

Снижение кромочного эффекта в адгезионном соединении ситаллов

В. М. Маслов, Е. Б. Сорока, Б. А. Ляшенко, Ю. М. Родичев

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

Показано, что с повышением жесткости адгезионных соединений ситаллов увеличивается концентрация напряжений на кромках соединения. В связи с неприменимостью традиционных способов снижения напряжений на кромках соединений ситаллов предложен подход, позволяющий уменьшить концентрацию напряжений в зоне кромки. Подход основан на выборе такого закона изменения модуля упругости адгезионной прослойки, который “зеркально” отражал бы функцию распределения напряжений. Изменение модуля упругости позволяет сохранить жесткость соединения на уровне, обеспечиваемом постоянным модулем упругости прослойки. Проведенный модельный эксперимент подтверждает эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: ситаллы, адгезионное соединение, диффузионное спекание, концентрация напряжений, кромочный эффект.

Введение. В последнее время все шире применяются адгезионные соединения стекла, ситаллов и керамики в различных сочетаниях с металлами. Перспективен класс бесклеевых соединений ситаллов с помощью тонкой прослойки адгезионно-активных металлов [1]. Подобные соединения получают по технологии диффузионного спекания.

Значительную сложность при проектировании и производстве всех типов адгезионных соединений представляют кромки и законцовки соединений. Результаты испытаний показали, что краевое расслоение снижает эффективную жесткость образца и его предельную прочность. Однако данные по исследованию кромочных эффектов в диффузионных соединениях крайне ограничены [2].

Цель настоящей работы заключалась в уменьшении кромочного эффекта в адгезионном соединении ситаллов за счет применения прослойки с переменным модулем упругости без снижения общей жесткости соединения. Значение модуля упругости уменьшается только в зоне кромочного эффекта.

Зона кромки адгезионного соединения определяет переход от локальной концентрации напряжений к равномерному их распределению на достаточном расстоянии от кромки. Эффекты, обусловленные большими градиентами напряжений на боковой грани адгезионного соединения, называют кромочными, или краевыми. Высокие межслойные нормальные и касательные напряжения могут быть причиной разрушений путем расслоения при относительно низких приложенных нагрузках, существенно меньших предельных для сопрягаемых материалов. Поэтому кромочное расслоение – одно из наиболее распространенных в практике видов разрушения композиционных конструкций. Тенденция повышения жесткости адгезионного соединения ситаллов обуславливает увеличение кромочных концентраторов напряжений. В конечном итоге именно кромочные эффекты определяют прочность и несущую способность адгезионного соединения.

Отсутствие достаточно проверенных методов снижения кромочного эффекта сдерживает развитие и использование адгезионных соединений в современном машино- и приборостроении.

Наличие концентрации напряжений в зоне кромки столь существенно, что возникает необходимость в создании методов рационального проектирования и поиска конструктивных путей снижения кромочных напряжений.

Большинство как расчетных, так и экспериментальных работ по оценке кромочных эффектов посвящено слоистым композиционным материалам. Наиболее распространены вычислительные эксперименты на ранних стадиях проектирования сложных объектов [3], направленные на рациональное конструирование [3–7]. Трудность применения метода конечных элементов заключается в определении достоверности результатов в зависимости от применяемого элемента и сетки.

Цель аналитических и численных решений по определению кромочных эффектов в композитных материалах состоит в сравнении полученных решений с аналогичными решениями с использованием различных систем уравнений, функций напряжений, форм конечных элементов [8–11].

Экспериментальные методы позволяют оценить деформированное состояние в зоне кромочного эффекта различных адгезионных соединений, а также изучить зарождение и развитие разрушения на свободной кромке. Отмечается [12], что экспериментальное исследование кромочного эффекта – достаточно сложная задача. Даже обладая существенными недостатками, методы незаменимы на стадии опробования применимости различных расчетных моделей. Однако их использование в повседневной инженерной практике представляет некоторые трудности.

При циклических воздействиях невысокого уровня напряжений в зоне кромок происходит интенсивное накопление повреждений, что приводит к местным расслоениям. Воздействие рабочей среды (газовая или жидкая) может ускорить эти процессы. Поэтому при оценке прочности адгезионных соединений учитывают локальные угловые и кромочные дефекты. По конечноэлементным расчетным моделям отыскиваются решения для интерфейсных дефектов и трещин различной формы [13].

