

Г. М. Кочетов, Д. М. Самченко, О. В. Ластівка

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ РОЗРОБЛЕННЯ РІДКИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

Анотація. Показано, що в умовах підвищення амплітуд та розширення частотного спектра техногенних електромагнітних полів найбільш прийнятними екрануючими матеріалами є композити з потрібними властивостями. Особливістю композиційних матеріалів усіх класів є відсутність стандартних довідкових даних щодо їх ефективності та електрофізичних і магнітних властивостей, які визначають коефіцієнти екранування. Для спрощення процесів проектування екрануючих сумішей доцільне попереднє розрахункове оцінювання значень діелектричної і магнітної проникностей та питомої провідності кінцевого матеріалу. Проаналізовано можливість використання для цих розрахунків співвідношень Лорентца, Максвелла-Гарнета, Оделевського та Ліхтенеккера. Показано пов'язані з цим труднощі і межі застосування та необхідність врахування морфології екрануючих частинок у матриці. Наголошено, що у процесі проектування слід враховувати залежність електрофізичних властивостей компонентів від частоти поля, яке потребує екранування. Такий підхід дозволяє отримати рідкі матеріали з різними властивостями для формування багатошарової структури: верхній шар може мати мінімальні коефіцієнти відбиття, а нижній – максимальні поглинальні властивості. Надано послідовність дій при проектуванні захисних композицій для раціоналізації проектних робіт.

Ключові слова: електромагнітне поле, екранування, композиційний матеріал, електрофізичні властивості.

Вступ

Пріоритетним напрямом досліджень та прикладних розробок у галузі екранування електромагнітних полів є створення захисних композицій на основі лакофарбових та полімерних матеріалів. Найбільш прийнятними основами (матрицями) є фарби, що обумовлюються їх високими функціональними властивостями – зчеплення з поверхнею нанесення, незначна деградація внаслідок фізико-хімічних впливів. Але застосування фарб у процесі проектування захисних композицій має низку проблем. Додавання до фарби екрануючих домішок може критично змінювати адгезійні та когезійні властивості носія, а також робить непередбачуваними електрофізичні та магнітні властивості суміші (питому електропровідність, діелектричну та магнітну проникність). Визначити функціональні параметри кінцевого продукту можливо експериментально, але це вимагає виготовлення та випробування великої кількості дослідних зразків, значної витрати коштів і часу, і не є раціональним. Тому доцільно розробити цілісну систему попереднього оцінювання необхідних властивостей композиції, які забезпечують потрібні захисні властивості матеріалу у залежності від амплітудно-частотних характеристик електромагнітних полів, які потребують екранування.

Огляд останніх публікацій за темою дослідження. Розробленню рідких композицій для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону та електричних і магнітних полів наднизьких частот приділяється багато уваги. Більшість робіт є експериментальними, що пояснюється зазначеним вище. Так, у дослідженнях [1, 2] на стандартному синтетичному носії отримані матеріали малої товщини (до 100 мкм) з високими коефіцієнтами екранування (20 дБ і вище). Їх недоліком є висока вартість наповнювачів (нанотрубки, графені, графітизована сажа) та наявність кількох компонентів наповнювача, що робить їх метастабільними. У роботі [3] пропонується носій на водній основі. Слід зазначити, що водно-емульсійна фарба, у якості матриці показала найгірші результати [4]. Крім того,

у матеріалі на основі залізородного концентрату низькі коефіцієнти екранування і не відповідають сучасним вимогам. Значна частина досліджень присвячена застосуванню наноматеріалів у якості екрануючого наповнювача [5]. Такі матеріали мають велику вартість через складність технологій отримання магнітної рідини з вмістом наночастинок. Коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль композиційних матеріалів принаймні у декілька разів нижчі, ніж у металів та сплавів. Узгодженість імпедансу поверхні з показником повітря (377 Ом) знижує загальний коефіцієнт екранування. У розробці [6] пропонується створення градієнтних магнітних властивостей матеріалу. Але оброблення рідкої композиції неоднорідним полем дозволяє отримати градієнт тільки під час виготовлення матеріалу, а не у процесі його нанесення на поверхню. Тому доцільно розглядати багатошарові структури з малими товщинами шарів, але різними фізичними властивостями [7]. Для забезпечення високої ефективності багатошарових структур потрібне визначення електрофізичних і магнітних властивостей кожного шару, що потребує коректних розрахункових методів. Тому доцільним є обґрунтування та розроблення певного алгоритму щодо проектування захисних матеріалів (у тому числі і багатошарових) для безпосереднього нанесення на елементи будівель і конструкцій.

