

О.І. Аксіментьєва<sup>1</sup>, І.Б. Чепков<sup>2</sup>, Р.В. Філіпсонов<sup>3</sup>, С.З. Малинич<sup>3</sup>, Р.В. Гамерник<sup>1</sup>,  
Г.В. Мартинюк<sup>4</sup>, Ю.Ю. Горбенко<sup>1</sup>

## **Гібридні композити з низьким відбиттям ІЧ-випромінювання**

<sup>1</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна, [aksimen@ukr.net](mailto:aksimen@ukr.net)

<sup>2</sup>Центральний науково-дослідний інститут озброєння і військової техніки ЗСУ, м. Київ, Україна

<sup>3</sup>Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, Україна, [s.malynych@gmail.com](mailto:s.malynych@gmail.com)

<sup>4</sup>Рівненський державний гуманітарний університет, Рівне, Україна, [galmart@ukr.net](mailto:galmart@ukr.net)

Вивчено умови формування і властивості гібридних органо-неорганічних композитів на основі епоксидної полімерної матриці та суміші магнітних та полімерних наповнювачів.

На основі вивчення фізико-хімічних властивостей наповнювачів та композитів встановлено, що уведення дисперсії магнетиту, модифікованого полімерними оболонками, та поліаніліну, легованого толуенсульфоокислотою, до складу термореактивної епоксидної композиції у кількості 2 - 6 мас.% забезпечує здатність композитів до значного поглинання та низького відбивання хвиль ІЧ та СВЧ діапазону.

Знайдено, що оптимальному складу композиції відповідають найкращі механічні властивості отриманих покриттів, зокрема, висока мікротвердість. Це дає змогу застосувати запропоновану композицію для отримання на її основі композиційних плівок і покриттів антирадарного призначення, які зменшують інтенсивність діючого на об'єкт мікрохвильового випромінювання та одночасно діють як захисні покриття на поверхні металів.

**Ключові слова:** гібридні композити, ІЧ-випромінювання, магнетит, поліанілін, мікротвердість.

*Подано до редакції 26.11.2020; прийнято до друку 15.12.2020.*

### **Вступ**

У багатьох практичних застосуваннях, особливо у сонячній енергетиці, військового обладнанні, екологічному захисті існує попит на покриття, які ефективно поглинають ІЧ-випромінювання. Такі покриття можуть суттєво покращити збирання електромагнітної енергії як у фотоелектричних, так і в теплових сонячних системах, їх також можна використовувати для антирадарного захисту і для стелс-технологій [1, 2].

Композиційні матеріали, що складаються з діелектричної матриці та феромагнітних матеріалів привертають велику увагу протягом останніх десятиліть. Феромагнітні матеріали відомі своєю здатністю поглинати електромагнітні хвилі ближнього ІЧ та мікрохвильового діапазону [3-5]. Очікується, що нано- або мікрочастинки наповнювачів посилять взаємодію композиту з

електромагнітним випромінюванням, забезпечуючи бажаний технічний результат [6].

Аналіз науково-технічної літератури свідчить, що для розробки захисних покриттів, здатних взаємодіяти з ІЧ-випромінюванням, переважно використовують термореактивні полімерні композиції на основі епоксидної смоли, отвердника, магнітного наповнювача (карбонільного заліза, фериту, нанорозмірного магнетиту [3, 4]) і вуглецевої електропровідної домішки (вуглецеві волокна, карбонові нанотрубки та ін. [5, 7]). Проте використання магнітодіелектричних матеріалів як наповнювачів, спричиняє значне підвищення температури при переході електромагнітної енергії в теплову [4], а уведення нанорозмірних магнітних наповнювачів не може забезпечити ефективного розсіювання ІЧ-випромінювання. Водночас використання перелічених вище дорогих і дефіцитних карбонових наночастинок як провідної

складової значно підвищує вартість композиції. Альтернативою таким наповнювачам в полімерних композитах може бути електропровідний спряжений полімер - поліанілін [6], який здатний зменшувати інтенсивність ІЧ випромінювання.

Завданням цієї роботи стала розробка композитного покриття, яке володіло би високим поглинанням випромінювання та низькою відбивною здатністю в ІЧ-діапазоні спектра. Оскільки перше вікно ІЧ-прозорості виникає в діапазоні довжин хвиль 0,8... 1,6 мкм, де працює більшість лазерних направляючих систем [1, 2], ми обмежили наші дослідження цим спектральним діапазоном. Окрім заданих ІЧ-характеристик, потенційне антирадарне покриття повинно відповідати деяким іншим технологічним умовам, таким як простота виготовлення та нанесення, механічна міцність, захист поверхні від корозійного впливу та низька вартість [6, 7].

