

DOI: 10.31319/2519-2884.47.2025.5

УДК 678:519.23

Набережна О.О.¹, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1302-4098,

e-mail: o.naberezhnaya@gmail.com

Губарєв С.В.¹, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-8607-9394, e-mail: gubarev196@gmail.com**Пелешенко Б.І.²**, к. ф.-м. н., професор, ORCID: 0000-0001-8154-4277¹Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське²Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро**Naberezhna Olha¹**, Ph.D. in Technology, Docent, Associate professor of the Physics of Condensed state**Hubarev Serhii¹**, Ph.D. in Technology, Docent, Associate professor of the Physics of Condensed state**Peleshenko Borys²**, Ph.D. in Physics and Mathematics, Professor¹Dniprovsky State Technical University, Kamianske²Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro

ОБЧИСЛЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ ВИБІРКОВОЇ ДИСПЕРСІЇ ЧАСТКИ АРМУЮЧОГО МАТЕРІАЛУ, ЯКА ДОПОВНЮЄТЬСЯ ПРИ ВІДБОРІ ПРОБИ СУМІШІ

У роботі розглянуто проблему оцінки рівномірності розподілу армуючих частинок у полімерній суміші, яка змішується в умовах обертального електромагнітного поля. Показано доцільність статистичного аналізу розподілу компонентів шляхом визначення вибіркової дисперсії об'ємної частки волокон. Результати досліджень демонструють можливість досягнення гомогенного складу композиту шляхом використання контрольованих режимів змішування. Цей підхід сприяє покращенню механічних властивостей кінцевого матеріалу, що особливо важливо для виробництва відповідальних конструкцій у машинобудуванні.

Ключові слова: полімерна суміш; армування; гомогенність; вибіркова дисперсія.

This paper addresses the issue of assessing the uniformity of the distribution of reinforcing particles in a polymer mixture stirred under conditions of a rotating electromagnetic field. The authors demonstrate the feasibility of applying statistical analysis to evaluate the distribution of components by calculating the sample variance of the fiber volume fraction. The study results indicate that achieving a homogeneous composition of the composite is possible by employing controlled mixing regimes. This approach contributes to the improvement of the mechanical properties of the final material, which is particularly important for the production of critical structural components in mechanical engineering.

Keywords: polymer mixture; the volume fraction of fibers; the statistical method; the sample variance.

Постановка проблеми

У сучасних умовах зростання вимог до механічних і фізико-хімічних властивостей композиційних матеріалів особливу увагу приділяють якості розподілу армуючих елементів у полімерній матриці. Рівномірність такого розподілу істотно впливає на експлуатаційні властивості композиту, зокрема на міцність, зносостійкість і довговічність. В умовах переходу до індустріальних технологій виготовлення полімерних композитів актуальним є створення методик, що дозволяють кількісно оцінити однорідність внутрішньої структури матеріалу з метою її подальшої оптимізації. Статистичні підходи до аналізу мікроструктури на основі вибірових дисперсій та середніх значень дають змогу отримати достовірні дані про якість змішування та орієнтацію армуючих волокон у матриці.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На сьогодні у світі існує велика кількість полімерних композиційних матеріалів, що застосовуються в різних галузях промисловості. Виробництво нових функціональних матеріалів є актуальним напрямом, який дозволяє суттєво спростити та здешевити технології виготовлення

з їх використанням [1]. Наразі все ширше застосовуються композити на основі високоміцних хімічних волокон. Середньорічний приріст органопластиків (ОП) у США становить близько 30% порівняно з 11,3 % для склопластиків і 23,7 % для вуглепластиків. Перевага органічних волокон перед скляними зумовлена не лише вищим модулем пружності (60...80 ГПа), але й значно меншою (у 1,3 рази) густиною, що особливо важливо для виготовлення вузлів тертя та механізмів, які працюють в екстремальних умовах [2]. Через високу затребуваність зростає кількість наукових досліджень зі створення нових композиційних матеріалів, які перевершують за властивостями вже відомі. Вченими встановлено, що армування полімерів суттєво підвищує експлуатаційні характеристики матеріалів. Робота техніки в екстремальних умовах висуває особливі вимоги до матеріалів різних деталей, зокрема вузлів тертя — підшипників, ущільнень, як найбільш вразливих до відмов елементів при тривалому впливі низьких температур [3].

