УДК 621.365:621.315.61

А.Л. Демура

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ І ТЕПЛОФІЗИЧНІ ЯВИЩА ПРИ ОТВЕРДІННІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ВПЛИВОМ НАДВИСОКОЧАСТОТНИХ ПОЛІВ

Анотація. Представлені результати дослідження електромагнітних і теплофізичних явищ, що мають місце при отвердінні склопластиків під впливом електромагнітного поля надвисокої частоти.

В результаті досліджень складені дві програми для побудови графіків залежностей поглиненої нормованої потужності від товщини діелектрику і розподілу нормованої амплітуди електромагнітного поля в ньому.

Ключові слова: електромагнітне поле надвисокої частоти, процес отвердіння, електромагнітні і теплофізичні явища, полімерні композиційні матеріали.

Вступ. Для прискорення процесу полімеризації склопластиків і виробів з них автори запропонували застосовувати електромагнітне поле надвисокої частоти (ЕМП НВЧ) [1]. Першочерговою задачею при використанні НВЧ енергії є уникнення надмірного локального нагрівання.

В роботах [2, 3] сформульовано спільну задачу електродинаміки і теплопровідності, але її рішення отримано для окремих самих простих випадків. Відомі рішення теплового рівняння [4], що одержані на основі припущення однорідності розподілу теплових джерел у матеріалі при НВЧ нагріванні, але вони не відповідають дійсності.

В наукових публікаціях практично відсутні як данні з впливу електричних те теплофізичних параметрів матеріалу, так і уявлення щодо ступеню впливу зміни властивостей матеріалу на розподіл температури в процесі нагрівання. Навіть якщо рішення рівнянь, що описують, наприклад, електромагнітне поле у нагрівальній камері із зразком і буде знайдено, то воно буде відповідати тільки зразку певної форми для конкретних параметрів матеріалу та фіксованому роз-

© Демура А.Л., 2011

ташуванню зразка в камері. Таким чином, точне визначення електромагнітного поля у зразках не завжди має сенс.

Тому для відпрацювання технології отвердіння полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), до яких відносять і склопластики, під впливом НВЧ – полів є необхідність розуміння електромагнітних і теплофізичних явищ, що мають місце при нагріванні, і на основі знання цих процесів отримання адекватної математичної моделі.

Формулювання цілей статті. Основними цілями нижче приведеного дослідження є:

- вивчення розповсюдження електромагнітних хвиль в поглинаючих середовищах;

- визначення впливу електромагнітного поля при нормальному падінні плоскої хвилі на діелектричний шар.

Викладання матеріалу та результати. Дослідження електромагнітних та теплофізичних процесів в зразках у вигляді діелектричного шару проводили шляхом певної формалізації задач, тобто на основі рішення одномірного хвилевого та теплового рівнянь.

Першим кроком в дослідженні було вивчення розповсюдження електромагнітних хвиль в поглинаючих середовищах.

Вільне (існуюче без джерел) гармонійне електромагнітне поле з круговою частотою $\omega = 2\pi f$, яке змінюється у просторі тільки вздовж напрямку вісі z, вибраної декартової системи координат, повністю описується за допомогою однорідного рівняння Гельмгольца відносно комплексної амплітуди напруженості вектора електричного поля $\dot{\vec{E}}$ [5]:

$$\frac{d^2\dot{\vec{E}}}{dz^2} + k^2\dot{\vec{E}} = 0, \qquad (1)$$

де $k = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon\mu}$ – хвилеве число;

ε, μ – комплексні діелектрична та магнітна проникності.

Комплексну амплітуду вектора напруженості магнітного поля $\vec{H}$ можна знайти із другого рівняння Максвела у комплексній формі [5] як

$$\dot{\vec{H}} = -\frac{1}{j\omega\mu_0\mu} rot\dot{\vec{E}}. \qquad (2)$$

Загальне рішення рівняння (1) для плоскої електромагнітної хвилі поляризованої, наприклад, в площині $x0y$ має вигляд

$$\dot{\vec{E}} = \vec{x}_0(Ae^{-jkz} + Be^{jkz}), \quad (3)$$

де A і B – довільні комплексні константи.

