

УДК 621.315.6;621.357.74;678.029.6;620.179.14

*А.М. Сімбіркіна <sup>а</sup>, В.С. Хандецький <sup>б</sup>, О.С. Сverdліковська <sup>в</sup>, О.В. Черваков <sup>в</sup>***БЕЗКОНТАКТНІ ВИМІРЮВАННЯ ПРОВІДНОСТІ ПРОТОТИПІВ ЗОВНІШНІХ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ МЕТАЛІЗОВАНИХ СКЛЯНИХ МІКРОСФЕР**<sup>а</sup> ДП «КБ «Південне», м. Дніпро, Україна<sup>б</sup> Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна<sup>в</sup> ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

Запропоновано використання безконтактного вихорострумове методу вимірювань електричної провідності прототипів зовнішніх теплозахисних покриттів на основі уретан-акрилової водної дисперсії NeoPac E-106 з металізованими скляними мікросферами HGS 16 як наповнювачами. Виконані вимірювання на зразках зовнішніх теплозахисних покриттів у діапазоні частот 50–120 МГц. Виявлено, що зовнішнє електромагнітне випромінювання занурюється на всю глибину срібного покриття скляної мікросфери, збуджуючи в об'ємі покриття струми, перебіг яких забезпечує процес поглинання електромагнітних хвиль даною мікросферою. Встановлено, що товщина композиційного матеріалу та концентрація у ньому металізованих мікросфер забезпечують необхідний ступінь екранування з урахуванням діапазону частот і інтенсивності зовнішнього випромінювання. Розраховані значення еквівалентної електропровідності зразків безперервних середовищ, що відповідають за величиною джоулевих втрат дослідженим зразкам композиційних матеріалів. Розвинуто теорію безконтактних вимірювань провідності гетерогенних матеріалів на прикладі порошку графіту. Безконтактні методи вимірювання показали більш високу відтворюваність результатів порівняно з контактними методами. Проведено порівняння запропонованого методу з традиційно використовуваними контактними методами вимірювання опору композиційних матеріалів на постійному струмі та у діапазоні низьких частот. Показано, що безконтактне вихорострумове вимірювання електричного опору матеріалів покриттів у високочастотному діапазоні є більш інформативним порівняно з контактними методами вимірювання на постійному струмі та у діапазоні низьких частот.

**Ключові слова:** вихорострумові вимірювання, провідність, зовнішні теплозахисні покриття, металізовані мікросфери, композиційний матеріал.

DOI: 10.32434/0321-4095-2020-132-5-81-87

**Вступ**

Одним з перспективних напрямів захисту електронного обладнання літальних апаратів від зовнішнього електромагнітного випромінювання є використання зовнішніх теплозахисних покриттів (ЗТП), які являють собою композиційні матеріали, що містять у своєму складі провідні порошкоподібні наповнювачі. Для забезпечення теплоізоляційних і інших спеціальних властивостей таких покриттів пропонується використовувати порожнисті скляні мікросфери з поверхневими металізованими шарами,

зокрема на основі срібла або нікелю [1].

У роботах [1,2] нами проаналізовані можливі методи отримання металізованих порожніх скляних мікросфер, що дозволило зробити висновки про доцільність застосування методу хімічного осадження металів. Були розроблені технології нанесення тонких шарів металу з необхідною морфологією і товщиною покриття на поверхню скляних мікросфер, а також створено і експериментально досліджено обладнання для отримання вітчизняних металізованих наповнювачів для перспективних ЗТП. Необхідно зазна-

чити, що порожнисті металізовані сріблом скляні мікросфери виробляються компаніями Nanoshell LLC (США), Microsphere Technology (США), Brazel Technology GmbH (Німеччина), PQCorporation (США).

