

## ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ З ЧАСТКАМИ ФЕРО- І ПАРАМАГНІТНОЇ ПРИРОДИ

*Скирденко В.О.*

*Херсонська державна морська академія,*

*Мініцький А.В.*

*Національний технічний університет України «КПІ»*

*У роботі проведені дослідження магнітної проникності епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошками з пара- та феромагнітними властивостями. Визначено величину магнітної проникності епоксикомпозитних матеріалів, наповнених феромагнітними порошками, залізним суриком та сталлю 45. Встановлено, що максимальна величина магнітної проникності для композитів із залізним суриком при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,75$ . За такої ж напруженості поля магнітна проникність оброблених високочастотним імпульсним магнітним полем зразків підвищується несуттєво і становить  $\mu = 2,80$ . Це можна пояснити тим, що попередня магнітна обробка незначно змінює величину магнітного моменту часток даного наповнювача. Доведено, що максимальна величина магнітної проникності для КМ із частками Сталь 45 при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,30$ . Магнітна обробка даних часток забезпечує отримання зразків, магнітна проникність яких становить  $\mu = 2,80$ . Аналіз результатів дослідження магнітної проникності КМ, наповнених вугільним шлаком, колоїдною сіркою та карбідною шихтою дозволяє стверджувати, що використані наповнювачі відносяться до парамагнетиків. Магнітна обробка композицій з такими частками не призводить до суттєвого поліпшення властивостей епоксидних КМ.*

*Ключові слова:* епоксидний композит, феромагнітні наповнювачі, магнітна проникність.

**Постановка проблеми.** Важливим елементом конструювання нових епоксикомпозитних матеріалів є вибір наповнювачів, які б прогнозовано забезпечували необхідні як фізико-механічні, так і електротехнічні характеристики. У більшості випадків це стосується можливості створення захисних покриттів або ж конструкцій деталей машин, які б забезпечили підвищення експлуатаційних характеристик устаткування в цілому. Важливим у цьому напрямку є використання магнітної обробки як наповнювачів, так і епоксидних композицій до введення твердника, що передбачає застосування феромагнітних часток при формуванні захисних покриттів. Оптимізація часу обробки феромагнітних наповнювачів та композицій високочастотним імпульсним магнітним полем доводить, що в результаті поліпшується не лише адгезійна міцність, але й когезійні властивості матеріалів. У зв'язку з цим, важливим і актуальним є проведення дослідження з метою визначення впливу магнітних характеристик (зокрема, магнітної сприйнятності) дисперсних часток на властивості епоксидних композитних матеріалів (КМ).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Стосовно магнітної проникності існуючі в природі речовини умовно можна поділити на три групи: діа-, пара- і феромагнетики, а фізичні принципи існування матеріалів з різними магнітними властивостями ґрунтуються, насамперед, у магнетизмі їх складових – атомів і молекул. При накладанні зовнішнього магнітного поля відбувається впорядкування напрямків векторів магнітних моментів атомів і молекул речовини [1].

Аналіз літературних публікацій стосовно визначення магнітної проникності матеріалів показує, що результати щодо дослідження магнітної проникності епоксикомпозитів з феромагнітними частками висвітлені недостатньо. Переважно у наукових періодичних виданнях наведено результати дослідження магнітної проникності вакууму в присутності електромагнітного поля [2] та визначення магнітної проникності феромагнетиків при силовому впливі імпульсних магнітних полів [3].

**Мета роботи** – дослідити зміну магнітної проникності епоксикомпозитів з частками феро- і парамагнітної природи залежно від напруженості зовнішнього магнітного поля.

**Матеріали та методика дослідження.** Як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Зшивали КМ, вводючи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як наповнювачі використовували дрібнодисперсні (10...20 мкм) порошки: колоїдна сірка (КС) (ГОСТ 127.5-93), залізний сурик (ЗС) (складається із суміші мікроелементів і оксиду заліза ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (ГОСТ 8135-74) та карбідна шихта (КБШ). Карбідна шихта є побічним продуктом при виробництві ацетилену. Її переробка не є складною і зводиться до зневоднення матеріалу та перемелювання для отримання однорідної суміші. Експериментально встановлено, що КБШ містить солі кальцію – 58 % та інші солі – 42 %. Окрім того, у ній виявлено важкі метали наступного складу, мг/кг: цинк – 7,0; мідь – 3,8; кадмій – 1,0; свинець – 11,6; нікель – 11,6 та хром – 3,8.

Додатково використовували дисперсні (63...80 мкм) порошки, такі як: Сталь 45 (ГОСТ 1050-88), пермалой 45Н (ГОСТ 10994-74) та вугільний шлак (ВШ), що є продуктом згорання кам'яного вугілля з подрібненням його механічним способом.

Епоксидні композити формували за наступною технологією: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20 і наповнювача та подальше введення його в епоксидний зв'язувач; гідродинамічне суміщення олігомеру ЕД-20 і дисперсних часток; введення твердника ПЕПА і перемішування композиції впродовж часу  $\tau = 300 \pm 10$  с.

