

А.В. ИВАНЧЕНКО

Киевский национальный университет технологий и дизайна,

Н.А. ДОЛГОВ

Институт проблем прочности имени Г.С.Писаренко НАН Украины,

А.В. БЕСОВ

Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины,

А.В. ЧЕРНЫЙ

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ОСОБЕННОСТИ АДГЕЗИОННО-КОГЕЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПЛАЗМЕННОНАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Разработан критериальный подход к определению критической длины покрытия, при которой возникает его одновременное адгезионное отслоение и когезионное растрескивание. Показано, что критическая длина покрытия определяется не одним значением, а лежит в области, которая ограничена четырехугольником. Установлено, что вид распределения плотностей вероятности характеристик прочности (адгезионной и когезионной) следует учитывать при определении критической длины покрытия. Отмечен случайный характер возникновения трещин в плазменных покрытиях, что связано с наличием микротрещин и дефектов в их структуре.

Ключевые слова: покрытие, адгезионное отслоение, когезионное растрескивание, напряженное состояние, касательные напряжения, нормальные напряжения, плазменное напыление, испытания на растяжение.

О.В. ИВАНЧЕНКО.

Київський національний університет технологій і дизайну

М.А. ДОЛГОВ

Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України

А.В. БЕСОВ

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.Н.Францевича НАН України,

А.В. ЧОРНИЙ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ОСОБЛИВОСТІ АДГЕЗІЙНО-КОГЕЗІЙНОГО РУЙНУВАННЯ ПЛАЗМОВО-НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

Розроблено критериальний підхід до визначення критичної довжини покриття, при якій виникає його одночасне адгезійне відшарування і когезійне розтріскування. Показано, що критична довжина покриття визначається не одним значенням, а лежить в області, що обмежена чотирикутником. Встановлено, що вид функції розподілу густини ймовірності характеристик міцності (адгезійної і когезійної) слід враховувати при визначенні критичної довжини покриття. Відзначено випадковий характер виникнення тріщин у плазово-напилених покриттях, що пов'язано з наявністю микротріщин і дефектів в їх структурі.

Ключові слова: покриття, адгезійне відшарування, когезійне розтріскування, напружений стан, дотичні напруження, нормальні напруги, плазове напылення, випробування на розтяг.

A.V. IVANCHENKO

Kiev National University of the Technologies and Design, Ukraine

N.A. DOLGOV

Pisarenko Institute for Problems of Strength, Nat. Ac. Sci. of Ukraine, Ukraine

N.A. BESOV

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, Nat. Ac. Sci. of Ukraine, Ukraine

A.V. CHERNYI

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

THE DESTRUCTION FEATURES OF THE PLASMA SPRAYED COATINGS

The criterion for determining the fragmentation length of the coating with mixed (adhesive-cohesive) failure was developed. It is shown that the critical length of the coating is determined not by a single value, but lies in a region which is bounded by the quadrangle. It is established that the kind of probability density function both the adhesion strength and the cohesion one should be considered when determining the critical length of the coating. It was noted, the formation of multiple cracks in the plasma-sprayed coating has random character due to microstructural defects, such as pores and microcracks.

Keywords: coating, detachment, multiple cracking, interface shear stress, normal stress, plasma spraying, tensile testing.

Постановка проблемы

При эксплуатации покрытия подвергаются различным видам механических нагрузок, которые могут вызывать их разрушение. Для понимания процессов разрушения в материалах с покрытиями исследуют механизм передачи нагрузки из основы в покрытие через зону адгезионного контакта.

