

**Буря А.И.,
Ерёмина Е.А.,
Рева А.Г.**
г. Каменское, Украина,
E-mail: ol.burya@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕПЛАСТИКА

УДК 519.242 : 678.5

Методом математического планирования эксперимента исследовано влияние режимов эксплуатации на триботехнические характеристики углепластика. Определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на параметр оптимизации. Найден экстремальный режим эксплуатации углепластика на основе термостойкого ароматического полиамида фенилон, армированного модифицированными наночастицами Mg углеродным волокном, и математические модели, адекватно описывающие процесс эксплуатации трибоузла.

Ключевые слова: углепластик, наночастицы Mg, режим эксплуатации трибоузла, метод математического планирования эксперимента.

Введение

По данным Костецкого [1], только 10 ... 15 % деталей машин и механизмов выходят из строя из-за недостаточной прочности, другие – из-за износа. В работе [2] также отмечается, что 30 % всех аварий происходит из-за износа, в том числе количество аварий, происходящих по причине абразивного износа, составляет 30, адгезионного и усталостного – по 15, термической усталости – 12, контактной коррозии и коррозии – по 10, кавитации – 8 %. Становится очевидным, что повышение износостойкости узлов трения – важное научное и производственное задание [3, 4]. Сегодня оно занимает ведущее место при решении проблемы повышения надёжности и долговечности современной техники.

Трение и изнашивание являются многофакторными процессами, характеризующимися следующими особенностями:

- значительным многообразием управляемых и неконтролируемых факторов, которые оказывают существенное влияние на ход процессов;
- большим числом сложных корреляционных связей между факторами;
- ярко выраженной зависимостью физико - механических и фрикционных свойств трущихся материалов от температуры, воздействия внешней среды и многих других факторов.

Цель работы

Исходя из изложенного, становится очевидным, что изучение сложных процессов трения и изнашивания требует усовершенствования методами экспериментальных исследований. В связи с чем, цель работы – изучение влияния режимов эксплуатации на триботехнические характеристики углепластика на основе ароматического полиамида фенилон.

Объекты и методы исследования

В качестве полимерной матрицы для изготовления углепластиков (УП) использовали ароматический полиамид фенилон марки С-2 (ТУ 6–05–221–226–72) – один из перспективных термостойких полимеров, которой работоспособен до температуры 533 К и уступает по прочности только лучшим маркам армированных пластиков, что вызывает к нему особый интерес как к связующему.

Для армирования полимерной матрицы использовали модифицированные наночастицами магния углеродные волокна (Mg-УВ), содержащие в своём составе высокодисперсный металл, который при температуре термической обработки 1073...1173 К катализирует образование фазы наноразмерного упорядоченного углерода, структурными элементами которого являются графеновые слои. Введение Mg в структуру УВ осуществляли путём пропитки целлюлозных волокон хлоридом соответствующего металла с последующей карбонизацией в струе инертного газа.

Пресскомпозиции состава: фенилон С-2 + 17 мас.% Mg-УВ готовили путём смешения компонентов во вращающемся электромагнитном поле в присутствии неравноосных ферромагнитных частиц. Приготовленные таким образом смеси таблетировали на гидравлическом прессе при комнатной температуре и давлении – 40 МПа, после чего таблетированные заготовки сушили в термощкафу при температуре 473 ... 523 К, т. к. переработка невысушенного фенилона ухудшает его прочностные характеристики и приводит к поверхностным дефектам [5]. Из высушенных и таблетированных заготовок изготавливали втулки (размеры: $D = 32$, $d = 22$, $l = 22$ мм) методом компрессионного прессования при температуре 593 К и давлении – 40 МПа, выдержка при этой температуре составляла 10 минут.

Триботехнические характеристики в режиме трения без смазки определяли на машине трения 2080 СМТ-1 системы «вал – втулка». Контртело: Ст 45, закалённая до 42 ... 46 HRC₃, с шероховатостью поверхности $Ra = 0,16 \dots 0,32$ мкм. Путь трения в опытах варьировался в интервале 1000 ... 5000 м, нагрузка – 0,2 ... 0,6 МПа, скорость скольжения – 0,5 ... 2 м/с.

Коэффициент трения определяли из выражения:

$$M = \frac{M_{cp}}{p \cdot R},$$

где P – нагрузка на образец, Н;

R – внешний радиус втулки, м;

M_{cp} – средний момент трения.

Линейный износ определяли по формуле:

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

где m_1 и m_2 – начальная и конечная масса образца, соответственно, кг,

ρ – плотность материала, кг/м³,

S – площадь пятна контакта, м².