Мета роботи – розроблення концептуальних засад проектування рідких композицій для екранування електромагнітних полів широких частотних діапазонів.

Викладення основного матеріалу

Для проектування захисних властивостей композиції необхідно попередньо оцінити її електрофізичні та магнітні властивості з урахуванням об'ємної частки екрануючого наповнювача у діелектричній матриці. Для визначення магнітної проникності суміші існує декілька можливостей розрахунку. Теоретичною основою розрахунків для матеріалів з впливом геометричної структури, наприклад магнітодіелектриків, є поняття структурного фактору розмагнічування:

$$\mu_k = B/(\mu_0 H) = \mu_n / (1 + N(\mu_n - 1)),$$

де μ_k – магнітна проникність композиту, μ_0 – магнітна стала, H – напруженість магнітного поля за відсутності магнітного матеріалу, μ_n – магнітна проникність частинок наповнювача, N – коефіцієнт розмагнічування.

$$N = (1 + 1/(\mu_n - 1)) / (\mu_k - 1/(\mu_n - 1)).$$

У випадку, коли μ_k набагато нижча за проникність феромагнітної фази, це співвідношення може бути використане для оцінювання структурного коефіцієнта розмагнічування. Наприклад, за $\mu_k=5$, а $\mu_n=200$ (конструкційна сталь) похибка розрахунку складає 2,5 %.

Практичне значення мають співвідношення, визначені для малого (до 0,3) заповнення матриці феромагнітним матеріалом. Розрахунок для системи регулярно розташованих частинок (формула Лорентца):

$$\mu_k = 1 + V_n(\mu_n - 1) / (1 + (1 - \mathcal{G}_n(\mu_n - 1))/3),$$

де V_n – відносна об'ємна частина наповнювача у матеріалі. Не дивлячись на певну громіздкість співвідношення, за умови немагнітності матеріалу матриці та $\mu_n \gg 0$ магнітні властивості матеріалу визначаються тільки його структурою:

$$\mu_k = (1 + 2V_n) / (1 - V_n),$$

Але для малих значень магнітної проникності (10–30), характерної для феритів, доцільно користуватися формулою Максвелла:

$$\mu_k = 1 + 3V_n(\mu_n - 1) / (\mu_n + 2),$$

Її перевагою є достатня точність за умови, що магнітна проникність матеріалу матриці відмінна від одиниці. Прийнятний збіг з експериментом дають розрахунки за формулою Ліхтенеккера:

$$\mu_k = \mu_n^{V_n} \mu_m^{(1-V_n)},$$

де μ_m – магнітна проникність матеріалу матриці.

$$\text{За } \mu_m=1, \mu_k = \mu_n^{V_n}.$$

У загальному випадку це співвідношення має обмеження – воно передбачає постійне зростання магнітної проникності композиту із збільшенням магнітної проникності наповнювача, що не зовсім коректно. Крім того передбачається, що частинки наповнювача мають форму, близьку до сферичної, що на практиці не завжди відповідає реальним формам наповнювача. Ці особливості розглянемо нижче.

Формула Ліхтенеккера дає прийнятний результат у разі заміни магнітної проникності на провідність σ . А цей параметр σ критичний за досягнення перколяційного ефекту – зростання провідності композиту внаслідок формування провідних витягнутих структур:

$$\sigma_k = \sigma_n^{V_n} \sigma_m^{(1-V_n)},$$

де σ_k , σ_n , σ_m – питомі провідності композиту, наповнювача та матриці.

Як зазначалося, для більш точного визначення магнітних властивостей магнітодіелектрика необхідно

враховувати морфологію частинок наповнювача – співвідношення довжини та діаметру частинок. Як показано у роботі [8], найприйнятнішими співвідношеннями є значення 2/1. Цей параметр враховує коефіцієнт деполяризації F :

$$F = \ln(2l/d) / (1/d)^2,$$

де l – довжина частинки, d – діаметр.

