

УДК 519.242 : 678.5

О. І. БУРЯ, К. А. ЄРЬОМІНА, А. С. БЕДІН

Дніпровський державний технічний університет, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕНІЛОНУ

Методом математичного планування експерименту досліджено вплив режимів експлуатації на триботехнічні характеристики фенілону марки С-2. Визначено чинники, які найбільше впливають на параметр оптимізації. Знайдено екстремальні режими експлуатації фенілону і математичні моделі, які адекватно описують процес експлуатації трибовузла.

Ключові слова: фенілон марки С-2, режим експлуатації трибовузла, методи математичного планування експерименту.

Постановка проблеми. За даними Костецького [1], лише 10...15% деталей машин і механізмів виходять з ладу через недостатню міцність, інші – через зношування. В роботі [2] також наголошується, що 30% всіх аварій відбувається через зношування, в тому числі кількість аварій, що трапляються у зв'язку з абразивним зношуванням, становить 30, адгезійним – 15, втомним – 15, термічною втомою – 12, контактною корозією – 10, корозією – 10, кавітацією – 8%. Стає очевидним, що підвищення зносостійкості вузлів тертя – важливе наукове і виробниче завдання [3; 4]. Сьогодні воно займає провідне місце при вирішенні проблеми підвищення надійності та довговічності сучасної техніки.

Тертя та зношування є складними багатофакторним процесами, що характеризуються наступними особливостями:

- значним різноманіттям керованих і неконтрольованих факторів, які істотно впливають на протікання процесів;
- великою кількістю складних кореляційних зв'язків між факторами;
- яскраво вираженою залежністю фізико-механічних і фрикційних властивостей матеріалів, що підлягають тертю, від температури, впливу зовнішнього середовища і багатьох інших факторів.

Виходячи з викладеного, стає очевидним, що вивчення складних процесів тертя та зношування потребує вдосконалення методів експериментальних досліджень. У зв'язку з цим, мета роботи – вивчення впливу режимів експлуатації на триботехнічні характеристики фенілону.

Об'єкти та методи дослідження. Ароматичний поліамід фенілон (ТУ 6-05-221-226-72) – один з перспективних термостійких полімерів, який працездатний до температури 533 К і поступається за міцністю лише кращим маркам армованих пластиків, що викликає до нього особливий інтерес.

Фенілон марки С-2 таблетували на гідравлічному пресі при кімнатній температурі й навантаженні – 40 МПа, після чого таблетовані заготовки сушили в термошафі при температурі 473...523 К, оскільки переробка невисушеного фенілону погіршує його характеристики і призводить до поверхневих дефектів [5]. З висушених і таблетованих заготовок виготовляли втулки (розміри: $D = 32$, $d = 22$, $l = 22$ мм) методом компресійного пресування при температурі 593 К і навантаженні – 40 МПа, витримка при цій температурі становила 10 хвилин.

Триботехнічні характеристики в режимі тертя без змащення визначали на машині тертя 2080 СМТ-1 системи «вал – втулка». Контртіло: Ст 45, загартована

до 42...46 HRCe, з шорсткістю поверхні $Ra = 0,16...0,32$ мкм. Шлях тертя в дослідях варіювався в інтервалі 1000...5000 м, навантаження – 0,2...0,6 МПа, швидкість ковзання – 0,5...2 м/с.

Коефіцієнт тертя визначали з виразу:

$$M = \frac{M_{\text{сер.}}}{P \cdot R},$$

де P – навантаження на зразок, Н; R – зовнішній радіус втулки, м; $M_{\text{сер.}}$ – середній момент тертя.

Лінійне зношування визначали за формулою:

$$\Delta h = \frac{m_1 - m_2}{\rho \cdot S},$$

де m_1 і m_2 – початкова та кінцева маса зразка, відповідно, кг, ρ – густина матеріалу, кг/м³, S – площа контакту, м².

До досліджень, що пов'язані з плануванням експерименту, пред'являються підвищені вимоги до точності вимірювання факторів X_i і параметрів оптимізації у в кожному з дослідів. У зв'язку з цим, зважування втулок проводили на аналітичних терезах з похибкою вимірювання $\pm 0,0002$ г, а середній момент тертя визначали з 5...10 фіксованих значень моментів тертя.

Обговорення результатів. Застосуємо повний факторний експеримент для дослідження впливу навантаження, швидкості, а також шляху тертя ковзання на лінійне зношування і коефіцієнт тертя фенілону марки С-2.

Дослідження проводили за допомогою багатофакторного експерименту типу 2^3 – повного факторного експерименту [6]. Параметрами оптимізації виступали коефіцієнт тертя і лінійне зношування фенілону. Досліджувані процеси описували функціональними залежностями: $y(f) = f(x_1, x_2, x_3)$, $y(\Delta h) = f(x_1, x_2, x_3)$, де варіюваними незалежними факторами виступали: навантаження на зразок (x_1), швидкість тертя ковзання (x_2), шлях тертя (x_3).

