

Н. В. Касаткіна¹, О. М. Тихенко², О. В. Панова³, Я. І. Бірук³

¹ Національний університет харчових технологій, Київ, Україна

² Національний авіаційний університет, Київ, Україна

³ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ РЕГУЛЮВАННЯМ МОРФОЛОГІЇ ФЕРОМАГНІТНОГО НАПОВНЮВАЧА

Анотація. Встановлено, що при проектуванні композиційних металополімерних електромагнітних екранів необхідно врахувати морфологію частинок екрануючої субстанції – принаймні співвідношення довжини та товщини окремих частинок. Визначено, що різке зростання захисних властивостей відбувається за концентрацій екрануючих елементів, коли вони контактують між собою (критична концентрація). Найбільша критична концентрація (до 47 %) відповідає співвідношенню довжини та діаметру частинок 1:2. Зі зростанням співвідношення критична концентрація монотонно зменшується. За співвідношення 1:32 вона складає 15 %. Показано, що некоректні результати розрахунку діелектричної проникності композиційних матеріалів для визначення коефіцієнтів екранування, зокрема коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль обумовлені невірним розрахунком коефіцієнтів деполаризації, які є визначними щодо обчислення критичних об'ємних концентрацій провідної субстанції у матриці композиційного матеріалу. В свою чергу значення критичної концентрації входить до формули Оделевського для розрахунку діелектричної проникності гетерогенних композиційних матеріалів. Наведені розрахунки впливу співвідношення довжини та діаметра екрануючих елементів придатні для застосування (прогнозування функціоналу) тільки для композитів з вмістом однакових спеціально виготовлених екрануючих елементів. Розрахунки для умовно круглих (точкових) екрануючих частинок не збігаються з надійними експериментальними даними. Для такого наповнювача критична концентрація (за вагою) – 12–15 %. Прогнозування захисних властивостей композитів з використанням дрібнодисперсної субстанції (принаймні до розмірів частинок 150–200 мкм) доцільно здійснювати на основі визначення електрофізичних властивостей суміші. Наведено спосіб застосування для таких розрахунків формули Дебая для діелектричної проникності матеріалу.

Ключові слова: електромагнітний екран, композиційний матеріал, коефіцієнт деполаризації, формула Дебая.

Вступ

Найбільш ефективними матеріалами для екранування електромагнітних полів є композити діелектричних матриць з наповнювачами з металевих та металовмісних елементів різної форми та регулярності розташування. Перевагами таких композиційних матеріалів є можливість регулювання коефіцієнтами поглинання та відбиття електромагнітних хвиль за рахунок зміни геометричних характеристик матеріалів та концентрацій екрануючого наповнювача у ньому. Зокрема, ефективним способом підвищення коефіцієнтів екранування є підвищення дисперсності екрануючої субстанції, але практично в усіх випадках екрануючі частинки мікро- та нанорозмірів розглядалися як малі кулеподібні об'єкти без урахування їх морфології. Форма екранувальних елементів вираховувалася тільки для частинок протяжної (дроти) та пласкої (лускоподібної) конфігурації. Втім теоретичні міркування свідчать, що зміна форми частинок, принаймні мікророзмірів може суттєво впливати на захисні властивості матеріалів, що відкриває можливості за певних умов зменшувати товщину захисного матеріалу зі збереженням ступенів захисту й знижувати вагу екрануючої конфігурації, тому потребує оцінювання й порівняння з експериментальними даними залежності екрануючих властивостей композиційних металовмісних матеріалів від морфологічних показників екрануючих елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зазвичай у якості наповнювача діелектричної матриці у композиційних матеріалах застосовують феромаг-