Для рационального конструирования и внедрения в производство адгезионных соединений необходимо располагать способами снижения кромочных эффектов. Наиболее известным для различных соединений является метод скошенных кромок [14]. Для слоистых материалов распространены рекомендации по снижению кромочных эффектов путем инверсии чередования слоев, их толщин и комбинации упругих характеристик [3, 12, 15].

Представляет интерес метод снижения кромочного эффекта за счет использования укладок и межслойных вставок, предотвращающих кромочное расслоение [5, 16]. Применение дополнительных краевых прослоек из полиэтилена позволяет увеличить прочность и сопротивление усталости углепластика за счет повышения сопротивления материала к краевому расслоению при деформировании [17].

Расслоение композитов обусловлено анизотропией механических свойств, резким изменением свойств от слоя к слою, а также различием между коэффициентами термического расширения [13].

Особый интерес представляют адгезионные соединения ситаллов с нулевым коэффициентом термического расширения. Однако и в этом случае имеет место концентрация напряжений в краевых зонах при деформировании.

Постановка задачи. Методом конечных элементов проанализированы кромочные эффекты в стыковом бесклеевом соединении ситаллов при нормальном отрыве. Размеры соединения (в плане) 20×20 мм. Толщина адгезионной прослойки 10 мкм. Модуль упругости ситалла $E_0 = 0,6 \cdot 10^5$ МПа. В вычислительном эксперименте варьировали величиной модуля упругости адгезионной прослойки E_{II} .

На рис. 1 приведена зависимость концентрации касательных напряжений на кромке соединения от соотношения модулей упругости адгезионной прослойки E_{II} и ситалла E_0 . Установлено наличие кромочного эффекта и его зависимость от соотношения модулей упругости.

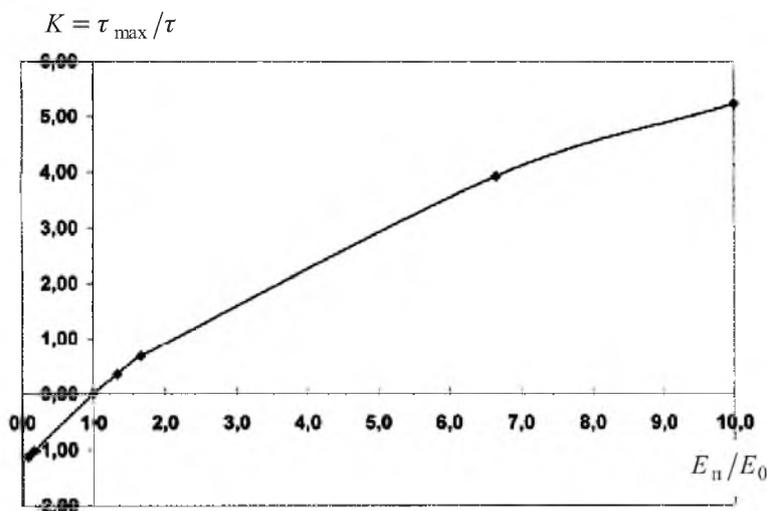


Рис. 1. Зависимость концентрации касательных напряжений на кромке соединения от соотношения модулей упругости адгезионной прослойки и ситалла.

Кромочный эффект в адгезионном соединении однородных ситаллов зависит от механизма передачи механической нагрузки от одного сопрягаемого элемента к другому через адгезионную прослойку. Рекомендации о снижении модуля упругости адгезионной прослойки в адгезионных соединениях ситаллов с нулевым коэффициентом термического расширения некорректны из-за требований высокой жесткости, точности и стабильности соединения. Некорректны также для этих соединений рекомендации по снижению кромочных эффектов путем изменения формы кромок, так как острые углы уязвимы к повреждаемости в процессе сборки и эксплуатации.