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:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{n},$$

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

Результати розрахунків вихідних дозувань досліджуваних компонентів зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні данні для планування експерименту

Фактори	Символ	Позначення	Крок варіювання (n)	Рівні варіювання		
				-1	0	+1
Навантаження	P , МПа	x_1	0,2	0,2	0,4	0,6
Швидкість	v , м/с	x_2	0,75	0,50	1,25	2,00
Шлях	S , м	x_3	2000	1000	3000	5000

Згідно з прийнятим планом повного факторного експерименту (табл. 2) було проведено 8 дослідів (N), кожен з яких повторювали двічі ($k = 2$) в рандомізованому порядку для повного виключення системних похибок.

Таблиця 2

Матриця планування з розрахунковими стовбцями взаємодії факторів

№ дослідів	Значення змінних в умовному масштабі								Значення змінних в натуральному масштабі		
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	x_1	x_2	x_3
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	60	2,0	5000
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	20	2,0	5000
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	60	0,5	5000
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	20	0,5	5000
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	60	2,0	1000
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	20	2,0	1000
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	60	0,5	1000
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	20	0,5	1000

Математичний опис залежностей коефіцієнта тертя та лінійного зношування фенілону від обраних варійованих факторів пропонувалося шукати у вигляді рівняння регресії, представленого поліномом першого порядку:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (1)$$

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

На підставі отриманих експериментальних даних (табл. 3) розраховували середнє значення функції відгуку $\tilde{y}_j$:

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

Таблиця 3

Експериментальні та розрахункові значення параметра оптимізації

№ дослідів	для коефіцієнта тертя				для лінійного зношування			
	y_1	y_2	середнє	розрахункове	y_1	y_2	середнє	розрахункове
			$\tilde{y}_j$	y_j^p			$\tilde{y}_j$	y_j^p
1	0,300	0,320	0,310	0,281	3,05	4,33	3,688	3,381
2	0,310	0,355	0,333	0,362	3,80	2,35	3,075	3,381
3	0,340	0,350	0,345	0,338	1,16	1,42	1,288	1,181
4	0,495	0,525	0,510	0,517	1,15	1,00	1,075	1,181
5	0,340	0,338	0,339	0,346	0,61	0,53	0,568	0,530
6	0,490	0,575	0,533	0,525	0,58	0,41	0,493	0,530
7	0,310	0,419	0,365	0,394	0,19	0,35	0,268	0,248
8	0,538	0,469	0,504	0,474	0,245	0,21	0,229	0,248

исперсії паралельних дослідів (S_j^2) розраховували за формулою:

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{ji} - \tilde{y}_j)^2. \quad (3)$$

Розраховані значення дисперсій подано в табл. 4.

Перевірку однорідності отриманих дисперсій паралельних дослідів проводили за критерієм Кохрену:

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{i=1}^k S_j^2}. \quad (4)$$

Розрахункові значення порівнювали з табличними ($G_{\text{табл.}}$) для ступенів свободи $f_1 = k - 1 = 1$ та $N = 8$, при довірчій вірогідності $P = 0,95$ [7].

Для отриманих дисперсій паралельних дослідів $G_{p.(f)} = 0,435$ та $G_{p.(dh)} = 0,542$, що менше $G_{\text{табл.}} = 0,6798$. Відповідно, дисперсії паралельних дослідів однорідні.

Дисперсію відтворюваності розраховували за формулою:

$$S_b^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2. \quad (5)$$

На підставі повного факторного експерименту були обчислені коефіцієнти рівняння регресії, відповідно до формули:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{y}_j. \quad (6)$$

Розраховані значення коефіцієнтів рівняння подано в табл. 4.

Таблиця 4

Коефіцієнти рівняння регресії і значення дисперсій паралельних дослідів

для коефіцієнта тертя		для лінійного зношування	
коефіцієнти рівняння	дисперсії паралельних дослідів	коефіцієнти рівняння	Дисперсії паралельних дослідів
b_j	S_j	b_j	S_j
0,4046	0,00020	1,3352	0,81281
-0,0650	0,00101	0,1173	1,05125
-0,0261	0,00005	0,6204	0,03251
-0,0303	0,00045	0,9461	0,01125
0,0110	0,00000	0,0546	0,00361
0,0181	0,00361	0,0889	0,01531
-0,0270	0,00594	0,4796	0,01201
0,0246	0,00238	0,0454	0,00051

