



**ОПТИМИЗАЦИЯ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ  
КОМПОЗИЦИИ МЕТАЛЛ – ПОЛИМЕР**

Е.П. Липовская<sup>1</sup>, С.И. Пелевин<sup>2</sup>

*Балтийский Федеральный университет (БФУ) имени Иммануила Канта,  
236041, г. Калининград, ул. А. Невского 14*

*Аннотация* – В статье приводится исследование оптимизации адгезионной прочности композиции металл–полимер. Указываются причины разрушения данной композиции с учетом адгезионной и когезионной равнопрочности. Получена зависимость для определения минимально допустимой прочности сцепления для случая статического растяжения композиции металл–полимер.

*Ключевые слова:* прочность, клеевая композиция, напряжение, металл, полимер, деформация, расчетная схема, модуль упругости, прогиб образца.

**ADHESIVE DURABILITY OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION METAL  
– POLYMER**

E.P.Lipovskaja, S.I.Pelevin

*The Baltic Federal university (BFU) of Immanuel Kant,  
236041, Kaliningrad, A.Nevsky's street 14*

*The summary* – In article research of optimization for adhesive durability of a composition metal-polymer is resulted. Rupture sources of the given composition taking into account adhesive and cohesive equal durability are specified. Dependence for definition the minimum admissible durability for a case of a static stretching of a composition metal-polymer is received.

*Keywords:* durability, a glutinous composition, pressure, metal, polymer, deformation, the settlement scheme, the elasticity module, a deflection of the sample.

Прогресс во многих областях техники непрерывно связан с проблемами создания и внедрения эффективных защитных полимерных покрытий, способных работать под нагрузкой и в различных условиях эксплуатации.

Для защиты металлических элементов автомобильного транспорта при длительной эксплуатации успешно применяют полимерные покрытия, которые являются универсальным видом защитным металла от коррозии.

Основным условием работоспособности композиции металл – полимер является сохранение сплошности покрытия элемента, температура, физико-химическое воздействие внешней среды,

так как образование любого сквозного дефекта в полимерном покрытии приводит к нарушению адгезионной связи и появлению коррозии металла.

При изучении прочности полимерных покрытий обычно рассматривают два основных вида разрушения – адгезионное и когезионное [1]. Тот или иной вид разрушения, а также смешанное адгезионно – когезионное разрушение обусловлено рядом внутренних и внешних фактов, таких как прочность, химический состав и структура полимерного покрытия и металла, вид напряженного состояния, геометрическая форма

физико-химическое взаимодействие в контактной зоне при формировании и эксплуатации покрытия и др.

Одним из главных условий работоспособности полимерного покрытия является достаточная прочность сцепления его с металлом. В зависимости от соединения фаз и условий формирования композиции природа связи между полимерным покрытием и поверхностью металла может быть различной [2].

В связи с этим представляем интерес исследование оптимизации адгезионной прочности композиции металл – полимер.

Рассмотрим одноосное растяжение металлической пластины, на боковых поверхностях которой нанесено полимерное покрытие толщиной  $h$  (рис). Задача сводится к определению напряжения в любом соединении покрытия и металла. Начало координат выбрано в средней точке оси пластины. Сечение  $Z=0$  остается при деформировании плоским. Нагрузка прикладывается только к торцам металла. Поэтому напряжение в покрытие возникает только из-за касательных напряжений на поверхности адгезионного контакта с металлом. Принимаем во внимание также, что линейные элементы при деформации остаются прямыми. Решение такой задачи получено в работе [3]. Согласно этой работы касательные напряжения  $\tau$  в поверхностном слое металла и нормальные напряжения в покрытии  $\sigma_{\Pi}$  определенной из соотношений:

$$\tau = \frac{\varepsilon_M \cdot K}{t \left( \frac{1}{E_{\Pi} \cdot F_{\Pi}} + \frac{2}{E_M \cdot F_M} \right)} \cdot \frac{\text{sh}kz}{\text{ch}kz}; \quad (1)$$

$$\sigma_{\Pi} = \frac{\varepsilon_M}{F_{\Pi} \left( \frac{1}{E_{\Pi} \cdot F_{\Pi}} + \frac{2}{E_M \cdot F_M} \right)} \left( 1 - \frac{\text{sh}kz}{\text{ch}kz} \right); \quad (2)$$

$$K^2 = 2tL \left( \frac{1}{E_{\Pi} \cdot F_{\Pi}} + \frac{2}{E_M \cdot F_M} \right), \quad (3)$$

где:  $E_{\Pi}$ ,  $E_M$  – модули упругости покрытия и металла соответственно;  $F_{\Pi}$ ,  $F_M$  – площади покрытия и металла соответственно;

$\text{sh}kz$ ,  $\text{ch}kz$  – гиперболические синус и косинус от аргумента  $kz$ .