Для дослідження магнітних характеристик КМ використовували зразки кільцевої форми, які виготовляли методом лиття з розмірами: зовнішній діаметр –  $d_3 = 35$  мм, внутрішній діаметр –  $d_6 = 25$  мм, висота  $h = 10$  мм. Для заливання зразків попередньо виготовляли гіпсові форми у вигляді циліндрів з діаметром  $d = 50$  мм і висотою  $h = 20$  мм, які після затвердження розточували на токарному верстаті з метою виготовлення кільцевого глухого отвору під розміри кільцевого зразка. Форму гіпсової конструкції та отриманого після заливки кільцевого зразка КМ для подальшого проведення досліджень його магнітних властивостей показано на рис. 1. Після заливання композицій заповнені форми піддавали термічній обробці за експериментально встановленим режимом: витримання зразків впродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год при температурі  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 0,05$  К/с до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання КМ впродовж часу  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  год, повільне охолодження до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі при температурі  $T = 293 \pm 2$  К. Надалі отримані зразки шліфували до необхідних розмірів.



Рис. 1 – Гіпсова форма та отриманий після заливки кільцевий зразок

Магнітні властивості КМ визначали на вимірювальній інформаційній системі В5045, що призначена для визначення статичних магнітних характеристик (основної кривої

намагнічування, початкової магнітної проникності, максимальної магнітної проникності, залишкової індукції, коефіцієнта прямокутності петлі гистерезису, коерцитивної сили за індукцією) магніто-м'яких матеріалів з коерцитивною силою до 800 А/м. Дослідження проводили при комутаційному режимі намагнічування на зразках кільцевої форми, відповідно до вимог ДСТУ 8.377-80. Блок-схему установки наведено на рис. 2.

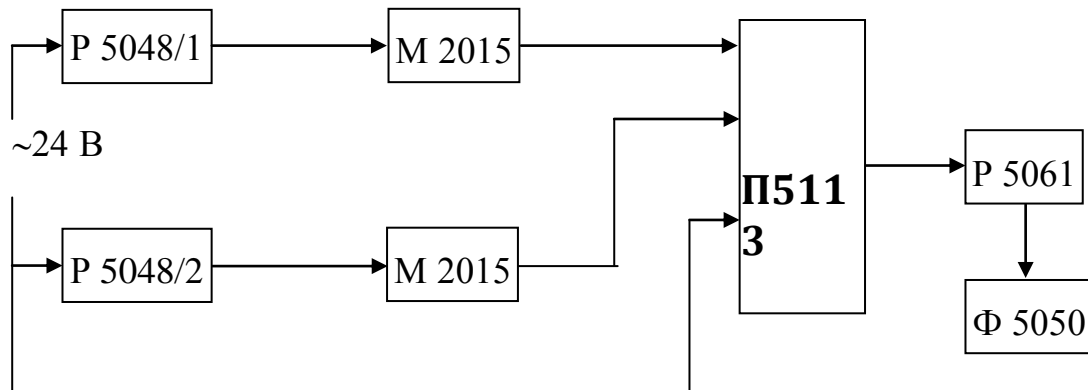


Рис. 2 – Блок-схема установки вимірювальної інформаційної системи В5045

На блок-схемі символами Р 5048/1 і Р 5048/2 позначено регулюючі пристрої, призначені для регулювання струму в ланцюзі у діапазоні від 1 мА до 15 А. Зазначимо, що у вигляді регулюючих пристроїв вибрано чотири реостати. Відповідно, символами М 2015 позначено амперметр, а символами П5113 – пристрій для випробування кільцевих зразків. Блок моделювання позначений як Р 5061. Він призначений для забезпечення безпосереднього вимірювання магнітної індукції, а за показами цифрового мікrobeберметра Ф 5050 здійснювали моделювання вимірювальної обмотки за сумарною площею вимірювальних витків.

Межа допустимої похибки ( $\Delta$ ) вимірювання магнітної індукції без обліку похибки первинного вимірювального перетворювача не перевищувала значень, розрахованих за формулою:

$$\Delta = \pm (0,01\Phi_x + \Phi_k),$$

де  $\Phi_x$  – покази мікrobeберметра, Тл;  $\Phi_k$  – кінцеве значення границі вимірювання мікrobeберметра, Тл.

Для одержання у зразку необхідної напруженості магнітного поля в намагнічуючому ланцюзі встановлювали струм, значення якого розраховували за формулою:

$$I = \frac{H \cdot W_{\text{нама}}}{\pi \cdot d_{\text{ср}}} 10^2,$$

де  $I$  – струм в намагнічуючому ланцюзі, А;  $H$  – напруженість магнітного поля А/м;  $W_{\text{нама}}$  – кількість витків в намагнічуючому ланцюзі;  $d_{\text{ср}}$  – середній діаметр зразка, мм.

Магнітну індукцію визначали шляхом вимірювання вольт-секундної площі імпульсу напруги, що наводиться у вимірювальній обмотці при зміні напрямку намагнічуючого струму. Значення магнітної проникності  $\mu$  визначали за формулою:

$$\mu = \frac{B}{H},$$

де  $B$  – магнітна індукція, Тл;  $H$  – напруженість магнітного поля, А/м.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Магнітна індукція  $B$ , що характеризує внутрішнє магнітне поле в матеріалі, пов'язана з напруженістю поля  $H$  співвідношенням:

$$B = \mu_0 \mu H,$$

де  $H$  – відносна магнітна проникність середовища.

У свою чергу:

$$B_0 = \mu_0 H, \text{ тоді } B = \mu B_0.$$

Звідси стає зрозумілим фізичний зміст величини  $\mu$ : відносна магнітна проникність середовища показує, у скільки разів змінюється індукція магнітного поля, якщо простір, у якому воно існує, заповнити певним магнетиком. Залежно від значення магнітної проникності  $\mu$ , матеріали поділяють на три групи: діа-, пара- і ферромагнетики. Для діамagnetиків магнітна проникність  $\mu < 1$ , для парамагнетиків –  $\mu > 1$ , для ферромагнетиків  $\mu \gg 1$ . У випадку діа- і парамагнетиків магнітна проникність несуттєво відрізняється від одиниці [1, 4].

