

УДК 678.6 : 677.5

О.П. Чигвинцева, И.В. Рула*Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет***ИЗУЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ФЕНИЛОНА**

Проведен сравнительный анализ трибологических свойств ароматического полиамида фенилон С2 и углепластика на его основе, содержащего 15 мас. % углеродного волокна марки углен. Установлено, что армирование фенилона существенно снижает коэффициент трения, повышает износостойкость и критерий работоспособности полимерного материала. Изучение влияния режимов эксплуатации на основные трибологические свойства углепластика показало, что он имеет незначительный коэффициент трения (0,23-0,08), минимальную интенсивность линейного изнашивания ($0,03-0,04 \cdot 10^{-9}$) и критерий работоспособности PV не более 1,6 МПа · м/с, что позволяет рекомендовать его к использованию в качестве антифрикционного материала узлов трения машин и механизмов.

Ключевые слова: ароматический полиамид, углеродное волокно, углепластик, коэффициент трения, интенсивность линейного изнашивания, критерий работоспособности, антифрикционный материал.

Рис. 3, Табл. 3, Лит. 10.

О.П. Чигвинцева, И.В. Рула**ВИВЧЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВУГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВІ ФЕНІЛОНУ**

Проведений порівняльний аналіз трибологічних властивостей ароматичного поліаміду фенілон С2 і вуглепластика на його основі, що містить 15 мас. % вуглецевого волокна марки углен. Встановлено, що армування фенілону суттєво знижує коефіцієнт тертя, підвищує зносостійкість та критерій працездатності полімерного матеріалу. Вивчення впливу режимів експлуатації на основні трибологічні властивості вуглепластика показало, що він має незначний коефіцієнт тертя (0,23-0,08), мінімальну інтенсивність лінійного зношування ($0,03-0,04 \cdot 10^{-9}$) та критерій працездатності PV не більше 1,6 МПа · м/с, що дозволяє рекомендувати його до застосування як антифрикційний матеріал вузлів тертя машин та механізмів.

Ключові слова: ароматичний поліамід, вуглецеве волокно, вуглепластик, коефіцієнт тертя, інтенсивність лінійного зношування, критерій працездатності, антифрикційний матеріал.

O.P. Chigvintseva, I.V. Rula**STUDY OF TRIBOLOGY PROPERTIES CARBON PLASTIC ON BASIS OF PHENILON**

The comparative analysis of tribology properties of aromatic polyamide of phenilon C2 and carbon plastic on his basis, containing 15 mass. % carbon fibre of brand of ugen is conducted. It is set that reinforcement of phenilon substantially reduces the coefficient of friction and promotes wearproofness and criterion of capacity of polymeric material. Study of influence of the modes of exploitation on basic tribology properties carbon plastic showed that he had insignificant coefficient of friction (0,23-0,08), minimum intensity of linear wear ($0,03-0,04 \cdot 10^{-9}$) and criterion of capacity of PV no more than 1,6 MPa · m/s, that allows to recommend him to using as antifriction material of knots of friction of machines and mechanisms.

Keywords: aromatic polyamide, carbon fibre, carbon plastic, coefficient of friction, intensity of linear wear, criterion of capacity, antifriction material.

Постановка проблеми. Увеличение срока службы полимерных деталей машин и механизмов, подверженным интенсивному изнашиванию, является одной из наиболее важных задач современного машиностроения. Известно, что порядка 80-90 % потери работоспособности изделий подвижных сочленений происходит вследствие износа их узлов и деталей [1]. При этом затраты на ремонт, техническое обслуживание и восстановление изношенных деталей машин в современных условиях, характеризующихся ужесточением режимов эксплуатации, значительно возрастают [2].

Учитывая то, что физико-химические явления, которые развиваются в зоне контакта узла трения, отличаются значительной сложностью [1], изучение механизмов и основных закономерностей процессов трения и износа изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), имеет важное научное и прикладное значение.

Цель работы. Учитывая вышеизложенное, с целью создания ПКМ антифрикционного назначения с повышенной износостойкостью ароматический полиамид фенилон С2 (ТУ6-05-226-72) армировали низко модульным углеродным волокном углен-9 в количестве 15 мас. %. Композиции готовились методом сухого смешения во вращающемся электромагнитном поле, а перерабатывались в блочные изделия методом компрессионного прессования.

Материалы и методика исследований. Ароматический полиамид фенилон С2 относится к числу термопластичных полимеров, сохраняющих свою работоспособность до температуры 260°C. Он представляет собой линейный гетероцепной сополимер, содержащий в главной цепи макромолекулы амидную группу $-NHCO-$, соединенную с обеих сторон фенильными фрагментами [3]:

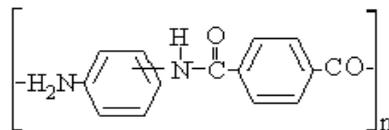


Таблица 1.