Дисперсійним аналізом [2] отриманих нами скляних мікросфер встановлено, що 74% мікросфер мають діаметр від 21 до 80 мкм. Аналіз властивостей комерційних металізованих скляних мікросфер показав, що на ринку широко пропонуються мікросфери з діаметром частинок 10–150 мкм з покриттям на основі металевого срібла товщиною ~50 нм (наприклад, мікросфери типу CONDUCTOSPHERES Silver марок M-18-AG, M-30-AG, M-40-AG, M-45-AG, M-60-AG, де цифрами вказано середній розмір мікросфер ([www.microspheretechnology.com](http://www.microspheretechnology.com))). У той же час, у рекламних матеріалах компанії Brazel Technology GmbH (Німеччина, [www.brazel.com](http://www.brazel.com)) зазначається, що вони виробляють металізовані сріблом скляні мікросфери середнього діаметра від 4 до 42 мкм із вмістом срібла на поверхні 4–16% від маси мікросфер (товщина срібного покриття ~500–600 нм). Такі мікросфери рекомендується використовувати у фарбах, адгезивах і композиційних матеріалах [3] для забезпечення електричної провідності та захисту матеріалів і виробів з них від дії електромагнітного опромінення, а також в медицині [4].

У роботі [1] зазначається, що товщина шару срібла на поверхні мікросфер складала приблизно 250 нм. Ступінь покриття мікросфер сріблом – 100%, при цьому 30% мікросфер мали шорстку поверхню срібного покриття.

При хімічному осадженні на морфологію поверхні металізованих мікросфер істотний вплив мають температура і тривалість процесу відновлення срібла [2]. У ряді випадків на поверхні спостерігаються відкладення коралоподібної форми (coral-like surface morphology) [5]. Наявність схожих поверхневих відкладень зазначається також у роботах [6,7].

У роботі [3] вказується, що використання скляних мікросфер з нанесеним на їх поверхню сріблом фірми Nanoshell (США) для ЗТП дозволяє одержувати матеріали з підвищеною ефективністю екранування електромагнітного випромінювання до 60 децибел у діапазоні частот від 100 МГц до 25 ГГц і вище.

Для оцінки ступеня екранування ЗТП, що містять в своєму складі металізовані скляні мікросфери, необхідно знати ефективну електричну провідність (або опір). Для отримання таких даних традиційно використовують кон-

тактні методи вимірювання.

У роботі [4] були наведені графіки залежності поверхневого опору композиційного матеріалу, що містить вкриті сріблом скляні мікросфери, від загального обсягу матеріалу, зменшеного в процесі стиснення. В якості полімерної матриці такого матеріалу використовують поліуретанове в'язуче. Вихідний об'ємний вміст мікросфер – 50%. Вказується, що для більшості зразків, які відрізняються розмірами мікросфер, перколяційний поріг 20–30% залишкового об'єму досягається при стисканні. При цьому, чим менше розміри мікросфер, тим сильніше необхідно стискати зразок для отримання граничної величини струму між вимірювальними електродами. Після подолання перколяційного порогу спостерігається експоненціальна залежність опору від зменшення об'єму матеріалу: зменшення обсягу на 1–2% в кілька разів збільшує поверхневий опір композиційного матеріалу.

У роботі [3] також зазначається, що провідність композиційного матеріалу, що містить в своєму складі металізовані скляні мікросфери, 30% залишкового об'єму в основному починає фіксуватися при стискаючих навантаженнях.

Таким чином, актуальною є проблема стійкої оцінки електричної провідності розроблених нами ЗТП, що містять в якості наповнювача металізовані скляні мікросфери, які теоретично можна використовувати в якості покриття для конструкцій літальних апаратів. Величина електричної провідності такого типу матеріалів істотно впливатиме на ступінь екранування ними електромагнітних хвиль.

Використання контактних вимірювань для оцінювання електричної провідності ЗТП з наповнювачами у вигляді металізованих скляних мікросфер характеризується значними похибками. Після примусового стиснення композиційного матеріалу і відповідного подолання перколяційного порогу між вимірювальними електродами з'являється помітний струм, за величиною якого і визначають поверхневий або об'ємний (в залежності від розташування вимірювальних електродів) опір матеріалу. У роботі [4], наприклад, при вимірюванні поверхневого опору композиційних матеріалів використовують стандарт ASTM D-257 «Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials».

