

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 9 (93)
сентябрь
2012

Издается с января 2005 г.

Главный редактор

д-р техн. наук,
Ю.В. ПАНФИЛОВ

**Председатель редакционного
совета**

д-р техн. наук, заслуженный
деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

**Заместитель главного
редактора**

д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя
редакционного совета:**

д-р техн. наук
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН

д-р техн. наук
А.В. КИРИЧЕК

д-р техн. наук
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ
А.П. БАБИЧЕВ
В.П. БАЛКОВ
В.М. БАШКОВ
А.И. БЕЛИКОВ
А.И. БОЛДЫРЕВ
С.Н. ГРИГОРЬЕВ
В.А. ЗЕМСКОВ
С.А. КЛИМЕНКО
В.А. ЛАШКО
В.А. ЛЕБЕДЕВ
В.В. ЛЮБИМОВ
Е.Д. МАКАРЕНКО
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО
Х.М. РАХИМЯНОВ
Б.П. САУШКИН
В.П. СМОЛЕНЦЕВ
А.М. СМЫСЛОВ
Г.А. СУХОЧЕВ
В.П. ТАБАКОВ
В.А. ШУЛОВ
М.Л. ХЕЙФЕЦ

Редакция:

Л.П. ШЕСТОПАЛОВА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить в любом
почтовом отделении (индексы
по каталогам: "Роспечать" 85159,
"Пресса России" 39269, "Почта России"
60252) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00,
268-40-77.

Факс: (499) 269-48-97.

E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован
в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации
ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

СОДЕРЖАНИЕ



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Ибрагимов А.Р., Ильинкова Т.А. О модуле Юнга теплозащитных покрытий
на основе оксида циркония 3



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Григорьев С.Н., Кропоткина Е.Ю. Технологическое управление качеством
поверхностного слоя по заданному закону упрочнения 8



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

**Верхотуров А.Д., Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х., Гордиенко П.С., Панин Е.С.,
Коневцов Л.А.** Эффективность процесса электроискрового легирования (ЭИЛ)
при поверхностном упрочнении стали 10 13

Коротков В.А. 10 лет применению ручной плазменной закалки 20



ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

Рогов В.А., Шкарупа М.И. Исследование магнетронного напыления
нанопокровов на поверхность деталей из конструкционной керамики
после механической обработки 25

Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Рельеф поверхности
и структура электровзрывных композиционных поверхностных слоев системы
титан-бор-медь 30



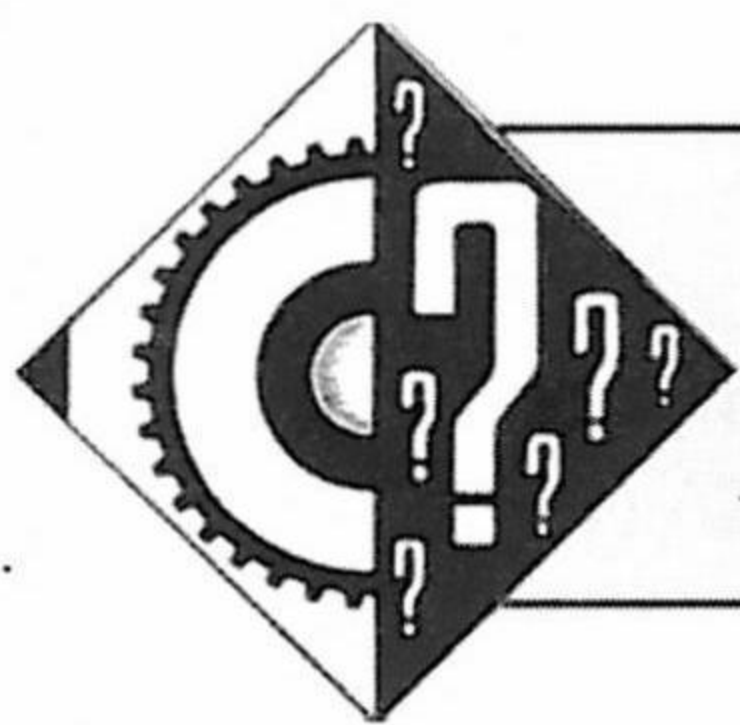
ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Безъязычный В.Ф., Аверьянов И.Н., Ситникова М.Н. Восстановительный
ремонт поверхностей деталей методами аргонодуговой наплавки
и газоплазменного напыления 34

