

УДК: 539.621 : 539.21 : 678.01 : 676.035

А. И. БУРЯ, Е. А. ЕРЁМИНА, Е. В. МАМЧЕНКО, А. С. БЕДИН

Днепродзержинский государственный технический университет, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПЕНТАПЛАСТА, АРМИРОВАННОГО ТЕРЛОНОМ

Методом планирования эксперимента изучено влияние скорости истирания и нагрузки на износостойкость пентапласта, армированного волокном терлон. Найдено уравнение, адекватно описывающее износостойкость композиции в варьруемом интервале исследуемых переменных.

Ключевые слова: пентапласт, терлон, износостойкость, режимы трения, планирование эксперимента, уравнение регрессии.

Введение. Одним из проявлений научно-технического прогресса и связанного с ним процесса технического перевооружения современных производств являются разработка и внедрение новых видов конструкционных материалов, главным образом – полимеров и полимерных композиционных материалов.

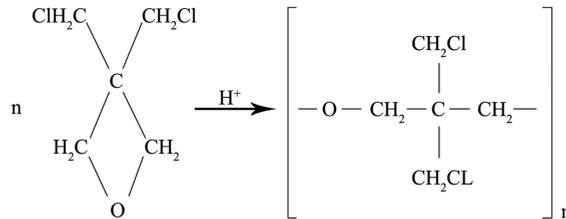
Современные полимерные материалы обладают целым рядом преимуществ по сравнению с традиционными конструкционными, что позволяет увеличивать производительность и срок службы оборудования, следовательно, повышать рентабельность производства, создавать конкурентно способные материалы. В некоторых случаях свойства полимеров настолько уникальны, что альтернативы их применению просто не существует, в особенности, если речь идет о полимерах нового поколения, внедренных в широкую практику в последнее двадцатилетие.

Состояние проблемы. Исследованиями украинских ученых установлено [1], что только 10 – 15 % деталей машин и механизмов выходят из строя из-за недостаточной прочности, а остальные – из-за износа, поэтому задача повышения износостойкости движущихся деталей и их частей занимает ведущее место при решении проблемы увеличения надежности и долговечности современной техники. Перспективным направлением решения данной проблемы является изготовление деталей из специальных композиционных материалов, сочетающих высокие износостойкость и прочность с необходимыми конструкционными свойствами.

Пентапласт относится к перспективным связующим для получения композитных материалов с хорошими трибологическими характеристиками [2]. Его достоинствами являются достаточно высокая прочность и низкий коэффициент трения, которые сочетаются с очень высокой химической стойкостью, по которой он уступает лишь фторопласту. Армирование же пентапласта высокомолекулярным волокном терлон [3] может обеспечить композиту достаточно хорошие ударную вязкость и износостойкость. Однако, создание материала с оптимальными рабочими характеристиками невозможно без тщательных исследований поведения материала в той или иной рабочей среде.

Цель и задание исследования. Повышение износостойкости трущихся поверхностей – важная научная и производственная задача [4 – 6]. На износостойкость влияют твердость материалов, их упругие свойства, режим работы, внешние условия и конструктивные особенности узла трения [7]. Поскольку армирование пентапласта обеспечивает хорошую износостойкость композиту, научный интерес составляло изучение влияния режима трения на свойства материалов.

Объекты и методы исследований. В качестве связующего использовали пентапласт (ТУ 6-05-1422-74), получаемый в промышленности путем полимеризации 3,3-бис(хлорметил)оксациклобутана по схеме:



В качестве наполнителя использовали арамидное волокно терлон, представляющее собой полипарафенилентерефталамид. Характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики волокна терлон

Свойства	Показатели
Линейная плотность, текс	58,8
Филаментность	333
Разрушающее напряжение комплексной нити при разрушении в микропластике, МПа	3500
Динамический модуль упругости при растяжении, ГПа	147
Разрывное удлинение, %	19
Равновесное влагопоглощение, масс. %	2,2
Плотность, кг/м ³	1450

Содержание волокна в органопластиках составляло 35 %, т.к. данная композиция характеризуется наименьшим износом [8]. Армирование пентапласта терлоном осуществляли во вращающемся магнитном поле (0,13 Тл) с помощью ферромагнитных частиц, которые извлекали из композиции магнитной сепарацией. Композицию сушили при температуре 323 – 343 К на протяжении 1 – 2 ч и перерабатывали в изделия методом компрессионного прессования. Параметры режима переработки композита: загрузка в пресс-форму с температурой 383 К; нагрев до 443 – 447 К и выдержка при этой же температуре 10 мин; прессование при удельном давлении 45 – 70 МПа. После этого пресс-форму охлаждали под давлением до температуры 383 К и выпрессовывали изделия.

