УДК 620.179.1

В. Р. Джала, Л. І. Капко, Д. Б. Куриляк

РАДІОХВИЛЬОВА НАДВИСОКОЧАСТОТНА ДІАГНОСТИКА РОЗШАРУВАННЯ У ДІЕЛЕКТРИЧНІЙ ПЛАСТИНІ

The method of microwave non-destructive testing of exfoliation in the dielectric plate is developed. The proposed method based on multi-frequency sounding in 5-mm wave band and solving of the inverse problem for determine of dielectric structure's thickness. The precision and resolution of proposed method are evaluated.

Розвинуто метод радіохвильового неруйнівного контролю розшарування у діелектричному шарі. Метод базується на багаточастотному зондуванні у 5-мм діапазоні довжин хвиль та розв'язанні оберненої задачі з визначенням товщин окремих шарів діелектричної структури. Експериментально визначено точність і роздільну здатність запропонованого методу.

Радіохвильовий метод має важливе значення для неруйнівного контролю та технічної діагностики виробів із діелектричних та композитних матеріалів. Порушення цілісності та структури виробів майже завжди супроводжується зміною параметрів електромагнітної хвилі, відбитої від об'єкта контролю. Перевагою методу є можливість безконтактного контролю з одностороннім доступом до об'єкта. Перспективним є міліметровий діапазон довжин хвиль, оскільки з ростом частоти зондуючого сигналу покращується просторова вибірковість контролю.

Класичні прямі методи радіохвильового контролю дають змогу проводити якісне визначення неоднорідностей у матеріалах, а також визначати деякі його параметри у вузькому діапазоні зміни структури [3]. Застосування оберненої задачі (ОЗ) діагностики дає можливість перейти від якісної оцінки дефектів і параметрів структури до кількісної оцінки складних структур у широких межах зміни їх параметрів. Для реалізації такого підходу необхідно застосовувати багатопараметрове зондування об'єкта [4]. Одним з інформативних параметрів діагностування є комплексний коефіцієнт відбивання (ККВ), виміряний на багатьох частотах. Мета цієї праці полягає у проведенні експериментального дослідження запропонованого методу радіохвильового діагностування на прикладі розшарування у діелектричному матеріалі.

Опис експерименту. Метод ґрунтується на вимірюванні ККВ структури та розв'язуванні ОЗ з використанням математичної моделі взаємодії зондуючого поля і середовища.

Експерименти з вимірювання ККВ структур проводили на автоматизованому стенді НВЧ діагностики у смузі частот 58...76 ГГц [1]. На рис. 1 показано схемну модель стенду. Стенд побудовано за принципом інтерферометра на базі подвійного Т-моста. До Н-плеча моста під'єднано генератор коливальної частоти, до Е-плеча детекторну секцію, а до бічних плечей каліброване навантаження та рупорну антену спрямовану на об'єкт контролю.

Для автоматизованого вимірювання ККВ на багатьох частотах вимірювальна схема працює у розбалансованому режимі. Вимірюється потужність "сигналу розбалансу" моста. ККВ невідомого навантаження визначають на підставі математичної моделі, що враховує матрицю розсіювання подвійного Т-моста (**K**(*f*) на рис. 1) та випромінювально-приймальної рупорної антени (**S**(*f*) на рис. 1). Процедура калібрування стенду та вимірювання ККВ досліджуваної структури $V_S(f)$ описана в [1].

© В. Р. Джала, Л. І. Капко, Д. Б. Куриляк, 2009

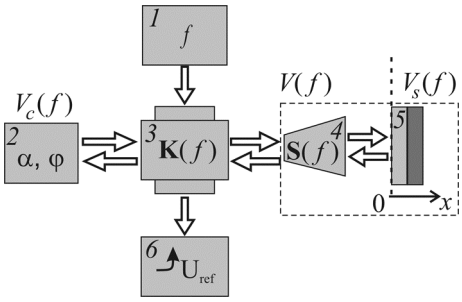

Рис. 1. Схемна модель автоматизованого стенду НВЧ діагностики: *1* – генератор коливальної частоти; *2* – каліброване навантаження; *3* – подвійний Т-міст; *4* – антена; *5* – плоскошарове середовище у вільному просторі; *6* – детектор.

Геометричні параметри антени такі: відстань від апертури антени до нульової площини – 50 мм, апертура 25×25 мм, довжина антени від горловини до апертури – 65 мм.

Для фізичного моделювання розшарування у діелектричному матеріалі використано дві однакові пластини з оргскла, між якими створювався зазор за допомогою листів паперу, що розміщували за межами ділянки зондування. Товщина зазору змінювалась від 0 до 6 листів завтовшки 0,09 ± 0,005 мм. Для уникнення паразитних перевідбивань зондуючої хвилі від навколишніх предметів антену і зразок поміщали у комірку з поглинаючого матеріалу. Схему експерименту показано на рис. 2. На рис. 3 приведено виміряні частотні залежності ККВ для структури з різною товщиною розшарування. Криві *1–4* відповідають товщині розшарування в 0…3 листи. З рис. 3 видно, що модуль і фаза коефіцієнта відбивання залежать від товщини зазору.