Вследствие различия упругих свойств основы и покрытия напряженное состояние системы основа-покрытие неоднородное. Адгезионное и когезионное разрушения происходят в областях, где напряжения достигают критических значений. Достоверные сведения об адгезионной и когезионной прочностях можно получить только при учете неоднородности напряженного состояния в материалах с покрытиями или при использовании образцов с покрытиями, в которых неоднородностью полей напряжений можно пренебречь. Однако, как в образцах, так и в элементах конструкций с покрытиями, существуют значительные неоднородности напряженного состояния. Поэтому для исследования распределений напряжений в системе основа – покрытие обычно используются различные модели. Особенностью системы основа-покрытие является способность передавать через адгезионный контакт нагрузку как в покрытие, так и в основу. Рассмотрим случаи, в которых напряжения в покрытии возникают вследствие приложенных к основе усилий (рис. 1).

Анализ последних исследований и публикаций

В основу классической модели сдвигового запаздывания Г.Л.Кокса положено предположение, что напряжения в системе (матрица-волокно) пропорциональны различию перемещений составляющих этой системы [1]. Гипотезы о том, что напряжения в системе основа-покрытие пропорциональны различию перемещений основы и покрытия, привели к разработке различных моделей [2–5].

Другие модели, которые используются при определении адгезионных характеристик покрытий, базируются совершенно на иных подходах и гипотезах. Оригинальный подход, предложенный в работе [6], основан на том, что распределение касательных напряжений в плоскости адгезионного контакта основы и покрытия имеет вид синусоиды, а максимальные касательные напряжения τ_{\max} возникают при удалении от свободного края покрытия на четверть его длины.

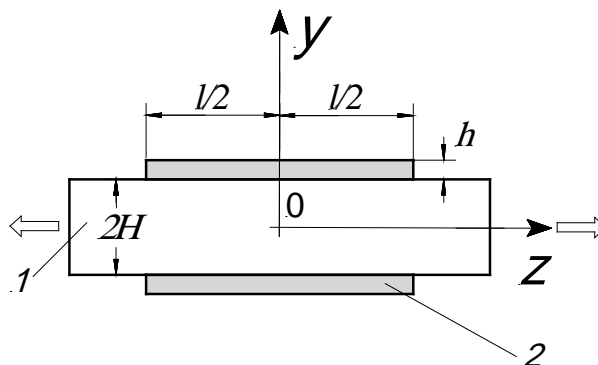


Рис. 11. Расчетная схема образца с покрытием (1 – основа, 2 – покрытие)

В работе [7] предложено использовать полусинусоидальное распределение для касательных напряжений в зоне адгезионного контакта основы и покрытия. В соответствии с этим предположением максимальные касательные напряжения τ_{\max} находятся у свободного края покрытия.

Обычно, в случае одноосного внешнего нагружения или при циклическом воздействии термомеханических нагрузок в покрытии возникает сетка периодически расположенных трещин перпендикулярных направлению действия нагрузки [8]. Расстояние между трещинами зависит как от величины приложенных нагрузок, так и от характеристик прочности покрытия.

Некоторые покрытия продолжают выполнять своё функциональное назначение и после растрескивания, как например, износостойкие [9], трибологические типа “хамелеон” [10], двухслойные на сварочных электродах [11], анодные [12,13] и теплозащитные [14]. В работах [15,16] отмечен положительный эффект от растрескивания теплозащитных покрытий. Покрытия с предварительно созданными трещинами имеют более высокое сопротивление термическому удару, чем покрытия без трещин [17,18].

Целью работы является разработка критериального подхода к определению критической длины покрытия, при которой возникает его одновременное адгезионное отслоение и когезионное растрескивание.

Изложение основного материала исследования

В соответствии с зависимостями для определения распределения нормальных напряжений в покрытии и касательных напряжений в зоне адгезионного контакта, приведенными в работе [3], деформации, при которых происходит растрескивание $\varepsilon_{coh}(l)$ и отслоение $\varepsilon_{adh}(l)$ покрытия, определяют из выражений:

$$\varepsilon_{coh}(l) = \sigma_{\max} h(1/(E_c h) + 1/(E_s H)) \left(1 - \frac{1}{ch(kl/2)} \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{adh}(l) = \frac{\tau_{\max}}{k} h(1/(E_c h) + 1/(E_s H)) \frac{ch(kl/2)}{sh(kl/2)}, \quad (2)$$

