

УДК 678.029.46:620.179.12

DOI 10.36910/775.24153966.2022.74.21

**І.В. Рула, Н.К. Дьяченко***Дніпровський державний аграрно-економічний університет***ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ФОРМУВАННЯ ВИРОБІВ ІЗ  
ВУГЛЕПЛАСТИКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ**

*Досліджено вплив режимів виготовлення сумішей в обертальному електромагнітному полі (ОЕП) та формування виробів із вуглепластиків на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2, армованого 15 мас. % вуглецевого волокна Углен-9. В роботі, за допомогою методів математичного планування експерименту показано, що оптимальними параметрами виготовлення зразків, для тримання деталей з найкращими значеннями ударної в'язкості є час обробки сумішей в ОЕП 60 с феромагнітними частками довжиною 40 мм при температурі подальшої переробки 598 К.*

*Ключові слова:* ароматичний поліамід, вуглецеве волокно, вуглепластик, планування експерименту, режими формування матеріалу, ударна в'язкість.

**I.V. Rula, N.K. Diachenko****STUDY OF THE INFLUENCE OF THE MODES OF FORMING CARBON PLASTIC  
PRODUCTS WITH THE HELP OF MATHEMATICAL PLANNING**

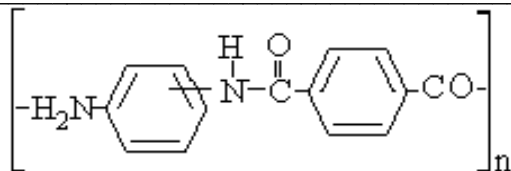
*The influence of the modes of manufacturing mixtures in a rotating electromagnetic field (REF) and the formation of products from carbon plastics based on the aromatic polyamide phenylon C-2, reinforced with 15 wt. % carbon fiber Uglen-9. In the work, using the methods of mathematical planning of the experiment, it is shown that the optimal parameters for the production of samples, in order to keep parts with the best values of impact strength, are the time of processing mixtures in REF 60 s with ferromagnetic particles 40 mm long at a further processing temperature of 598 K.*

*Key words:* aromatic polyamide, carbon fiber, carbonplastics, experiment planning, material molding modes, impact strength

Полімерні композиційні матеріали займають дуже важливе місце нашому повсякденному житті. На сьогодні вони з успіхом застосовуються в багатьох галузях промисловості від авіаційно-космічної та ракетної до енергетики, приладо- та машинобудування у гірничорудній, металургійній промисловостях та будівництві. І щорічне збільшення діапазону застосування цих матеріалів обумовлено їх високими функціональними можливостями, що забезпечують зниження маси виробів одночасно з підвищенням надійності, збільшенням ресурсу роботи і можливістю експлуатації в екстремальних умовах. На даний час є техніко-економічні передумови для широкого застосування ПКМ в різних галузях техніки, зокрема, і в машинобудуванні. Встановлено, що заміна традиційних металевих матеріалів на ПКМ забезпечує зниження матеріаломісткості деталей машин до 2,5 разів при збільшенні їх робочого ресурсу до 3 разів. Крім того, надійність деталей з ПКМ в 1,5 рази вища, ніж із традиційних матеріалів.

До найбільш поширених термопластичних антифрикційних матеріалів належать ароматичні поліаміди (ПА), зокрема фенілони. Такі матеріали мають низький коефіцієнт тертя, доволі стійкі до зношування і здатні працювати в інтервалі температур від -40 до +80°C. До недоліків поліамідів можна віднести незначну теплопровідність, низьку несучу здатність, що впливає на їх фізико-механічні характеристики. Одним з ефективних методів поліпшення експлуатаційних характеристик поліамідів є армування їх волокнистими та дисперсними наповнювачами.