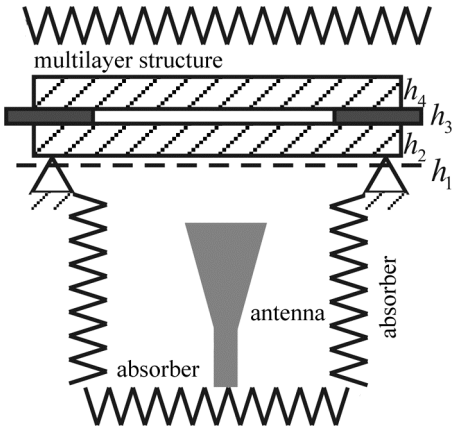

Рис. 2. Схема експерименту.

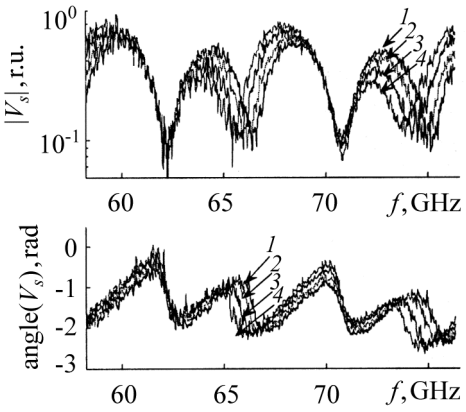

Рис. 3. ККВ пластини з розшаруваннями.

Пряма та обернена задачі діагностики. Вважаємо, що об’єкт контролю є багатошаровою структурою із плоскопаралельними границями поділу. Кожен шар з непровідних ізотропних матеріалів описується товщиною та електрофізичними параметрами – діелектричною проникністю та тангенсом кута втрат.

Розглянемо модель взаємодії зондуючого поля і контрольованої структури. Вважаємо, що об’єкт контролю розташований у дальній зоні опромінення. У вільному просторі поширюється плоска електромагнітна хвиля і перпендикулярно падає на напівнескінченне (M–1)-шарове середовище. ККВ досліджуваної структури залежить від частоти, геометричних та електрофізичних параметрів кожного шару:

$$V_S = V_S(f;\ h_1,\ \varepsilon_1,\ \mathrm{tg}\delta_1,..\ h_{M-1},\ \varepsilon_{M-1},\ \mathrm{tg}\delta_{M-1},\varepsilon_M,\ \mathrm{tg}\delta_M), \qquad (1)$$

де f – частота, h_n, ε_n, $\mathrm{tg}\delta_n$ – відповідно товщина, діелектрична проникність та тангенс кута втрат n-го шару. У моделі плоскої хвилі додатково враховується втрата енергії зондувального поля на розсіяння за межі проекції апертури антени [2].

Обернена задача полягає у визначенні вектора шуканих параметрів плоскошарового середовища $\mathbf{p}^*$ за виміряною частотною залежністю ККВ і розв'язується методом глобальної мінімізації функціоналу [2, 4]:

$$\mathbf{p}^* = \inf_{\mathbf{p}\in\mathbf{P}} F(\mathbf{p}),\ F(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{N_f} \left| V_S^{ex}(f_i) - V_S^{th}(\mathbf{p}, f_i) \right|^2, \qquad (2)$$

де $V_S^{th}(\mathbf{p}, f_i)$ – теоретичний ККВ середовища; $V_S^{ex}(f_i)$ – виміряний ККВ; N_f – кількість частотних відліків f_i. Шуканими параметрами середовища є товщини та(або) електрофізичні параметри окремих шарів структури, решта параметрів вважаємо заданими.

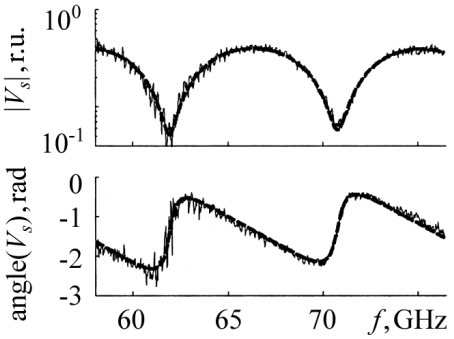

Рис. 4. ККВ діелектричної пластини, експеримент (—) та моделювання (- - -).

Експеримент та його обговорення. Для визначення параметрів матеріалу (оргскло) було виміряно ККВ однієї пластини. За результатами розв'язування ОЗ було визначено такі параметри структури: положення пластини $h_1^* = -0{,}358$ мм, товщина $h_2^* = 10{,}461$ мм, та електрофізичні параметри $\varepsilon_2^* = 2{,}624$, $\mathrm{tg}\delta_2^* = 6{,}71\times10^{-3}$. Товщину пластини також контролювали за допомогою мікрометра. У точці вимірювання вона становить $h_2 = 10{,}46 \pm 0{,}005$ мм. На рис. 4 зображено експериментально виміряний та обчислений за моделлю (1) ККВ пластини.