Як було наведено вище, фізичні принципи існування матеріалів з різними магнітними властивостями ґрунтуються насамперед у магнетизмі їх складових – атомів і молекул. У атомах і молекулах будь-якої речовини існують колові струми, зумовлені рухом електронів по орбітах навколо ядер. Таким чином виникають орбітальні струми. Кожному такому орбітальному струму відповідає певний магнітний момент – орбітальний магнітний момент, який визначається добутком сили колового струму на площу, яку він охоплює. Вектор орбітального магнітного моменту напрямлений уздовж осі колового струму (збігається з напрямом індукції магнітного поля в центрі колового струму). До того ж для електронів характерний власний, або спіновий, магнітний момент. Власний магнітний момент мають ядра атомів. Геометрична сума орбітальних та спінових магнітних моментів електронів і власного магнітного моменту ядра утворює магнітний момент  $P_m$  атома (молекули) речовини. При накладанні зовнішнього магнітного поля відбувається впорядкування напрямів векторів магнітних моментів атомів і молекул магнетика, внаслідок чого макроскопічний об'єм  $V$  магнетика набуває певного сумарного магнітного моменту – речовина намагнічується.

Для характеристики намагнічування речовин введено фізичну величину, яку називають інтенсивністю намагнічування. Вектором інтенсивності намагнічування  $I$  називають границю відношення магнітного моменту будь-якого об'єму речовин до цього об'єму [1]:

$$\bar{I} = \lim_{V \rightarrow 0} \left( \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \bar{P}_{mi} \right),$$

де  $n$  – кількість часток, що містяться в об'ємі  $V$  речовини;  $P_{mi}$  – магнітний момент окремої частки (атома або молекули).

Експериментально встановлено, що інтенсивність намагнічування пропорційна напруженості зовнішнього магнітного поля, тобто:

$$I = \chi H.$$

Величину  $\chi$ , яка чисельно дорівнює магнітному моменту одиниці об'єму матеріалу, внесеного в магнітне поле з одиничною напруженістю, називають магнітною сприйнятністю речовини. На відміну від магнітної проникності, що характеризує вплив матеріалу на магнітне поле, магнітна сприйнятність характеризує вплив поля на матеріал. Відповідні теоретичні розрахунки показують, що  $\mu$  і  $\chi$  пов'язані співвідношенням:

$$\mu = 1 + \chi.$$

Магнітна сприйнятність – безрозмірна величина. Для діамagnetиків  $\chi < 0$ , а для парамагнетиків  $\chi > 0$ . У випадку ферромагнетиків магнітна сприйнятність також додатна величина, але на відміну від парамагнетиків, має великі числові значення. До того ж для них характерна залежність магнітної сприйнятності від напруженості зовнішнього магнітного поля. Такої залежності немає у парамагнетиків і діамagnetиків [4].

Як було наведено вище, істотною особливістю феромагнетиків є залежність  $\mu$  від  $H$ . Відносна магнітна проникність  $\mu$  феромагнетика спочатку швидко зростає зі збільшенням  $H$ , досягає максимуму, а потім знижується, наближаючись до одиниці при сильних намагнічуючих полях. Це можна пояснити, виходячи з того, що:

$$\mu = 1 + \chi = 1 + \frac{I}{H}.$$

При насиченні  $I = \text{const}$ . Якщо напруженість зовнішнього магнітного поля  $H$  прямує до нескінченності, а  $\frac{I}{H} \rightarrow 0$ , тоді  $\mu \rightarrow 1$ . Максимальні значення  $\mu$  для феромагнетиків досить великі. Зокрема, для заліза –  $\mu_{\text{max}} = 5000$ , для силіцієвого заліза (що містить 3,3 % Si) –  $\mu_{\text{max}} = 10\ 000$ , для чавуну (3 % C) –  $\mu_{\text{max}} = 2000$ , а для пермалою (78 % Ni і 22 % Fe) –  $\mu_{\text{max}} = 100\ 000$ .

Для феромагнетиків характерна ще одна особливість: за певної для кожного феромагнетика температури  $T_k$ , яку називають точкою Кюрі, вони втрачають притаманні їм властивості й перетворюються у звичайний парамагнетик. Залежність магнітної сприйнятності  $\chi$  від температури для таких парамагнетиків описується законом Кюрі – Вейса:

$$\chi = \frac{C'}{T - T_k},$$

де  $C'$  – стала, що залежить від природи матеріалу;  $T$  – абсолютна температура;  $T_k$  – температура Кюрі.

Температура Кюрі неоднакова для різних феромагнетиків. Наприклад, для заліза вона становить 780 °С, для кобальту – 1150 °С, для нікелю – 358 °С.

Без зовнішнього магнітного поля вектори магнітних моментів окремих доменів орієнтовані в просторі хаотично, тому результуючий магнітний момент усього матеріалу дорівнює нулю. Зовнішнє магнітне поле, що діє на феромагнетик, орієнтує магнітні моменти не окремих часток, як це було у випадку парамагнетиків, а цілих ділянок спонтанного намагнічування. Очевидно, магнітне насичення настає тоді, коли вектори магнітних моментів у всіх ділянках спонтанного намагнічування встановлюються паралельно зовнішньому магнітному полю. Властивість феромагнетика зберігати намагніченість у поєднанні з магнітною проникністю зразків досліджуваних матеріалів, можуть бути застосовані для тих чи інших практичних цілей, наприклад, для отримання певного значення магнітної проникності магнітопроводів сигнальних трансформаторів електроустаткування машин, суден, електропотягів.

