

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМООБРОБКИ ПОРИСТОГО ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ В ВИХРОВОМУ АПАРАТІ ЗА МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

**Вступ.** Область застосування теплоізоляційних матеріалів безпосередньо залежить від теплофізичних і механічних властивостей самого матеріалу, які також пов'язані між собою. Механічні властивості визначають поведінку матеріалу при деформації і руйнуванні від дії зовнішніх навантажень і при температурній нарузі.

**Постановка задачі.** Для виявлення впливу характеристик термічних режимів обробки на механічні властивості оброблюваного матеріалу поставлено задачу отримати математичну модель процесу термічної обробки пористого матеріалу [1-3]. В якості показників процесу, що характеризують поведінку матеріалу при деформації і руйнуванні від дії зовнішніх навантажень, взяті модуль пружності  $Y_1$  і міцність матеріалу  $Y_2$ . В якості факторів, що характеризують термічний режим обробки, обрано температуру термічного процесу  $X_1$ , час термічного впливу  $X_2$ , вологість матеріалу  $X_3$  і пористість матеріалу  $X_4$ .

Для визначення механічних властивостей при статичних випробуваннях найчастіше використовують дані, отримані при випробуванні на розтяг [4]. Випробування на розтяг проводиться на спеціальних машинах, які записують діаграму залежності подовження зразка  $\Delta l$  (мм) від діючої сили завантаження  $P$ , тобто  $\Delta l = f(P)$ . На основі діаграм розтягування будують діаграму «залежність відносного подовження  $\delta$  (%) від напруження  $\sigma$ ».

**Результати роботи.** Дані, отримані в ході експерименту, наведено в табл.1 і 2. Для побудови моделей використовувався ортогональний центральний композиційний план другого порядку з ядром  $2^4$  [5].

Таблиця 1 – Рівні варіювання

$X$	-1,414	-1	0	+1	+1,414	$\Delta$
$X_1$	20	100	300	500	580	200
$X_2$	0,2	1	3	5	5,8	2
$X_3$	24	30	45	60	66	15
$X_4$	56	60	70	80	84	10

Після проведених розрахунків за алгоритмом методу були отримані наступні квадратичні моделі залежностей  $Y_1$  і  $Y_2$  від досліджуваних факторів  $X_k$ ,  $k=1, \dots, 4$ :

$$Y_1 = 0,376 - 0,053X_1 - 0,064X_2 + 0,005X_3 + 0,0009X_4 - 0,020X_1^2 - 0,025X_2^2 + 0,042X_3^2 - 0,003X_4^2 - 0,043X_1X_2 + 0,005X_3X_4, \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,05 - 0,0058X_1 - 0,0089X_2 + 0,0008X_3 + 0,0006X_4 - 0,0046X_1^2 - 0,005X_2^2 + 0,004X_3^2 - 0,0038X_4^2 - 0,0003X_1X_2 - 0,0015X_1X_3 + 0,0003X_1X_4 - 0,0004X_2X_3 + 0,0009X_2X_4 + 0,004X_3X_4, \quad (2)$$

де  $X_1, X_2, X_3, X_4$  – кодовані значення факторів [5].

Для перевірки залежності впливу факторів і їх взаємодії на показники, а також адекватності, оцінена дисперсія помилок спостережень  $S_1^2$  і  $S_2^2$ , відповідно для  $Y_1$  і  $Y_2$ . Для цього кожного показника в «нульовій» точці  $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 0$  проведено чотири повторних досліди. Їх результати для значень  $Y_1$ : 0,300; 0,358; 0,347; 0,319, для значень  $Y_2$ : 0,023; 0,034; 0,024; 0,026.

Таблиця 2 – Отримані значення модулю пружності та міцності

№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1$	$Y_2$
1	+	+	+	+	0,181	0,020
2	-	+	+	+	0,362	0,031
3	+	-	+	+	0,395	0,038
4	-	-	+	+	0,519	0,076
5	+	+	-	+	0,154	0,023
6	-	+	-	+	0,416	0,035
7	+	-	-	+	0,433	0,041
8	-	-	-	+	0,429	0,039
9	+	+	+	-	0,159	0,018
10	-	+	+	-	0,428	0,044
11	+	-	+	-	0,444	0,048
12	-	-	+	-	0,433	0,046
13	+	+	-	-	0,190	0,025
14	-	+	-	-	0,388	0,039
15	+	-	-	-	0,419	0,053
16	-	-	-	-	0,530	0,078
17	-1,414	0	0	0	0,321	0,047
18	+1,414	0	0	0	0,375	0,051
19	0	-1,414	0	0	0,322	0,046
20	0	+1,414	0	0	0,353	0,050
21	0	0	-1,414	0	0,421	0,056
22	0	0	+1,414	0	0,519	0,076
23	0	0	0	-1,414	0,283	0,038
24	0	0	0	+1,414	0,480	0,063
25	0	0	0	0	0,331	0,027