Для более корректного определения кромочного эффекта примем расчетную схему, где деформирующая нагрузка P приложена только к одному элементу на удалении от соединения, достаточном для соблюдения принципа Сен-Венана. В качестве простой модели рассмотрим адгезионное соединение, состоящее из двух элементов в виде полос единичной ширины,

соединенных адгезионной прослойкой. Толщины первого и второго элемента, а также прослойки обозначим соответственно H , h и δ . Длина композиции составила $2l$. Начало координат выберем в средней точке оси соединения. Ось z является продольной осью симметрии соединения. Поперечное сечение $z = 0$ при деформации остается плоским. Равномерно растягивающая нагрузка приложена только к торцам первого элемента композиции. Ко второму элементу усилия передаются через жесткую адгезионную связь. При этом предполагается, что усилия во втором элементе возникают из-за касательных напряжений на поверхностях адгезионного контакта, а внутренняя прослойка работает только на сдвиг.

Из условия равновесия элементов системы, а также учитывая, что в сечении $z = 0$ касательные напряжения $\tau = 0$, получаем

$$\tau = -\frac{E_2 F_2}{t} \frac{d^2 u_2}{dz^2}; \quad (1)$$

$$\tau = \frac{E_1 F_1}{2t} \frac{d^2 u_1}{dz^2}, \quad (2)$$

где E_1, E_2 – модули упругости первого рода элементов; u_1, u_2 – осевые перемещения центров тяжести сечений; F_1, F_2 – площади поперечного сечения; t – ширина композиции. Величины, относящиеся к первому и второму элементам композиции, обозначены соответственно индексами 1 и 2.

Предположим, что точки поперечных сечений $z = \text{const}$ при деформации адгезионного соединения переходят на кусочно-линейную поверхность, в результате получим геометрические уравнения задачи. Перемещения точек поперечного сечения свидетельствуют о том, что касательные напряжения в слоистой системе в нагруженном первом элементе должны убывать, приближаясь к его оси, во втором элементе, соединенном с нагруженным адгезионной связью, – при движении от поверхности контакта к свободному краю.

Таким образом, имеем

$$\gamma_1 = \frac{2(1 + \mu_1)\tau}{E_1} = \frac{2(u_1 - u'_1)}{H}; \quad (3)$$

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{2(1 + \mu_{\text{п}})\tau}{E_{\text{п}}} = \frac{u'_1 - u'_2}{\delta}; \quad (4)$$

$$\gamma_2 = \frac{2(1 + \mu_2)\tau}{E_2} = \frac{2(u'_1 - u_2)}{h}, \quad (5)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_{\text{п}}$ – относительный сдвиг рассматриваемых элементов адгезионного соединения и прослойки соответственно; $\mu_1, \mu_2, \mu_{\text{п}}$ – коэффициенты Пуассона, которые далее будем полагать равными $\mu_1 = \mu_2 = \mu_{\text{п}} = \mu$; $E_{\text{п}}$ – модуль упругости прослойки; u'_1, u'_2 – осевые перемещения на

поверхности адгезионного контакта прослойки с первым и вторым элементами соответственно.

После преобразований (1)–(5) получим линейное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} - k^2 w(z) = 0, \quad (6)$$

где $w(z) = u_1 - u_2$;

$$k^2 = \frac{\left(\frac{1}{E_1 H} + \frac{1}{E_2 h} \right)}{(1 + \mu) \left[\frac{2\delta}{E_{\text{II}}} + \frac{h}{E_2} + \frac{H}{E_1} \right]}. \quad (7)$$

Решение уравнения (6) в случае, когда модуль упругости прослойки E_{II} – величина постоянная, находим в аналитическом виде [18]

$$w(z) = C \operatorname{sh} kz + D \operatorname{ch} kz,$$

где постоянные C и D определяем из граничных условий

$$\begin{aligned} w &= 0 && \text{при } z = 0; \\ \frac{dw}{dz} &= \frac{P}{E_1 F_1} && \text{при } z = l \end{aligned}$$

(P – растягивающее усилие, приложенное к первому элементу).

Тогда

$$w(z) = \frac{P}{E_1 F_1} \frac{\operatorname{sh} kz}{\operatorname{ch} kl}, \quad (8)$$

а

$$\tau = \frac{E_1}{(1 + \mu) H \left(\frac{2E_1}{H} \left(\frac{\delta}{E_{\text{II}}} + \frac{h}{E_2} \right) + 1 \right)} w(z). \quad (9)$$

Результаты и их обсуждение. Расчетное распределение касательных напряжений τ для случая растяжения адгезионной композиции, состоящей из двух силалловых элементов ($E_1 = E_2 = 0,6 \cdot 10^5$ МПа) с прослойкой $\delta = 1 \cdot 10^{-5}$ м, представлено на рис. 2.