Виходячи з наведеного вище, можна констатувати, що, безумовно, актуальним при створенні нових, модифікованих високочастотним магнітним полем епоксидних матеріалів, є дослідження магнітних характеристик композитів з феромагнітними наповнювачами. У нашому випадку це порошки залізного сурику (ЗС) з розміром 10...20 мкм і Сталі 45 з розміром 63...80 мкм.

Результати досліджень магнітної проникності епоксикомпозитних матеріалів з наповнювачами різної природи та дисперсності наведено на рис. 3 – рис. 10. Слід зауважити, що додатково феромагнітні наповнювачі (Сталь 45 та залізний сурик) до введення в олігомерний зв'язувач ЕД-20 піддавали впливу високочастотного магнітно-імпульсного поля (ВМП) з попередньо визначеними оптимальними для обраних меж досліджень параметрами [5].

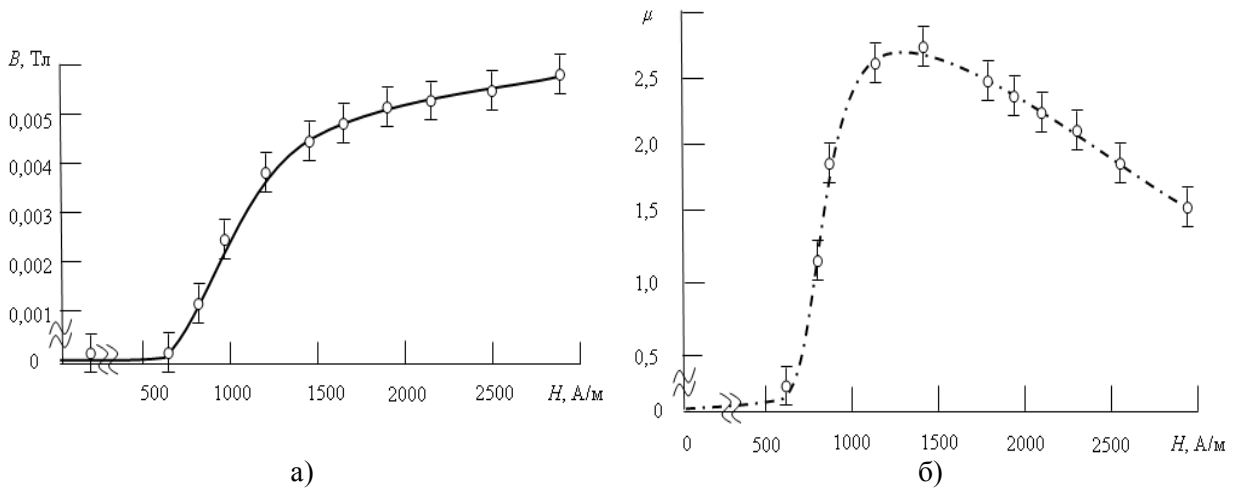


Рис. 3 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із частками ЗС ( $q = 50$  мас.ч.)

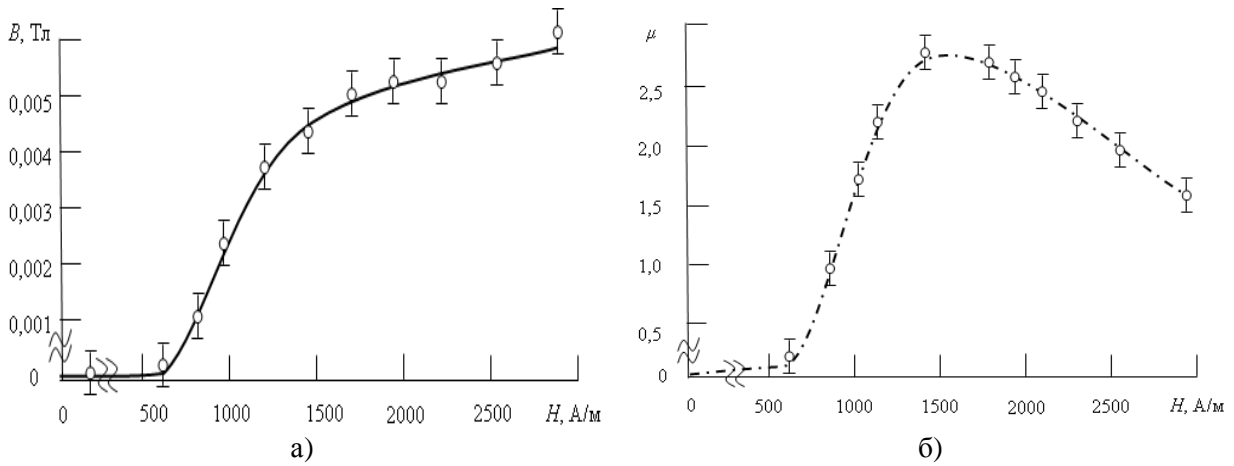


Рис. 4 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із модифікованими ВМП частками ЗС ( $q = 50$  мас.ч.)

