

УДК 535.024:620.168:678.02:678.5.059

О. Є. Колосов, д-р. техн. наук,
В. І. Сівецький, канд. техн. наук,
В. С. Кривошеєв, канд. техн. наук,
О. П. Колосова, асистент

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОДЕРЖАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проаналізовані особливості використання методів моделювання в прикладних задачах на прикладі оптимізації технологічних параметрів ультразвукового формування реактопластичних полімерних композиційних матеріалів.

Ключові слова: *технологія, параметр, моделювання, експеримент, математика, статистика, епоксид, полімер, олігомери, зв'язуюче, ультразвук.*

Вступ. Сучасний етап розвитку хімічної, машинобудівної, будівельної, та ряду інших галузей промисловості характеризується існуванням на ринку величезної кількості полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), які розрізняються між собою не тільки складами і фізико-механічними властивостями, але й технологією одержання.

Розвиток технологічних процесів переробки різних ПКМ, численні сфери застосування таких матеріалів вимагають ясного розуміння закономірностей процесів формування кінцевого продукту з детермінованими фізико-механічними та структурними характеристиками.

Слід відзначити, що виготовлення виробів з ПКМ — порівняно складний технологічний процес, що базується на використанні певних фізико-хімічних закономірностей. Адаже в залежності від умов формування ПКМ змінюються його фізико-механічні властивості. Тому вибір і обґрунтування режимних параметрів формування, а також параметрів формуючого обладнання, мають принципове значення.

Одна з важливих складових розв'язання цієї проблеми — оптимізація режимних параметрів технологічних процесів та конструктивно-технологічних параметрів реалізуючого обладнання для формування, переробки, а також створення ПКМ з певним, заздалегідь заданим комплексом властивостей. Не менш важливим є здійснення направленої фізико-хімічної модифікації існуючих ПКМ з метою покращання їх експлуатаційних властивостей.

Це, у свою чергу, обумовлює підвищені вимоги до існуючих технологій формування ПКМ та реалізуючого їх технологічного обладнання, зокрема, до інтенсифікації процесів формування, наприклад, за допомогою ультразвуку (УЗ), при одночасному зниженні енергоємності та досягненні ресурсозбереження при реалізації цих процесів [3].

Таким чином, для обґрунтованого проектування параметрів технологічних процесів виготовлення виробів і конструкцій з ПКМ доцільним є широке використання методів моделювання (як математичного, так і експериментально-статистичного) цих процесів. Крім того, застосування математичних методів планування експерименту для оптимізації режимних параметрів базових процесів одержання ПКМ дозволяє істотно скоротити спектр і кількість необхідних експериментів, а також суттєво зменшити фінансові і часові витрати на їх проведення.

У свою чергу, знайдені оптимальні технологічні параметри УЗ-обробки, а саме частота, амплітуда, інтенсивність, час, температура, тиск, можуть використовуватись для детермінації конструктивно-технологічних параметрів реалізуючого УЗ-технологічного обладнання (ванн для об'ємного озвучування, просочувального, дозувального і активаційного обладнання).

Вирішення вищезазначених проблемних ситуацій в базових технологіях одержання ПКМ, у тому числі армованих волокнистими наповнювачами, дозволяє направлено вибирати режимні параметри нових енергоощадних технологій їх одержання та прогнозувати властивості одержуваних матеріалів на основі створених адекватних експериментально-статистичних моделей [4].

Постановка задачі. Метою досліджень є аналіз ефективності використання методів математичного та експериментально-статистичного моделювання для оптимізації технологічних параметрів ультразвукового одержання реактопластичних полімерних композиційних матеріалів на основі епоксидних олігомерів.

Використовувані матеріали, експериментально-статистична обробка результатів вимірювань та методика оптимізації технологічних і режимних параметрів формування. Як полімерну реактопластичну матрицю у складі ПКМ використовували епоксидну композицію (ЕК) у складі епоксидного олігомеру (ЕО) марки ЕД-20, що затверджували аміним твердником — діетилентриаміном ДЕТА. Вимірювали крайовий кут змочування Θ , змочувальну здатність $\sigma \cos \Theta$, динамічну вязкість η ЕО, а також температуру склування T_c затверділого полімеру на основі ЕД-20.

