

Булавін Л.А.<sup>1</sup>, Забашта Ю.Ф.<sup>1</sup>, Тодосійчук Т.Т.<sup>2</sup>, Актан О.Ю.<sup>1</sup>, Косянчук Л.Ф.<sup>2</sup>,  
Голік Ю.С.<sup>1</sup>, Ярова Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Україна, м. Київ

<sup>2</sup> Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України. Україна, м. Київ

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗСУВНОЇ АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ЗАХИСНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ

### Анотація

*Запропоновано експериментальний метод визначення зсувної адгезійної міцності полімерного покриття з твердою підкладкою, який моделює реальну картину напруженого стану, що виникає при експлуатації подібних з'єднань. Розроблено методику розрахунку цієї величини. Проведена експериментальна апробація запропонованого методу.*

### Abstract

*The experimental method of the adhesive strenght of the polymer coating with solid base layer is proposed. This method the stressed state real picture at the operation of similar connections is simulates. The procedure of the adhesive strenght calculation is developed. The experimental approval of the proposed method is carried out.*

Як відомо [1, 2], одним із ефективних способів захисту технологічного обладнання від руйнівного впливу зовнішніх чинників (температури, механічного навантаження, УФ-випромінення та ін.) є нанесення на його зовнішню поверхню шару полімерного покриття. Відомо також [3–6], що удосконалення технології нанесення покриття включає контроль поверхневих властивостей цього покриття, а також властивостей поверхні. Однією із задач щодо оптимізації взаємодії полімерного покриття з поверхнею є оцінка міцності з'єднання між застосовними матеріалами як критерію його якості. Основним показником адгезійної міцності в системі «покриття–підложка» є величина руйнівного навантаження на межі тверда поверхня – полімерне покриття [7, 8]. Однак, при дослідженнях властивостей та визначення якості з'єднання компонентів залишається чимало нерозв'язаних проблем, які виникають при експлуатації приладів та пов'язані з впливом різноманітних факторів: технічними умовами виготовлення, заводськими нормами та ін. [9–11].

Найчастіше для визначення адгезійної міцності використовуються випробувальні машини із схемою навантаження, зображеною на рис. 1, а. Як видно з цього рисунку, зовнішні сили діють перпендикулярно до з'єднаних поверхонь. Однак, такі випробування не відповідають реальній картині напруженого стану, що виникає при експлуатації адгезійних з'єднань, які в багатьох випадках піддаються зсувній деформації. Тому існує необхідність розробки методу визначення адгезійної міцності, який би моделював напружений стан, що існує в реальності.

### Теоретичне обґрунтування методу

Можна вказати два основних реальних фактори, що впливають на зниження адгезійної міцності кріплення полімерного покриття. Перший фактор пов'язаний з існуванням структурних напружень, які виникають внаслідок усадки полімерної клейової композиції при її твердненні. Другий фактор – це температурні напруження, які виникають в результаті різниці коефіцієнтів теплового розширення полімеру та підкладки. Суттєво, що ці напруження діють паралельно поверхні підложки [9]. Таким чином, для визначення адгезійної міцності необхідно змодельовати реальну ситуацію, розташувавши зовнішні сили в площинах, паралельних поверхні адгезійного шару. Така схема навантаження зображена на рис. 1, б.

Для визначення напруженого стану, який виникає в адгезійному шарі за схемою навантаження, зображеною на рис. 1, б, скористаємося теорією пружності [12]. Як видно з рис. 1, б, при такій схемі навантаження адгезійний шар зазнає деформації крутіння під дією крутильного моменту  $M$ .

Під час випробувань будемо використовувати зразки з поперечним перерізом, що має форму квадрата. Позначимо через  $a$  – довжину сторони такого квадрата.

Згідно з теорією пружності [12], в даному випадку в площині, яка є перпендикулярною до осі крутіння, виникають дотичні напруження. Та обставина, що напруження діють в площинах, паралельних поверхням з'єднаних об'єктів, якраз і відповідає реальному напруженому станові, який

виникає в процесі експлуатації адгезійного з'єднання. Це і є суттєва відмінність запропонованого нами експериментального методу. За теорією пружності [12] розподіл дотичних напружень в площині поперечного перерізу адгезійного шару має вигляд, зображений на рис. 2.

