б)

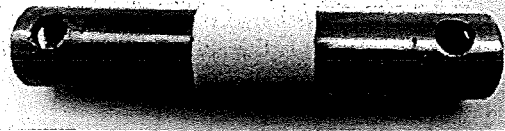


Рис. 5. Образец с нанесенным керамическим слоем

Толщина слоев ТЗП, необходимая для расчетов площадей поперечного сечения образцов, определялась с помощью микроскопа ИМЦ-150 с электронным блоком регистрации. Испытания проводились на разрывной машине УМЭ-10ТМ. Измерение разрушающей нагрузки керамического слоя производилось с помощью динамометра фирмы Test-systems.

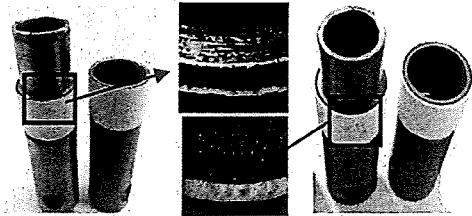
Таким образом, значения среднего предела когезионной прочности подслоя и керамического слоя при  $T=20^{\circ}\text{C}$  составили 27,3 и 6,4  $\text{кг}/\text{мм}^2$  соответственно.

Результаты определения адгезионной прочности подслоя и керамического слоя ТЗП на образцах с ограничительным кольцом представлены в таблице 3.

Табл. 3 Адгезионная прочность керамического слоя (№1) и подслоя (№2)

№	T, °C	$\delta_{\text{кер}}$ , мкм	$P_{\text{разр}}$ , кг	$\sigma_{\text{б}}$ , $\text{кг}/\text{мм}^2$
1	20	150	120	3,23
2	20	150	320	10,07

(а)

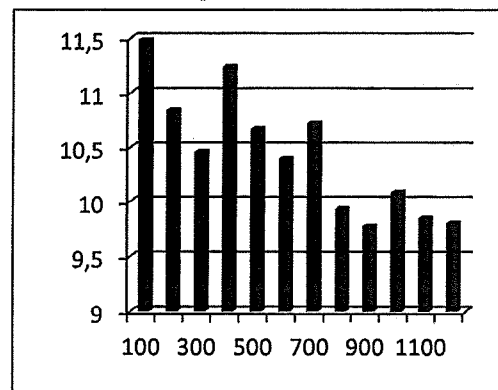


(б)

(в)

Рис. 6. Внешний вид образца с керамическим слоем (а) после проведения испытаний и поверхности разрушения керамических слоев образцов №1 (в) и №2 (г)

$\alpha \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$



T, °C

Рис. 7. Результаты определения КТР образца из  $\text{ZrO}_2$  по разработанной в ЦИАМ

Экспериментальная отработка методики определения КТР слоев ТЗП проводилась на образце из двуокиси циркония (основного материала для получения керамического слоя ТЗП) толщиной 500 мкм. Результаты испытаний, представлены на рис. 7.

