

УДК 620.173.2

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-22>

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ПРЕСУВАННЯ ОРГАНОПЛАСТИКІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Набережна Ольга Олександрівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри фізики конденсованого стану
Дніпровського державного технічного університету
ORCID ID: 0000-0003-1302-4098

Єрьоміна Катерина Андріївна,

кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики конденсованого стану
Дніпровського державного технічного університету
ORCID ID: 0000-0001-8595-5735

У статті представлено результати комплексного експериментального дослідження процесу формування органопластиків на основі термостійкого ароматичного поліаміду фенілону C-1, армованих органічними волокнами. Метою роботи є визначення оптимальних режимів пресування, що забезпечать підвищену ударну в'язкість матеріалу. Для цього використано метод математичного планування експерименту із застосуванням повного факторного плану. Вивчено вплив температури формування, умісту волокна та його довжини на механічні властивості композиту. Побудовано рівняння регресії першого порядку, яке описує залежність ударної в'язкості від зазначених параметрів. Модель перевірено на статистичну значущість і адекватність. Побудовані поверхні відгуку дали змогу визначити оптимальні технологічні режими: температура – 593–595 K, уміст волокна – 5–10 мас. %, довжина волокна – 2,5–4 мм. Дослідження підтвердили, що оптимальний результат досягається за 5 % умісту волокна, що забезпечує оптимальну мікроструктуру та покращені властивості матеріалу. Проведені експерименти свідчать про важливість точного регулювання кожного параметра формування, оскільки навіть незначне відхилення від оптимальних умов може спричинити суттєве погіршення властивостей отриманого матеріалу. Застосування статистичного аналізу у поєднанні з фізико-механічними випробуваннями дало змогу оцінити вплив чинників та встановити їх взаємозв'язки. Запропонована методика дає змогу не лише підвищити якість композитних матеріалів, а й оптимізувати виробничі ресурси, оскільки завдяки математичному моделюванню можна зменшити кількість експериментів і знизити витрати сировини. Проведено морфологічний аналіз структури отриманих зразків за допомогою растрової електронної мікроскопії, що підтвердив рівномірність розподілу армуючого волокна та мінімальну кількість дефектів. Отримані результати демонструють доцільність використання органічних волокон як ефективної альтернативи скляним і вуглецевим наповнювачам, що відкриває нові можливості у створенні високоякісних термостійких полімерних композиційних матеріалів для авіації, транспорту та машинобудування.

Ключові слова: органопластик, фенілон C-1, математичне планування, пресування, ударна в'язкість, параметри формування, регресійна модель.

Naberezhna Olha, Yeriomina Yekaterina. Optimization of technological pressing regimes for organoplastics using experimental design

The article presents the results of a comprehensive experimental study on the forming process of organoplastics based on the heat-resistant aromatic polyamide Phenilon C-1, reinforced with organic fibers. The aim of the work is to determine the optimal pressing conditions that ensure enhanced impact strength of the composite material. The study employs the method of mathematical experimental design using a full factorial plan. The influence of forming temperature, fiber content, and fiber length on the mechanical properties of the composite is investigated. A first-order regression equation describing the relationship between impact strength and the selected parameters is developed and verified for statistical significance and adequacy. The generated response surfaces allow the determination of optimal processing conditions: forming temperature of 593–595 K, fiber content of 5–10 wt.%, and fiber length of 2.5–4 mm. The findings confirmed that the best results are achieved at 5 % fiber content, which ensures a balanced microstructure and improved performance characteristics. The experiments demonstrate the importance of accurately controlling each processing parameter, as even minor deviations can lead to significant deterioration in material properties. The application of statistical analysis combined with mechanical testing enabled the evaluation of individual factor effects and their interactions. The proposed methodology not only improves the quality of composite materials but also optimizes manufacturing resources, as mathematical modeling reduces the number of required trials and material waste. Additionally, morphological analysis of the formed samples using scanning electron microscopy showed a uniform distribution of the reinforcing phase and a minimal number of defects.

under recommended conditions. The results support the use of organic fibers as an effective alternative to traditional glass and carbon fillers due to their better compatibility with polyamides and ability to form stable interfacial zones. This opens new prospects for the development of polymer composites with tailored characteristics for demanding applications in aviation, transport, mechanical engineering, and other high-performance industries.