Тоді вираз для комплексної амплітуди вектора напруженості магнітного поля, знайдений за допомогою (2), має наступний вигляд:

$$\dot{\vec{H}} = \vec{y}_0 \frac{1}{W}(Ae^{-jkz} - Be^{jkz}), \quad (4)$$

де $W = \sqrt{\mu_0\mu / \varepsilon_0\varepsilon} = W_0\sqrt{\mu / \varepsilon}$ – характеристичний опір середовища;

$W_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} = 120\pi$ [Ом] – характеристичний опір вакууму (ε=1, μ=1).

Для середовища з втратами хвилеве число k є величиною взагалі комплексною через комплексний характер проникностей ε і μ:

$$k = k' - jk''. \quad (5)$$

Так як досліджувані матеріали не є магнітними, то будемо вважати, що магнітні втрати відсутні ($\mu'' = 0$), а μ'=1. Для урахування електричних втрат діелектричну проникність представляють у вигляді

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon'(1 - jtg\delta), \quad (6)$$

де $tg\delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$ – тангенс кута електричних втрат.

Вирази для дійсної і уявної частин хвилевого числа (5) при урахуванні електричних втрат мають вигляд [5]:

$$k' = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon'\mu'}\sqrt{\frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 + tg^2\delta})}, \; k'' = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon'\mu'}\sqrt{\frac{1}{2}(-1 + \sqrt{1 + tg^2\delta})}. \quad (7)$$

Характеристичний опір W для діелектрика дорівнює

$$W = W_0\sqrt{\frac{\mu'}{\varepsilon'(1 - jtg\delta)}} = |W|\exp(j\phi_W), \quad (8)$$

де $\phi_W = \arg(W)$ – фаза характеристичного опору.

Поклавши в (3) і (4) B=0, отримаємо часткове рішення

$$\dot{\vec{E}} = \vec{x}_0 Ae^{-jkz}, \; \dot{\vec{H}} = \vec{y}_0 \frac{A}{W}e^{-jkz}. \quad (9)$$

Перейшовши в (9) від комплексних амплітуд до векторів поля, знаходимо

$$\vec{E} = \vec{x}_0 A e^{-k''z}\cos(\omega t - k'z + \phi),\ \vec{H} = \vec{y}_0 \frac{A}{|W|} e^{-k''z}\cos(\omega t - k'z + \phi - \phi_w). \qquad (10)$$

Це затухаюча хвиля, у якій напруженості поля спадають за законом $\exp(-k''z)$, причому вектори $\vec{E}$ і $\vec{H}$ зсунуті за фазою на кут ϕ_W. Відстань, на якій амплітуда поля спадає в e раз, носить назву глибини проникності $\Delta_0 = 1/k''$, а k'' – коефіцієнта затухання.

Середня потужність втрат в об'ємі V визначається за формулою [4]:

$$P = \frac{\omega}{2}\int_V \varepsilon_0 \varepsilon'' \dot{\vec{E}}\dot{\vec{E}}^{\times} dv. \qquad (11)$$

Якщо в деякому об'ємі V електромагнітне поле однорідне, то середня потужність внутрішніх джерел тепла в одиниці об'єму (щільність потужності) виражається як [6]

$$p = 0.5\omega\varepsilon_0\varepsilon''\left|\dot{\vec{E}}\right|^2 = 0.5\omega\varepsilon_0\varepsilon' tg\delta\left|\dot{\vec{E}}\right|^2. \qquad (12)$$

Наступним кроком було вивчення електромагнітних процесів, які мають місце при нагріванні діелектричних матеріалів полем падаючої хвилі. В зв'язку з цим розглянули наступну формалізовану задачу.