В 2015 году также были проведены экспериментальные исследования эффективности тепловой защиты металла с помощью ТЗП из отечественной и зарубежной керамики, а также влияния нанесения этих покрытий на термоциклическую долговечность рабочих лопаток турбин из сплава ЖС-6Ф. Результаты испытаний показали незначительное (менее 1%) различие в эффективности теплозащиты и термоциклической долговечности рабочих лопаток с покрытиями из данных материалов, что позволяет заменить импортную керамику на отечественную. Причем, при снижении температуры опасного сечения рабочей лопатки на величину эффективности тепловой защиты, ее термоциклическая долговечность выросла в 2,6 раза. Нанесение ТЗП из отечественной керамики на рабочие лопатки из сплава ЖС-30МОНО повысило их термоциклическую долговечность примерно в 2 раза за счет снижения температуры металла на величину эффективности тепловой защиты, определенной по методике ЦИАМ при газопламенном разогреве трубчатых образцов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методы экспериментального определения прочностных и теплофизических характеристик отдельных слоев теплозащитных покрытий (реальной толщины и структуры) в направлении действия эксплуатационных нагрузок при рабочих температурах.
2. По разработанным методиками определены значения когезионной прочности подслоя и керамического слоя, нанесенных плазменным методом на втулочные образцы, которая составила в среднем  $27,3 \text{ кг/мм}^2$  и  $6,4 \text{ кг/мм}^2$  соответственно. Адгезионная прочность КС и МП составила соответственно 3,23 и  $10,07 \text{ кг/мм}^2$ .
3. Отработана методика определения КТР отдельных слоев ТЗП на образце из двуокиси циркония при температурах до  $1200^\circ\text{C}$ .
4. С использованием разработанных методик проведены экспериментальные исследования по определению эффективности тепловой защиты металла с помощью ТЗП из отечественной и зарубежной керамики и оценке их влияния на термоциклическую долговечность рабочих лопаток турбин из сплавов ЖС-6Ф и ЖС-30МОНО. Положительные результаты испытаний позволяют заменить зарубежную керамику для ТЗП на отечественную.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C633-03. Standard Test Method for Adhesion of Cohesive Strength of Flame-Sprayed Coatings [S] // Annual Book of ASTM Standards, 2003. [Стандартный метод испытаний по определению адгезионной и когезионной прочности газотермических покрытий (in English). Ежегодная Книга Американского общества по Стандартам испытаний материалов, 2003]
2. Захарова Б.Н., Новикова Б.Н. Определение свойств газотермических покрытий // Методическое руководство МР1.595-27-001-93, ВИАМ, 1993. [B.N. Zaharova and B.N. Novikova, Definition of properties of Flame-Sprayed Coatings (in Russian). Methodical management МР1.595-27-001-93, VIAM, 1993]
3. C.C. Berndt and R. McPherson Adhesion of thermally sprayed coatings // Australian Welding Research, December, 1982. [C.C. Berndt and R. McPherson Адгезия газотермических покрытий (in English). Австралийское сварочное общество, Декабрь, 1982]
4. M. Hadad, G. Marot. Adhesion tests for thermal spray coatings: Application range of tensile, shear and interfacial indentation methods // Proceedings of ITSC 2005 Thermal Spray connects: Explore its surfacing potential, 2005, p. 759-764. [M. Hadad, G. Marot Методы определения адгезионной прочности газотермических покрытий: испытания на растяжение, сдвиг и метод индентирования (in English). Семинар ITSC 2005 по газотермическим покрытиям: Исследование потенциала поверхности, 2005, стр. 759-764]
5. Robert A. Miller Mechanical Properties of Plasma-Sprayed  $\text{ZrO}_2\text{-8wt\%Y}_2\text{O}_3$  Thermal Barrier Coatings // NASA/TM 2004-213216, 2004 [Robert A. Miller Механические свойства плазменного  $\text{ZrO}_2\text{-8wt\%Y}_2\text{O}_3$  теплозащитного покрытия (in English), Технический отчет NASA №2004-213216, 2004]
6. E228-95. Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials with a Vitreous Silica Dilatometer // Annual Book of ASTM Standards, 1995 [E228-95. Стандартный метод испытаний по определению температурного

*коэффициента линейного расширения твердых материалов с кварцевым dilatометром (in English). Ежегодная Книга Американского общества по Стандартам испытаний материалов, 1995]*

7. Бычков Н.Г., Ножницкий Ю.А., Хамидуллин А.Ш., Першин А.В. Способ определения адгезионной прочности теплозащитного покрытия на сдвиг и устройство для его осуществления // Патент РФ №2548378 от 20.03.2015, Бюл.№11 [N.G. Vyckov, Y.A. Nozhnitsky, A.S. Khamidullin, A.V. Pershin Method of definition of adhesive durability of a heat-shielding coatings on shift and the device for its realisations (in Russian). Patent of Russia №2548378, 20.03.2015]

8. Бычков Н.Г., Хамидуллин А.Ш., Першин А.В. Устройство для формирования и испытания образцов тонких покрытий // Патент РФ №2545082 от 18.02.2015, Бюл.№9. [N.G. Vyckov, A.S. Khamidullin, A.V. Pershin The device for formation and test of samples of thin coatings (in Russian). Patent of Russia №2545082, 18.02.2015]

9. Бычков Н.Г., Ножницкий Ю.А., Хамидуллин А.Ш., Першин А.В. Устройство для определения температурного коэффициента линейного расширения теплозащитных пленочных покрытий // Заявка на патент РФ №2015121341, 2015 [N.G. Vyckov, Y.A. Nozhnitsky, A.S. Khamidullin, A.V. Pershin The device for definition of CTE of thermal barrier coatings, application for a patent №2015121341, 2015]