

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОРГАНОПЛАСТИКІВ, АРМОВАНИХ ХІМІЧНИМИ ВОЛОКНАМИ, МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Єршоміна К. А., с.н.с. кафедри фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету

Томіна А.-М. В., н.с. кафедри фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету

Буря О. І., к.т.н., проф., професор кафедри фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету

Томін С. В., магістр кафедри фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету

Методом математичного планування експерименту - ортогональним центральним композиційним плануванням 2-го порядку типу 3^2 - досліджено вплив режимів експлуатації на трибологічні властивості органопластиків на основі ароматичного поліаміду фенілон марки С-1, армованих поліакрилонітрильним (Лола), поліоксидіазольним (Оксалон), полісульфонамідним (Танлон) волокнами. Визначено чинники, які впливають на інтенсивність лінійного зношування та коефіцієнт тертя розроблених матеріалів. Встановлено, що найбільший вплив на зносостійкість та коефіцієнт тертя органопластиків чинить навантаження, при цьому розроблені матеріали залишаються працездатними при факторі $Pv = 3$ МПа·м²/с. Знайдено математичні моделі, у вигляді поліномів другого порядку, що адекватно описують залежність параметрів оптимізації розроблених матеріалів від швидкості ковзання та навантаження, а також дозволяють оптимізувати роботу вузлів, укомплектованих органопластиками.

Ключові слова: органопластики, режим експлуатації, методи математичного планування експерименту, зносостійкість, коефіцієнт тертя.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.154-162

Постановка проблеми. У процесі експлуатації основною причиною виходу з ладу обладнання сільськогосподарської, текстильної, металургійної техніки є зношування їхніх трибовузлів [1]. Використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) натомість традиційним матеріалам, використовуваним у трибовузлах (бронзи, сталі, чавуну тощо) дозволяє вирішити дану проблему: підвищити зносостійкість (у 10-20 разів) та надійність (у 1,5 рази) системи. Ароматичний поліамід фенілон є одним із перспективних полімерів для створення композитів триботехнічного призначення на його основі. Проте недостатня визначеність впливу навантаження та швидкості ковзання на трибологічні показники ПКМ [2] стримує їхнє широке впровадження як деталей рухомих з'єднань обладнання та механізмів.

Вирішення задачі. Використання методів математичного планування для визначення впливу режимів експлуатації на триботехнічні характеристики дозволить вирішити дану проблему. Але, як правило, прогнозування роботи вузлів тертя машин та механізмів, укомплектованих деталями з ПКМ, у реальних умовах експлуатації не вдається в повній мірі описати лінійними регресійними закономірностями. Для підвищення точності опису необхідно використовувати математичні моделі більш високого порядку. З цією метою використовують [3] ортогональне центральне композиційне планування, застосування якого дозволить визначити ті екстремальні умови роботи при яких запропоновані склади ПКМ будуть ефективно працювати [4].

Формулювання мети дослідження. Враховуючи зазначене, мета даної роботи полягала у розробці математичних моделей процесів зношування рухомих з'єднань техніки, при використанні статистичних методів планування експерименту на основі результатів проведеного комплексу трибологічних досліджень в умовах тертя без змащення за схемою «диск-колодка». Отримані математичні моделі дозволять визначити екстремальні умови

роботи (критичну швидкість (v , м/с) та навантаження (P , МПа)) для ефективної працездатності розроблених ПКМ.

Викладення основного матеріалу дослідження. Як полімерну матрицю для створення органопластиків триботехнічного призначення використовували ароматичний поліамід марки С-1. ПКМ на його основі, зазвичай, характеризуються високими показниками твердості, міцності та жорсткості, стабільністю фізико-механічних показників при підвищених температурах (до 523 К) [4]. Як наповнювач обрали органічні волокна: поліоксидіазольне (Оксалон, виробництво «Світлогорськ Хімволокно», Білорусь), поліакрилонітрильне (Лола, Всеросійський науково-дослідний інститут полімерних волокон (ВНДПВ), Росія) та полісульфонамідне (Танлон Т700, Шанхай).