Серед різноманітності діелектричних матеріалів ми пропонуємо використати епоксидну смолу як матрицю, що містить частинки магнетиту  $Fe_3O_4$  разом зі спряженим провідним полімером - поліаніліном (ПАН) [8]. Оксид заліза  $Fe_3O_4$  (магнетит) служить поглиначем ІЧ-випромінювання, тоді як провідний полімер може створювати синергетичний ефект, тобто посилювати поглинання електромагнітної енергії та покращувати антикорозійні та механічні властивості покриття. Для посилення взаємодії ІЧ-випромінювання з композитом використано магнетит у формі майже сферичних частинок із середнім діаметром 1 - 2 мкм. Оскільки такий розмір співмірний з довжинами хвиль ближнього ІЧ-діапазону, частинки не тільки поглинають електромагнітне випромінювання, але й ефективно розсіюють його, зменшуючи загальну інтенсивність відбитого ІЧ-сигналу.

## Методика експерименту

Високодисперсний магнетит ( $Fe_3O_4$ ) синтезували шляхом лужного гідролізу солей ферум (II) і ферум (III) і стабілізували олеатом натрію [9]. Для кращої сумісності магнітної складової з епоксидною матрицею проводилась модифікація поверхні магнетиту полімерними оболонками в умовах суспензійної полімеризації стирену згідно [10]. Дисперсний магнетит-полімерний композит у формі сферичних частинок (гранул) розміром близько 1 - 2 мкм відокремлювали магнітною декантацією від суспензії композиту, що містила магнетит, стабілізований полістиреновою оболонкою.

Синтез поліаніліну (ПАН) здійснювали методом окисної полімеризації 0,1 М розчину аніліну під дією еквімолярної кількості окисника амоній пероксодисульфату за кімнатної температури протягом 24 годин. Як реакційне середовище використовували водний 0,1 М розчин толуенсульфокислоти (ТСК) [11]. Виділений продукт сушили до постійної маси в умовах динамічного вакууму при температурі 60 °С протягом 6 годин, потім ретельно перетирали у фарфоровій ступці.

Для приготування термореактивної полімерної композиції 2 г епоксидної смоли ЕД-20 змішували з 0,05 - 0,015 г порошку магнетиту. Після цього додавали 0,05 - 0,15 г порошку поліаніліну, легованого ТСК, і обережно ретельно перемішували з подальшою обробкою ультразвуком протягом 10 хвилин за температури  $20 \pm 1$  °С. Для отвердіння отриманої композиції до підготовленої суміші додавали 0,24 г амінного отверджувача ПЕПА і ретельно перемішували. З отриманої композиції методом поливу формували покриття на поверхні тефлону або сталі товщиною 0,01 - 0,2 мм. Покриття витримували протягом 2 годин для монолітування, а потім відпалювали за температури 40 - 50 °С протягом години в термостаті для остаточного отвердіння. Після отвердіння композиції плівку відділяли від поверхні і отримували зразки вільних плівок.

Полімерні композити досліджували за допомогою X-променевого дифрактометра (ДРОН-2,  $FeK\alpha$ -випромінювання). Рентгенофазовий аналіз проводили за допомогою програм PowderCell та LATCON [12]. Кристалічну структуру уточнювали з даних дифракції порошку методом Рітвельда з програмою FullProf.2k. Мікроструктурний аналіз, тобто визначення середнього видимого розміру та середньої максимальної деформації зерен, проводили за допомогою спрощених методів інтегральної широти, використовуючи процедуру підгонки профілю з наближенням Фогеля, підтримувану в програмному забезпеченні WinPLOTR [13]. Молекулярну структуру ПАН-ТСК вивчали методом FT-IR спектроскопії з використанням спектрофотометра AVATAR-320N у діапазоні хвильових чисел 400 - 4000  $cm^{-1}$ .

Раманівську спектроскопію здійснювали за допомогою спектроскопа Jobin Yvon, модель T64000, з'єднаним з оптичним мікроскопом фірми Olympus (зі збільшенням 50x). Всі спектри виконано збуджуючи зразки світлом довжиною 514,5 нм лазера Ar (LEXEL). Оптимальна вихідна потужність лазера становила 10 мВт, що давало біля 1 мВт на поверхні зразка.

Вимірювання питомої об'ємної провідності та температурної залежності опору проводили за динамічної зміни температури (5 К/хв). Зразок порошку поміщали в кварцовий циліндр ( $d = 5$  мм,  $h = 2$  мм) між двома нікелевими дисковими контактами із вбудованою термопарою, зразок знаходився під тиском 10 Н/см<sup>2</sup>.

Визначення мікротвердості композитів проводили з допомогою консистометра Хешлера. Мікротвердість  $F_p$  (конічну точку текучості) визначали виходячи з площі (S) проникнення конусоподібного стержня в зразок (h) під певним навантаженням (G):

$$F_p = \frac{G}{S} = \frac{4 \cdot G \cdot 10^4}{\pi \cdot h^2}$$

Зразки для дослідження одержували заливанням рідкої композиції в циліндричну тефлонову форму діаметром 0,5 см і висотою 0,8 см, і отвердінням протягом 1 години при  $T = 50$  °С.