Плоска електромагнітна хвиля нормально падає на шар діелектрика товщиною d (Рисунок). Припустимо, що падаюча хвиля поляризована в площині $x0y$. Для рішення поставленої електродинамічної задачі скористаємося «методом зшивання». Для цього розіб'ємо всю область визначення поля на часткові області 1, 2 і 3 із спільними границями. З урахуванням відбиття від границь розділу середовищ в областях 1 і 2 будуть існувати хвилі, які розповсюджуються у протилежних напрямках, а в області 3 – тільки біжуча у напрямку z хвиля. Тоді вирази для комплексних амплітуд полів в областях 1, 2 і 3 на основі (3), (4) запишемо у вигляді [7]:

$$\left.\begin{aligned}\dot{\vec{E}}_1 &= \vec{x}_0(Ae^{-jk_1(z+d/2)} + Be^{jk_1(z+d/2)}),\\ \dot{\vec{H}}_1 &= \vec{y}_0\frac{1}{W_1}(Ae^{-jk_1(z+d/2)} - Be^{jk_1(z+d/2)}),\end{aligned}\right\}\quad z \le -d/2; \qquad (13)$$

 ISSN 1562-9945

$$\left.\begin{aligned}\dot{\vec{E}}_2 &= \vec{x}_0(Ce^{-jk_2z} + De^{jk_2z}),\\ \dot{\vec{H}}_2 &= \vec{y}_0\frac{1}{W_2}(Ce^{-jk_2z} - De^{jk_2z}),\end{aligned}\right\} \quad -d/2 \le z \le d/2; \qquad (14)$$

$$\left.\begin{aligned}\dot{\vec{E}}_3 &= \vec{x}_0 Fe^{-jk_1(z-d/2)},\\ \dot{\vec{H}}_3 &= \vec{y}_0\frac{1}{W_1}Fe^{-jk_1(z-d/2)},\end{aligned}\right\} \quad d/2 \le z. \qquad (15)$$

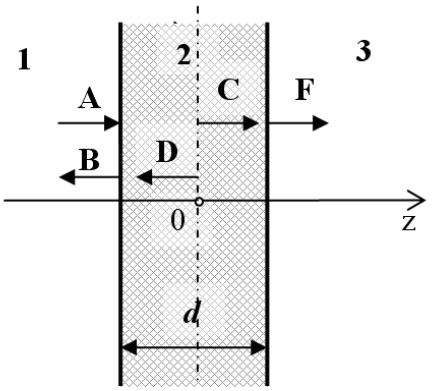

Рисунок – нормальне падіння плоскої електромагнітної хвилі на однорідний діелектричний шар

У виразах (13)-(15) A – амплітуда падаючої хвилі; B, C, D, F – комплексні амплітуди хвиль у часткових областях, які підлягають визначенню; $W_1 = W_0$ – характеристичний опір середовищ 1 і 3; $W_2 = W_0\sqrt{\dfrac{\mu'}{\varepsilon'(1 - jtg\delta)}}$ – характеристичний опір середовища 2 (діелектричний шар); $k_1 = \omega / c$ – хвилеве число для середовищ 1 і 3; k_2 – хвилеве число середовища 2, яке визначається за (5), (7).

Накладемо граничні умови, які задамо у вигляді вимог безперервності тангенціальних компонент векторів $\vec{E}$ і $\vec{H}$ на границях розділу середовищ:

$$\left.\begin{aligned}&\dot{\vec{E}}_1(z = -d/2) = \dot{\vec{E}}_2(z = -d/2);\\ &\dot{\vec{H}}_1(z = -d/2) = \dot{\vec{H}}_2(z = -d/2);\\ &\dot{\vec{E}}_2(z = d/2) = \dot{\vec{E}}_3(z = d/2);\\ &\dot{\vec{H}}_2(z = d/2) = \dot{\vec{H}}_3(z = d/2).\end{aligned}\right\}. \qquad (16)$$

Тоді з (13)-(15) за допомогою (16) для знаходження комплексних амплітуд хвиль у часткових областях B, C, D, F отримаємо наступну систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} -B + Ce^{jk_2 d/2} + De^{-jk_2 d/2} = A; \\ \dfrac{1}{W_1} B + \dfrac{1}{W_2} Ce^{jk_2 d/2} - \dfrac{1}{W_2} De^{-jk_2 d/2} = \dfrac{1}{W_1} A; \\ Ce^{-jk_2 d/2} + De^{jk_2 d/2} - F = 0; \\ \dfrac{1}{W_2} Ce^{-jk_2 d/2} - \dfrac{1}{W_2} De^{jk_2 d/2} - \dfrac{1}{W_1} F = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Коефіцієнти відбиття ρ і проходження τ (які приведені до координати $z = -d/2$) за обчисленими значеннями комплексних амплітуд визначаються як

$$\rho(z = -d/2) = \frac{B}{A}; \quad \tau(z = -d/2) = \frac{Fe^{jk_1 d}}{A} \quad (18)$$