Приготування органопластиків (ОП) на основі фенілону, що містять 5–20 мас. % волокна (довжина 3-7 мм), здійснювали методом сухого змішування в апараті з обертальним електромагнітним полем (0,12 Тл) за допомогою феромагнітних часток. В подальшому, частки вилучали з приготовлених сумішей методом магнітної сепарації. Формування готових виробів проводили методом компресійного пресування.

Триботехнічні характеристики в умовах тертя без змащення за схемою «диск-колодка» вивчали на машині тертя СМЦ-2 у діапазоні навантажень 0,5-1,5 МПа, швидкості ковзання 0,5-1,5 м/с. Як контртіло використовували сталь 45 (45-48 HRC, $R_a=0,32$ мкм).

Для постановки математичного експерименту необхідно визначитися з вибором цільової функції параметрів, що оптимізуються. З [1] відомо, що на процеси тертя та зношування вузлів машин і механізмів найбільше впливають швидкість та шлях ковзання, навантаженість трибовузла. Враховуючи, що як параметри оптимізації розглядали інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя, які характеризують матеріали незалежно від шляху тертя, у ході досліджень останнім знехтували. Таким чином, вирішальними факторами впливу на триботехнічні характеристики органопластиків обрані: швидкість ковзання (X_1) та навантаження (X_2).

Для спрощення розрахунків значення дозувань досліджуваних факторів перетворювали в умовні одиниці і встановлювали таким чином, щоб при перекладі в умовний масштаб вони відповідали -1; 0; +1 за формулою:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{h}$$

де x_i – кодоване значення фактору, X_i та X_{i0} – верхній і основний рівні варіювання факторів, відповідно, h – крок варіювання факторів.

Обґрунтований вибір параметрів, які впливають на досліджуваний процес, а також інтервалів їх варіювання – запорука успішно проведеної роботи. При цьому необхідно враховувати, що при занадто малому кроці варіювання змінних значення деяких коефіцієнтів рівняння можуть виявитись незначущими, тобто збігтися з похибками вимірювань. Тому крок варіювання становив 0,5 одиниць. Результати розрахунків дозувань подано в табл. 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані для планування експерименту

Параметр	Символ	Крок варіювання	Рівні варіювання					
			+а	+1	0	-1	-а	
Швидкість ковзання	X_1	v , м/с ²	0,5	1,5	1,5	1	0,5	0,5
Навантаження	X_2	P , МПа	0,5	2	2	1,5	1	1

Виходячи з постановки завдання, з метою економії часу дослідження, прийнято ортогональне центральне композиційне планування експерименту 2-го порядку типу 3^2 , яке дозволяє отримати роздільні оцінки для коефіцієнтів рівняння регресії [3]. Вимірювання проводили на п'яти рівнях кожного з параметрів (табл. 2) для ОП, що містять 15 мас.% органічного волокна (Оксалон, Танлон чи Лола).

Таблиця 2 – Матриця планування ортогонального центрального композиційного планування експерименту

Номер досліджу		Умовний масштаб						Натуральний масштаб	
		x_0	x_1	x_2	x_1x_2	x_1'	x_2'	$v, м/с^2$	$P, МПа$
Ядро плану	1	1	1	1	1	0,333	0,333	1,5	2
	2	1	-1	1	-1	0,333	0,333	0,5	2
	3	1	1	-1	-1	0,333	0,333	1,5	1
	4	1	-1	-1	1	0,333	0,333	0,5	1
	5	1	1	0	0	0,333	-0,667	1,5	1,5
Зоряні точки	6	1	-1	0	0	0,333	-0,667	0,5	1,5
	7	1	0	1	0	-0,667	0,333	1	2
	8	1	0	-1	0	-0,667	0,333	1	1
Центр плану	9	1	0	0	0	-0,667	-0,667	1	1,5

Згідно до прийнятого плану експерименту всього було проведено $N = N_{я} + 2n + 1 = 9$ дослідів, де $N_{я}$ – кількість дослідів у ядрі плану, n – кількість факторів. Кожний дослід повторювали двічі ($k = 2$) у рандомізованому порядку для виключення системних похибок. Експериментальні дані дослідів подано в табл. 3 у вигляді параметрів оптимізації (y_1, y_2).

