

Аналитические методы определения напряженного состояния в системе основа–покрытие при воздействии силовых нагрузок

Н. А. Долгов

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Проанализированы аналитические модели определения напряженного состояния в системе основа–покрытие при нагружении основы. Показано, что результаты, полученные по этим моделям, различаются. Отмечено, что преимущество аналитических методов перед численным анализом заключается в возможности расчета напряжений в области сингулярности в окрестности свободного края покрытия. Проанализирован характер распределения касательных напряжений при использовании аналитических моделей. Приведены примеры применения различных подходов к определению критических касательных напряжений, которые характеризуют адгезионную прочность покрытий. Анализ литературных источников показывает, что при исследовании адгезионной прочности покрытий используются как простые, так и более сложные аналитические модели.

Ключевые слова: покрытие, напряженное состояние, касательные и нормальные напряжения, адгезионная прочность, модель сдвигового запаздывания, сингулярность.

Введение. Для исследования процессов разрушения в материалах с покрытиями необходимо использовать модели, которые позволяют решить задачу передачи нагрузки из основы в покрытие через зону адгезионного контакта. Из-за различия упругих свойств основы и покрытия напряженное состояние в системе основа–покрытие является неоднородным. Адгезионное и когезионное разрушение происходит в областях, где напряжения достигают критических значений. Достоверные сведения об адгезионной и когезионной прочности 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 имеют место значительные неоднородности напряженного состояния. Поэтому для исследования распределения напряжений в системе основа–покрытие обычно используются разные модели.

Согласно большинству методов испытаний образцов с покрытиями адгезионное разрушение начинается в области концентрации напряжений. Величина максимальных напряжений в зоне отслоения покрытия позволяет корректно и точно определить его адгезионные характеристики. Однако характер распределения напряжений в образце с покрытием достаточно сложный.

Цель работы заключается в анализе различных моделей и методов определения напряженного состояния в системе основа–покрытие при нагружении основы. Система основа–покрытие способна передавать нагрузку через зону адгезионного контакта как в покрытие, так и в основу. Рассмотрим случаи, когда напряжения в покрытии возникают вследствие прикладываемых к основе усилий.

1. Анализ напряженного состояния. Известен ряд аналитических моделей и методов, которые используются для исследования распределения напряжений в покрытиях и в зоне адгезионного контакта. Расчет адгезионных соединений (системы основа–покрытие, многослойные и композиционные материалы) обусловлен предположениями об уровне напряжений в них.

1.1. Модели сдвигового запаздывания. В работе [1] предложена одна из первых моделей передачи нагрузки через зону адгезионного контакта, так называемая модель

сдвигового запаздывания (shear-lag model). Модель была разработана на основе допущений об идеальной адгезии и что при возникновении напряжений в волокне, действующих в осевом направлении, деформации в зоне адгезионного контакта матрицы и волокна будут одинаковыми. Модель позволяет определить распределение осевых напряжений вдоль волокна и касательных напряжений в зоне адгезионного контакта.

Преимущество модели заключается в простоте ее использования и возможности получения аналитических выражений для определения распределения напряжений. Однако она не позволяет исследовать процесс разрушения и его механизм, хотя, несмотря на это, широко используется, что свидетельствует о ее актуальности.

В основу классической модели сдвигового запаздывания положено предположение, что напряжения в системе (матрица–волокно) пропорциональны разнице перемещений ее составляющих [1]. В работах [1, 2] описана модель сдвигового запаздывания для цилиндрического образца. Касательные напряжения на поверхности адгезионного контакта в соответствии с этой моделью рассчитывают по следующей формуле:

$$\tau = K_1 \frac{\text{sh}(K_2(l/2 - x))}{\text{ch}(K_2 l/2)}, \quad (1)$$

где K_1, K_2 – коэффициенты, которые зависят от геометрических и упругих характеристик матрицы и волокна; l – длина волокна; x – расстояние от края волокна.