Враховуючи складний рельєф поверхні срібного покриття мікросфер, наявність ділянок

поверхні з коралоподібною структурою можна припустити, що електричні контакти між металізованими мікросферами у значній частині матимуть стохастичний характер. Це належить як до площі кожного контакту, величина якої залежить від форми дотичних ділянок поверхні і від зусилля притиснення сусідніх мікросфер один до одного, так і до сукупності контактів в межах даного зразка композиційного матеріалу. З огляду на випадковість розташування місць контактів даної мікросфери з найближчими сусідами, трубки (зони) струму, що виникають між контактами, будуть мати різну довжину і перетин. Такий струм буде характеризувати опір частини покриття мікросфери взагалі невідомої і різної для кожної мікросфери. Слід очікувати значної залежності вимірюваного опору від розмірів мікросфер, що опосередковано підтверджується графіками, наведеними у роботі [4]. Крім того, серйозну проблему представляє собою необхідність забезпечення контакту вимірювальних електродів з поверхнею ЗТП і сталість контактного опору від зразка до зразка.

Внаслідок зазначених недоліків контактних вимірювань і виникаючих складностей доцільно оцінити можливість безконтактних вимірювань провідності досліджуваних ЗТП в вихоровому магнітному полі.

#### **Експериментальна частина**

Нами проведено дослідження зразків ЗТП на основі уретан-акрилової водної дисперсії з наступними наповнювачами: 40% скляних мікросфер (зразок № 1); 40% скляних мікросфер з покриттям зі срібла (зразок № 2); 38,5% скляних мікросфер, 3,8% графіту (зразок № 3), 38,5% скляних мікросфер з покриттям зі срібла, 3,8% графіту (зразок № 4).

Зразки ЗТП являють собою пластини розміром  $50 \times 60 \pm 1,0$  мм. В якості в'язучого (плівкоутворювача) для їх одержання використовували уретан-акрилову водну дисперсію торгової марки NeoPac E-106 (виробник DSM NeoResins), а як наповнювач – скляні мікросфери HGS 16 (виробник Lagand Chemical Corp., США) з насипною щільністю  $144 \text{ кг/м}^3$  і з середнім розміром частинок 40 мкм та графіт електро-вугільний марки ЭУЗ-М (розміром частинок 45 мкм 75–90% та 71 мкм не більше 5% за ГОСТ 10274-79). Результати замірів товщини пластин наведені у таблиці.

Площі зразків були розділені на 6 однакових ділянок. Товщини вимірювалися на цих ділянках. Значення товщини у таблиці наведені в порядку убутання для зручності аналізу.

#### **Розподілення товщини пластин**

№ вимірювання	Значення товщини зразка, T, мм			
	Зразок № 1	Зразок № 2	Зразок № 3	Зразок № 4
1	2,5	2,4	2,6	2,0
2	2,5	2,1	2,6	1,9
3	2,4	1,8	2,4	1,8
4	2,2	1,5	2,4	1,7
5	2,1	1,5	2,0	1,7
6	2,1	1,4	2,0	1,6
$T_{\text{сер}}$	2,3	1,8	2,3	1,8

Датчик для безконтактних вихорострумів вимірювань являє собою коротку циліндричну котушку індуктивності без сердечника, кількість витків  $W=2$ , середній діаметр витків  $D=16$  мм, намотування мідним дротом діаметром  $d_0=1$  мм, інсталяційний зазор (відстань між поверхнею найближчого до зразка витка датчика і зовнішньою поверхнею зразка в зоні контролю)  $h_0=0,7$  мм. Виміри проводилися при гармонійному збудженні вихорового магнітного поля датчика з використанням вимірювача добротності в діапазоні частот  $f=50-120$  МГц за наступною методикою.

Вихорострумний датчик включався в резонансний контур вимірювача добротності. Зміною ємності приладу контур настраювався в режим резонансу на заданій частоті вимірювання. На першому етапі фіксувалися значення добротності  $Q_0$  і ємності  $C_0$  резонансного контуру без зразка. Після внесення зразка, що досліджувався, в поле датчика контур наново настраювався у резонанс, при цьому фіксувалися значення  $Q_1$  та  $C_1$ . Еквівалентна схема параметричного вихорострумного датчика зі зразком із провідного матеріалу наведена і проаналізована в [8,9].

Відносні значення активної та реактивної складових внесеного імпедансу розраховувалися за формулами:

$$\frac{R_{\text{ад}}}{\omega L_0} = \frac{Q_0 C_0 - Q_1 C_1}{Q_0 Q_1 C_1}, \quad (1)$$

де  $R_{\text{ад}}$  – внесений (доданий до власного) активний опір вихорострумного датчика,  $\omega$  – частота гармонійного поля датчика,  $L_0$  – власна індуктивність датчика;

$$\frac{X_{\text{ад}}}{\omega L_0} = \frac{C_1 - C_0}{C_1}, \quad (2)$$

де  $X_{ad}$  – внесений реактивний (індуктивний) опір вихорострумового датчика.

