

PACS numbers: 07.57.-с, 78.20.Ci, 78.67.-n, 78.70.Gq, 81.16.-с, 82.35.Nр, 89.20.Bb

Захист від надвисокочастотного електромагнетного випромінення багат шаровими полімеркомпозитними покриттями

В. М. Коржик¹, П. Д. Стухляк², О. М. Берднікова^{1,3}, О. В. Тотосько²,
Д. П. Стухляк², О. І. Дем'янов¹, К. М. Лепіліна³

¹Інститут електрозварювання ім. Е. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
вул. Руська, 56,
46001 Тернопіль, Україна

³Науково-дослідний інститут зварювальних технологій імені Є. О. Патона
в провінції Чжецзян,
вул. Фенар, 233,
311225, район Сяошань, Ханчжоу, Китайська Народна Республіка

Конструювання захисних екранів здійснюють шляхом створення покриттів з різних за складом шарів і за фізичними характеристиками наповнювачів у полімерній матриці. Виготовлення багат шарового покриття здійснювали шляхом поетапного формування різних за складом шарів з епоксидних композитів, виходячи з наступного. Під час створення композитів використано принцип зростання провідності шарів у міру наближення до тильної сторони захисного покриття. Задавали різні магнетні та діелектричні властивості матеріалів шарів для забезпечення фазово-структурних відмінностей на межі поділу фаз як в самому матеріалі, так і на межі поділу фаз шарів. Використано також тришарове покриття, виконане ультразвуковою металізацією полімеру зі збереженням принципу зміни токопровідності шарів. В дослідженнях використано вуглетканину, що покрита міддю та ніклем. Шари ніклю на поверхні міді виконують дві функції: збільшують внутрішнє відбивання у матеріалі шару та захищають мідь від окиснення. В дослідженнях використано епоксидну діанову смолу марки ЕД-20 і наповнювачі. Матеріали різних шарів містять компоненти та наповнювачі нанорозмірів і близьких до нанорозмірів частинок високої очистки для дослідження взаємодії з електромагнетним випроміненням (ЕМВ). Чергуванням шарів, що вбирають, розсіюють або відбивають ЕМВ, досягали розширення діапазону частот. Використано багат шарові покриття. Виконання першого шару з діелектричного матеріалу близьким за хвильовим опором до значення хвильового опору зовнішнього середо-

вища істотно зменшить відбивання ЕМВ покриттям в цілому. Вбирання та розсіювання електромагнетної енергії реалізується на межі поділу шарів з різними коефіцієнтами відбивання. Слід зауважити, що спостерігається взаємодія електромагнетної енергії з дисперсними частинками наповнювачів, які мають високу електропровідність, що додатково розширює діапазон частот під час екранування ЕМВ.

The development of modern industry raises the problem of creating new materials for various functional purposes. One of the most important tasks is to develop protective shields against electromagnetic radiation (EMR), including at high frequencies. The primary task in this area of research is to expand the frequency range of protective shielding for the equipment and biological objects. The design of protective shields is carried out by creating multilayer coatings with different properties of the layers. Achievement of the specified characteristics is carried out by adjusting the composition of the material of the layers. The use of polymeric materials is promising in solving this problem. The modification and filling of layers based on epoxy composites is carried out with nanoparticles with different physical characteristics. The multilayer coating is made by phased formation of layers of different composition from epoxy composites based on the following. The principle of changing the electrophysical characteristics of the layers is used to create the composites. It is important to increase the conductivity of the layers as they approach the back of the protective shielding coating. Different magnetic and dielectric properties of the layer materials are set to ensure phase-structural differences at the interface both inside the material itself and at the interface of the layers. Many industries use large-size polymer products with long-dimensional surfaces of complex profiles. These include, in most cases, computer equipment housing parts. The use of such products made of thermoplastic polymeric material requires their protection against external influences, including external intrusion, electromagnetic radiation of various frequencies. In this regard, for comparison, a three-layer metal coating is studied. Formation of it is performed by the method of arc metallization from wire under ultrasonic spraying and from metal powder on the polymeric surface of a 3-mm thick polycarbonate plate. The principle of changing the interaction of EMR with the materials of the layers, which is set by their characteristics, is preserved. Continuity of the applied layers is ensured. Studies on EMR shielding are carried out in the frequency range of 30–3000 MHz. Epoxy-diane resin of ED-20 grade and fillers are used in the experiments. In the formation of a multilayer epoxy coating, a carbon fibre coated with copper and nickel is used as a base. The nickel layer on the copper surface performs two functions: it increases the internal reflection in the layer material and protects copper against oxidation. This ensures the stability of electrophysical characteristics. The back layer of the protective coating is the specified conductive carbon fibre + ED-20, the backside of which is additionally coated with a composite containing dispersed copper. On the opposite side, the next layer is applied to the composite fabric: Co + ED-20. Next, a layer is formed from the material—powder (Co + Ni + Fe + Si + C) + ED-20. The closest layers to the EMR source are made on the base of ED-20 with nanocarbon multi-

layer tubes. In this case, we should expect an improvement in the absorbing properties of EMR. By alternating layers, which absorb, scatter, or reflect electromagnetic waves, the frequency range is expanded. Multilayer coatings are used. Making the outer layer of dielectric material close in wave impedance to the value of the wave impedance of the external environment will reduce significantly the reflection of EMR by the coating as a whole. The absorption and scattering of electromagnetic energy is realized at the interface of layers with different reflection coefficients. The interaction of electromagnetic energy with dispersed particles of fillers having high electrical conductivity is observed that additionally provides an expansion of the frequency range of protection against EMR. It has been established experimentally that the use of epoxy multilayer and three-layer metal coatings on a polycarbonate plate provides a different shielding mechanism.

Ключові слова: екранування, електромагнетне випромінення надвисокої частоти, епоксидні композити, багатошарові покриття, вуглетканина, поглинання, відбивання.

Key words: shielding, high-frequency electromagnetic radiation, epoxy composites, multilayer coatings, carbon fabric, absorption, reflection.

(Отримано 3 березня 2024 р.; остаточний варіант — 17 квітня 2024 р.)

