

В. М. Малець, аспірант; І. В. Боярська, асистент; В. П. Кашицький, канд. техн. наук, доцент  
(Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна)

## Вплив зовнішніх фізичних полів на структурування епоксикомпозитів наповнених високодисперсним порошком заліза

Досліджено властивості різнофункціональних епоксикомпозитних матеріалів наповнених високодисперсним порошком заліза. Оптимальний режим формування розроблених композитів наповнених високодисперсними частинками заліза визначено за результатами досліджень твердості та вмісту гель-фракції. Встановлено позитивний вплив ультразвукової та електромагнітної обробки епоксидних композицій, що містять у складі твердник, під впливом якої відбувається інтенсифікація процесів структурування системи та підвищення фізико-механічних характеристик.

**Ключові слова:** епоксикомпозитний матеріал, високодисперсний порошок, електромагнітне випромінювання, адгезив.

Исследованы свойства разнофункциональных эпоксикомпозитных материалов наполненных высокодисперсным порошком железа. Оптимальный режим формирования разработанных композитов наполненных высокодисперсными частицами железа определен по результатам исследований твердости и содержания гель-фракции. Установлено положительное влияние ультразвуковой и электромагнитной обработки эпоксидных композиций, содержащих в составе отвердитель, под влиянием которой происходит интенсификация процессов структурирования системы и повышения физико-механических характеристик.

**Ключевые слова:** эпоксикомпозитный материал, высокодисперсный порошок, электромагнитное излучение, адгезив.

The properties of multifunctional epoxy composite materials filled with fine iron powder are investigated. The optimal conditions of formation of composites filled with superfine iron particles are determined by the results of research of hardness and the content of gel fraction. The influence positive ultrasonic and electromagnetic treatment of epoxy compositions containing a part of the curing agent is established. Processes of treatment contribute to the intensification of the system structuring and improve the physical and mechanical characteristics.

**Keywords:** epoxy composite material, finepowders, electromagnetic field, adhesive.

### Вступ та постановка мети дослідження

Епоксикомпозитні матеріали широко використовуються для виготовлення покриттів загальнотехнічного призначення [1, 2]. Ці матеріали повинні мати підвищені фізико-механічні характеристики, що дає змогу використовувати їх під час статичних і динамічних навантажень. Традиційним технологічним способом покращення властивостей епоксикомпозитів є структурна модифікація шляхом введення дисперсних наповнювачів.

Високодисперсні порошки металів або сполук використовують як наповнювач для отримання композитних покриттів [3] через малі розміри, хімічну і дифузійну активність та високі температури плавлення частинок.

Основним недоліком цих покриттів є формування в них неоднорідної структури внаслідок адсорбційної взаємодії полімерної матриці з наповнювачем та поверхнею металевої основи. Різ-

швидкість фізико-хімічних процесів під час формування матеріалів на полімерній основі супроводжується виникненням залишкових напружень, які у більшості випадків впливають на адгезійну та когезійну міцність системи. Одним зі способів підвищення експлуатаційних характеристик епоксикомпозитів наповнених високодисперсними порошками є регулювання процесів структуроутворення шляхом зовнішнього впливу енергетичних полів.

Керування процесом структуроутворення у зонах міжфазної взаємодії під час формування покриттів дозволить значно підвищити основні механічні та експлуатаційні характеристики. Фізико-хімічні процеси (хімічна взаємодія контактуючих тіл, адсорбція молекул і груп молекула на межі розподілу фаз, дифузія компонентів одного з контактуючих тіл в об'єм іншого), що відбуваються під час взаємодії адгезиву з субстратом ініціюються під впливом зовнішнього поля. Тому, в дано-

му плані перспективною є обробка композицій на стадії формування фізичними полями для забезпечення максимальної фізичної та хімічної взаємодії між компонентами [4, 5].

Метою роботи є підвищення основних механічних й експлуатаційних характеристик епоксикомпозитів наповнених високодисперсним порошком заліза на основі забезпечення максимальної фізичної та хімічної взаємодії між компонентами шляхом додаткової ультразвукової та електромагнітної обробки композицій на стадії формування.