Вихорострумний датчик, що використувався нами, є датчиком параметричного типу. Такі датчики переважно використовуються в діапазоні високих частот. Він одночасно є джерелом вихорового магнітного поля і вимірювачем магнітного поля вихорових струмів, що збуджуються у провідному матеріалі. Вимірювання складових поля вихорових струмів здійснюється посередньо шляхом вимірювання параметрів, визначених виразами (1) і (2). Зона контролю в площині матеріалу для осі симетричних датчиків практично обмежується площиною кола, діаметр якого приблизно в 1,5 рази перевищує середній діаметр витків датчика. У нашому випадку цей діаметр складає 24 мм.

#### **Результати та обговорення**

Зондуюче вихрове магнітне поле датчика збуджує в електропровідному покритті скляній мікросфери вихровий струм, що тече за замкнутою траєкторією, яка охоплює поверхню мікросфери. Глибина проникнення поля для покриття з металевого срібла на частоті  $f=100$  МГц становить  $\delta_1=6,3$  мкм, що приблизно в 25 разів перевищує товщину покриття металізованих мікросфер, одержання яких описано у [1]. Це означає, що вихровий струм протікає всією глибиною покриття і рельєф поверхні покриття не робить на величину струму значного впливу. На частоті  $f=25$  ГГц, представленої в [3] в якості, орієнтовно, верхньої межі діапазону екранування, глибина проникнення плоских електромагнітних хвиль в срібло покриття  $\delta_2=0,4$  мкм, що теж перевищує товщину покриття. Таким чином, у всьому діапазоні екранування зовнішнє електромагнітне випромінювання проникає на всю глибину срібного покриття скляної мікросфери, збуджуючи в об'ємі покриття струми, які забезпечують процес поглинання електромагнітних хвиль даною мікросферою. Товщина ЗТП і концентрація в ньому металізованих мікросфер повинні забезпечити необхідний ступінь екранування з урахуванням діапазону частот і інтенсивності зовнішнього випромінювання.

Необхідно підкреслити, що зменшення інтенсивності зондуючого поля при вимірюваннях, що відбувається за рахунок збудження вихрових струмів та послаблення інтенсивності зовнішніх електромагнітних хвиль (що викликається струмами, наведеними цими хвилями) в поверхневих металевих шарах мікросфер, відповідають явищам, які мають одну і ту ж фізичну природу. Таким чином, для досліджен-

ня поглинаючих властивостей ЗТП використання безконтактної технології вихорострумів вимірювань, проведених у високочастотному діапазоні, є більш інформативним порівняно з контактними вимірами електричного опору матеріалів покриттів на постійному струмі і в діапазоні низьких частот. Такі дослідження здійснюються в природному стані ЗТП і не вимагають механічного ущільнення або стиснення зразків матеріалів перед вимірюванням провідності.

Збудження вихрових струмів в провідному немагнітному матеріалі викликає зменшення добротності датчика та зменшення його індуктивності за рахунок поля наведених струмів. В еквівалентній схемі датчика це відображається у вигляді внесених (або доданих) активного  $R_{ad}$  і негативного індуктивного  $X_{ad}$  опорів, які підключаються послідовно. Внесений індуктивний опір  $X_{ad}$  у наших експериментах практично не фіксувався, тому інформаційним параметром є внесений активний опір  $R_{ad}$ , який зазвичай нормують до величини власного індуктивного опору датчика, тобто  $R_n=R_{ad}/\omega L_0$ , де  $\omega$  – частота, а  $L_0$  – власна індуктивність датчика.

На рис. 1 показані частотні залежності  $R_n$  для зразків № 1 і № 3. Вимірювання проводились на різних ділянках пластин зразків. Отримані результати коригувалися з урахуванням товщини ділянки вимірювання, при цьому спостерігається хороша однорідність властивостей зразків. Наведені на рис. 1 результати отримані усередненням для кожного зразка.