1. ВСТУП

Конструювання та виготовлення захисних екранувальних покриттів для різних частотних діапазонів електромагнетного випромінення (ЕМВ) становлять важливу, але складну проблему для її реалізації. Даний напрям досліджень у теперішній час розвивається за рахунок створення матеріалів для багатошарових покриттів, що здатні значно поліпшити екранувальні функції в широкому діапазоні частот, в тому числі й у надвисокочастотному (НВЧ). Складний механізм поширення, відбивання, вбирання та розсіювання ЕМВ в екранувальних матеріалах, а також технологічні складності суміщення їхніх компонентів і формування у виробі з науково-прогнозованими електромагнетними характеристиками в широкому діапазоні частот зумовлюють використання різноманітних вже наявних екранувальних матеріалів і покриттів на їхній основі. Класифікацію таких матеріалів можна провести за елементним складом, мікроструктурою, фазовою організацією тощо. За фазовим складом матеріали можна розділити на гомогенні та гетерогенні, тобто ті, що складаються з однієї, двох і більше фаз [1, 2]. Гомогенні матеріали вирізняються ізотропними властивостями та характеризуються однорідною структурою. В залежності від електромагнетних властивостей їх поділяють на провідні, магнетні та діелектричні. Слід наголосити, що

теорію екранування засновано на двох фундаментальних принципах — на відбиванні та вбиранні електромагнетних хвиль під час переходу через межу поділу фаз з одного матеріального середовища до іншого. Обидва вказані ефекти понижують енергію електромагнетного поля, що пройшла за екран. Можна й дещо по іншому сформулювати фізичний сенс екранування від електромагнетних перешкод. В основі екранування ЕМВ лежать два фізичних принципи — поляризація та магнетування матеріалу в шарах екрану. Поширюючись у цих матеріалах, електромагнетне випромінення (ЕМВ) створює змінне електричне поле, енергія якого перетворюється у теплову енергію практично повністю в радіовбиральних і мінімально в радіопрозорих матеріалах. У таких матеріалах і конструкціях поряд з діелектричними та магнетними втратами мають місце дисперсія, дифракція, інтерференція та внутрішнє відбивання електромагнетних хвиль, що викликають додаткове пониження енергії ЕМВ. Вироби з зазначених матеріалів вбирають електромагнетну енергію. Основу радіовбиральних матеріалів складають органічні чи то неорганічні матеріали. Як активний вбиральний компонент, вводять порошки графіту, металів та їхніх карбідів.

Градiєнтні радіовбиральні матеріали конструктивно виконано багатошаровими; їхні структурні характеристики забезпечують задану зміну діелектричної проникності пошарово по товщині екрану. У даному випадку зовнішній шар виготовляють з твердого діелектрика з діелектричною проникністю, близькою до 1 (наприклад, з полімерного матеріалу, зміцненого кварцовим скловолокном). Наступні шари виготовляють з діелектриків із більш високою проникністю (проникність епоксидної смоли з наповнювачем становить 25). Для збільшення вказаного показника використовують графітовий пил як вбирач ЕМВ. Описана структура багатошарового покриття сприяє мінімальному відбиванню радіохвиль від поверхні покриття та збільшенню поглинання їх з проникненням у глибину покриття екрану.

З розвитком технології виготовлення композиційних матеріалів, властивості яких можуть змінюватися в широких межах шляхом підбору матеріалу зв'язувача та наповнювача, особливу увагу приділяють гетерогенним радіовбиральним середовищам. Матеріали як вбирачі ЕМВ одержують методами порошкової металургії та з використанням технології виготовлення композиційних матеріалів у випадку використання полімерних зв'язувачів. В якості вихідної сировини застосовують неорганічні порошки та волокна. Їх формують закріпленими у зв'язувальному матеріалі на основі сполук — неорганічних (оксидів Алюмінію, Титану та ін.) або органічних (термореактивних смол, полімерних матеріалів, виробів з пластмас, парафінів то-

що) [3–5]. Такі матеріали мають як високу ефективність екранування, так і значний коефіцієнт вбирання ЕМВ; однак часто застосування їх обмежено вузьким частотним діапазоном. Останні дослідження в області розробки композиційних матеріалів, спрямовані на розширення частотного діапазону електромагнетних екранів і одержання багатофункціональних конструкцій виробів у вигляді покриттів, добре представлено в роботах [2, 5–13]. Збільшення ефективності вказаних ґрадієнтних матеріалів досягали підбором шарів і розміщенням їх у порядку збільшення електричних і магнетних втрат у міру віддалення від джерела ЕМВ у системі «вільний простір–шари екрану–об’єкт захисту». Ґрадієнтні матеріали можуть бути виконані у вигляді багат шарових структур або з неперервною зміною параметрів матеріалу по глибині. Причому необхідно підбирати шарі, що розміщені ближче до джерела ЕМВ, таким чином, щоб забезпечити зростання [7–18] характеристик по внутрішньому відбиванню електромагнетних хвиль. Загальна ефективність у даному випадку визначається в основному властивостями матеріалу шарів всередині екрану [19–23].

В зв’язку з викладеним вище розробка захисних покриттів та екранів з них, у тому числі й ширококосмугових, є актуальною задачею сучасного матеріалознавства. В таких покриттях розширення діапазону захисту від електромагнетних хвиль реалізують за рахунок внутрішнього розсіювання та вбирання їхніх магнетної й електричної складових за мінімального відбивання від поверхні покриття.

Метою даної роботи є створення багат шарових покриттів для розширення частотного діапазону захисту від електромагнетних хвиль шляхом формування багат шарових покриттів з різними за складом і призначенням шарами з використанням термореактопластів (епоксидних композитів) і термопластів (полікарбонату).