нітні елементи (залізо, нікель, кобальт) та їх сполуки. Поширення набули також ферити різного складу. У більшості робіт розглядаються залізовмісні наповнювачі різної дисперсності. У дослідженні [1] розглядалися можливості виготовлення магнітних та електромагнітних екранів на основі магнітної рідини з вмістом феромагнітних частинок. За таких розмірів наночастинок, врахувати їх форму неможливо. У роботі [2] досліджено захисні властивості металополімерного матеріалу на основі латексу та залізорудного пилу. Показано, що зі збільшенням дисперсності залізорудного наповнювача підвищується загальний коефіцієнт екранування електромагнітних полів наднизьких та ультрависоких частот і знижуються коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль ультрависоких частот. Перевагою дослідження є вимірювання змін ефективної діелектричної проникності та питомої провідності матеріалів у залежності від вмісту провідного матеріалу, що надає інформацію про критичні, з точки зору захисних властивостей, концентрації екрануючої речовини. У дослідженні [3] розглядаються протяжні наноструктури регулярного розташування, що викликає труднощі технологічного характеру. Аналітичне визначення ефективності таких структур добре опрацьовано. Практично в усіх дослідженнях розглядаються приблизні розміри та переважна дисперсність частинок навіть розмірів сотень мікрон [4]. Значною мірою це обумовлене тим, що одним з пріоритетних напрямів досліджень з отримання новітніх матеріалів є створення захисних матеріалів на текстильній основі. У дослідженні [5] розглянуто технологію виготовлен-

ня тканини просоченої карбоновими частинками, розміри яких не надаються. Роботу [6] присвячено створенню текстильного матеріалу з використанням феромагнітної рідини. Під дією магнітного постійного поля високої неоднорідності наночастинки магнетиту імплантуються у волокна тканини, утворюючи протяжні регулярні захисні елементи. В останні роки виконано низку робіт, які визначають вплив морфології екрануючих елементів на захисні властивості матеріалів, але у цих дослідженнях є невідповідності та протиріччя. Так, у статті [7] надано розрахунок відбивальної спроможності нового матеріалу з наповнювачем із резистивних волокон, але цей наповнювач не впливає на ці властивості через його розташування під верхнім шаром відомого і досить добре дослідженого матеріалу. У роботі [8] стверджується, що найнижчий коефіцієнт магнітної деполаризації мають частинки сферичної форми, але це не відповідає дійсності. У роботі [9] наведено невірне співвідношення щодо розрахунку деполаризації частинок визначених довжини та товщини, що призводить до помилкового визначення необхідної та критичної об'ємної частки екрануючої компоненти у композиційному матеріалі. Наведене обумовлює проведення досліджень, щодо впливу габаритних параметрів та відносного вмісту екрануючих елементів у матриці композиційного матеріалу та порівнянні розрахункових результатів з експериментальними даними.

Мета роботи – розроблення засад керування ефективністю електромагнітних екранів за рахунок регулювання морфології екрануючої субстанції.

Виклад основного матеріалу

Як показано у [2], для забезпечення ефективного екранування електромагнітних, магнітних та електричних полів екрануючі частинки повинні бути мікро-, субмікро-, або нанорозмірів. Відомо, що магнітний момент, тобто для підсилення, наприклад сумарного магнітного моменту, їх об'ємна концентрація повинна бути суттєвою. Наприклад, для порошкоподібних частинок, які мають форму луски, об'ємний вміст яких скорочується на 30 % й більше за збереження радіо поглинальних властивостей композиційного матеріалу [10]. Залежність захисних властивостей матеріалу від форми частинок визначається коефіцієнтом деполаризація:

$$F \sim (\ell/d)^2,$$

де ℓ – довжина частинки, d – діаметр частинки.

Точне визначення здійснюється за формулою:

$$F = \ln(2\ell/d) / (\ell/d)^2.$$

Для різних співвідношень ℓ і d коефіцієнт деполаризації приймає значення, наведені у табл. 1.

Як видно, найбільший коефіцієнт деполаризації притаманий симетричній структурі, притаманній кульовій формі, але його значення 0,69, а не 0,33, як наведено у роботі [8]. Близьке значення мають частинки з $\ell/d = 1/2$, що для деяких випадків може бути важливим.

Таблиця 1 – Коефіцієнт деполаризації для різних співвідношень ℓ і d

| ℓ/d | $1/1$ | $1/2$ | $1/4$ | $1/8$ | $1/16$ | $1/32$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| F | 0,69 | 0,35 | 0,13 | 0,04 | 0,014 | 0,004 |

Як показано у [2], різке зростання захисних властивостей металополімерного композиту (з наповнювачем з FeO, Fe₃O₄) відбувається за різкого зростання провідності матеріалу, коли концентрація провідних частинок складає 12–14 % (за вагою). Очевидно, це відбувається за досягнення концентрації межі протікання, що узгоджується з положеннями електродинаміки суцільних середовищ та з результатами теоретичних та експериментальних досліджень для мідного наповнювача. Тобто, межа протікання електричного струму досягається за появи контакту між частинками наповнювача.

