

А.Л. Демура, В.Д. Рябчій

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІСЛЯ ОТВЕРДІННЯ ПІД ВПЛИВОМ ПОЛЯ НАДВИСОКОЇ ЧАСТОТИ

Анотація. Представлені результати дослідження процесу охолодження полімерних композиційних матеріалів після отвердіння під впливом електромагнітного поля надвисокої частоти.

На основі рішення теплового рівняння складена програма для обчислення температури в процесі охолодження. Програма дозволяє розраховувати просторовий розподіл температури в матеріалі в певний момент часу.

Ключові слова: процес охолодження, полімерні композиційні матеріали, отвердіння, електромагнітне поле надвисокої частоти.

Вступ

На цей час одним із вузьких місць технологічного процесу виготовлення виробів із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), до яких відносяться склопластики, є операція отвердіння.

Відомі наступні способи отвердіння ПКМ, що прискорюють цей процес: інфрачервоний [1], радіаційний [2], прискореними електронами [3], магнітна та ультразвукова обробка [2, 4], та інші. Перелічені способи мають ряд недоліків, які стримують їх широке використання в різних галузях виробництва.

Процес отвердіння (нагрівання до певної температури і охолодження) ПКМ безпосередньо у виробі є складним і відповідальним, тому що він визначає основні характеристики готової продукції: фізико-механічні і електричні властивості, монолітність, точність геометричних розмірів і їх стабільність. Саме стадія охолодження отверділого виробу визначає умови їх отримання з необхідними стабільними властивостями. При охолодженні в матеріалі виникають мікро- і макроскопічні залишкові напруження, які суттєво визначаються термічною усадкою зв'язуючого і які призводять до розтріскування зв'язуючого, тріщиноутворення, розшарування ПКМ, втрати герме-

тичності. Тому швидкість охолодження повинна бути такою, щоб усунути перелічені негативні наслідки і забезпечити отримання виробів з рівномірною структурою.

Таким чином, швидкість нагрівання і охолодження ПКМ вибирають з умови досягнення найбільшої глибини отвердіння за відносно короткий час і мінімального значення залишкових напружень.

Автори [5, 6] запропонували і довели, що найбільший ефект прискорення процесу отвердіння досягається при використанні електромагнітного поля надвисокої частоти (ЕМП НВЧ). При цьому отримано суттєве піліпшення фізико-механічних властивостей і їх стабільність. В роботі [7] автори розробили і навели модель процесу нагрівання склопластиків під впливом ЕМП НВЧ. Але в літературі обмежені дані з дослідження процесу охолодження ПКМ, що були отверджені під впливом НВЧ-енергії.

Постановка задачі дослідження

Основними цілями нижче приведенного дослідження є:

- вивчення ступеню теплообміну матеріалу з навколишнім середовищем;
- розробка програми для розрахунку просторового розподілу температури у часі при охолодженні склопластику після отвердіння під впливом ЕМП НВЧ.

Викладання матеріалу та результати

Дослідження процесу охолодження є важливою складовою для відпрацювання технологічного циклу обробки матеріалу. Зокрема, моделювання цього процесу може дати відповідь на таке питання, який повинен бути ступінь теплообміну матеріалу з навколишнім середовищем для уникнення надмірного градієнта температури при затвердінні та охолодженні матеріалу.

Розв'язання цієї задачі потребує вирішення при певних початкових та граничних умовах однорідного теплового рівняння, яке описує лінійний тепловий потік у твердому тілі, обмеженому двома паралельними площинами ($z=0$ і $z=d$). Будемо вважати, що фізичні параметри матеріалу є сталими величинами, тоді теплове рівняння набуває вигляду [8]

$$\alpha^2 \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} - \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0, \quad (1)$$

де $t = t(z, \tau)$ – температура в координаті z в момент часу τ ;

$\alpha^2 = \frac{K}{c\gamma}$ – коефіцієнт температуропровідності;

K – коефіцієнт теплопровідності;

c – питома теплоємність;

γ – щільність матеріалу.