Спектри ІЧ-поглинання та відбиття зразків

отримували за допомогою монохроматора MDR-23, оснащеного галогенною лампою як джерелом світла. Зразки формували у вигляді плівок площею  $1 \text{ cm}^2$  і товщиною  $0,2 \text{ mm}$  поливом отриманої композиції на поверхню тефлону, отвердінням при  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  та відділенням від поверхні з утворенням «вільних» плівок.

## Результати і обговорення

Магнітні та електричні властивості гібридних нанокompatитних матеріалів залежать від природи і кількості феромагнітного та електропровідного наповнювача, ступеня допування поліаніліну, методу їхнього виготовлення. Плівкові композитні матеріали з невисоким вмістом електропровідного полімеру, синтезовані за наявності феромагнітних наночастинок зі специфічними властивостями, можуть виступати альтернативою металовмісних систем, завдяки поліпшеним властивостям та меншій вартості.

Ми запропонували як магнітну домішку увести до складу композиції магнетит, модифікований полімерними оболонками, а як електропровідну органічну складову використати поліанілін, легований толуенсульфокислотою (ТСК).

На дифрактограмі отриманого магнетиту

(рис. 1,а) піки з індексами  $hkl$  вказують на наявність кубічної фази  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  зі структурою типу шпінелі, просторова група  $Fd-3m$ , параметр ґратки  $a = 8,3490(3) \text{ \AA}$ . Проведення мікроструктурного аналізу дало можливість обчислити середній розмір зерен  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  на рівні  $75,5(\pm 7,3) \text{ \AA}$ .

Дифрактограма отриманого композиту магнетит-полістирен наведена на рис. 1,б. Для дифракційної картини магнетиту, модифікованого полімерними оболонками, спостерігається аморфне гало, притаманне полістирену, і набір дифракційних рефлексів магнетиту. Водночас на порошкових дифрактограмах композиційних зразків дифракційні піки кубічної фази  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  з малою інтенсивністю практично не проявляються.

Знайдено, що параметр ґратки  $a$  приблизно однаковий для обох зразків в межах стандартного відхилення, але для зразків композиту має дещо вищі значення ( $a = 8,3491(12) \text{ \AA}$ ). Важливим є факт, що визначений середній розмір гранул композиційних зразків  $111,1(\pm 1,8) \text{ \AA}$  перевищує розмір гранул зразків  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , отриманих за відсутності полімеру, що підтверджує факт утворення полімерної оболонки на частинках магнетиту. Спостережені явища можна пояснити як результат формування нанокompatиту із структурою магнетиту, інкапсульованого полімерними оболонками.

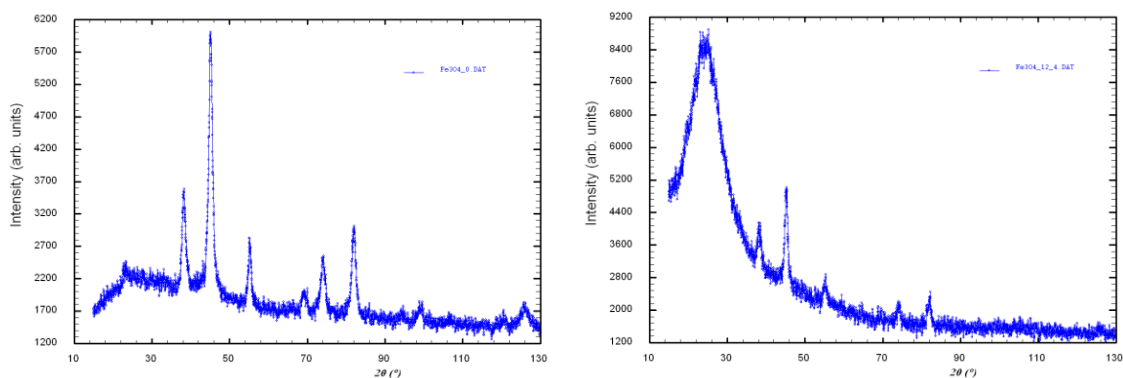


Рис. 1. (а) Дифрактограма зразка  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  та (б) композиту полімер-магнетит.