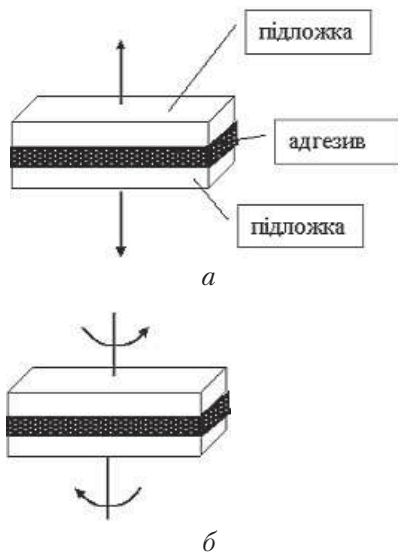


Рис. 1. Схеми випробувань при визначенні адгезійної міцності полімерного покриття з твердою підложкою

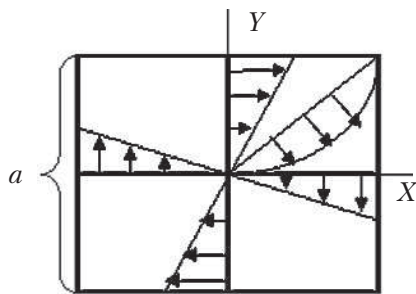


Рис. 2. Розподіл дотичних напружень по поперечному перерізу клейового шару

Як видно з цього рисунку, дотичні напруження досягають свого максимального значення в граничних точках, що знаходяться на однаковій відстані від країв зразка.

Теорія пружності дає для цих напружень формулу:

$$\tau_{\max} = \frac{M}{qa^3}, \quad (1)$$

де  $q$  — числовий коефіцієнт, рівний 0,208.

Як відомо [12], існує декілька феноменологічних теорій міцності, які відрізняються одна від одної механізмом руйнування. Однією з найбільш поширених теорій є теорія, згідно з якою руйнування відбувається в той час, коли дотичні напруження досягають певного критичного значення. Саме такий підхід прийнято в нашому дослідженні, тому міцність на зсув розраховуватимемо за формулою:

$$\tau_p = \frac{M}{qa^3}. \quad (2)$$

Оскільки йдеться про дотичні напруження, логічно назвати це критичне значення зсувної адгезійною міцністю. Саме цю характеристику ми і визначаємо, застосовуючи запропонований метод.

## Опис експериментальної установки

Для реалізації методу була сконструйована установка, загальний вигляд якої представлений на рис. 3. Принцип дії установки пояснює схема, зображена на рис. 4.

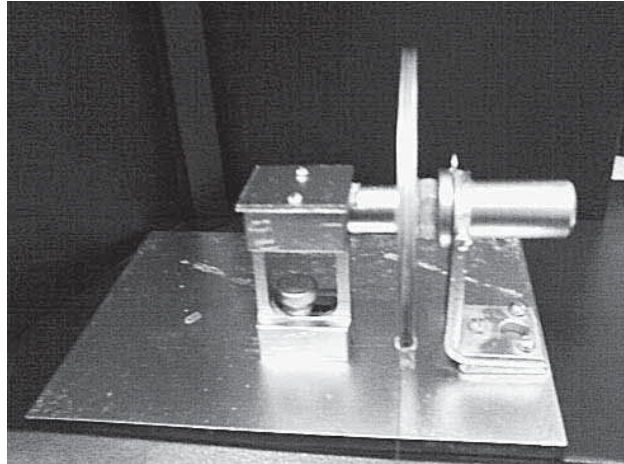


Рис. 3. Загальний вигляд експериментальної установки

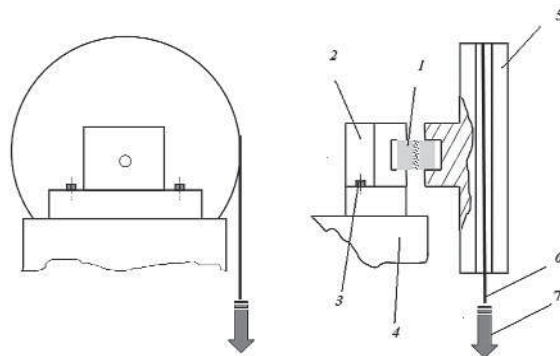


Рис. 4. Робоча схема експериментальної установки для визначення зсувної адгезійної міцності

Досліджуваний зразок 1 розміщується в затисках 2, який гвинтами 3 приєднаний до нерухомої станини 4. З другого боку до зразка приєднується рухомий диск 5. Радіус рухомого диска складає 51 мм. Металевий дріт 6 з'єднує рухомий диск 5 із спеціальним пристроєм 7, який забезпечує режим постійної швидкості навантаження.