У якості граничних умов виберемо умови, які відповідають вільному теплообміну поверхні матеріалу з навколишнім середовищем за законом Ньютона [8]:

$$\left. \begin{aligned} \left[K \frac{\partial t}{\partial z} - H(t - t_0) \right]_{z=0} &= 0, \\ \left[K \frac{\partial t}{\partial z} + H(t - t_0) \right]_{z=d} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де H – коефіцієнт теплообміну;

t_0 – температура оточуючого середовища.

Припустимо спочатку, що $t_0=0$ і позначимо $h = H / K$ ($h>0$), тоді граничні умови (2) приймають вигляд

$$\left. \begin{aligned} \left[\frac{\partial t}{\partial z} - ht \right]_{z=0} &= 0, \\ \left[\frac{\partial t}{\partial z} + ht \right]_{z=d} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Знайдемо часткові рішення рівняння (1), які задовольняють граничним умовам (3). Згідно методу власних функцій, представимо рішення у вигляді добутку двох функцій, причому, кожна з них залежать тільки від одного аргументу

$$t(z, \tau) = \Phi(z)\Psi(\tau), \quad (4)$$

де функція $\Phi(z)$ – функція змінної z ;

$\Psi(\tau)$ – функція змінної τ .

Підстановка (4) в (1) приводить до двох звичайних лінійних однорідних диференціальних рівнянь:

$$\Phi'' + q^2\Phi = 0 \quad ; \quad (5)$$

$$\Psi' + \alpha^2 q^2 \Psi = 0. \quad (7)$$

із відповідними граничними умовами

$$\left. \begin{aligned} \Phi'(0) - h\Phi(0) &= 0, \\ \Phi'(d) + h\Phi(d) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Рішення однорідного рівняння Гельмгольца (5) має вигляд

$$\Phi_n(z) = \cos(q_n z) + \frac{h}{q_n} \sin(q_n z) \quad (n=1, 2, \dots), \quad (9)$$

де q_n – n -й корінь рівняння $tg(qd) = \frac{2qh}{q^2 - h^2}$.

Рішення (7) при $q = q_n$ набуває вигляд

$$\Psi_n(t) = A_n \exp(-\alpha^2 q_n^2 t) \quad (n=1, 2, \dots), \quad (10)$$

де значення коефіцієнтів A_n знаходяться з початкових умов.

У якості початкових умов виберемо умову

$$t(z, 0) = t_N = \text{const}, \quad (11)$$

яка відповідає рівномірному розподілу температури вздовж координати z в результаті дії ЕМП НВЧ.

Для того, щоб задовольнити початковій умові (11), складаємо ряд із часткових рішень (4)

$$t(z, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\alpha^2 q_n^2 \tau) \left[q_n \cos(q_n z) + \frac{h}{q_n} \sin(q_n z) \right] \quad (12)$$

і затребуємо виконання рівності

$$t(z, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left[q_n \cos(q_n z) + \frac{h}{q_n} \sin(q_n z) \right] = t_N. \quad (13)$$

Підрахунок коефіцієнтів Фур'є дає

$$A_n = t_N \|N\|^2 \frac{1}{q_n^2} [q_n \sin(q_n d) - h \cos(q_n d) + h] \quad (n=1, 2, \dots). \quad (14)$$

Таким чином, рішення поставленої задачі дається рядом (12), де коефіцієнти A_n підраховуються за формулою (14).

Для обчислення температури в процесі охолодження в довільній координаті z в певний момент часу τ за рівнянням (12) була складена програма, входними параметрами якої є товщина шару, початкова температура, питома теплоємність матеріалу, коефіцієнт теплопровідності, густина матеріалу, коефіцієнт теплообміну.

