

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЗАЛИШКОВИХ
НАПРУЖЕНЬ У ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТЯХ
ДІАГРАМНИМ МОДЕЛЮВАННЯМ**

**д.т.н., проф. Стухляк П.Д., к.ф.-м.н., доц. Добротвор І.Г.,
Сорівка І.Т., Каретін В.М.**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Досліджено залежності залишкових напружень від вмісту дисперсних наповнювачів у епоксикомпозитному матеріалі та товщини покриттів з використанням операторів програмного забезпечення Mathcad. Встановлено закономірності зміни фізико-механічних властивостей епоксикомпозитних покриттів від вмісту наповнювача і товщини покриття шляхом діаграмного моделювання. Розроблені композити мають високі показники експлуатаційних характеристик. Такі матеріали перспективно використовувати у вигляді захисних покриттів на робочих поверхнях деталей технологічного обладнання.

Постановка проблеми. Розвиток сучасної промисловості вимагає створення нових матеріалів з покращеними фізико-механічними властивостями. Чільне місце у цьому плані займають композити на основі реактопластів. Полімерні композитні матеріали (КМ) у вигляді покриттів широко використовують у багатьох галузях промисловості і сільського господарства для захисту технологічного устаткування апаратів і машин від впливу зовнішнього агресивного середовища, котре спричиняє корозійне руйнування. Використання полімеркомпозитних покриттів дозволяє збільшити довговічність і надійність експлуатації обладнання, продовжити міжремонтний ресурс роботи технологічного устаткування, а також суттєво підвищити хімічну тривкість механізмів та машин [1, 2]. У зв'язку з цим, завдання створення покриттів з високими експлуатаційними характеристиками є актуальним і перспективним на даний час.

Особливий науковий і практичний інтерес становлять композити на основі епоксидного зв'язувача, оскільки вони мають розвинуту сировинну базу, високі питомі, міцнісні показники, технологічність при формуванні у вигляді покриттів на довгомірних поверхнях складного профілю. Відомо, що одним із способів покращення фізико-механічних властивостей епоксикомпозитних покриттів є введення у зв'язувач різноманітних за природою дисперсних наповнювачів, що зумовлює появу різних видів хімічної та фізичної взаємодії, яка виникає на межі поділу фаз у системі «полімер–наповнювач». Природа таких процесів у значній мірі залежить від хімічної активності наповнювача та характеристик топології його поверхні. Вказані чинники суттєво впливають на властивості матеріалу та їх зміну у процесі експлуатації [3, 4].

Важливими властивостями, які визначають довговічність захисних по-

криттів, є залишкові напруження. Вони є однією з причин руйнування полімеркомпозитної системи як у процесі формування, так і при експлуатації. Чим більша степінь зшивання, тим більші залишкові напруження у матеріалі [5]. У зв'язку з цим, залишкові напруження вибрано як один із основних критеріїв, що характеризують процеси структуроутворення у композиті. Кінетика зміни залишкових напружень на межі поділу фаз у системі «полімеркомпозит–основа» показує, що магнітна природа добавки та її кількісний вміст значно впливають на фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозиту. Відомо, що залишкові напруження залежать як від природи наповнювача у матеріалі, так і від товщини покриття [6].

Метою роботи є оцінка залежностей залишкових напружень від вмісту дисперсних наповнювачів у композитному матеріалі та товщини полімерних покриттів шляхом діаграмного моделювання з використанням операторів програмного забезпечення Mathcad.

Матеріали та методика досліджень. Як об'єктом дослідження вибрано епоксидний олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Тверднення композитів здійснювали поліетиленполіаміном (ТУ 6-05-241-202-78), що дає можливість затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Для покращення експлуатаційних характеристик КМ у полімерну матрицю вводили дисперсні наповнювачі різної фізичної природи, а саме: карбід кремнію, оксид алюмінію та оксид міді з розміром часток 60...65 мкм. Концентрацію наповнювачів визначали у мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидного зв'язувача. У якості зразків для дослідження залишкових напружень використовували покриття з досліджуваних КМ, які формували на основі у вигляді пластини, товщиною $\delta=0,3$ мм з матеріалу, що має відомий модуль пружності (матеріал сталь марки 08кп).