Keywords: organoplastic, phenilon C-1, mathematical planning, pressing, impact strength, forming parameters, regression model.

Вступ. Виробництво полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) як на національному, так і на міжнародному рівні демонструє стабільну тенденцію до зростання, що свідчить про їхню зростаючу роль у створенні конструкційних матеріалів. Інтеграція ПКМ у галузі народного господарства розглядається як один із ключових напрямів технічного прогресу. Це сприяє вирішенню нових технологічних завдань, що постають перед сучасною промисловістю (зокрема, в авіаційній і ракетній техніці, атомній енергетиці, радіоелектроніці тощо), а також дає змогу поліпшити технічні показники й експлуатаційні властивості машин: зменшити масу конструкцій, підвищити їхню надійність, довговічність тощо [3, с. 25–26]. Таке вдосконалення безпосередньо позначається на експлуатаційних характеристиках транспортних засобів, зокрема на їхніх швидкості, маневреності, вантажопідйомності, а також сприяє зниженню зношування транспортної інфраструктури.

Серед матеріалів цієї групи особливе місце займають органоластики (ОП), які вважаються одними з найбільш перспективних напрямів розвитку композитних технологій. Досягнення науки й техніки в частині вдосконалення існуючих типів ОП та створення нових композицій і методів їх формування у виробі забезпечують подальше розширення сфери застосування таких матеріалів у конструкціях різного призначення.

Подальше розширення номенклатури органоластиків та зміцнення їхньої конкурентоспроможності напряму пов'язано з рівнем наукової опрацьованості їхніх рецептур та технологічної оптимізації процесів виготовлення. У сучасних умовах до пріоритетних завдань експериментальних досліджень відносять необхідність отримання максимально об'єктивної й повної інформації про досліджуваний об'єкт чи процес за мінімального рівня ресурсних витрат [2, с. 15, 226].

У ситуаціях, коли обсяг знань про механізми, що лежать в основі процесів формування, є обмеженим, доцільним стає використання методів математичного планування експерименту. Такі підходи дають змогу побудувати адекватні моделі досліджуваних явищ. Для ефективної оптимізації процесу формування необхідно спочатку визначити цільову функцію,

а також перелік змінних параметрів, що підлягають варіюванню.

Як свідчать дані літератури [1; 3–5, с. 65, 102, 33, 92, 114], найбільш істотний вплив на властивості органоластиків (ОП), виготовлених на основі фенілону С1, справляють такі чинники: температура формування, масова частка органічних волокон (ОВ) у композиції, а також їх довжина. З огляду на це, оптимізацію властивостей ОП за вказаними трьома змінними: температурою формування, умістом ОВ та довжиною волокна проводили із застосуванням методу математичного планування експерименту [6, с. 334], зокрема використовуючи схему повного факторного експерименту.

Методи та методики дослідження. Як параметр оптимізації вибрано ударну в'язкість досліджуваних матеріалів. Вимірювання проводили за трьох рівнів варіювання кожного з трьох факторів (табл. 1), що дало змогу побудувати функціональну залежність у вигляді:

$$y = f(x_1, x_2, x_3),$$

де x_1 – температура формування (T), К;

x_2 – уміст наповнювача (C), мас. %;

x_3 – довжина волокон (l), мм.

Із метою спрощення обчислень значення дозувань досліджуваних факторів було приведено до умовних одиниць, при цьому їх установлювали так, щоб у перетвореному масштабі вони відповідали рівням -1 ; 0 ; $+1$.

