УДК 621.763

Малець В. М., аспірант, Кашицький В. П., к.т.н., доцент
(Луцький національний технічний університет)

ФОРМУВАННЯ ДВОШАРОВИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ ПІД ВПЛИВОМ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ

В роботі досліджено властивості різнофункціональних шарів епоксикомпозитних покриттів наповнених високодисперсними порошками металів. Встановлено особливості структурування епоксикомпозитного адгезійного шару після попередньої обробки композиції ультразвуком або витримки в електромагнітному полі. Оптимальний режим формування розроблених епоксикомпозитів визначено за результатами досліджень адгезійної та ударної міцності. Встановлено позитивний вплив ультразвукової та електромагнітної обробки на формування епоксикомпозитних покриттів, який призводить до інтенсифікації процесів структурування системи та підвищення фізико-механічних характеристик.
***Ключові слова*: епоксикомпозитний матеріал, високодисперсний порошок, електромагнітне випромінювання, ультразвук, адгезійна міцність.**

В теперішній час композити на основі епоксидної матриці ефективно використовують для захисту деталей машин і механізмів в багатьох галузях промисловості. Однак експлуатація технологічного обладнання в жорстких умовах, зокрема, робота механізмів під впливом агресивних середовищ, при знакозмінних навантаженнях і високих температурах, потребує підвищення вимог щодо експлуатаційних характеристик епоксидних композитних матеріалів [1; 2].

Розробка багатошарових покриттів і способів керування їх властивостями є важливим напрямком у розвитку техніки. До недоліків даних покриттів необхідно віднести високу енергоємність, обмежені технологічні можливості при виборі складу і товщини шарів, розшарування покриттів, що викликане внутрішніми напруженнями [3]. На сьогоднішній день ефективне формування композицій на основі реакційноздатних полімерів здійснюють за умов використання зовнішніх фізичних полів. Дана обробка в процесі формування матеріалів та покриттів підвищує механічні характеристики за рахунок регулювання параметрів надмолекулярної структури полімеру і орієнтова-

ного розподілу частинок наповнювача на межі розділу фаз [4; 5].

У даній роботі досліджено вплив ультразвуку і електромагнітного випромінювання на формування структури захисних покриттів з високими фізико-механічними характеристиками на основі епоксидних полімерів.

Як полімерну матрицю вибрано епоксидний олігомер марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), для структурування якого застосовано низькотемпературний твердник поліетиленполіамін (ТУ 6-05-241-202-78). Наповнювачі – порошки цирконію, карбонільного заліза та фторопласту.

Порошок цирконію ПЦрК1 (ТУ 48-4-234-84) має середній розмір частинок 1...2 мкм. Хімічний склад порошку: Si 1,847%, S 5,633%, Fe 0,171%, Zr 91,447%, Hf 0,902%. Цирконій пластичний і легко піддається холодній та гарячій обробці. Твердість за Брінеллем становить 64-67 кгс/мм^2. Цирконій парамагнітний, його питома магнітна сприйнятливість збільшується при нагріванні металу. При температурі 73° С питома магнітна сприйнятливість цирконію становить 1,28° С, а при 327° С – 1,41° С. Цирконій має високу корозійну стійкість відносно атмосферних газів, води та лугів, не реагує з соляною і сірчаною (концентрацією до 50%) кислотами.

Карбонільне залізо марки Р-20 (ГОСТ 13610-79) – дрібнодисперсний порошок чистого заліза (середній діаметр частинок становить 2,5...5,0 мкм), який отримують шляхом термічного розкладання пентакарбонілу заліза з наступним рафінуванням в струмені водню. Має високі фізико-хімічні характеристики – підвищену електропровідність, стійкістю до дії агресивних середовищ, а також характеризується високими показниками пластичності. Містить частинки сферичної форми щільної структури без гострих виступів. Хімічний склад: 0,7...0,9% С, 0,6...0,9% N, 0,8...1,2% O_2, 96,9...97% Fe.

Фторопласт – синтетичний атомовмісний поліолефін. Має низький коефіцієнт тертя та високу хімічну стійкість до дії кислот й лугів, сильних окисників. Практично не поглинає вологи. В роботі застосовано ультрадисперсний фторопласт.

Обробку ультразвуком здійснювали в лабораторній установці в середовищі води за частоти 20 кГц. Підготовлену полімерну композицію у посудині розташовували на відстані 10 мм від джерела ультразвукових хвиль. Обробку в електромагнітному полі здійснювали в середовищі повітря за частоти 50 МГц. Оптимальна тривалість обробки складала 5 хв.