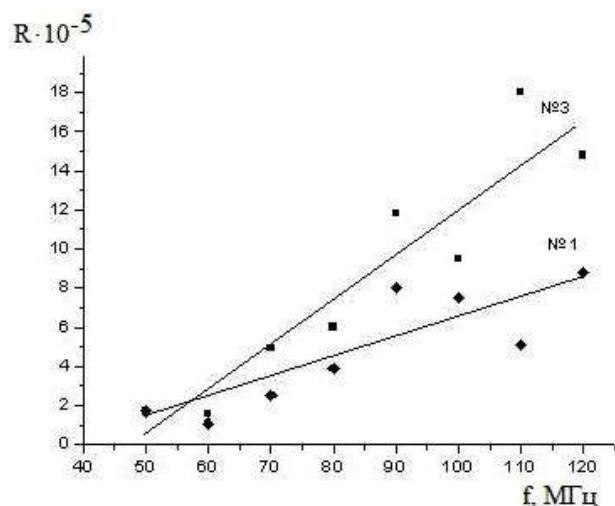


Рис. 1. Частотні залежності  $R_n$  для твердих зразків ЗТП з наступними наповнювачами:  
зразок № 1 – 40% скляних мікросфер;  
зразок № 3 – 38,5% скляних мікросфер+3,8% графіту

Параметр  $R_n$  залежить від потужності джоулевих втрат в матеріалі, що знаходиться під впливом вихорового магнітного поля датчика. Для зразка № 3 це, перш за все, втрати за рахунок замкнених зон (трубок) вихорових струмів, що протікають в частинках графіту. Джоулеві втрати у зразку № 1 можуть бути пов'язані з певною провідністю, а також діелектричними втратами у плівкоутворювачі (в'язучому).

Була досліджена провідність дрібнодисперсного порошка графіту, який міститься у зразку № 3. Такий порошок засипався в ємність, виготовлену з органічного скла пробовідбірника. Ця ємність має циліндричну форму з глибиною 3,2 мм і діаметром 40 мм.

Порошок графіту ущільнювався вібраційним способом для максимально можливого ущільнення, після чого повністю заповнена ємність закривалася зверху мембраною з склотекстоліту товщиною 0,6 мм. Через цю мембрану і виконувалися вимірювання вихорострумовим датчиком, який встановлювався зверху на неї. Датчик використовувався той же, що і для вимірювання провідності зразків ЗТП. Відповідна частотна характеристика показана на рис. 2.

Слід зазначити, що величина  $R_n$  для порошка графіту, як і для інших порошкоподібних матеріалів з провідними зернами, залежить від питомої електричної провідності матеріалу зерен, густини порошку і розмірів зерен. Теорія безконтактних вимірювань провідності таких гетерогенних матеріалів до теперішнього часу повністю не створена.

Проте, експериментальні вимірювання порошків графіту і розрахунки, проведені нами

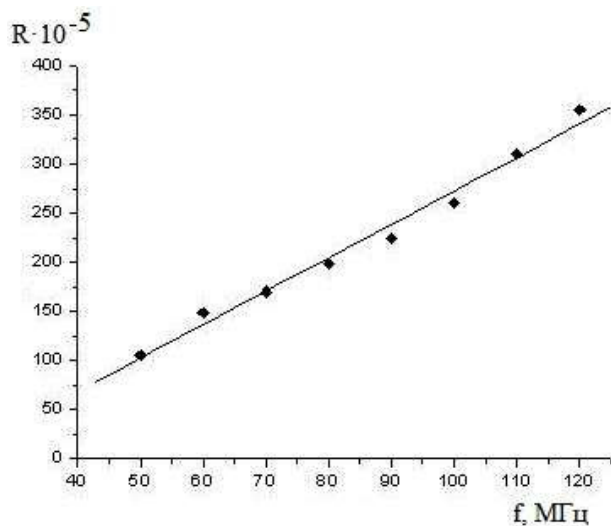


Рис. 2. Частотна залежності  $R_n$  для дрібнодисперсного порошку графіту

раніше [10], показали практично лінійну залежність величини  $R_n$  від щільності порошкоподібного матеріалу. Вплив розмірів зерен, що проводять, повністю не з'ясовано, тому при порівняльних вимірюваннях електропровідних властивостей порошкоподібних матеріалів рекомендується обирати порошки з приблизно однаковим гранулометричним складом. Слід також зазначити, що безконтактні вимірювання показали значно вищу повторюваність результатів у порівнянні з контактними вимірюваннями.