Таблиця 3 – Дослідні значення параметрів оптимізації

№	Інтенсивність зношування, 10^7						Коефіцієнт тертя					
	Лола		Оксалон		Танлон		Лола		Оксалон		Танлон	
	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2
1	0,64	0,65	1,79	1,60	9,11	9,30	0,48	0,46	0,42	0,44	0,42	0,44
2	0,55	0,53	0,27	0,37	3,20	3,39	0,34	0,34	0,41	0,39	0,33	0,33
3	0,32	0,32	0,18	0,23	2,89	2,40	0,20	0,20	0,38	0,40	0,36	0,38
4	0,08	0,07	0,09	0,09	0,41	0,30	0,12	0,14	0,26	0,30	0,19	0,17
5	0,51	0,53	0,75	0,67	7,12	7,42	0,31	0,29	0,41	0,43	0,36	0,40
6	0,41	0,42	0,22	0,06	1,80	1,39	0,19	0,19	0,37	0,39	0,28	0,26
7	0,59	0,59	0,69	0,77	7,95	7,42	0,39	0,41	0,42	0,42	0,40	0,40
8	0,12	0,12	0,29	0,12	0,62	0,32	0,18	0,18	0,31	0,29	0,34	0,32
9	0,44	0,42	0,34	0,58	6,11	6,40	0,26	0,24	0,40	0,40	0,33	0,35

Математичний опис даних процесів пропонувалось шукати у вигляді рівнянь регресії, які визначають залежність досліджуваних процесів від v і P та подані у вигляді поліному другого порядку:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=j}^n b_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii}^2 x_i^2$$

де: y – розрахункове значення параметру оптимізації, b_i, b_{ij} і b_{ii} – коефіцієнти рівняння регресії.

На підставі отриманих експериментальних даних розраховували середнє значення функції відгуку \bar{y}_j за формулою:

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

Середні значення експериментальних даних подано в табл. 4

Таблиця 4 – Середнє та розрахункове значення параметрів оптимізації

№	Інтенсивність зношування, 10^{-7}						Коефіцієнт тертя					
	Лола		Оксалон		Танлон		Лола		Оксалон		Танлон	
	\bar{y}_j	y_j^p	\bar{y}_j	y_j^p	\bar{y}_j	y_j^p	\bar{y}_j	y_j^p	\bar{y}_j	y_j^p	\bar{y}_j	y_j^p
1	0,64	0,65	1,69	1,54	9,21	10,36	0,47	0,46	0,43	0,43	0,43	0,43
2	0,54	0,57	0,32	0,22	3,29	3,92	0,34	0,33	0,40	0,41	0,33	0,34
3	0,32	0,30	0,21	0,16	2,64	2,97	0,20	0,20	0,39	0,38	0,37	0,38
4	0,08	0,08	0,09	0,10	0,35	0,16	0,13	0,12	0,28	0,28	0,18	0,20
5	0,52	0,55	0,71	0,74	7,27	7,76	0,30	0,29	0,42	0,44	0,38	0,39
6	0,41	0,40	0,14	0,06	1,59	3,14	0,19	0,19	0,38	0,38	0,27	0,26
7	0,59	0,57	0,73	0,88	7,69	7,14	0,40	0,40	0,42	0,41	0,40	0,41
8	0,12	0,15	0,21	0,13	0,47	1,56	0,18	0,17	0,30	0,32	0,33	0,32
9	0,43	0,44	0,46	0,40	6,25	5,45	0,25	0,24	0,40	0,40	0,34	0,36

Дисперсії відтворюваності розраховували за формулою:

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

а дисперсії паралельних дослідів S_j^2 за формулами:

$$S_{bi}^2 = \frac{1}{6} S_b^2;$$

$$S_{bij}^2 = \frac{1}{4} S_b^2;$$

$$S_{bii}^2 = \frac{1}{2} S_b^2;$$

$$S_{b'0}^2 = \frac{1}{9} S_b^2;$$

$$S_{b0}^2 = S_{b'0}^2 + \frac{4}{9} S_{bii}^2.$$

Перевірку однорідності отриманих дисперсій паралельних дослідів проводили за критерієм Кохрена [5]:

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

Розрахункові значення порівнювали з табличними ($G_{табл.}$) для ступеня свободи $f_1 = k - 1 = 2$ та $N = 9$ при довірчій вірогідності $P = 0,95$.