Метод виготовлення даних покриттів полягав згідно технології

(таблиця). Сформовану композицію, яку піддавали впливу фізичних полів, наносили на підготовлену поверхню.

Таблиця

Склад та технологія формування двошарових епоксикомпозитних покриттів

№ досліду	1 шар	Вид обробки	2 шар
1	епоксиполімер	без обробки	епоксикомпозит наповнений порошком фторопласту (10 мас. ч.)
2	епоксиполімер	ультразвукова	
3	епоксиполімер	електромагнітна	
4	епоксикомпозит з цирконієм (2 мас. ч.)	без обробки	
5	епоксикомпозит з цирконієм (2 мас. ч.)	ультразвукова	
6	епоксикомпозит з цирконієм (2 мас. ч.)	електромагнітна	
7	епоксикомпозит з карбонільним залізом (6 мас. ч.)	без обробки	
8	епоксикомпозит з карбонільним залізом (6 мас. ч.)	ультразвукова	
9	епоксикомпозит з карбонільним залізом (6 мас. ч.)	електромагнітна	

Епоксикомпозити структурували протягом 15 хв у печі за температури 40° С. Зовнішній шар формували з використанням порошку ультрадисперсного фторопласту та наносили поверх ґрунтівного шару.

Твердження епоксикомпозитів проведено за наступним режимом: витримка протягом 24 год за температури 18° С; 1 год – 70° С, 1 год – 100° С, 4 год – 130° С.

Експериментально встановлено, що двошарові композитні покриття, за умови проведення додаткової обробки композиції ґрунтівного шару, характеризуються зростанням адгезійної міцності (рис. 1).

В епоксиполімерах, композиції яких не піддавалися обробці, зафіксовано мінімальні значення досліджуваної характеристики (σ_a = 16,9...23,1 МПа). При проведенні додаткової обробки зовнішніми фізичними полями адгезійна міцність зростає у 1,7...3,3 рази, оскільки додаткова обробка сприяє зменшенню в'язкості композиції, що зумовлює підвищення здатності полімеру до змочування субстрату.

В епоксикомпозитах наповнених порошком цирконію з додатковою електромагнітною обробкою композицій отримано максимальне значення адгезійної міцності (σ_a = 56,49 МПа). При електромагнітній обробці композицій з порошком карбонільного заліза отримано також високе значення адгезійної міцності (σ_a = 53,8 МПа). Обробка композицій ультразвуком (σ_a = 41,3 МПа – епоксикомпозити з вмістом порошку цирконію, σ_a = 45,7 МПа – епоксикомпозити з вмістом порошку карбонільного заліза) призводить до незначного зниження на 15-26% досліджуваної характеристики порівняно з обробкою в електромагнітному полі. Для епоксиполімерів максимальна адгезійна міцність зафіксована при обробці ультразвуком (σ_a = 43,6 МПа), а електромагнітна обробка знижує дану характеристику на 7%. Додаткова обробка композицій зовнішніми фізичними полями сприяє інтенсивному суміщенню компонентів, рівномірному розподілу наповнювача в об'ємі полімеру, покращенню ступеня зшивання епоксикомпозитних покриттів.

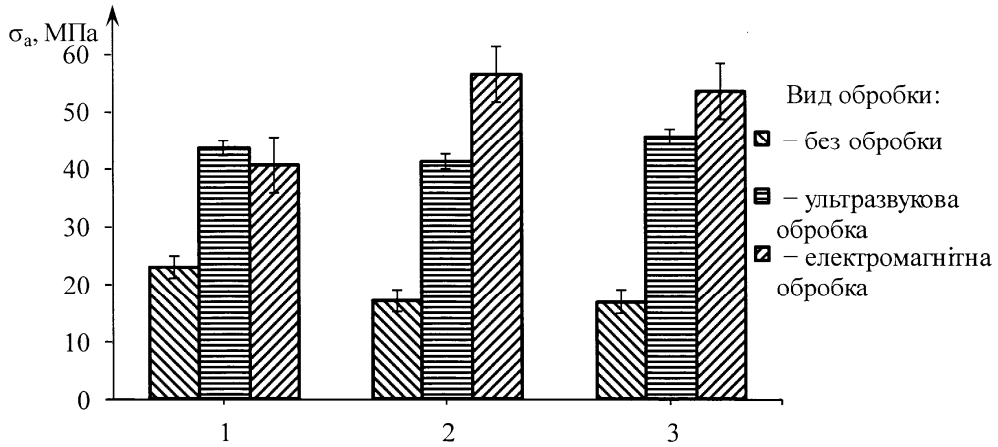

Рис. 1. Залежність адгезійної міцності двошарових композитних покриттів при використанні в якості ґрунтівного шару: 1 – епоксиполімеру; 2 – епоксикомпозиту з порошком цирконію; 3 – епоксикомпозиту з карбонільним залізом

Внаслідок впливу зовнішнього електромагнітного поля пара- та

феромагнітні наповнювачі взаємодіють з магнітним моментом дипольних молекул епоксиполімеру, що призводить до покращення рухливості частинок в об'ємі епоксикомпозитної системи.