Нормована потужність, що поглинається у діелектричному шарі, визначається за формулою

$$P_n = 1 - |\rho|^2 - |\tau|^2. \quad (19)$$

Нормована амплітуда напруженості електричної компоненти поля на основі (13)-(15) визначається як

$$|E| = \begin{cases} \left| e^{-jk_1(z+d/2)} + (B/A)e^{jk_1(z+d/2)} \right|, & z \le -d/2; \\ \left| (C/A)e^{-jk_2 z} + (D/A)e^{jk_2 z} \right|, & |z| \le d/2; \\ \left| (F/A)e^{-jk_1(z-d/2)} \right|, & d/2 \le z. \end{cases} \quad (20)$$

Для рішення системи (17) були складені програми absorbtion.m та fild.m. Програма absorbtion.m дозволяє визначати та будувати графіки залежності нормованої потужності, що поглинається, від товщини шару. Вхідними параметрами цієї програми є дійсна частина відносної діелектричної проникності, тангенс кута втрат, граничне значення товщини діелектричного шару та частота електромагнітного поля. Програма fild.m дозволяє визначати та будувати графіки просторового розподілу нормованої амплітуди електричного поля у розглянутій структурі. Вхідними параметрами програми є дійсна частина відносної діелектричної проникності, тангенс кута втрат, товщина діелектричного шару, частота електромагнітного поля та граничне значення повздовжньої координати.

Таким чином, результати досліджень нормованого падіння електромагнітних хвиль на діелектричний шар дають уявлення щодо електромагнітних процесів, які мають місце в діелектриках при нагріванні падаючою хвилею.

Висновки. У межах даної частини роботи досліджено електромагнітні і теплофізичні явища, які мають місце в процесі отвердіння полімерних композиційних матеріалів під впливом надвисокочастотної енергії. Результати досліджень дали можливість прогнозувати процеси, які відбуваються в ПКМ при нагріванні падаючою хвилею.

В результаті досліджень визначені формули для розрахунку середньої потужності втрат в об'ємі матеріалу, нормованої потужності, нормованої амплітуди напруженості електричної компоненти поля і розроблені програми.

Отримані результати будуть використані в подальших дослідженнях з визначення зміни поглиненої нормованої потужності та положення стоячих хвиль від товщини діелектрику для різних значень діелектричних властивостей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Санін Ф.П. Обґрунтування використання електромагнітного поля надвисокої частоти для отвердіння полімерних композиційних матеріалів / Ф.П. Санін, А.Л. Демура // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Ракетно-космічна техніка. – 2003. – Вип. 7. – С. 129-133.
2. Sekkak A. 3-DFEM maqneto-themalanalysis in microwave ovens / A. Sekkak, L. Pichon, A. Razek // IEEE Transactions on Maqnetics. – 1994. – V. 30, № 9. – P. 3347-3350.
3. Комаров В.В. Исследование процессов СВЧ-нагрева диссипативных сред с учетом конвективного теплообмена: теория и эксперимент / В.В. Комаров // Прикладная физика. – 2006. - № 4. – С.34-41.
4. Пюшнер Г. Нагрев энергий сверхвысоких частот / Г. Пюршнер. – М.: Энергия, 1968. – 312с.
5. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – М.: Наука, 1989. – 544с.
6. Глуханов Н.П. Физические основы высокочастотного нагрева / Н.П. Глуханов. Под ред А.Н.Шамова – [5-е изд.].- Л.:Машиностроение, 1989.-56с.
7. Демура А.Л. Моделювання процесу нагрівання склопластиків за допомогою НВЧ енергії / А.Л. Демура, В.Д. Рябчій // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Ракетно-космічна техніка. – 2007. – Вип. 11. Том 1. – С.22-30.