Для моделей, предложенных в [1, 2], коэффициенты K_1 и K_2 представлены в табл. 1, где

$$\beta = \left(\frac{H}{E_f A_f} \right)^{1/2}; \quad \lambda = 2 \left(\frac{2\sqrt{2}(G_f/E_f)(1 + (A_f/A_m)(E_f/E_m))}{\sqrt{2} - 1 + (G_f/G_m)(\sqrt{(A_m/A_f + 2) - \sqrt{2}}) - \sqrt{2}} \right)^{1/2}; \quad H = \frac{2\pi G_m}{\ln(r_m/r_f)};$$

σ_c – растягивающие напряжения, которые возникают в матрице, упрочненной волокном; A_m, A_f – площадь поперечного сечения матрицы и волокна; E_m, E_f – модули упругости матрицы и волокна; G_m, G_f – модули сдвига матрицы и волокна; r_m, r_f – радиус матрицы и волокна.

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты K_1 и K_2 для цилиндрического образца [1, 2]*

Коэффициент	Модель	
	[1]	[2]
K_1	$\frac{\beta E_f A_f (1 - E_m/E_f)}{2\pi r_f E_m} \sigma_c$	$\frac{\lambda}{4} \frac{A_m (1 - E_m/E_f)}{A_m (E_f/E_m) + A_f} \sigma_c$
K_2	β	$\lambda/2r_f$

С использованием полученных в [3] выражений можно рассчитать коэффициенты K_1 и K_2 для плоского образца. В табл. 2 приведены коэффициенты K_1 и K_2 , полученные на основе тех же допущений, которые предложены в [1, 2] для образца цилиндрической формы, где

* Здесь и далее условные обозначения соответствуют приведенным в литературных источниках.

$$\beta = \left(\frac{H}{E_f A_f} \right)^{1/2}; \quad \lambda = 2 \left(\frac{2(A_m/E_f + A_f/E_m)}{(A_m/A_f)(A_f/G_f + A_m/G_m)} \right)^{1/2}; \quad H = \frac{2G_m t}{r_m - r_f};$$

t – толщина образца; r_m, r_f – половина ширины матрицы и волокна.

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты K_1 и K_2 для образца плоской формы [3]

Коэффициент	Модель	
	[1]	[2]
K_1	$\frac{\beta E_f A_f (1 - E_m/E_f)}{2t} \sigma_c$	$\frac{\lambda}{2} \frac{A_m (1 - E_m/E_f)}{A_m (E_f/E_m) + A_f} \sigma_c$
K_2	β	$\lambda/2r_f$

Гипотезы о том, что напряжения в системе основа–покрытие пропорциональны разнице перемещений ее составляющих, обусловили разработку различных моделей [4–7] (рис. 1). Например, коэффициенты K_1 и K_2 в соответствии с работой [6] определяются по следующим формулам:

$$K_1 = \frac{k\varepsilon}{1/(E_s H) + 1/(E_c h)}; \quad K_2 = k,$$

где

$$k = \sqrt{L \left(\frac{1}{E_s H} + \frac{1}{E_c h} \right)}; \quad L = 2 \frac{\frac{G_s}{H} \frac{G_c}{h}}{\frac{G_s}{H} + \frac{G_c}{h}};$$

E_s, E_c – модули упругости основы и покрытия; G_s, G_c – модули сдвига основы и покрытия; $2H, h$ – толщина основы и покрытия; ε – относительное удлинение основы.

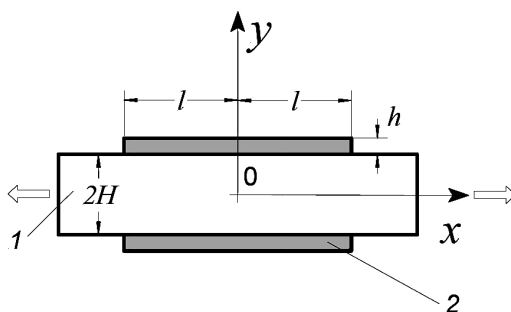


Рис. 1. Расчетная схема образца с покрытием: 1 – основа; 2 – покрытие.

В работах [8, 9] приведен анализ напряженного состояния системы основа–покрытие, базирующийся также на классической модели сдвигового запаздывания. Коэффициенты K_1 и K_2 в соответствии с [8] определяются по следующим формулам:

$$K_1 = (-\varepsilon) \sqrt{\frac{E_c h_c G_s}{h_s}} F_1(\xi); \quad K_2 = \beta,$$

где $\beta = F_1(\xi) \sqrt{\frac{G_s}{h_s h_c E_c}}$; $F_1(\xi)$ – некоторая функция, описанная в [8]; h_s , h_c – толщина основы и покрытия.