Свойства фенилона С-2 (ТУ6-05-226-72)

Внешний вид	Насыпная плотность, г/см ³	Влажность, %	Удельная вязкость 0,5%-го раствора в ДМФА	Температура стеклования, К
мелкодисперсный белый порошок	0,33	0,40	1,2	553

При выборе углеродного волокна (УВ) учитывалось то, что массовое применение высокопрочных высокомодульных УВ весьма ограничено вследствие их высокой стоимости. Поэтому для армирования фенилона С-2 было выбрано анизотропное низкомодульное УВ широкого назначения марки Углен-9, основные технические характеристики которого представлены в таблице 2 [4].

Таблица 2.

Свойства волокна Углен-9 (ТУ 6-06-и-87-81)

Диаметр, мкм	Содержание углерода, вес. %	Прочность элементарного волокна, МПа	Прочность при разрыве, МПа	Модуль упругости $\times 10^{-3}$, МПа
7-9	90	350	500	15

Изучение триботехнических характеристик фенилона С2 и углепластика (УП) на его основе производилось в условиях трения без смазки на дисковой машине трения [5] при нагрузках 0,5-0,8 МПа и скоростях скольжения 1, 1,5 и 2 м/с, путь трения составлял 1000 м. В качестве контртела использовался диск, изготовленный из стали 45 (ГОСТ 1050-74), термообработанной до твердости 45-48 HRC, с шероховатостью поверхности $R_a = 0,16-0,32$ мкм.

Коэффициент трения f определялся по формуле:

$$f = \frac{(F_1 + F_2)}{N} \quad (1)$$

где N – нормальная нагрузка на образец; F_1 – сила трения испытуемого образца; F_2 – потери, возникающие при повороте рычага на остриях в горизонтальной плоскости.

Интенсивность линейного изнашивания I_h рассчитывалась согласно соотношению:

$$I_h = \frac{\lambda}{\rho_T} \cdot \frac{dG}{(A_a \cdot dL_T)} \quad (2)$$

где G – величина весового износа; L_T – путь трения, м; A_a – номинальная площадь контакта; ρ_T – плотность исследуемого образца.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты проведенных исследований процесса трения фенилона С2 (табл. 3) свидетельствуют о том, что с повышением удельной нагрузки коэффициент трения связующего независимо от скорости скольжения снижался. Причем, если при минимальной скорости скольжения ($v = 1$ м/с) фенилон С2 стабильно работал во всем нагрузочном режиме и его коэффициент трения снижался в среднем на 30 %, то при $v = 1,5$ м/с в условиях максимальной нагрузки ($P = 0,8$ МПа) материал интенсивно изнашивался, а при $v = 2$ м/с образец полностью терял работоспособность и определить коэффициент трения не удалось.

Таблиця 3.

Влияние режимов эксплуатации на коэффициент трения и интенсивность линейного изнашивания фенилона С2

Скорость скольжения, м/с	Удельная нагрузка, МПа		
	0,50	0,65	0,80
Коэффициент трения			
1	0,63	0,45	0,43
1,5	0,38	0,26	–
Интенсивность линейного изнашивания, $I_l \times 10^{-9}$			
1	1,95	6,5	9,9
1,5	9,3	–	–

Обращает на себя внимание тот факт, что интенсивность линейного изнашивания фенилона с ужесточении нагрузочного режима снижалась более, чем в 5 раз [8]. Изучение поверхности контртела при трении связующего показало на наличие на ней пленки переноса, образующейся из продуктов трибодеструкции фенилона вследствие усталостного механизма разрушения пластика. В процессе трения происходило многократное деформирование полимера в отдельных пятнах фактического контакта, которое привело к разрушению и последующему отделению материала [9]. Кроме того, образование указанной поверхностной пленки можно объяснить тем, что в результате повышения температуры в зоне контакта (от 334 до 351 К) возросли адгезионные силы между полимерным образцом и стальным диском. В определенный момент силы внешнего трения стали превышать силы внутреннего трения, верхние слои полимера приобрели высокую подвижность по всей поверхности трения и происходило их намазывание на контртело [6], что, в конечном итоге, привело к резкому росту интенсивности линейного изнашивания при $P = 0,65, 0,8$ МПа и $v = 2$ м/с.