С целью уменьшения концентрации напряжений на кромке адгезионного контакта при одновременном сохранении общей высокой жесткости соединения используем прием снижения модуля только в зоне кромочного эффекта. Полагаем целесообразным использовать закон изменения модуля упругости “зеркальным” закону изменения касательных напряжений (рис. 3).

Пусть модуль упругости прослойки изменяется от значения 10^5 МПа в центре соединения до 10^3 МПа на кромке:

$$E_{II}(z) = 10^5 + 2\text{sh}(-575,15z). \quad (10)$$

Замена E_{II} величиной $E_{II}(z)$ приводит к тому, что коэффициент k (7) становится величиной переменной. В этом случае уравнение (6) превращается в дифференциальное линейное уравнение второго порядка с переменным коэффициентом:

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} - k^2(z)w(z) = 0. \quad (11)$$

В результате численного решения уравнения (11) методом Рунге-Кутты определяем осевые перемещения центров тяжести сечения элементов $w(z)$ как меру жесткости соединения. Граничные условия задавались при $z = l$.

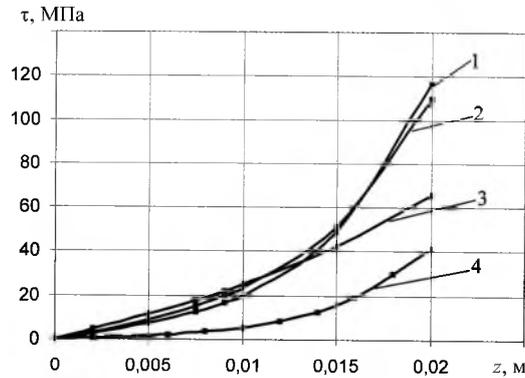


Рис. 2. Распределение касательных напряжений τ при растяжении адгезионного соединения из ситаллов с прослойкой: 1 – $E_{II} = 10^5$ МПа; 2 – $E_{II} = 10^4$ МПа; 3 – $E_{II} = 10^3$ МПа; 4 – E_{II} изменяется от 10^5 до 10^3 МПа по закону (10).

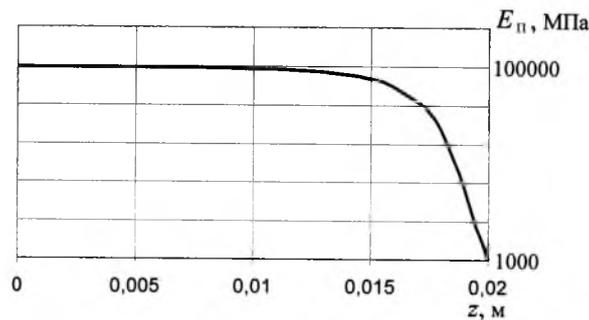


Рис. 3. Изменение модуля упругости прослойки $E_{II}(z)$ по длине в соответствии с зависимостью (10).

После подстановки найденных значений в (9) с учетом выражения (10) для модуля упругости прослойки $E_{II}(z)$ получим распределение касательных напряжений в случае переменного модуля упругости прослойки (на

рис. 2 кривая 4). На рис. 4 приведены максимальные значения разности осевых перемещений центров тяжести сечения элементов адгезионного соединения для различных модулей упругости прослойки.

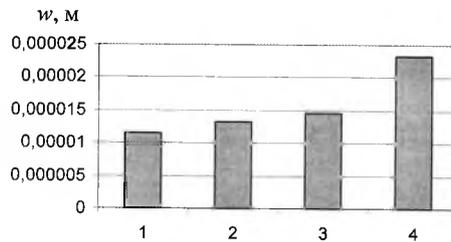


Рис. 4. Максимальные значения разности осевых перемещений центров тяжести сечения элементов адгезионного соединения для различных модулей упругости прослойки: 1 – $E_{II} = 10^5$ МПа; 2 – $E_{II} = 10^4$ МПа; 3 – E_{II} изменяется от 10^5 до 10^3 МПа по закону (10); 4 – $E_{II} = 10^3$ МПа.