Зазвичай частинки різняться за параметрами, тому у практичних розрахунках доцільно користуватися середніми значеннями для подовжених структур. Ще одним важливим параметром композиту, принаймні для визначення коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль, є діелектрична проникність матеріалу. Ефективну діелектричну проникність можна оцінити, виходячи зі співвідношення Максвелла-Гарнета:

$$\frac{\varepsilon_k - \varepsilon_m}{\varepsilon_k + 2\varepsilon_m} = V_n \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_m}{\varepsilon_n + 2\varepsilon_m},$$

де ε_k , ε_m , ε_n – відповідно діелектричні проникності композиту, матриці та наповнювача. Співвідношення дає прийнятні результати за $V_n < 1/3$. Такі пропорції прийнятні з огляду на те, що велика кількість наповнювача може критично впливати на адгезійні і когезійні властивості кінцевого матеріалу.

Для визначення критичного вмісту наповнювача, за якого різко зростає провідність матеріалу, доцільно скористатися формулою Оделевського:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_m \left[1 + \frac{V_n(\varepsilon_n - \varepsilon_m)}{(1 - V_n/V_k)F(\varepsilon_n - \varepsilon_m) + \varepsilon_m} \right],$$

де V_k – критична об'ємна концентрація наповнювача, за якої екрануючі частинки контактують між собою.

V_k визначається як:

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

Застосування наведених вище співвідношень допомагає певним чином раціоналізувати як обирання компонентів композиції, так і їх співвідношення у залежності від мети розробки. Слід враховувати, що усі розрахунки містять об'ємні частки матеріалів, що не завжди зручно. За додавання у рідкий матеріал насипного наповнювача необхідно перераховувати густини у твердому стані у об'ємні, виходячи з густин наповнювача і матриці. При цьому важливою може бути зміна густини матеріалу матриці у процесі висихання або полімеризації.

У процесі проєктування захисних сумішей існує ще одна проблема, пов'язана з вихідними даними – деяка відмінність стандартних проникностей матеріалів від проникностей у дрібнодисперсній субстанції (вона зменшується, наприклад, для традиційних феромагнітних матеріалів – заліза, нікелю, пермалоїв). Тому у процесі проєктування слід робити деякий запас по потрібним властивостям.

Застосування співвідношення Ліхтенеккера може давати некоректний результат через окислення поверхонь екрануючих частинок, що заважає прояву перколяційного ефекту. Це треба враховувати обираючи компоненти композиції. Ще однією проблемою є

частотна залежність магнітної проникності. Наприклад, для заліза, проникність по поглинанню за підвищення частоти поля від 1 ГГц до 10 ГГц знижується з 20–22 до 1–2. Тому у практичній діяльності необхідні дані потрібно визначати експериментально, або з'ясувати із спеціальних наукових джерел.

Проектування рідких екрануючих сумішей доцільно здійснювати за певним алгоритмом. На першому етапі необхідно з'ясувати амплітудно-частотні характеристики електромагнітного поля, яке потребує екранування та можливе співвідношення захисту за рахунок відбиття та поглинання електромагнітних хвиль. На другому етапі визначається кількість шарів матеріалу та електрофізичні і магнітні властивості кожного шару. На третьому етапі розраховуються співвідношення параметрів компонентів та обираються прийнятні для цього матеріали матриці та наповнювача.

Враховуючи практично повну відсутність довідкових даних щодо сучасних композиційних матеріалів та багатьох прийнятних для їх виготовлення компонентів такий підхід певним чином спростить проектування композицій для екранування електромагнітних полів визначених частот і смуг частот потрібної ефективності.

Висновки

1. Відсутність довідкових даних щодо екрануючих властивостей композиційних матеріалів та їх електрофізичних і магнітних властивостей ускладнює процес розроблення захисних матеріалів і конструкцій та потребує попереднього розрахункового оцінювання прийнятних параметрів.

2. Визначення діелектричної та магнітної проникностей і питомої провідності кінцевого матеріалу доцільно здійснювати з використанням співвідношень Лорентца, Максвелла-Гарнета, Оделевського та Ліхтенеккера. При цьому слід враховувати форму і розміри екрануючих частинок у матриці та визначати межу перколяційного ефекту – різкого зростання провідності внаслідок контакту частинок наповнювача. Слід враховувати частотну залежність властивостей наповнювача.