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Методика створення матеріалів для екранування ЕМВ

Випробування матеріалів для екранування ЕМВ здійснювали згідно зі стандартом ASMT D4935-18 (GB/T 30142-2013, КНР). Рекомендовані значення для вимірювання екранування за частоти ЕМВ і віддалі між антеною й екранувальним матеріалом такі: 0,3 м (10–30 кГц), 0,6 м (1–18 ГГц), 1 м (30–1000 МГц), 0,3 м (18–40 ГГц). Слід наголосити, що частотний діапазон випробувань охоплює всі типи антен — кільцеву (рамкову), вертикально поляризовану монопольну, біконічну, дипольну, логаритмічну періодичну, рупорну. Принципову схему, зразки для випробувань

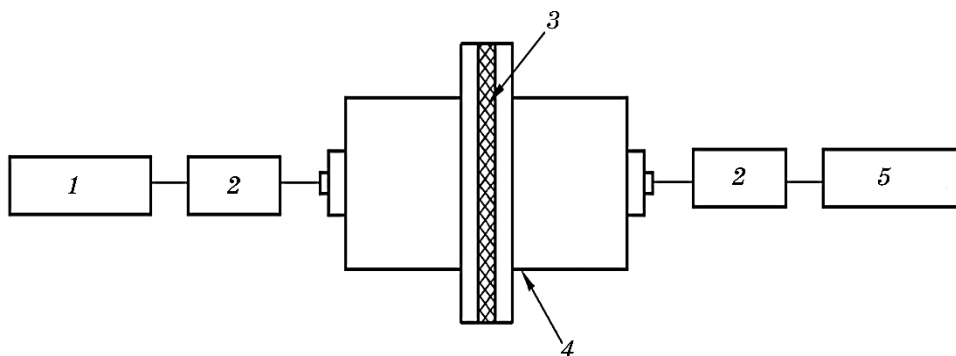


Рис. 1. Принципова схема тестової системи генератора сигналів-аналізатора спектру: 1 — генератор сигналів; 2 — атенюатор; 3 — зразок; 4 — фланцевий коаксіальний пристрій; 5 — електромагнетний аналізатор.¹

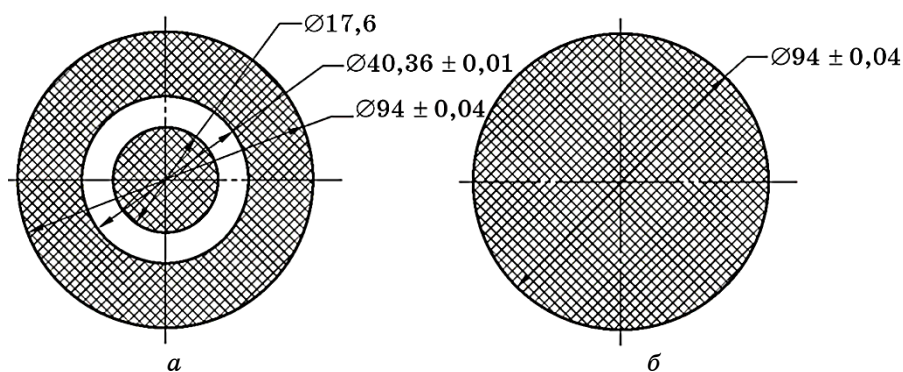


Рис. 2. Зразки для випробувань екранувальної здатності покриття: а — еталонний зразок; б — зразок для випробувань.²

та конфігураційну схему тестувань показано на рис. 1–3. Під час випробувань охоплювали діапазон частот, що використовують у роботі різних антен (табл. 1), та рекомендовані віддалі від джерела ЕМВ до зразка для випробувань (табл. 2).

2.2. Зразки для випробувань

Зразки для випробувань виготовляли у вигляді пластин з розмірами, що відповідають рис. 2, б. Зразок (екран 1) виготовлено у вигляді пластини з полікарбонату товщиною у 3,0 мм сформованим зі сторони дії ЕМВ трьома шарами: з цинку (Zn) товщиною у 50–120 мкм, міді (Cu) товщиною у 120–150 мкм і зі стопу на ос-

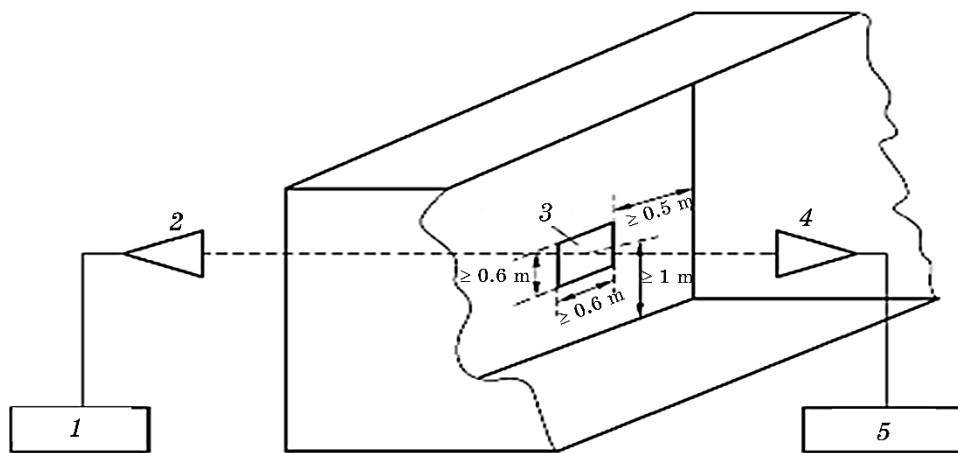


Рис. 3. Конфігураційна схема тестування методом екранованого приміщення (вікно 0,6 м): 1 — обладнання для запуску; 2 — запускна антена; 3 — випробувальний зразок; 4 — приймальна антена; 5 — пристрій для одержання сигналу.³

ТАБЛИЦЯ 1. Антени, що використовують у кожному діапазоні частот.⁴

Діапазон частот	Тип антени
10 кГц–30 МГц	Кільцева (рамкова)
10 кГц–30 МГц	Вертикально поляризована монопольна
20 МГц–200 МГц	Біконічна
100 МГц–1000 МГц	Дипольна
200 МГц–1000 МГц	Логаритмічна періодична
1 ГГц–40 ГГц	Рупорна

нові кобальту (Co(71.2) + Ni + Fe + Si + C) товщиною у 150 мкм.

Також виготовлено пластину для випробувань (екран 2) у вигляді багат шарового покриття наступним чином (рис. 4): як зв'язувач використано епоксидну діанову смолу (марки ЕД-20) та затверджувач — поліетиленполіамін (ПЕПА).