На рисунку приведені розраховані температурні картини $t(z, \tau)$ в процесі стаціонарного охолодження шару товщиною $d=30$ мм для двох значень коефіцієнта теплообміну H ($t_N=130$ °C; $t_0=20$ °C;

$$c=922 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; K=0,464 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \gamma=1,87 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3).$$

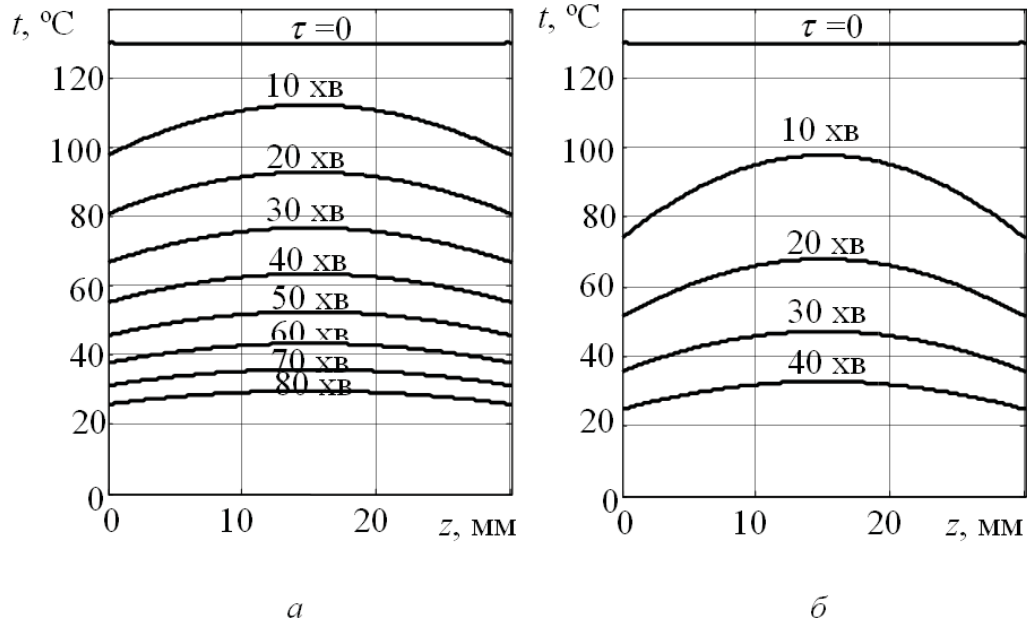


Рисунок 1 – температурні картини $t(z, \tau)$ при охолодженні шару для значень коефіцієнта теплообміну: $a - H = 9 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; $b - H = 19 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$

Висновки

Показано, що максимальний градієнт температур у зразку, навіть при сталому коефіцієнті теплообміну, має місце на початковій стадії процесу охолодження. Розрахунки показали, що для уникнення різниці температур всередині і на поверхні зразка меншої, ніж $10^0С$, потрібно, щоб коефіцієнт теплообміну не перевищував $5 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$.

Останнє можливе лише при виключенні вільного теплообміну поверхні нагрітого зразка з повітрям. Таким чином, в режимі витримки, при якому відбувається затвердіння матеріалу, необхідно забезпечувати теплоізоляцію зразка.

Чисельне моделювання охолодження дало змогу обрати оптимальні режими нагрівання при полімеризації та швидкості охолодження при розробці всього технологічного процесу обробки ПКМ за допомогою НВЧ енергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Недорезков Е.К. Расчет температурных полей в стеклопластиковых трубах при нагреве ИК-излучателем / Е.К. Недорезков, А.Н. Никитин, С.С. Ермоленко // Пластические массы. – 1986. – №4.–С.41-43.
2. Кестетельман В.М. Физические методы модифицированных полимерных материалов / В.М. Кестельман. – М.: Химия, 1980.– 224с.
3. Цаплин А.Н. Динамика отверждения стеклопластикового цилиндра, облучаемого пучком электронов / А.Н. Цаплин, С.В. Бочкарев // Механика композиционных материалов.–1989.–№2.–С.341-345.
4. Зеленев Ю.В. Влияние термомагнитной обработки на теплофизические и механические свойства полимеров / Ю.В. Зеленев, Г.В. Кирик, А.Ф. Стадник // Пластические массы. – 2003. –№4.– С.17-19.
5. 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.
6. Демура А.Л. Використання електромагнітного поля надвисокої частоти в технологічному процесі виготовлення виробів з полімерних композиційних матеріалів / А.Л. Демура // Вестник двигателестроения. – Запорожье: Мотор Сич. – 2006. – №4. – С.76-79.
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.
8. Толстов Г.П. Ряды Фурье / Г.П. Толстов – М.:Наука, 1980. – 381с.