Рідкою композицією на базі ЕД-20 просочували джгут на основі скловолкна і органоволкна, в результаті чого будували кінетичні криві просочування (залежність висоти підйому h ЕО по волокну у залежності від часу просочення).

УЗ-дію (або УЗ-коливання — УЗК) здійснювали при частоті $f = 17\text{--}44$ кГц, амплітуді $A = 20\text{--}100$ мкм, інтенсивності $I = 5\text{--}15$ Вт/см² і температурі $T = 50\text{--}70$ °С протягом часу $\tau = 25\text{--}35$ хв.

Обробку результатів вимірювань та оптимізацію технологічних і режимних параметрів формування ПКМ здійснювали наступним чином.

По результатам досліджень визначали середнє значення \bar{x} дискретної випадкової вимірюваної величини x за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{N^o} \sum_{i=1}^N x_i,$$

де N^o — число випробувань; x_i — значення випадкової величини при i -му випробуванні.

Середньоквадратичне відхилення $\bar{S}_\sigma(x)$ дискретної випадкової величини x характеризує розсіювання експериментальних даних і визначається за формулою:

$$\bar{S}_\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - Nx_i}{N_o - 1}}.$$

Коефіцієнт варіації k_V визначають за величиною середньоквадратичного відхилення по формулі:

$$k_V = \frac{\bar{S}_\sigma(x)}{\bar{x}} \cdot 100, [\%].$$

Точність середнього арифметичного $\tilde{\varepsilon}$ визначають так:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\bar{x}}{\frac{\sqrt{N_o}}{\tilde{f}}},$$

де \tilde{f} — критерій точності, що залежить від числа вимірів N^o і обраної ймовірності знаходження розрахованих величин середньоарифметичного всередині довірчого інтервалу ($\bar{x} - \tilde{\varepsilon}$, $\bar{x} + \tilde{\varepsilon}$).

Що стосується вибору математичних методів планування експерименту, які застосовували для оптимізації параметрів модифікації ЕО, то слід відзначити наступне.

При детальному вивченні локальної області факторного простору (тобто простору, який утворюють вже раніше досліджувані входні технологічні параметри), до цього вже приблизно вивченої, слід обирати саме D -оптимальний план реалізації експерименту.

Останній, як правило, і застосовується для вирішення задач такого типу, так як дозволяє отримувати план реалізації експерименту з меншою кількістю точок, на відміну від повнофакторного експери-

менту. Це, у свою чергу, що значно зменшує сировинні, часові й енергетичні витрати на реалізацію D -оптимального плану.

Тому, скориставшись цим, можна синтезувати D -оптимальний план з мінімально можливою для більш-менш достовірної інформації кількістю експериментів, величина яких, звичайно, є більшою за кількість факторів, і в результаті регресивного аналізу знайти коефіцієнти шуканої математичної моделі.

Синтез D -оптимального плану та статистичну обробку отриманих експериментальних даних проводили за допомогою програмного продукту STAT-SENS [5].

Відповідно до використовуваної методики обробки експериментальних даних [5], проводили також перевірку однорідності дисперсій та оцінку значимості коефіцієнтів для математичних моделей, одержаних для досліджуваних процесів модифікації ПКМ.

Для перевірки гіпотези про адекватність математичної моделі необхідно співставити досягнуту точність моделі з величиною, яка характеризує точність спостережень. Якщо похибки, що характеризують точність моделі, перевищують похибки спостережень, то гіпотеза про адекватність моделі відхиляється.

Так як перевірка адекватності отриманих моделей досліджуваних процесів фізичної і хімічної модифікації проводилась за допомогою статистичного критерію Фішера F , то вважали, що рівняння регресії адекватно описує досліджуваний процес виготовлення ПКМ, якщо остаточно дисперсія (дисперсія адекватності) s_{ocm}^2 вихідної величини $Y_i^p(X) = Y_{розр}$, розрахованої по рівнянню регресії відносно експериментальних даних Y_i , не перебільшує в статистичному сенсі похибку експериментальних досліджень [5].

Слід зазначити, що для визначення шуканої похибки експериментальних досліджень необхідно мати декілька значень вихідної змінної $Y_{розр}$, вимірної при однакових умовах, у зв'язку із чим необхідно проводити паралельні експерименти. При цьому вважають, що отримане рівняння регресії адекватно описує досліджуваний процес, якщо виконується наступна нерівність:

$$F_p = s_{ocm}^2 / s_o^2 < F_T,$$

де s_o^2 — дисперсія відносно середнього \bar{Y} ; s_{ocm}^2 — остаточно дисперсія; F_T і F_p — відповідно теоретичне (табличне) і розраховане значення критерію Фішера.