Після розрахунку всіх коефіцієнтів рівняння приймають вигляд:

$$y(f) = 0,4046 - 0,0650x_1 - 0,0261x_2 - 0,0303x_3 + 0,0110x_1x_2 + 0,0181x_1x_3 - 0,0270x_2x_3 + 0,0246x_1x_2x_3,$$

$$y(dh) = 1,335 + 0,1173x_1 + 0,6204x_2 + 0,946x_3 + 0,0546x_1x_2 + 0,0889x_1x_3 + 0,4796x_2x_3 + 0,0454x_1x_2x_3.$$

Перевірку статистичної значущості коефіцієнтів рівнянь $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$, оцінювали на основі обчислення довірчих інтервалів з урахуванням дисперсії, що характеризує похибки визначення коефіцієнтів рівняння:

$$S_{bi} = \sqrt{S_b^2}. \quad (7)$$

Сам же довірчий інтервал розраховували за критерієм Стюдента (t), заданим відповідно до прийнятих ступенів свободи (f_1, f_2) і рівнем значущості (0,95). Для повного факторного експерименту похибки коефіцієнтів прирівнюються і довірчий інтервал визначають за формулою:

$$\Delta b_i = t_{\text{кр.}} \cdot S_{bi}. \quad (8)$$

Критичне значення критерія Стюдента $t_{кр}$. [7] обирали для числа ступенів свободи $N(k-1) = 8$ і прийнятого рівня значущості 0,95. Прийнято вважати, що коефіцієнт регресії значимий, якщо виконується умова: $t_{кр} < t$.

З урахуванням значущості, рівняння, що описують залежності коефіцієнта тертя та лінійного зношування фенілону від обраних варійованих факторів, приймуть вигляд:

$$y(f) = 0,4046 - 0,0650x_1 - 0,0261x_2 - 0,0303x_3 - 0,0270x_2x_3 + 0,0246x_1x_2x_3, \quad (9)$$

$$y(\Delta h) = 1,335 + 0,6204x_2 + 0,946x_3 + 0,4796x_2x_3. \quad (10)$$

Отримані рівняння перевіряли на адекватність. Для цього оцінювали відхилення значень параметрів оптимізації y_j^p , розрахованих за рівняннями (9, 10) від експериментальних $\tilde{y}_j$ для кожного з дослідів здійснюваного експерименту, що дозволило визначити дисперсії адекватності для рівного числа паралельних дослідів:

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

де: B – кількість значущих коефіцієнтів рівняння. З ними також пов'язано число ступенів свободи $f_{ад.(f)} = k(N-B) = 6$ і $f_{ад.(\Delta h)} = 8$.

Розрахункові значення параметрів оптимізації подано в табл. 3.

Для визначення адекватності математичних описів (9, 10) після розрахунку коефіцієнтів регресії перевіряли ступінь відповідності отриманих моделей теоретичній формі зв'язку між досліджуваними вхідними та вихідними параметрами. З цією метою використовували критерій Фішера (F_p), який являє собою відношення дисперсії адекватності $S_{ад.}^2$ до дисперсії відтворюваності дослідів S_b^2 (див. табл. 5) та розраховується за формулою:

$$F_p = \frac{S_{ад.}^2}{S_b^2} \quad (12)$$

При розрахунку критерію Фішера має виконуватися умова: $S_{ад.}^2 > S_b^2$. В іншому випадку необхідно поміняти місцями дисперсії [8]. Тоді формула розрахунку набуде вигляду:

$$F_p = \frac{S_b^2}{S_{ад.}^2} \quad (13)$$

Таблиця 5

**Розрахункові значення для оцінки адекватності рівнянь
за критерієм Фішера**

для коефіцієнта тертя			для лінійного зношування		
S_b^2	S_{bi}	$S_{ад.}^2$	S_b^2	S_{bi}	$S_{ад.}^2$
0,0017	0,01033	0,0012	0,2424	0,12309	0,053

Оскільки при рівні значущості 0,95 і ступенях свободи $f_{ад.}$ для розглянутих рівнянь $F_{p.(f)} = 1,42$ і $F_{p.(\Delta h)} = 4,54$, що менше табличного $F_{табл.} = 6,02 \dots 6,37$ [7], то вони є адекватними.

Аналізуючи отримані математичні моделі в досліджуваному діапазоні варіювання факторів видно, що найбільше впливає на коефіцієнт тертя фенілону навантаження на зразок, причому, чим вище навантаження, тим менший коефіцієнт тертя. Мінімальних значень ($f = 0,2809$) він досягає при наступних режимах експлуатації: навантаження – 0,6 МПа, швидкість – 2 м/с, шлях – 5 км. Максимальних ($f = 0,5254$) – при навантаженні 0,2 МПа, швидкості 2 м/с², і шляху

тертя – 1 км.