Ноженков М.В. Кристаллическая структура и свойства покрытий, наносимых
вакуумными ионно-плазменными методами 38

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов,
публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются
со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий
для публикации трудов соискателей ученых степеней



УДК 629.7.023.222

А.Р. Ибрагимов, Т.А. Ильинкова (Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань)
E-mail: ibragimovscript@mail.ru

О модуле Юнга теплозащитных покрытий на основе оксида циркония

Обоснован выбор метода четырехточечного изгиба многослойной балки для определения модуля Юнга керамического слоя теплозащитного покрытия. Представлены результаты по оценке модуля Юнга керамического слоя, а также прочности и жесткости теплозащитных покрытий различного состава и толщин.

Ключевые слова: модуль Юнга, прочность, жесткость двухслойных теплозащитных покрытий.

The method of four-point bending of a multilayered beam is choosing to determine the Young's modulus of ceramic thermal barrier coatings. Presents the results of the evaluation of Young's modulus of the top layer and strength and stiffness of thermal barrier coatings of different compositions and thicknesses.

Keywords: Young's modulus, strength, stiffness of plasma bilayer thermal barrier coatings.

Введение

Среди многих механических свойств материалов такие свойства, как модуль нормальной упругости (модуль Юнга E), модуль сдвига (G), модуль K и коэффициент Пуассона (μ) играют наиболее важную роль, поскольку в широком диапазоне изменения механических свойств они остаются постоянными.

В настоящее время модуль Юнга считается фундаментальным понятием в области механики сплошных сред и материаловедения. Современное определение модуля Юнга, приведенное в справочнике по физике Бронштейна, было дано в 1826 г., за три года до смерти Юнга, французским инженером Навье. Оно гласит: "Модуль упругости численно равен напряжению, которое возникает при относительной деформации растяжения (сжатия), равной единице". Это определение следует из закона Гука:

$$\sigma = E \varepsilon; \quad \text{или} \quad \sigma = E \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (1)$$

если $\frac{\Delta l}{l_0} = 1$, то $E = \sigma$ [МПа].

Модуль Юнга отличается некоторыми преимуществами перед другими свойствами материала. Во-первых, эта характеристика материала имеет значительную информативную емкость, поскольку является мерой сил межатомного взаимодействия, поэтому при высокой точности измерения модуль Юнга может

быть структурно-чувствительной характеристикой. Во-вторых, модуль Юнга можно измерять одновременно с целым рядом других прочностных и деформационных характеристик материала на одном и том же образце и в одних и тех же условиях опыта. Существенно, что на изменение модуля Юнга влияет только величина деформации кристаллической решетки, а не ее происхождение. При этом неустойчивому состоянию кристаллической решетки соответствует значение модуля, равное 70 % от исходного, вне зависимости от причины, приведшей кристаллическую решетку в неустойчивое состояние. Модуль Юнга наряду с коэффициентом Пуассона μ и коэффициентом линейного расширения α считается характеристикой, нечувствительной к изменению температуры [1].

В работе проведено экспериментальное определение модуля Юнга двухслойных металлокерамических плазменных теплозащитных покрытий (ТЗП). ТЗП на основе частично стабилизированного оксида циркония (6-8YSZ), напыляемые на детали горячего тракта ГТД (рабочие и сопловые лопатки турбины, кожух, форсунки камеры сгорания и т.п.) играют важную роль в повышении эффективности работы двигателя. Актуальной проблемой является создание ТЗП повышенной толщины, так как при увеличении толщины керамического слоя закономерно увеличивается степень тепловой защиты деталей. Однако при этом возрастают количество дефектов в структуре покрытия и уровень остаточных напряжений. Как установлено,

модуль Юнга этих покрытий в сильной степени зависит от технологии напыления: применяемых порошковых материалов, режимов напыления, толщины отдельного слоя [2–4].

Газотермические покрытия имеют особые механические характеристики, обусловленные их слоистой структурой. Когезионная прочность покрытия снижается в результате отсутствия полного взаимодействия между слоями, наличия пористости, окисления слоев. Это в свою очередь, как установили R. McPherson с соавторами [2, 3], A. Kucuk с соавторами [4], приводит к снижению модуля Юнга покрытия, а также прочности на разрыв.