У процесі зшивання епоксикомпозитів у вигляді покриттів на межі поділу фаз «захисне покриття – металева основа» формуються зв'язки, що зумовлює виникнення залишкових напружень розтягу [6]. Внаслідок цього, спостерігали деформацію консолі (у вигляді основи з покриттям).

Для оцінки залишкових напружень у захисних покриттях використовували консольний метод, що ґрунтується на вимірюванні висоти згину (відхилення) консольної пластинки-основи з нанесеним на неї покриттям по відношенню до її базового положення [7].

Величину залишкових напружень $\sigma_{зал}$ (МПа) визначали за формулою:

$$\sigma_{зал} = \frac{H \cdot E \cdot \delta^3}{3 \cdot L^2 \cdot (\delta + \delta^*) \cdot \delta^*}, \quad (1)$$

де H – відхилення пластинки-основи від початкового положення; E – модуль пружності пластинки-основи ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа); L – довжина пластинки-основи з покриттям ($L = 7$ см); δ – товщина пластинки-основи ($\delta = 0,3$ мм); δ^* – товщина покриття.

Обговорення результатів дослідження. У ході проведення досліджень оцінювали залежність залишкових напружень епоксикомпозитних покриттів

від вмісту дисперсних наповнювачів q (від 0 до 80 мас. ч. наповнювача на 100 мас. ч. олігомера) у композитному матеріалі та в залежності від товщини полімерних покриттів δ^* (від 0,1 до 0,6 мм) шляхом діаграмного моделювання з використанням операторів програмного забезпечення Mathcad. У результаті отримано діаграми (рис. 1) залежностей залишкових напружень ($\sigma_{\text{зал}}$) від товщини покриттів (δ^*) та вмісту (q) наповнювачів, а саме: карбіду кремнію (SiC), оксиду алюмінію (Al_2O_3) та оксиду міді (CuO).