Крутильний момент  $M$ , що діє на зразок, визначається за формулою:

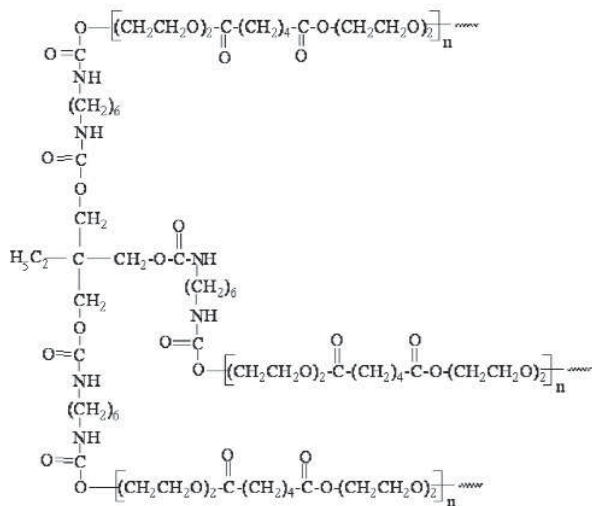
$$M = PR, \quad (3)$$

де  $P$  — сила, що діє на зразок з боку пристрою 7.

## Підготовка зразків

При визначенні адгезійної міцності на зсув використовували зразки, що склалися з двох скляних пластин, склеєних полімерною композицією.

Полімерна клейова композиція складається з двох компонентів — основи та твердника. Основою є форполімер, синтезований з полідіетиленглікольадипінату (ММ 800) та гексаметилендіізоціанату при співвідношенні 1:2. Тверднення клейової композиції проводили триметилпропаном (ТМП) при 60°C протягом 8–10 годин з утворенням нерозчинних зшитих продуктів без виділення будь-яких летючих речовин. Хімічна структура клейової композиції представлена нижче:



За підкладки були використані скляні квадратні пластинки розміром 10x10 мм і товщиною 2 мм (рис. 5) двох типів — із гладкою та шорсткою робочими поверхнями. Шорсткість поверхні створювалась за допомогою обробки на шліфувальному верстаті, що забезпечувала необхідну

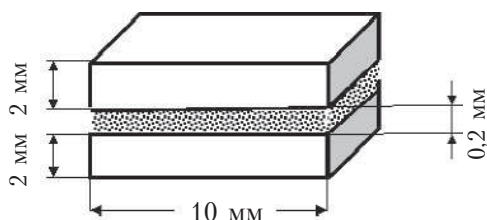


Рис. 5. Параметри досліджуваних зразків

ступінь чистоти поверхні. Було виготовлено зразки трьох серій. В зразках серії А обидві робочі поверхні залишались необробленими, в зразках серії Б — необробленою залишалась одна поверхня. В зразках серії В обидві робочі поверхні були оброблені.

**Результати експерименту та їх обговорення**

Результати проведених вимірів зсувної міцності наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Зсувна міцність досліджених з'єднань «полімерне покриття-тверда підложка»

Серія зразків	Зсувна міцність дослідженого з'єднання, $\tau_p$ , МПа
А	2,3 ± 0,2
Б	3,5 ± 0,3
В	3,2 ± 0,3

На рис. 6, а, б, в зображено вигляд зразків після руйнування (А, Б, В, відповідно).

Як видно з цих рисунків, для зразків серії А, Б з'єднання носить змішаний характер: як адгезійний — відрив клейового шару від поверхні скла, так і когезійний — розрив по клейовому шару. Руйнування зразків серії В відбулося за рахунок руйнування підложки.

В цьому випадку мова може йти про міцність клейового з'єднання як цілого.

Із порівняння результатів експерименту зразків А і Б випливає висновок, що збільшення шорсткості з'єднаних поверхонь, відбувається збільшення поверхні контакту адгезиву із поверхнею скла, що призводить до підвищення міцності клейового з'єднання. Для зразків типу В виміряти адгезійну зсувну міцність нам не вдалося із-за руйнування підкладки, причому в цьому випадку зсувна міцність в межах похибки значення виміряних зсувних міцностей для зразків Б і В не відрізнялись. Для зразків серії Б тільки одна із з'єднаних поверхонь була шорсткою. Виходячи з цього, можна вважати, що адгезійна міцність зразків Б і В, коли обидві з'єднані поверхні є шорсткими, буде більшою за адгезійну міцність зразків А. Крім того, слід звернути увагу, що