Для отриманих дисперсій паралельних дослідів G_p менші (див. табл. 5) за $G_{табл.} = 0,47$ [6]. Таким чином, дисперсії паралельних дослідів однорідні.

На підставі ортогонального композиційного планування експерименту були обчислені коефіцієнти регресії у відповідності до формул:

$$b_i = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^N x_i \bar{y}_i,$$

$$b_{ij} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N x_{ij} \bar{y}_i,$$

$$b_{ii} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (x_i')^2 \bar{y}_i,$$

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_0 y_i - \frac{2}{3} (b_{11} + b_{22}).$$

Таблиця 5 – Розрахункові значення для оцінки адекватності рівнянь за критеріями Кохрена та Фішера

Рівняння	G_p	S_b^2	$S_{ад}^2$	F_p
(1) / (7)	0,2000	0,0008	0,00024	3,375
(2) / (8)	0,3181	0,0005	0,00145	3,008
(3) / (9)	0,4000	0,0020	0,00037	5,400
(4) / (10)	0,2092	0,0561	0,01924	2,916
(5) / (11)	0,3831	0,0019	0,00044	4,277
(6) / (12)	0,2721	0,4741	1,65577	3,493

Примітка: рівняння (1, 2, 7, 8) отримані для ОП, армованих волокном Лола, (3, 4, 9, 10) – Оксалон, (5, 6, 11, 12) – Танлон.

Після розрахунку всіх коефіцієнтів рівняння прийняли вигляд:

$$f = 0,266 + 0,052 x_1 + 0,117 x_2 + 0,015 x_1 x_2 - 0,005 x_1 x_1 + 0,04 x_2 x_2; \quad (1)$$

$$I_h = 0,414 + 0,075 x_1 + 0,210 x_2 - 0,036 x_1 x_2 + 0,038 x_1 x_1 - 0,074 x_2 x_2; \quad (2)$$

$$f = 0,384 + 0,030 x_1 + 0,047 x_2 - 0,020 x_1 x_2 + 0,010 x_1 x_1 - 0,030 x_2 x_2; \quad (3)$$

$$I_h = 0,470 + 0,343 x_1 + 0,374 x_2 + 0,313 x_1 x_2 + 0,061 x_1 x_1 + 0,106 x_2 x_2; \quad (4)$$

$$f = 0,341 + 0,067 x_1 + 0,047 x_2 - 0,023 x_1 x_2 - 0,031 x_1 x_1 + 0,010 x_2 x_2; \quad (5)$$

$$I_h = 4,717 + 2,313 x_1 + 2,787 x_2 + 0,905 x_1 x_2 - 0,742 x_1 x_1 - 1,098 x_2 x_2. \quad (6)$$

Перевірку статичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії оцінювали на основі розрахунку довірчих інтервалів з урахуванням дисперсії, яка характеризує похибки визначення коефіцієнтів рівняння. Довірчий інтервал розраховували за критерієм Стьюдента, який обрано згідно до прийнятих ступенів свободи (f_1, f_2) та рівня значущості (0,95). Для ортогонального центрального композиційного планування експерименту похибки коефіцієнтів розраховуються за формулою:

$$t = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}.$$

Довірчий інтервал:

$$\Delta b_i = t_{кр} \cdot S_{b_i}.$$

Критичне значення $t_{кр}$ обирали для числа ступенів свободи $N(k-1) = 9$ та прийнятого рівня значущості 0,95 [6]. Прийнято вважати, що коефіцієнт регресії значущий, якщо виконується умова: $t_{кр} < t$.