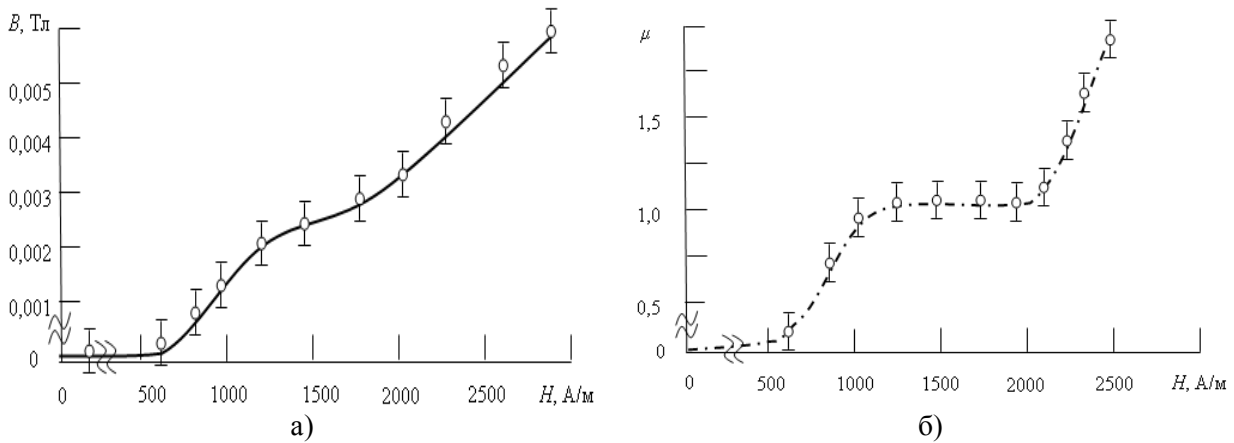


Рис. 5 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із частками КБШ ( $q = 50$  мас.ч.)

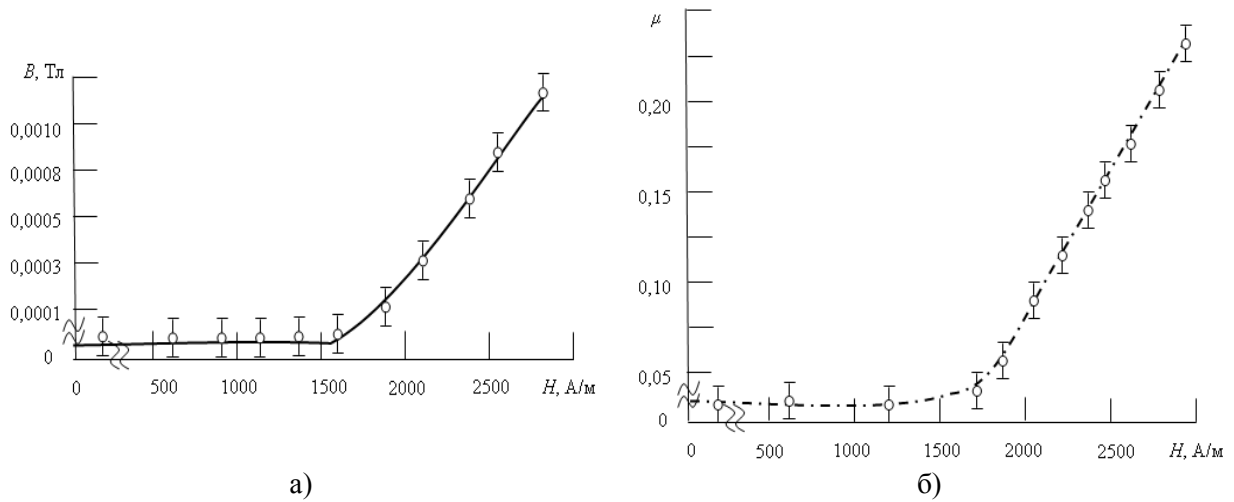


Рис. 6 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ з частками КС ( $q = 50$  мас.ч.)

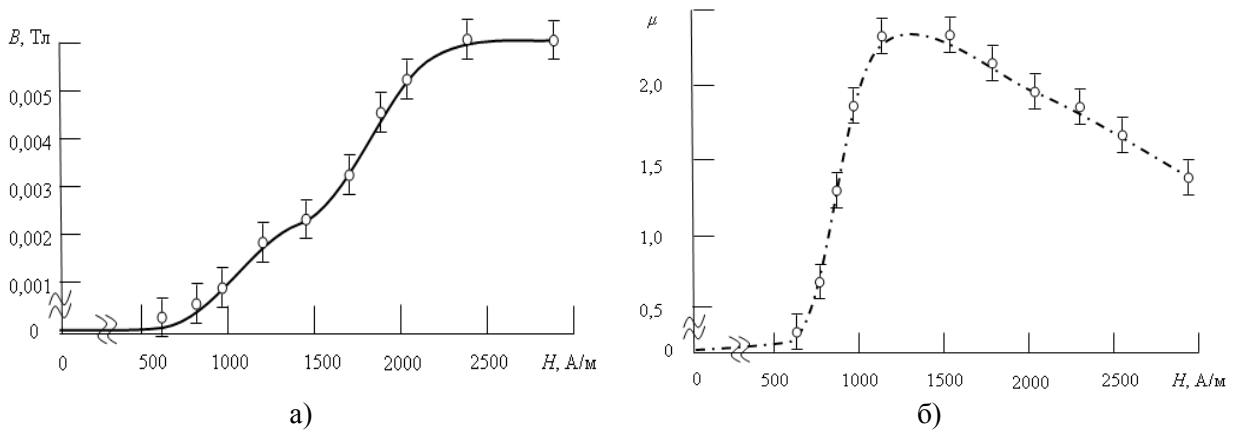


Рис. 7 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із частками Сталь 45 ( $q = 50$  мас.ч.)