где $k = \sqrt{L(1/(E_c h) + 1/(E_s H))};$ (3)

$$L = 2 \left(\frac{G_s}{H} \cdot \frac{G_c}{h} \right) / \left(\frac{G_s}{H} + \frac{G_c}{h} \right); \quad (4)$$

σ_{\max} – максимальные нормальные напряжения в покрытии; τ_{\max} – максимальные касательные напряжения в плоскости адгезионного контакта основы и покрытия; E_s, E_c – модули упругости основы и покрытия соответственно; G_s, G_c – модули сдвига основы и покрытия соответственно; $2H, h$ – толщины основы и покрытия соответственно; l – длина покрытия.

Графики зависимостей $\varepsilon_{coh}(l)$ и $\varepsilon_{adh}(l)$ от длины покрытия l приведены на рис. 2. Покрытие будет растрескиваться, если $\varepsilon_{coh}(l) < \varepsilon_{adh}(l)$. Если же $\varepsilon_{coh}(l) > \varepsilon_{adh}(l)$, то покрытие будет отслаиваться.

Как видно из рис. 2 точка пересечения двух графиков определяет величину критической длины покрытия l_{cr} , при которой процесс растрескивания покрытия изменится на процесс отслаивания покрытия. Критическая длина покрытия l_{cr} определяется из выражения:

$$\varepsilon_{coh}(l_{cr}) = \varepsilon_{adh}(l_{cr}). \quad (5)$$

Преобразуем уравнение (5) в следующий вид:

$$\frac{k}{\tau_{\max} (1/(E_c h) + 1/(E_s H))} th(kl_{cr}/2) = \frac{1}{\sigma_{\max} h(1/(E_c h) + 1/(E_s H))} \left(1 - \frac{1}{ch(kl_{cr}/2)} \right).$$

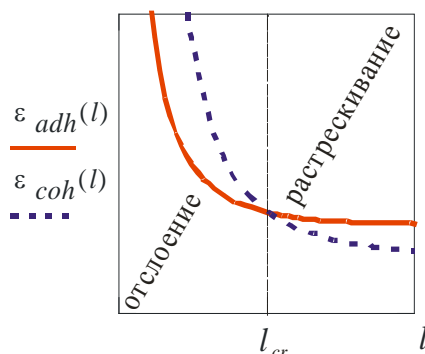


Рис. 2. Зависимости $\varepsilon_{coh}(l)$ и $\varepsilon_{adh}(l)$ от длины покрытия l

После соответствующих преобразований получим уравнение:

$$\frac{\sigma_{\max} hk}{\tau_{\max}} th \left(k \frac{l_{cr}}{2} \right) = 1 - \frac{1}{ch \left(k \frac{l_{cr}}{2} \right)}. \quad (6)$$

Введем обозначение $\Psi = \frac{\sigma_{\max} hk}{\tau_{\max}}$.

Уравнение (6) запишем в следующем виде:

$$\Psi \cdot th \left(\frac{kl_{cr}}{2} \right) = 1 - \frac{1}{ch(kl_{cr}/2)}. \quad (7)$$

Это уравнение имеет два корня:

$$l_{cr1} = 0 \text{ и } l_{cr2} = \frac{4}{k} \text{Arth}\Psi \text{ (при } \Psi < 1) \quad (8)$$

Уменьшение длины покрытия l приводит к достижению ею величины критической длины l_{cr} . Растрескивание покрытия при l_{cr} прекращается и оно начинает отслаиваться. При $\Psi < 1$ покрытие сначала растрескивается, т. е. $l > l_{cr}$. Если же $\Psi > 1$, то покрытие отслаивается без растрескивания, т. е. $l < l_{cr}$. При $\Psi = 1$ происходит одновременно отслоение и растрескивание покрытия.