Враховуючи те, що ПА являються основою для створення багатьох термостійких та високоміцних матеріалів, об'єктами дослідження були обрані композиційні матеріали на основі фенілону марки С-2(ТУ6-05-226-72), який представляє собою гетероланцюговий кополімер, що містить в головному ланцюзі макромолекули амідну групу -NCSO-, з'єднану з обох сторін фенільними фрагментами. Даний ПА отримують емульсійною поліконденсацією [1, 2] суміші дихлорангідридів ізо-, терефталевої кислот, взятих в співвідношеннях 60 та 40 мас.% відповідно, з м-фенилендіаміном.



Основні технологічні характеристики в'язучого наведені в табл. 1.

Табл. 1.

#### Властивості фенілону С-2

Зовнішній вигляд	Насипна густина, г/см <sup>3</sup>	Вологість, %	Питома в'язкість 0,5%-го розчину у ДМФА	Температура склування, К
Дрібнодисперсний білий порошок	0,33	0,40	1,2	553

Для армування полімерної матриці використовували відоме за своєю ефективністю [3] гідратцелюлозне вуглецеве волокно. При виборі волокон враховували той факт, що масове застосування високомодульних волокон обмежується достатньо високою їх вартістю, обумовленою технологічною складністю виробництва та відносно низьким виходом продукції, тому були як армуючий наповнювач було обране низькомодульне анізотропне вуглецеве волокно Углен-9 (15 мас. %) діаметром 7÷9 мкм і довжиною 3 мм. Основні властивості вуглецевого волокна наведені у таблиці 2.

Таблиця 2.

#### Властивості волокна Углен-9 [2]

Крихкість, ум. од.	Вологість волокна, %	Міцність джгута, кгс/мм <sup>2</sup>	Модуль пружності, ГПа	МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТАРНОГО ВОЛОКНА при розриві, МПа
20-40	3	не менше 6	15-18	350-500

Це волокно має ряд цінних властивостей: підвищену тепло-, електропровідність та термостійкість, високу міцність, модуль пружності та хіміїсткість, низький коефіцієнт теплового розширення, технологічність, завдяки яким воно знаходить широке застосування [4].

На сьогодні при недостатній кількості знань механізмів протікання процесів формування виробів із вуглепластиків стає доцільним використання методів математичного планування експерименту, які дозволяють адекватно описувати досліджувані процеси [5, 6]. Для оптимізації процесу формування необхідно визначитися з вибором цільової функції і параметрів оптимізації.

Так при дослідженні впливу режимів обробки сумішей в ОЕП та температури переробки в готові вироби застосовували математичне планування експерименту, а в якості параметру оптимізації було обрано ударну в'язкість вуглепластиків.

Вплив цих факторів досліджували за загальною схемою при трьох рівнях кожного з них. Для спрощення розрахунків, фактичні значення температури переробки, часу обробки сумішей в ОЕП та довжини ФЧ перетворювали в умовні одиниці [6]. Значення змінних встановлювали таким чином, щоб при переведенні в умовний масштаб вони відповідали: -1; 0; +1 (таблиця 3).

Табл. 3.

#### Основні параметри приготування сумішей в ОЕП та переробки композицій

Показник	Факт	Крок	Значення рівнів змінних		
			-1	0	1
Температура переробки, К	$x_1$	5	593	598	603
Час обробки в ОЕП, с	$x_2$	55	5	60	115
Довжина ФЧ, мм	$x_3$	20	20	40	60

Коефіцієнти рівняння для трьох змінних розраховували за результатами двадцяти семи експериментів на основі плану Бокса-Бенкена (таблиця 4).

Рівняння має наступний загальний вигляд:

$$a = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$$

де  $a$  – властивість, що досліджується (ударна в'язкість);

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$  – коефіцієнти рівняння;

$x_1, x_2, x_3$  – відповідно температура переробки сумішей, час обробки сумішей в ОЕП та довжина феромагнітних часток, фактичні значення яких при постановці досліду наведені в таблиця 4.

Таблиця 4.