Результаты модельного эксперимента. Проверка влияния переменного модуля упругости на величину напряжений на кромке проведена на модельном эксперименте. Необходимо получить адгезионную прослойку, модуль упругости которой зависел бы от расстояния до кромки соединения. С этой целью в качестве адгезионной композиции использовался раствор полимера в летучем мономере с добавками сшивателя-пластификатора ДТ [19], который легко сополимеризуется с летучим мономером, но не может вступать в реакцию гомолимеризации. Подобная композиция при полимеризации образует жесткий и прочный слой. Растворенный в мономере полимер в отвержденной композиции присутствует в виде наполнителя [19].

Отверждение адгезива в зоне кромки в контакте с воздухом происходит иначе. Мономер при отверждении адгезива выветривается из краевой зоны, граничащей с воздухом. В адгезионной прослойке образуется полимер, который был растворен в мономере. Этот полимер пластифицирован добавкой ДТ, поскольку ДТ без мономера не полимеризуется. Следовательно, пластифицированный полимер обеспечивает снижение модуля упругости $E_{II}(z)$ в зоне кромки.

Модуль упругости $E_{II}(z)$ адгезионной прослойки повышается с увеличением расстояния до кромки и изменяется в широких пределах в результате изменения количества введенного летучего мономера и пластификатора ДТ. Таким образом, по уравнению (10) получаем необходимый вид функции $E_{II}(z)$.

Экспериментально эффект снижения модуля упругости $E_{II}(z)$ на кромках соединения оценивался по увеличению кратковременной статической прочности. Для испытаний на нормальный отрыв использовали два типа образцов: стандартный и с коническим штифтом (рис. 5). Штифтовый образец позволяет ограничить влияние кромочного эффекта. Толщина адгезионной прослойки составляла 10 мкм.

Как следует из рис. 5, наблюдается повышение прочности соединения за счет снижения модуля упругости прослойки $E_{II}(z)$ в зоне кромки. Особенно увеличилась прочность стандартных образцов, поскольку преобладало влияние кромочного эффекта.

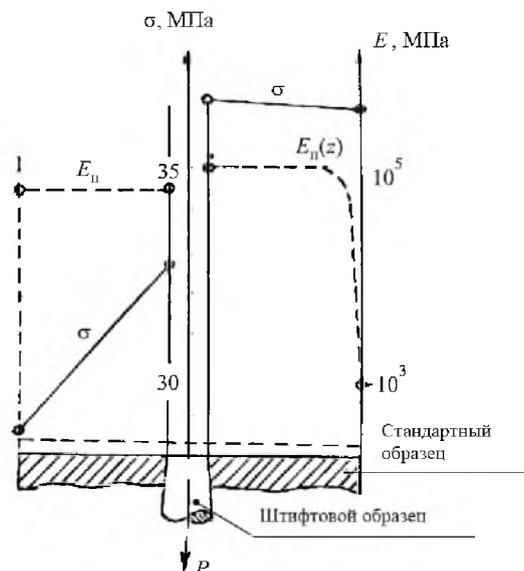


Рис. 5. Увеличение кратковременной статической прочности при снижении модуля упругости на кромках адгезионного соединения.

Выводы

1. Повышение жесткости адгезионных соединений ситаллов приводит к увеличению концентрации напряжений на кромках. При этом прочность соединения зависит от величины концентрации напряжений на кромке.

2. Традиционные рекомендации по снижению напряжений на кромке для различных слоистых материалов неприменимы для соединения ситаллов.

3. Понизить концентрацию напряжений в зоне кромки можно путем снижения модуля упругости адгезионной прослойки. При этом целесообразно использовать закон изменения модуля упругости прослойки, который “зеркально” отражает функцию распределения напряжений.

4. Использование переменного модуля упругости несущественно уменьшает жесткость соединения.

5. Снижение модуля упругости адгезионной прослойки в зоне кромки приводит к уменьшению концентрации напряжений. При этом жесткость соединения практически остается на уровне, который обеспечивается постоянным модулем упругости прослойки.

Работа выполнена по проекту 3045 УНТЦ.