Для определения распределения касательных напряжений τ_1 и τ_2 в двухслойных покрытиях вдоль соответствующих плоскостей адгезионного контакта разработана модель, представленная на рис. 2 [10]. Аналогичная модель предложена в [11].

Модель сдвигового запаздывания используется также для определения распределения касательных напряжений в зоне адгезионного контакта между монослоем графена и эпоксидным покрытием (рис. 3) [12, 13].

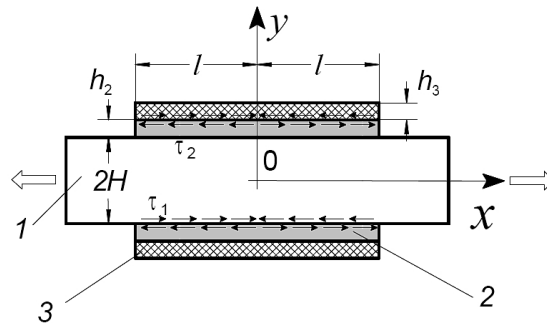


Рис. 2. Расчетная схема образца с двухслойным покрытием: 1 – основа; 2 – подслой; 3 – внешнее покрытие.



Рис. 3. Схема расчетной модели.

В моделях, основанных на классической модели сдвигового запаздывания, при определении напряженного состояния в системе основа–покрытие используется простой математический аппарат методов сопротивления материалов. К достоинствам классической модели [1] и моделей, разработанных на ее основе [4–12], можно отнести следующее:

выражения для определения параметров сдвигового запаздывания записываются в явном виде;

при определении адгезионных характеристик покрытий используются достаточно простые и удобные для практического применения аналитические выражения.

Хотя классическая модель сдвигового запаздывания [1] дает погрешность в определении касательных напряжений при низком объеме волокна по сравнению с объемом матрицы и равенстве характеристик упругости волокна и матрицы, однако для систем основа–покрытие эти условия практически никогда не выполняются, так как характеристики упругости покрытия и основы различаются.

1.2. Модели, в основу которых положено синусоидальное распределение напряжений. В работе [14] предложен подход, основанный на том, что распределение касательных напряжений в плоскости адгезионного контакта основы и покры-

тия имеет вид синусоиды, а максимальные касательные напряжения τ_{\max} возникают при удалении от свободного края покрытия на четверть его длины. В этом случае распределение касательных напряжений τ имеет вид

$$\tau = \tau_{\max} \sin \frac{2\pi x}{l},$$

где $\tau_{\max} = (\pi h/l)\sigma_{\max}$; $\sigma_{\max} = E\varepsilon_f$; h , l – толщина и длина покрытия; E – модуль упругости; ε_f – деформация.

В [15] для определения касательных напряжений в зоне адгезионного контакта основы и покрытия предложено использовать полусинусоидальное распределение. В соответствии с этим максимальные касательные напряжения τ_{\max} имеют место у свободного края покрытия. При этом характер распределения касательных напряжений τ полусинусоидальный:

$$\tau = \tau_{\max} \sin \frac{\pi x}{l}.$$

1.3. Модели, в основу которых положено линейное распределение напряжений. В работе [16] предполагается, что касательные напряжения τ распределены линейно по длине адгезионного контакта и имеют максимальное значение у свободного края покрытия:

$$\tau_{\max} = \frac{4h\sigma_c^{av}}{l},$$

где h – толщина покрытия; σ_c^{av} – средние растягивающие напряжения в покрытии; l – длина покрытия.

В [17] также используется линейное распределение касательных напряжений. Величина максимальных касательных напряжений у свободного края покрытия определяется из выражения

$$\tau_{\max} = \frac{4h\sigma_o}{l_f},$$

где h – толщина покрытия; σ_o – максимальные напряжения растяжения в покрытии; l_f – длина покрытия.

1.4. Модель на основе степенной функции. Анализ напряженного состояния на основании уравнений равновесия показывает, что касательные напряжения в зоне адгезионного контакта снижаются обратно пропорционально расстоянию от свободного края покрытия [18]. Предложенная модель не позволяет определить величину касательных напряжений в окрестности свободного края покрытия.