Дисперсія відносно середнього s_o^2 дорівнює:

$$s_o^2 = \frac{1}{N_{II} - 1} \sum (Y_i - \bar{Y})^2,$$

де N_{II} — число паралельних вимірювань показника.

Остаточна дисперсія s_{ocm}^2 дорівнює:

$$s_{ocm}^2 = \frac{1}{m-n} \sum_{i=1}^m (Y_{розр} - Y_i)^2,$$

де різниця $m-n = \varphi_1$ — число ступенів свободи, що є різницею між числом експериментальних точок (m) і числом коефіцієнтів у рівнянні, включаючи вільний член (n).

Але якщо паралельні експерименти не проводили (у зв'язку з необхідністю витрачання великого обсягу енергетичних та сировинних ресурсів), то розрахувати дисперсію (похибку) експериментів у цьому випадку неможливо. Тоді замість перевірки адекватності складеного рівняння регресії виконували оцінку якості апроксимації дослідних (експериментальних) точок прийняттям рівнянням регресії.

Таку перевірку здійснювали порівнянням остаточної дисперсії s_{ocm}^2 та дисперсії s_o^2 відносно середнього \bar{y} по всім дослідом. При цьому вимога, за якої рівняння регресії має сенс, виражається нерівністю $F_p > F_T$.

Що стосується іншого аспекту оптимізації технологічних параметрів фізичної та хімічної модифікації ПКМ, то відомо [5], одним із найвдаліших методів розв'язання задачі оптимізації технологічних процесів з будь-якою кількістю відгуків (Y_i) є використання узагальненого критерію оптимізації Харінгтона і так званої функції бажаності D , на базі яких і побудований математичний апарат STAT-SENS [5].

При її побудові вимірювані значення відгуків перетворюють у безрозмірну шкалу бажаності d з інтервалами її зміни від 0 до 1. При цьому значення $d(D) = 0$ відповідає абсолютно неприпустимому значенню відгуку, а $d(D) = 1$ — найбажанішому значенню відгуку. Тому при знаходженні оптимальних значень проводили багатокритеріальну оптимізацію із залученням функції бажаності Харінгтона.

Крім того, при здійсненні пошуку компромісної точки, тобто точки, яка б задовольняла значення всіх технологічних чи експлуатаційних характеристик ПКМ, значення змінних розігрували згідно з нормальним законом розподілу. При цьому найкращі та найгірші значення вихідної змінної Y були вибрані відповідно до апріорної інформації про особливості технологічного процесу фізико-хімічного формування ПКМ та про бажані результати експерименту, які можна отримати за даних умов.

Крім того, для досліджуваних математичних моделей визначали такі статистичні характеристики, як SSE , SSR , $r_{x,y}$ та R^2 , де: SSE — сума квадратів помилок, що дорівнює:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

де y_i — експериментальні дані; \hat{y}_i — розраховані за допомогою апроксимуючого поліному значення вихідної величини; SSR — сума квадратів, що пояснює регресію, і яка обчислюється як квадрат різниці між середнім значенням вихідної змінної \bar{y} та розрахованим значенням \hat{y}_i :

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2,$$

$r_{x,y}$ — коефіцієнт кореляції, що дорівнює:

$$r_{x,y} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{var}(x) \cdot \text{var}(y)}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

при цьому чисельник виразу для $r_{x,y}$ обчислюється так:

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(x_i - \bar{x} \right) \left(y_i - \bar{y} \right),$$

де x_i, y_i — експериментальні значення відповідно незалежної та залежної змінної; \bar{x}, \bar{y} — середнє експериментальне значення відповідно незалежної та залежної змінної; множники знаменника виразу для $r_{x,y}$ обчислюються так:

$$\text{var}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; \quad \text{var}(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2,$$

а R^2 — коефіцієнт детермінації, що є квадратом коефіцієнта кореляції $r_{x,y}$.