Використання вказаних інгредієнтів уможлиблює формувати виріб за кімнатних температур. Тильний шар захисного покриття виконано з ЕД-20, що містить 50% дисперсної міді високої очистки. Наступний шар виконано на основі токопровідної вуглетканини товщиною у 0,3–0,35 мм, що має мідне покриття. Для захисту від окиснення на шар міді нанесено шар нікелю. Фактично така вуглетканина з металевими шарами на поверхні складається з трьох матеріалів, що сприяє зміні механізму взаємодії їх з ЕМВ. Далі таку тканину просочують епоксидним композитом

ТАБЛИЦЯ 2. Рекомендована віддаль між антеною та матеріалом екрану.⁵

Діапазон частот	Віддаль
10 кГц–30 МГц	0,3 м
10 кГц–30 МГц	0,3 м
30 МГц–1000 МГц	1,0 м
1 ГГц–18 ГГц	0,6 м
18 ГГц–40 ГГц	0,3 м
10 кГц–30 МГц	0,3 м

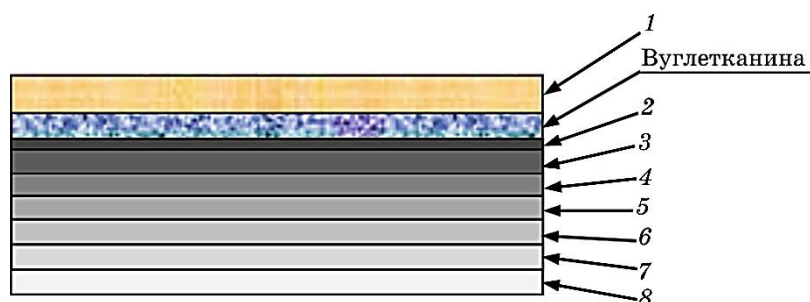


Рис. 4. Схематичне зображення епоксикомпозитного багатошарового покриття (екран 2). 1 — шар епоксикомпозиту (ЕК), що містить 50% дисперсної міді; вуглетканина, просочена ЕК, що містить 50% порошку кобальту; 2 — ЕК, що містить 50% порошку кобальту; 3 — ЕК, що містить 50% порошку кобальту наступного складу $\text{Co}(71,2) + \text{Ni}(12,2) + \text{Fe}(6,2) + \text{Si}(7,3) + \text{C}(3,2)$; 4 — ЕК, що містить 30% порошку кобальту наступного складу $\text{Co}(71,2) + \text{Ni}(12,2) + \text{Fe}(6,2) + \text{Si}(7,3) + \text{C}(3,2)$; 5 — ЕК, що містить нанорозмірні вуглецеві багат шарові трубки (НВБТ) (співвідношення компонентів, мас.ч.: ЕД-20:ПЕПА:НВБТ = 100:11:10); 6 — ЕК, що містить НВБТ, поєднаний зі спиртом ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) (співвідношення компонентів, мас.ч.: ЕД-20:ПЕПА:НВБТ: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ = 100:11:12:12); 7 — ЕК, що містить нанорозмірні вуглецеві багат шарові трубки (НВБТ) (співвідношення компонентів, мас.ч.: ЕД-20:ПЕПА:НВБТ = 100:11:3); 8 — ЕК, що містить нанорозмірні вуглецеві багат шарові трубки (НВБТ) (співвідношення компонентів, мас.ч.: ЕД-20:ПЕПА:НВБТ = 100:11:1.3). Товщина шару складає 0,15–0,2 мм.⁶

(ЕД-20 + Со у співвідношенні 1:1). Дисперсність порошку Со — 1–2 мкм (з чистотою 99,99%). Далі формують два шари, на основі ЕД-20 та з суміші порошків $\text{Co}(71,2) + \text{Ni}$, Fe, Si, C (решта). Далі формують чотири шари на основі ЕД-20, що містить нановуглецеві багат шарові (НВБШ) трубки різної концентрації, та технологічних добавок.

2.3. Металографічні дослідження

Металографічні дослідження одержаних зразків виконували за допомогою світлової мікроскопії. Зразки для досліджень готували на високошвидкісних полірувальних кругах з використанням алмазних паст різної дисперсності. Дослідження мікроструктури виконували на металографічному мікроскопі Zeiss AXIO Imager M2. Зображення мікроструктур одержано за допомогою цифрової фотокамери OLYMPUS-BX3.

3. РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

Запропоновано багат шарові покриття для захисту від електромагнетного випромінення (ЕМВ) на основі епоксидних композитів, що містять різні функціональні шари. Як правило, використання матеріалів для вузького діапазону частот не ефективне навіть за незначної зміни частоти. Товщина таких покриттів вимірюється половиною довжини хвилі, що обмежує його широке використання в діапазоні промислових частот.

Формування покриттів на пластині з полікарбонату товщиною у 3,0 мм здійснювали послідовно: з цинку, міді та на основі стопу Со з використанням методу плазмового надзвукового напорошення. Виявлено істотне збільшення екранувальних властивостей. Вказане композиційне покриття сформовано з суцільних шарів, а ефективність захисту об'єкта реалізовано, ймовірно, за рахунок відбивання падної хвилі ЕМВ. Результати випробувань представлено в табл. 3.

Далі здійснювали конструювання захисних покриттів шляхом створення багат шарового епоксидного покриття (екран 2). В різних шарах використовували наповнювачі, різні за складом і фізичними характеристиками, для матеріалу шарів. Схему такого

ТАБЛИЦЯ 3. Результати випробувань покриття на полікарбонаті (екран 1).⁷

Частота, МГц	SE, дБ	SE, %
30	-74,571	99,99999650
50	-63,586	99,99995720
100	-66,263	99,99997636
250	-76,019	99,9999750
500	-81,208	99,99999924
1000	-96,734	99,99999998
2000	-68,214	99,99998991
3000	-59,027	99,99987489

покриття представлено на рис. 4. Використано розмір дисперсних частинок у нанодіапазоні та близькому до нього. Як основу, використано вуглетканину, що покрита міддю та ніклем. Формування багатошарового покриття здійснювали шляхом поетапного формування різних за складом шарів з епоксидних композитів, виходячи з наступного. Забезпечували зміну магнетних і діелектричних властивостей матеріалів шарів у міру наближення до тильної сторони захисного покриття. Шари, що були сформовані у тильній частині покриття, виконано токопровідними. Під час виготовлення багатошарового покриття гарантували фазово-структурні відмінності на межі поділу фаз як між шарами, так і між поверхнею наповнювачів і зв'язувачем у композитному матеріалі шару покриття.