Для прогнозування захисних властивостей екрануючих матеріалів, критичну концентрацію, тобто концентрацію наповнювача, коли відбувається контакт між частинками наповнювача треба розраховувати, для цього доцільно застосовувати формулу Оделевського. Для розрахунку реальної діелектричної проникності суміші, яка заснована на її залежності від геометричних розмірів радіопоглинального наповнювача у вигляді резистивних диполів, їх об'ємних концентрацій та діелектричних характеристик матеріалів матриці та наповнювача.

$$\varepsilon = \varepsilon_M \left[1 + \frac{V_N (\varepsilon_N - \varepsilon_M)}{(1 - V_N/V_K) F (\varepsilon_N - \varepsilon_M) + \varepsilon_M} \right],$$

де ε_M – діелектрична проникність матеріалу матриці; ε_N – діелектрична проникність наповнювача; F – коефіцієнт деполаризації; V_N – об'ємна концентрація наповнювача; V_K – критична об'ємна концентрація наповнювача, за якої екрануючі частинки контактують між собою, V_K визначається як

$$V_K = \frac{[3F(1-F)]^{0,6}}{[4F\sqrt{\ell/d} + (1-F)/\sqrt{\ell/d}]^{0,6}}.$$

Враховуючи значну залежність електрофізичних параметрів від V_N та V_K , останній доцільно розраховувати для різних співвідношень довжини і діаметра екрануючих частинок. На рис. 1 наведено залежність критичної концентрації V_K (%) частинок від безрозмірного параметра ℓ/d .

З отриманих даних видно, що найнесприятливішим співвідношенням ℓ/d , на відміну від наведеного у [8], є 2/1, а відсоток вмісту екрануючої субстанції, який забезпечує високі захисні властивості зростає зі збільшенням співвідношення ℓ/d .

Але отриманий результат суперечить надійним експериментальним даним. В роботі [2] показано, що ефекти підвищення провідності й зростання захисних властивостей відбуваються за вмісту екра-

нуючої субстанції 12–14 % у залежності від дисперсності залізорудного пилу.

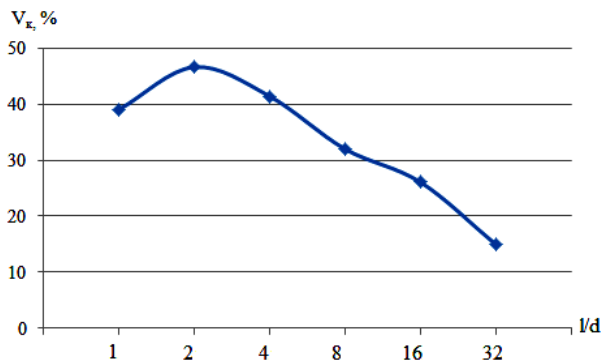


Рис. 1. Залежність критичної концентрації екрануючих частинок від їх геометричних параметрів

У роботі [11] показано, що за переважного розміру 12 мкм спектр розмірів частинок залізорудного концентрату досить широкий, це ж стосується розподілу розмірами частинок залізорудного пилу [2]. Тобто у цих випадках не можна розглядати якісь визначні геометричні параметри частинок. Враховуючи, що гранулометричний аналіз здійснювався методом седиментації, а вихідний залізорудний концентрат отримувався методом флотації, розміри l і d не можуть суттєво відрізнитися. Тобто, потребує тлумачення низький відсоток вмісту екрануючого матеріалу порівняно з розрахунковим. З цією метою було проведено металографічні дослідження зрізу металополімерного матеріалу (рис. 2).

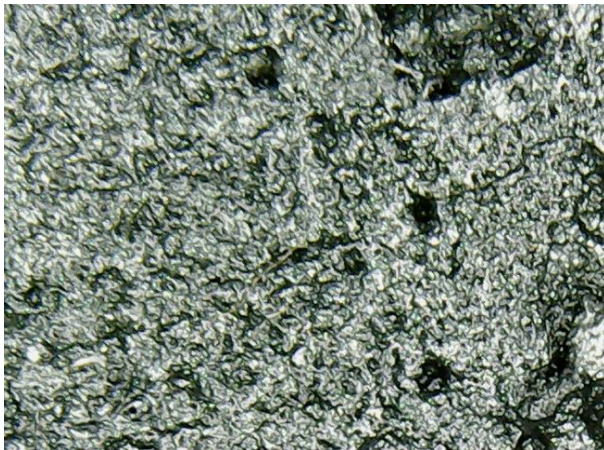


Рис. 2. Поверхня металополімерного матеріалу на основі латексу та залізорудного концентрату (вміст екрануючої субстанції 15 %, збільшення $\times 200$).