Результати оптимізації технологічних характеристик епоксидних олігомерів і зв'язуючих на їх основі, що були піддані ультразвуковій обробці. У таблиці 1 наведені зведені порівняльні результати вимірювань деяких технологічних характеристик вихідних ЕО та експлуатаційних характеристик затверділих ЕК на основі ЕД-20+ДЕТА, а також композицій, отриманих за відомим способом аналога [6], способом прототипу [7] і за досліджуваними технологічними режимами [8].

Таблиця 1

*Вплив параметрів УЗ-обробки на технологічні
і експлуатаційні властивості ЕК у складі ЕД-20 + ДЕТА*

Параметри УЗ-обробки					Властивості ЕО			
f , кГц	A , мкм	I , Вт/см ²	T , °С	τ , хв	η , Па·с	Θ_{min} , °	h_{max} , мм	T_c , °С
Вихідний олігомер ЕД-20								
—	—	—	—	—	0,78	30	0,90	104
Віброакустична обробка олігомера ЕД-20								
29	8	3	100	40	0,86	21	1,40	114
Віброакустична обробка олігомера ЕД-20								
17-44	50-120	15-30	70-90	30-45	0,840	19-20	2,00	118
УЗ-обробка олігомера ЕД-20 за розробленою технологією								
16	10	4	50	25	0,83	18,6	2,40	118,5
16	30	10	80	35	0,83	18,8	2,50	119,0
18	10	4	50	25	0,83	18,5	2,40	118,5
18	30	10	80	35	0,83	18,9	2,48	118,5
20	20	7	65	30	0,83	18,4	2,35	120,0
20	30	10	80	35	0,82	19,0	2,35	118,5
22	10	4	50	25	0,83	18,5	2,25	118,8
22	30	10	70	35	0,83	18,8	2,10	118,0
24	20	7	60	30	0,83	18,5	2,10	119,0
24	30	10	80	35	0,83	19,0	2,15	118,0
Відхилення від оптимальних параметрів УЗ-обробки олігомера ЕД-20 за розробленою технологією								
8	3	2	40	10	0,83	24,0	1,40	110
8	10	5	100	60	0,84	23,0	1,45	112
10	50	20	100	15	0,86	22,0	1,50	113
10	30	15	120	20	0,85	21,5	1,60	114
13	20	2	40	20	0,85	23,5	1,75	112
30	20	4	100	40	0,89	23,0	1,80	114
44	40	15	120	40	0,91	23,5	1,80	113

При цьому для отримання достовірної картини щодо ефектів зміцнення та поліпшення експлуатаційних властивостей відтворювали експерименти за схемою усіх способів на ЕО марки ЕД-20, взятої з однієї партії. Параметри відтворення експериментів указані у верхній частині табл. 1.

З таблиці 1 видно, що відхилення від описаних ефективних режимних параметрів УЗ-обробки олігомера ЕД-20 призводить до погіршення технологічних і експлуатаційних характеристик ЕК.

Було експериментально встановлено, що часова залежність крайового кута змочування Θ і змочувальної здатності $\sigma \cos \Theta$ для низьких УЗ-частот f , що досліджуються, і температур розігрівання T (обробки) носить також екстремальний характер (див. рис. 1).

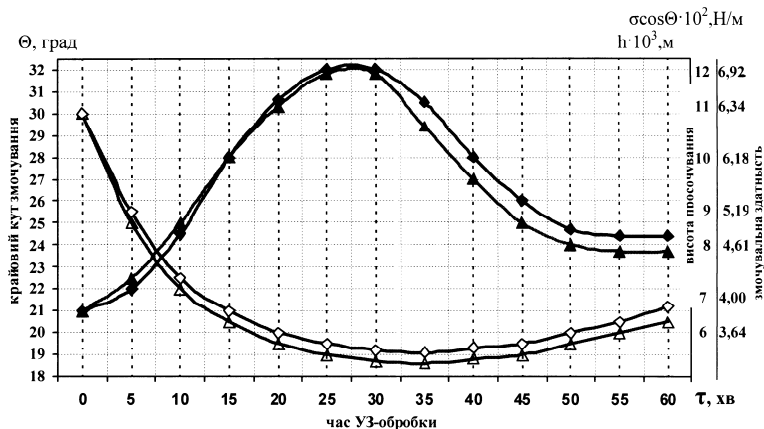


Рис. 1. Зміна крайового кута змочування I по скляній підкладці і змочувальної здатності уcosu ЕО марки ЕД-20 при $T = 20^\circ\text{C}$ у залежності від часу озвучування τ у низькочастотному УЗ-діапазоні: частота $f = 17$ кГц для I (Δ) і для уcosu (\circ); частота $f = 22$ кГц для Θ (\diamond) і для уcosu (\blacklozenge); h — висота підйому ЕО марки ЕД-20 по скляному капіляру

При зменшенні амплітуди коливань A (а отже, й інтенсивності I) крайовий кут змочування ЕО по скловолокну Θ дещо меншає, а величина змочувальної здатності $\sigma \cos \Theta$ збільшується.

