

УДК 621.45.038.74

## РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТДЕЛЬНЫХ, ИМЕЮЩИХ РЕАЛЬНУЮ ТОЛЩИНУ, СЛОЕВ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Н. Г. Бычков<sup>1</sup>, Ю. А. Ножницкий<sup>2</sup>, А. В. Першин<sup>3</sup>, А. Ш. Хамидуллин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>bychkov@rtc.ciam.ru, <sup>2</sup>nozhnitsky@ciam.ru, <sup>3</sup>pershin@rtc.ciam.ru, <sup>4</sup>khamidullin@rtc.ciam.ru

<sup>1-4</sup> ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова»

(ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»)

Поступила в редакцию 1 июля 2015 г.

**Аннотация.** Рассмотрены разработанные в ЦИАМ методы, конструкции образцов и оборудование для проведения экспериментальных исследований по определению прочностных свойств и коэффициента температурного расширения отдельных, имеющих реальную толщину, слоев керамических теплозащитных покрытий при рабочих температурах. Приводятся результаты определения прочностных свойств покрытий NiCrAlY+ ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученных по серийной технологии.

**Ключевые слова:** теплозащитные покрытия; двуокись циркония; адгезионная прочность; когезионная прочность; коэффициент температурного расширения.

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В настоящее время керамические теплозащитные покрытия (ТЗП) играют 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 70...150 °С 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 повышение 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 ока-

зывают значительное влияние на долговечность покрытия в эксплуатации, поскольку их отличные от имеющихся у ЖС значения приводят к возникновению внутренних напряжений, способствующих сколу ТЗП. В связи с этим, данные о КТР МП и КС 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 смешанное когезионно-адгезионное разрушение или обрыв 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, закреп-

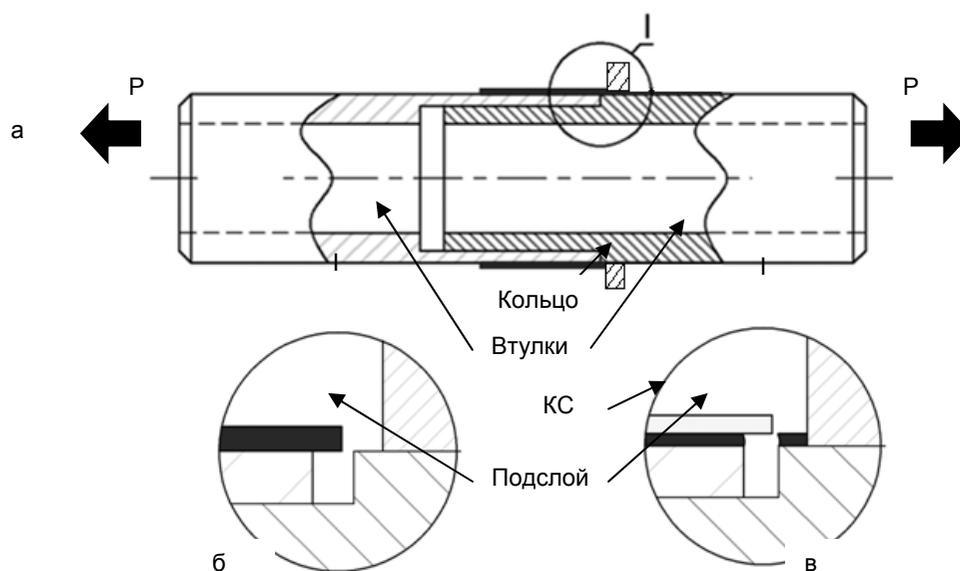
ленного в идентичном отверстии ответной детали, и последующем нагружении образца растягивающей нагрузкой. Нагружение покрытия, как и при клеевом методе, осуществляется силой, приложенной перпендикулярно к поверхности, тогда как в эксплуатации нагружение слоев ТЗП от термомеханических деформаций деталей 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: царапая [3] и индентирования [4].

Когезионную прочность КС ТЗП, как правило, определяют описанным выше клеевым методом по ASTM-C633 или путем испытаний массивных образцов [5], изготовленных из материала ТЗП. При этом механические характеристики ТЗП, полученные при испытаниях массивных 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 значений КТР отдельных слоев ТЗП при выполнении расчетов деталей ГТД с покрытиями, как правило, принимают значения, полученные по результатам испытаний массивных 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 °С (а перспективных ТЗП до 1350 °С), причем необходимо исследовать влияние длительной высокотемпературной выдержки на тепло-физические свойства покрытий.

#### РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ

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. 1, а, 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



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

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.

При определении адгезионной прочности отдельных слоев ТЗП, соотношение толщины верхнего слоя системы покрытия и ширины сдвигаемого участка должно гарантировать исключение когезионного разрушения слоя ТЗП по месту стыковки втулок (рис. 1, б). 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. 1, в). Предел адгезионной прочности слоев ТЗП определяется по отношению разрушающей нагрузки к площади сдвига покрытия.