К исследованиям, связанным с планированием эксперимента, предъявляются повышенные требования к точности измерения факторов X_i и параметров оптимизации y в каждом из опытов. В связи с чем, взвешивание втулок проводили на аналитических весах с погрешностью измерения $\pm 0,0002$ г, а средний момент трения определяли из 5 ... 10 фиксированных значений моментов трения.

Обсуждение результатов

Применим полный факторный эксперимент для исследования влияния нагрузки, скорости, а также пути трения скольжения на линейный износ и коэффициент трения УП на основе фенилона С-2, армированного 17 мас.% Mg-УВ.

Исследования проводили с помощью многофакторного эксперимента типа 2³ – полного факторного эксперимента [6]. Параметрами оптимизации выступали коэффициент трения и линейный износ УП. Исследуемые процессы описывали функциональными зависимостями: $y(f) = f(x_1, x_2, x_3)$, $y(\Delta h) = f(x_1, x_2, x_3)$, где варьируемыми независимыми факторами выступали: нагрузка на образец (x_1), скорость трения скольжения (x_2), путь трения (x_3).

Для упрощения расчётов значения дозировок исследуемых факторов преобразовывали в условные единицы и устанавливали так, чтобы при переводе в условный масштаб они соответствовали -1; 0; +1 по формуле:

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

где x_i – кодированное значение фактора;

X_i и X_{i0} – верхний и основной уровни варьирования факторов, соответственно;

n – шаг варьирования факторов.

Результаты расчёта исходных дозировок исследуемых компонентов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для планирования эксперимента

Факторы	Символ	Обозначение	Шаг варьирования (n)	Уровни варьирования		
				-1	0	+1
Нагрузка	P , МПа	x_1	0,2	0,2	0,4	0,6
Скорость	v , м/с	x_2	0,75	0,50	1,25	2,00
Путь	S , м	x_3	2000	1000	3000	5000

Согласно принятому плану полного факторного эксперимента (табл. 2) было проведено 8 опытов (N), каждый из которых повторяли дважды ($k = 2$) в рандомизированном порядке для полного исключения системных ошибок.

Математическое описание зависимостей коэффициента трения и линейного износа УП от выбранных варьируемых факторов предлагалось искать в виде уравнения регрессии, представленного полиномом первого порядка:

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

где y – расчётное значение параметра оптимизации;

b_i и b_{ij} – коэффициенты уравнения регрессии.

Таблица 2

Матрица планирования с расчётными столбцами взаимодействия факторов

№ опыта	Значение переменных в условном масштабе								Значения переменных в натуральном масштабе		
	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

На основании полученных экспериментальных данных (табл. 3) рассчитывали среднее значение функции отклика \tilde{y}_j :

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

Таблица 3

Экспериментальные и расчётные значения параметра оптимизации

№ опыта	Для коэффициента трения				Для линейного износа			
	y_1	y_2	среднее	расчётное	y_1	y_2	среднее	расчётное
			\tilde{y}_j	y_j^p			\tilde{y}_j	y_j^p
1	0,395	0,403	0,406	0,410	46,80	43,80	45,300	45,082
2	0,186	0,198	0,194	0,210	17,55	19,80	18,675	18,893
3	0,210	0,200	0,204	0,190	6,80	5,16	5,980	6,198
4	0,474	0,468	0,464	0,462	3,17	3,42	3,295	3,077
5	0,448	0,442	0,445	0,435	20,90	17,50	19,200	19,418
6	0,236	0,235	0,231	0,234	1,70	3,90	2,800	2,582
7	0,330	0,338	0,341	0,345	3,14	1,34	2,240	2,022
8	0,496	0,511	0,507	0,526	7,75	8,32	8,035	8,253

Дисперсии параллельных опытов S_j^2 рассчитывали по формуле:

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

Расчитанные значения дисперсий представлены в табл. 4.

Проверку однородности полученных дисперсий параллельных опытов проводили по критерию Кохрена:

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

Расчётные значения сравнивали с табличными ($G_{\text{табл.}}$) для степени свободы $f_1 = k - 1 = 1$ и $N = 8$, при доверительной вероятности $P = 0,95$ [7].

Для полученных дисперсий параллельных опытов $G_{p,(f)} = 0,3405$ и $G_{p,(\Delta h)} = 0,314$, что меньше $G_{\text{табл.}} = 0,6798$. Следовательно, дисперсии параллельных опытов однородны.