Аналіз рис. 2 свідчить, що залізорудний концентрат, не дивлячись на ретельне перемішування із застосуванням ультразвукової обробки утворює у тілі матриці хаотично розташовані протяжні структури (чорний колір). Це обумовлює контакт окремих провідних частинок з утворенням довгих ланцюгів. При цьому середній розмір окремих частинок 150–200 мкм.

Таким чином, наведені розрахункові підходи дають коректні результати за застосування у якості

наповнювача спеціально виготовлених частинок фіксованих розмірів – потрібної довжини та діаметру. Для умовно круглих частинок, тобто приблизно однакових у середньому значень l і d та малих розмірів (принаймні до 100–150 мкм, а можливо і більше) коефіцієнти екранування та відбиття доцільно визначати за електрофізичними та магнітними властивостями матеріалів.

Для малих концентрацій наповнювача (до 20 %) формулу Оделевського для сумішей можливо привести до співвідношення типу формули Дебая для діелектричної проникності, обумовленою поляризаційним процесом типу релаксації [12]. Розрахунок діелектричної проникності матеріалу виконується за формулою, аналогічною формулі Дебая за умови неперервного спектра часу релаксації (довжин хвиль релаксації) з даними коефіцієнтами α_1 , α_2 , α_3

$$\varepsilon = \varepsilon_m + \frac{D\alpha_1\alpha_2}{1 + (\lambda_p/\lambda)^{1-\lambda}}$$

де ε_m – відносна діелектрична проникність матеріалу матриці; λ – довжина електромагнітної хвилі у вільному просторі; D – діаметр релаксації.

$$D = \frac{\varepsilon_m V_n}{F}, \quad \lambda_p = \frac{\varepsilon_m \rho_n}{60F},$$

де ρ_n – питомий опір наповнювача.

Коефіцієнт λ_1 приблизно враховує орієнтацію вектора напруженості електричного поля. Для хаотичного розташування волокон або частинок приблизно круглої форми він дорівнює 0,33.

У загальному випадку емпіричні коефіцієнти λ_2 та λ_3 визначаються експериментально, виходячи зі складу та технології виготовлення матеріалу й враховують необхідність збільшення концентрації наповнювача у матриці порівняно з теоретичною та розкид (спектр) довжини хвилі релаксації. Для малих концентрацій та відношень l/d принаймні до 4 $\lambda_2 \approx 0,5-0,6$, $\lambda_3 \approx 0,15-0,20$.

У такий спосіб можна, з прийнятною похибкою, оцінити відбивальні властивості проектованого матеріалу, а також визначити загальні поглинальні властивості, виходячи з електрофізичних та магнітних властивостей компонентів проектованого електромагнітного екрана.

Висновки

1. При проектуванні композиційних металополімерних матеріалів критичною для захисних властивостей матеріалу є морфологія частинок наповнювача. Різке зростання коефіцієнтів екранування відбувається за концентрацій, коли частинки наповнювача контактують між собою. Найбільш критична концентрація (47 %) для частинок (волокон) зі співвідношенням довжини та товщини (діаметра) – 1:2. Зі збільшенням співвідношення критична концентрація монотонно зменшується до 15 % (1:32).

2. Встановлено, що розрахунок за формулою Оделевського й визначення критичних концентрацій

для умовно точкових частинок наповнювача (нано- та мікророзмірів) дає некоректні результати. Для сферичних частинок наповнювача критична концентрація (розрахункова) – 39 %, для точкових (експериментальних) – 12–15 %.

3. Для дрібнодисперсного наповнювача, принаймні до розмірів частинок 150–200 мкм визначення (прогнозування) захисних властивостей метало-

полімерних матеріалів, зокрема коефіцієнта відбиття, доцільно здійснювати, виходячи з електрофізичних та магнітних властивостей компонентів композиційних матеріалів.