В настоящее время применяют несколько подходов для улучшения стойкости ТЗП к теплосменам и окислению [7–11] и все они включают оценку модуля Юнга покрытия. Например, в работе [11] основное внимание уделяется снижению значения модуля Юнга и остаточных напряжений в толстых ТЗП. На практике этого можно достигнуть путем контроля параметров напыления и температур основы и покрытия. Если при напылении система нагревается слишком сильно, то в керамическом покрытии формируются напряжения сжатия. По этой причине при напылении обычно используется активное охлаждение поверхности основы. Разброс модуля Юнга, измеренного по методике четырехточечного изгиба разными авторами, велик.

Методика проведения исследований

Модуль Юнга определяли при помощи схемы четырехточечного статического изгиба. В эксперименте использовали образцы размером 10×80×2 мм из сплава ВХ4А (ЭП-648) с напыленным с одной стороны плазменным двухслойным ТЗП различного химического состава. Толщина керамического слоя составляла 230...780 мкм, подслоя – 50...200 мкм.

В качестве нагружающего устройства использовали разрывную машину "FPZ 100/1", обеспечивающую плавность нагружения малыми нагрузками, не более 10 кН, а также измерение деформаций малых размеров. Для измерения продольной деформации верхней и нижней поверхностей образца использовали тензодатчики типа 2ПКБ, которые наклеивали на исследуемые образцы с обеих сторон.

Испытание проводили при комнатной температуре. Нагружение образцов осуществлялось с минимальной скоростью (0,02...0,84 мм/мин); значения деформаций снимались через каждые 19,6 Н.

Расчеты модуля Юнга проводились в соответствии с методикой M. Veghini, L. Bertini, F. Frendo [12, 13]. В данной методике показано, что модуль Юнга, рассчитанный по модели пластины, имеет большую точность, однако на практике можно использовать более

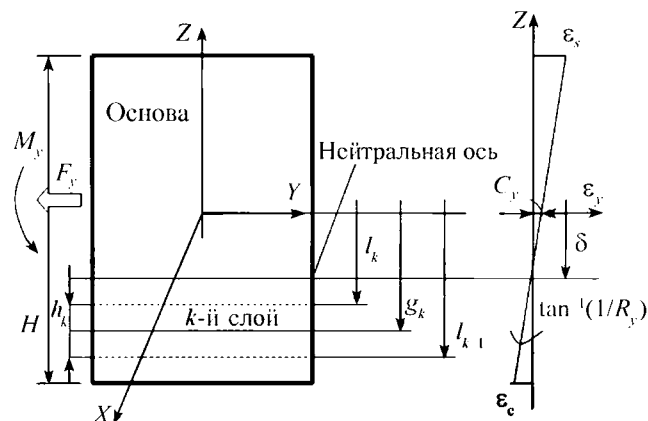


Схема балки с покрытием при изгибе [15]

простые расчеты по модели балки. На рисунке представлена схема балки с покрытием при изгибе.

Ось Y проходит через ось образца, имеющего общую толщину H . Для того чтобы найти напряжение в k -м слое покрытия, необходимо определить положение нейтральной оси, в которой главные напряжения σ_x и σ_z равны 0, а продольная деформация $\epsilon_y(z)$ является только в поверхностном слое (покрытии).

Модель балки может быть представлена произвольным числом нанесенных слоев покрытия. По предположению Кирхгофа–Лава [14], продольная нормальная деформация может быть выражена в виде выражения:

$$\epsilon_y(z) = C_y + \frac{z}{R_y}, \quad (2)$$

где C_y – продольная деформация геометрического центра тяжести, мм;

R_y – радиус кривизны геометрической оси в плоскости $Z-Y$, мм;

X, Y, Z – декартова система координат.

При допущении, что $\epsilon_y = 0$, расстояние до нейтральной оси δ (мм) может быть найдено по следующей формуле:

$$\delta = -C_y R_y. \quad (3)$$

Так как при чистом изгибе осевая нагрузка F_y практически равна 0, то расстояние до нейтральной оси δ можно получить следующим образом:

$$F_y = B \sum_k E_k \int_{l_{k-1}}^{l_k} \left(C_y + \frac{z}{R_y} \right) dz = 0, \quad (4)$$

$$\delta = \frac{\sum_k E_k g_k h_k}{\sum_k E_k h_k}, \quad (5)$$

где B – ширина образца, мм;

E_k – модуль Юнга k -го слоя, размещенного между l_{k-1} и l_k слоями, МПа;

$h_k = l_k - l_{k-1}$ – толщина k -го слоя, мм;
 $g_k = (l_k + l_{k-1})/2$ – расстояние от оси образца с покрытием до оси k -го слоя, мм.