Діелектричну пластину з розшаруванням описували моделлю 4-шарового середовища: повітряного шару між нульовою площиною і діелектриком товщиною h_1; другого та четвертого шарів діелектрика з параметрами h_2, h_4, $\varepsilon_2=\varepsilon_4$, $\mathrm{tg}\delta_2=\mathrm{tg}\delta_4$ та третього повітряного шару – розшарування h_3.

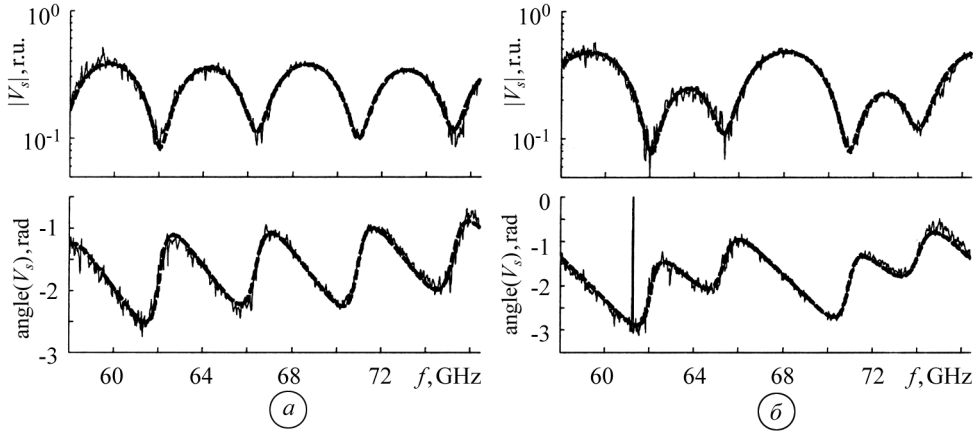

Рис. 5. ККВ пластини без розшарування (*а*) та з розшаруванням у три листи (*б*), експеримент (—) та числове моделювання (- - -).

Обернену задачу діагностування розшарування у пластині розв'язували так. Вважатимемо параметри матеріалу (оргскла) та розшарування (повітря) заданими. За виміряними частотними залежностями ККВ необхідно визначити положення та товщини всіх шарів структури, тобто вектор шуканих параметрів $\mathbf{p}^*=(h_1, h_2, h_3, h_4)^T$.

На рис. 5 подано експериментальні та обчислені за моделлю частотні залежності ККВ структури без розшарування (*а*) та з розшаруванням (*б*). Розв'язки ОЗ подано в таблиці. Оскільки пластини мають певну кривизну, товщина зазору може відрізнятись від товщини вставки з паперових листів. Тому як параметр розглянуто зміну товщини зазору при додаванні одного листа Δh_3^*. У таблиці також наведені середні значення знайдених товщин діелектричних пластин та листів паперу h^*_m, а також їх середньоквадратичні відхилення σ та відхилення знайдених параметрів структури від товщин, виміряних мікрометром (h^*_m–h).

Розв'язок оберненої задачі для пластини з розшаруванням

К-сть листів	0	1	2	3…	h^*_m, мм (з 1..6)	σ, мм	(h^*_m–h), мм
h_1^*, мм	–0,52455	–0,5081	–0,4913	–0,4852	–	–	–
h_2^*, мм	10,559	10,483	10,468	10,464	10,469	0,008	0,009
h_3^*, мм	0,0345	0,0945	0,1828	0,2701	–	–	–
Δh_3^*, мм	–	0,0600	0,0884	0,0873	0,0887	0,003	–
h_4^*, мм	10,311	10,392	10,410	10,414	10,413	0,015	0,003

ВИСНОВКИ

Вимірювання виявили, що модуль та фаза ККВ є чутливими до наявності та зміни товщини розшарування. Модель плоскої хвилі адекватно описує взаємодію зондуючого поля з плоскошаровою структурою і може бути застосована для НК розшарувань у діелектричному матеріалі. Роздільна здатність радіохвильового методу за даних умов вимірювання та діапазону розшарувань 0,1 … 0,5 мм по товщині окремих шарів та положенню розшарування не перевищує 0,01 мм. Зі зменшенням товщини зазору точність визначення параметрів структури погіршується.

1. *Джала В. Р., Капко Л. І.* Метод і пристрій для вимірювання комплексного коефіцієнта відбивання у радіохвильовому діапазоні довжин хвиль // Відбір і обробка інформації. – 2006. – № 24 (100). – С. 13–18.
2. *Джала В. Р., Капко Л. І.* Експериментальне дослідження моделі радіохвильового зондування шаруватих діелектриків // Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів (серія), Вип. 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій: Зб. наук. праць. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, 2008. – С. 72–79.
3. *Неразрушающий* контроль и диагностика: Справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др.; Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
4. *Kolodiy B. I., Ljashchuk O. B.* Methematical models, methods, and algorithms used for the radiowave diagnostics of multilayer dielectrics // Material Science. – **33**, № 5. – 1999. – P. 639–649.

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Одержано 18.11.2008