Критерии прочности формулируются обычно для микрооднородных сред. К таким средам относятся, в частности, металлические материалы. Прочность металлов определяется усредненными в объеме характеристиками. В то же время критерии, сформулированные на основе гипотез о сплошности и микрооднородности, не могут быть использованы в случае структурно-неоднородных покрытий. В этих случаях процессы разрушения определяются не усредненными характеристиками, а локальными дефектами (микротрещинами, порами, фазовыми неоднородностями) в структуре покрытия. Дефекты структуры становятся источниками разрушения. Кроме этого, структурная неоднородность покрытий имеет случайный характер.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, предел прочности, предел текучести, модуль упругости и другие механические характеристики материалов имеют весьма значительный разброс. Покрытия могут растрескиваться случайным образом [19–23] и критическая длина для одного и того же покрытия может отличаться. Так, например, при четырехточечном изгибе возникает постоянный по величине изгибающий момент и, следовательно, распределенные равномерно по длине балки максимальные напряжения изгиба. Это означает, что в образце с покрытием, которое имеет идеальное равномерное распределение дефектов, все трещины возникнут одновременно на одинаковом расстоянии друг от друга в момент, когда напряжения на поверхности покрытия превысят его предел прочности. Однако при испытании на изгиб таких материалов плотность трещин в покрытии увеличивается постепенно с увеличением нагрузки [24]. Это подтверждает тот факт, что дефекты в материале покрытия распределены неравномерно.

Методика испытаний образцов с покрытиями заключается в следующем. Образец с покрытием подвергают растяжению. Металлический образец, используемый в качестве основы, представляет собой стандартный образец на растяжение (ГОСТ 1497-84). Покрытие наносится таким образом, чтобы часть основы в рабочей зоне образца оставалась непокрытой (рис. 3). Эта непокрытая зона используется для измерения деформации основы на участке без покрытия.

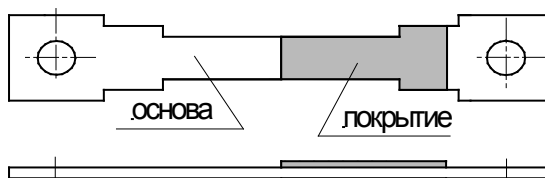


Рис. 3. Плоский образец с покрытием для испытаний на растяжение

Покрытия напыляли на образцы из нержавеющей стали 1Х18Н9 толщиной 1,5 мм на установке “ПЛАСТ” [25]. В качестве материала для напыления использовали порошок нержавеющей стали марки ПХ18Н9Т (ГОСТ 13084-88). Толщина покрытий варьировалась от 150 до 300 мкм. Режимы напыления приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы напыления покрытий		
Материал покрытия	Ток, А	Дистанция напыления, см
ПХ18Н10Т	8,0	5,0

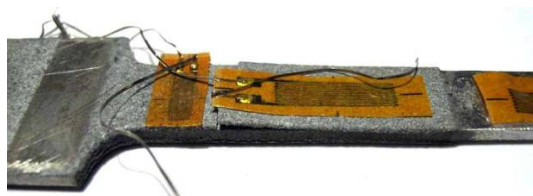


Рис. 4. Растрескивание плазменно-напыленного покрытия толщиной 300 мкм



Рис. 5. Сетка трещин в плазменно-напыленном покрытии толщиной 150 мкм

Экспериментальные исследования на растяжение образцов с плазменными покрытиями показали, что трещина не делит покрытие на два равных по длине сегмента (рис. 4). Это связано с наличием микротрещин и дефектов в структуре плазменного покрытия. Особенности растрескивания (рис. 5) и отслоения покрытий дают четыре кривые, характеризующие максимальную $\varepsilon_{coh}^{max}(l)$ и минимальную $\varepsilon_{coh}^{min}(l)$ деформации, при которых происходят когезионные разрушения, а также максимальную $\varepsilon_{adh}^{max}(l)$ и

минимальную $\varepsilon_{adh}^{min}(l)$ деформации, при которых происходят адгезионные разрушения (рис. 6). Область, определяющая критическую длину покрытия, ограничивается криволинейной фигурой, которую приближенно можно представить, как четырехугольник. Таким образом, критическая длина покрытия определяется не одним значением, а лежит в области, которая ограничена четырехугольником.