Трение и износ полимерных композиций определяли на дисковой машине трения (диск из стали 45, термообработанной до твердости 45–48 HRC, имеющий шероховатость поверхности $Ra = 0,16\text{--}0,32$ мкм)

Обсуждение результатов. При изучении процесса трения наиболее существенным является установление функциональной зависимости между исследуемыми свойствами и факторами их определяющими: скорость истирания (v) и нагрузка (P). Интерес составляло получение математической модели исследуемого технологического процесса в виде уравнения множественной регрессии второго порядка.

Исходя из постановки задачи, с целью экономии времени исследования было предпринято ортогональное центральное композиционное планирование эксперимента [9]. Оценивали влияние технологических параметров процесса трения на из-

нос органопластиков на основе пентапласта. Измерения проводили на трех уровнях каждого из параметров (табл. 2) и описывали следующей функциональной зависимостью: $y = f(x_1, x_2)$, где: x_1 – нагрузка, МПа; x_2 – скорость истирания, м/с.

Для упрощения расчетов значения дозировок исследуемых факторов преобразовывали в условные единицы и устанавливали так, чтобы при переводе в условный масштаб они соответствовали -1 ; 0 ; $+1$. Результаты расчета исходных дозировок исследуемых компонентов сведены в табл.3.

Таблица 2

Исходные данные для планирования эксперимента

Параметр	Шаг варьирования (h)	Уровни варьирования		
		+1	0	-1
Нагрузка, МПа	0,5	0,5	1	1,5
Скорость истирания, м/с	0,2	0,2	0,4	0,6

Таблица 3

Матрица планирования и данные эксперимента

№ п/п	x_0	x_1	x_2	$x_{1,2}$	x_1^2	x_2^2	Натуральный масштаб		Износ, мг y_j			Среднее $\overline{y_j}$	Расчетное y_j^p
							x_1	x_2	y_1	y_2	y_3		
1	1	-1	-1	0,33	0,33	1	0,2	0,5	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3
2	1	1	-1	0,33	0,33	-1	0,2	1	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3
3	1	-1	1	0,33	0,33	-1	0,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
4	1	1	1	0,33	0,33	1	0,4	0,5	1,8	1,8	1,8	1,8	1,6
5	1	0	0	-0,67	-0,67	0	0,4	1	0,5	0,3	0,2	0,3	0,2
6	1	1	0	0,33	-0,67	0	0,4	1,5	0,4	0,5	0,7	0,5	0,8
7	1	-1	0	0,33	-0,67	0	0,6	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
8	1	0	1	-0,67	0,33	0	0,6	1	0,7	0,5	0,5	0,6	0,7
9	1	0	-1	-0,67	0,33	0	0,6	1,5	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2

Согласно принятому плану эксперимента всего было проведено $N = N_n + 2n + 1 = 9$ опытов, где N_n – число опытов в ядре плана, n – число факторов. Каждый опыт повторяли трижды ($k = 3$) в рандомизированном порядке для исключения системных ошибок.

Обоснованный выбор параметров, влияющих на процесс, а также интервалов их варьирования является залогом успешно проведенной работы. При этом необходимо учитывать, что при уменьшенном шаге варьирования переменных величины некоторых коэффициентов уравнения могут оказаться незначимыми, т.е. соизмеримыми с ошибками измерений.

Математическое описание рассматриваемого процесса предлагалось искать в виде уравнения регрессии, которое определяет зависимость изучаемого процесса от v и P и представлено в виде полинома второго порядка:

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

Исходные данные в виде натурального масштаба представлены в табл. 3.

На основании полученных экспериментальных данных рассчитывали среднее значение функции отклика $\overline{y_j}$:

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

Дисперсию воспроизводимости:

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

и дисперсии параллельных опытов S_j^2 :

$$S_{bi}^2 = \frac{1}{6} S_b^2; \quad S_{bij}^2 = \frac{1}{4} S_b^2; \quad S_{bii}^2 = \frac{1}{2} S_b^2; \quad S_{b'0}^2 = \frac{1}{9} S_b^2;$$

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

Проверку однородности полученных дисперсий параллельных опытов проводили по критерию Кохрена:

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

Расчетные значения сравнивали с табличными для степени свободы $f_1 = k - 1 = 2$ и $N = 9$, при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Для полученных дисперсий параллельных опытов $G_p = 0,185$, что существенно меньше $G_{табл.} = 0,478$. Следовательно, дисперсии параллельных опытов однородны.