В якості об'єкта дослідження обрано полімеркомпозитний матеріал на основі епоксидної смоли марки ЕД-20 (ГОСТ 10587), що являє собою рідкий реакційноздатний олігомерний продукт на основі дигліциділового ефіру дифенілолпропану. Епоксидні полімери характеризуються високою адгезією до металу, скла, кераміки, стійкістю в агресивних середовищах, високою твердістю та еластичністю. Для полімеризації

епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін – ПЕПА (ТУ 6–05–241–202–78), який має високу швидкість взаємодії первинних і вторинних аміногруп з епоксидними групами при кімнатній температурі.

В якості наповнювача використано високодисперсний порошок заліза марки Р-20, що має у своєму складі не менше 97 % основної речовини – заліза. Вміст домішок вуглецю становить до 1,2 % мас., азоту – до 0,9 % мас. і кисню – до 0,7 % мас., які знаходяться у вигляді карбідів, нітридів та оксидів. Вискодисперсний порошок заліза виготовляється шляхом термічного розкладання пентакарбоніта заліза, що призводить до утворення складної шаруватої структури сферичних частинок карбонільного заліза, яке характеризується специфічними електромагнітними властивостями.

### Методика дослідження

Формування матеріалу полягало в отриманні однорідної композиції, до складу якої входили необхідні компоненти. Композицію формували двома способами: I – до епоксидної смоли вводили твердник ПЕПА (12 мас. ч. на 100 мас. ч. ЕД-20) та порошок заліза (10 мас. ч.) з механічним вимішуванням складових на кожному етапі та піддавали впливу ультразвукового або електромагнітного випромінювання; II – до епоксидної смоли вводили наповнювач (10 мас. ч.), здійснювали механічне вимішування компонентів та піддавали впливу ультразвукового або електромагнітного випромінювання. Після обробки вводили твердник ПЕПА (12 мас. ч.). Визначення оптимального способу формування епоксикомпозитів здійснено за результатами досліджень фізико-механічних характеристик.

Обробку ультразвуком здійснювали в лабораторній ультразвуковій установці в середовищі води при частоті 20 кГц. Підготовлену полімерну композицію у посудині розташовували на відстані 10 мм від джерела ультразвукових хвиль. Оптимальна тривалість обробки складала 5 хв.

Для вивчення впливу електромагнітного поля використовували лабораторний електромагнітний змішувач. Обробку здійснювали в повітряному середовищі при частоті 50 МГц. Підготовлену композицію розташовували над джерелом електромагнітних хвиль. Тверднення матеріалу проведено за наступним

режимом: витримка протягом 24 год за температури 18 °С; 1 год з витримкою за температури 70 °С, 1 год – за температури 100 °С, 4 год – за температури 130 °С.

Для визначення оптимального режиму формування епоксикомпозитів наповнених високодисперсними частинками заліза вибрано методики досліджень твердості матеріалу (ГОСТ 1786) та вмісту гель-фракції [6]. Дослідження твердості проведено на зразках у формі бруска з рівною поверхнею основи товщиною не менше 5 мм і шириною не менше 15 мм. Вміст гель-фракції визначали за зміною маси зразків у формі пластинок розміром 40x70 мм товщиною до 0,5 мм, екстракцію яких проведено в толуолі протягом 8 год з наступним сушінням за температури 393 К до постійної маси.

### Результати дослідження

В епоксиполімерах без попередньої обробки зафіксовано мінімальні значення твердості (рис. 1) порівняно з епоксиполімерами, композиції яких піддавали обробці у фізичних полях, що пов'язано з утворенням додаткових фізико-механічних зв'язків. Значне підвищення на 90 % твердості епоксиполімерів відбувається у випадку попередньої обробки композиції з твердником ультразвуком та в 1,5 рази у випадку впливу електромагнітного випромінювання. Позитивний вплив ультразвуку полягає у зменшенні кількості бульбашок повітря та перемішуванні компонентів системи, в результаті чого підвищується однорідність, а також починають інтенсифікуватись процеси структуривання. Вплив електромагнітної обробки полягає у механічному перемішуванні компонентів за рахунок переорієнтації сегментів макромолекул під дією електромагнітного

поля, що забезпечує наближення кінцевих груп макромолекул без інтенсифікації процесів структуривання, оскільки в'язкість композиції зменшується. Відповідно забезпечується висока однорідність системи з низькими залишковими напруженнями.

Введення твердника після обробки у фізичному полі призводить до незначного підвищення величини твердості, що вказує на однотипність процесів структуривання епоксиполімерних систем незалежно від характеру зовнішнього впливу.