Експериментально встановлено зміну екранувальних характеристик пластини з нанесенням багатошарового матеріалу в залежності від частоти ЕМВ (табл. 4).

Таке виконання багатошарового екрану враховує узгодження хвильового опору поверхні екрану з хвильовим супротивом середовища, де поширюється ЕМВ. Узгодженням вбиральних характеристик матеріалів шарів у покритті, в тому числі й шару, що контактує з оточувальним простором, істотно зменшили інтегральний ефект відбивання електромагнетних хвиль. Вказаний принцип конструювання забезпечить екранування за рахунок вбирання енергії ЕМВ. У запропонованих багатошарових екранах вбирання хвилі відбувається за рахунок багаторазового перевідбивання електромагнетної хвилі всередині екрану між шарами (рис. 5). На нашу думку, вбирання електромагнетної енергії від-

ТАБЛИЦЯ 4. Результати випробувань покриття на полікарбонаті (екран 1).⁸

Результати випробувань		SE, %
Частота, МГц	SE, дБ	
30	53,3114	GB/T 30142-2013
80	35,495	GB/T 30142-2013
150	35,9944	GB/T 30142-2013
300	38,9050	GB/T 30142-2013
450	44,6881	GB/T 30142-2013
915	39,0895	GB/T 30142-2013
1000	36,0041	GB/T 30142-2013
1500	43,1591	GB/T 30142-2013
1800	39,7509	GB/T 30142-2013
2450	44,1561	GB/T 30142-2013
3000	38,1705	GB/T 30142-2013

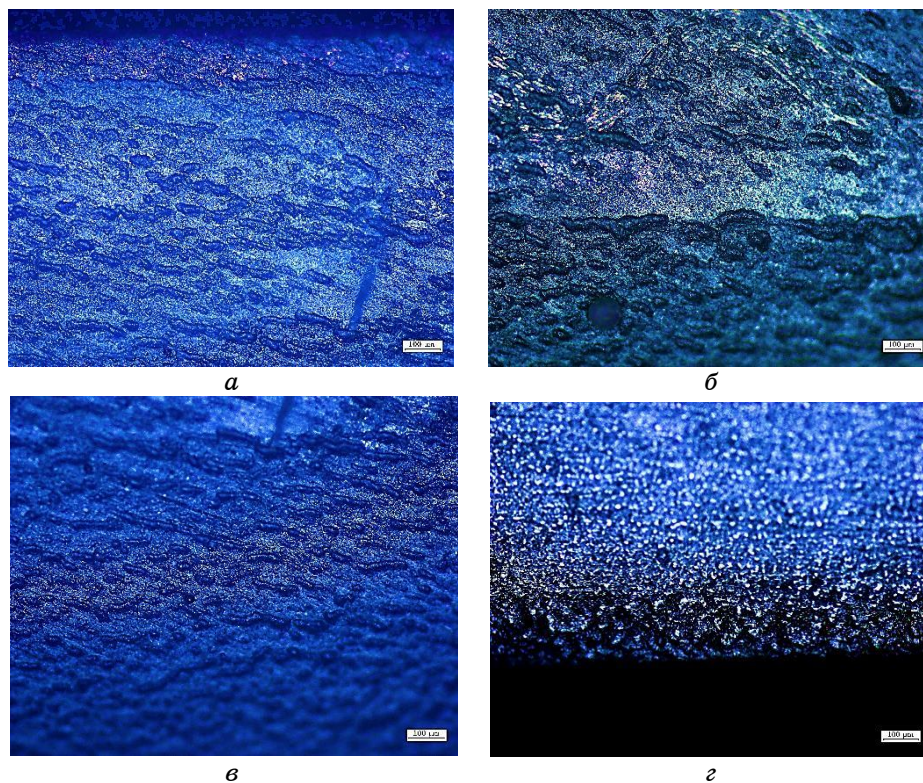


Рис. 5. Мікроструктура покриття на основі епоксидних багатошарових композитів: тильний шар (*a*) захисного покриття; токопровідна (*б*) вуглетканина + ЕД-20 + Со; ЕД-20 + порошок (Со + Ні + Fe + Si + С), шари на основі ЕД-20 + НВБТ (*в*, *г*).⁹

бувається за рахунок діелектричних, магнетних втрат і втрат на провідність, що максимально збільшило ефективність екранування. Результати досліджень добре узгоджуються з даними робіт ряду авторів [6–10].

У даному матеріалі використано принцип поступової зміни опору та провідності вільного простору на поверхні падіння електромагнетної хвилі до більш низького опору та більш високої провідності шарів покриття з наближенням до його задньої (тильної) поверхні. Цю поступову зміну може бути досягнуто зміною властивостей матеріалу, що реалізують з використанням різних вуглецевих наповнювачів. Такі композитні матеріали, крім вбирання ЕМВ, можуть значно розширити частотний діапазон за невеликої товщини покриття [15].

Доведено, що з використанням феромагнетних плівок ефективність екранування можна збільшити шляхом розбиття товстого

шару металу на більш тонкі, ізолювані один від одного шари [16]. Слід зауважити, що технологічні можливості одержання епоксидних багатошарових композитних вбиральних матеріалів дають змогу реалізувати їх у широкому діапазоні концентрацій наповнювачів. Слід очікувати ефективність використання в надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні ЕМВ. Для порошкових матеріалів, призначених для об'ємного вбирання енергії ЕМВ, одним із головних є забезпечення заданої мікроструктурної організації в шарах матеріалу [17–19]. Оцінку ролі розміру ізолюваних металевих частинок і мікрооб'єктів для екранів електромагнетного захисту наведено в роботі [20]. Максимальне ущільнення в матеріалі типу метал–оксид Алюмінію спостерігали за масового вмісту в стопах металевих компонентів у 40–50%. Збільшення відсоткового вмісту металевого компонента призводить до пониження ефекту об'ємного вбирання. Падна хвиля практично повністю відбивається. Матеріал такого шару працює як суцільний металевий екран, що і спостерігали за використанням полікарбонату з тришаровим металевим покриттям (екран 1). Такі закономірності справедливі для широкого діапазону частот і кутів падіння електромагнетних хвиль [15]. Електродинамічний розрахунок таких сумішей може бути проведений як для звичайних магнетодіелектриків з використанням ефективних показників магнетної та діелектричної проникностей. У нашому випадку важливим є конструювання як самого шару, так і багатошарового покриття з різними функціональними властивостями шарів. Слід науково направлено використовувати вихідні компоненти або їхню суміш для одержання матеріалів для різних шарів із наперед заданими властивостями. Радіовбиральні матеріали (РВМ) на основі епоксидних композитів з вуглецевим наповненням мають порівняно невелику щільність, однак товщину покриття можна регулювати в широкому діапазоні шляхом послідовного формування шарів [20].