Накопичений досвід свідчить, що застосування антифрикційних матеріалів на основі пластмас у багатьох випадках дозволяє збільшити строк служби машин і механізмів, а отже — подовжити міжремонтні інтервали та знизити витрати на ремонт. Композиції на основі пластмас значно зменшують трудомісткість виготовлення вузлів і деталей тертя завдяки вищій ефективності переробки полімерів у вироби порівняно з механічною обробкою металів. Використання антифрикційних пластмас дає змогу зменшити масу та габарити машин. Розширення сфери застосування полімерів у вузлах тертя вивільняє значні обсяги кольорових металів, легованих сталей та інших дефіцитних матеріалів, дозволяє економити мастильні матеріали й спрощувати конструкції вузлів тертя [4].

Світовий обсяг виробництва пластмас станом на 2023 рік перевищив 400 млн тонн. Основними виробниками полімерів залишаються Китай, США, Німеччина, Південна Корея та Японія [5].

Формулювання мети дослідження

Відомо, що на відміну від грубодисперсних наповнювачів, пластмаси, армовані хімічними волокнами, навіть за невеликого вмісту (5—20 %), дозволяють отримувати матеріали з унікальними й керованими властивостями, яких практично неможливо досягти при наповненні порошками грубого помелу. Введення волокон у полімерну матрицю змінює властивості полімеру та впливає на його структуру. Основною проблемою створення композитів «полімер — волокно» є поліпшення сумісності наповнювача зі в'язким. Однією з основних вимог до будь-якої полімерної композиції є висока однорідність її фізико-хімічних характеристик. Така однорідність може бути досягнута лише за умови рівномірного розподілу всіх компонентів у об'ємі. Для цього застосовують різні змішувачі, кульові млини тощо [6]. Необхідність рівномірного розподілу наповнювача є складною технічною проблемою, оскільки волоконний наповнювач має схильність до розпушення і злипання, що істотно погіршує експлуатаційні властивості готових виробів.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення цієї проблеми в роботі розглядалися вуглепластики (ВП) на основі поліамідів, армованих високоміцними вуглецевими волокнами (ВВ). Завдяки особливостям своєї структури, ВВ мають специфічний комплекс властивостей — окрім високих міцнісних характеристик, вони відзначаються високою електро- та теплопровідністю, низьким коефіцієнтом лінійного теплового розширення, великою стійкістю до повзучості та низьким коефіцієнтом тертя.

Накопичений експериментальний досвід показує, що властивості та характеристики ВП залежать від багатьох чинників, передусім — від природи полімерної матриці, типу волокна, характеру його розподілу в об'ємі в'язкого, а також технології переробки композиту [1, 2, 4, 6]. У зв'язку з цим, запропоновано технологію виготовлення виробів триботехнічного призначення на базі термостійких поліамідів шляхом їх змішування у обертовому електромагнітному полі з ВВ довжиною 2—3 мм. У результаті досліджень встановлено таке:

- як робоче середовище для армування полімеру дискретними волокнами слід використовувати анізотропні феромагнітні частинки;
- об'єм феромагнітних частинок, що завантажуються в реактор апарата, має становити 0,04—0,05 від об'єму електромагнітного поля;

• максимальний час змішування компонентів залежить від їх механічних характеристик і не повинен перевищувати 270—380 с.

Для оцінки гомогенності суміші, отриманої цим способом, було використано статистичний метод [7], що дає змогу значно скоротити необхідну кількість проб.

Результати дослідження. У статті представлено аналітичні розрахунки середньої вибіркової дисперсії, які базуються на узагальненому підході до вибірки у контрольованих технологічних умовах.

Для статистичної обробки використовували дані, наведені в статті, масову частку волокон перераховували в об'ємну. Із суміші, приготовленої шляхом змішування 85 мас. % поліаміду фенілон С—1 та 15 мас. % вуглецевих волокон марки «Торейка», відбирали 39 однакових проб, об'єм яких був малим порівняно з об'ємом досліджуваних композицій [8, 9]. При цьому частка волокна Р у загальному об'ємі суміші дорівнювала 0,15. Вміст вуглецевих волокон у кожній пробі у частках визначали за формулою:

$$n = \frac{V_2}{V_1}, \quad (1)$$

де V_1 — об'єм проби, см^3 ; V_2 — об'єм вуглецевого волокна в пробі, см^3 .