Низькі значення твердості мають епоксикомпозити, композиції яких не піддавали впливу фізичних полів, через наявність агломератів частинок, що сформувалися за рахунок значної питомої енергії наповнювача. Підвищення даної характеристики на 22 % (НВ = 490,2 МПа) зафіксовано для композитів порівняно з ненаповненою системою у випадку введення твердника до обробки ультразвуком. Дане підвищення твердості обумовлено наявністю в системі твердої фази у вигляді частинок порошку заліза.

Твердість епоксикомпозитів структурованих під впливом електромагнітного випромінювання з введенням твердника до обробки знижується на 21 % порівняно з ненаповненою системою, що пов'язано з інтенсифікацією процесів структуривання епоксиполімерної матриці в перехідних зонах на межі контакту з поверхнею наповнювача, що супроводжується локалізацією залишкових напружень в даних зонах.

Введення твердника після ультразвукової обробки до складу композиції наповнених порошком заліза призводить до зменшення досліджуваної характеристики у 2,2 рази, порівняно з композита-

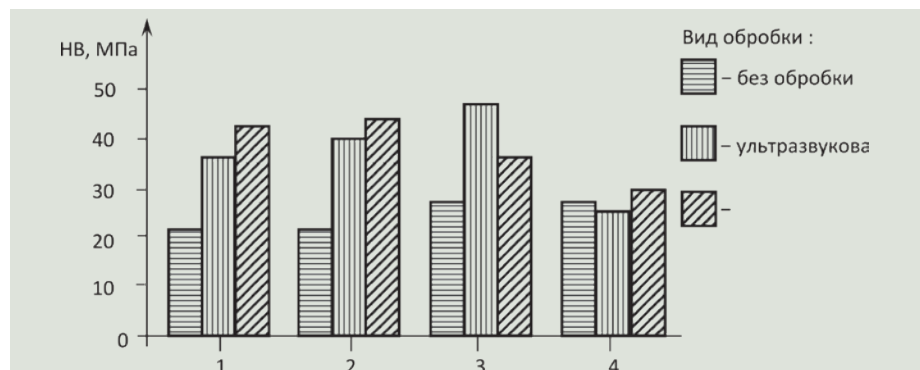
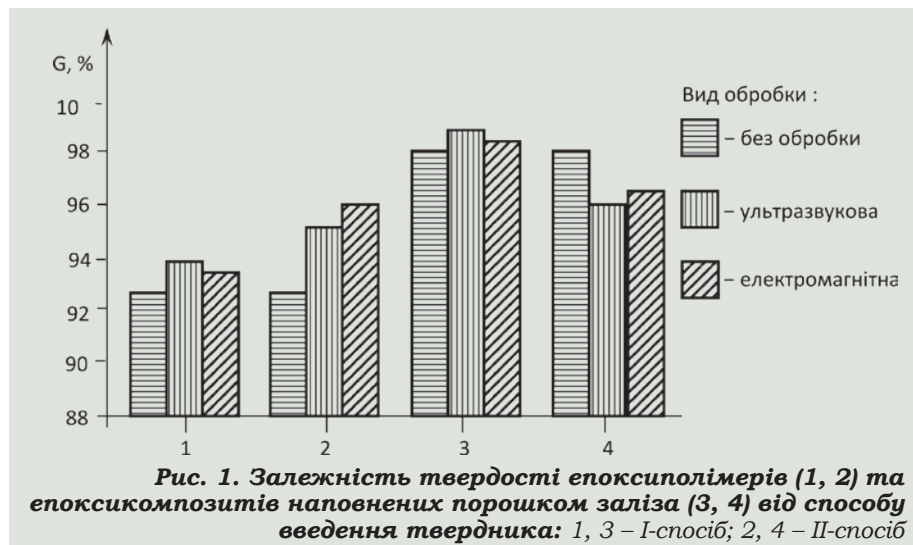


Рис. 1. Залежність твердості епоксиполімерів (1, 2) та епоксикомпозитів наповнених порошком заліза (3, 4) від способу введення твердника: 1, 3 – I-спосіб; 2, 4 – II-спосіб

ми, обробка яких на стадії формування проводилась за наявності в системі твердника, що пов'язано із неможливістю забезпечення високої однорідності розподілу хімічних зв'язків в системі у випадку застосування наступного механічного вимішування, яке нівелює позитивний вплив попередньої обробки у фізичному полі. Аналогічні результати отримано для епоксикомпозитів, композиції яких оброблені електромагнітним випромінюванням з наступним введенням твердника після обробки, що вказує на домінуючий вплив зовнішніх полів на формування епоксикомпозитів на завершальній стадії. При цьому значення твердості є вищими порівняно з обробкою ультразвуком, що очевидно пов'язано з локальним розподілом феромагнітного наповнювача та зниженням в'язкості системи, в якій починають поступово формуватися первинні зв'язки під час введення твердника.