На рис. 7 показана диаграмма определения критической длины покрытий с нормальными распределениями плотностей вероятности для характеристик прочности. Темным цветом выделена область максимума плотности вероятности суммарного распределения, которая соответствует наиболее вероятному значению критической длины покрытия. Очевидно, что для случая нормальности закона распределения критическая длина совпадает со значением, рассчитанным по формуле (8) (точка 1 на рис. 7а).

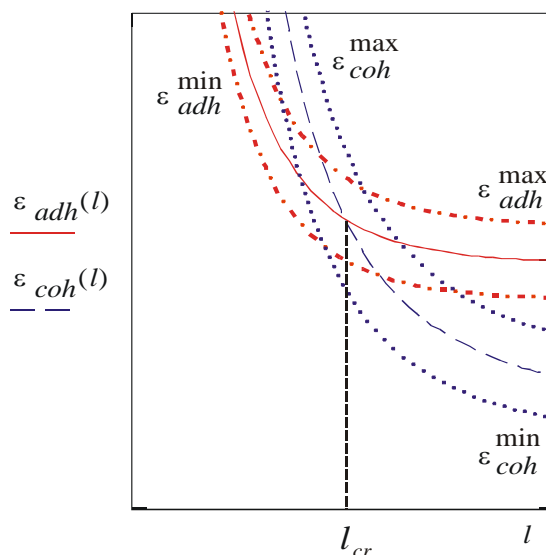


Рис. 6. Область одновременного растрескивания и отслоения покрытия

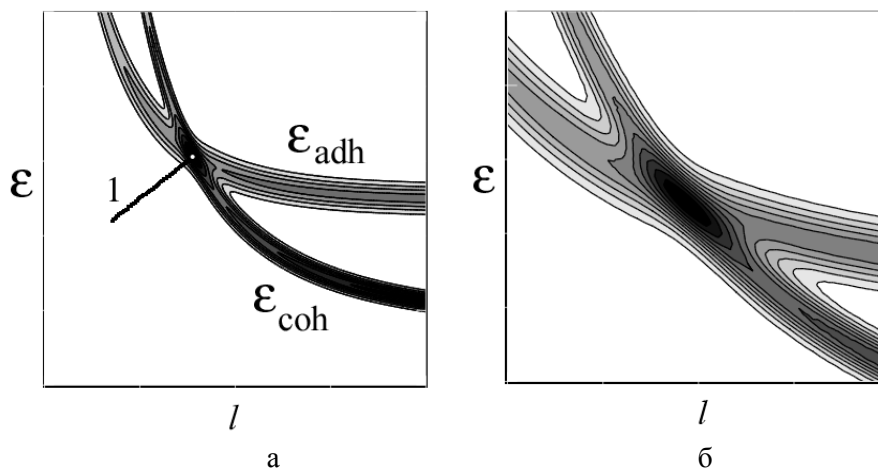


Рис. 7. Диаграмма определения критической длины покрытия с нормальным распределением плотностей вероятностей характеристик прочности (а) и ее увеличенный фрагмент в окрестности точки 1 (б)

На рис. 8 показана диаграмма определения критической длины в предположении равномерного распределения плотности вероятности для адгезионной и когезионной прочностей покрытия. В отличие от предыдущего случая (см. рис. 7), при равномерных распределениях характеристик прочности наиболее вероятное значение критической длины смещено в сторону больших значений длины покрытия (точка 2 на рис. 8а) по сравнению со значением, рассчитанным по формуле (8) (точка 1 на рис. 8а). Смещение будет увеличиваться при увеличении значений среднеквадратических отклонений для распределений характеристик прочности. Такое отклонение может достигать 10% и более от величины l_{cr} , которая определяется по формуле (8), поэтому вид распределения плотностей вероятности характеристик прочности следует учитывать при определении критической длины покрытия.