1.5. Модели, полученные на основе решения интегро-дифференциального уравнения Прандтля. В работе [19] рассмотрена следующая задача: к грани упругой полуплоскости, растягиваемой на бесконечности равномерно распределенными усилиями интенсивности p , жестко прикреплена абсолютно гибкая пластина (покрытие) длины $2l$ с жесткостью на растяжение E_c , отнесенной к единице ширины пластины (рис. 4). Для определения касательных напряжений $\tau(x)$ получено интегро-дифференциальное уравнение

$$\frac{d}{l}T(x) - \frac{1}{\pi} \int_{-l}^l \frac{T'(\xi)}{\xi - x} d\xi = \frac{p}{2}, \quad (2)$$

где

$$T(x) = \int_{-l}^x \tau(\xi) d\xi;$$

$d = lE_2 / (2E_c(1 - \nu_2^2))$ – для случая плоского деформируемого состояния; $d = lE_2 / 2E_c$ – для плоского напряженного состояния; E_2, ν_2 – модуль упругости и коэффициент Пуассона основы.

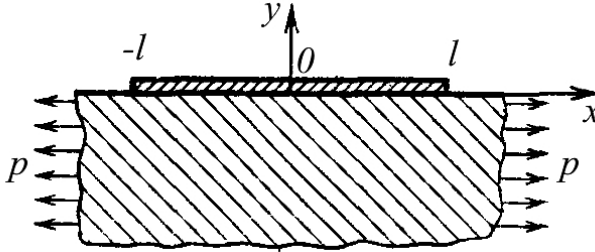


Рис. 4. Расчетная модель.

Приближенное решение уравнения (2) получено в виде

$$T(x) = \frac{p}{2(1 + d/\sqrt{2})} \sqrt{l^2 - x^2}.$$

Анализ этого выражения показывает, что максимальные касательные напряжения возникают при $x = \pm l$. Аналогичное выражение получено в работе [20].

В работе [21] приведена модель определения распределения касательных напряжений вблизи свободного края покрытия. Показано, что при растяжении образца с покрытием величина касательных напряжений незначительна, за исключением области вблизи свободного края покрытия. Касательные напряжения определяются из выражения

$$\tau(\xi) = -\frac{f}{\pi} \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \left\{ \frac{\chi}{1 + \nu\xi^2} \left[I_1(\xi) + \frac{I_2}{\cos\left[\frac{\chi}{\sqrt{1 + \nu}} \frac{\pi}{2}\right]} \sin[\theta(\xi)] \right] + \right. \\ \left. + \xi + \frac{C_1}{C_2} \frac{1}{1 + \nu\xi^2} \left[\chi \left(I_3(\xi) + \frac{I_4}{\cos\left[\frac{\chi}{\sqrt{1 + \nu}} \frac{\pi}{2}\right]} \sin[\theta(\xi)] \right) + \xi \right] \right\},$$

где $\xi = x/l$; $\chi = \frac{1}{2m} \frac{l}{b_0}$; $m = \frac{E_f}{E_s} \frac{1 - \nu_s^2}{1 - \nu_f^2}$; $2l$ – длина покрытия; b_0 – толщина покрытия

при $x = 0$; E_s, E_f – модули упругости основы и покрытия; ν – параметр формы покрытия; ν_s, ν_f – коэффициенты основы и покрытия; f – параметр функции нагружения. (Параметры $\theta(\xi), I_i$ ($i = 1, 2, \dots, 4$), C_i ($i = 1, 2$) приведены в [21].)

Задача о нагружении упругой полуплоскости не только растягивающими распределенными усилиями p (рис. 4), но и касательными напряжениями на поверхности покрытия и сосредоточенными силами на его краях решена в работе [22].

1.6. **Модели расчета нормальных напряжений в покрытии.** Модель расчета напряжений в покрытии с трещиной приведена в работе [23] (рис. 5). Нормальные напряжения в покрытии толщиной h на достаточном удалении x от трещины ($x \gg \eta h$) определяются из выражения

$$\sigma_{xx}(x) = \left(1 - \frac{\beta}{2} \frac{h^2}{(L/2 - x)^2} \right) \sigma_{fo},$$

где $\beta = 6,2 \frac{E_f(1-\nu_s^2)}{E_s(1-\nu_f^2)}$; E_s, E_f, ν_s, ν_f – модули упругости и коэффициенты

Пуассона основы и покрытия соответственно; h – толщина покрытия; $x = L/2$ – координата точки расположения трещины; σ_{fo} – напряжение в покрытии.