Ошибка эксперимента рассчитывалась по формуле:

$$S_b = \sqrt{S_b^2}.$$

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

$$b_i = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^N x_i \bar{y}_i, \quad b_{ij} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N x_{ij} \bar{y}_i, \quad b_{ii} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (x_i')^2 \bar{y}_i, \quad b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_0 \bar{y}_i - \frac{2}{3} (b_{11} + b_{22})$$

После расчета всех коэффициентов уравнение принимает вид:

$$y = 0,23 + 0,38x_1 + 0,28x_2 + 0,36 x_1x_2 + 0,15x_1x_1 + 0,21 x_2x_2 \quad (1)$$

Проверку статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии $b_0, b_1, b_2, b_{1,2}, b_{11}, b_{22}$ оценивали на основе вычисления доверительных интервалов с учетом дисперсии, характеризующей ошибки определения коэффициентов уравнения. Сам же доверительный интервал рассчитывали по критерию Стьюдента, выбранному согласно принятым степеням свободы (f_1, f_2) и уровню значимости (0,95) [9]. Для ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента ошибки коэффициентов определяются:

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

Доверительный интервал Δb_i :

$$\Delta b_i = t_{kp} \cdot S_{bi}.$$

Критическое значение t_{kp} выбирали для числа степеней свободы $N(n-1)=18$ и для принятого уровня значимости 0,95. Принято считать, что коэффициент

регрессии значим, если выполняется условие:

$$t_{кр} < t.$$

Коэффициенты уравнения (1), кроме b_{11} , являются статически значимыми, следовательно, уравнение описывающее исследуемый процесс примет вид:

$$y = 0,23 + 0,38x_1 + 0,28x_2 + 0,36 x_1x_2 + 0,21 x_2x_2$$

Полученное уравнение проверяли на адекватность. Для этого оценили отклонения значений параметра оптимизации y_j^p , рассчитанных по уравнению (1) от экспериментальных $\overline{y_j}$ для каждого из опытов осуществляемого эксперимента, что позволило определить дисперсию адекватности для равного числа параллельных опытов по формуле:

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

где B – число значимых коэффициентов уравнения. С ней также связано число степеней свободы $f_{ад} = N - B = 4$.

Расчетные значения параметра оптимизации представлены в табл. 3.

Для определения адекватности математического описания (1) после расчета коэффициентов регрессии проверяли степень соответствия выбранной модели теоретической форме связи между исследуемыми входными и выходными параметрами. Для этой цели использовали критерий Фишера (F_p) [9], который представляет собой отношение дисперсии адекватности $S_{ад}^2$ к дисперсии опыта S_b^2 (см. табл.4) и вычисляется по формуле:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_b^2}$$

Таблица 4

Расчетные значения для оценки адекватности уравнений по критерию Фишера

Дисперсия воспроизводимости	Ошибка эксперимента	Коэф. регрессии						Дисперсия адекватности
		b_0	b_1	b_2	$b_{1,2}$	b_{11}	b_{22}	
1,446	1,2	0,23	0,38	0,28	0,36	0,21	0,36	3,176

Т. к. при уровне значимости 0,95 и степенях свободы $f_{ад} = 3$ и $f_2 = 16$ для рассматриваемого уравнения $F_p = 2,197$, что меньше табличного $F_{табл.} = 3,16$, то оно является адекватным.

Применение теории планирования эксперимента позволило свести к минимуму число опытов, необходимое для расчета коэффициентов уравнения регрессии, за счет получения адекватной модели, описывающей процесс трения пен-тапласта, армированного терлоном.

Полученная математическая модель, для наглядности, представлена в виде поверхности отклика. В нашем случае, она иллюстрируется плоскостью в трехмерном пространстве: рис. 1.

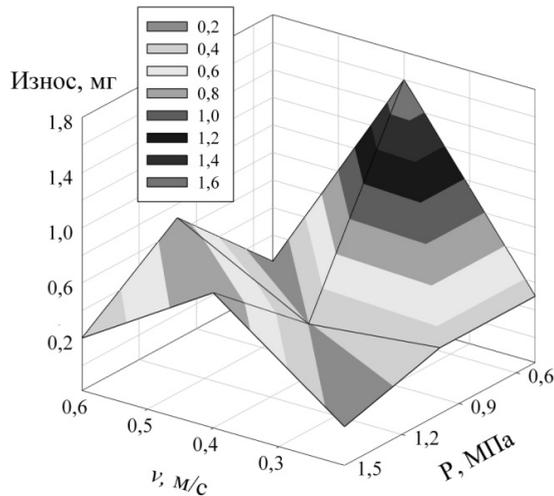


Рис. 1. Зависимость износа пентапласта, армированного терлоном от скорости истирания (v) и нагрузки (P).