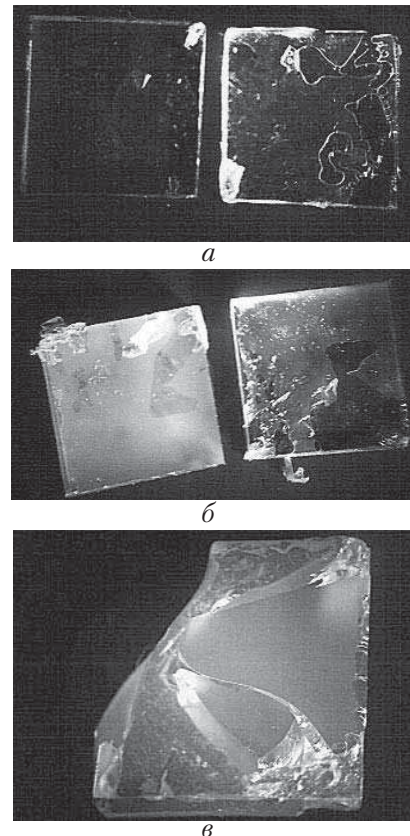


Рис. 6. Зовнішній вигляд зразків після руйнування

близькі значення зсувної міцності для зразків серії *B* і *B* свідчать про високі адгезійні властивості досліджуваної полімерної композиції.

Проведена апробація методу дозволяє зробити висновок, що даний метод є перспективним для оцінки міцності адгезійних з'єднань, що працюють в умовах деформаційних навантажень.

### Висновки

Проведена апробація методу дозволяє зробити висновок, що даний метод є перспективним для оцінки міцності адгезійних з'єднань, що працюють в умовах деформаційних навантажень. Запропонована експериментальна методика дає можливість отримувати нову інформацію щодо впливу компонентів клейової суміші та режимів формування з'єднання на стійкість контакту між покриттям та поверхнею матеріалів в процесі їх експлуатації.

### Література

1. *Зимов А. Д.* Адгезия плёнок и покрытий. — М.: Химия, 1988. — 252 с.
2. *Анисимов Ю. А., Колодяжний А. В.* Кинетика процессов отверждения и получение композиционных материалов с повышенной ударной прочностью при использовании эпоксиуретановых смол // Ж. прикл. химии. — 1994. — Т. 67, № 12. — С. 2038–2042.
3. *Бельй В. А., Егоренков Н. И., Плескачевский Ю. М.* Адгезия полимеров к металлам. — Минск: Наука и техника, 1984. — 287 с.
4. *Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Смилга В. П.* Адгезия твёрдых тел. — М.: Наука, 1983. — 279 с.
5. *Solodilov V. I.* Properties of unidirectional GFRPs based on an epoxy resin modified with polysulphone or an epoxyurethane oligomer / V. I. Solodilov, Yu. A. Gorbatkina // Mechanics of Composite Materials. — 2006. — Vol. 42, № 6. — P. 154–165.
6. *Xiao Han-Wen.* Morphology, rheology, and mechanical properties of dynamically cured EPDM / PP blend: Effect of curing agent dose variation / Han-Wen Xiao, Shi-Qiang Huang, Tao Jiang // J. Appl. Polym. Sci. — 2004. — Vol. 92, № 1. — P. 357–362.
7. *Фрейдлин А. С.* Прочность и долговечность клеевых соединений. 2-е изд., перераб. И доп. — М.: Химия, 1981. — 272 с.
8. *Guo Y., Shao-Yun F., Jiao-Ping Y.* Preparation and mechanical properties of modified epoxy resins with flexible diamines // Polymer. — 2007. — Vol. 48, № 1. — P. 302–310.
9. *Ковачич Л.* Склеивание металлов и пластмасс. — М.: Химия, 1985. — 240 с.
10. *Ведякин С. В., Смахов Ф. М., Погребной И. Н.* [и др.] Адгезионные свойства покрытий на основе эпоксиуретановых олигомеров с полидиметилсилоксановыми и полиоксипропиленовыми звеньями // Лакокрасочн. матер. — 1995. — № 5. — С. 19–21.
11. *Степанова И. С., Литская В. А., Пулуляк В. Б.* [и др.] Прочность оксидных полимеров, обладающих адгезией к необезжиренным поверхностям // Пластические массы. — 1995. — № 3. — С. 28–29.
12. *Тимошенко С. П.* Курс теории упругости. — Киев: Наукова думка, 1972. — 501 с.