Резюме

Показано, що зі збільшенням жорсткості адгезійних з'єднань ситалів підвищується концентрація напружень на кромках з'єднання. Оскільки традиційні способи зниження напружень на кромках з'єднань ситалів не можуть бути використані, запропоновано підхід, що дозволяє зменшити концентрацію напружень у зоні кромки за рахунок використання закону зміни

модуля пружності прошарку, що “дзеркально” відображає функцію розподілу напружень. Зміна модуля пружності прошарку дозволяє зберегти жорсткість з’єднання на рівні, що забезпечується постійним модулем пружності. Модельний експеримент підтверджує ефективність запропонованого підходу.

1. *Бачин В. А.* Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
2. *Киселев А. Г.* Напряженное состояние в краевых точках диффузионных соединений разнородных материалов // Сб. науч. тр. – М.: Изд-во МИФИ, 2000. – С. 131 – 132.
3. *Абрамов А. А., Зарубин В. А.* Исследование межслойных напряжений и кромочных эффектов в слоистых композитах на основе двухмерных конечных элементов // Прикл. пробл. прочности и пластичности. – 1997. – № 55. – С. 84 – 88.
4. *Гузь А. Н., Коханенко Ю. В.* Краевые эффекты в композитах // Прикл. механика. – 1995. – **31**, № 3. – С. 3 – 23.
5. *Толкачев В. М.* Краевые эффекты в слоистых пластинах // Механика твердого тела. – 1994. – № 2. – С. 52 – 63.
6. *Лурье С. А.* Расчет кромочных напряжений в слоистых композиционных материалах // Механика композитных материалов. – 1994. – **30**, № 1. – С. 48 – 56.
7. *Коханенко Ю. В., Быстров В. М., Зеленский В. С.* Численное исследование затухания краевых эффектов в металлических слоистых материалах // Прикл. механика. – 1997. – **33**, № 12. – С. 50 – 59.
8. *Lessard L. B., Schmidt A. S., and Shokrieh M. M.* Three-dimensional stress analysis of free-edge effects in simple composite cross-ply laminate // Int. J. Solids Struct. – 1996. – **33**, No. 15. – P. 2243 – 2259.
9. *Gaudenzi P., Mannini A., and Carbonaro R.* Multi-layer higher-order finite elements for the analysis of free-edge stresses in composite laminates // Int. J. Numer. Meth. Eng. – 1998. – **41**, No. 5. – P. 851 – 873.
10. *Yin W.-L.* Free edge effects in anisotropic laminates under extension, bending and twisting. Pt. II. Eigenfunction analysis and the results for symmetric laminates // Trans. ASME J. Appl. Mech. – 1994. – **61**, No. 2. – P. 416 – 421.
11. *Hilton H. H. and Yi Sung.* Free edge stresses in elastic and viscoelastic composites under uniaxial extension, bending and twisting loading // Trans. ASME J. Eng. Mater. Technol. – 1997. – **119**, No. 3. – P. 266 – 272.
12. *Поляков В. А., Перов Ю. Ю.* Экспериментальные методы оценки кромочного эффекта // Механика композитных материалов. – 1989. – № 2. – С. 318 – 331.
13. *Bedley M. R. and Ambrico J. M.* Delamination of thin films from two-dimensional interface flaws at corners and edges // Int. J. Fract. – 2001. – **112**, No. 3. – P. 205 – 222.

14. *Kay N., Barut A., and Madenci E.* Singular stresses in a finite region of two dissimilar viscoelastic materials with fraction-free edges // *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* – 2002. – **191**, No. 11-12. – P. 1221 – 1244.
15. *Chan W. S.* Design approaches for edge delamination resistance in laminated composites // *J. Compos. Technol. Res.* – 1991. – **13**, No. 2. – P. 91 – 96.
16. *Тернопольский Ю. М., Перов Ю. Ю., Поляков В. А.* Инженерные методы оценки кромочного эффекта в плоских деталях из композитов // *Межслойные эффекты в композитных материалах.* – М.: Наука, 1993. – С. 300 – 340.
17. *Tanimoto T.* Interleaving methodology for property tailoring of CFRP laminates // *Compos. Interfaces.* – 2002. – **9**, No. 1. – P. 25 – 39.
18. *Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях* / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1980. – Т. 2. – 772 с.
19. *Veselovsky R. and Kestelman V.* Adhesion of Polymers. – New York: McGraw Hill, 2002. – 500 p.

Поступила 21. 02. 2005