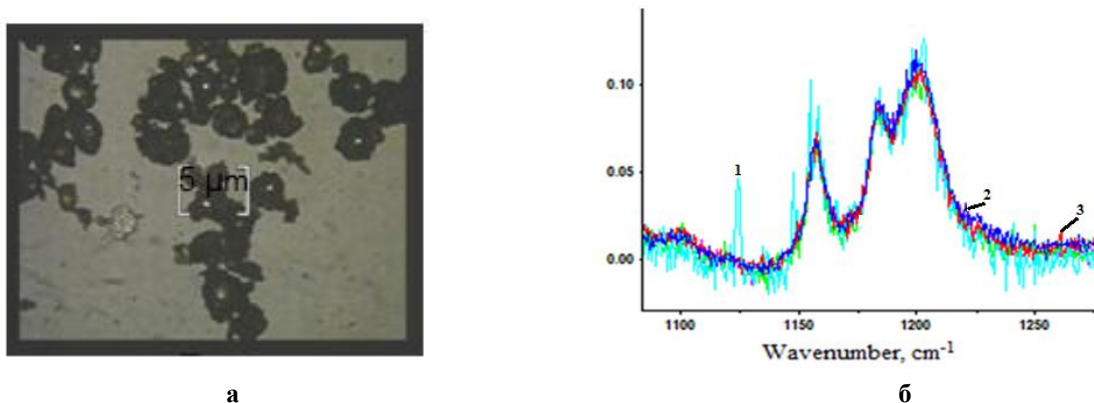


Рис. 2. (а) Мікрофотографія дисперсії магнетиту, інкапсульованого полімерними оболонками (мікроскоп «Olympus»); (б) Раманівські спектри гібридних нанокompatитів полімер – магнетит при вмісті магнетиту 6.3 (1), 9.5 (2), 12.4 (3) мас. %.

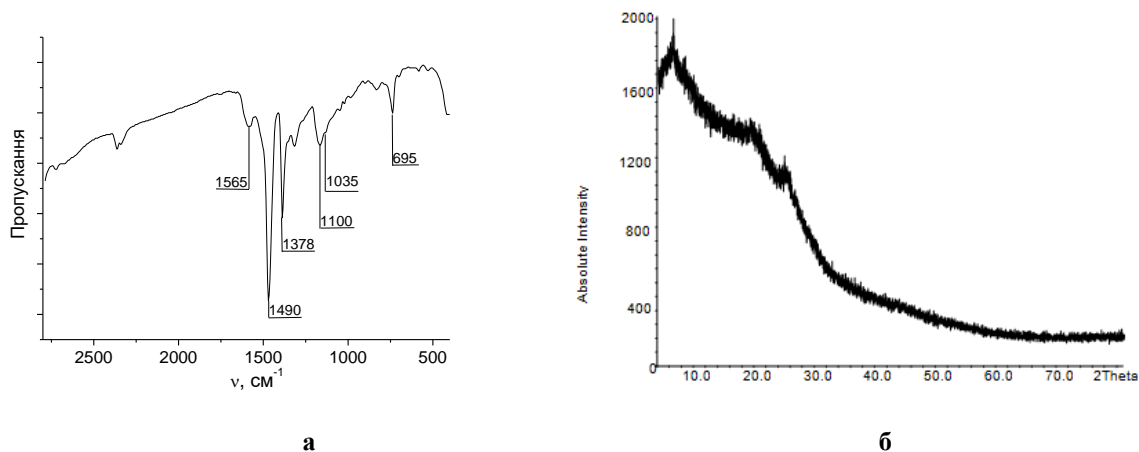


Рис. 3. (а) FT-IR спектр ПАН-ТСК; (б) Порошкова дифрактограма ПАН-ТСК.

Внаслідок часткової агломерації зерен магнетиту та утворення на їхній поверхні полімерного шару формуються частинки сферичної форми типу ядро-оболонка з середнім діаметром 1,5 - 2 мкм (рис. 2, а).

Згідно даних спектроскопії комбінаційного розсіювання, практично для всіх зразків спостерігаються раманівські зсуви, характерні для полімеру і магнетиту у полімерному середовищі. При відносно високих вмістах магнетиту у раманівських спектрах спостерігається розширення основи піку при 1590 - 1595  $\text{cm}^{-1}$ , що характерно для інкапсульованих систем [15]. У низькочастотних раманівських спектрах виявлено область в діапазоні 275 - 300  $\text{cm}^{-1}$ , характерну для магнетиту.

Слід зазначити, що інкапсуляція магнетиту полімерними оболонками незначно впливає на показники магнітної сприйнятливості наповнювача [16]. Отже, отримані структури здатні ефективно поглинати електромагнітне випромінювання ІЧ та СВЧ діапазону [3].

Для підсилення абсорбуючих властивостей антирадарних матеріалів до складу композитів вводять електропровідну домішку, що сприяє розсіюванню електромагнітного випромінювання [4-6]. З огляду на високу провідність і добру сумісність з епоксидною матрицею, як електропровідну домішку ми застосували поліанілін, легований ТСК.

Інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є (FT-IR) для легованого полімеру ПАН-ТСК, підтверджує утворення провідної емеральдинової солі поліаніліну [11]: пік при 1490  $\text{cm}^{-1}$  відповідає бензеновому кільцю, подвійний пік поглинання при 1090 - 1100  $\text{cm}^{-1}$  належить коливанням С-Н зв'язку. Смуги поглинання при 1378 і 1565  $\text{cm}^{-1}$  свідчать про наявність груп С-N і С=N відповідно. Наявність допанта (толуен сульфорова кислота) чітко підтверджується смугами при 1035 і 695  $\text{cm}^{-1}$  (рис. 3.а).