На рис. 3 показані частотні залежності  $R_n$  для зразків № 2 і № 4, а також для наочності порівняння розміщена і частотна характеристика для зразка № 3, що наведена раніше на рис. 1.

Лінійність зростання  $R_n$  з частотою, що відповідає початковій області годографа внесеного імпедансу датчика, відповідно до теорії вихорострумового контролю [11], свідчить про сталість електричної провідності середовища у досліджуваному частотному діапазоні.

Використовуючи залежності, наведені на рис. 1–3, були розраховані значення питомої електричної провідності  $\sigma_{\text{екв}}$ , однорідного середовища, еквівалентної за величиною  $R_n$  зразкам ЗТП.

Еквівалентність полягає в тому, що пластина ЗТП забезпечує таке ж значення відносно внесеного активного опору датчика  $R_n = R_{\text{ад}} / \omega L_0$ , що і пластина тієї ж товщини з безперервного провідного матеріалу.

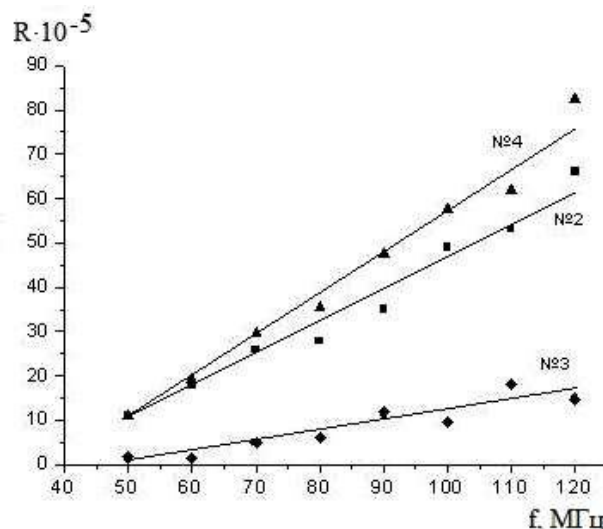


Рис. 3. Частотні залежності  $R_n$  для твердих зразків композиційних матеріалів з наступними наповнювачами:  
 № 2 – 40,0% скляних мікросфер з покриттям зі срібла;  
 № 3 – 38,5% скляних мікросфер, 3,8% графіту;  
 № 4 – 38,5% скляних мікросфер з покриттям зі срібла, 3,8% графіту

Розрахунок виконувався за відомою з літератури [11] наближеною формулою, спрощеною нами з урахуванням очікуваного діапазону значень  $\sigma_{\text{екв}}$ :

$$\frac{R_{\text{ад}}}{\omega L_0} = \frac{1}{L_0} \cdot 48 \cdot 10^{-7} \cdot R \cdot W^2 e^{\frac{3 \cdot h}{R}} \frac{\beta^2 \cdot \text{th} \frac{3 \cdot \vartheta}{4}}{9 + 9 \cdot \text{th} \frac{3 \cdot \vartheta}{4}}, \quad (3)$$

де  $\vartheta = 2T/R$ ,  $T$  – товщина зразка,  $R$  – радіус витків датчика,  $W$  – кількість витків,  $L_0$  – власна індуктивність датчика,  $\beta = (\omega \sigma_{\text{екв}} \mu_0)^{1/2}$ ,  $\omega$  – частота,  $\sigma_{\text{екв}}$  – питома еквівалентна електрична провідність,  $\mu_0$  – магнітна постійна.

В результаті отримані наступні дані. Еквівалентна провідність для зразків:

– ЗТП № 3 (38,5% скляних мікросфер, 3,8% графіту)  $\sigma_{\text{екв}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ;

– ЗТП № 2 (40% скляних мікросфер з покриттям зі срібла)  $\sigma_{\text{екв}} = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ;

– ЗТП № 4 (38,5% скляних мікросфер з покриттям зі срібла, 3,8% графіту)  $\sigma_{\text{екв}} = 12,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ;

– дрібнодисперсного порошку графіту  $\sigma_{\text{екв}} = 37,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .

#### Висновки

Запропоновано використання безконтактного вихорострумowego методу вимірювання провідності теплозахисних і радіопоглинаючих покриттів літальних апаратів, що містять в якості наповнювача металізовані скляні мікросфери.

Проведено вимірювання провідності зразків композиційних матеріалів типу ЗТП в діапазоні високих частот 50–120 МГц. Оцінена глибина проникнення зонduючого поля. Розраховані значення еквівалентної електропровідності зразків безперервних середовищ, відповідних за величиною джоулевих втрат даними зразкам ЗТП. Проаналізовано переваги та недоліки запропонованого методу порівняно з традиційними контактними методами вимірювання опору подібних матеріалів, заснованими на використанні постійного струму та діапазону низьких частот.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Металлизованные полые стеклянные микросферы для перспективных теплоизоляционных и радиопоглощающих покрытий* / Симбиркина А.Н., Нефедов В.Г., Черваков О.В., Глоба Н.И. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2015. – Вып. 3. – № 83. – С.79-88.

2. *Аппаратурное оформление химической металлизации полых стеклянных микросфер* / Симбиркина А.Н., Нефедов В.Г., Черваков О.В., Глоба Н.И. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2016. – Вып. 1 – С.109-122.

3. *Ultralow content silver densely-coated glass microsphere for high performance conducting polymer-matrix composites* / Wang Y., Ren K., Sun J., Li W., Zhao S., Chen Z., Guan J. // Compos. Sci. Technol. – 2017. – Vol.140. – P.89-98.

4. *Study of incongruent upshot of microsphere technology & its relevance* / Bagade O.M., Bhosale D.R., Bhargude D.N., Kad D.R., Kahane S.K. // Int. J. Drug Dev. Res. – 2013. – Vol.5. – No. 4. – P.1-15.

5. *Preuksarattanawut T., Asavavisithchai S., Nisaratanaporn E.* Fabrication of silver hollow microspheres by sodium hydroxide in glycerol solution // Mater. Chem. Phys. – 2011. – Vol.130. – No. 1-2. – P.481-486.

6. *Sulfonated polystyrene spheres as template for fabricating hollow compact silver spheres via silver-mirror reaction at low temperature* / Cai W., Wang W., Yang Y., Ren G., Chen T. // RSC Adv. – 2014. – Vol.4. – P.2295-2299.

7. *Tai Y., Xu C., Chen H.* Silver-coated glass fabric composites prepared by electroless plating // Mater. Lett. – 2016. – Vol.180. – P.144-147.

8. *Khandetskyi V.S.* Determination of the conductivity of non-metallic powder materials by the eddy current method // J. Phys. Electron. – 2019. – Vol.27. – P.63-70.

9. *Hughes R., Fan Y., Dixon S.* Near electrical resonance signal enhancement (NERSE) in eddy-current crack detection // NDT & E Int. – 2014. – Vol.66. – P.82-89.

10. *Patent 7288941 B2 США*, МКИ G 01 N 27/00, G 01 R 33/14, G 01 R 27/00. Method and apparatus for measuring conductivity of powder materials using eddy currents / Redko V., Khandetsky V., Novak P., Shembel E., Kohara S. – № 11/244796; Заявл. 06.10.2005; Опубл. 30.10.2007. – 8 с.

11. *Неразрушающий контроль в восьми томах.* – Т.2. – Вихретоковый контроль / Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.А. Останин; Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.

Надійшла до редакції 20.03.2020

**CONTACTLESS CONDUCTIVITY MEASUREMENTS OF THE PROTOTYPES OF EXTERNAL THERMAL PROTECTING COATINGS FILLED WITH METALIZED GLASS MICROSPHERES**

A.N. Simbirkina <sup>a, \*</sup>, V.S. Khandetskiy <sup>b</sup>, O.S. Sverdlivska <sup>c</sup>, O.V. Chervakov <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Yuzhnoye Design Office, Dnipro, Ukraine