Ультразвуковий вплив підвищує фізико-механічні характеристики епоксикомпозитів за рахунок формування щільної просторової сітки та інтенсивного перебігу релаксаційних процесів під час обробки.

Аналіз поверхні клейового шва (рис. 2) показав, що для двошарового композитного покриття, в якому перший шар – епоксиполімер (рис. 2, а), властивий адгезійний характер руйнування, що пов'язано з низькою адгезійною здатністю полімеру.

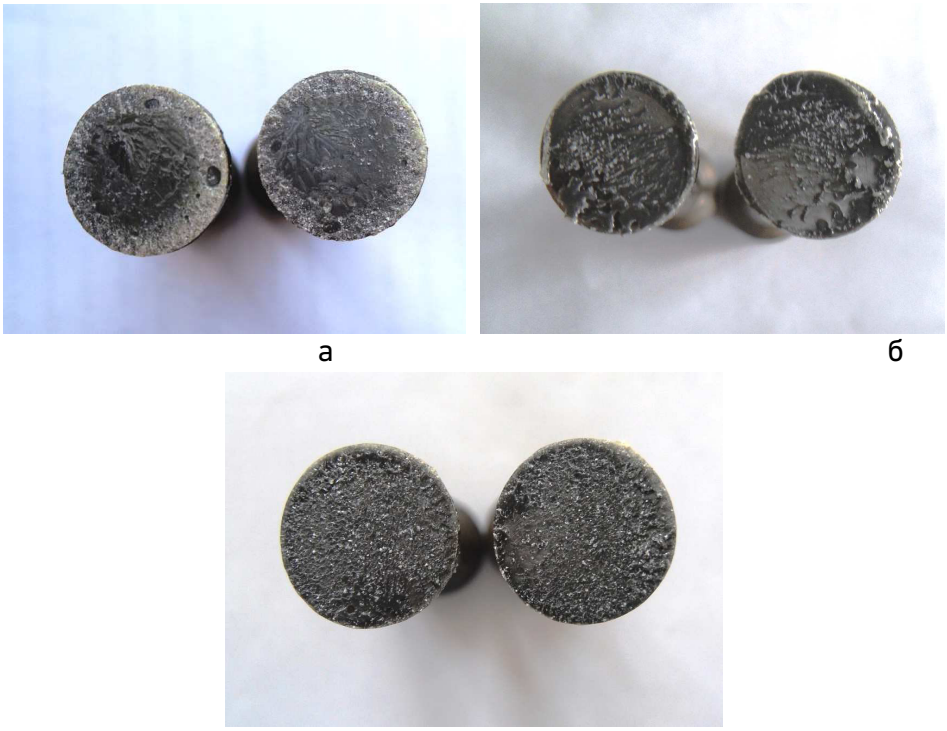

Рис. 2. Загальний вигляд поверхні клейового шва двошарових композитних покриттів оброблених ультразвуком після досліджень на адгезійну міцність при використанні в якості ґрунтівного шару: а – епоксиполімеру; б – епоксикомпозиту з порошком цирконію; в – епоксикомпозиту з карбонільним залізом

При введенні до складу епоксидної матриці карбонільного заліза спостерігається когезійний характер руйнування клейового шва (рис. 2, в), що пов'язано з підвищенням адгезійної міцності епоксиполімеру.

Максимальне значення (рис. 3) ударної міцності (А = 15,89 Дж) отримано при введенні до складу адгезійного шару покриття порошку цирконію, композицію якого оброблено електромагнітним полем. Відсутність обробки призводить до зниження ударної міцності на 53% через формування системи з підвищеним напруженим станом.

Найвищі значення ударної міцності зафіксовано в двошарових покриттях, в яких першим шаром є епоксиполімер, а другий шар являє собою епоксикомпозит з вмістом порошку карбонільного заліза після обробки композиції ультразвуком. В епоксикомпозитах без обробки спостерігається зниження даної характеристики на 58%.