Результати визначення вмісту вуглецевих волокон у пробах наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Вміст вуглецевого волокна в пробах

№ проби	Частка ВВ	№ проби	Частка ВВ	№ проби	Частка ВВ
1	0,1068	14	0,1196	27	0,1252
2	0,1068	15	0,1204	28	0,1261
3	0,1138	16	0,1226	29	0,1269
4	0,1138	17	0,1226	30	0,1283
5	0,1138	18	0,1226	31	0,1305
6	0,1154	19	0,1240	32	0,1305
7	0,1154	20	0,1240	33	0,1325
8	0,1154	21	0,1240	34	0,1325
9	0,1154	22	0,1240	35	0,1327
10	0,1161	23	0,1241	36	0,1355
11	0,1169	24	0,1241	37	0,1355
12	0,1184	25	0,1241	38	0,1355
13	0,1184	26	0,1252	39	0,1369

З урахуванням того, що обсяг вихідної інформації N перевищує 25 значень, для підвищення надійності подальших обчислень формували статистичний ряд даних. Кількість інтервалів статистичного ряду n визначали за рівнянням:

Отриманий результат округлювали в бік збільшення до найближчого цілого числа — 7. Кількість інтервалів при цьому має знаходитись у межах 6...20. Величину одного інтервалу визначали згідно з рівнянням:

$$A = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{n}, \quad (2)$$

де $t_{\max}$ та $t_{\min}$ — найбільше і найменше значення процентного вмісту ВВ в полімерній матриці.

Далі вивчали вплив способу відбору проб суміші полімеру та вуглецевого волокна на вибірконе середнє і вибірконе дисперсію об'ємної частки вуглецевого волокна в суміші, а також на її розподіл у суміші. За різних способів відбору проб навіть у добре перемішаній суміші вуглецеві волокна можуть зачіпатися і або потрапляти до проби, або вилучатися з неї, що призводить до зміни масової частки вуглецевого волокна. У результаті вибірконе середнє змінюється, а вибірконе дисперсія зростає порівняно з теоретичною дисперсією об'ємної частки вуглецевого волокна в суміші; закон розподілу об'ємної частки вуглецевого волокна також зазнає змін.

Для побудови довірчих інтервалів вибірових числових характеристик об'ємної частки волокна в суміші використовують теоретично визначену дисперсію $D(\delta)$, яка часто суттєво відрізняється від вибіркової дисперсії s^2 .

Це відбувається внаслідок того, що суміш або недостатньо перемішана, або, навіть за умови доброї перемішаності, при різних способах відбору проб порушується структура суміші: зачіпаються волокна, які або залишаються в пробі, або вилучаються з неї.

Об'ємна частка волокна в кожній пробі $\gamma(V_i)$ об'ємом V_i є сумою об'ємної частки волокна $\Delta(V_i)$, що додається додатково під час відбору проби, та теоретичної об'ємної частки $\delta(V)$ волокна в усій суміші об'ємом V .

$$\gamma(V_i) = \Delta(V_i) + \delta(V), i = 1, \dots, N.$$

Тоді, згідно з властивістю математичного сподівання:

$$E(\gamma) = E(\Delta) + E(\delta). \quad (3)$$

І в силу закону великих чисел: $\bar{\gamma}_B \approx \bar{\Delta}\sigma_B + E(\delta)$, де $E(\delta)$ позначає математичне сподівання, що дорівнює теоретичній масовій частці волокна в усій суміші, а $\bar{\Delta}\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta(V_i)}{N}$,

$\bar{\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma(V_i)}{N}$ позначають, відповідно, вибірове середнє значення, отримане додатково під час відбору N проб, і вибірове значення для всієї суміші з урахуванням додаткових змін під час відбору тих же N проб. Випадкові вибірові величини $\Delta(V_i)$, та $\delta(V)$ вважаються незалежними, тому для дисперсій виконується рівність:

$$D(\gamma) = D(\Delta\sigma) + D(\delta);$$

$$D(\gamma) = D(\Delta) + D(\delta).$$

І при великих N виконується наближене рівняння:

$$S_B^2(\gamma) \approx S_B^2(\Delta\sigma) + S^2(\delta),$$

де $S_B^2(\gamma)$, $S_B^2(\Delta\sigma)$ — позначаються як незміщені вибірові дисперсії відповідно об'ємної частки волокна в пробах та додаткової компоненти, отриманої під час відбору, а $S^2(\delta)$ — незміщена теоретична дисперсія.