Доведено, що найліпші електродинамічні, механічні та захисні характеристики мають багатошарові матеріали і сформовані покриття на їхній основі, що реалізовані з використанням всіх вище перерахованих механізмів взаємодії ЕМВ з екранами. Запропоновано багатошарові ферит-діелектричні матеріали з токопровідним, у тому числі й металевим, наповнювачем. Доведено ефективність використання епоксидних композитних багатошарових матеріалів, що мають плавний (поступовий) перехід від властивостей вільного простору до властивостей матеріалу шарів покриття з високими значеннями електропровідності та магнетних втрат. Водночас, для збільшення вбирання ЕМВ може бути використане резонансне вбирання енергії електромагнетного поля в окремих шарах. Епоксидні композитні матеріали можуть бути

використані, і в більшості випадків їх використовують, у вигляді покриттів.

У розробленому покритті для вбирання використовують металеві дисперсні наповнювачі, що забезпечують додаткове розсіювання ЕМВ, підвищують механічну міцність і поліпшують тепловідводні характеристики. Виходячи з результатів досліджень з'явилася можливість створення ширококутових вбирачів ЕМВ. У даному випадку слід враховувати властивості дисперсних наповнювачів у різних шарах. Запропоновані епоксидні композити можуть також бути використані як конструкційний матеріал для оболонкових виробів. Останні можуть бути виготовлені для формування полімерних композитів відомими високопродуктивними методами, у тому числі багатошаровим пресуванням під час вакуумування (епоксидні композити, реактопласти) і литвом під тиском (термопластичні матеріали) з наступним нанесенням металевих шарів (метод металізації за газотермічного напорошення).

Розробку та проєктування РВМ засновано на аналітичних методах розрахунку й експериментальних дослідженнях. Задача формування захисних покриттів полягає в тому, щоб за заданими параметрами вихідних електромагнетних полів і конструкцій вбиральних і відбивальних екранів визначити ступінь захисту. Водночас, визначають розподіл електромагнетних параметрів по товщині у багатошаровому покритті, обґрунтовують електродинамічний модель для розрахунку. На основі експериментальних досліджень проводяться розрахунки коефіцієнта відбиття або коефіцієнта проходження ЕМВ в заданому діапазоні частот. Слід зауважити, що товщина шарів легко задається конструктивно під час виготовлення РВМ. Найбільш важливим питанням під час розробки РВМ є завдання прогнозування для одержання заданого коефіцієнта відбиття (проходження) в необхідних діапазонах частот ЕМВ за заданих параметрів матеріялу екрана [22, 23].

Визначення електромагнетних параметрів компонентів композиційних матеріялів шарів, розподіл їх по його товщині, забезпечення радіотехнічних характеристик і можливості фізичної реалізації композитів з РВМ і вбирачів електромагнетного випромінювання входять в задачу синтезу за заданого частотного діапазону і їх детально проаналізовано в роботі [20]. У процесі розробки РВМ підбором спеціальних засобів і розподілом їхніх електродинамічних і електрофізичних характеристик по фазовому простору матеріялу можна одержати дуже невелике відбивання ЕМВ, практично до долей відсотків. В роботі [21] на основі Френелевої формули запропоновано методику проєктування багатошарових вбиральних екранів. Вказана методика дає змогу виконати розрахунок оптимальних ширококутових вбирачів з урахуванням

частотної дисперсії діелектричної та магнетної проникностей матеріалів шарів. Вбирання електромагнетної хвилі супроводжується омичними або гістерезисними втратами [23]. Омичні властивості матеріялу спостерігали, наприклад, у пластику з порошковим наповнювачем.

Таким чином, використання багатошарового покриття на основі епоксидних композитів поліпшує екранувальні характеристики у діпазоні частот 30–3000 МГц на 35–53 дБ, а за плазмового формування покриття за цих же частот спостерігали зменшення згасання електромагнетного випромінення на 59–96 дБ. Зі збільшенням частоти ЕМВ слід очікувати підвищення екранувальної здатності розроблених матеріалів.

4. ВИСНОВКИ

Таким чином, запропоноване багатошарове покриття на основі епоксидних композитів може бути використане як екран від електромагнетного випромінення у діпазоні частот 30–3000 МГц.

Встановлено, що рівень випромінення після екрану знижується на 35–53 дБ за вказаного епоксидного матеріялу. Із покриттями на полікарбонаті за плазмового формування трьох металевих суцільних шарів на вказаних частотах після екрану спостерігали зменшення електромагнетного випромінення на 59–96 дБ.