Особливістю досліджених ефективних режимів УЗ-модифікації є й те, що після змішування компонентів композиції на основі ЕО (тобто без твердника) для покращення її гомогенізації суміш ЕК обробляють при тих же значеннях частоти, амплітуди, інтенсивності коливань і відношенні площі випромінювача поздовжніх УЗК до маси наважки епоксидної основи, але при температурі $20\text{--}25^\circ\text{C}$ і протягом декількох секунд ($10\text{--}15$ с), щоб не допустити початку процесу полімерізації.

Експериментально було встановлено, що якщо обробляти УЗ суміш олігомера ЕД-20 (як озвученої, так і неозвученої) і твердника ДЕТА при температурі, що перевищує 25°C , а також впродовж часу, що перевищує 15 с, відбувається поступове неконтрольоване твердіння суміші із різким погіршенням кінцевих властивостей полімеру.

Значимо, що наведені параметри УЗ-обробки сприяють швидкому перемішуванню, а також рівномірному розподілу одного компонента суміші в іншому.

Для визначення впливу параметрів УЗ-обробки на технологічні властивості ЕО марки ЕД-20 і експлуатаційні властивості затверділих ЕК на його основі були проведені експериментальні дослідження згідно з синтезованим D -оптимальним планом експерименту для кожної залежної змінної [5].

У зв'язку з великою кількістю факторів для полегшення розрахунків була вибрана структура моделі 1-го порядку для кожної змінної, яка має такий вигляд:

$$Y(X) = c_0 + c_1 \cdot X_1 + c_2 \cdot X_2 + c_3 \cdot X_3 + c_4 \cdot X_4 + c_5 \cdot X_5, \quad (1)$$

де X_i — вхідні параметри (фактори), що означають відповідно: $f_{УЗ}$ — частота УЗК, кГц (X_1); A — амплітуда УЗК, мкм (X_2); I — інтенсивність УЗК, Вт/см² (X_3); T — температура УЗ-обробки, °С (X_4); τ — час УЗ-обробки, хв (X_5); Y_i — вихідні параметри, що уособлюють такі технологічні і експлуатаційні властивості: η — динамічна в'язкість, Па·с (Y_1); Θ_{min} — мінімальне значення крайового кута змочування ЕО по матеріалу наповнювача (скляної підложки), ° (Y_2); h_{max} — максимальна висота підйому ЕО по скловолоконистому наповнювачу, мм (Y_3); T_c — температура склування затверділого полімеру, °С (Y_4); $c_0, c_1, c_2, \dots, c_5$ — константи рівняння (1), що підлягають визначенню.

Інтервали варіювання вхідних факторів УЗ-модифікації вибирали згідно із вимірювально-експлуатаційними можливостями УЗ-технологічного обладнання та попередніми результатами досліджень.

У таблиці 2 показано D -оптимальний план та результати експериментів у реальних координатах.

Таблиця 2

D-оптимальний план та дані експериментальних досліджень, отриманих в результаті реалізації УЗ-модифікації ЕО та ЕК на їх основі, в реальних координатах

f , кГц	A , мкм	I , Вт/см ²	T , °С	τ , хв.	η , Па·с	Θ_{min} , °	h_{max} , мм	T_c , °С
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
16	10	4	50	25	0,835	18,6	2,40	118,5
16	30	10	80	35	0,832	18,8	2,50	119,0
18	10	4	50	25	0,83	18,5	2,40	118,5
18	30	10	80	35	0,832	18,9	2,48	118,5
20	20	7	65	30	0,83	18,4	2,35	120,0
20	30	10	80	35	0,828	19	2,35	118,5
22	10	4	50	25	0,832	18,5	2,25	118,8
22	30	10	70	35	0,833	18,8	2,10	118,0
24	20	7	60	30	0,834	18,5	2,10	119,0
24	30	10	80	35	0,831	19	2,15	118,0