Разработанный методы 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 и столбчатую структуру. Образец представляет собой кольцо, выполненное из жаропрочного сплава, с нанесенными слоями ТЗП (рис. 2, а). На рис. 2, б схематично изображен принцип последовательного определения адгезионной прочности слоев ТЗП. Данный метод позволяет проводить прочностные испытания покрытий любой структуры, а простейшая конструкция кольцевых образцов обеспечивает минимальные затраты времени и средств на проведение исследований.

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

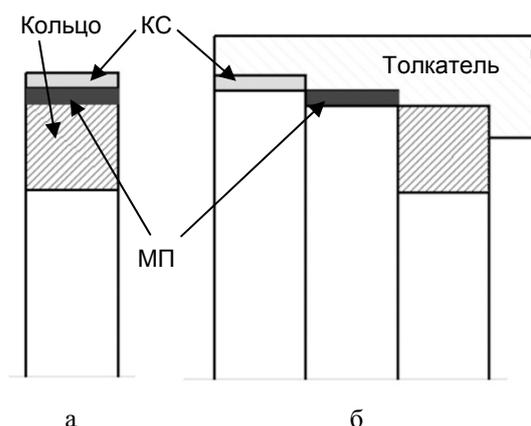


Рис. 2. Образец (а) и последовательность определения адгезионной прочности при приложении сдвиговых нагрузок (б)

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

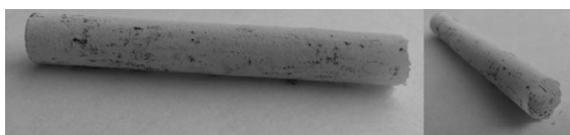


Рис. 3. Образец керамического слоя ТЗП толщиной 50 мкм для определения его КТР

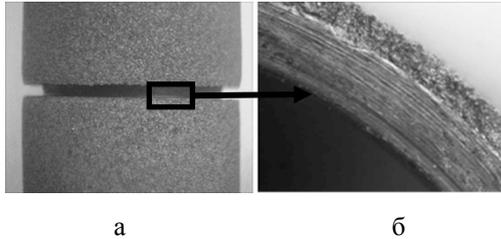
Особенностями данного метода, позволяющего получать достоверные значения КТР покрытий, является оригинальная конструкция нагревателя, использование высокочастотного разогрева и бесконтактного измерения удлинений образца.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ

Проведены экспериментальные исследования по определению предела когезионной прочности МП и КС ТЗП, нанесенных плазменным методом на воздухе (АПС). Испытания проводились при нормальной температуре. Результаты испытаний МП и КС представлены в табл. 1, 2, а также на рис. 4–6.

**Таблица 1**  
Когезионная прочность плазменного МП

T, °C	Толщина, мкм	Разрушающая нагрузка, кг	Предел прочности, кг/мм <sup>2</sup>
20	260	300	25,9
	270	318	26,5
	225	296	29,6



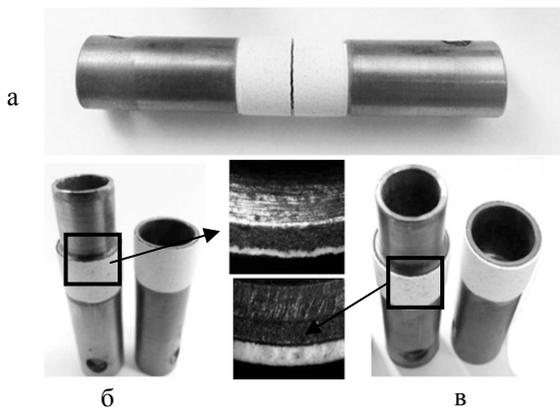
**Рис. 4.** Втулочный образец с оборванным подслоем (а) и поверхность разрушения (б)

**Таблица 2**  
Когезионная прочность плазменного КС

T, °C	Толщина, мкм	Разрушающая нагрузка, кг	Предел прочности, кг/мм <sup>2</sup>
20	90	24,6	6,22
20	100	28,8	6,55



**Рис. 5.** Образец с нанесенным КС



**Рис. 6.** Внешний вид образца с КС (а) после проведения испытаний и поверхности разрушения КС образцов №1 (б) и №2 (в)

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.

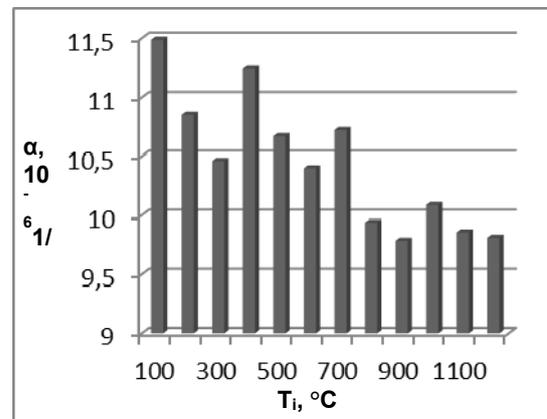
Таким образом, значения среднего предела когезионной прочности МП и КС составили 27,3 и 6,4 кг/мм<sup>2</sup> соответственно.