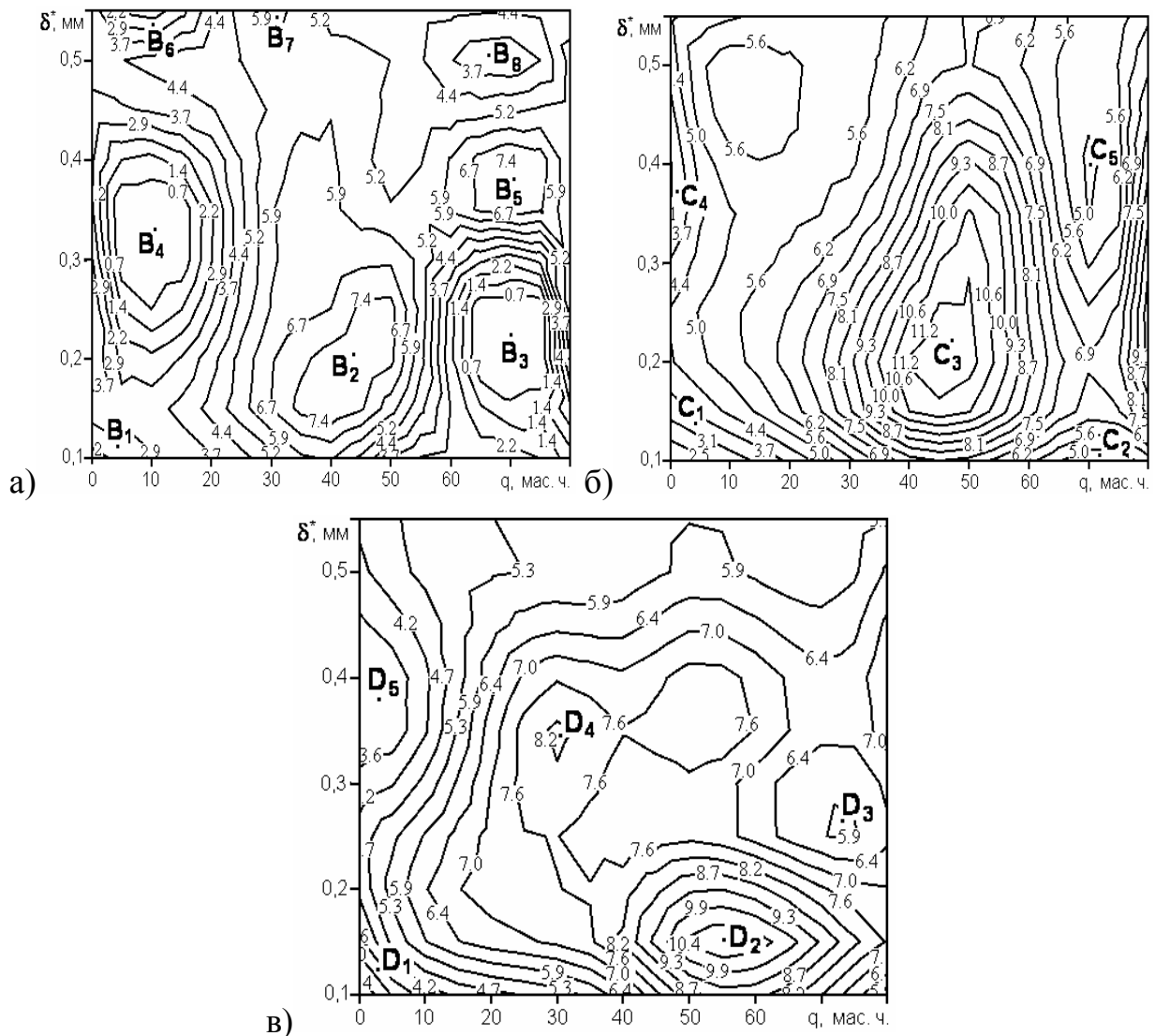


Рис. 1. Діаграми залежностей залишкових напружень ($\sigma_{\text{зал}}$) від товщини покриттів (δ^*) та вмісту (q) дисперсних наповнювачів: а) карбіду кремнію, б) оксиду алюмінію, в) оксиду міді.

Максимальні значення залишкових напружень (рис. 1, а) у сформованому КМ у вигляді покриттів із використанням дисперсного наповнювача SiC спостерігали в точках B_2 (при вмісті $q=45$ мас.ч. наповнювача на 100 мас.ч. олігомера та товщині покриття $\delta^*=0,2$ мм), т. B_5 ($q=70$ мас.ч.; $\delta^*=0,3-0,4$ мм) і т. B_7 ($q=30$ мас.ч.; $\delta^*=0,5-0,6$ мм).

У випадку наповнювача Al_2O_3 найвище значення залишкових напружень (рис. 1, б) отримали в т. C_3 ($q=45$ мас.ч.; $\delta^*=0,2-0,3$ мм). Максимуму ве-

личини залишкових напружень (рис. 1, в) у матеріалі, що містить CuO спостерігали у т. D_2 ($q=55$ мас.ч.; $\delta^*=0,1-0,2$ мм) і т. D_4 ($q=30$ мас.ч.; $\delta^*=0,3-0,4$ мм).

Мінімальні значення залишкових напружень (рис. 1, а) у композитах з SiC спостерігали в т. B_1 ($q=10$ мас.ч.; $\delta^*=0,1-0,2$ мм), т. B_3 ($q=70$ мас.ч.; $\delta^*=0,2-0,3$ мм), т. B_4 ($q=10$ мас.ч.; $\delta^*=0,3-0,4$ мм), т. B_6 ($q=10$ мас.ч.; $\delta^*=0,5-0,6$ мм) і т. B_8 ($q=70$ мас.ч.; $\delta^*=0,5$ мм). У випадку наповнювача Al_2O_3 найнижчі значення залишкових напружень отримали в т. C_1 ($q=10$ мас.ч.) та т. C_2 ($q=70$ мас.ч.) в діапазоні товщини покриття $\delta^*=0,1-0,2$ мм, в т. C_4 ($q=5$ мас.ч.) і т. C_5 ($q=70$ мас.ч.) в діапазоні товщини покриття $\delta^*=0,3-0,4$ мм (рис. 1, б). Мінімуму величини залишкових напружень (рис. 1, в) у композитах з CuO досягнули в т. D_1 ($q=5$ мас.ч.; $\delta^*=0,1-0,2$ мм), т. D_3 ($q=75$ мас.ч.; $\delta^*=0,2-0,3$ мм) і т. D_5 ($q=5$ мас.ч.; $\delta^*=0,3-0,4$ мм).