Що стосується лінійного зношування, то на нього найбільше впливає пройдений зразком шлях, причому, чим він більший, тим більше зношується фенілон. Мінімальні значення зношування ($\Delta h = 0,2483$) досягаються при навантаженні – 0,2...0,6 МПа, швидкості – 0,5 м/с, шляху – 1 км, максимальні ($\Delta h = 3,3813$) при наступних режимах експлуатації: навантаження – 0,2...0,6 МПа, швидкість – 2 м/с, шлях тертя ковзання – 5 км.

Висновки. Досліджено вплив режимів експлуатації на триботехнічні характеристики ароматичного поліаміду фенілон. Методом математичного планування експерименту визначено фактори, які найбільше впливають на коефіцієнт тертя та лінійне зношування фенілону. Знайдено екстремальні режими його експлуатації та математичні моделі, які адекватно описують процес експлуатації трибовузла.

Список літератури

1. Костецкий Б.И. Трение смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. К.: Техника, 1970. – 394 с.
2. Quels sont les modes de degradation de surface par usure des pieces mécaniques // Matériaux et Techniques, 1989. – Vol. 77, No 1-2. – P. 24 – 29.
3. Беркович И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский ; под ред. Д.Г. Громаковского. – Самара: Самаровский гос. техн. ун-т., 2000. – 268 с.
4. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: [монография] / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самаровский гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с. : ил.
5. Козлов Г.В. Механизм усиления полимерных нанокомпозитов, наполненных углеродными нанотрубками / Г.В. Козлов, А.И. Буря, Ю.С. Липатов // Доповіді НАНУ. – 2008. – № 1. – С. 132 – 136.
6. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента / А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев // Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1975. – 149 с.
7. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.
8. Блохин В.Г. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов / В.Г. Блохин, О.П. Глудкин, А.И. Гуров, М.Л. Ханин; Под ред. О.П. Глудкина. – М.: Радио и связь, 1997. – 232 с.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2018

Буря Олександр Іванович – професор, канд. техн. наук, професор кафедри фізики конденсованого стану, Дніпровський державний технічний університет, ol.burya@gmail.com.

Єрьоміна Катерина Андріївна – канд. техн. наук, науковий співробітник науково-дослідної частини кафедри фізики конденсованого стану, Дніпровський державний технічний університет, eka.yeriomina@gmail.com.

Бедін Андрій Степанович – старший викладач кафедри фізики та матеріалознавства, Дніпровський державний аграрно-економічний університет.

BURYA A.I., YERIOMINA Ye.A., BEDIN A.S.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF OPERATING MODES ON THE TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF PHENYLONE

The effect of operating modes on the tribotechnical characteristics of phenylone of grade C-2 by the method of mathematical experiment planning has been studied. The factors that have the greatest influence on the optimization parameter are determined. Extreme regimes of exploitation of phenylone and mathematical models adequately describing the operation of the tribonode are found.

Keywords: phenylone of grade C-2, mode of operation of the tribological unit, the method of mathematical planning of experiment.

References

1. Kosteckij B.I. Trenie smazka i iznos v mashinah/ B.I. Kosteckij. K.: Tehnika, 1970. – 394 s.
2. Quels sont les modes de degradation de surface par usure des pieces mécaniques // Matériaux et Techniques, 1989. – Vol. 77, No 1-2. – P. 24 – 29.
3. Berkovich I.I. Tribologija. Fizicheskie osnovy, mehanika i tehicheskie prilozhenija / I.I. Berkovich, D.G. Gromakovskij ; pod red. D.G. Gromakovskogo. – Samara: Samarovskij gos. tehn. un-t., 2000. – 268 s.
4. Ibatullin I.D. Kinetika ustalostnoj povrezhdaemosti i razrushenija poverhnostnyh sloev: [monografija] / I.D. Ibatullin. – Samara: Samarovskij gos. tehn. un-t, 2008. – 387 s. : il.
5. Kozlov G.V. Mehanizm usilenija polimernyh nanokompozitov, napolnennyh uglerodnymi nanotrubkami / G.V. Kozlov, A.I. Burja, Ju.S. Lipatov // Dopovidi NANU. – 2008. – № 1. – С. 132 – 136.
6. Spiridonov A.A. Planirovanie jeksperimenta / A.A. Spiridonov, N.G. Vasil'ev // Sverdlovsk: UPI im. S.M. Kirova, 1975. – 149 s.
7. Bol'shev L.N. Tablicy matematicheskoy statistiki / L.N. Bol'shev, N.V. Smirnov. – M.: Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1983. – 416 s.
8. Blohin V.G. Sovremennij jeksperiment: podgotovka, provedenie, analiz rezul'tatov / V.G. Blohin, O.P. Gludkin, A.I. Gurov, M.L. Hanin; Pod red. O.P. Gludkina. – M.: Radio i svjaz', 1997. – 232 s.