Для пластин большой протяженности по ширине, с учетом эффекта Пуассона, в формулах для напряжения (1) и (2) вместо величин  $E_{\Pi}$  и  $E_M$  подставляем величины  $E_{\Pi} / (1 - \mu_{\Pi}^2)$  и  $E_M (1 - \mu_M)$ .

Принимаем условие адгезионной и когезионной равнопрочности композиции металл – полимер. Для этого рассмотрим когезионное разрушение полимерного покрытия под действием нормальных напряжений  $\sigma_{\Pi}$ , вызванных критической деформацией металла  $\varepsilon_{\text{Мкр}}$ . Эти величины связаны зависимостью (2), а напряжения  $\sigma_{\Pi}$  в момент разрушения равны пределу прочности материала покрытия, т.е.  $\sigma_{\Pi} = \sigma_{\text{пв}}$ . Величина адгезионной прочности будет оптимальной, когда максимальные касательные напряжения  $\tau_{\text{max}}$  на образовавшиеся в результате разрушения кромки полимерного покрытия будут равны пределу прочности сцепления, т.е. при достижении металлом критической деформации  $\varepsilon_{\text{Мкр}}$  произойдет одновременное когезионное разрушение покрытия и его отслоение в зоне образовавшейся трещины.

В связи с этим, для оптимального соотношения адгезионной и когезионной прочности полимерного покрытия в зависимости от критической деформации металла  $\varepsilon_{\text{Мкр}}$  необходимо определить эти величины из зависимостей (1) и (2).

Определяем максимальные касательные напряжения из уравнения (1) при  $Z=L$  для пластины единичной ширины ( $t=1$ ):

$$\tau_{\text{max}} = \frac{\varepsilon_M \cdot K}{t \left( \frac{1}{E_{\Pi} \cdot F_{\Pi}} + \frac{2}{E_M \cdot F_M} \right)} \cdot \text{th}kL. \quad (4)$$

В большинстве случаев при нанесении полимерного покрытия на металлическую поверхность имеем  $E_M \cdot F_M \gg E_{\Pi} \cdot F_{\Pi}$ . Тогда

$$\tau_{\text{max}} = \varepsilon_M K E_{\Pi} \text{th}kL. \quad (5)$$

Учитывая, что на достаточном удалении от кромки при когезионном разрушении соблюдается равенство  $\sigma_{пв} = \varepsilon_{пкр} \cdot E_{п}$ , а также  $\tau_{сц} = \tau_{max}$ , получаем условие адгезионной и когезионной равной прочности:

$$\frac{\tau_{сц}}{\sigma_{пв}} = h_k thkL. \quad (6)$$

Критическую деформацию металла определяем из выражения (4):

$$\varepsilon_{Мкр} = \frac{\tau_{сц}/E_{п}h_k}{th_kL} \quad (7)$$

и получаем зависимость для определения минимально допустимой прочности сцепления для случая статического растяжения композиции металл – полимер:

$$\tau_{сц} = \varepsilon_{Мкр} th_kL \cdot E_{п}h_k. \quad (8)$$

Остаточные нормальные напряжения в полимерном покрытии  $\sigma_{п}$  и металле  $\sigma_{м}$  определяет по формулам, предложенным С.П. Тимошенко [4] и уточненным в работах [5,6]:

$$\sigma_{п} = \frac{2\delta}{L^2} \left[ \frac{2}{h_{п}hb} (E_{п} \cdot J_{п} + E_{м} \cdot J_{м}) + \frac{E_{п}h_{п}}{2} \right]; \quad (9)$$

$$\sigma_{м} = \frac{2\delta}{L^2} \left[ \frac{2}{h_{м}hb} (E_{п} \cdot J_{п} + E_{м} \cdot J_{м}) + \frac{E_{м}h_{м}}{2} \right],$$

где:  $h_{п}$ ,  $h_{м}$  – толщина полимерного покрытия и металла соответственно;  $h$  – общая толщина композиции металл – полимер;  $\delta$  – прогиб образца композиции;  $b$  – ширина образца композиции;  $J_{п} = \frac{bh_{п}^3}{12}$ ,  $J_{м} = \frac{bh_{м}^3}{12}$  – моменты инерции полимерного покрытия и металла соответственно.