3. Проектування композиційного матеріалу слід здійснювати у певній послідовності, виходячи з необхідного співвідношення захисту за рахунок відбиття та поглинання електромагнітних хвиль і пов'язаної з цим кількості та характеристик окремих шарів матеріалу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Butenko, O., Boychuk, V., Savchenko, B., V Kotsyubynsky, Barsukov, V. Pure ultrafine magnetite from carbon steel wastes. *Materials Today: Proc.*, 2019, v. 6, pp. 270–278 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478531832399X>
2. Senyk, I., Kuryptia, Y., Barsukov, V., Butenko, O., Khomenko, V. Development and application of thin wide-band screening composite materials. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2020, 21(4), pp. 771–778.
3. Tudose Ioan Valentin, Mouratis Kyriakos, Ionescu Octavian Narcis, Romanitan Cosmin, Pachiu, Cristina, Popescu Marian, Khomenko Volodymyr, Butenko Oksana, Chernysh Oksana, Kenanakis George, Barsukov Viacheslav Z., Sucheia Mirela Petruta, Koudoumas Emmanouel, *Novel Water-Based Paints for Composite Materials Used in Electromagnetic Shielding Applications, Nanomaterials*, 2022, 12(3), 487, <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/3/487>
4. V. Glyva, V. Bakharev, N. Kasatkina, O. Levchenko, L. Levchenko, N. Burdeina, S. Guzii, O. Panova, O. Tykhenko, Y. Biruk. 2021. Design and study of protective properties of liquid composite materials for screening electromagnetic fields *European Journal of Enterprise Technologies. Materials Science*. Vol 3/6, No (111), pp.25-31. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.231479
5. Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh B.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/technd2018.04.014>
6. Градієнтний електромагнітний екран Пат. 144619, Україна МПК G12B 17/00 (2020.01). Глива В.А., Кажан К.І., Левченко Л.О., Панова О.В., Тихенко О.М., Халмуродов Б.Д., Володілець: Глива В.А., Кажан К.І., Левченко Л.О., Панова О.В., Тихенко О.М., Халмуродов Б.Д. № u 2020 03224; заявл. 28.05.2020; опубл. 12.11.2020, Бюл. № 19.
7. Бурдейна Н.Б., Бірук, Я.І., Ніколаєв К.Д. (2023). Розроблення матеріалів багатшарової структури градієнтного типу на основі рідких композицій для екранування електромагнітних полів. Екологічна безпека та природокористування, 45 (1), 68–75. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.68-75>
8. Касаткіна Н. В., Тихенко О. М., Панова О. В., Бірук Я. І. Підвищення ефективності композиційних електромагнітних екранів регулюванням морфології феромагнітного наповнювача. «Системи управління навігації та зв'язку», - 2020. Вип. № 3(61), С. 115-119. doi: 10.26906/SUNZ.2020.3.115

Received (Надійшла) 28.02.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.05.2023

Methodological principles of development of liquid mixtures for the shielding of electromagnetic fields

G. Kochetov, D. Samchenko, O. Lastivka

Abstract. It is shown that in conditions of increasing amplitudes and expanding the frequency spectrum of man-made electromagnetic fields, the most suitable shielding materials are composites with the required properties. A feature of composite materials of all classes is the lack of standard reference data on their efficiency and electrophysical and magnetic properties, which determine the shielding coefficients. To simplify the design processes of shielding mixtures, it is advisable to make a preliminary calculation of the values of the dielectric and magnetic permeability and the specific conductivity of the final material. The possibility of using the Lorentz, Maxwell-Garnett, Odelevsky and Lichtenecker ratios for these calculations was analyzed. The related difficulties and limits of application and the need to take into account the morphology of shielding particles in the matrix are shown. It is emphasized that the dependence of electrophysical properties of components on the frequency of the field that requires shielding should be taken into account in the design process. This approach makes it possible to obtain liquid materials with different properties for the formation of a multilayer structure: the upper layer can have the minimum reflection coefficient, and the lower one - the maximum absorption properties. The sequence of actions in the design of protective compositions for the rationalization of project works is given.

Keywords: electromagnetic field, shielding, composite material, electrophysical properties.