Таблиця 1

Вихідні дані для складання матриці планування експерименту

Фактор	Нульовий рівень	Крок варіювання	Значення змінних	
			+1	-1
Температура формування (x_1), К	598	5	603	593
Уміст наповнювача (x_2), мас. %	10	5	15	5
Довжина волокна (x_3), мм	3	2	5	1

Розраховані значення вихідних дозувань для кожного з досліджуваних компонентів наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Матриця планування і дані експерименту

№ досліджу	Значення змінних у кодовому позначенні							Значення змінних у натуральному позначенні		
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1	x_2	x_3
1	1	1	1	1	1	1	1	603	15	5
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	593	15	5
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	603	5	5
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	593	5	5
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	603	15	1
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	593	15	1
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	603	5	1
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	593	5	1

Результати дослідження. Відповідно до прийнятого плану експерименту, було виконано $N = 8$ дослідів. Кожен із них проводили тричі ($k=3$) у випадковій послідовності з метою усунення систематичних похибок.

Рациональний вибір факторів, що впливають на досліджуваний процес, а також визначення відповідних інтервалів їх варіювання, є необхідною умовою успішного проведення експерименту. При цьому слід урахувати, що надто малий крок варіювання змінних може призвести до того, що окремі коефіцієнти у рівнянні регресії виявляться статистично незначущими, тобто такими, що співмірні з похибками вимірювань.

Математичне моделювання досліджуваного процесу здійснювалося у вигляді рівняння регресії, яке описує залежність параметра оптимізації від основних змінних: температури формування, умісту волокна та його довжини. Як математичну модель вибрано поліном першого порядку:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (1)$$

де: y – розрахункове значення оптимізованого параметра (ударної в'язкості);

b_1, b_2 – коефіцієнти рівняння регресії;

x_1, x_2, x_3 – відповідно температура формування, уміст волокон та їх довжина в умовних одиницях.

Вихідні експериментальні значення та відповідні розрахункові дані наведено в табл. 3.

На основі отриманих результатів було обчислено середнє значення функції відгуку $\bar{y}_j$:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{ji}, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Дисперсію відтворюваності розраховували:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2. \quad (3)$$

Дисперсія паралельних дослідів розраховується за формулою:

$$S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_j)^2}{(k-1)}, \quad (4)$$

де y_i – одне з паралельних значень параметра оптимізації.

Таблиця 3

Дані експериментальних та розрахункових результатів ударної в'язкості

№ з/п	Дані експерименту			Середнє значення	Розрахункове значення
	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}_j$	y_j^p
1	18,40	20,20	17,10	18,57	18,98
2	17,80	23,90	19,80	20,50	19,91
3	20,00	10,40	16,80	15,73	15,14
4	23,40	25,10	22,30	23,60	24,02
5	21,10	26,20	24,80	24,03	23,62
6	18,40	20,00	19,60	19,33	19,93
7	14,60	14,20	14,80	14,53	15,13
8	21,70	17,50	20,20	19,80	19,38

Перевірку однорідності дисперсій, отриманих у паралельних дослідях, здійснювали із застосуванням критерію Кохрена:

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{i=1}^k S_j^2}. \quad (5)$$

Розрахункові значення критерію порівнювали з табличними за ступенів свободи: $f_1 = k - 1 = 2$ та $N = 8$, за довірчої ймовірності $P = 0,95$.

Для отриманих значень дисперсій паралельних дослідів величина критерію Кохрена становила $G_p = 0,47$, що є меншою за табличне значення $G_{таб1} = 0,516$. Це свідчить про те, що дисперсії вважаються однорідними.