В ходе триботехнических исследований установлено, что во всем диапазоне нагрузок УП имел более низкий коэффициент трения по сравнению с полимерным связующим. Максимальное падение коэффициента трения УП (в 2,6-2,9 раз) наблюдалось при $v = 1$ м/с и $P = 0,65$ МПа (рис. 1), при $v = 1,5$ м/с данный показатель был на 34-46% ниже, чем у фенилона, а при $v = 2$ м/с

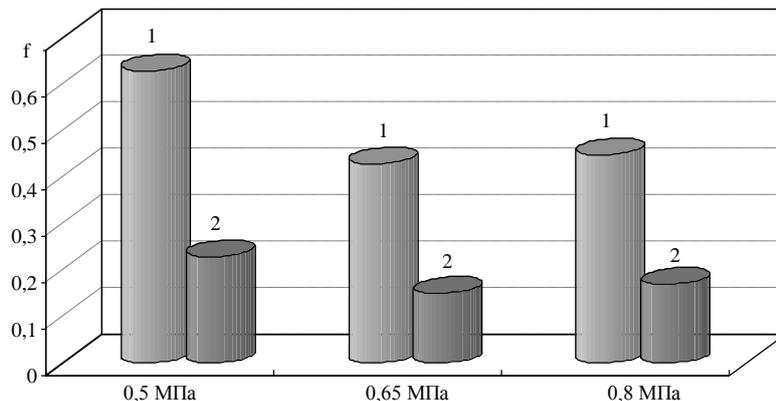


Рис. 1. - Зависимость коэффициента трения фенилона С2 (1) и углеродистого пластика на его основе (2) от удельного давления при испытаниях в условиях скорости скольжения 1 м/с

УП имел минимальный коэффициент трения (0,23-0,08), который снижался при повышении удельной нагрузки достигая минимального значения при $P = 0,8$ МПа (рис. 2). Образец из фенилона при $v = 2$ м/с полностью потерял свою работоспособность и коэффициент трения определить не удалось [7]. Указанный факт объясняется тем, что при трении в условиях высокой скорости скольжения происходил значительный разогрев поверхности трения связующего, обусловленный невысокой его теплопроводностью (средний коэффициент теплопроводности фенилона С2 составлял 0,32, а УП – 0,46 Вт/м · К). Таким образом, высокая температура, которая развивалась в зоне контакта полимерный образец – контртело (более 350 К), не позволила

обеспечить хороший теплоотвод из зоны трения, вследствие чего произошёл катастрофический износ полимера и выход его со строя.

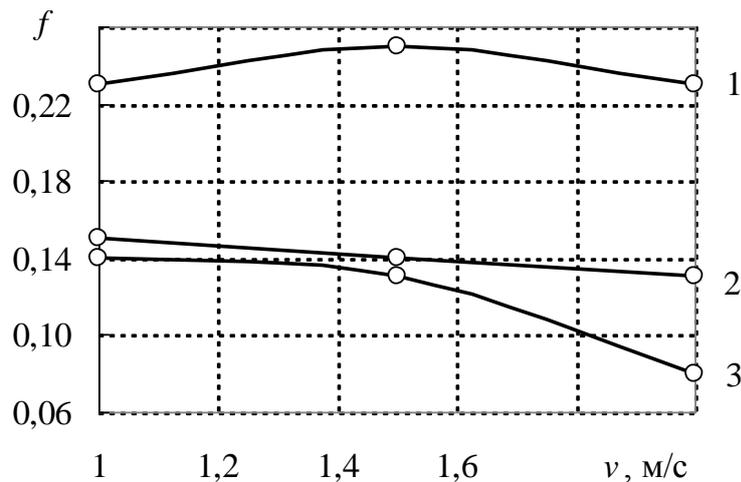


Рис. 2.- Зависимость коэффициента трения углепластика на основе фенилона С2 от скорости скольжения при трении в условиях удельных нагрузок: 0,5 (1), 0,65 (2) и 0,8 (3) МПа

Интенсивность линейного изнашивания УП находилась в пределах $0,03-0,04 \cdot 10^{-9}$, в то время как для образцов связующего I_h возрастала от $1,95$ до $9,9 \cdot 10^{-7}$ при $v = 1,0$ м/с, а при $v = 1,5-2,0$ м/с связующее катастрофически изнашивалось. Минимальную интенсивность линейного изнашивания имели образцы УП, испытанные при $P = 0,65$ МПа и $v = 1,0$ м/с (рис. 3). В целом установлено, что с увеличением скорости скольжения во всем исследованном интервале удельных нагрузок интенсивность линейного изнашивания УП возрастала, причем наиболее ярко проявлялась данная тенденция при $P = 0,5$ МПа.