Таким образом, по уравнению (5) можно получить положение нейтральной оси образца с покрытием независимо от прикладываемого изгибающего момента.

Суммарная жесткость всех слоев может быть выражена как:

$$F_y = \sum_k E_k J_k = B \sum_k \left(E_k \int_{l_{k-1}}^{l_k} (z - \delta)^2 dz \right) =$$

$$= B \sum_k E_k \left(h_k g_k^2 + \frac{h_k^3}{12} - 2\delta h_k g_k + \delta^2 h_k \right). \quad (6)$$

При подстановке уравнения (5) в уравнение (6) и некоторого упрощения жесткость всего образца может быть выражена как

$$\frac{K_y}{B} = \sum_k E_k \left(\frac{h_k^3}{12} + h_k g_k^2 \right) - \frac{\left(\sum_k E_k g_k h_k \right)^2}{\sum_k E_k h_k}, \quad (7)$$

$$t_{NA} = \frac{|E_{осн} h_{осн}^2 + E_{подсл} (h_{подсл}^2 + 2h_{подсл} h_{осн}) + E_{к.с} (h_{к.с}^2 + 2h_{к.с} h_{осн} + 2h_{к.с} h_{подсл})|}{2(E_{осн} h_{осн} + E_{подсл} h_{подсл} + E_{к.с} h_{к.с})}. \quad (11)$$

где K_y – прочность при изгибе в области $Z-Y$.

Уравнение представляет собой зависимость жесткости образца от геометрических размеров и модуля упругости k -го слоя покрытия.

Отношение продольной деформации основы $\epsilon_{осн}$ (мм) к деформации поверхности покрытия $\epsilon_{пк}$ (мм) можно записать как

$$\frac{\epsilon_{осн}}{\epsilon_{пк}} = (H/2 - \delta)/(H/2 + \delta). \quad (8)$$

Замещение δ из уравнения (5) в уравнение (8) дает следующую взаимосвязь:

$$\frac{\sum_k E_k g_k h_k}{E_k h_k} \left(\frac{\epsilon_{осн}}{\epsilon_{пк}} - 1 \right) + \frac{H}{2} \left(\frac{\epsilon_{осн}}{\epsilon_{пк}} + 1 \right) = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) может быть использовано для определения модуля упругости k -го слоя, если отношение $\epsilon_{осн} / \epsilon_{пк}$ и свойства другого ($k - 1$)-слоя известны.

$$E_{к.с} = \frac{\left(1 - \frac{P \epsilon_{к.с}}{P \epsilon_{осн}} \right) (E_{осн} h_{осн} g_{осн} + E_{подсл} h_{подсл} g_{подсл})}{H h_{к.с} + \left(\frac{P \epsilon_{к.с}}{P \epsilon_{осн}} - 1 \right) h_{к.с} g_{к.с}} - \frac{H (E_{осн} h_{осн} + E_{подсл} h_{подсл})}{H h_{к.с} + \left(\frac{P \epsilon_{к.с}}{P \epsilon_{осн}} - 1 \right) h_{к.с} g_{к.с}}, \quad (16)$$

Для многослойных систем с двумя слоями покрытия применяется преобразованное уравнение:

$$EI := \frac{E_{осн}}{3} [(h_{осн} - t_{NA})^3 + t_{NA}^3] +$$

$$+ \frac{E_{подсл}}{3} [(h_{осн} + h_{подсл} - t_{NA})^3 + (t_{NA} - h_{осн})^3] +$$

$$+ \frac{E_{к.с}}{3} [(h_{осн} + h_{подсл} + h_{к.с} - t_{NA})^3 +$$

$$+ (t_{NA} - h_{осн} - h_{подсл})^3],$$

где $E_{осн}$, $E_{подсл}$, $E_{к.с}$ – модули упругости основы, подслоя и керамического слоя, МПа;

$h_{осн}$, $h_{подсл}$, $h_{к.с}$ – толщины основы, подслоя и керамического слоя, мкм;

t_{NA} – расстояние между нейтральной осью образца и нижней границей основы, мкм.

Расположение нейтральной оси определяется по формуле:

Модуль упругости основы $E_{осн}$ определялся по формуле:

$$E_{осн} = \frac{8 a^3}{(B h_{осн}^3)} \frac{\Delta P}{\Delta y}, \quad (12)$$

где $\Delta P / \Delta y$ – отношение разности нагрузки к разности смещения, Н/мм;

a – расстояние между нагруженной и опорной балками (равно 10 мм);

$h_{осн}$ – толщина основы, мм.