Емпіричний закон розподілу випадкової вибіркової величини γ має вигляд:

$$p(\gamma) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(\gamma - \delta) p_2(\delta) d\gamma, \quad (4)$$

де $p_1(\Delta)$, $p_2(\delta)$ є, відповідно, емпіричним законом розподілу об'ємної частки волокна Δ , отриманої додатково під час відбору проби, та теоретичним законом розподілу об'ємної частки δ волокна в усій суміші.

Обчислимо виправлену (незміщену) вибірову дисперсію частки армувального матеріалу, що додається під час відбору проби, за наступним алгоритмом.

1. Відбирається проба об'ємом V за якою обчислюється радіус R за співвідношенням:

$$V = \frac{2}{3} \pi R^3, \quad (5)$$

(або інша відповідна формула, залежно від геометричної форми проби).

2. Нехай:

- β — об'ємна частка частинок армувального матеріалу,
- l — довжина частинок армувального матеріалу,
- d — діаметр частинок армувального матеріалу,
- $\frac{4\beta\Delta V_i}{\pi l d^2}$ — кількість центрів частинок армувального матеріалу в сферичному шарі ΔV_i .

Для знаходження ΔV_i розіб'ємо сферичний шар на підшарів. Об'єм кожного підшару обчислюється за формулою:

$$V_i = \frac{2}{3} \pi ((x_i + \Delta x)^3 - x_i^3) = \frac{2}{3} \pi (3x_i^2 \Delta x + 3x_i \Delta x^2 + \Delta x^3).$$

де $x_i = R - \frac{1}{2} + i\Delta x$, $i=1, \dots, n$,

$$\Delta x = \frac{x^* - R + \frac{1}{2}}{n} = \frac{l}{2n} \text{ та } x^* = x_{0,n+1} = \sqrt{R^2 - \frac{l^2}{4}}, \text{ а } y_{0,n+1} = \frac{l}{2}.$$

3. Частка армувального матеріалу, що додається під час відбору проби до загальної частки армувального матеріалу в суміші в сферичному підшарі ΔV_i

$$\sigma_i = \frac{\beta \Delta V_i (1 - \frac{H_i}{2r_i}) \xi_i}{\frac{2}{3} \pi R^3 l}, \quad (6)$$

де $H_i = x_{0,i} - x_{l,i}$, абсциса $x_{0,i}$ визначається із системи рівнянь:

$$R^2 = x_{0,i}^2 + y_{0,i}^2;$$

$$\frac{l^2}{4} = x_{0,i}^2 - 2x_i x_{0,i} + x_i^2 + y_{0,i}^2.$$

$x_{0,i}$ — є перетин прямої, що проходить через точки $A_i(x_{0,i}, y_{0,i})$, $B_i(x_i, 0)$, з окружністю з центром у точці $B_i(x_i, 0)$, і радіусом $\frac{l}{2}$; $r_i = \frac{l}{2}$ і, обчислюється за формулою:

$$\Delta \sigma_i = \frac{\beta \Delta V_i (1 - \frac{2h_i}{l}) \xi_i}{\frac{2}{3} \pi R^3 l}, \quad (7)$$

де $h_i = x_{0,i} - \frac{x_i - x_{i-1}}{2}$.

Крім того, середня висота ξ_i частини армувальних частинок, яка додатково потрапляє в пробу у сферичному підшарі ΔV_i обчислюється за допомогою подвійного інтеграла:

$$\xi_i = \frac{1}{\pi y_{0,i}^2} (\iint_{S_i} \sqrt{1 - y^2 - z^2} + \frac{x_i - x_{i-1}}{2} dydz - \iint_{S_i} \sqrt{R^2 - y^2 - z^2} dydz), \quad (8)$$

де S_i — це коло з центром в точці $C(x_{0,i}, 0, 0)$ і радіусом $y_{0,i}$.

