

*LXVII Международная конференция
«Актуальные проблемы прочности», 2-5 апреля 2024 г., Екатеринбург*

ОЦЕНКА АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ПУТЕМ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Смирнов С.В., Мясникова М.В

Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова
Уральского отделения РАН



Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 24-29-00528.

Проблема: отслоение (нарушение адгезионных связей) является самым распространенным типом повреждений в конструкциях с покрытиями.

Цель исследования: разработать методику оценки адгезионной прочности с помощью критериев, учитывающих параметры напряженно-деформированного состояния на контакте взаимодействующих поверхностей в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Задачи исследования:

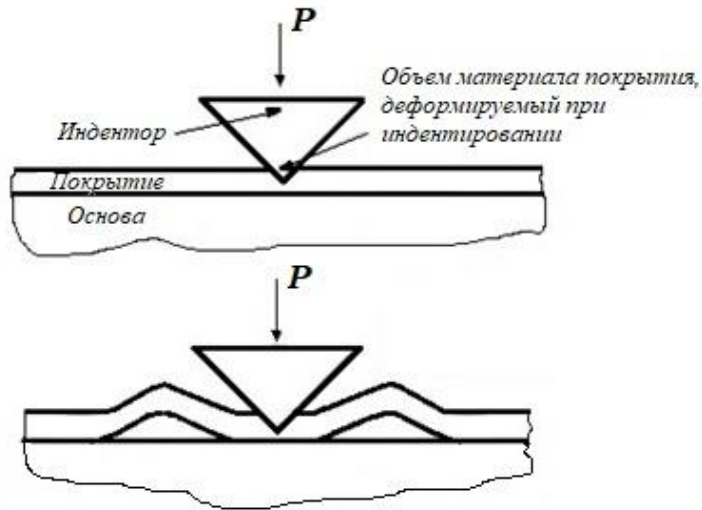
- 1) проведение испытаний по разрушению адгезионного контакта (метод инструментального индентирования);
- 2) численное моделирование условий проведения эксперимента (программный пакет ANSYS);
- 3) выбор критерия для количественной оценки адгезионной прочности (предельная удельная поверхностная энергия адгезионного разрушения).

Объект исследования: полимерная композиция горячего отверждения на основе эпоксидной диановой смолы ЭД-20 с титаналкоксидным отвердителем (адгезив), нанесенная на металлическую основу из низкоуглеродистой конструкционной стали Ст 3 с содержанием углерода 0.2% (субстрат).

Толщина покрытия составила 160 мкм.

Состав покрытия был синтезирован в Институте органического синтеза УрО РАН.

Испытания для определения адгезионной прочности: метод инструментального индентирования



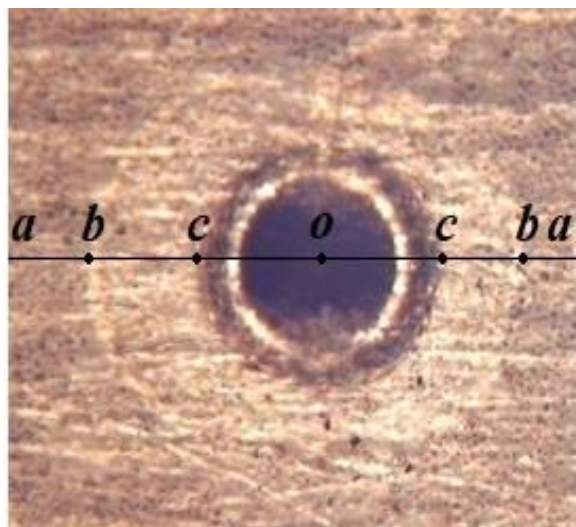
Индентор – твердосплавный конус Роквелла с углом конусности при вершине 120° и радиусом сферической части 200 мкм.

При внедрении наконечник индентора пластически деформирует некий объем материала покрытия, что приводит к формированию кольцевой области вспучивания покрытия вокруг отпечатка.