$X_1$  – температура процесу ( $T_{-1}=100^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0=300^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{+1}=500^{\circ}\text{C}$ );

$X_2$  – час термічного впливу ( $t_{-1}=1\text{c}$ ;  $t_0=3\text{c}$ ;  $t_{+1}=5\text{c}$ );

$X_3$  – вологість матеріалу ( $\varphi_{-1}=30\%$ ;  $\varphi_0=45\%$ ;  $\varphi_{+1}=60\%$ );

$X_4$  – пористість матеріалу ( $\phi_1=60\%$ ;  $\phi_2=70\%$ ;  $\phi_3=80\%$ );

$Y_1$  – модуль пружності, МПа;

$Y_2$  – міцність, МПа.

У результаті розрахунку за формулою оцінки дисперсії помилки спостереження:

$$S^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (Y_i - \bar{Y})^2, \quad (3)$$

де  $Y_i$  – спостережуване значення показника  $Y$  в  $i$ -му повторному дослідженні, а  $\bar{Y}$  – середнє значення  $Y$  у «нульовій» точці.

У результаті розрахунків оцінки дисперсії помилки спостереження отримані наступні результати:  $S_1^2 = 0,0007$  і  $S_2^2 = 0,0000025$ .

«Пороги значущості» для оцінок коефіцієнтів, що характеризують силу впливу факторів і їх ефектів взаємодії, знаходилися як  $h_i \cdot S$ , де  $S$  – середньоквадратичне відхи-

лення помилки спостереження,  $h_i = t_{kp}(\alpha; \varphi) \cdot \sqrt{c_i}$ ,  $t_{kp}(\alpha; \varphi)$  – критичне значення розподілу Стьюдента для рівня значущості  $\alpha$  і числа ступенів свободи  $\varphi$ . У проведених дослідженнях  $\varphi=3$ ,  $c_1 = 0,05$  для  $x_i$ ,  $c_2 = 0,125$  для  $x_i^2$ ,  $c_3 = 0,0625$  для  $x_i \cdot x_j$ ,  $i, j = 1, \dots, 4$  [5].

У результаті розрахунків за наведеною вище формулою «пороги значущості» для оцінок коефіцієнтів склали для рівня значущості  $\alpha = 0,05$ , для показника  $Y_1$  0,021; 0,033; 0,023, для показника  $Y_2$  0,004; 0,0056; 0,004. Для рівня значимості  $\alpha = 0,1$  для  $Y_1$  0,014; 0,020; 0,015; для  $Y_2$  0,003; 0,0042; 0,003.

Виключивши з моделей чинники і їх взаємодії, величина коефіцієнтів яких за модулем менше зазначених «порогів значущості», для рівня значущості  $\alpha = 0,1$  отримано наступні залежності:

$$\hat{Y}_1 = 0,374 - 0,053X_1 - 0,064X_2 - 0,020X_1^2 + 0,025X_2^2 + 0,042X_3^2 - 0,043X_1X_2, \quad (4)$$

$$\hat{Y}_2 = 0,05 - 0,0058 X_1 + 0,0089 X_2 + 0,0046 X_1^2 + 0,0051 X_2^2 + 0,0041 X_3 X_4. \quad (5)$$

Треба відзначити, що вплив на  $Y_1 - X_1, X_2, X_3^2, X_1 \cdot X_2$  значимий з ймовірністю 0,95, а вплив  $X_1^2$  і  $X_2^2$  з ймовірністю 0,90. Аналогічно, вплив на  $Y_2 - X_1, X_2, X_3 \cdot X_4$  значимий з ймовірністю 0,95, а  $X_1^2$  й  $X_2^2$  з ймовірністю 0,9.

Перевірка адекватності отриманих моделей проводилася за критерієм Фішера. Розрахункове значення  $F$  статистики знаходилося за формулою:

$$F_P = \frac{S_{OCT}^2}{S^2}, \quad (6)$$

Для отриманих моделей залишкова дисперсія знаходилася як:

$$S_{ЗАЛИШ}^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (7)$$

де  $n = 25$  – кількість дослідів;  $m$  – кількість коефіцієнтів в моделі.