У повному факторному експерименті всі коефіцієнти рівняння регресії мають однакову похибку, яка визначається за формулою:

$$S_{bi} = \frac{S_y}{\sqrt{N \cdot k}}. \quad (6)$$

На основі результатів проведеного факторного експерименту розраховано коефіцієнти рівняння регресії згідно з відповідними аналітичними виразами:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_0 \bar{y}_i; \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \bar{y}_i, \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} \bar{y}_i. \quad (7)$$

Після розрахунку всіх коефіцієнтів рівняння набуває вигляду:

$$y = 19,5125 - 1,2958x_1 + 1,0958x_2 + 0,0875x_3 + 1,9875x_1x_2 - 1,1542x_1x_3 - 1,1625x_2x_3 \quad (8)$$

Оцінку статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ проводили шляхом обчислення довірчих інтервалів, що враховували дисперсію, пов'язану з похибками визначення зазначених коефіцієнтів.

Розрахунок самих довірчих інтервалів здійснювали із застосуванням критерію Стюдента виходячи з прийнятих ступенів свободи (f_1, f_2) та рівня довірчої ймовірності 0,95.

Формула для довірчого інтервалу Δb_i має вигляд:

$$\Delta b_i = t_{kr} \cdot S_{bi}. \quad (9)$$

Критичне значення критерію Стюдента t_{kr} вибирали відповідно до кількості ступенів свободи $N(n - 1) = 16$ та прийнятого рівня значущості 0,95.

Коефіцієнт регресії вважали статистично значущим, якщо виконується така умова: $t_{kr} < t$.

Коефіцієнти, які виявилися статистично незначущими, вилучають із рівняння регресії. Після цього рівняння набуває спрощеного вигляду:

$$y = 19,5125 - 1,2958x_1 + 1,0958x_2 + 1,9875x_1x_2 - 1,1542x_1x_3 - 1,1625x_2x_3 \quad (10)$$

Перевірку адекватності отриманого рівняння здійснювали шляхом оцінки розбіжностей між теоретичними значеннями параметра оптимізації, обчисленими за рівнянням (10), та відповідними експериментальними даними для кожного

з проведених дослідів. Це дало змогу розрахувати дисперсію адекватності за однакової кількості паралельних випробувань за такою формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N - B} \sum_{j=1}^k (\bar{y}_j - y_j^p)^2, \quad (11)$$

У цьому контексті B позначає кількість статистично значущих коефіцієнтів рівняння регресії. Відповідно, число ступенів свободи для оцінки адекватності моделі визначалося як $f_{ae} = N - B = 2$.

Розраховані значення параметра оптимізації наведено в табл. 4.

Для оцінки відповідності математичної моделі (10) реальному характеру взаємозв'язку між вхідними та вихідними параметрами після обчислення коефіцієнтів регресії виконували перевірку її адекватності.

Для цього застосовували критерій Фішера (F_p) [7, с. 223], який визначається як відношення дисперсії адекватності до середньої дисперсії дослідів (табл. 4) і обчислюється за формулою:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_b^2}.$$

Таким чином, за довірчої ймовірності 0,95 та ступенів свободи $f_{ad} = 1$ і $f_2 = 2$ розрахункове значення критерію Фішера $F_p = 0,167$ виявилось меншим за відповідне табличне значення. Це свідчить про адекватність побудованої математичної моделі у відображенні досліджуваного процесу.

Застосування методів математичного планування експерименту дало змогу значно скоротити кількість необхідних дослідів для визначення коефіцієнтів рівняння регресії. Це стало можливим завдяки побудові адекватної моделі, яка відображає залежність ударної в'язкості органопластиків від параметрів процесу їх формування [8, с. 123].

Для наочності отримані математичні залежності були представлені у вигляді поверхонь відгуку (рис. 1).

У даному дослідженні отримані результати були подані у тривимірному просторі у вигляді залежностей: $a = f(C, T)$ та $a = f(l, T)$, де a – ударна в'язкість, C – уміст волокон, T – температура формування, l – довжина волокнистого наповнювача.