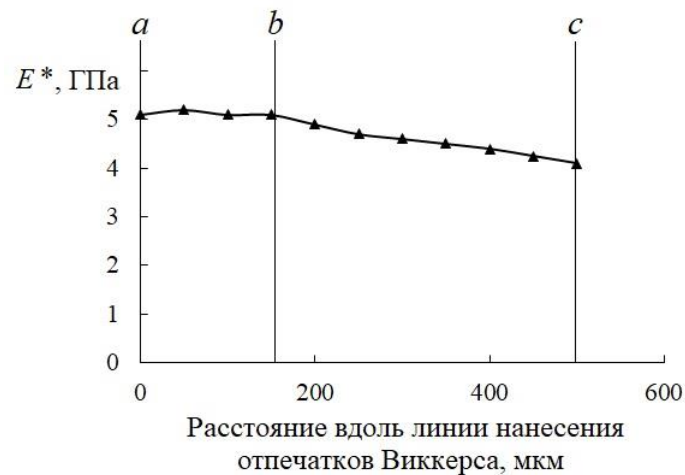
С увеличением глубины внедрения на границе соединения материалов покрытия и основы может зародиться и начать развиваться трещина, вследствие разрушения адгезионных связей преимущественно по механизму сдвига.

Усилие индентирования – 150 Н

Дополнительные испытания по внедрению алмазного индентора Виккерса на инструментированном микротвердомере FISHERSCOPE 2000хум для определения границы возможного отслоения покрытия от основы.



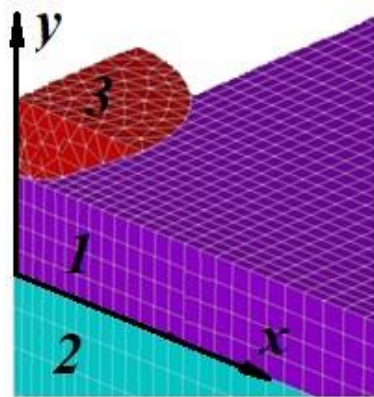
Участок поверхности покрытия вблизи отпечатка индентора Роквелла (светлая зона – зона предполагаемого отслоения покрытия), увеличение х60



К определению ширины зоны отслоения $b - c$ для одного из отпечатков индентора Роквелла

Среднее значение $L_f = 300$ мкм экспериментальной ширины зоны отслоения $b - c$, определенное по результатам 20 проведенных испытаний на индентирование с усилием 150 Н, использовали в качестве контролируемого геометрического параметра для численного моделирования.

Конечно-элементное моделирование процесса индентирования с использованием CZM модели

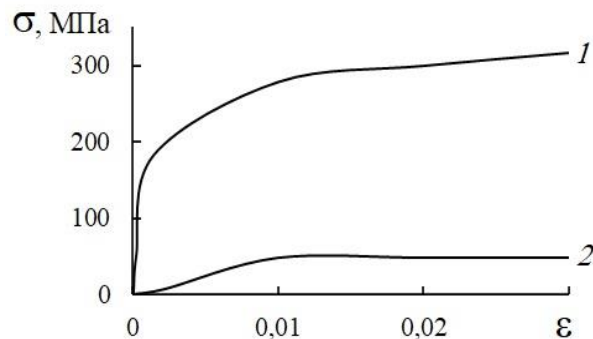


3D вычислительная модель полимерного соединения при индентировании: 1 – покрытие; 2 – основа; 3 – индентор Роквелла

Упруго-пластическая модель материала компонентов адгезионного соединения:

$$\begin{cases} \varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E}, \text{ где } \sigma < \sigma_0 = E\varepsilon_0 \\ \varepsilon_{pl} = \frac{1}{E_T} (\sigma - \sigma_0), \text{ где } \sigma \geq \sigma_0 \end{cases}$$

где ε_{el} , ε_{pl} – эквивалентная упругая и пластическая деформации соответственно; E – модуль Юнга; σ_0 – предел текучести; E_T – модуль деформационного упрочнения