Дисперсию воспроизводимости рассчитывали по формуле:

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

На основании полного факторного эксперимента были вычислены коэффициенты уравнения регрессии, в соответствии с формулами:

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

Расчитанные значения коэффициентов представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Коэффициенты уравнения регрессии
и значения дисперсий параллельных опытов**

Для коэффициента трения		Для линейного износа	
коэффициенты уравнения	дисперсии параллельных опытов	коэффициенты уравнения	дисперсии параллельных опытов
b_j	S_j	b_j	S_j
0,3492	0,000113	13,1906	4,5000
-0,0038	0,000288	4,9894	2,5313
-0,0299	0,000200	8,3031	1,3448
-0,0321	0,000072	5,1219	0,0313
0,1066	0,000085	5,7669	5,7800
-0,0121	0,000002	2,3381	2,4200
0,0131	0,000113	5,3719	1,6200
0,0116	0,000450	0,2181	0,1625

После расчёта всех коэффициентов уравнения принимают вид:

$$y(f) = 0,3492 - 0,0038x_1 - 0,0299x_2 - 0,0321x_3 + 0,1066x_1x_2 - 0,012x_1x_3 + 0,0131x_2x_3 + 0,0116x_1x_2x_3,$$

$$y(\Delta h) = 13,1906 + 4,9894x_1 + 8,303x_2 + 5,1219x_3 + 5,7669x_1x_2 + 2,338x_1x_3 + 5,3719x_2x_3 + 0,218x_1x_2x_3.$$

Проверку статистической значимости коэффициентов уравнений регрессии $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$, оценивали на основе вычисления доверительных интервалов с учётом дисперсии, характеризующей ошибки определения коэффициентов уравнения:

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

Сам же доверительный интервал рассчитывали по критерию Стьюдента (t), выбранному согласно принятым степеням свободы (f_1, f_2) и уровню значимости (0,95). Для полного факторного эксперимента ошибки коэффициентов приравниваются и доверительный интервал определяют по формуле:

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

Критическое значение критерия Стьюдента t_{kp} [7] выбирали для числа степеней свободы $N(k-1) = 8$ и принятого уровня значимости 0,95. Принято считать, что коэффициент регрессии значим, если выполняется условие: $t_{kp} < t$.

С учётом значимости, уравнения, описывающие зависимость коэффициента трения и линейного износа УП от выбранных варьируемых факторов, примут вид:

$$y(f) = 0,3492 - 0,0299x_2 - 0,0321x_3 + 0,1066x_1x_2 - 0,0121x_1x_3 + 0,0131x_2x_3 + 0,0116x_1x_2x_3. \quad (9)$$

$$y(\Delta h) = 13,1906 + 4,9894x_1 + 8,303x_2 + 5,1219x_3 + 5,7669x_1x_2 + 2,338x_1x_3 + 5,3719x_2x_3. \quad (10)$$

Полученные уравнения проверяли на адекватность. Для этого оценивали отклонения значений параметра оптимизации y_j^p , рассчитанные по уравнениям (9, 10) от экспериментальных \tilde{y}_j для каждого из опытов осуществляемого эксперимента, что позволило определить дисперсии адекватности для равно-го числа параллельных опытов:

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

где B – число значимых коэффициентов уравнения. С ними также связано число степеней свободы $f_{ad,(f)} = k(N-B) = 2$ и $f_{ad,(\Delta h)} = 8$.

Расчётные значения параметров оптимизации представлены в табл. 3.

Для определения адекватности математических описаний (9, 10) после расчёта коэффициентов регрессии проверяли степень соответствия полученных моделей теоретической форме связи между исследуемыми входными и выходными параметрами. С этой целью использовали критерий Фишера (F_p), который представляет собой отношение дисперсии адекватности S_{ad}^2 к дисперсии воспроизводимости опыта S_b^2 (табл. 5) и вычисляется по формуле:

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

При расчёте критерия Фишера должно выполняться условие: $S_{ad}^2 > S_b^2$. В противном случае необходимо поменять местами дисперсии [8]. Тогда формула расчёта примет вид:

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

Таблица 5

Расчётные значения для оценки адекватности уравнений по критерию Фишера

Для коэффициента трения			Для линейного износа		
S_b^2	S_{bi}	S_{ad}^2	S_b^2	S_{bi}	S_{ad}^2
0,0002	0,0032	0,00006	2,2987	0,3790	0,381

Т.к. при уровне значимости 0,95 и степенях свободы f_{ad} для рассматриваемых уравнений $F_{p,(f)} = 2,84$ и $F_{p,(\Delta h)} = 6,039$, что меньше табличных $F_{табл,(f)} = 6,02$ и $F_{табл,(\Delta h)} = 8,65$ [7], то они являются адекватными.