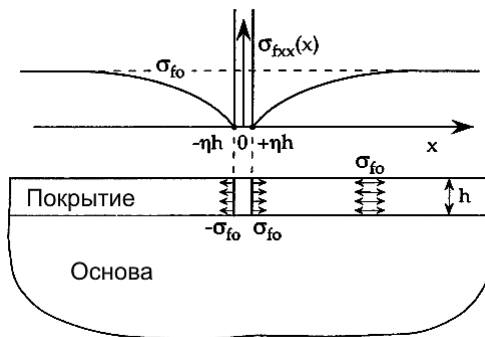


Рис. 5. Моделирование трещины в покрытии.

В работе [24] получено интегро-дифференциальное уравнение для определения нормальных напряжений $\sigma_{f,x}(x)$ в покрытии в зависимости от расстояния до его свободного края:

$$\sigma_{f,x}(x) = \sigma_0 - \frac{2h}{\pi} \frac{E_f(1-\nu_s^2)}{E_s(1-\nu_f^2)} \int_0^\infty \frac{\partial \sigma_{f,x}(u)}{\partial u} \frac{du}{x-u},$$

где σ_0 – однородные напряжения в покрытии; h – толщина покрытия; E_s, E_f, ν_s, ν_f – модули упругости и коэффициенты Пуассона основы и покрытия соответственно; x – расстояние от свободного края покрытия.

В [25] отмечалось, что покрытие растрескивается после нагружения. Нормальные напряжения $\sigma_{xx}^f(x)$ в покрытии между двумя трещинами определяются из выражения

$$\sigma_{xx}^f(x) = \frac{\sigma_o^s}{K} + \sigma_r^f - \frac{2h}{\pi K} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\partial \sigma_{xx}^f(u)}{\partial u} \frac{du}{x-u}, \quad (3)$$

где σ_o^s – напряжения, приложенные к основе; σ_r^f – остаточные напряжения в покрытии; h – толщина покрытия; K – отношение модуля упругости основы к модулю упругости покрытия; L – длина покрытия между двумя трещинами, т.е. длина нетреснутого фрагмента покрытия; u – расстояние в продольном направлении, равное нулю в середине сегмента покрытия и $-L/2, L/2$ на краях фрагмента покрытия.

2. Результаты и их обсуждение. Известно много аналитических моделей определения напряжений в системе основа–покрытие в случае прилагаемых к материалу основы силовых нагрузок. Точность результатов, полученных по этим моделям, различается. Наряду с аналитическими моделями для анализа систем основа–покрытие, подверженных механическому нагружению, используют численные методы [26–29]. Наибольшее преимущество аналитических моделей перед численными заключается в возможности определения напряжений в окрестности свободного края покрытия. Численные методы в области сингулярности не дают корректных решений. Анализ результатов показывает, что распределение касательных напряжений, определяемое по разным моделям, различается (рис. 6). Поэтому при расчетах на прочность элементов конструкций с покрытиями необходимо использовать наиболее точную и достоверную модель.

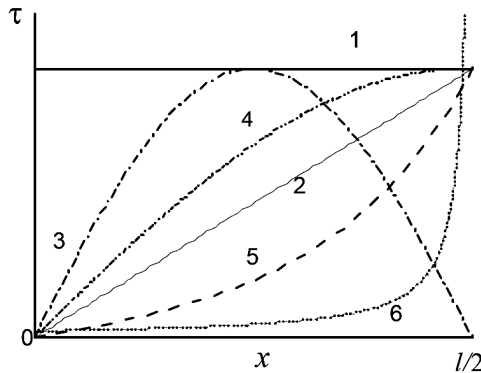


Рис. 6. Схема распределения касательных напряжений τ в плоскости адгезионного контакта в соответствии с различными моделями: 1 – $\tau = \text{const}$ [41]; 2 – $\tau \sim \beta x$ [16, 17]; 3 – $\tau \sim \sin(2\pi x/l)$ [14]; 4 – $\tau \sim \sin(\pi x/l)$ [15]; 5 – $\tau \sim \text{sh}(kx)$ [4–9]; 6 – $\tau \sim 1/(ax)$ [18].