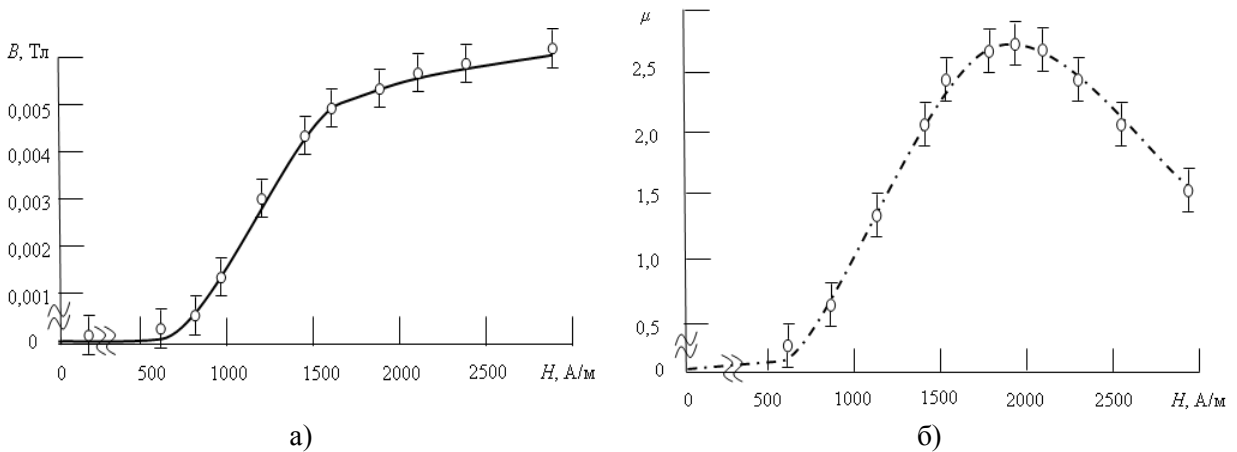


Рис. 8 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ з модифікованими ВІМП частками Сталь 45 ( $q = 50$  мас.ч.)

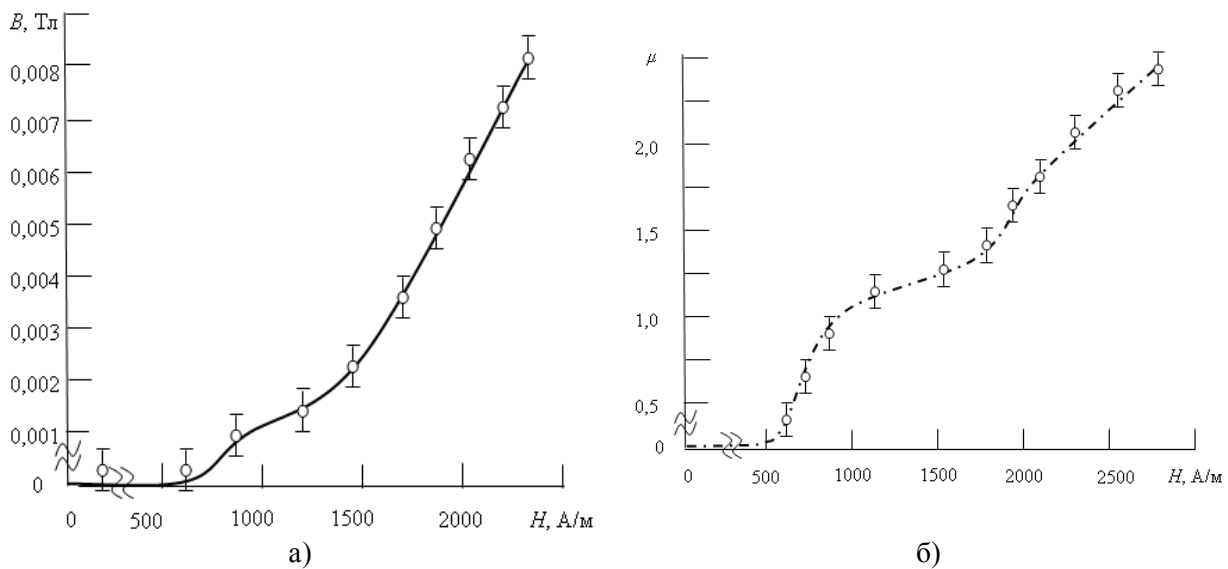


Рис. 9 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із частками ВШ ( $q = 50$  мас.ч.)