В розроблених матеріялах реалізовано принцип зміни електромагнетних характеристик (провідності, магнетних і діелектричних характеристик) у міру наближення до об'єкту захисту. Розроблені матеріяли та покриття на їхній основі уможливають значно розширити частотний діпазон для захисту об'єктів від електромагнетного випромінення. Зі збільшенням частоти ЕМВ слід очікувати підвищення екранувальної здатності розроблених матеріалів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Л. М. Лыньков, С. Л. Прищепа, В. А. Богуш, В. В. Соловьев, *Охрана труда и промышленная экология. Методы и средства экранирования электромагнитного излучения* (Минск: 2000).
2. Л. М. Лыньков, В. А. Богуш, В. П. Глыбин и др., *Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения* (Минск: 2000).
3. P. D. Stukhlyak, M. M. Mytnyk, V. O. Orlov, and S. O. Orlov, *Materials Science*, **37**, No. 1: 80 (2001); <https://doi.org/10.1023/A:1012338422984>
4. I. H. Dobrotvor, P. D. Stukhlyak, and A. V. Buketov, *Materials Science*, **45**, No. 4: 582 (2009); <https://doi.org/10.1007/s11003-010-9217-0>
5. Roman Dinzhos, Natalia Fialko, Viktor Prokopov, Yuliy Sherenkovskiy, Na-

- talia Meranova, Neli Koseva, Vladimir Korzhik, Alexander Parkhomenko, and Natalia Zhuravskaya, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5–6, No. 107: 49 (2020); <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214810>
6. В. А. Богущ, *Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты* (Ред. Л. М. Лынькова) (Минск: Бестпринт: 2003).
7. P. D. Stukhlyak and M. M. Bliznets, *Trenie i Iznos*, 8, No. 3: 122 (1987).
8. О. Ф. Оніпко, *Маскувальне радіопоглинаюче покриття* (Патент 59168. МПК H01Q1 7/00, F41H 3/00, No. а 2003 054050; заявл. 05.05.2003; опубл. 15.08.2003, Бюл. No. 8: 3 (Україна)).
9. О. Р. Бедюх, *Полімерний композиційний матеріал для захисту від м'якого рентгенівського випромінювання* (Патент 56201. МПК G21F1/00, C08K3/2. No.а 99063594; заявл. 25.06.1999; опубл. 15.05.2003, Бюл. No.5: 3 (Україна)).
10. K. W. Whites, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 43, No. 4: 376 (1995); [doi:10.1109/8.376035](https://doi.org/10.1109/8.376035)
11. C. H. Chung and K. W. Whites, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 10, No. 10: 1363 (2012); <https://doi.org/10.1163/156939396X00135>
12. Y. Borisov, V. Korzhyk, and S. Revo, *Thermal Spray Meeting the Challenges of the 21st Century: Proceedings of the 15-th International Thermal Spray Conference (May 25, 1998, France)*, vol. 1, p. 687.
13. В. О. Віленський, *Радіопоглинаюче покриття* (Патент 93293. МПК H05K9/00, H01Q17/00. No.а 200906307; заявл. 17.06.2009; опубл. 25.01.2011, Бюл. No.2: 5 (Україна)).
14. A. J. Bahr and K. R. Clausing, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 42, No. 12: 1592 (1994); <https://doi.org/10.1109/8.362815>
15. A. H. Sihvola and I. V. Lindell, *Electron. Letters*, 26, No. 2: 118 (1990); [doi:10.1049/el:19900081](https://doi.org/10.1049/el:19900081)
16. S. Y. Liao, *IEEE Trans. EMC*, 17, No. 4: 211 (1975).
17. A. H. Sihvola and I. V. Lindell, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 6, No. 5/6: 553 (1992); <https://doi.org/10.1163/156939392X01318>
18. F. Mariotte, S. A. Tretyakov, and B. Saviac, *IEEE Antennas Propagation Mag.*, 38: 22 (1996); <https://doi.org/10.1109/74.500229>
19. К. М. Білозерцев, *Матеріал для екранування* (Патент 106047. МПК F41H3/02, H01Q17/00. No. u201510879; заявл. 09.11.2015; опубл. 11.04.2016, Бюл. No. 7: 6 (Україна)).
20. В. З. Барсуков, І. В. Сенік, *Композиційний матеріал для захисту від електромагнітного випромінювання* (Патент 114444. МПК C09D5/30, C09D131/00. No. u201609196; заявл. 02.09.2016; опубл. 10.03.2017, Бюл. No. 5: 8 (Україна)).
21. F. Mariotte, S. A. Tretyakov and B. Saviac, *Microwave Opt. Technol. Letters*, 7, No. 18: 861 (1994); <https://doi.org/10.1002/mop.4650071814>
22. R. Tretyakov, B. Sauviac, and D. Ya. Khaliullin, *Petroleum and Coal*, 65, No. 3: 718 (2023) (in Slovakian).
23. D. Miroshnichenko, V. Lebedev, M. Riabchenko, P. Stukhlyak, and A. Myktyshyn, *Petroleum and Coal*, 65, No. 3: 718 (2023) (in Slovakian); <https://doi.org/10.33042/bhch2023.023>