Однако при исследовании адгезионной прочности покрытий используют более простые и менее точные, но удобные для инженерного применения модели. Так, модель на основе синусоидального распределения касательных напряжений в зоне адгезионного контакта [14] используют в работах [30–40], модель Келли–Тайсона [41] – в [42, 43], модели сдвигового запаздывания – в [44–49]. Модель, основанную на линейном распределении напряжений [17], также используют для расчета характеристик прочности покрытий.

Заключение. Несмотря на то что использование численных методов по сравнению с достаточно простыми и относительно точными аналитическими решениями позволяет в широких пределах изменять геометрические параметры и характеристики упругости системы основа–покрытие, однако нельзя получить корректные решения в области сингулярности в окрестности свободного края покрытия.

Хотя при использовании аналитических моделей полученные величины максимальных касательных напряжений τ_{max} в плоскости адгезионного контакта различаются, все же они широко применяются в расчетах при исследовании адгезионной прочности покрытий. Анализ литературных источников показывает, что при расчете характеристик прочности покрытий используются как простые, так и более сложные аналитические модели.

Резюме

Проаналізовано аналітичні моделі визначення напруженого стану в системі основа–покриття при навантаженні основи. Показано, що отримані за цими моделями резуль-

тати розрізняються. Відмічено, що перевагою аналітичних методів визначення напруженого стану перед чисельним аналізом є можливість розрахунку напружень в області сингулярності в околі вільного краю покриття. Проаналізовано характер розподілу дотичних напружень при використанні аналітичних методів. Наведено приклади використання різних підходів щодо визначення критичних дотичних напружень, які характеризують адгезійну міцність покриттів. Аналіз літературних джерел показує, що при дослідженні адгезійної міцності покриттів використовуються як прості, так і більш складні аналітичні моделі.

1. Cox H. L. The elasticity and strength of papers and other fibrous materials // Brit. J. Appl. Phys. – 1952. – **3**. – P. 72–79.
2. Dow N. F. Study of Stresses near a Discontinuity in a Filament-Reinforced Composite Metal. – Technical Report R63SD61. – General Electric Co., 1963.
3. Tyson W. R. and Davies G. J. A photoelastic study of the shear stresses associated with the transfer of stress during fibre reinforcement // Brit. J. Appl. Phys. – 1965. – **16**, No. 2. – P. 199–205.
4. Guo G., Osaki H., Keer L. M., and Wheeler D. R. Measurement of the intrinsic bond strength of brittle thin films on flexible substrates // J. Appl. Phys. – 1990. – **68**, No. 4. – P. 1649–1654.
5. Nair S. V. and Grosse I. R. Mechanics of delamination of a brittle coating strip on a brittle substrate // Surf. Coat. Tech. – 2005. – **195**, No. 2-3. – P. 280–286.
6. Уманский Э. С., Ляшенко Б. А. Условия адгезионной и когезионной равнопрочности жаростойких покрытий // Косм. исследования на Украине. – 1975. – Вып. 6. – С. 58–64.
7. Ignat M. Mechanical response of multilayers submitted to in-situ experiments // Key Eng. Mater. – 1996. – **116-117**. – P. 279–290.
8. Ting B. Y., Ramalingam S., and Winer W. O. An experimental investigation of the film-to-substrate bond strength of sputtered thin film using a semi-quantitative test method // J. Tribol. Trans. ASME. – 1985. – **107**, No. 4. – P. 478–482.
9. Ting B. Y., Winer W. O., and Ramalingam S. A semi-quantitative method for thin-film adhesion measurement // Ibid. – P. 472–477.
10. Долгов Н. А. Определение напряжений в двухслойном покрытии // Пробл. прочности. – 2005. – № 4. – С. 121–132.
11. Vitkovskii I. V., Dolgov N. A., and Konev A. N. Stressed state of the electrical insulation barrier in the wall structure of a thermonuclear reactor liquid-metal blanket // Tech. Phys. – 2011. – **56**, No. 10. – P. 1508–1512.
12. Gong L., Kinloch I. A., Young R. J., et al. Interfacial stress transfer in a graphene monolayer nanocomposite // Adv. Mater. – 2010. – **22**. – P. 2694–2697.
13. Young R. J., Kinloch I. A., Gong L., and Novoselov K. S. The mechanics of graphene nanocomposites: A review // Compos. Sci. Technol. – 2012. – **72**. – P. 1459–1476.
14. Agrawal D. C. and Raj R. Measurement of the ultimate shear strength of a metal-ceramic interface // Acta Metall. – 1989. – **37**, No. 4. – P. 1265–1270.
15. Shieu F.-S., Raj R., and Sass S. L. Control of the mechanical properties of metal-ceramic interfaces through interfacial reactions // Acta Metall. Mater. – 1990. – **38**, No. 11. – P. 2215–2224.
16. Tien J. K. and Davidson J. M. Oxide spallation mechanisms / Ed. J. V. Cathcart. Stress Effects and the Oxidation of Metals. – New York: AIME, 1975. – P. 200–219.