Результаты проведения исследования можно использовать в конструкторской практике при выполнении расчетов на прочность композиционных элементов металл – покрытие по предельным и остаточным напряжениям, а также деформациям металла, вызывающим отслоение полимерного покрытия от металлической поверхности.

Известно [1], что работа клеевого металлополимерного соединения глав-

ным образом определяется релаксационной способностью клеевого слоя, то есть является следствием деформационной способности, которую в условиях работы клеевого слоя проконтролировать практически невозможно. Выбор критерия прочности для клеевого металлополимерного соединения необходимо проводить с учетом структурных изменений, которым подвергается клеевой слой в процессе эксплуатации в составе изделия, и большого количества экспериментальных данных.

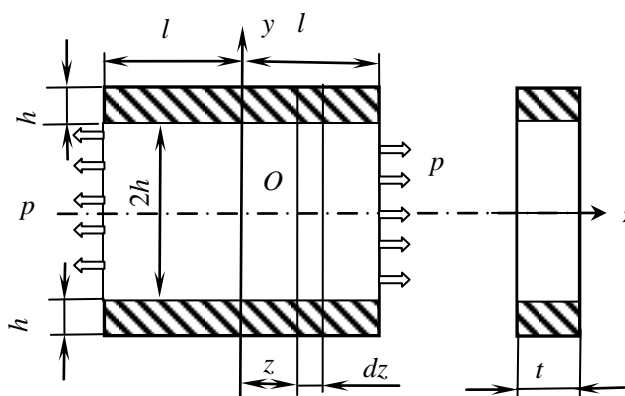


Рисунок – Расчетная схема для определения нормальных напряжений в полимерном покрытии  $\sigma_{п}$  и касательная напряжения  $\tau_{в}$  в зоне адгезионного контакта композиции металл – полимер.

При выборе критерия прочности для клеевых металлополимерных соединений на основании [7,8] отдадим предпочтение критерию наибольших касательных напряжений, т.е. третьей теории прочности, которую с учетом исследуемых значений нормальных и касательных напряжений рассматриваем в виде:

$$\sigma_{эквкр} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma] \quad (10)$$

Сравнение результатов расчета, выполненного с помощью зависимости (10), с экспериментальными данными, приведенными в работе [7], показало практически полное их совпадение, то есть факти-

ческие данные хорошо согласуются с расчетными.

Это позволяет сделать вывод, что работу исследуемых клеевых металлополимерных соединений можно рассматривать в рамках основных положений третьей теории прочности при наличии большого количества экспериментальных данных. Кроме того, работа этих соединений аналогична основным особенностям работы пластических материалов.

Используя результаты исследований, приведенные в работах [1,7] проведен сравнительный анализ диаграмм предельного напряженного состояния клеевого металлополимерного соединения, который показал, что предельные кривые для различных длительностей предварительной нагрузки можно рассматривать как эквидистантные по отношению к диаграмме предельного напряженного состояния, полученной по результатам кратковременных статических испытаний [8]. Это дает возможность по диаграммам кратковременной прочности описывать диаграммы предельного напряженного состояния после различной предварительной наработки. Для этой цели в зависимость (10) введем временный коэффициент, а оценку эквивалентного напряжения после различной предварительной наработки будем выполнять по следующему выражению:

$$\sigma_{\text{экв}_t} = a_t \tau \sqrt{n^2 + 4}, \quad (11)$$

где  $n = \sigma / \tau$ ;  $a_t = \sigma_{\text{экв}_t} / \sigma_{\text{экв}_\text{кр}}$ .

В результате экспериментальных исследований были получены зависимости коэффициента  $a_t$  от величины соотношения нормальных и касательных напряжений для клеевого металлополимерных соединений, нагруженных предварительными нагрузками величина которых составляла  $0,25 P_{\text{кр}}$ , и  $0,5 P_{\text{кр}}$ . Анализ полученных данных позволил сделать

закключение, что величина коэффициента  $a_t$  является постоянной для различных соотношений нормальных и касательных напряжений. Это дает возможность более точно выполнять сопоставление влияния рассматриваемого эффекта степени снижения кратковременной статической прочности после предварительной наработки клеевого металлополимерного соединения. Результаты сопоставления для стали Ст.3 при напряжениях  $\sigma = 0,25 \sigma_{\text{в}}$  и  $\sigma = 0,5 \sigma_{\text{в}}$  (соответствующих  $0,25 P_{\text{кр}}$ , и  $0,5 P_{\text{кр}}$ ), различных толщинах армированного клеевого слоя (0,5; 1,5; 2,5 мм) на основе клеевых композиций типа "Спрут-9М" и "ВАК-А" представлены в табл.1. В качестве армирующего материала здесь применялась стеклоткань марки Т-11-ГВС-9.