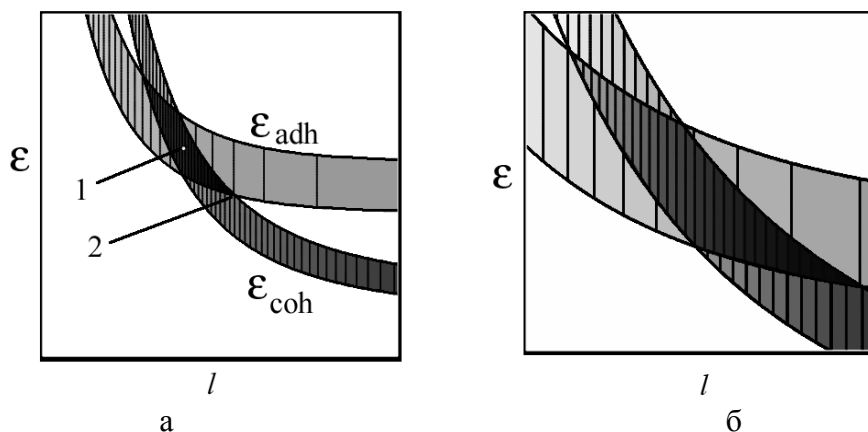


Рис. 8. Диаграмма определения критической длины покрытия с равномерным распределением плотностей вероятностей характеристик прочности и ее увеличенный фрагмент в окрестности точки 1 (б)

Выводы

Рассмотрены особенности адгезионно-когезионного разрушения плазменно-напыленных покрытий. Сделан вывод, что критическая длина покрытия определяется не одним значением, а лежит в области, которая ограничена четырехугольником. Установлено, что вид функции распределения плотностей вероятности характеристик прочности следует учитывать при определении критической длины покрытия.

Список использованной литературы

1. H. L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials / H.L.Cox // British Journal of Applied Physics. – 1952. – V.3. – P. 72 – 79.
2. Measurement of the intrinsic bond strength of brittle thin films on flexible substrates / G.Guo, H.Osaki, L.M.Keer, D.R.Wheeler // Journal of Applied Physics. – 1990. –V.68, No4. – P.1649 – 1654.
3. Уманский Э.С. Условия адгезионной и когезионной равнопрочности жаростойких покрытий / Э.С.Уманский, Б.А.Ляшенко // Космические исследования на Украине. – 1975. – Вып.6. – С. 58 – 64.
4. Ting B.Y. An experimental investigation of the film-to-substrate bond strength of sputtered thin film using a semi-quantitative test method / B.Y.Ting, S.Ramalingam, W.O.Winer // J. Tribol. ASME. – 1985. – V. 107, No 4. – P. 478 – 482.
5. Ting B.Y. A semi-quantitative method for thin-film adhesion measurement / B.Y.Ting, W.O.Winer, S.Ramalingam // J. Tribol. ASME. – 1985. – V. 107, No 4. – P.472 – 477.
6. Agrawal D.C. Measurement of the ultimate shear strength of a metal-ceramic interface / D.C.Agrawal, R.Raj // Acta Metallurgica. – 1989. – V.37, No 4. –P.1265 – 1270.
7. Shieu F.-S. Control of the mechanical properties of metal-ceramic interfaces through interfacial reactions / F.-S.Shieu, R.Raj, S.L.Sass // Acta Metallurgica et Materiala. – 1990. – V.38, No11. – P.2215 – 2224.
8. Zhang T.Y. Equilibrium depth and spacing of cracks in a tensile residual stressed thin film deposited on a brittle substrate / T.Y.Zhang, M.H.Zhao // Engineering Fracture Mechanics. – 2002. – V.69, No5. – P.589 – 596.
9. Повышение износостойкости технологической оснастки упрочняющими покрытиями / Б.А.Ляшенко, М.В.Киндрачук, Е.Б.Сорока и др.// Проблемы тертя та зношування, 2008 – Вип. 49, Т. 1. – С. 27 – 54.
10. Muratore C. Chameleon coatings: adaptive surfaces to reduce friction and wear in extreme environments / C.Muratore, A.A.Voevodin // Annual Review of Materials Research. – 2009. – V. 39. – P.297 – 324.
11. Марченко А.Е. Состояние разработки и производства низковольтных электродов с двухслойным покрытием в странах СНГ (Обзор) / А.Е.Марченко, Н.В.Скорина, В.П.Костюченко // Автоматическая сварка. –2011. – № 1. – С. 47 – 51.
12. Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита / И.Н.Францевич, А.Н.Пилянкевич, В.А.Лавренко, А.И.Вольфсон. – К.: Наукова думка, 1985. – 280 с.
13. Морозов Д.И. Защита радиоэлектронных средств от влияния климатических факторов / Д.И.Морозов, П.Г.Андреев, И.Ю.Наумова // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов; под ред. В.А.Сергеева. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 255 – 261.
14. Technical and Economical Aspects of Current Thermal Barrier Coating Systems for Gas Turbine Engines by Thermal Spray and EB-PVD: A Review / A.Feuerstein, J.Knapp, T.Taylor et al. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2008. – V. 17, No 2. – P. 199 – 213.

15. Plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia coatings: Structure-property relationships / T.A.Taylor, D.L.Appleby, A.E.Weatherill, J.Griffiths // *Surface and Coatings Technology*. – 1990. – V.43 – 44, No1 – 3. – P.470 – 480.
16. The effect of periodic segmentation cracks on the interfacial debonding: Study on interfacial stresses / C.W.Wu, G.N.Chen, K.Zhang et al. // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – V.201, No1. – P.287 – 291.
17. Taylor T.A. Thermal properties and microstructure of two thermal barrier coatings / T.A.Taylor // *Surface and Coatings Technology*. – 1992. – V.54, Part 1. – P.53 – 57.
18. Guo H.B. Atmospheric plasma sprayed thick thermal barrier coatings with high segmentation crack density / H.B.Guo, R.Vassen, D.Stöver // *Surface and Coatings technology*. – 2004. – V.186, No3. – P.353 – 363.
19. Ramboarina R. A statistical approach for cracking of deposits: determination of mechanical properties / R.Ramboarina, J.Lepage // *Mechanics of coating*; Ed. D.Dowson, C.M.Taylor, M.Godet. – Leeds – Lion 16 Tribology Series, 17. – 1990. – P.209 – 213.
20. Mezin A. Unidirectional multiple cracking of coatings described through random sequential placement of rods on a line / A.Mezin, B.Sajid // *Thin Solid Films*. – 2000. – V.358, No1 – 2. – P.46 – 55.
21. Statistical analysis of multiple cracking phenomenon of a SiO_x thin film on a polymer substrate / M.Yanaka, Y.Tsukahara, T.Okabe, N.Takeda // *Journal of Applied Physics*. – 2001. – V.90. – P.713 – 719.
22. Two mechanisms of the fragmentation of thin coatings on rubber substrates / S.L.Bazhenov, A.L.Volynskii, V.M.Alexandrov, N.F.Bakeev // *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. – 2002. – V.40, No1. – P.10 – 18.
23. Tribological behavior of W-DLC coated rubber seals / Y.T.Pei, X.L.Bui, X.B.Zhou, J.T.De Hosson // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – V.202, No9. – P.1869 – 1875.
24. Delannay F. On crack interaction and crack density in strain-induced cracking of brittle films on ductile substrates / F.Delannay, P.Warren // *Acta metallurgica et materialia*. – 1991. – V.39, No6. – P.1061 – 1072.
25. Бесов А.В., Морозов В.В. Можливості застосування плазмової технології в медицині // *Металознавство та обробка металів*. – 2002. – №3. – С.62 – 66.