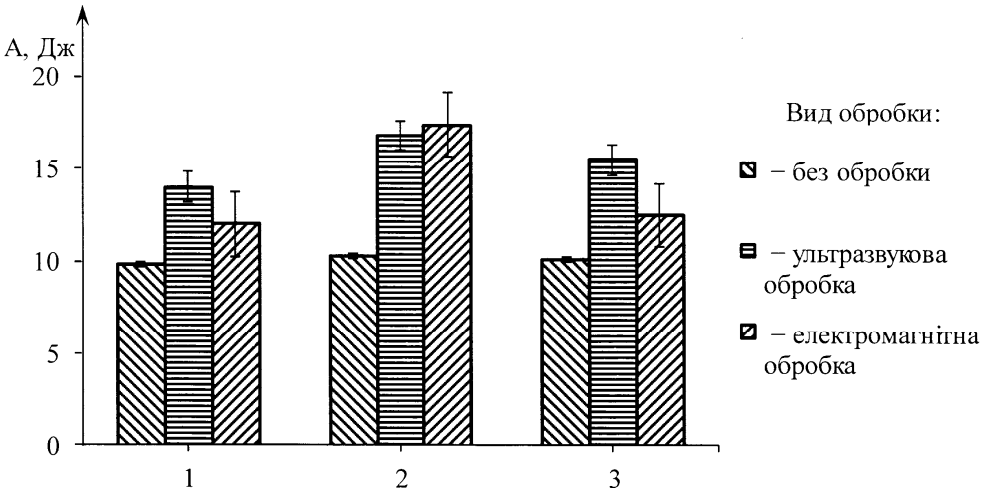

Рис. 3. Залежність ударної міцності двошарових композитних покриттів при використанні в якості ґрунтівного шару: 1 – епоксиполімеру; 2 – епоксикомпозиту з порошком цирконію; 3 – епоксикомпозиту з карбонільним залізом

Високі значення ударної міцності епоксикомпозитних покриттів з додатковою ультразвуковою обробкою підтверджено аналізом поверхні двошарових покриттів після досліджень на ударну міцність. Застосування в якості ґрунтівного шару епоксиполімерів призводить до катастрофічного руйнування покриття, що супроводжується викришуванням великих ділянок (рис. 4, а), а зона руйнування покриття значно зростає, що пояснюється підвищенням залишкових напружень. Висока ударна міцність двошарових епоксикомпозитних покриттів з вмістом порошку цирконію та карбонільного заліза підтверджується наявністю зони пластичної деформації без видимих областей відшарувань (рис. 4, б, в).

Експериментальні дослідження підтверджують перспективність використання додаткової обробки фізичними полями для формуван-

ня двошарових композитних покриттів з високими фізико-механічними характеристиками. Дане покращення можливе за рахунок інтенсифікації процесів структуроутворення та появи додаткових активних центрів на поверхні частинок, що сприяє збільшенню кількості хімічних зв'язків між макромолекулами епоксидної смоли та поверхнею наповнювача, в результаті чого забезпечується висока адгезійна міцність між компонентами епоксикомпозитного матеріалу. Вплив фізичних полів також сприяє підвищенню молекулярної рухливості в проміжних граничних шарах, що зумовлює збільшення ступеня структурування епоксикомпозитів.