Схема планування експерименту трьох компонентів

№ експерименту	Значення параметру						$a$ , кДж/м <sup>2</sup>
	Умовних одиниць			Реальне значення			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$T, K$	$t_{обр}, c$	$l_{фч}, мм$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-1	-1	593	5	20	8,18
2	-1	-1	0	593	5	40	9,03
3	-1	-1	1	593	5	60	6,28
4	-1	0	-1	593	60	20	8,52
5	-1	0	0	593	60	40	13,32
6	-1	0	1	593	60	60	6,02
7	-1	1	-1	593	115	20	6,21
8	-1	1	0	593	115	40	6,48
9	-1	1	1	593	115	60	3,12
10	0	-1	-1	598	5	20	8,46
11	0	-1	0	598	5	40	10,00
12	0	-1	1	598	5	60	6,53
13	0	0	-1	598	60	20	8,57
14	0	0	0	598	60	40	16,50
15	0	0	1	598	60	60	6,24
16	0	1	-1	598	115	20	6,40
17	0	1	0	598	115	40	6,51
18	0	1	1	598	115	60	3,34
19	1	-1	-1	603	5	20	8,31
20	1	-1	0	603	5	40	8,87
21	1	-1	1	603	5	60	6,12
22	1	0	-1	603	60	20	8,49
23	1	0	0	603	60	40	12,28
24	1	0	1	603	60	60	6,11
25	1	1	-1	603	115	20	6,12
26	1	1	0	603	115	40	6,21
27	1	1	1	603	115	60	3,03

Використовуючи прикладний пакет програм «STATISTICA 10», визначено коефіцієнти рівняння:

$$b_0 = 7,4988; b_1 = -0,0913; b_2 = -1,3712; b_3 = -1,2522; b_{11} = 0,3447; b_{22} = 1,4420; b_{33} = 1,6057; b_{12} = -0,0217; b_{13} = -0,0142; b_{23} = -0,2683.$$

Отримане рівняння для розрахунку має вигляд:

$$y = 7,4988 - 0,0913x_1 - 1,3712x_2 - 1,2522x_3 + 0,3447x_1^2 + 1,4420x_2^2 + 1,6057x_3^2 - 0,0217x_1x_2 - 0,0142x_1x_3 - 0,2683x_2x_3$$

Перевірку статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}$  оцінювали на основі обчислювання довірчих інтервалів, враховуючи дисперсію, що характеризує похибки визначення коефіцієнтів рівняння. Сам же довірчий інтервал розраховували за критерієм Стюдента, заданого згідно прийнятим ступеням свободи ( $f_1, f_2$ ) і рівнем значимості (значущості) (0,95).

Критичне значення  $t_{кр}$  вибирали для числа ступенів свободи  $N(n-1) = 54$  і для прийнятого рівня значущості 0,95. Прийнято вважати, що коефіцієнт регресії значимий, якщо виконується умова:  $t_{кр} < t$ .

Незначимі коефіцієнти виключили з рівняння регресії, після чого воно набуло наступного вигляду:

$$y = 7,4988 - 1,3712x_2 - 1,2522x_3 + 0,3447x_1^2 + 1,4420x_2^2 + 1,6057x_3^2 - 0,2683x_2x_3$$

Визначено значення критерію Фішера для надійності  $P = 0,95 - 1,56$ . Так як  $F = 1,56 < F_{табл} = 3,59$ ; отримане рівняння регресії другого порядку адекватно відтворює результати експерименту.

Таким чином, за допомогою методу математичного планування експерименту, де параметром оптимізації було обрано ударну в'язкість ВП, було одержано рівняння регресії представлене у вигляді полінома другого порядку. Для встановлення впливу факторів на величину ударної в'язкості проведено дослідження та одержані дані наведені в таблиці 5. На основі приведених результатів побудовано поверхні відгуку (рис. 1 – 3).

Табл. 5.