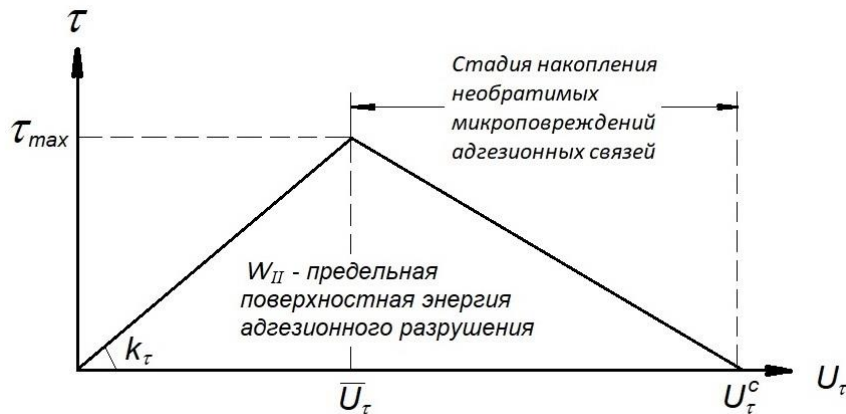
Кривые деформационного упрочнения материалов основы из стали Ст3 (1) и покрытия (2)

Упругие характеристики компонентов вычислительной модели

Компонент вычислительной модели	Значения упругих констант	
	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона
Покрытие	4100	0,35
Основа	210000	0,3
Индентор	650000	0,2

Модель CZM (cohesive zone model)

Задача разрушения адгезионного контакта сводится к эквивалентной задаче когезионного разрушения виртуального слоя непосредственно перед фронтом трещины, движущейся при разрыве адгезионных связей в условиях нормального отрыва (mode I), сдвига (mode II) или в смешанных условиях за счет совместного влияния нормальных и касательных напряжений (mode III).



CZM билинейная диаграмма разрушения адгезионных связей по механизму сдвига

Предельная поверхностная энергия, затрачиваемая на распространение трещины адгезионного разрушения по механизму сдвига, численно равна площади диаграммы:

$$W_{II} = \frac{1}{2} \tau_{\max} U_{\tau}^c$$

τ_{\max} - локальный предел прочности на сдвиг, который может возникать на контакте без нарушения его целостности

\bar{U}_{τ} - максимальная вытяжка адгезионных связей при сдвиге взаимодействующих поверхностей до начала образования и накопления необратимых повреждений адгезионных связей

U_{τ}^c - предельная вытяжка адгезионных связей при критическом смещении взаимодействующих поверхностей, соответствующем моменту разрыва адгезионных связей

При постановке вычислительных задач применили следующие допущения:

1. В качестве минимального порогового значения предела локальной поверхностной адгезионной прочности приняли $\tau_{\max} = 0,1$ МПа (что составляет менее 1% когезионной прочности материала покрытия), а моделирование осуществляли при условии, что $\tau_{\max} \geq 0,1$ МПа.