Отримані статистичним методом адекватні статистичні математичні моделі (2)–(5) для кожної змінної при здійсненні фізичної модифікації ЕО і ЕК на їх основі мають такий вигляд:

$$Y_1(X) = -8,835116 - 0,000163322 \cdot X_1 + 0,140158 \cdot X_2 - 1,388366 \cdot X_3 - 0,000359 \cdot X_4 + 0,553614 \cdot X_5; \quad (2)$$

$$Y_2(X) = 3,62683 - 0,001 \cdot X_1 + 0,04375 \cdot X_2 - 1,4462 \cdot X_3 + 0,01399 \cdot X_4 + 0,78039 \cdot X_5; \quad (3)$$

$$Y_3(X) = -7,5833 - 0,0384 \cdot X_1 + 0,11818 \cdot X_2 - 1,4262 \cdot X_3 + 0,01713 \cdot X_4 + 0,57288 \cdot X_5; \quad (4)$$

$$Y_4(X) = 77,284 - 0,0035 \cdot X_1 - 0,5634 \cdot X_2 - 1,8848 \cdot X_3 + 0,04167 \cdot X_4 + 2,11015 \cdot X_5. \quad (5)$$

У табл. 3 представлено експериментальні і розраховані значення змінних після здійснення УЗ-модифікації ЕО та ЕК на їх основі.

Таблица 3

Зведені експериментальні і розраховані значення змінних після здійснення УЗ-модифікації ЕО та ЕК на їх основі

Експериментальні значення				Розраховані значення			
η , Па·с	Θ min ^o	h_{max} , мм	T_{cs} , °C	η , Па·с	Θ min ^o	h_{max} , мм	T_{cs} , °C
X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3	X_4
0,835	18,6	2,40	118,5	0,832	18,47	2,45	118,5
0,832	18,8	2,50	119,0	0,831	18,89	2,50	119
0,83	18,5	2,40	118,5	0,832	18,47	2,38	118,5
0,832	18,9	2,48	118,5	0,830	18,89	2,43	118,5
0,83	18,4	2,35	120,0	0,831	18,67	2,32	120
0,828	19	2,35	118,5	0,830	18,88	2,35	118,5
0,832	18,5	2,25	118,8	0,831	18,46	2,22	118,8
0,833	18,8	2,10	118,0	0,833	18,74	2,10	118
0,834	18,5	2,10	119,0	0,832	18,60	2,08	119
0,831	19	2,15	118,0	0,829	18,88	2,19	118
Розрахований критерій Фішера F_T				10,025	8,0214	5,889	9,8501
Адекватність (так/ні)				Так	Так	Так	Так

Значення вихідних функцій (відгуків) при здійсненні пошуку компромісної точки після здійснення УЗ-модифікації ЕО та ЕК на їх основі становлять:

Відгук	Найкраще значення	Найгірше значення
Y_1	0,84	0,82
Y_2	19	18
Y_3	2,7	2
Y_4	122	177.

Слід зауважити, що значення параметрів оптимізації в точці оптимуму не завжди входить в той круг, що був окреслений на початку оптимізації. Це пояснюється тим, що при розрахунках ми маємо справу з функцією, що описує експериментальні дані не абсолютно точно, а з деякою похибкою.

Точка оптимуму, отримана для функції бажаності $d(D) = 0,99997$ при кількості обчислень її значень, що становить 21120,

досягається за таких значень вхідних факторів: $X_1 = 16$ (кГц); $X_2 = 10$ (мкм); $X_3 = 4$ (Вт/см²); $X_4 = 80$ (°C); $X_5 = 35$ (хв).

Значення вихідних функцій технологічних ($Y_1 - Y_3$) показників ЕО і ЕК та експлуатаційних (Y_4) показників ЕП на їх основі у знайденій точці оптимуму становить: $Y_1 = 0,8427$ (Па·с); $Y_2 = 19,25$ (°); $Y_3 = 3,024$ (мм); $Y_4 = 121,24$ (°C).

Таким чином, фізична (ультразвукова) модифікація епоксидно-амінної композиції у складі ЕД-20+ДЕТА за рахунок застосування ефективних режимів УЗ-обробки дозволяє вирішити технічну задачу одержання модифікованої ЕК, що використовується як для просочування тканих волокнистих композитів, так і для формування ПКМ на їх основі, що володіє високими технологічними й експлуатаційними характеристиками.