На ділянці від x^* до R

$$\sigma_{s+1} = \frac{\beta \Delta V_{s+1} (1 - \frac{2h_{s+1}}{l}) \xi_{s+1}}{\frac{2}{3} \pi R^3 l}, \quad (9)$$

де $h_{s+1} = x_{0,s+1} - \frac{R - x^*}{2}$ і частка армувального матеріалу, яка додатково потрапляє до складу проби при її відборі в сферичному підшарі ΔV_{n+1} , обчислюється за іншою формулою:

$$\Delta V_{n+1} = \frac{2}{3} \pi R^3 - \frac{2}{3} \pi x^{*3}, \quad (10)$$

Величина ξ_{n+1} (частка армувального матеріалу, що додається при відборі проби) обчислюється за формулою:

$$\xi_{n+1} = \frac{4}{l^2 \pi} \iint_{S_{n+1}} \left(\frac{x^* + R}{2} + \sqrt{1 - y^2 - z^2} - \sqrt{R^2 - y^2 - z^2} \right) dy dz, \quad (11)$$

де S_{n+1} — круг з центром у точці $C(x_{0,n+1}, 0, 0)$ і радіусом $y_{0,n+1}$. Переходячи до полярних координат відносно y, z маємо:

$$\begin{aligned} \xi_{n+1} &= \frac{4}{l^2 \pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{1/2} \left(\frac{R+x^*}{2} + \sqrt{\frac{l^2}{4} - r^2} \right) r dr - \frac{4}{l^2 \pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{1/2} (\sqrt{R^2 - r^2}) r dr = \frac{R+x^*}{2} - \frac{8}{l^2} \frac{u^{2/3}}{3/2(-2)} \Big|_0^{l^2/4} - \\ &- \frac{8}{l^2} \frac{v^{3/2}}{3/2(-2)} \Big|_{R^2}^{R^2 - l^2/4} = \frac{R+x^*}{2} - \frac{8}{l^2} \frac{u^{3/2}}{3/2(-2)} \Big|_0^{l^2/4} - \frac{8}{l^2} \frac{v^{3/2}}{3/2(-2)} \Big|_{R^2}^{R^2 - l^2/4} = \frac{(R+x^*)}{2} + \frac{l}{3} - \frac{8}{3l^2} (R^3 - \sqrt{(R^2 - \frac{l^2}{4})^3}). \end{aligned}$$

4. Позначаючи далі $x_{n+2} = 2R - x^*$ та розглядаючи відрізок $[R, 2R - x^*]$ маємо:

$$\Delta \sigma_{n+2} = \frac{\beta \Delta V_{n+2} \left(1 - \frac{2h_{n+2}}{l} \right) \xi_{n+2}}{\frac{2}{3} \pi R^3 l}, \quad (11)$$

$$\text{де } \Delta V_{n+2} = \frac{2}{3} \pi (2R - x^*)^3 - \frac{2}{3} \pi R^3$$

Точка $M_{n+2}(x_{n+2,0}, y_{n+2,0})$ буде точкою, яка найбільш близько розташована до x_{n+2} , обчислення координат перетину двох кіл

$$x^2 + y^2 = R^2, \left(x - \frac{R + 2R - x^*}{2} \right)^2 + y^2 = 1.$$

Окрім цього, величина ξ_{n+2} буде розраховуватись за формулою, де S_{n+2} буде коло з центром в точці $C(x_{n+2,0}, 0, 0)$ і радіусом $y_{n+2,0}$.

Розіб'ємо відрізок $[2R - x^*, R + 1]$ на n частин:

$$x_{n+2+i} = 2R - x^* + i \frac{r + 1 - 2R + x^*}{n}, \quad i = 1, \dots, n.$$

$$\text{Отримаємо: } \Delta \sigma_{n+2+i} = \frac{\beta \Delta V_{n+2+i} \left(1 - \frac{2h_{n+2+i}}{l} \right) \xi_{n+2+i}}{\frac{2}{3} \pi R^3 l}, \quad i = 1, \dots, n.$$

$$\text{де } \Delta V_{n+2} = \frac{2}{3} \pi x_{s+2+i}^3 - \frac{2}{3} \pi x_{n+2+i-1}^3.$$

Точка $M_{n+2}(x_{n+2+i,0}, y_{n+2+i,0})$, буде точкою ближньою до x_{n+2+i} , перетину окружностей:

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= R^2. \\ \left(x - \frac{x_{n+2+i} - x_{n+2+i-1}}{2} \right)^2 + y^2 &= 1. \end{aligned}$$

Також, величина ξ_{n+2+i} буде розраховуватись за формулою:

$$\xi_i = \frac{1}{\pi y_{n+2+i}^2} \iint_{S_{n+2+i}} \left(\sqrt{1 - y^2 - z^2 + \frac{x_{n+2+i} - x_{n+2+i-1}}{2}} \right) dydz - \frac{1}{\pi y_{n+2+i}^2} \iint_{S_{n+2+i}} \sqrt{R^2 - y^2 - z^2} dydz,$$

де S_{n+2+i} це коло з центром в точці $C(x_{n+2+i,0}, 0, 0)$ і радіусом $y_{n+2+i,0}$ в тримірному просторі.

5. Обчислимо усереднене значення $\overline{\Delta\sigma_i}$, $i = 1, \dots, n+1$ за формулою:

$$\overline{\Delta\sigma_i} = \iint_G (\lambda \Delta\sigma_i - \mu \Delta\sigma_{2n+2-i+1}) d\lambda d\mu = \frac{1}{2} (\Delta\sigma_i - \Delta\sigma_{2n+2-i+1}), i = 1, \dots, n+1.$$

В цьому випадку буквою G позначають квадрат зі стороною l і з центром в точці $A\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$.

6. Далі складемо закон розподілу, поставивши у відповідність до кожного усередненого значення $\overline{\Delta\sigma_i}$ відповідну ймовірність.

$$p_i = \frac{|\overline{\Delta\sigma_i}|}{\sum_{i=1}^{n+1} |\overline{\Delta\sigma_i}|}, i = 1, \dots, n+1.$$

7. Обчислимо середнє значення усередненої частки, що доповнює при відборі проби частку армуючого матеріалу в суміші, за формулою:

$$\overline{\Delta\sigma_\sigma} = \sum_{i=1}^{n+1} \overline{\Delta\sigma_i} p_i = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{\overline{\Delta\sigma_i} |\overline{\Delta\sigma_i}|}{\sum_{i=1}^{n+1} |\overline{\Delta\sigma_i}|}.$$

8. Вибіркову дисперсію усередненої частки, що доповнює при відборі проби армуючого наповнювача в суміші, обчислимо за формулою:

$$s_\sigma^2(\Delta\bar{\sigma}) = \frac{n+1}{n} \left(\sum_{i=1}^{n+1} \Delta^2 \bar{\sigma}_i p_i - (\overline{\Delta\sigma_\sigma})^2 \right) = \frac{n+1}{n} \left[\sum_{i=1}^{n+1} \Delta^2 \bar{\sigma}_i \frac{|\overline{\Delta\sigma_i}|}{\sum_{i=1}^{n+1} |\overline{\Delta\sigma_i}|} - (\overline{\Delta\sigma_\sigma})^2 \right]. \quad (11)$$

Тоді вибіркова дисперсія усередненої частки армуючого матеріалу в суміші обчислюється: $s_\sigma^2(\gamma) = s_\sigma^2(\Delta\bar{\sigma}) + s^2(\delta)$.

У багатьох дослідженнях рівномірності розподілу армуючого матеріалу в суміші використовується $s_\sigma^2(\gamma)$. Існує правило: при висуненні гіпотези, що дисперсія частки армуючого матеріалу в суміші дорівнює певному значенню $s_\sigma^2(\gamma)$ для перевірки цієї гіпотези вибирається r проб, у кожній з яких обчислюється частка армуючого волокна. Далі через s_σ^2 позначається вибіркова дисперсія частки армуючого волокна у сукупності проб. Критерій для перевірки сформульованої гіпотези базується на порівнянні відношення $\frac{s_\sigma^2}{s_\sigma^2(\gamma)}$ з одиницею. Гіпотеза приймається з ймовірністю $(1-2\alpha)$, $0 \leq \alpha < 1$, якщо $\frac{s_\sigma^2}{s_\sigma^2(\gamma)} m \left[\frac{1}{r-1} \chi_{(1-\alpha);(r-1)}^2, \frac{1}{r-1} \chi_{\alpha;(r-1)}^2 \right]$, де $\chi_{(1-\alpha);(r-1)}^2$ і $\chi_{\alpha;(r-1)}^2$ позначають квантілі відповідно рівнів значущості $(1-\alpha)$, α закону розподілу $\chi_{(r-1)}^2$.