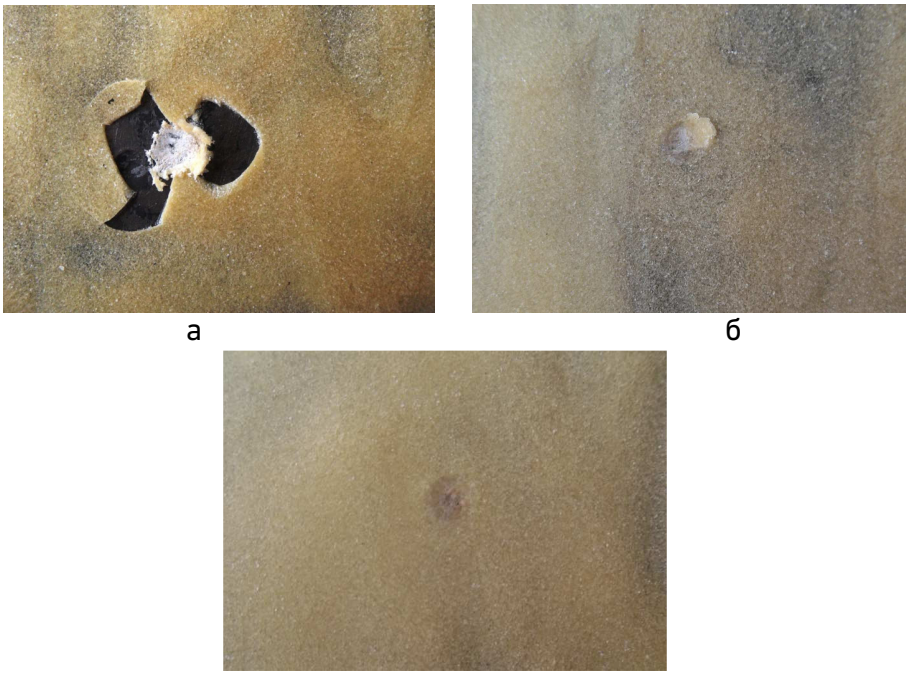

Рис. 4. Загальний вигляд поверхні двошарових покриттів оброблених ультразвуком після досліджень на ударну міцність при використанні в якості ґрунтівного шару: а – епоксиполімеру; б – епоксикомпозиту з порошком цирконію; в – епоксикомпозиту з карбонільним залізом

Розроблений спосіб формування ґрунтівного адгезійного шару дозволить отримувати високоякісні двошарові захисні епоксикомпозитні покриття з високою щільністю і підвищеною адгезійної міцністю між шарами та субстратом. Розроблені двошарові епоксикомпозитні покриття наповнені порошком цирконію та з обробкою композиції в електромагнітному полі, характеризуються високими значеннями фізико-механічних характеристик (σ_a = 56,5 МПа, А = 17,4 Дж).

Дані покриття можуть бути використані в якості корозійностійких покриттів для захисту деталей автомобільної та приладобудівної галузі, а також конструкцій нафтогазового комплексу, що працюють в умовах нерівномірного розподілу температур, напружень, деформацій та інших впливів.

1. Гранулированные борсодержащие железные материалы для износостойких композиционных покрытий / Спиридонова И. М., Суховая Е. В., Безрукавая О. Г., Ващенко А. П. // Техника машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 75–78. **2.** Спиридонова И. М. Износостойкие композиционные материалы для ремонта и восстановления деталей металлургического оборудования / Спиридонова И. М., Суховая Е. В., Ващенко А. П. // Сварщик. – 2005. – № 6. – С. 26–30. **3.** Кербер М. Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии: учебное пособие / М. Л. Кербер. – СПб. : Профессия, 2008. – 560 с. **4.** Андреева А. В. Основы физикохимии и технологии композитов: Учеб. пособие для вузов / А. В. Андреева. – М. : ИПРЖР, 2001. – 192 с. **5.** Кальба Є. Вплив ультразвукового і високочастотного електромагнітного полів та режиму формування на електропровідність полімеркомпозиційних покриттів / Є. Кальба, Р. Гарматюк // Вісник ТДТУ. – 2009. – Том 14. – № 3. – С. 43–47. –(механіка та матеріалознавство).

Рецензент: д.т.н., професор Савчук П. П. (ЛНТУ)

Malets V. M., Post-graduate Student, Kashytskyi V. P., Candidate of Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University, Lutsk)

FORMATION OF DOUBLE-LAYER EPOXY COMPOSITE COATINGS UNDER THE INFLUENCE OF PHYSICAL FIELDS

The paper presents research of the properties of epoxy composite coating filled by fine powder. Structuring features of the epoxy composite adhesive layer after preliminary ultrasound treatment or exposure composition in the electromagnetic field are established. Optimum mode of formation of epoxy composites determined by results of adhesion and impact strength. Positive effects of ultrasound and electromagnetic treatment for forming composite epoxy coating, which leads to the intensification of the structuring of the system and improve the physical and mechanical characteristics are established.
Keywords: **epoxy composite material, fine powder, electromagnetic radiation, ultrasound, adhesive strength.**

Малец В. М., аспирант, Кашицкий В. П., к.т.н., доцент (Луцкий национальный технический университет)

ФОРМИРОВАНИЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ЭПОКСИКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

В работе исследованы свойства разнофункциональных слоев эпоксидных композитных покрытий наполненных высокодисперсными порошками металлов. Установлены особенности структурирования эпоксидного композитного адгезионного слоя после предварительной обработки композиции ультразвуком или выдержки в электромагнитном поле. Оптимальный режим формирования разработанных эпоксидных композитов определен по результатам исследований адгезионной и ударной прочности. Установлено положительное влияние ультразвуковой и электромагнитной обработки на формирование эпоксидных композитных покрытий, которое приводит к интенсификации процессов структурирования системы и повышения физико-механических характеристик.
***Ключевые слова*: эпоксидный композитный материал, высокодисперсный порошок, электромагнитное излучение, ультразвук, адгезионная прочность.**