17. *Wheeler D. R. and Osaki H.* Intrinsic Bond Strength of Metal Films on Polymer Substrates. A New Method of Measurement / Eds. E. Sacher, J.-J. Pireaux, and S. P. Kowalczyk. Metallization of Polymers. – ACS Symposium Series. – Vol. 440, 1990. – Ch. 440. – P. 500–512.
18. *Козуб И. Ю., Алексюк М. М., Эрик А. П., Сосновский Л. А.* Методы исследования механических свойств материалов с защитными покрытиями // Жаростойкие и теплостойкие покрытия. – Л.: Наука, 1969. – С. 472–477.
19. *Александров В. М., Мхитарян С. М.* Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. – М.: Наука, 1983. – 488 с.
20. *Иоргачев В. Д.* Адгезионная прочность пластически деформированного поверхностного слоя // Тр. Одесс. политехн. ун-та. – 2004. – Вып. 2 (22). – С. 19–22.
21. *Alaca B. E., Saif M. T., and Sehitoglu H.* On the interface debond at the edge of a thin film on a thick substrate // Acta Mater. – 2002. – **50**. – P. 1197–1209.
22. *Кундрат М. М., Мельник Ю. В.* Локальне руйнування в пластині з гнучким пружним підкріпленням // Пробл. обчислювальної механіки і міцності конст-рукцій. – 2012. – Вип. 19. – С. 186–192.
23. *Mezin A.* An analytical solution for stress relaxation in cracked coatings // Surf. Coat. Tech. – 2003. – **166**, No. 2-3. – P. 160–166.
24. *Hu S. M.* Film-edge-induced stress in substrates // J. Appl. Phys. – 1979. – **50**, No. 7. – P. 4661–4666.
25. *Harry E., Rouzaud A., Ignat M., and Juliet P.* Mechanical properties of W and W(C) thin films: Young's modulus, fracture toughness and adhesion // Thin Solid Films. – 1998. – **332**, No. 1-2. – P. 195–201.
26. *Bansal P., Shipway P. H., and Leen S. B.* Finite element modelling of the fracture behaviour of brittle coatings // Surf. Coat. Tech. – 2006. – **200**, No. 18-19. – P. 5318–5327.
27. *Luo J. F., Liu Y. J., and Berger E. J.* Interfacial stress analysis for multi-coating systems using an advanced boundary element method // Comput. Mech. – 2000. – **24**, No. 6. – P. 448–455.
28. *Bennani H. H. and Takadoum J.* Finite element model of elastic stresses in thin coatings submitted to applied forces // Surf. Coat. Tech. – 1999. – **111**, No. 1. – P. 80–85.
29. *Djabella H. and Arnell R. D.* Finite element comparative study of elastic stresses in single, double layer and multilayered coated systems // Thin Solid Films. – 1993. – **235**, No. 1-2. – P. 156–162.
30. *Filiaggi M. J., Pilliar R. M., and Abdulla D.* Evaluating sol-gel ceramic thin films for metal implant applications. II. adhesion and fatigue properties of zirconia films on Ti–6Al–4V // J. Biomed. Mater. Res. – 1996. – **33**. – P. 239–256.
31. *Gan L., Wang J., and Pilliar R. M.* Evaluating interface strength of calcium phosphate sol-gel-derived thin films to Ti–6Al–4V substrate // Biomaterials. – 2005. – **26**, No. 2. – P. 189–196.
32. *Tang H., Foran B., and Martin D. C.* Quantitative measurement of adhesion between polypropylene blends and paints by tensile mechanical testing // Polym. Eng. Sci. – 2001. – **41**, No. 3. – P. 440–448.
33. *Latella B. A., Gan B. K., Davies K. E., et al.* Titanium nitride/vanadium nitride alloy coatings: mechanical properties and adhesion characteristics // Surf. Coat. Tech. – 2006. – **200**, No. 11. – P. 3605–3611.