Коефіцієнти рівнянь (1–6), окрім b_{11} при коефіцієнтах $x_1 x_1$ рівнянь (4, 6), статистично значущі, тому рівняння набудуть остаточного вигляду:

$$f = 0,266 + 0,052 x_1 + 0,117 x_2 + 0,015 x_1 x_2 - 0,005 x_1 x_1 + 0,04 x_2 x_2; \quad (7)$$

$$I_h = 0,414 + 0,075 x_1 + 0,210 x_2 - 0,036 x_1 x_2 + 0,038 x_1 x_1 - 0,074 x_2 x_2; \quad (8)$$

$$f = 0,384 + 0,030 x_1 + 0,047 x_2 - 0,020 x_1 x_2 + 0,010 x_1 x_1 - 0,030 x_2 x_2; \quad (9)$$

$$I_h = 0,470 + 0,343 x_1 + 0,374 x_2 + 0,313 x_1 x_2 + 0,106 x_2 x_2; \quad (10)$$

$$f = 0,341 + 0,067 x_1 + 0,047 x_2 - 0,023 x_1 x_2 - 0,031 x_1 x_1 + 0,010 x_2 x_2; \quad (11)$$

$$I_h = 4,717 + 2,313 x_1 + 2,787 x_2 + 0,905 x_1 x_2 - 1,098 x_2 x_2. \quad (12)$$

Отримані рівняння перевіряли на адекватність. Для цього оцінювали відхилення значень параметру оптимізації y_j^p , розрахованого за рівняннями (7–12), від експериментальних $\overline{y_j}$ для кожного з дослідів експерименту. Це дало змогу визначити дисперсію адекватності для рівного числа паралельних дослідів за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N-B} \sum_{j=1}^k (\overline{y_j} - y_j^p)^2,$$

де B – кількість значущих коефіцієнтів рівняння.

Розрахункові значення параметра оптимізації подано в табл. 5.

Для визначення адекватності математичних описів (7–12), після розрахунку коефіцієнтів регресії, перевіряли ступінь відповідності отриманих моделей теоретичній формі зв'язку між досліджуваними та вихідними параметрами. З цією метою використовували критерій Фішера (F_p), який являє собою відношення дисперсії адекватності $s_{a\partial}^2$ до дисперсії відтворюваності досліджуваного s_b^2 (табл. 5) та розраховується за формулою:

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

Слід зазначити, що при розрахунку критерію Фішера повинна виконуватися умова $s_{a\partial}^2 > s_b^2$. Оскільки, для рівнянь (7, 9 – 11), ця вимога не задовольняється, для них необхідно поміняти місцями дисперсії [7]. Тоді критерій Фішера буде розраховуватись за формулою:

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

Оскільки при рівні значущості 0,95 для рівнянь, що розглядаються, F_p менші за табличне $F_{табл.}$ [6], то вони адекватно описують досліджуваний процес.

Кодовані значення факторів пов'язані з натуральними наступними залежностями:

$$x_1 = \frac{v-1}{0,5} = 2v - 2,$$

$$x_2 = \frac{P-1,5}{0,5} = 2P - 3.$$

Переходячи від кодованих значень факторів (x_1, x_2) до натуральних (v і P), одержимо залежність інтенсивності зношування та коефіцієнту тертя від швидкості ковзання та навантаження:

$$f = -0,02 v^2 + 0,16 P^2 + 0,06 Pv + 0,054 v - 0,306 P + 0,241; \quad (13)$$

$$I_h = 0,152 v^2 - 0,296 P^2 - 0,144 Pv + 0,062 v + 1,452 P - 1,096; \quad (14)$$

$$f = 0,04 v^2 - 0,12 P^2 - 0,08 Pv + 0,1 v + 0,534 P - 0,167; \quad (15)$$

$$I_h = 0,424 P^2 + 1,252 Pv - 1,192 v - 1,776 P + 1,494; \quad (16)$$

$$f = -0,124 v^2 + 0,04 P^2 - 0,092 Pv + 0,52 v + 0,066 P - 0,106; \quad (17)$$

$$I_h = -4,392 P^2 + 3,62 Pv - 0,804 v + 15,13 P - 12,722. \quad (18)$$

Примітка: рівняння (13, 14) отримані для ОП, армованих волокном Лола, (15, 16) – Оксалон, (17, 18) – Танлон.

Отримані математичні моделі, для наочності та подальшого аналізу, подані у вигляді поверхневій відгуку. В нашому випадку вони ілюструються поверхнями у тривимірному просторі (рис. 1).