Отже, можна стверджувати, що попередня УЗ-обробка ЕО за ефективних режимних параметрів поліпшує їх технологічні характеристики. Ефективними режимними параметрами озвучування досліджуваних ЕО можуть вважатися наступні: частота $f = 16 - 24$ кГц; амплітуда $A = 10 - 30$ мкм; температура $T = 0 - 80$ °C; час $\tau = 25 - 35$ хв.

Крім того, отримані математичні залежності дозволяють прогнозувати технологічні параметри процесу приготування просочувальних композицій і процесу просочування ними волокнистих наповнювачів, тобто оптимізувати відповідні технологічні режими формування реактопластичних ПКМ.

Висновки.

1. На основі використання математичних методів планування експериментів отримано адекватні статистичні моделі, які описують вихідні змінні у залежності від вхідних змінних, що отримані при розв'язанні задач прогнозування технологічних і експлуатаційних властивостей ПКМ на базі ЕО, одержаних в процесі УЗ-модифікації.
2. Отримані математичні залежності дозволяють прогнозувати технологічні параметри процесів приготування просочувальних композицій і просочування, тобто оптимізувати відповідні технологічні режими формування ПКМ.

Список використаних джерел:

1. Цыплаков О. Г. Научные основы технологии композиционно-волоконистых материалов. Часть 1 / О. Г. Цыплаков. — Пермь : Пермское книжное изд-во, 1974. — 317 с.
2. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии : [учебное пособие] / М. Л Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др. ; под ред. А. А. Берлина. — СПб. : Профессия, 2008. — 560 с.
3. Воронков А. Г. Эпоксидные полимеррастворы для ремонта и защиты строительных изделий и конструкций : учебное пособие / А. Г. Воронков, В. П. Ярцев. — Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. — 92 с.

4. Математичне моделювання базових процесів виготовлення полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвукової модифікації / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, Є. М. Панов та ін. — К. : ВД «Едельвейс», 2012. — 268 с.
5. Статюха Г. О. Розробка комп'ютерної системи підготовки та обробки даних у межах застосування експериментально-статистичної методології для хіміко-технологічних систем / Г. О. Статюха, А. Г. Петрань // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2000. — №1. — С. 100–106.
6. Колосов О. Є. Формування полімерних композиційних матеріалів із застосуванням фізико-хімічної модифікації (у двох частинах) / О. Є. Колосов. — К. : НТУУ «КПІ», 2005. — Ч. 1. Дослідження передумов направленої здійснення фізико-хімічної модифікації. — 251 с.
7. Колосов О. Є. Формування полімерних композиційних матеріалів із застосуванням фізико-хімічної модифікації (у двох частинах) / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький. — К. : НТУУ «КПІ», 2006. — Ч. 2. Ефективні режими та обладнання для здійснення фізико-хімічної модифікації. — 196 с.
8. Колосов О. Є. Технологія одержання багатокomпонентних епоксиполімерів із застосуванням направленої фізико-хімічної модифікації / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, Є. М. Панов. — К. : НТУУ «КПІ», 2010. — 220 с.

The features of the using of modeling techniques in applied problems on the example of the optimization of technological parameters of ultrasonic molding reactoplastic polymer composites are analyzed.

Key words: *technology, parameter, modeling, experiment, mathematics, statistics, epoxy, polymer, resin binder, ultrasonic.*

Отримано: 24.07.2014

УДК 533.17

І. М. Кузьменко, канд. техн. наук

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ПОВІТРЯ ПО КАНАЛУ НАСАДКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТУ ANSYS FLUENT

У пакеті ANSYS Fluent виконано комп'ютерне моделювання руху повітря в каналі насадки. Для верифікації моделі результати порівнювалися з експериментальними даними Нікурадзе за турбулентного руху в каналі. Шляхом моделювання визначено товщину граничного шару та рекомендовано конструктивне розміщення каналів з мінімальною товщиною граничного шару.

Ключові слова: *пакет Ansys Fluent, канал, насадка, повітря, поле швидкостей.*

Вступ. Застосування методів комп'ютерного моделювання при розрахунку складних технологічних процесів дозволяє підвищити їх ефективність [1]. Зокрема для процесів в нафто-хімічній промисловості, енер-