Анализируя полученные математические модели в исследуемом диапазоне варьируемых факторов видно, что наибольшее влияние на коэффициент трения УП оказывает путь трения скольжения, причём, чем больше путь, тем меньше коэффициент трения. Минимальных значений ($f = 0,1942$) он достигает при следующих режимах эксплуатации: нагрузка – 0,2 МПа, скорость – 2 м/с, путь – 5 км. Максимальных ($f = 0,5072$) – при нагрузке 0,2 МПа, скорости 0,5 м/с, и пути трения – 1 км.

Что касается линейного износа, то на него наибольшее влияние оказывает скорость скольжения, причём, чем она выше, тем больше изнашивается углепластик. Минимальные значения износа ($\Delta h = 2,092$) достигаются при нагрузке – 0,6 МПа, скорости – 0,5 м/с, пути – 1 км, максимальные ($\Delta h = 45,082$) – при следующих режимах эксплуатации: нагрузка – 0,6 МПа, скорость – 2 м/с, путь трения скольжения – 5 км.

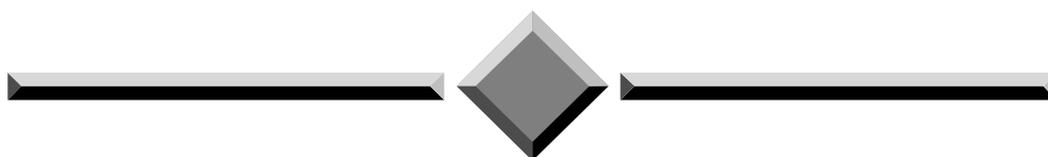
Выводы

Исследовано влияние режимов эксплуатации на триботехнические характеристики углепластика на основе ароматического полиамида фенилон, армированного модифицированным наночастицами Mg углеродным волокном. Методом математического планирования эксперимента определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на коэффициент трения и линейный износ углепластика. Найдены экстремальные режимы его эксплуатации и математические модели, адекватно описывающие процесс эксплуатации трибузла.

Литература

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 mecaniques // 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 : Самарский гос. техн. ун-т., 2000. – 268 с.
4. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: [монография] / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самарский 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.

Надійшла в редакцію 05.04.2018



Проблеми трибології
“Problems of Tribology”
E-mail: tribosensor@gmail.com

Burya A.I., Yeriomina Ye.A., Reva A.G. Investigation of the influence of operating modes on the tribotechnical characteristics of carbon fiber reinforced plastic.

The effect of operating modes on the tribotechnical characteristics of carbon fiber reinforced plastic 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 carbon fiber reinforced plastic (with modified Mg nanoparticles) based on heat-resistant aromatic polyamide phenylone and mathematical models adequately describing the operation of the tribo-node are found.

Key words: carbon fiber reinforced plastic, Mg nanoparticles, mode of operation of the tribological unit, the method of mathematical planning of experiment

References

1. Kostetskiy B.I. Treniye smazka i iznos v mashinakh. K. Tekhnika, 1970. 394 p.
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. Tribologiya. Fizicheskiye osnovy, mekhanika i tekhnicheskiye prilozheniya. I.I. Berkovich, D.G. Gromakovskiy; pod red. D.G. Gromakovskogo. Samara. Samarovskiy gos. tekhn. un-t., 2000. 268 p.
4. Ibatullin I.D. Kinetika ustalostnoy povrezhdayemosti i razrusheniya poverkhnostnykh sloyev: [monografiya]. I.D. Ibatullin. Samara. Samarovskiy gos. tekhn. un-t, 2008. 387 p.
5. Kozlov G.V. Mekhanizm usileniya polimernykh nanokompozitov, napolnennykh uglerodnymi nanotrubkami. G.V. Kozlov, A.I. Burya, Yu.S. Lipatov. Dopovidi NANU. 2008. № 1. P. 132 – 136.
6. Spiridonov A.A. Planirovaniye eksperimenta. A.A. Spiridonov, N.G. Vasil'yev. Sverdlovsk: UPI im. S.M. Kirova, 1975. 149 p.
7. Bol'shev L.N. Tablitsy matematicheskoy statistiki. L.N. Bol'shev, N.V. Smirnov. M. Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1983. 416 p.
8. Blokhin V.G. Sovremennyy eksperiment: podgotovka, provedeniye, analiz rezul'tatov. V.G. Blokhin, O.P. Gludkin, A.I. Gurov, M.L. Khanin; Pod red. O.P. Gludkina. M. Radio i svyaz', 1997. 232 p.