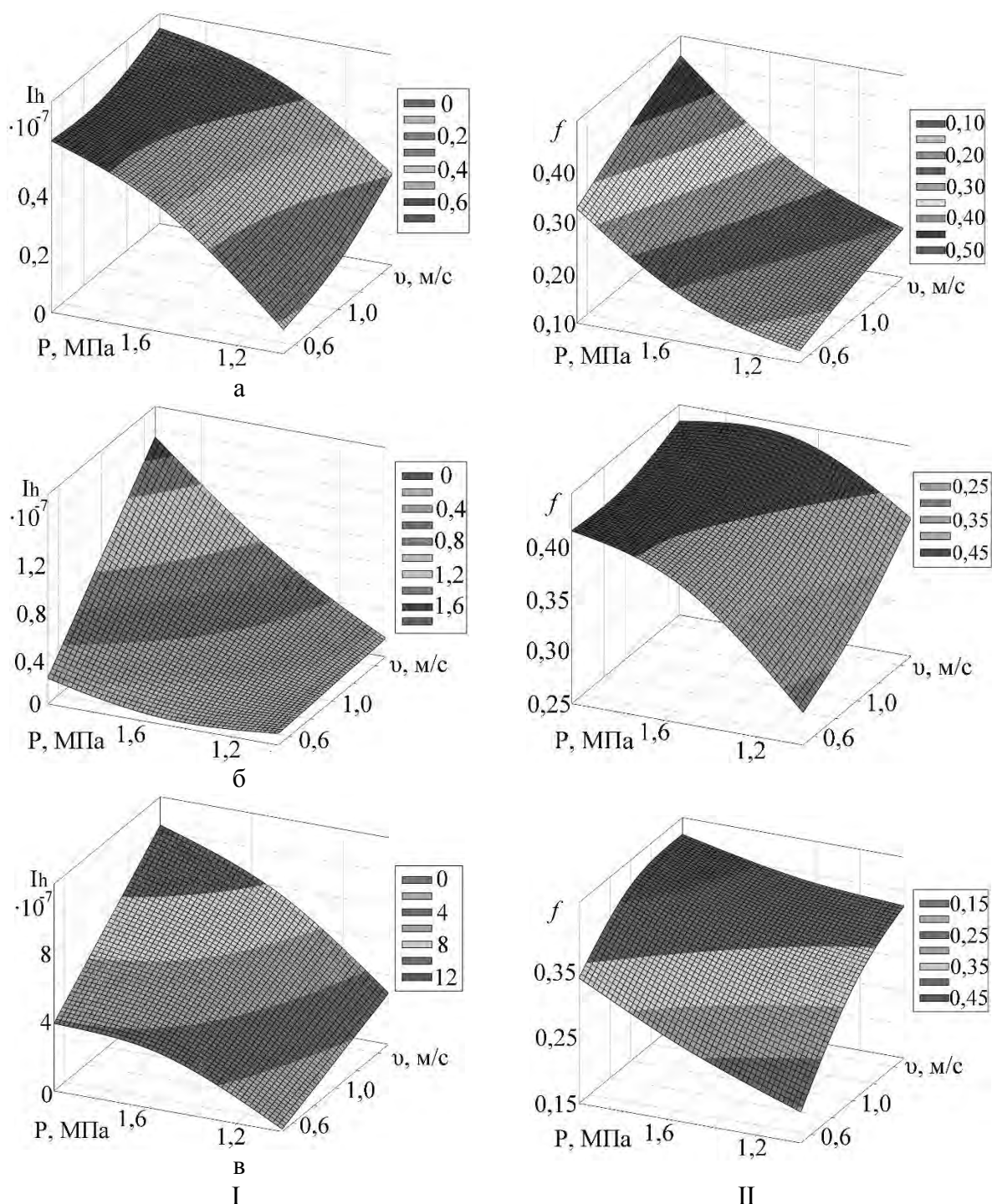


Рисунок 1 – Залежність інтенсивності зношування (I) і коефіцієнту тертя (II) органопластиків, армованих волокном Лола (а), Оксалон (б) та Танлон (в) від швидкості ковзання (v) і навантаження (P)

Як видно з рис. 1, розроблені ОП залишаються працездатними навіть при факторі $Pv = 3$ МПа м²/с. Аналіз отриманих математичних моделей в досліджуваному діапазоні варіювання факторів свідчить, що навантаження чинить найбільший вплив на зносостійкість та коефіцієнт тертя.