Таким чином, аналіз процесів структуроутворення КМ дає можливість встановити оптимальний вміст дисперсного наповнювача у епоксикомпозитах з підвищеними експлуатаційними характеристиками та визначити діапазони товщин покриттів з досліджуваних КМ шляхом діаграмного моделювання.

Висновки. У даній роботі досліджено залежності залишкових напружень від вмісту дисперсних наповнювачів у епоксикомпозитному матеріалі та товщини покриттів з використанням операторів програмного забезпечення Mathcad. Встановлено закономірності зміни фізико-механічних властивостей епоксикомпозитних покриттів від вмісту наповнювача і товщини покриття шляхом діаграмного моделювання. Величина залишкових напружень у значній мірі залежить як від вмісту наповнювача у КМ, так і від товщини покриття. На основі експериментальних досліджень встановлено, що у подальшому для захисту поверхонь технологічного устаткування апаратів і машин доцільно використовувати епоксикомпозитні покриття, котрі містять SiC , Al_2O_3 та CuO , з товщиною $0,3...0,4$ мм із наповненням $5...15$ мас. ч. на 100 мас. ч. олігомера. У випадку наповнювачів SiC , Al_2O_3 та CuO , покриття з товщиною $0,1...0,2$ мм із вмістом наповнювача $40...55$ мас. ч. на 100 мас. ч. зв'язувача не може бути рекомендованим для довготривалого використання на робочих поверхнях деталей технологічного обладнання. Розроблені композити мають високі показники експлуатаційних характеристик і можуть бути використані при експлуатації матеріалу у вигляді захисних покриттів на вузлах технологічного устаткування машин. Дослідження у цій галузі дають можливість встановити механізм впливу твердої поверхні наповнювача на структуроутворення матеріалу зв'язувача на межі поділу фаз «захисне покриття – металева основа».

Список використаних джерел:

1. Адаменко Н.А. Конструкционные полимерные композиты / Адаменко Н.А., Фетисов А.В., Агафонова Г.В. – Волгоград, 2010. – 101 с.

2. Сухарева Л.А. Долговечность полимерных покрытий / Сухарева Л.А. – М.: Химия, 1984. – 368 с.
3. Чернин И.З. Эпоксидные полимеры и композиции / Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. – М.: Химия, 1982. – 232 с.
4. Федоров В. Дослідження реологічних і фізико-механічних властивостей матриці для епоксидних покриттів / Федоров В., Шкодзінський О., Білий Л. // Вісник ТДТУ. – 2006. – № 2. – С. 39–43.
5. Бартнев Г.М. Физика и механика полимеров: Учеб. пособие для вузов / Бартнев Г.М., Зеленеv Ю.В. – М.: Высшая школа, 1983. – 391 с.
6. Букетов А.В. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів / Букетов А.В., Стухляк П.Д., Кальба Є.М. – Тернопіль: Збруч, 2005. – 182 с.
7. Карякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / Карякина М.И. – М.: Химия, 1988. – 272 с.

Аннотация

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭПОКСИКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЯХ ДИАГРАММНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

Стухляк П.Д., Добротвор И.Г., Соривка И.Т., Каретин В.Н.

Исследованы зависимости остаточных напряжений от содержания дисперсных наполнителей в эпоксикомпозитном материале и толщины покрытий с использованием операторов программного обеспечения Mathcad. Установлены закономерности изменения физико-механических свойств эпоксикомпозитных покрытий от содержания наполнителя и толщины покрытия путем диаграммного моделирования. Разработаны композиты имеют высокие показатели эксплуатационных характеристик. Такие материалы перспективно использовать в виде защитных покрытий на рабочих поверхностях деталей технологического оборудования.

Abstract

THE INVESTIGATION OF THE REMAINING TENSIONS DEPENDENCE'S IN EPOXYCOMPOSITE COATINGS BY DIAGRAM MODELING

Stukhlyak P.D., Dobrotvor I.G., Sorivka I.T., Karetin V.M.

There investigated remaining tensions dependence's from the quantity of the disperse fillers in epoxycomposite material and thickness of coatings using operators of software Mathcad. Established the regularities of the change of physics and mechanical properties of epoxycomposite coatings from the quantity of the filler and coating thickness by diagram modeling. The proposed composites are characterized by high exploitative characteristics. Such materials use prospectively as a protective coating in the working surfaces of equipment components.