В результаті для  $Y_1$ :  $S_{ЗАЛИШ1}^2 = 0,0053$  і  $F_{P1} = 7,56$ ; для  $Y_2$ :  $S_{ЗАЛИШ2}^2 = 0,00002$  і  $F_{P2} = 8,00$ . Табличні значення  $F$ -статистики для рівня значущості  $\alpha=0,05$  для  $Y_1$   $F_{ТАБЛ} = F(0,05;18;3) = 8,675$ , для  $Y_2$   $F_{ТАБЛ} = F(0,05;19;3) = 8,667$ . Так як  $F_P$  для обох моделей менше  $F_{ТАБЛ}$ , то обидві моделі адекватні з надійністю 0,95 дійсної залежності та можуть бути використані для технологічного аналізу процесу і прогнозу значень показників  $Y_1$  і  $Y_2$ .

Так як регресійні залежності для модуля пружності  $Y_1$  і міцності  $Y_2$  вийшли адекватними експериментальними даними, цей факт дозволив використовувати їх для управління процесом термічної обробки. В якості опції ланцюга була взята міцність  $Y_2$ , а модуль пружності  $Y_1$  включений в обмеження. В результаті отримана наступна оптимізаційна модель процесу термічної обробки:

$$\max Y_2 = 0,05 - 0,0058X_1 - 0,0089X_2 - 0,0046X_1^2 - 0,0051X_2^2 + 0,0041X_3X_4, \quad (8)$$

$$Y_1 = 0,374 - 0,053X_1 - 0,064X_2 - 0,020X_1^2 - 0,025X_2^2 + 0,042X_3^2 - 0,043X_1 \cdot X_2 \leq 0,45. \quad (9)$$

Для визначення оптимального режиму термічної обробки за температурою та часом складалася функція Лагранжа:

$$L = Y_2 + \lambda(Y_1 + X_3 - 0,45). \quad (10)$$

Для визначення оптимальних значень  $X_i, i = 1, \dots, 5$  отримана система рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial X_1} = -0,0058 - 0,0092X_1 + \lambda(-0,53 - 0,4X_1 - 0,43X_2) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial X_2} = -0,0089 - 0,0102X_2 + \lambda(-0,64 - 0,5X_2 - 0,43X_1) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial X_3} = 0,0041X_4 + 0,84 \cdot \lambda \cdot X_3 = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial X_4} = 0,0041X_3 = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial X_5} = \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0,374 - 0,053X_1 - 0,064X_2 - 0,02X_1^2 - 0,025X_2^2 + \\ + 0,042X_3^2 - 0,043X_1 \cdot X_2 + X_5 - 0,45 = 0 \end{array} \right. \quad (11)$$

У результаті розв'язання даної системи рівнянь отримана стаціонарна точка функції Лагранжа в кодованих значеннях змінних  $X_i$ :  $X_1 = -0,63$ ;  $X_2 = -0,87$ ;  $X_3 = 0$ ;  $X_4 = 0$ ;  $X_5 = 0,076$ ;  $\lambda = 0$ ; в натуральних величинах:  $X_1 = 174^\circ$ ,  $X_2 = 1,3$  сек.,  $X_3 = 45\%$ ,  $X_4 = 70\%$ . Точковий прогноз показників за отриманими моделям для даного термічного режиму обробки пористого матеріалу склав: значення модуля пружності дорівнює  $0,413$ , значення міцності матеріалу на стискання дорівнює  $0,056$ .

**Висновки.** За результатами проведеного дослідження основним фактором, що визначає міцність теплоізоляційного пористого матеріалу, є тривалість термічної дії. Очевидно, що саме цей фактор визначає інтенсивність тепломасообмінних процесів у початковому матеріалі, яка взаємопов'язана з основним технологічним показником - температурою зовнішнього теплоносія. Таким чином, використовуючи отримані дані, можна прогнозувати механічні властивості пористого матеріалу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Чураев Н.В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах. М.: Химия, 1990. 272 с.
2. Пат. 25862 Україна. МПК С 04 В 14/00. Сировинна суміш для пористого теплоізоляційного матеріалу / Соколовська І.Є., Кошлак Г.В., Павленко А.М., заявник і власник Дніпродз. держ. техн. ун-т. № 200703899; заявл. 10.04.2007; опубл. 27.08.2007, Бюл. №13, 2007 р.
3. Соколовська І.Є. Чумак К.В. Оптимізація процесу виробництва пористого теплоізоляційного матеріалу в вихровому апараті. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське: ДДТУ. 2020. Випуск 1 (36). С. 93-98.
4. Мозберг Р.К. Материаловедение. М.: Высш. шк., 1991. 448 с.
5. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 552 с.

Надійшла до редколегії 13.10.2020.