Висновки. Методом математичного планування експерименту досліджено вплив режимів експлуатації (швидкості ковзання та навантаження) на трибологічні властивості органопластиків, армованих волокнами Лола, Оксалон, Танлон. Знайдено математичні моделі, що дозволяють оптимізувати роботу вузлів, укомплектованих органопластиками, армованими поліариленовим волокном Лола:

$$f = -0,02 v^2 + 0,16 P^2 + 0,06 Pv + 0,054 v - 0,306 P + 0,241,$$

$$I_h = 0,152 v^2 - 0,296 P^2 - 0,144 Pv + 0,062 v + 1,452 P - 1,096,$$

поліоксидіазольним волокном Оксалон:

$$f = 0,04 v^2 - 0,12 P^2 - 0,08 Pv + 0,1 v + 0,534 P - 0,167,$$

$$I_h = 0,424 P^2 + 1,252 Pv - 1,192 v - 1,776 P + 1,494,$$

полісульфонамідним волокном Танлон:

$$f = -0,124 v^2 + 0,04 P^2 - 0,092 Pv + 0,52 v + 0,066 P - 0,106,$$

$$I_h = -4,392 P^2 + 3,62 Pv - 0,804 v + 15,13 P - 12,722.$$

Встановлено, що навантаження чинить найбільший вплив на зносостійкість та коефіцієнт тертя розроблених матеріалів. При цьому, органопластики залишаються працездатними навіть при факторі $Pv = 3$ МПа м²/с.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технология изготовления деталей узлов трения из полимерных композиционных материалов [Текст] / Д.А. Негров, В.Ю. Путинцев, О.А. Передельская, А.В. Наумова // Вестник ЮУрГУ. – 2015. – № 2 (15). – С. 13 – 19.
2. Исследование антифрикционных свойств армированного полиамида [Текст] / В.С. Кох-Татаренко, Н.Ф. Майникова, О.И. Кладовщикова и др. // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – №10. – С. 46 – 48.
3. Ахназарова, С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии [Текст] / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – Москва: Высшая школа, 1978. – 213 с.
4. Гайдадин, А.Н. Использование метода композиционного планирования эксперимента для описания технологических процессов: метод. указания [Текст] / А.Н. Гайдадин, С.А. Ефремова. – Волгоград: ВолгГТУ, 2008. – 16 с.
5. Спиридонов, А.А. [Текст] Планирование эксперимента / А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев / Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1975. – 149 с.
6. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики [Текст] / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.
7. Блохин, В.Г. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов [Текст] / В.Г. Блохин, О.П. Глудкин, А.И. Гуров, М.Л. Ханин; ред. О.П. Глудкина // Москва: Радио и связь, 1997. – 232 с.

REFERENCES

1. Negrov, D.A., & Putincev, V.Yu., & Peredelskaya, & O.A., Naumova, A.V. (2015). Tehnologiya izgotovleniya detalej uzlov treniya iz polimernyh kompozicionnyh materialov [The manufacturing technology of parts of friction units from polymer composite materials]. *Vestnik YuUrGU. – Bulletin of the SUrSU*, 2, 13-19 [in Russian].
2. Koh-Tatarenko, V.S., Majnikova, N.F., Kladovshikova, O.I. (2016). Issledovanie antifrikcionnyh svojstv armirovannogo poliamida [Investigation of the antifriction properties of reinforced polyamide]. *Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii. Advances in – Chemistry and Chemical Technology*, 10, 46-48 [in Russian].
3. Ahnazarova, S.L., & Kafarov V.V. (1978). [Optimizaciya eksperimenta v himii i himicheskoy tehnologii] *Optimization of an experiment in chemistry and chemical technology*. Moskva: Vysshaya shkola [in Russian].
4. Gajdadin, A.N., & Efremova, S.A. (2008). *Ispolzovanie metoda kompozicionnogo planirovaniya eksperimenta dlya opisaniya tehnologicheskikh processov: metod. ukazaniya* [Using

the method of compositional planning of an experiment to describe technological processes]. Moskva: Vysshaya shkola [in Russian].