34. Zhang S., Wang Y. S., Zeng X. T., et al. Evaluation of interfacial shear strength and residual stress of sol-gel derived fluoridated hydroxyapatite coatings on Ti-6Al-4V substrates // *Eng. Fract. Mech.* – 2007. – **74**, No. 12. – P. 1884–1893.
35. Schaufler J., Durst K., Massler O., and Goken M. In-situ investigation on the deformation and damage behaviour of diamond-like carbon coated thin films under uniaxial loading // *Thin Solid Films.* – 2009. – **517**, No. 5. – P. 1681–1685.
36. Chaiwong C., McKenzie D. R., and Bilek M. Study of adhesion of TiN grown on a polymer substrate // *Surf. Coat. Tech.* – 2007. – **201**, No. 15. – P. 6742–6744.
37. Panin A. V., Shugurov A. R., Kazachenok M. S., and Sergeev V. P. Effect of the nanostructuring of a Cu substrate on the fracture of heat-resistant Si–Al–N coatings during uniaxial tension // *Tech. Phys.* – 2012. – **57**, No. 6. – P. 779–786.
38. Latella B. A., Gan B. K., and Li H. Fracture toughness and adhesion of thermally grown titanium oxide on medical grade pure titanium // *Coat. Technol.* – 2007. – **201**, No. 14. – P. 6325–6331.
39. Alexis J., Gaussens C., Etcheverry B., and Bonino J.-P. Development of nickel-phosphorus coatings containing micro particles of talc phyllosilicates // *Mater. Chem. Phys.* – 2013. – **137**, No. 3. – P. 723–733.
40. Qu J., Ouyang L., Kuo C.-C., and Martin D. C. Stiffness, strength and adhesion characterization of electrochemically deposited conjugated polymer films // *Acta Biomater.* – 2016. – **31**. – P. 114–121.
41. Kelly A. and Tyson W. R. Tensile properties of fibre-reinforced metals: copper/tungsten and copper/molybdenum // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1965. – **13**. – P. 329–350.
42. Fabbri P., Singh B., Leterrier Y., et al. Cohesive and adhesive properties of polycaprolactone/silica hybrid coatings on poly (methyl methacrylate) substrates // *Surf. Coat. Tech.* – 2006. – **200**, No. 24. – P. 6706–6712.
43. Rochat G. and Fayet P. Characterization of mechanical properties of ultra-thin oxide coatings on polymers by uniaxial fragmentation tests // *J. Adhes. Sci. Technol.* – 2012. – **26**, Issue 20-21. – P. 2381–2392.
44. Choudhury P. and Agrawal D. C. Sol-gel derived hydroxyapatite coatings on titanium substrates // *Surf. Coat. Tech.* – 2011. – **206**, No. 2-3. – P. 360–365.
45. Ляшенко Б. А., Веремчук В. С., Долгов Н. А., Иванов В. М. Исследование прочностных и деформационных свойств композиций с плазмонапыленными покрытиями // *Пробл. прочности.* – 1996. – № 6. – С. 57–60.
46. Jeong J.-H. and Kwon D. Evaluation of the adhesion strength in DLC film-coated systems using the film-cracking technique // *J. Adhes. Sci. Tech.* – 1998. – **12**, No. 1. – P. 29–46.
47. Nair S. V., Eaton H. E., and Sun E. Y. Measurements of interface strength and toughness in shear of environmental barrier coatings on ceramic substrates at ambient and at elevated temperature // *Surf. Coat. Tech.* – 2006. – **200**, No. 18-19. – P. 5175–5180.
48. Dolgov N. A., Smirnov I. V., and Besov A. V. Studying the elastic properties and adhesive strength of plasma-sprayed double-layer coatings during tensile tests // *Powder Metall. Metal Ceram.* – 2015. – **54**, No. 1-2. – P. 40–46.
49. Liu Y., Bhamji I., Withers P. J., et al. Evaluation of the interfacial shear strength and residual stress of TiAlN coating on ZIRLO fuel cladding using a modied shear-lag model approach // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – **466**. – P. 718–727.

Поступила 04. 04. 2016