Достатньо коректні результати отримані за використання формули Дебая для діелектричної проникності матеріалу, обумовленої поляризаційними процесами типу релаксації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh B.V., Radionov A.V. A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. № 4. P.14–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2018.04.014>
- Glyva V., Podkopaev S., L. Levchenko, N. Karaieva, K. Nikolaiev, O. Tykhenko, O. Khodakovskyy, B. Khalmuradov. Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, Iss. 1/5 (91). PP. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123622>
- Mondal S., Ganguly S., Das P., Khastgir D., Das N. C. Low percolation threshold and electromagnetic shielding effectiveness of nano-structured carbon based ethylene methyl acrylate nanocomposites // *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 119. P. 41–56.
- Sukach, S., Riznik, D., Zacheпа, N., Chencheyov, V. (2020). Normalization of the Magnetic Fields of Electrical Equipment in Case of Unauthorized Influence on Critical Information Infrastructure Facilities. *Soft Target Protection*, 337–349. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1755-5_28.
- Богуш В.А. Модифицирование водными растворами углеродосодержащих иглопробивных полотен для экранов электромагнитного излучения. Доклады БГУИР. 2016. №3 (97). С. 95-98.
- Valentyn Glyva V., Kasatkina N., Nazarenko V., Burdeina N., Karaieva N., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Khalmuradov B., Khodakovskyy O. Development and study of protective properties of the composite materials for shielding the electromagnetic fields of a wide frequency range. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, Iss. 12 (104). PP. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.201330>
- Агафонова А.С., Беляев А.А., Кондрашов Э.К., Романов А.М. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном. *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3 (28). С. 56–59.
- Краев И.Д., Образцова Е.П., Юрков Г.Ю. Влияние морфологии магнитного наполнителя на радиопоглощающие характеристики композиционных материалов. *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 10–14.
- Беспалова Е.Е., Беляев А.А., Широков В.В. Радиопоглощающие материалы для СВЧ-излучения высокой мощности. *Труды ВИАМ*. 2015. №3. С. 43–49.
- Drnота A., Koselj J., Drogenik M., Žnidaršič A. Electromagnetic wave absorption of polymeric nanocomposites based on ferrite with a spinel and hexagonal crystal structure. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2012. 324(6). PP. 1225–1229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.11.015>.
- Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 6/5 (96). P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150778>
- Хмельник Г.И., Бибиков С.Б. Статистический анализ зависимости параметров распределения Дебая от удельных сопротивлений слоев многослойного РПП. *Технологии электромагнитной совместимости*. 2012. № 4(43). С. 45–51.

Received (Надійшла) 17.07.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.08.2020

Improving the efficiency of composite electromagnetic screens by the adjustment of the ferromagnetic filler morphology

N. Kasatkina, O. Tykhenko, O. Panova, Y. Biruk

Abstract. It is established that when designing composite metal-polymer electromagnetic screens it is necessary to take into account the morphology of the particles of the shielding substance - at least the ratio of the length and thickness of individual particles. It is determined that the sharp increase in the protective properties occurs at those concentrations of shielding elements, which provide their contact with each other (critical concentration). The highest critical concentration (up to 47%) corresponds to the ratio between the length and diameter of the particles of 1: 2. The critical concentration decreases monotonically with the increase of the ratio. When the ratio reaches 1:32, it is 15%. The incorrect results of calculating the dielectric constant of composite materials to determine the shielding coefficients, in particular the reflection coefficient of electromagnetic waves, are shown to be the product of the wrong calculation of depolarization coefficients, which are decisive for the determination of the critical volumetric concentrations of conductive substance in the composite matrix. In turn, the value of the critical concentration is included in the Odelevskiy's formula for calculating the dielectric constant of heterogeneous composite materials. The presented calculations on the influence of the shielding elements length to diameter ratio are applicable (prognosis of the functionality) for composites containing the same specially made shielding elements only. The calculation results for conditionally round (point) shielding particles do not coincide with reliable experimental data. For such filler the critical concentration (by weight) is 12–15%. The prediction of the protective properties of composites containing fine substance (particle size below 150–200 μm) should be carried out on the basis of determining the electrophysical properties of the mixture. The adaptation of the Debye's formula for the dielectric constant of the material is offered for such calculations.

Keywords: electromagnetic screen, composite material, depolarization coefficient, Debye's formula.