Таблиця 4

Розрахункові значення для оцінки адекватності рівняння за критерієм Фішера

Дисперсія відтворюваності	Похибка експерименту	Коефіцієнт регресії							Дисперсія адекватності
		b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	
6,28	0,51	19,51	-1,296	1,096	0,09	1,99	-1,15	-1,16	1,047

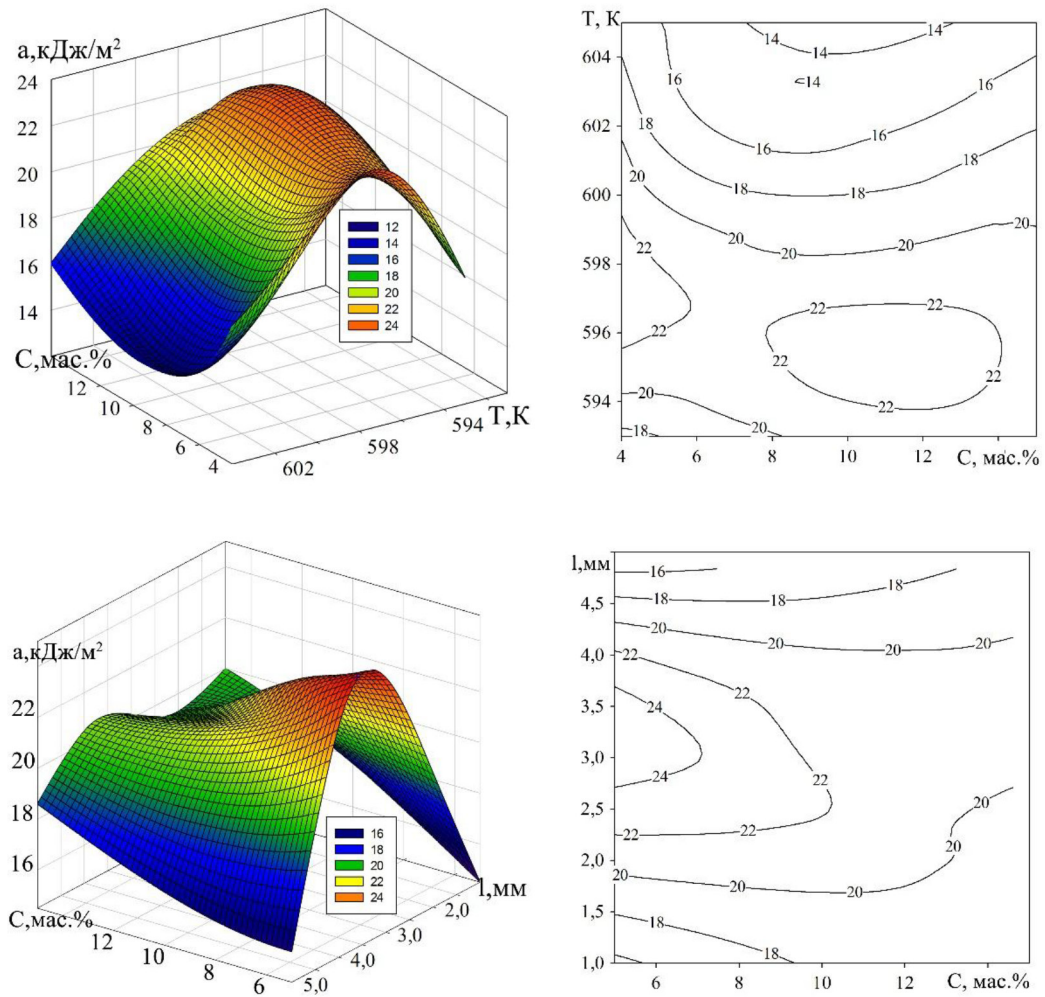


Рис. 1. Вплив масового вмісту волокна (C , мас.%), температури формування (T , К) або довжини волокна (l , мм) на ударну в'язкість (a , kJ/m^2) органопластиків