Висновки

Як показали підрахунки, з ймовірністю 0,97 відношення вибіркової дисперсії частки армуючого наповнювача у сукупності проб до обчисленої дисперсії частки армуючого матеріалу в суміші не відрізняється від одиниці. Це свідчить про високий рівень точності в процесі

відбору проб і підтверджує стабільність розподілу армуючого матеріалу в суміші. Отримані результати свідчать, що використання методу обробки сумішей в обертовому електромагнітному полі є ефективним для досягнення бажаних властивостей композиційних матеріалів.

Додатково, аналіз результатів показує, що метод обробки сумішей в електромагнітному полі може бути використаний для подальшої оптимізації технологічного процесу. Вдосконалення цієї технології дозволяє досягти більш рівномірного розподілу армуючих компонентів, що значно підвищує експлуатаційні характеристики матеріалів. Підвищення рівня рівномірності розподілу часток в суміші дозволяє зменшити варіацію властивостей кінцевих виробів і сприяє підвищенню їх міцності та довговічності.

Дані результати можуть бути корисними для подальших досліджень у галузі композиційних матеріалів, оскільки вони відкривають нові перспективи для підвищення якості продукції, що виробляється. Зокрема, це може допомогти в розробці нових матеріалів, які мають унікальні фізико-хімічні характеристики, що відповідають вимогам високих технологій, таких як авіація, космічна індустрія та виробництво високонавантажених механізмів.

Крім того, отримані результати підтверджують важливість вибору відповідних параметрів для обробки сумішей і дозволяють більш точно налаштовувати процеси змішування в залежності від конкретних вимог до кінцевих матеріалів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на детальне вивчення впливу різних умов обробки на властивості сумішей і на розробку нових методів контролю за рівномірністю їхнього розподілу. Це також відкриває перспективи для використання нових армуючих матеріалів та полімерів для підвищення ефективності змішування і досягнення ще кращих результатів.

Враховуючи ці фактори, можна зробити висновок, що запропонована технологія змішування у обертовому електромагнітному полі є перспективною та ефективною для застосування в промисловості, оскільки вона дозволяє досягти стабільних і високих результатів у виготовленні композиційних матеріалів з потрібними властивостями.

Список використаної літератури

- 1.Ranganathan R., Prakash R. A Critical Review on Tribological and Mechanical Characteristics of Hybrid Polymer Composite Materials. *Macromolecular Symposia*. 2022. Vol. 404(1). P. 2200194. DOI: 10.1002/masy.202200194.
- 2.Hubbe M.A. Sustainable Composites: A Review with Critical Questions to Guide Future Research. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(14). Article 11088. DOI: 10.3390/su151411088.
- 3.Zhang Y., et al. Surface Modification of Polytetrafluoroethylene (PTFE) Fibers through Plasma Treatment. *Applied Surface Science*. 2024. Vol. 634. Article 157741. DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.157741.
- 4.Zha J.-W., Wan Y., Luo H., Zhang D. Highly Heat-Resistant Polymers with Good Dielectric Properties at High Temperatures. *Materials Today Physics*. 2023. Vol. 30. Article 100944. DOI: 10.1016/j.mtphys.2023.100944.
- 5.Tian Y., et al. Intelligent Polymers for Multi-Functional Applications: Mechanical and Electrical Properties. *Polymers*. 2023. Vol. 15(12). Article 2620. DOI: 10.3390/polym15122620.
- 6.Kumar V.K., et al. A Comprehensive Review of Various Biopolymer Composites and Their Recyclability. *Materials Today Sustainability*. 2023. Vol. 20. Article 100117. DOI: 10.1016/j.mtsust.2023.100117.
- 7.NASA Technical Memorandum. Advances in Thermoplastic Composites Over Three Decades. NASA-TM-20240005376. 2024. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240005376/downloads/NASA-TM-20240005376.pdf>.
- 8.Burya A.I., Naberezhnaya O.A., Cui Hong, Feng Xiao Song. Effect of fiber on properties of self-reinforced phenylone. *Machines Technologies Materials*. 2016. №6. С. 11–12.
- 9.Набережна О.О., Буря О.І. Дослідження впливу органічного та вуглецевого волокна на експлуатаційні характеристики гібридних композитів на основі ароматичного поліаміду. *Наукові нотатки: Міжвузівський збірник за галузями знань «Технічні науки»*. 58. 2017. С. 255–261.