Згідно даних рентгенівської дифракції (рис. 3, б), структура ПАН-ТСК в основному аморфна, з декількома кристалічними рефлексами при  $2\theta = 6,80; 19,60; 22,60$  град. Ступінь кристалічності, визначений за інтегруванням кристалічних максимумів та

аморфного гало, становить 8 – 10 %. Розмір кристалітів становить в середньому 25 – 27 Å.

Знайдено, що зразки ПАН-ТСК мають досить високі значення питомої провідності на рівні  $\sigma = 0,4 - 0,5 \text{ См/м}$ , що майже на 3 порядки перевищує значення  $\sigma$  для більшості кислотно-легованих зразків ПАН [17]. За підвищення температури спостерігається зменшення питомого опору полімеру ( $\rho$ ), що типово для напівпровідників.

Температурна залежність опору ( $\rho$ ) добре описується експоненціальним рівнянням  $\rho = \rho_0 \exp(E_a/2kT)$  в інтервалі температур 273 - 373 К. Як видно з рисунку, температурна залежність опору ПАН-ТСК характеризується двома паралельними ділянками. Стрибкова зміна опору відбувається при температурах  $T = 370 - 373 \text{ К}$  (біля 100 °С), що відповідає десорбції хемосорбованої вологи. Представлення цієї залежності в координатах  $\ln\rho - 1/T$  (рис. 4) дало змогу визначити енергію активації провідності, розраховані значення якої знаходяться в межах  $E_a = 0,17 - 0,19 \text{ eВ}$ .

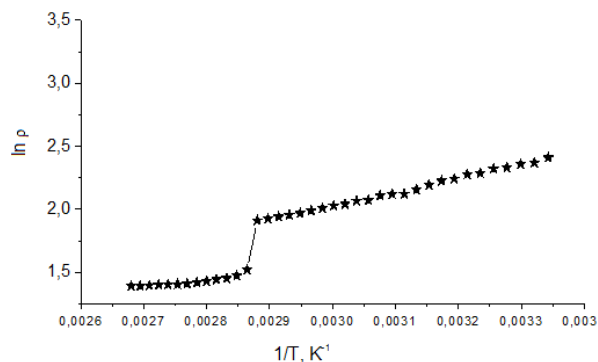
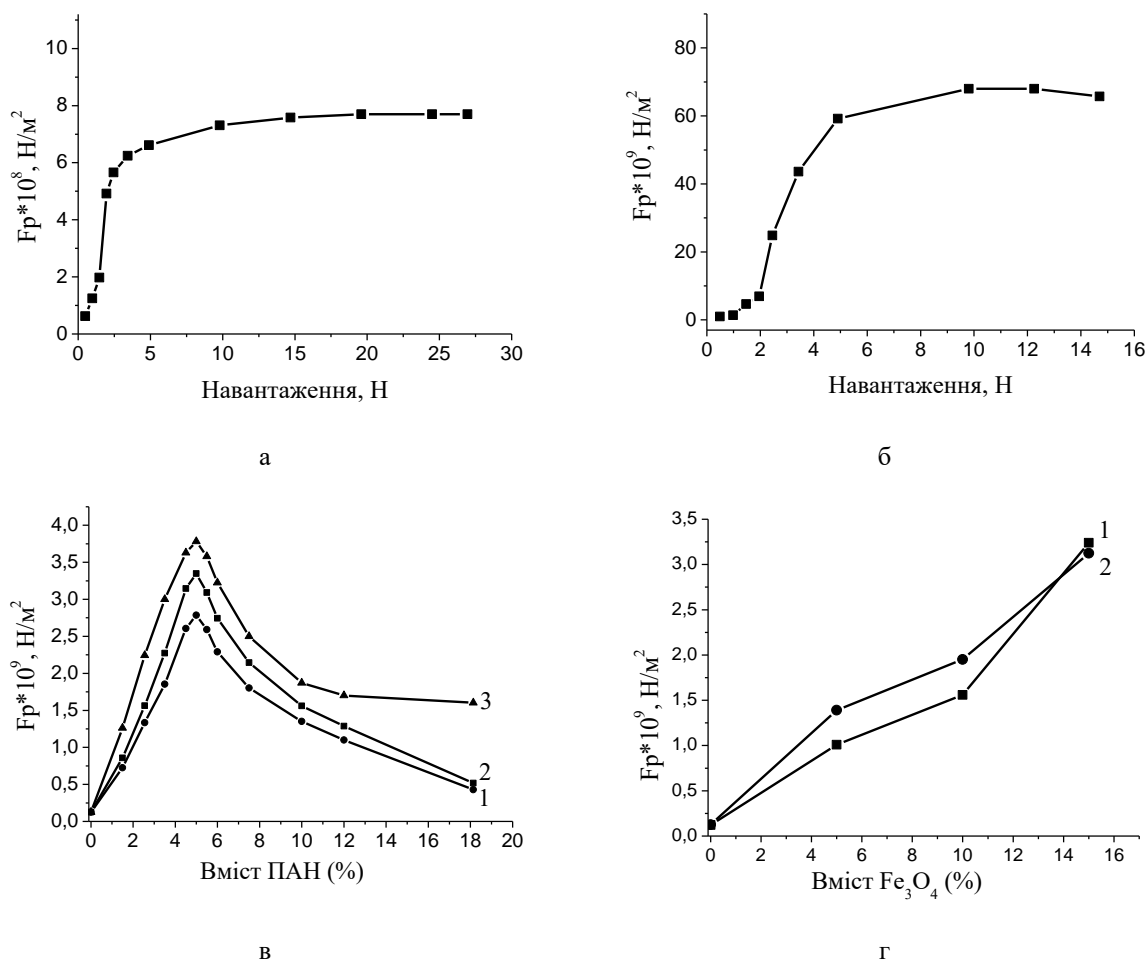