Модуль Юнга подслоя $E_{подсл}$ определяли по следующему уравнению:

$$E_{подсл} = E_s R \frac{FR + 2F - R}{2R - F + 1}, \quad (13)$$

где

$$F = - \frac{\epsilon_{осн}}{\epsilon_{подсл}} = - \frac{P \epsilon_{подсл}}{P \epsilon_{осн}}, \quad (14)$$

$$R = \frac{h_{осн}}{h_{подсл}}. \quad (15)$$

Модуль упругости керамического слоя $E_{к.с}$ оценивали по формуле:

где H – полная толщина образца, мм;

$g_{осн}$, $g_{подслоя}$, $g_{к.с}$ – координаты центра тяжести основы, подслоя и керамического слоя соответственно по отношению к их геометрическому центру, мкм;

$P_{\epsilon_{к.с}}$ – значение крайней точки по оси смещения в упругой области керамического покрытия на диаграмме кривой нагружение–смещение. То же значение нагрузки используется для получения значения смещения на металле основы $P_{\epsilon_{осн}}$, мкм.

Результаты исследований и их обсуждение

В таблице представлены усредненные результаты по оценке модуля Юнга керамического слоя теплозащитных покрытий различного состава и толщин, а также прочности и жесткости. Анализ научной лите-

ратуры показал, что в большинстве плазменных циркониевых покрытий модуль Юнга, определенный при четырехточечном изгибе, лежит в диапазоне 20...70 ГПа [2, 7, 9, 16] в зависимости от уровня пористости и плотности микротрещин. Напряжение изгиба, при котором происходит расслоение или отслоение керамического слоя покрытия в среднем составляет 500...700 МПа [17, 18]. Поэтому эти диапазоны характеристик принимались во внимание при анализе экспериментальных данных.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Модуль Юнга керамического слоя ТЗП закономерно снижается с увеличением толщины. Видимый диапазон толщин керамики 250...380 мкм следует счи-

Таблица

Характеристики прочности, упругости и жесткости теплозащитных покрытий различных составов

Маркировка образца	Соотношение толщин	Толщина, мкм		Модуль Юнга керамики, ГПа	Жесткость системы, $\times 10^5$, Н·мм ²	Прочность при разрушении, МПа
		керамики	подслоя			
ЦИО-7-10-50						
1	3,0	300	100	35,3	1,64	1276
2	2,9	360	125	22,7	1,66	638
3	1,9	360	190	22,0	1,79	1221
4	2,6	435	170	13,8	1,73	559
5	9,3	465	50	11,45	1,48	502
6	2,5	470	185	10,9	1,75	667
7	6,6	495	75	9,60	1,52	690
8	4,5	545	120	7,4	1,60	646
9	8,7	610	70	5,55	1,49	573
10	5,3	670	126	4,4	1,60	594
Z7Y-10-90						
1	7,4	230	31	79,45	1,59	811
2	4,5	250	55	62,6	1,615	890
3	3,4	270	80	47,1	1,62	799
4	4,1	300	73	36,2	1,59	867
5	2,0	325	165	29,0	1,76	787
6	3,3	330	100	28,7	1,625	677
7	4,9	330	67	29,1	1,56	737
8	11,5	380	33	19,5	1,47	717
9	8,4	420	50	15,4	1,49	583
10	6,2	415	67	14,9	1,52	764
11	6,7	775	116	3,1	1,57	584

тать оптимальным, поскольку для среднестатистических покрытий подобного состава модуль Юнга составляет 20...70 ГПа. Установленный диапазон толщин керамического слоя в целом соответствует оптимальному диапазону толщин, установленному в результате испытаний этих покрытий на термостойкость [19].

2. В установленном диапазоне толщин керамического слоя ТЗП модуль Юнга покрытия ЦИО-7-10-50 в среднем составляет 26,6 ГПа, а покрытия Z7Y-10-90 – 36,0 ГПа.

Средняя прочность покрытия Z7Y-10-90 оптимальных толщин составляет 782 МПа, при этом рассеяние этой характеристики незначительно (при выборке в 14 образцов).

Средняя прочность покрытия ЦИО-7-10-50 составляет 1045 МПа. Можно отметить, что в этот диапазон попали образцы, обладающие наивысшей прочностью – 1220...1270 МПа.