**Вплив температури, часу обробки в ОЕП та довжини феромагнітних часток на величину ударної в'язкості**

$l_{фч} = 40$ мм		$a_n$ , кДж/м <sup>2</sup>	$t_{обр} = 60$ с		$a_n$ , кДж/м <sup>2</sup>	$T = 598$ К		$a_n$ , кДж/м <sup>2</sup>
$T$ , К	$t_{обр}$ , с		$T$ , К	$l_{фч}$ , мм		$t_{обр}$ , с	$l_{фч}$ , мм	
593	5	9,03	593	20	8,52	5	20	8,46
593	60	13,32	593	40	13,32	5	40	10,00
593	115	6,48	593	60	6,02	5	60	6,53
598	5	10,00	598	20	8,57	60	20	8,57
598	60	16,50	598	40	16,50	60	40	16,50
598	115	6,51	598	60	6,24	60	60	6,24
603	5	8,87	603	20	8,49	120	20	6,40
603	60	12,28	603	40	12,28	120	40	6,51
603	115	6,21	603	60	6,11	120	60	3,34

Користуючись одержаними рівняннями та даними наведеними в таблиці 3 будували графіки залежності  $a_n = f(T, t_{обр})$  при  $l_{фч} = 40$  мм,  $a_n = f(T, l_{фч})$  при  $t_{обр} = 60$  с,  $a_n = f(t_{обр}, l_{фч})$  при  $T = 598$  К (рис. 1 – 3).

Дані рисунків 2 та 3 дозволяють зробити висновок, що суттєвий вплив на величину ударної в'язкості має час обробки сумішей в ОЕП та довжина феромагнітних часток, в той час, як температура впливає не значно.

Таким чином, отримані залежності (рис. 1 – 3) дозволяють оптимізувати параметри виготовлення зразків в обертальному електромагнітному полі та переробки їх в вироби. Для отримання виробів з найкращими значеннями ударної в'язкості оптимальний час обробки сумішей в ОЕП становить 60 с феромагнітними частками довжиною 40 мм при температурі подальшої переробки 598 К.