Рис. 4. Температурна залежність питомого опору ПАН-ТСК.

Отже, застосування ПАН-ТСК як провідної домішки в антирадарних композитах є доцільним, оскільки сприятиме поглинанню і розсіюванню абсорбованого електромагнітного випромінювання [5, 6]. Легування поліаніліну ТСК, яка має високу поверхневу активність, забезпечує ефективне



**Рис. 5.** (а) Залежність мікротвердості від навантаження для композитів ЕД-20 + ПЕПА; (б) при введенні наповнювачів: 5 % ПАН-ТСК+ 5 %  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; (в) залежність мікротвердості композитів від вмісту ПАН-ТСК при навантаженні: 1) 0,5 Н; 2) 1,0 Н; 3) 1,5 Н (б) та (г) від вмісту магнетиту при навантаженні: 1) 0,5 Н; 2) 1,0 Н.

змочування наповнювача епоксидним олігомером.

З іншого боку, важливим питанням для застосування полімерних композитів є вплив наповнювачів на механічні властивості покриттів, зокрема їх мікротвердості. На рис. 5 зображено типові залежності мікротвердості зразків ( $F_p$ ) від навантаження ( $G$ ) для композитів різного складу залежно від природи і вмісту наповнювачів. Як можна бачити, залежність  $F_p-f(G)$  виходить на ділянку “плато”, де спостерігається гранична мікротвердість  $F_\infty$  за певного навантаження (рис. 5, а, б).

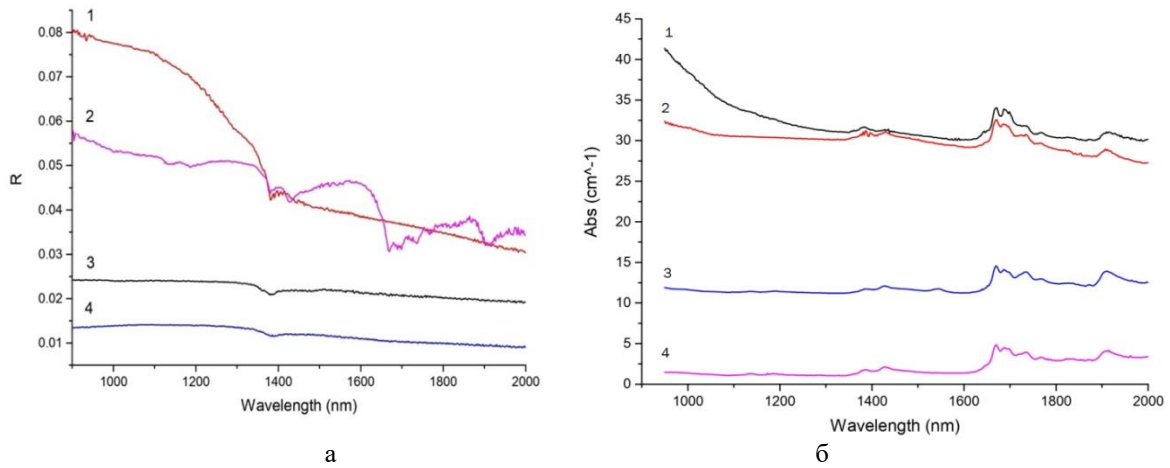
Визначені величини  $F_\infty$ , як граничної точки текучості для досліджуваних композитів показали, що значення мікротвердості залежить як від вмісту полімерного наповнювача та від його хімічного складу.