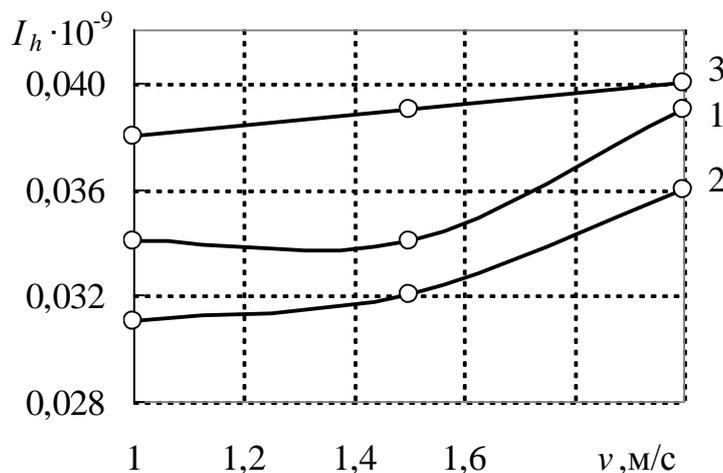


Рис. 3.- Зависимость интенсивности линейного изнашивания углепластика на основе фенилона С2 от скорости скольжения при трении в условиях удельных нагрузок: 0,5 (1), 0,65 (2) и 0,8 (3) МПа

Основной характеристикой, определяющей граничные условия эксплуатации изделий, работающих в условиях сухого трения, является фактор PV (произведение удельной нагрузки на скорость скольжения). Чем выше значение критерия PV антифрикционного материала, тем предпочтительнее его использование даже в том случае, если стоимость этого материала превосходит стоимость других антифрикционных материалов [10]. В результате проведенных триботехнических испытаний установлено, что изделия из УП имеют критерий $PV \leq 1,6$ МПа · м/с, в то время как для связующего он не превышал $1,0$ МПа · м/с.

Выводы. Таким образом, данные триботехнических исследований свидетельствуют о том, что армирование полиамидного связующего волокном марки углен, позволяет получить износостойкий материал антифрикционного назначения. При испытаниях в условиях наиболее

жестких режимов эксплуатации ($P = 0,8$ МПа, $v = 2$ м/с) УП на основе фенилона С2 и 15 мас. % волокна углен, имел низкий коэффициент трения (0,23-0,08), минимальные значения интенсивности линейного изнашивания ($0,03-0,04 \cdot 10^{-9}$) и более высокий по сравнению со связующим критерий работоспособности $PV (\leq 1,6$ МПа \cdot м/с). Разработанный УП можно рекомендовать к использованию в качестве антифрикционного материала узлов трения машин и механизмов.

1. Энциклопедия техники // <http://enciklopediya-tehniki.ru/tehnologiya-dobychi-gaza-i-nefti/trenie-iznos-i-smazka.html>.
2. Износостойкость конструкционных материалов: учеб. пособие / Л.И. Куксенова, С. А. Герасимов, В. Г. Лаптева. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 237 с.
3. Соколов Л.Б., Герасимов В.Д., Савинов В.Д., Беяков В.К. Термостойкие ароматические полиамиды. – М.: "Химия", 1975. – 256 с.
4. Углеродные волокнистые материалы / А.А. Конкин, М.Т. Азарова, Н.С. Волкова и др. // Химические волокна. – 1977. – № 3. – С. 65-66.
5. Трохимович А.Н., Приходько О.Г., Фомичев И.А. Машина для изучения свойств полимерных материалов // Машиностроитель. – № 3. – 1970. – С. 43-45.
6. Билик Ш.М. Пары трения металл – пластмасса в машинах и механизмах. М.: Машиностроение, 1965. – 312 с.
7. Чигвинцева О.П., Рула И.В. Исследование процессов трения и изнашивания углепластика на основе ароматического полиамида // Матеріали I Всеукраїнської наукової конференції "Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів", 10 квітня 2017, Дніпро, С. 29-31.
8. Чигвинцева О.П., Рула И.В., Киприч В.В. Изучение триботехнических характеристик углепластика на основе фенилона // Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених та студентів "Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи", 28-29 жовтня 2016, Луцьк, С. 134-136.
9. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. Ленинград: Изд-во "Химия", 1972, 240 с.
10. Обзорная информация "Композиционные материалы на основе углеродных волокон и полимерной матрицы", Серия: Промышленность химических волокон, Москва: НииТэхим, 1979, С. 55.

Рецензенты:

А.Д. Деркач, к.т.н., доцент, зав. кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка Днепропетровского государственного аграрно-экономического университета

В.В. Аулин, профессор кафедры эксплуатации и ремонта машин Кировоградского Национального технического университета

Стаття надійшла до редакції 19.04.2017