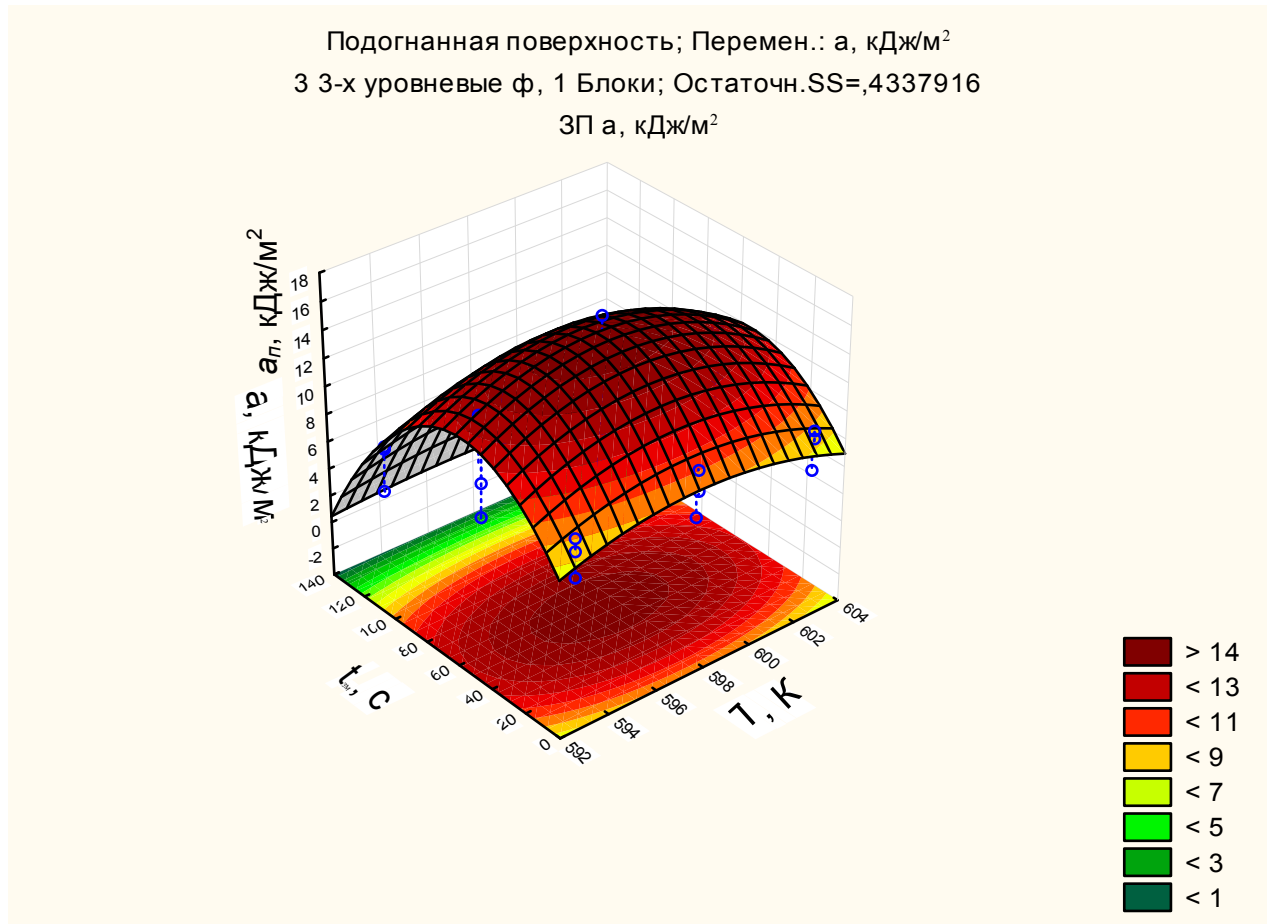


Рис. 1. Залежність ударної в'язкості від температури переробки та часу обробки сумішей в ОЕП при  $l_{\Phi\psi} = 40$  мм

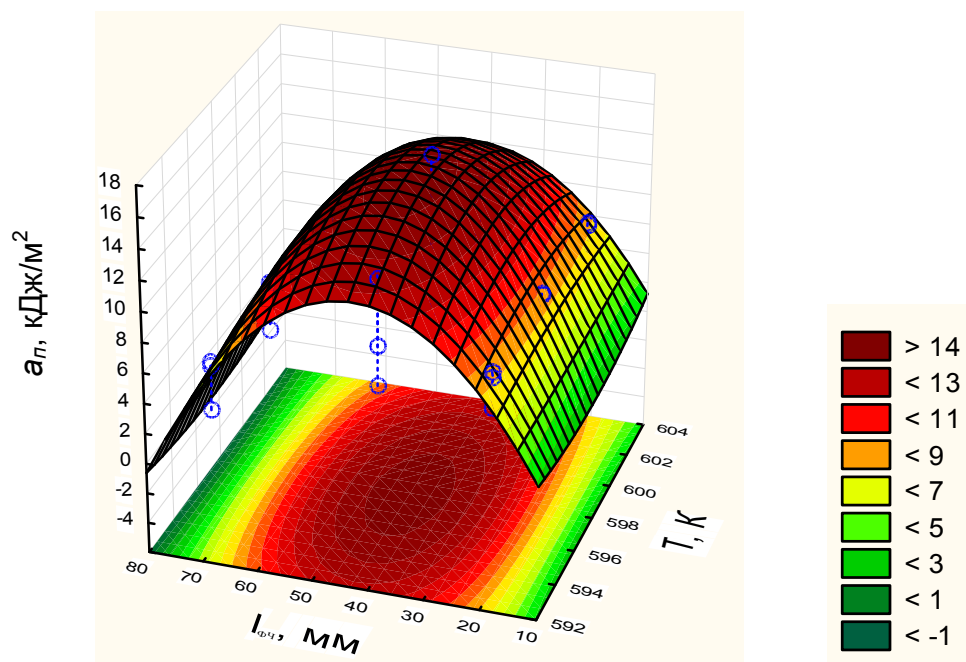


Рис. 2. Залежність ударної в'язкості від температури переробки та довжини ферромагнітних часток при  $t_{обр} = 60$  с