Ненаповнена композиція, на основі епоксидної смоли і отвердника має показники граничної мікротвердості  $F_\infty$  на рівні  $7,7 \cdot 10^8 \text{H}/\text{M}^2$  (рис. 5, а) при навантаженні  $G > 5 \text{H}$ . Введення до складу композиції наповнювача (ПАН-ТСК) спричиняє суттєве зростання  $F$ . Водночас залежність  $F_\infty$  від вмісту наповнювачів досить складна, і у випадку

ПАН-ТСК проходить через максимум при вмісті наповнювача близько до 5 мас.%( рис. 5, в). Уведення магнетиту теж спричиняє суттєве зростання мікротвердості (рис. 5, г). Але найбільше зростання  $F$  спостерігається при сумісному застосуванні обох наповнювачів – до  $67 \cdot 10^9 \text{H}/\text{M}^2$  (рис. 5, б). Це може свідчити про наявність синергетичного ефекту, коли дія одного компоненту підсилюється іншим і є доказом утворення гібридної структури. Слід зазначити, що за високих сумарних вмістів наповнювачів (понад 10–15 %), мікротвердість композитів може зменшуватись внаслідок «розпушуючого» ефекту або порушення цілісності зразка. Отже, оптимальним слід вважати вміст наповнювачів у кількості 5% кожного, що забезпечує не тільки найвищу мікротвердість, але й високі антикорозійні показники покриттів [16].

Дослідження відбивної та поглинаючої здатності розроблених композитів у ближньому ІЧ діапазоні проводили для плівкових зразків різного складу. Спектри ІЧ-відбивання та поглинання зразків з різним умістом наповнювачів показані на рис. 6.

Наші дослідження показують, що композит, який містить магнітні мікрочастинки та частинки



**Рис. 6.** (а) ІЧ спектри відбивання полімерних композитів при різних вмістах наповнювача, мас. %: 1 – без наповнювача, 2 - 10 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; 3 – 5 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> +5 ПАН; 4 - 10 ПАН. (б) - Спектри поглинання плівкових зразків епоксидної композиції з вмістом наповнювачів: 1 – 10 % (5 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> +5 ПАН); 2 – 15 % магнетит; 3 – 10 % ПАН; 4 – без наповнювача.

Таблиця 1

Вплив наповнювачів на ІЧ-відбиття та ІЧ поглинання композитів

№	Магнетит, мас. %	ПАН-ТСК, мас. %	Показник відбиття, R, (при $\lambda = 1200$ нм)	Коефіцієнт поглинання, A, см <sup>-1</sup>
1	0	0	0,082	3,5
2	5	5	0,022	35,2
3	10	0	0,056	31,7
4	0	10	0,014	14,8

поліаніліну, легованого ТСК, у співвідношенні 1:1 за 10 % сумарного вмісту наповнювачів, демонструє найсильніше ІЧ поглинання  $A = 35,2$  см<sup>-1</sup> та низький показник відбиття  $R = 0,022$  (Таблиця 1).

Як бачимо з представлених спектрів і даних таблиці, якщо композит містить тільки електропровідну полімерну домішку ПАН-ТСК, попри низький показник відбиття ( $R = 0,014$ ), його коефіцієнт поглинання залишається порівняно невисоким (14,8 см<sup>-1</sup>). Для композитів, що містять тільки магнітний наповнювач (10 % магнетиту), спостерігаються як досить високі значення  $A = 31,7$ , так і  $R = 0,056$ , що є небажаним. І тільки при сумісному застосуванні магнітного і провідного наповнювачів досягається бажаний результат – високе поглинання та низьке відбиття ІЧ-випромінювання.

## Висновки

На основі вивчення фізико-хімічних властивостей наповнювачів та композитів встановлено, що додавання до епоксидної композиції дисперсного магнетиту з розміром частинок 1 - 2 мкм, співмірних з довжиною хвилі мікрохвильового випромінювання, спричиняє як поглинання, так і відбиття і розсіювання такого

випромінювання. Використання як електропровідної органічної домішки ПАН-ТСК посилює цей ефект внаслідок явища синергізму, яке спостерігається в даній композиції у досить вузькому концентраційному інтервалі наповнювачів та при їх співвідношенні 1:1. При цьому, оптимальному складу композиції відповідають найкращі механічні властивості отриманих покриттів, зокрема, висока мікротвердість.

**Аксiмeнтiєвa O.I.** – професор, д.х.н., головний науковий співробітник кафедри фізичної та колоїдної хімії;

**Чепков I.B.** – професор, д.т.н., начальник Центрального науково-дослідного інституту озброєння і військової техніки ЗСУ, заслужений діяч науки і техніки України;