3. Покрытия всех серий, имеющие модуль Юнга в диапазоне 20...70 ГПа, обладают повышенными прочностными свойствами по сравнению с покрытиями, имеющими модуль Юнга, выходящий за эти пределы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Qian G., Nakamura T., Bernt C.C. Effects of thermal gradient and residual stresses on thermal barrier coating fracture // *Mechanics of materials*. 1998. Vol. 27. P. 91–110.
2. McPherson R. Review of Microstructure and Properties of Plasma Sprayed Ceramic Coatings // *Surface and Coatings Technology*. 1989. Vol. 39/40. P. 173–181.
3. Li C.H., Ohmori A., McPherson R. The Relationship Between Microstructure and Young's modulus of Thermally Sprayed Ceramic Coatings // *Journal of Materials Science*. 1997. Vol. 32. P. 997–1004.
4. Kucuk A., Dambra C.G., Berndt C.C. Influence of Plasma Spray Parameters on Behavior of Yttrium Stabilized Zirconium the Cracking Coatings // *Practical Failure Analysis*. 2001. Vol. 1 (1). P. 55–64.
5. Kuroda S., Fukushima T., Kitahara S. Significance of Quenching Stress in Cohesion and Adhesion of Thermal Spray Coatings // *Journal of Thermal Spray Technology*, 1992. P. 325–332.
6. Kuroda S., Clyne T.W. The Quenching Stress in Thermal Spray Coatings // *Journal of Thin Solid Films*. 1991. Vol. 200. P. 49–66.
7. Berndt C.C., Kucuk A., Dambra C.G. Influence of plasma spray parameters on behavior of yttrium stabilized zirconium the cracking coatings // *Practical failure analysis*. 2001. Vol. 1. P. 55–64.
8. Choi S.R., Dongming Zhu., Miller R.A. Mechanical properties of plasma-sprayed ZrO₂-8 wt % Y₂O₃ thermal barrier coatings // *NASA/TM-2004-213-216*.
9. Takahashi S., Yoshida M., Harada Y. Microstructural features of mechanical failure in thermal barrier coating systems under static loadings // *Materials at high temperatures*. 2001. Vol. 18 (2). P. 125–130.
10. Thompson J.A., Clyne T.W. The effect of heat treatment on the stiffness of zirconia top coats in plasma-sprayed TBCs // *Acta Materials*. 2001. Vol. 49. P. 1565–1575.
11. Steffens H., Babiak Z. Gramlich Some aspects of thick thermal barrier coating lifetime prolongation // *Journal of Thermal spray technology*. 1999. Vol. 8, N. T4. P. 517–522.
12. Beghini M., Bertini L., Frendo F. Measurement of Coatings Elastic Properties by Mechanical Methods: part 1. Consideration on Experimental Errors // *Experimental Mechanics*. 2001. Vol. 41. P. 293–304.
13. Beghini M., Benamati G., Bertini L., Frendo F. Measurement of Coatings Elastic Properties by Mechanical Methods: part 2. Application to Thermal Barrier Coatings // *Experimental Mechanics*. 2001. Vol. 41. P. 305–311.
14. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. *Theory of Plates and Shells*. New York. McGraw-Hill: 1959.
15. Beghini M., Bertini L., Frendo F. Measurement of Coatings' Elastic Properties by Mechanical Methods: part 1. Consideration on Experimental Errors // *Experimental Mechanics*. Vol. 41. No. 4. December. P. 293–304.
16. Thornton J. Thermal Barrier Coatings // *Materials Forum*. 1998. Vol. 22. P. 159–181.
17. Izquierdo P. Thesis. University of Aachen. 1998.
18. Singheiser L., Steinbrech R., Quadackers W.J., Herzog R. Failure aspects of thermal barrier Coatings // *Materials at high temperatures*. 2001. Vol. 18. № 4. P. 249–259.
19. Ильинкова Т.А., Валиев Р.Р., Тагиров А.Т. Долговечность плазменных теплозащитных покрытий в условиях термического нагружения // *Вестник КГТУ*. 2010. № 2. С. 24–28.
20. Ильинкова Т.А., Тагиров А.Т. О термостойкости теплозащитных покрытий // *Материалы 5-й Всероссийской науч.-техн. конф. "Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта, и энергетики"*. АНТЭ–2009. Казань. Т. 2. С. 394–398.