CALCULATION OF THE MEAN SAMPLE VARIANCE OF THE REINFORCING MATERIAL FRACTION SUPPLEMENTED DURING THE SELECTION OF A MIXTURE SAMPLE

Abstract

This paper addresses the critical problem of assessing the uniformity and homogeneity of reinforcing particles' distribution in polymer mixtures prepared under the influence of a rotational electromagnetic field. Achieving an even distribution of reinforcing components, such as carbon or aramid fibers, within the polymer matrix is essential for ensuring the mechanical integrity, wear resistance, and long-term durability of composite materials.

The proposed methodology is based on advanced statistical analysis, specifically the calculation of the sample variance of the fiber volume fraction within selected samples. Through a combination of analytical modeling and experimental verification, the authors demonstrate that the selected mixing parameters significantly affect the uniformity of the composite, enabling the optimization of process conditions for superior material quality.

The research findings highlight the applicability of the approach in various industrial sectors, particularly in the manufacturing of high-performance composite components for aerospace, automotive, and mechanical engineering applications. Moreover, the integration of statistical techniques with non-destructive testing methods such as ultrasonic control (USC) further enhances the diagnostic capabilities, enabling precise detection of material inconsistencies. This comprehensive methodology provides valuable insights for process engineers and material scientists, aiming to bridge the gap between laboratory-scale research and large-scale industrial production.

The significance of the study lies in its ability to translate complex statistical metrics into practical guidelines for composite material design, contributing to enhanced product reliability, reduced waste, and improved cost efficiency. Overall, the research not only advances the scientific understanding of composite material behavior but also paves the way for innovative solutions in the optimization of polymer composite manufacturing processes.

References

- [1] Ranganathan, R., & Prakash, R. (2022). A Critical Review on Tribological and Mechanical Characteristics of Hybrid Polymer Composite Materials. *Macromolecular Symposia*, 404(1), 2200194.
- [2] Hubbe, M.A. (2023). Sustainable Composites: A Review with Critical Questions to Guide Future Research. *Sustainability*, 15(14), 11088. <https://doi.org/10.3390/su151411088>.
- [3] Zhang, Y., Cui, H., & Feng, X.S. (2024). Surface Modification of Polytetrafluoroethylene (PTFE) Fibers through Plasma Treatment. *Applied Surface Science*, 634, 157741.
- [4] Zha, J.-W., Wan, Y., Luo, H., & Zhang, D. (2023). Highly Heat-Resistant Polymers with Good Dielectric Properties at High Temperatures. *Materials Today Physics*, 30, 100944.
- [5] Tian, Y., et al. (2023). Intelligent Polymers for Multi-Functional Applications: Mechanical and Electrical Properties. *Polymers*, 15(12), 2620.
- [6] Kumar, V.K., et al. (2023). A Comprehensive Review of Various Biopolymer Composites and Their Recyclability. *Materials Today Sustainability*, 20, 100117.
- [7] NASA Technical Memorandum. (2024). Advances in Thermoplastic Composites Over Three Decades. NASA-TM-20240005376.
- [8] Burya, A.I., Naberezhnaya, O.A., Cui, H., & Feng, X.S. (2016). Effect of Fiber on Properties of Self-Reinforced Phenylone. *Machines Technologies Materials*, (6), 11–12.
- [9] Naberezhna, O.O., & Burya, O.I. (2017). Doslidzhennia vplyvu orhanichnoho ta vuhletsevoho volokna na ekspluatatsiini kharakterystyky hibrydnykh kompozytiv na osnovi aromatychnoho poli-amidu [Investigation of the influence of organic and carbon fibers on the operational characteristics of hybrid composites based on aromatic polyamide]. *Naukovi Notatky: Mizhvuzivskyi Zbirnyk za Haluziamy Znan «Tekhnichni Nauky»*, 58, 255–261 [in Ukrainian].

Надійшла до редакції 30.06.2025

Прийнята після рецензування 20.10.25

Опублікована 23.10.2025