<sup>b</sup> Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

<sup>c</sup> Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

\* e-mail: angelika-simbirkina@yandex.ru

It was proposed to use a contactless eddy current method for measuring the electrical conductivity of prototypes of external thermal protective coatings based on urethane-acrylic water dispersion NeoPac E-106 with metallized glass microspheres HGS 16 as fillers. Measurements were made on the samples of external thermal protective coatings in the frequency range of 50–120 MHz. It was revealed that the external electromagnetic radiation is immersed in the entire depth of the silver coating of the glass microsphere, exciting currents in the volume of coverage; the flow of these currents provides the process of absorption of electromagnetic waves by the given microsphere. It was established that the thickness of the composite material and the concentration of metallized microspheres in it ensure a necessary degree of shielding with respect to the frequency range and the intensity of the external radiation. The values of equivalent conductivity of the samples of continuous media corresponding to the value of Joule losses of the investigated samples of composite materials were calculated. The theory of contactless measurements of conductivity of heterogeneous materials on the example of graphite powder has been developed. The contactless methods of measurement showed higher repeatability of results as compared with the contact methods. A comparison was made between the developed method and the commonly used contact methods for measuring the resistance of composite materials at constant current and in a low frequency range. It was shown that the contactless eddy current measurement of the electrical resistance of coating materials in the high-frequency range is more informative than the contact methods of direct current measurement and in the low-frequency range.

**Keywords:** eddy current measurements; conductivity; external thermal protecting coatings; metallized glass microspheres; composite material.

**REFERENCES**

1. Simbirkina A.N., Nefedov V.G., Chervakov O.V., Globa N.I. Metallizirovannyye polye steklyannyye mikrosfery dlya perspektivnykh teploizolyatsionnykh i radiopogloshchayushchikh pokrytii [Metallized hollow glass microspheres for advanced heat-insulating and radio-absorbing coatings]. *Voprosy Proektirovaniya i Proizvodstva Konstruktsii Letatel'nykh Apparátov*, 2015, no. 3(83), pp. 79–88. (in Russian).
2. Simbirkina A.N., Nefedov V.G., Chervakov O.V., Globa N.I. Apparturnoe oformlenie khimicheskoi metallizatsii polykh steklyannykh mikrosfer [Hardware design of chemical metallization of hollow glass microspheres]. *Voprosy Proektirovaniya i Proizvodstva Konstruktsii Letatel'nykh Apparátov*, 2016, no. 1, pp. 109–122. (in Russian).
3. Wang Y., Ren K., Sun J., Li W., Zhao S., Chen Z., Guan J. Ultralow content silver densely-coated glass microsphere for high performance conducting polymer-matrix composites. *Composites Science and Technology*, 2017, vol. 140, pp. 89–98.
4. Bagade O.M., Bhosale D.R., Bhargude D.N., Kad D.R., Kahane S.K. Study of incongruent upshot of microsphere technology & its relevance. *International Journal Drug Development and Research*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 1–15.
5. Preuksarattanawut T., Asavavisithchai S., Nisaratanaporn E. Fabrication of silver hollow microspheres by sodium hydroxide in glycerol solution. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, vol. 130, pp. 481–486.
6. Cai W., Wang W., Yang Y., Ren G., Chen T. Sulfonated polystyrene spheres as template for fabricating hollow compact silver spheres via silver–mirror reaction at low temperature. *RSC Advances*, 2014, vol. 4, pp. 2295–2299.
7. Tai Y., Xu C., Chen H. Silver-coated glass fabric composites prepared by electroless plating. *Materials Letters*, 2016, vol. 180, pp. 144–147.
8. Khandetskiy V.S. Determination of the conductivity of non-metallic powder materials by the eddy current method. *Journal of Physics and Electronics*, 2019, vol. 27, pp. 63–70.
9. Hughes R., Fan Y., Dixon S. Near electrical resonance signal enhancement (NERSE) in eddy-current crack detection. *NDT & E International*, 2014, vol. 66, pp. 82–89.
10. Redko V., Khandetskiy V., Novak P., Shembel E., Kohara S., *Method and apparatus for measuring conductivity of powder materials using eddy currents*. Patent US, no. 7,288,941 B2, 2007.
11. Fedosenko Yu.K., Gerasimov V.G., Pokrovsky A.D., Ostanin Yu.A., *Nerazrushayushchii kontrol' v vos'mi tomakh. Tom 2. Vkhretokovyi kontrol'* [Non-destructive testing in eight volumes. Vol. 2. Eddy current control]. Mashonostroenie Publishers, Moscow, 2006. 688 p. (in Russian).