Выводы. В ходе планирования математического эксперимента было установлено, что режимы трения значительно влияют на износостойкость пентапласта, армированного терлоном. Композиция характеризуется наименьшим износом при скорости – 1,5 м/с и нагрузке – 0,2 МПа.

Результатом ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента является уравнение: $y = 0,23 + 0,38 x_1 + 0,28 x_2 + 0,36 x_1 x_2 + 0,21 x_2 x_2$, которое адекватно описывает характер износа композиции в исследуемом диапазоне.

Список литературы

1. Костецкий Б. И. Трение и износ деталей машин / Б. И. Костецкий // Труды I научно-техн. конференции. [КИГВФ]. – М., 1956.
2. Бурия А.И. Исследование износостойких материалов на основе пентапласта, армированного химическими волокнами / А.И. Бурия, И.С. Раздольская, А.В. Захаров, С.Б. Лебедь // Химическая промышленность. Серия Производство и переработка пластмасс и сенергетических смол. – М.: НИИТЭХИМ. – 1982. – реф. № 569, Вып. 9 (192). – С. 10 – 11.
3. Бурия А.И. Армирование пластика из фенилона термостойкими волокнами // А.И. Бурия, Т.С. Соколова, З.Г. Оприц // Химические волокна. – М.: Химия. – 1977. – № 3. – С. 23 – 24.
4. Беркович И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский [под ред. Д.Г. Громаковского]. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2000. – 268 с.
5. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: [Монография] / Ильдар Дугласович Ибатуллин. – Самара: Самар.гос.техн. ун-т, 2008. – 387 с.: ил. ISBN - 978-5-7964-1211-4.
6. Ибатуллин И.Д. Новые методы и приборы для экспрессной оценки энергетических параметров усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: диссертация на соискание ученой степени доктора физ. – мат. наук: 01.04.01 / Ибатуллин Ильдар Дугласович. – Тольятти, 2010. – 387 с.
7. Теория механизмов и машин: [учеб. для втузов] / [К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов и др.]; [под ред. К.В. Фролова]. – М.: Высш. шк., 1987. – 496 с.: ил.

9. Пат. № 20116 Україна, МКИ С08L77/00. Полімерна композиція / Буря О.І., Голов'ятинська В.В., Арламова Н.Т. – u 200607263; заявл. 30.06. 06; опубл. 15.01. 07. Бюл. №1.

8. Спиридонов А.А., Планирование эксперимента / А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев // Свердловск: УПИ им. С.М.Кирова., 1975. – 149 с.

Статья поступила в редакцию 06.10.2015

О. І. БУРЯ, К. А. ЄРЬОМІНА, Є.В. МАМЧЕНКО, А.С. БЕДІН

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕРОБКИ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПЕНТАПЛАСТУ, АРМОВАНОГО ТЕРЛОНОМ

Методом планування експерименту вивчено вплив швидкості стирання і навантаження на зносостійкість пентапласту, армованого волокном терлон. Знайдено рівняння адекватно описує зносостійкість композиції у варійованому інтервалі досліджуваних змінних.

Ключові слова: пентапласт, терлон, зносостійкість, режими тертя, планування експерименту, рівняння регресії.

A. I. BURYA, Ye. A. YERIOMINA, E. V. MAMCHENKO, A. S. BEDIN

RESEARCH OF INFLUENCE OF PROCESSING PARAMETERS ON THE WEAR

The influence of speed velocity and load of wear resistant of the pentaplast reinforced by fiber terlon studied the method of experiment planning. The equation which is adequately describing wear resistance of composition in the varied interval of the studied variables is found.

Keywords: pentaplast, terlon, wear resistant, friction modes, planning of experiment, regression equation.

Буря Александр Иванович – профессор, канд. техн. наук, профессор кафедры Физика конденсированного состояния, Днепродзержинский государственный технический университет, Днепродзержинск, Днепростроевская, 2.

Єрєміна Катерина Андрєєвна – младший научный сотрудник, аспирант, Днепродзержинский государственный технический университет, Днепродзержинск, Днепростроевская, 2, 51918

Мамченко Елена Владимировна – технолог Днепропетровского завода полимерных материалов.

Бедин Андрей Степанович – старший преподаватель кафедры физики и материаловедства Днепропетровского государственного аграрно-экономического университета.