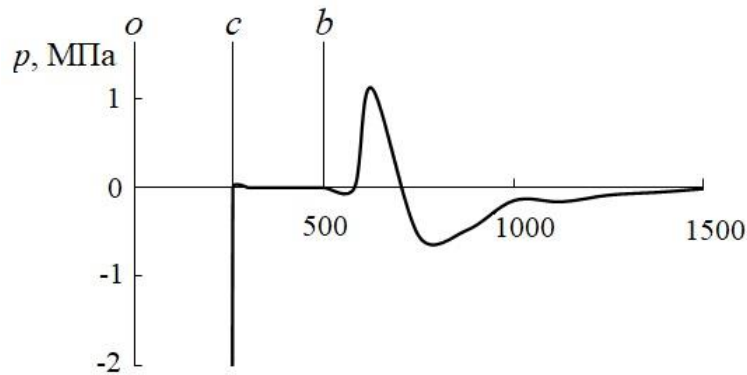
2. Предполагается, что адгезионные связи образованы волокнами, состоящими из полимерных молекул эпоксидной композиции. В этом случае величина предельной вытяжки адгезионных связей – параметр U_{τ}^c , может быть ограничена максимально возможной длиной волокна, которая в свою очередь не должна превышать значения длины макромолекулы полимера. Согласно проведенным исследованиям, микроструктура материала покрытия, состоит не из линейных молекул, а представляет собой трехмерную единую структуру, у которой формально может быть любой размер и молекулярная масса. В связи с этим начальное значение параметра U_{τ}^c ограничили размером неделимой структурной составляющей макромолекулы – длиной мономерного звена, равной $15,5 \cdot 10^{-10}$ м, а моделирование осуществляли при условии, что $U_{\tau}^c \geq 15,5 \cdot 10^{-10}$ м.

3. Величина предельной удельной поверхностной энергии W_{II} при определенном фиксированном значении τ_{\max} не зависит от величины соотношения $\overline{U_{\tau}}/U_{\tau}^c$, поскольку площадь диаграммы модели когезионной зоны будет одной и той же. Поэтому варьируемыми параметрами при проведении численного эксперимента являются τ_{\max} и U_{τ}^c . При этом соотношение $\overline{U_{\tau}}/U_{\tau}^c$ во всех расчетах приняли постоянным, равным 0,6 поскольку было обнаружено, что данное значение обеспечивает лучшую сходимость результатов расчета.

Идентификация вычислительной модели

τ_{\max} и U_{τ}^c - варьируемые параметры в соответствии с принятыми допущениями.

О размере расчетной ширины L зоны отслоения судили по величине нормального контактного давления p вблизи отпечатка индентора. Считали, что в области с разрушенными адгезионными связями $p = 0$. В результате для одной и той же глубины внедрения индентора $h = 90$ мкм получили выборку возможных значений L расчетной ширины зоны отслоения покрытия.



Распределение контактного давления вдоль оси x на границе соединения покрытия с материалом основы при отслоении, полученное при оптимальных параметрах модели когезионной зоны

Сравнение экспериментальных и расчетных данных

$$\delta = \left| \frac{L - L_f}{L_f} \right| \rightarrow \min$$

Оптимальные значения варьируемых параметров CZM:

$$\tau_{\max} = 28 \text{ МПа}; U_{\tau}^c = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Величина предельной поверхностной энергии адгезионного разрушения, наилучшим образом удовлетворяющая результатам эксперимента: $W_{II} = 2,8 \text{ Дж/м}^2$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана новая методика оценки адгезионной прочности полимерного покрытия, в основу которой положена численная реализация подхода механики разрушения при обработке результатов, полученных при испытаниях по внедрению индентора Роквелла. В качестве покрытия использована полимерная композиция горячего отверждения на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с титаналкоксидным отвердителем, нанесенная на металлическую основу из низкоуглеродистой конструкционной стали Ст3 с содержанием углерода 0.2%. Установлено формирование кольцевой зоны отслоения покрытия при индентировании за счет разрушения адгезионных связей преимущественно по механизму сдвига под действием касательных напряжений, возникающих на границе соединения, при вытеснении материала покрытия непосредственно из-под индентора. Ширина зоны отслоения, определенная по результатам серии дополнительных испытаний по внедрению индентора Виккерса с малыми нагрузками, использована в качестве контролируемого параметра при конечно-элементном моделировании отслоения покрытия. Для задания условий адгезионного контакта применен трехпараметрический билинейный закон модели когезионной зоны, описывающий соотношение между касательным напряжением сцепления и вытяжкой адгезионных связей при сдвиге взаимодействующих поверхностей в плоскости контакта. В качестве критерия для количественной оценки адгезионной прочности использована предельная величина удельной поверхностной энергии адгезионного разрушения.