Дослідження вмісту гель-фракції в епоксиолімерних та епоксикомпозитних системах підтвердили підвищення ступеня структуривання (рис. 2), що зумовлене проведенням попередньої обробки композицій у фізичних полях. Найнижчий вміст гель-фракції ( $G = 92,8\%$ ) зафіксовано для епоксиолімерів, композиції яких не піддавались обробці. Це вказує на те, що низькі значення твердості даних епоксиолімерів спричинені не лише наявністю включень бульбашок повітря, а також низьким рівнем структуривання. Проведення попередньої обробки композицій, що містять твердник, дозволяє отримати матеріал з нижчим вмістом гель-фракції порівняно з епоксиолімерами, композиції яких не містять твердника. Очевидно, що фізичні поля спричиняють інтенсивне структурирування, яке блокує повітряні включення, відповідно під час екстрагування розчинник потрапляє у пори, що сприяє легкому видаленню неструктурованої фракції. Вплив фізичних полів полягає у збільшенні кількості фізико-хімічних зв'язків за рахунок наближення кінцевих груп макромолекул епоксидної складової та твердника.

Введення до складу епоксиолімерної основи високодисперсного порошку заліза призводить до зростання вмісту гель-фракції на 7%. Це свідчить про зростання ступеня структуривання епоксиолімерної матриці у зовнішніх поверхневих шарах на-



вколо наповнювача, що підвищує експлуатаційні характеристики даних епоксикомпозитних систем.

Експериментально встановлено, що найвищий вміст гель-фракції ( $G = 99,2\%$ ) характерний для епоксикомпозитів наповнених порошком заліза при введенні твердника до ультразвукової обробки знижується на 3% при введенні твердника після даної обробки ( $G = 96,2\%$ ). Ультразвукова обробка ініціює утворення хімічних зв'язків та інтенсифікує процеси структуривання, тому в результаті отримуємо вищі значення вмісту гель-фракції порівняно з епоксикомпозитами, до складу композицій яких твердник вводили після обробки.

#### Висновок

За результатами досліджень встановлено, що:

1) спосіб введення твердника до обробки є більш оптимальним для розроблених матеріалів, оскільки в цьому формуванні спостерігається підвищення механічних характеристик епоксикомпозитів наповнених порошком заліза;

2) під час застосування I-способу спостерігається підвищена рухливість сегментів макромолекул при високому ступені структурованості системи, і, як наслідок, підвищення фізико-механічних характеристик матеріалу.

Таким чином, підтверджено ефективність обробки зовнішніми фізичними полями, які інтенсифікують процес структуривання та підвищують фізико-механічні властивості епоксикомпозитів наповнених високодисперсними частинками. Високі фізико-механічні характеристики отримано під час

формування епоксидних композицій з додатковою обробкою ультразвуком при введенні ПЕПА 12 мас. ч. до обробки (режим I), оскільки він забезпечує максимально повне структуривання ( $G = 99,2\%$ ) та високу твердість ( $HV = 490,2\text{ МПа}$ ) матеріалу. Цей режим формування доцільно застосовувати під час отримання композитних матеріалів та захисних покриттів в машинобудівній галузі.

#### Список літератури:

1. Спиридонова И. М. 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. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы / Ю. А. Михайлин. – М.: Профессия, 2006. – 152 с.
4. Санжаровский А. Т. Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий / А. Т. Санжаровский. – М.: Химия, 1978. – 184 с.
5. Букетов А. В. Закономерности влияния обробки энергетичними полями зв'язуючого і наповнювачів на властивості епоксикомпозитних матеріалів для захисних покриттів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / А. В. Букетов. – Тернопіль: ТДТУ, 2007. – 337 с.
6. Карякина М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М. И. Карякина. – М.: Химия, 1988. – 272 с.