5. Spiridonov, A.A., & Vasilev N.G. (1975). *Planirovanie eksperimenta [Planning an experiment]*. Sverdlovsk: UPI im. S.M. Kirova [in Russian].

6. Bolshev, L.N., & Smirnov, N.V. (1983). *Tablicy matematicheskoy statistiki [Math Statistics Tables]*. Moskva: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury [in Russian].

7. Blohin, V.G., Gludkin, O.P., Gurov, A.I., Hanin, M.L. (1997). *Sovremennyy eksperiment: podgotovka, provedenie, analiz rezultatov [Modern experiment: preparation, conduct, analysis of the results]*. Moskva: Radio i svyaz [in Russian].

Ерёмина Е.А., Томина А.-М.В., Буря А.И., Томин С.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОРГАНОПЛАСТИКОВ, АРМИРОВАННЫХ ХИМИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ, МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Методом математического планирования эксперимента - ортогональным центральным композиционным планированием 2-го порядка типа 3^2 - исследовано влияние режимов эксплуатации на трибологические свойства органоластиков на основе ароматического полиамида фенилон марки С-1, армированных полиакрилонитрильным (Лола), полиоксидиазольным (Оксалон), полисульфонамидным (Танлон) волокнами. Определены факторы, которые влияют на интенсивность линейного износа и коэффициент трения разработанных материалов. Установлено, что наибольшее влияние на износостойкость и коэффициент трения органоластиков оказывает нагрузка, при этом разработанные материалы остаются работоспособными при факторе $Pv=3$ МПа·м²/с. Найдены математические модели в виде полиномов второго порядка, адекватно описывающие зависимость параметров оптимизации разработанных материалов от скорости скольжения и нагрузки, а также позволят оптимизировать работу узлов, укомплектованных органоластиком.

Ключевые слова: органоластики, режим эксплуатации, методы математического планирования эксперимента, износостойкость, коэффициент трения.

Yeriomina Ye. A., Tomina A.-M. V., Burya A.I., Tomin S. V. RESEARCH OF THE INFLUENCE OF OPERATIONAL MODES ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ORGANIC PLASTICS REINFORCED WITH CHEMICAL FIBERS BY UTILIZING THE METHOD OF MATHEMATICAL PLANNING OF THE EXPERIMENT

During operation, the main reason for the failure of agricultural, textile, metallurgical equipment is the wear of their tributaries. The use of polymer composite materials (PCM) instead of the traditional materials used in tribodes (bronze, steel, cast iron, etc.) can solve this problem: to increase the durability (10-20 times) and reliability (1.5 times) of the system. Aromatic polyamide phenylon is one of the most promising polymers for the creation of tribotechnical composites based on it. However, the lack of certainty of the effect of loading and sliding speed on the tribological indices of PCMs hinders their widespread introduction as parts of moving joints of equipment and mechanisms. The method of mathematical planning of the experiment - orthogonal central composite planning of the 2nd order of type 3^2 - investigated the influence of modes of operation on tribological properties of organoplastics based on aromatic polyamide phenylone brand C-1, reinforced with polyacrylonitrile (Lola), polyoxidesulfonamide (polyoxides). The factors that most influence the intensity of linear wear and the coefficient of friction of the developed materials are identified. It is established that the greatest influence on the wear resistance and friction coefficient of the organoplastics has a load, while the developed materials remain viable at the factor $Pv = 3$ MPa m²/s. Mathematical models have been found, in the form of second order polynomials, which adequately describe the dependence of the optimization parameters of the developed materials on the sliding and loading velocity, and will also allow to optimize the work of nodes, equipped with organoplastics. The influence of the operating modes (sliding and loading speed) on the tribological properties of organo-plastics reinforced with Lola, Oxalon, and Tanlon fibers was investigated by the method of mathematical planning of the experiment. Mathematical models have been found that will allow optimizing the operation of nodes, equipped with organo-plastics reinforced with Lola polyarylene fiber.

Keywords: organoplastics, mode of operation, methods of mathematical planning of the experiment, wear resistance, coefficient of friction.

© Єр'оміна К. А., Томіна А.-М. В., Буря О. І., Томін С. В.

Статтю прийнято
до редакції 25.09.19