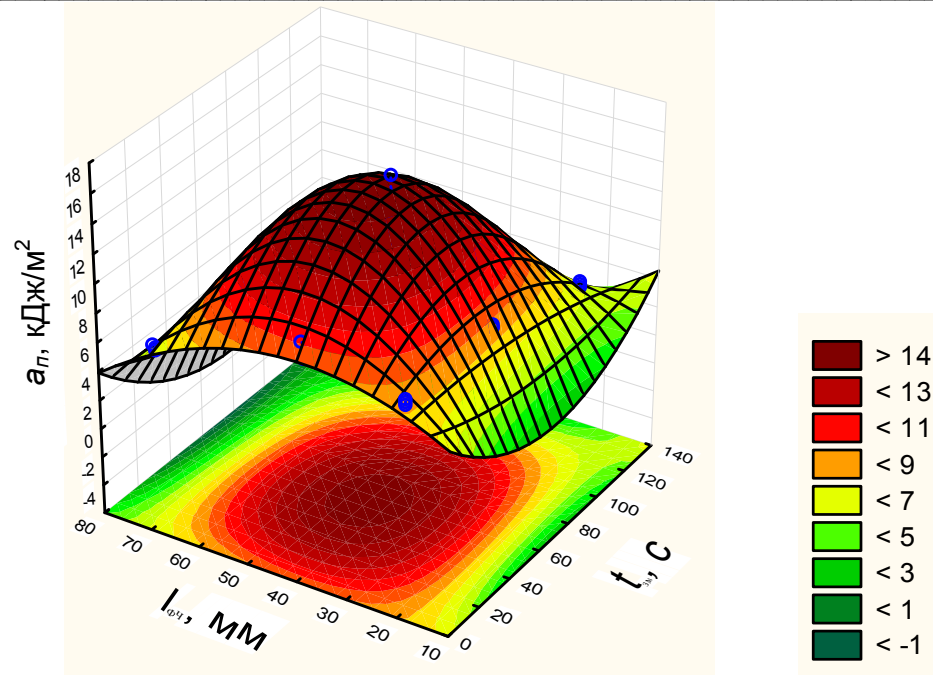


Рис. 3. Залежність ударної в'язкості від часу обробки сумішей в ОЕП і довжини ферромагнітних часток при  $T = 598 \text{ K}$

#### Список використаних джерел

1. Соколов Л.Б., Герасимов В.Д., Савинов В.М., Беляков В.К. (1975). Термостойкие ароматические полиамиды. М.: Химия, 256 с.
2. Соколов Л.Б. Термостойкие и высокопрочные полимерные материалы (1984). М.: Знание, 64 с.
3. Левит Р.М. (1979). Химическая структура углеродных волокон. *Химические волокна*. №3, С. 23–26.
4. Буря А.И. (1992). Свойства и опыт применения углепластиков в сельхозмашиностроении. *Методические рекомендации*. Киев: Знание, 29 с.
5. Буря А.И., Козлов Г.В., Рула И.В. (2004). Обобщенная методика оценки содержания межфазных областей в полимерных композитах. *Новини науки Придніпров'я*. Науково-практ. журнал. Дн-ськ, №3, С. 8–11.
6. Кобець А.С., Деркач О.Д., Чигвінцева О.П., Кабат О.С., Рула І.В., Дудін В.Ю., Макаренко Д.О., Бойко Ю.В. (2022). Застосування полімерних композитів в АПК: *Монографія*. Дніпро: ДДАЕУ, 2022 – 353 с.

#### Рецензенти:

Завідувач кафедри експлуатації машино-тракторного парку  
Дніпровського державного аграрно-економічного університету,  
кандидат технічних наук, доцент

Олексій ДЕРКАЧ

Завідувач кафедри інноваційної інженерії  
ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний університет”,  
доктор технічних наук, доцент

Олег КАБАТ