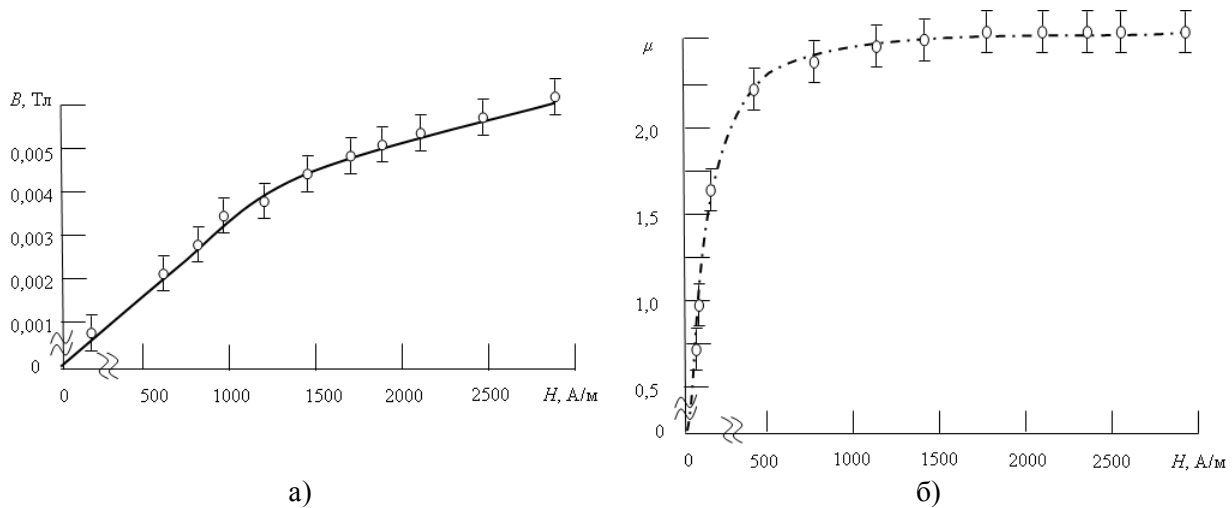


Рис. 10 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із частками пермалю Н 45 ( $q = 50$  мас.ч.)

Аналіз наведених графічних залежностей показує, що для усіх КМ з феромагнітними наповнювачами (ЗС і Сталь 45) підвищення напруженості зовнішнього магнітного поля призводить до збільшення магнітної індукції (рис. 3, рис. 4, рис. 7, рис. 8). При цьому зростає також і величина магнітної проникності, хоча при досягненні певної величини насичення вона спадає. Експериментально встановлено, що максимальна величина магнітної проникності для КМ із залізним суриком при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,75$  (рис. 3). За такої ж напруженості поля магнітна проникність оброблених ВІМП зразків підвищується несуттєво і становить  $\mu = 2,80$ . Це можна пояснити тим, що попередня обробка ВЕІП незначно змінює величину магнітного моменту часток даного наповнювача. Навпаки, доведено, що максимальна величина магнітної проникності для КМ із частками Сталь 45 при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,30$  (рис. 7). Обробка даних часток ВЕІП забезпечує отримання зразків, магнітна проникність яких становить  $\mu = 2,80$ . Таке підвищення проникності під дією ВІМП можна пояснити впливом зовнішнього магнітного поля на магнітні властивості порошку, що визначаються структурою його атомів і характером взаємодії між ними. Крім того, експериментально доведено [6], що магнітна обробка композицій з даним наповнювачем забезпечує підвищення показників адгезійних та когезійних властивостей епоксикомпозитів. Можна припустити, що після попередньої



обробки ВІМП матеріалів при їх зшиванні за рахунок збільшеного магнітного моменту наповнювача активуються міжфазові процеси взаємодії. У цьому випадку формуються на межі поділу фаз «наповнювач – полімер» зовнішні поверхневі шари значної товщини, що підвищує вміст гель-фракції у модифікованих КМ. Додатково слід зазначити, що інтенсивність зростання величини магнітної проникності для КМ з частками сталі є дещо вищою, порівняно з КМ, наповнених залізним суриком. Це можна пояснити хімічним складом та структурою введених у епоксидний олігомер добавок.

Важливе наукове і практичне значення мають дослідження магнітної проникності КМ, наповнених вугільним шлаком, колоїдною сіркою та карбідною шихтою. Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 5, рис. 6, рис. 9) дозволяє стверджувати, що використані наповнювачі відносяться до парамагнетиків. При цьому обробка ВІМП композицій з таким частками не приведе до суттєвого поліпшення властивостей епоксидних КМ. Аналіз результатів дослідження КМ з частками КС (рис. 6) дозволяє стверджувати, що дана добавка є парамагнетиком з досить малою величиною магнітної проникності. Додатково це можна використати для аналізу наповнювача і зазначити, що в його складі майже повністю відсутні речовини з феромагнітними чи діамагнітними властивостями.

Особливу увагу, на наш погляд, слід звернути на результати дослідження магнітної проникності КМ з порошком пермалою Н 45 (рис. 10). На залежності індукції та магнітної проникності від напруженості зовнішнього магнітного поля виявлено горизонтальні ділянки, що свідчить про наявність феромагнітних складових у даних частках (залізо та нікель). Однак, відсутність певної точки насичення, яку виявлено у досліджуваному діапазоні напруженості магнітного поля для композитів, наповнених залізним суриком та частками Сталі 45 доводить наступне. Таку точку магнітного насичення не можливо досягнути за даного вмісту ( $q = 50$  мас.ч.) наповнювача в олігомерній матриці ЕД-20 та у вибраному діапазоні напруженості магнітного поля.

**Висновки.** Наведені у роботі експериментальні дослідження дозволяють констатувати наступне:

1. Визначено величину магнітної проникності епоксикомпозитних матеріалів наповнених феромагнітними порошками (залізним суриком та Сталлю 45). Встановлено, що максимальна величина магнітної проникності для КМ із залізним суриком при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,75$ . За такої ж напруженості поля магнітна проникність оброблених високочастотним імпульсним магнітним полем зразків підвищується несуттєво і становить  $\mu = 2,80$ . Це можна пояснити тим, що попередня магнітна обробка незначно змінює величину магнітного моменту часток даного наповнювача. Доведено, що максимальна величина магнітної проникності для КМ із частками Сталь 45 при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,30$ . Магнітна обробка даних часток забезпечує отримання зразків, магнітна проникність яких становить  $\mu = 2,80$ .