Таблица 1 – Результаты сопоставления

№ п/п	Толщина армированного полимерного слоя, мм	Минимальное значение $a_t$	
		Клеевая композиция	
		«ВАК-А»	«Спрут-9М»
1.	0,5	0,47/0,57	0,42/0,52
2.	1,5	0,55/0,64	0,48/0,58
3.	2,5	0,43/0,54	0,37/0,45

Примечания: в числителе при предварительной нагрузке  $0,25 P_{\text{кр}}$ ; в знаменателе при предварительной нагрузке  $0,5 P_{\text{кр}}$ .

Из табл.1 видно, что величина коэффициента  $a_t$  зависит от толщины армированного полимерного слоя и предварительной нагрузки. Результаты исследований позволили установить, что величина коэффициента  $a_t$  для армированного полимерного слоя на основе клеевой композиции типа "ВАК-А" примерно на 10% выше, чем для армированного полимерного слоя - "Спрут-9М". Кроме того, наблюдается идентичное снижение прочности для армированного полимерного слоя на основе клеевых композиций типа "ВАК-А" и "Спрут-9М".

Из литературы известно [1,5,6], что величину коэффициента  $a_t$  можно определить по результатам стандартных испытаний на нормальный отрыв или сдвиг. Проведенные исследования позволяют нам сделать вывод, что диаграммы предельного напряженного состояния клеевого металлополимерного соединения для заданного времени предварительной наработки и условий испытаний можно описать с помощью третьей теории прочности, зная величину коэффициента  $a_t$ , то есть рассмотренные диаграммы могут служить своеобразным эталоном, к достижению которого следует стремиться при разработке новых рецептур клеевых композиций и получении на их основе армированных полимерных покрытий.

Необходимо также отметить, что современное состояние науки позволяет теоретически и экспериментально оценить напряженное состояние поверхности склеивания, то есть определить величины нормальных и касательных напряжений, которые будут совместно передаваться клеевому металлополимерному соединению в составе изделия. Выполнив испытания прочности клеевого металлополимерного соединения на основе различных клеевых композиций при совместном действии нормальных и касательных напряжений в условиях, моделирующих реальные, построив по результатам этих испытаний диаграммы предельного напряженного состояния, можно оценить применимость армированного полимерного покрытия на основе любой клеевой композиции в конкретном клеевом изделии, то есть данные результаты исследований целесообразно использовать в конструкторской практике.

Кроме того, выявленная применимость критериев прочности для материалов, неодинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию, к металлополимерным свидетельствует о принципиальной возможности расчета диаграмм их предельного напряженного состояния по результатам стандартных испытаний на прочность при нормальном отрыве и сдвиге.

### *Литература*

1. Корягин С.И. Несущая способность композиционных материалов. Калининград. ГИПП «Янтарный сказ». – 1996. – 301 с.
2. Корягин С.И. Теория адгезии и экспериментальные методы исследования прочности сцепления // Пластические массы. – 1997. - №3. с 17-21.
3. Корягин С.И. Оптимизация остаточных напряжений в полимерных покрытиях // Вестник Российского государственного университета им. И.Канта. Серия физико – механические науки. – 2007. вып. 3. с100-104.
4. Timoshenko S.P. Analysis of bimetallic thermos-tate. J. Opt. Soc. Amer. 1925, 11, p 233-255.
5. Уланский Э.С., Лященко Б.А. Условия адгезионной и когезионной равно прочности жиростойких покрытий. В кн.: Космические исследований на Украине. В. 6. Киев. «Науковая думка», 1975. с 58-64.
6. Журавлев Г.И., Кирш М. К Методике определения термоупругих напряжений в покрытиях. Наука, 1972, с 315-321.
7. Корягин С.И. Научные основы обеспечения несущей способности металлических конструкций, упрочненных армированными полимерными покрытиями. // Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук – Киев: ИПП НАН Украины, 1995, – 38с.
8. Корягин С.И., Власенко Е.А. Об эффекте восстановления прочности клеевых соединений под действием статической нагрузки // Изв. вузов. Машиностроение – 1987, №6

---

<sup>1</sup> Липовская Елена Петровна, ассистент кафедры автосервиса БФУ, тел: (4012)338284, email: [Elipovskaya@kantiana.ru](mailto:Elipovskaya@kantiana.ru)

<sup>2</sup> Пелевин Сергей Игоревич, аспирант кафедры автосервиса БФУ, тел: (4012)338284, email: [Pelewin17@gmail.ru](mailto:Pelewin17@gmail.ru)