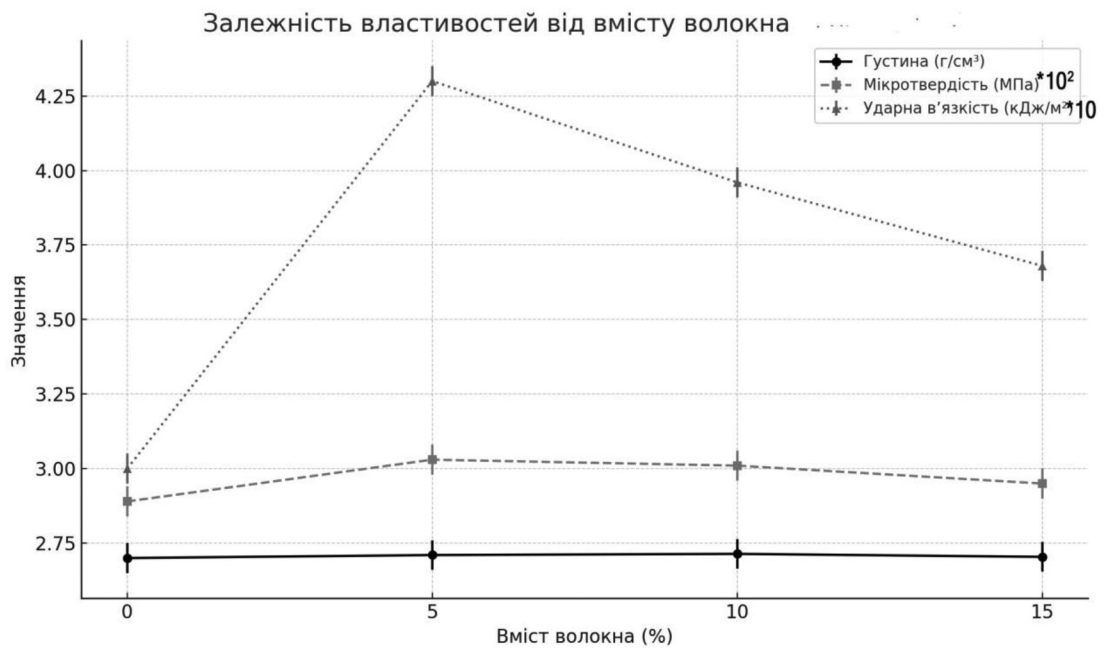


Рис. 2. Залежність фізико-механічних властивостей від умісту волокна

У процесі математичного планування експерименту було визначено оптимальні параметри формування: температура – у межах 593–595 К; масова частка волокон у полімерній матриці – 5–10 %; довжина волокон – 2,5–4 мм.

На основі математичної моделі було проведено низку досліджень фізико-механічних показників, а саме: густини, ударної в'язкості та мікротвердості. Результати представлено на рис. 2.

Дослідження показали (рис. 2), що у процесі математичного планування експерименту було визначено оптимальні параметри формування, які підтвердились експериментально.

Висновки. Аналіз отриманих експериментально результатів показав:

1. Спостерігається незначне зростання густини матеріалу з підвищенням вмісту волокна від 0 % до 10 % (від 1,35 до 1,357 г/см³), що свідчить про щільнішу структуру композиції за введення армуючого наповнювача. За подальшого збільшення вмісту до 15 % густина зменшується до 1,352 г/см³, що може бути пов'язано з утворенням внутрішніх пор або зниженням рівномірності розподілу волокон.

2. Найвищий показник мікротвердості спостерігається за вмісту волокна 5 % (303 МПа), що, ймовірно, зумовлено оптимальним армуванням без надлишкового впливу структурних дефектів [9, с. 186]. За подальшого збільшення вмісту волокна до 10 % і 15 % спостерігається незначне зниження твердості (до 301 і 295 МПа відповідно), що може вказувати на погіршення міжфазної адгезії [10, с. 87].

3. Найвищу ударну в'язкість зафіксовано за 5 % вмісту волокна (43 Дж/м²), що свідчить про оптимальне поєднання матриці та волокна, здатне ефективно поглинати ударну енергію. Подальше збільшення вмісту призводить до зменшення показника до 39,6 та 36,8 Дж/м², що може бути пов'язано з крихким характером надмірно армованої структури.