REFERENCES

1. L. M. Lyn'kov, S. L. Prishchepa, V. A. Bogush, and V. V. Solov'ev, *Okhrana Truda i Promyshlennaya Ehkologiya. Metody i Sredstva Ehkranirovaniya Ehlektromagnitnogo Izlucheniya* (Minsk: 2000) (in Russian).
2. L. M. Lyn'kov, V. A. Bogush, V. P. Glybin et al., *Gibkie Konstruktsii Ehkranov Ehlektromagnitnogo Izlucheniya* (Minsk: 2000) (in Russian).
3. P. D. Stukhlyak, M. M. Mytnyk, V. O. Orlov, and S. O. Orlov, *Materials Science*, **37**, No. 1: 80 (2001); <https://doi.org/10.1023/A:1012338422984>
4. I. H. Dobrotvor, P. D. Stukhlyak, and A. V. Buketov, *Materials Science*, **45**, No. 4: 582 (2009); <https://doi.org/10.1007/s11003-010-9217-0>
5. Roman Dinzhos, Natalia Fialko, Viktor Prokopov, Yuliy Sherenkovskiy, Natalia Meranova, Neli Koseva, Vladimir Korzhik, Alexander Parkhomenko, and Natalia Zhuravskaya, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **5–6**, No. 107: 49 (2020); <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214810>
6. V. A. Bogush, *Ehlektromagnitnyye Izlucheniya. Metody i Sredstva Zashchity* (Red. L. M. Lyn'kova) (Minsk: Bestprint: 2003) (in Russian).
7. P. D. Stukhlyak and M. M. Bliznets, *Trenie i Iznos*, **8**, No. 3: 122 (1987).
8. O. F. Onipko, *Maskuvalne Radiopohlynayuche Pokryttya* (Patent 59168. MPK H01Q1 7/00, F41H 3/00, No. a 2003 054050; zaiavl. 05.05.2003; opubl. 15.08.2003, Bul. No. 8: 3 (Ukraine)).
9. O. R. Bedyukh, *Polimernyy Kompozytsiynny Material dlya Zakhystu Vid Myakoho Rentgenivskoho Vyprominyuvannya* (Patent 56201. MPK G21F1/00, C08K3/2. No.a 99063594; zaiavl. 25.06.1999; opubl. 15.05.2003, Bul. No. 5: 3 (Ukraine)).
10. K. W. Whites, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **43**, No. 4: 376 (1995); [doi:10.1109/8.376035](https://doi.org/10.1109/8.376035)
11. C. H. Chung and K. W. Whites, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **10**, No. 10: 1363 (2012); <https://doi.org/10.1163/156939396X00135>
12. Y. Borisov, V. Korzhyk, and S. Revo, *Thermal Spray Meeting the Challenges of the 21st Century: Proceedings of the 15-th International Thermal Spray Conference (May 25, 1998, France)*, vol. 1, p. 687.
13. V. O. Vilenskyy, *Radiopohlynayuche Pokryttya* (Patent 93293. MPK H05K9/00, H01Q17/00. No.a 200906307; zaiavl. 17.06.2009; opubl. 25.01.2011, Bul. No. 2: 5 (Ukraine)).
14. A. J. Bahr and K. R. Clausing, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **42**, No. 12: 1592 (1994); <https://doi.org/10.1109/8.362815>
15. A. H. Sihvola and I. V. Lindell, *Electron. Letters*, **26**, No. 2: 118 (1990); [doi:10.1049/el:19900081](https://doi.org/10.1049/el:19900081)
16. S. Y. Liao, *IEEE Trans. EMC*, **17**, No. 4: 211 (1975).
17. A. H. Sihvola and I. V. Lindell, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **6**, No. 5/6: 553 (1992); <https://doi.org/10.1163/156939392X01318>
18. F. Mariotte, S. A. Tretyakov, and B. Saviac, *IEEE Antennas Propagation Mag.*, **38**: 22 (1996); <https://doi.org/10.1109/74.500229>
19. K. M. Bilozertsev, *Material dlya Ehkranuvannya* (Patent 106047. MPK F41H3/02, H01Q17/00. No. u201510879; zaiavl. 09.11.2015; opubl.

- 11.04.2016, Biul. No. 7: 6 (Ukraine)).
20. V. Z. Barsukov and I. V. Senyk, *Kompozytsiyni material dlia zakhystu vid elektromahnitnoho vyprominiuvannia* (Patent 114444. MPK C09D5/30, C09D131/00. No. u201609196; zaiavl. 02.09.2016; opubl. 10.03.2017, Bul. No. 5: 8 (Ukraine)).
 21. F. Mariotte, S. A. Tretyakov and B. Saviac, *Microwave Opt. Technol. Letters*, **7**, No. 18: 861 (1994); <https://doi.org/10.1002/mop.4650071814>
 22. R. Tretyakov, B. Sauviac, and D. Ya. Khaliullin, *Petroleum and Coal*, **65**, No. 3: 718 (2023) (in Slovakian).
 23. D. Miroshnichenko, V. Lebedev, M. Riabchenko, P. Stukhlyak, and A. Mykytyshyn, *Petroleum and Coal*, **65**, No. 3: 718 (2023) (in Slovakian); <https://doi.org/10.33042/bhch2023.023>

¹E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11, Kazymyr Malevich Str.,
UA-03150 Kyiv, Ukraine

²Ternopil Ivan Puluj National Technical University,
56, Ruska Str.,
UA-46001 Ternopil, Ukraine

³E. O. Paton Scientific Research Institute of Welding Technologies named in Zhejiang Province,
233, Fenar Street, Xiaoshan District, Hangzhou,
311225 Hangzhou, People's Republic of China

¹ Fig. 1. Schematic diagram of testing the material of shields against electromagnetic radiation: 1—signal generator; 2—attenuator; 3—sample; 4—flange coaxial device; 5—electromagnetic analyser.

² Fig. 2. Samples for testing the shielding ability of a material against electromagnetic radiation, made in the form of plates: a—reference sample; b—test sample.

³ Fig. 3. Configuration diagram for testing materials using the shielded room method (0.6-m window): 1—launching equipment; 2—launching antenna; 3—test specimen; 4—receiving antenna; 5—signal receiving device.

⁴ TABLE 1. Types of antennas used in the specified frequency range.

⁵ TABLE 2. Recommended distance between the antenna and the screen material.

⁶ Fig. 4. Schematic representation of an epoxy composite multilayer coating (screen 2). 1—epoxy composite (EC) layer containing 50% dispersed copper; carbon fibre impregnated with EC containing 50% cobalt powder; 2—EC containing 50% cobalt powder; 3—EC containing 50% of cobalt powder of the following composition Co(71.2) + Ni(12.2) + Fe(6.2) + Si(7.3) + C(3.2); 4—EC containing 30% of cobalt powder of the following composition Co(71.2) + Ni(12.2) + Fe(6.2) + Si(7.3) + C(3.2); 5—EC containing nanoscale carbon multilayer tubes (NCMT) (the ratio of components, mass parts: ED-20:PEPA:NCMT = 100:11:10); 6—EC containing NCMT combined with alcohol (C₂H₅OH) (the ratio of components, mass parts: ED-20:PEPA:NCMT:C₂H₅OH = 100:11:12:12); 7—EC containing NCMT (the ratio of components, mass parts: ED-20:PEPA:NCMT = 100:11:3); 8—EC containing NCMT (the ratio of components, mass parts: ED-20:PEPA:NCMT = 100:11:1.3). The layer thickness is of 0.15–0.2 mm.

⁷ TABLE 3. Test results of the coating on polycarbonate (screen 1).

⁸ TABLE 4. Test results of the coating on polycarbonate (screen 2).

⁹ Fig. 5. Microstructure of the coating based on epoxy multilayer composites: back layer (a) of the protective coating; conductive (b) carbon fibre + ED-20 + Co; ED-20 + powder (Co + Ni + Fe + Si + C), layers based on ED-20 + NCMT (c, d).