Результаты определения адгезионной прочности подслоя и КС ТЗП на образцах с ограничительным кольцом представлены в таб. 3.

**Таблица 3**  
Адгезионная прочность керамического слоя (№1) и подслоя (№2)

№	T, °C	$\delta_{\text{кер.}}$ , мкм	P <sub>разр.</sub> , кг	$\sigma_b$ , кг/мм <sup>2</sup>
1	20	150	120	3,23
2	20	150	320	10,07

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



**Рис. 7.** Значения КТР ZrO<sub>2</sub>, полученные по разработанной в ЦИАМ методике, в диапазонах температур (20°С - T<sub>1</sub>)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методы экспериментального определения прочностных характеристик и коэффициента теплового расширения 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, которые составили в среднем 27,3 кг/мм<sup>2</sup> и 6,4 кг/мм<sup>2</sup> соответственно. Адгезионная прочность КС и МП составила соответственно 3,23 и 10,07 кг/мм<sup>2</sup>.

3. Отработана методика определения КТР отдельных слоев ТЗП на образце из двуокиси циркония при температурах до 1200 °С.

4. Для выбора оптимальных характеристик отдельных слоев ТЗП для деталей горячего тракта ГТД целесообразно использовать результаты экспериментальных исследований свойств покрытий, полученные при испытаниях образцов реальной толщины и в эксплуатационных условиях термомеханического нагружения.

#### 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 (на английском языке). 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 (на английском языке). Австралийское сварочное сообщество, 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 (на английском языке). Семинар ITSC 2005 по газотермическим покрытиям: Исследование потенциала поверхности!, 2005, стр. 759-764]

5. **Robert A. Miller** 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 [Robert A. Miller Механические свойства плазменного ZrO<sub>2</sub>-8wt%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> теплозащитного покрытия (на английском языке), 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 (на английском языке). 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. Bychkov, 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. Bychkov, 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. Bychkov, 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]

#### ОБ АВТОРАХ

**Бычков Николай Григорьевич**, канд. техн. наук, нач. сектора термической усталости (20304) ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Исследования в области термомочности материалов деталей ГТД и теплозащитных покрытий.

**Ножницкий Юрий Александрович**, д-р. техн. наук, нач. отделения динамики и прочности, зам. ген. дир. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова». Исследования в области прочности, надежности и ресурса деталей и узлов газотурбинных двигателей.

**Першин Алексей Викторович**, научный сотр. сектора 20304 ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Исследования в области термомочности материалов деталей ГТД и теплозащитных покрытий.

**Хамидуллин Артем Шамилевич**, инж. 1 кат. сектора 20304 ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Готовит диссертацию в области прочностных свойств отдельных слоев ТЗП. Исследования в области термомочности материалов деталей ГТД и теплозащитных покрытий.

#### METADATA

**Title:** Development of experimental methods of determination of strength and thermophysical properties of separate real thickness TBC layers at working temperatures.

**Authors:** N. G. Bychkov<sup>1</sup>, Y. A. Nozhnitsky<sup>2</sup>, A. V. Pershin<sup>3</sup>, A. S. Khamidullin<sup>4</sup>

**Affiliation:**

<sup>1-4</sup> Central institute of aviation motors named after P.I. Baranov

**Email:** <sup>1</sup> bychkov@rtc.ciam.ru, <sup>2</sup> nozhnitsky@ciam.ru,  
<sup>3</sup> bychkov@rtc.ciam.ru, <sup>4</sup> khamidullin@rtc.ciam.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19 (69), no 3 (69) pp. 15-20, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The developed in CIAM methods, the samples design and the equipment for experimental research of strength properties and factor of temperature expansion of real thickness thermal barrier coatings (TBC) layers at working temperature are considered. Results of determination of properties of NiCrAlY+ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings made by serial technology are given.

**Key words:** thermal barrier coatings, zirconium dioxide, adhesive strength, cohesive strength, thermal expansion coefficient.

**About authors:**

**Bychkov, Nikolay Grigorievich**, Candidate of technical science, Head of sector Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. Thermal strength of gas turbine engine parts, research in the field of thermal barrier coatings.

**Nozhnitsky, Yuri Alexandrovich**, head of division, deputy General Director of the Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, doctor of technical Sciences. Research in the field of strength, reliability and lifetime of the parts of gas turbine engines.

**Pershin, Alexei Viktorovich**, research engineer Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. Thermal strength of gas turbine engine parts, research in the field of thermal barrier coatings.

**Khamidullin, Artem Shamilevich**, test engineer Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. Thermal strength of gas turbine engine parts, research in the field of thermal barrier coatings.