Тобто оптимальні показники фізико-механічних властивостей (мікротвердість та ударна в'язкість) спостерігається за вмісту органічних волокон на рівні 5 %. Це свідчить про доцільність використання саме цього співвідношення для оптимізації структури і міцності композиту та підтвердження адекватності математичної моделі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бутенко В. С. Статистичні методи планування експерименту в технічних дослідженнях. Київ : Вища школа, 1985. 263 с.
2. Васильєв Г. М. Полімери і композити: властивості, структура, технологія. Харків : ХНУРЕ, 2012. 348 с.
3. Драчевський С. Є. Основи наукових досліджень : навчальний посібник. Львів : Львівська політехніка, 2020. 212 с.
4. Кармазін В. І., Литвиненко С. Г. Теорія експерименту : навчальний посібник. Київ : НАУ, 2009. 164 с.
5. Колісник М. В. Основи математичного моделювання технологічних процесів. Вінниця : ВНТУ, 2015. 188 с.
6. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. New York : John Wiley & Sons, 2019. 752 p.
7. Myers R. H., Montgomery D. C., Anderson-Cook C. M. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. 4th ed. New York : Wiley, 2016. 856 p.
8. Sapura D., Rusu M. High Performance Polymer Composites. *Materiale Plastice*. 2019. Vol. 56, No. 2. P. 123–129.
9. Тузенко О. О., Кухар В. В., Балалаєва О. Ю., Дубиніна А. В. Дослідження математичних моделей у плануванні експерименту методом порівняльного аналізу. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Інформатика та моделювання»*. 2013. № 39(1012). С. 182–188.
10. Яворський В. І. Основи синтезу та дослідження полімерних матеріалів : навчальний посібник. Львів : Львівська політехніка, 2016. 240 с.

REFERENCES:

1. Butenko, V. S. (1985). *Statystychni metody planuvannia eksperymentu v tekhnichnykh doslidzhenniakh* [Statistical methods of experimental design in technical research]. Kyiv : Vyshcha Shkola. [in Ukrainian].
2. Drachievskiy, S. Ye. (2020). *Osnovy naukovykh doslidzhen* [Fundamentals of scientific research]. Lviv : Lvivska politekhnika. [in Ukrainian].
3. Karmazin, V. I., & Lytvynenko, S. H. (2009). *Teoriia eksperymentu* [Theory of experiment]. Kyiv : National Aviation University. [in Ukrainian].

4. Kolisnyk, M. V. (2015). *Osnovy matematychnoho modeliuвання tekhnolohichnykh protsesiv* [Fundamentals of mathematical modeling of technological processes]. Vinnytsia : VNTU. [in Ukrainian].
5. Montgomery, D. C. (2019). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). New York : John Wiley & Sons. [in Ukrainian].
6. Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments* (4th ed.). New York : Wiley. [in Ukrainian].
7. Rusu, M., & Sapura, D. (2019). High performance polymer composites. *Materiale Plastice*, 56(2), 123–129. [in Ukrainian].
8. Tushchenko, O. O., Kukhar, V. V., Balalaieva, O. Yu., & Dubinina, A. V. (2013). Doslidzhennia matematychnykh modelei u planiuvanni eksperymentu metodom porivnialnoho analizu [Study of mathematical models in experimental design by comparative analysis]. *Visnyk NTU "KhPI". Informatics and Modeling Series*, 39(1012), 182–188. [in Ukrainian].
9. Vasyliiev, H. M. (2012). *Polimery i kompozyty: Vlastyvosti, struktura, tekhnolohiia* [Polymers and composites: Properties, structure, technology]. Kharkiv : KhNURE. [in Ukrainian].
10. Yavorskyi, V. I. (2016). *Osnovy synthezu ta doslidzhennia polimernykh materialiv* [Fundamentals of synthesis and research of polymer materials]. Lviv : Lvivska Politehnika. [in Ukrainian].