**Філіпсонов P.B.** – ад'юнкт, штатний науково-організаційного відділу;

**Малинич С.З.** – д.ф.-м.н., професор кафедри електромеханіки та електроніки;

**Гамерник P.B.** – к.ф.-м. н., провідний науковий співробітник кафедри експериментальної фізики;

**Мартинюк Г.В.** – к.х.н., доцент кафедри екології і туризму;

**Горбенко Ю.Ю.** – науковий співробітник кафедри фізичної та колоїдної хімії.

- [2] Ю.И. Борисов, Динамика радиоэлектроники-3 (Техносфера, Москва, 2009).
- [3] F.X. Qin, H.X. Peng, N. Pankratov, M.H. Phan, L.V. Panina, M. Ipatov, V. Zhukova, A. Zhukov, J. of Applied Physics 108, 044510 (2010) (<https://doi.org/10.1063/1.3471816>).
- [4] Ö.Yavuz, M.K. Ram, M. Aldissi, P. Poddar, S Hariharan, J. Mater. Chem. 15(7), 810 (2005) (doi: 10.1039/b408165j).
- [5] S.K. Dhawan, N. Singh, D. Rodrigues, J. Science and Technology of Advanced Materials 4(2), 105 (2003) ([https://doi.org/10.1016/S1468-6996\(02\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S1468-6996(02)00053-0)).
- [6] D. Yuping, L. Shunhua, G. Hongtao, J. Compos. Mat. 40, 1093 (2006) (<https://doi.org/10.1177/0021998305057368>).
- [7] Z. Ye, Z. Li, J.A. Roberts, P. Zhang, J.T. Wang, and G.L. Zhao, J. Appl. Phys. 108(5), 054315-1-7 (2010) (<https://doi.org/10.1063/1.3477195>).
- [8] Р. Філіпсонов, С. Малинич, О. Аксіментьєва, Г. Мартинюк, II Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні технології одержання та переробки полімерних матеріалів” (Львів, 06–08 листопада 2019). С. 42.
- [9] І.Є. Опайнич, І.Й. Малєєв, Спосіб синтезу високодисперсного магнетиту. Патент України № 62416А.– Оpubл. 15.12.03. Бюл. № 12.
- [10] O.I. Aksimentyeva, V.P. Savchyn, V.P. Dyakonov, S. Piechota, Yu.Yu. Horbenko, I.Ye. Opainych, P.Yu. Demchenko, A. Popov, H. Szymczak, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 590(1), 35 (2014) (doi: 10.1080/15421406.2013.873646).
- [11] А.Л. Степура, О.І. Аксіментьєва, П.Ю. Демченко, Фізика і хімія твердого тіла 20(1), 77 (2019) (doi: 10.15330/pcss.20.1.77-82).
- [12] W. Kraus, G. Nolze, Powder Cell for Windows (version 2.4) (Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin, 2000).
- [13] Th.H. De Keijser, J.I. Langford, E.J. Mittemeijer, A.B.P. Vogels, J. Appl. Cryst. 15, 308 (1982) (<https://doi.org/10.1107/S0021889882012035>).
- [14] F. Ren, H. Yu, L. Wang, M. Saleem, Z. Tiana, P. Rena, Adv. 4(28), 14419 (2004).
- [15] M.H. Sonsa, F.A. Tourinho, J.C. Rubim, J. Raman Spectrosc. 31, 185 (2000).
- [16] O. Aksimentyeva, G. Martynyuk, Yu. Horbenko, S. Malynych, R. Filipsonov, Спеціальний випуск журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів” 13, 137, (2020).
- [17] M. Trchová, J. Stejskal, Pure Appl. Chem. 83(10), 1803 (2011) (doi:10.1351/PAC-REP-10-02-01).
- [18] S. Bhadra, D. Khastgir, N.K. Singha, J.H. Lee, Progress in Polymer Science 34, 783 (2009) (doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.04.003).

O.I. Aksimentyeva<sup>1</sup>, I.B. Chepkov<sup>2</sup>, R.V. Filipsonov<sup>3</sup>, S.Z. Malynych<sup>3</sup>, R.V. Gamernyk<sup>1</sup>,  
G.V. Martyniuk<sup>4</sup>, Yu.Yu. Horbenko<sup>1</sup>

## Hybrid Composites with Low Reflection of IR Radiation

<sup>1</sup>Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine, [aksimen@ukr.net](mailto:aksimen@ukr.net)

<sup>2</sup>Central Research Institute of Armaments and Military Equipment  
of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, Ukraine, [s.malynych@gmail.com](mailto:s.malynych@gmail.com)

<sup>4</sup>Rivne State Humanitarian University, Rivne, Ukraine, [galmart@ulr.net](mailto:galmart@ulr.net)

The conditions of formation and properties of hybrid organic-inorganic composites based on epoxy polymer matrix and a mixture of magnetic and polymeric fillers were studied.

Based on the study of physicochemical properties of fillers and composites, it was found that the introduction of a dispersion of magnetite modified with polymer shells and polyaniline doped with toluene sulfonic acid in the thermosetting epoxy composition in the amount of 2 - 6 wt.% provides the ability of composites to significant absorption and low reflection of IR and microwave range.

It was found that the optimal content of the composition corresponds to the best mechanical properties of the obtained coatings, in particular, high microhardness. This makes it possible to use the proposed composition to obtain on its basis composite films and coatings for anti-radar purposes, which reduce the intensity of microwave radiation acting on the object and at the same time act as protective coatings on the surface of metals.

**Keywords:** hybrid composites, IR radiation, magnetite, polyaniline, microhardness.