

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ АВТОКЛАВНОГО ЗАТВЕРДІВАННЯ ЗАГОТОВОК З ВУГЛЕПЛАСТИКІВ

Скачков В.О., Грицай В.П., Іванов В.І., Нестеренко Т.М.
Запорізька державна інженерна академія, colourmet@zgia.zp.ua

Процес автоклавного затвердіння вуглецевих заготовок є одним з найважливіших технологічних етапів під час продукування виробів із композитних матеріалів на основі полімерної матриці та формальдегідної смоли.

Головним параметром зазначеного процесу є температура в об'ємі вуглепластикової заготовки, що піддають затвердінню, рівень якої визначають тепловим станом автоклава, тиском в його робочому обсязі, а також передаванням теплоти в системі «оснащення-заготовка-оправка». Останній фактор характеризується наявністю значної теплової інерції процесу нагрівання зазначеної заготовки. Отже, під час моделювання процесу затвердіння заготовки необхідно враховувати інформацію, що є попередньою до нагрівання автоклава, та поточну температуру в його робочому обсязі.

Для описування процесу нагрівання заготовки в автоклаві може бути запропонована модель, яку подано у вигляді співвідношення:

$$T_3(t) = A(P) \cdot T_a(t) + \int_0^t k(t-\tau) \frac{\partial T_a(\tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (1)$$

де $T_3(t)$, $T_a(t)$ – відповідно температура заготовки та температура в робочому обсязі автоклава на момент часу t , °C; $A(P)$ – регресійний коефіцієнт, що залежить від тиску P в робочому обсязі автоклава; $k(t-\tau)$ – функція впливу передісторії нагрівання автоклава на температуру заготовки.

Функція $k(t-\tau)$ за своїм фізичним сенсом є такою, що монотонно зменшується та за значенням аргумента, який прагне до нескінченності, прямує до нуля. Такими властивостями характеризується функція типу

$$k(t-\tau) = B \cdot \exp[-K(t-\tau)], \quad (2)$$

де B , K – емпіричні константи.

Аналіз експериментальних кривих розподілу температури в робочому обсязі автоклава свідчить про те, що найбільш зручним способом їх подання є лінійна апроксимація на локальних часових інтервалах:

$$T_a(t_N) = \sum_{i=1}^N (a_i + b_i \cdot t_N), \quad (3)$$

де a_i , b_i – параметри апроксимації кривих розподілу температури у робочому обсязі автоклава; N – кількість ділянок, на які поділяють процес нагрівання під час апроксимації; t_N – сумарний час до кінця N -ої ділянки.

Після підставлення співвідношень (2) і (3) до рівняння (1) та нескладних перетворень можна записати:

$$T_3(t_N) = A(P) \cdot \sum_{i=1}^N (a_i + b_i \cdot t_N) - \frac{B(P)}{K} \cdot \sum_{i=1}^N b_i \cdot \exp[-K \cdot (t_N - t_i)]. \quad (4)$$

Значення параметрів $A(P)$, $B(P)$ і K у рівнянні (4) обчислюють з використанням регресійних методів [1].

Енергетичне забезпечення процесу затвердіння заготовки визначається значенням електричного струму та напруги, що підводять до роторного нагрівача автоклава. Величину потужності $W_a(t)$, що є необхідною для створення в робочому обсязі автоклава температури

$T_a(t)$, можна розрахувати з використанням моделі, яка відповідає рівнянню (1):

$$W_a(t) = V \cdot T_a(t) + \int_0^{\tau} R(t-\tau) \frac{\partial T_a(t)}{\partial \tau} d\tau, \quad (5)$$

де $R(t-\tau) = R \cdot \exp[-\omega \cdot (t-\tau)]$; V , R , ω – дослідні константи.

Параметри V , R і ω обчислюють за методикою, що є аналогічною до розрахунків коефіцієнтів $A(P)$, $B(P)$ і K .

Якщо температура автоклава $T_a(t_N)$ є відомою, то визначають необхідну потужність $W_a(t_N)$, яка забезпечує в даному агрегаті розрахункову температуру в його робочому обсязі $T_a^p(t_N)$ та розрахункову температуру заготовки $T_3^p(t_N)$.

У разі, коли параметри, що обумовлюють тепловий баланс автоклава, є постійними розрахункове значення $T_3^p(t_N)$ буде дорівнювати заданій величині $T_3(t_N)$. Змінювання внутрішніх і зовнішніх факторів процесу затвердіння, що забезпечують дотримання теплового балансу автоклава супроводжується появою непогодженості $\Delta T(t_N)$:

$$\Delta T(t_N) = T_3^p(t_N) - T_3(t_N). \quad (6)$$

Якщо значення непогодженості $\Delta T(t_N)$ перевищує припустиму погрішність, то її слід компенсувати. Для цього передбачено алгоритм адаптивного управління, що заснований на уточненні коефіцієнта $A(P)$. Під час адаптивного управління коефіцієнт $A(P)$ обчислюють за формулою:

$$A(P)_{t_{N+1}} = A(P)_{t_N} + \frac{\Delta T(t_N)}{T_a(t_N)}. \quad (7)$$

Алгоритм управління процесом автоклавного затвердіння є таким. До пам'яті ПЕОМ вводять закон змінювання температури затвердіння заготовки та величину припустимого відхилення вимірюваної температури заготовки від заданого значення. Обчислюють значення коефіцієнтів рівняння (3), а, отже, й температури $T_a(t)$. Потім розраховують значення потужності, яка забезпечує в робочому обсязі автоклава температуру $T_a(t)$. Після того, як система управління роботою автоклава видає зформований сигнал, визначають величину непогодженості $\Delta T(t_N)$. Якщо її значення є більшим ніж припустима величина, то виконують адаптивне змінювання коефіцієнтів моделі з подальшим обчисленням температури в робочому обсязі автоклава та потрібної потужності для наступного інтервалу часу. Виконуючи зазначену процедуру для всіх інтервалів часу, одержують повний процес управління автоклавним затвердінням заготовки.

Практичну реалізацію управління процесом нагрівання заготовки з композиційних матеріалів під час автоклавного затвердіння, що засновано на співвідношеннях (1)-(4), подають у вигляді програми ТУРБО-ПАСКАЛЬ для ПЕОМ.

Вихідними даними для проведення управління зазначеним процесом є:

- тиск в робочому обсязі автоклава;
- точність задавання температури заготовки;
- температура заготовки та температура в робочому обсязі автоклава на кожному інтервалі часу;
- кількість інтервалів часу на графіку нагрівання заготовок, їх тривалість;
- коефіцієнти моделі.

1. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов экспериментов. - М.: Наука, 1971. - 192 с.