2. Аналіз результатів дослідження магнітної проникності КМ, наповнених вугільним шлаком, колоїдною сіркою та карбідною шихтою дозволяє стверджувати, що використані наповнювачі відносяться до парамагнетиків. Магнітна обробка композицій з таким частками не приводить до суттєвого поліпшення властивостей епоксидних КМ. На залежності індукції та магнітної проникності від напруженості зовнішнього магнітного поля для зразків з частками пермалою Н 45 виявлено горизонтальні ділянки, що свідчить про наявність феромагнітних складових у даних частках (залізо та нікель).

Надалі авторами заплановано встановити вплив тривалості високочастотної магнітної обробки композицій на когезійні властивості епоксикомпозитів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Чолпан П. П. Фізика / П. П. Чолпан. – К. : Вища школа, 2003. – 567 с.
2. Агоп М. Тензори діелектричної і магнітної проникності вакууму в присутності електромагнітного поля / М. Агоп // Наукові праці Вінницького національного технічного університету – 2011. – № 4. – С. 34-42.
3. Степанов А. А. Определение магнитной проницаемости ферромагнетиков при силовом воздействии импульсных магнитных полей / А. А. Степанов, В. М. Барбашова // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. – 2013. – № 5. – С. 111-113.
4. Руководство к лабораторным занятиям по физике / [Голдин Л. Л., Игошин Л. Ф., Козел С. М. и др.] ; под ред. Л. Л. Голдина. – М. : Наука, 1973. – 687 с.
5. Скирденко В. О. Оптимізація режимів високочастотної електромагнітної обробки епоксидних композитів методом математичного планування експерименту / В. О. Скирденко, О. В. Акімов // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2013. – № 4 (67). – С. 28-36.
6. Новейшие инструментальные методы исследования структуры полимеров / под ред Дж. Кенига. – М. : Мир, 1982. – 420 с.

**Скирденко В.О., Мініцький А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ С ЧАСТИЦАМИ ФЕРРО- И ПАРАМАГНИТНОЙ ПРИРОДЫ**

*В работе проведены исследования магнитной проницаемости эпоксикомпозитных материалов, наполненных порошками с пара- и ферромагнитными свойствами. Определена величина магнитной проницаемости эпоксикомпозитных материалов, наполненных ферромагнитными порошками железным суриком и Сталью 45. Установлено, что максимальная величина магнитной проницаемости для композитов с железным суриком при напряженности поля  $H = 1300$  А/м составляет  $\mu = 2,75$ . По такой же напряженности поля магнитная проницаемость обработанных высокочастотным импульсным магнитным полем образцов повышается незначительно и составляет  $\mu = 2,80$ . Это можно объяснить тем, что предварительная магнитная обработка незначительно изменяет величину магнитного момента частиц данного наполнителя. Доказано, что максимальная величина магнитной проницаемости для композитов с частицами Сталь 45 при напряженности поля  $H = 1300$  А/м составляет  $\mu = 2,30$ . Магнитная обработка данных частиц обеспечивает получение образцов, магнитная проницаемость которых составляет  $\mu = 2,80$ . Анализ результатов исследования магнитной проницаемости композитов, наполненных угольным шлаком, коллоидной серой и карбидной шихтой позволяет утверждать, что использованные наполнители относятся к парамагнетикам. Магнитная обработка композиций с такими частицами не приводит к существенному улучшению свойств эпоксидных композитов.*

**Ключевые слова:** эпоксидный композит, ферромагнитные наполнители, магнитная проницаемость.

**Skirdenko V.O., Minskiy A.V. STUDY OF MAGNETIC PERMEABILITY OF EPOXY-FILLED COMPOSITES WITH PARTICLES OF FERRO- AND PARAMAGNETIC NATURE**

*Research of magnetic permeability of epoxy-composite materials filled with powders having para- and ferromagnetic properties was conducted. Value of magnetic permeability of epoxy composite materials filled with ferromagnetic powders, iron minium and steel 45 was determined. It was established that the maximum value of the magnetic permeability for composites with iron minium under field strength of  $H = 1300$  A/m is  $\mu = 2.75$ . Under the same field strength magnetic permeability of the samples processed with high-frequency pulsed magnetic field increases slightly and constitutes  $\mu = 2.80$ . This can be explained by the fact that the preliminary magnetic treatment slightly changes the value of the magnetic moment of particles of this filler. It was proved that the maximum value of the magnetic permeability for composites with particles of Steel 45 if field strength  $H = 1300$  A/m constitutes  $\mu = 2.30$ . Magnetic treatment of the particles ensures production of samples with magnetic permeability of  $\mu = 2.80$ . Results analysis of study of magnetic permeability of composites filled with coal slag, colloidal sulfur and carbide mixture allows to assert that the fillers used are regarded to be paramagnetic. Magnetic treatment of composition with such particles does not lead to a significant improvement of the properties of epoxy-filled composites.*

**Keywords:** epoxy-filled composite, ferromagnetic fillers, magnetic permeability.

© Скирденко В.О., Мініцький А.В.

Статтю прийнято  
до редакції 3.11.14