

УДК: 678:539.32; 531.43

О.О. Набережна, О.І. Буря*Дніпровський державний технічний університет***ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОРГАНІЧНОГО ТА ВУГЛЕЦЕВОГО ВОЛОКНА НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГІБРИДНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ АРОМАТИЧНОГО ПОЛІАМІДУ**

В статті розглядаються нові конструкційні полімерні композиційні матеріали на основі ароматичного поліаміду фенілон та їх експлуатаційні властивості. Досліджувався вплив волокнистого наповнювача на фізико-механічні та трибологічні властивості гібридних композитів. Різна хімічна природа волокнистого наповнювача суттєво впливає на досліджувані характеристики вихідного пластику, а саме модуль Юнга, межа текучості, перевершують вихідний фенілон в 1,4 і 1,45 рази відповідно, на порядок вища зносостійкість і в 2 рази нижчий коефіцієнт тертя. Проведені випробування отриманих композитів в умовах натурних експериментальних умовах в якості підшипників ковзання в опорних вузлах шнекової сушарки, показали позитивний результат.

Ключові слова: полімерні волокнисті композити, фенілон, гібриди, міцнісні та триботехнічні показники

О.А. Набережная А.И. Буря*Днепровский государственный технический университет***ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО И УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ АРОМАТИЧЕСКОГО ПОЛИАМИДА**

В статье рассматриваются новые конструкционные полимерные композиционные материалы на основе ароматического полиамида фенилон и их эксплуатационные свойства. Исследовалось влияние волокнистого наполнителя на физико-механические и трибологические свойства гибридных композитов. Различная химическая природа волокнистого наполнителя существенно влияет на исследуемые характеристики исходного пластика, а именно: модуль Юнга, предел текучести, превосходят исходный фенилон в 1,4 и 1,45 раза соответственно, на порядок выше износостойкость и в 2 раза ниже коэффициент трения. Проведенные испытания полученных композитов в условиях натурных экспериментальных условий в качестве подшипников скольжения в опорных узлах шнековой сушилки, показали положительный результат.

Ключевые слова: полимерные волокнистые композиты, фенилон, гибриды, прочностные и триботехнические показатели

O.O. Naberezhna, O.I. Burya*Dniprovsk State Technical University***RESEARCH INFLUENCE OF ORGANIC AND CARBON FIBER ON THE PERFORMANCE OF HYBRID COMPOSITES BASED ON AROMATIC POLYAMIDE**

The article considers new structural polymeric composite materials based on aromatic polyamide of phenylon and their operational properties. The effect of fibrous filler on the physico-mechanical and tribological properties of hybrid composites was investigated. The different chemical nature of the fibrous filler significantly influences the characteristics of the original plastic, namely: Young's modulus, yield strength, 1.4 and 1.45 times higher than the original phenylon, respectively, an order of magnitude higher in wear resistance and 2 times lower in the coefficient of friction. The performed tests of the obtained composites under conditions of full-scale experimental conditions as sliding bearings in the support nodes of the screw dryer showed a positive result.

Key words: Polymeric fibrous composites, phenylon, hybrids, strength and tribotechnical indices

Постановка проблеми. На сьогоднішній день неможливо уявити розвиток сучасної техніки без композиційних матеріалів: вони у рівній мірі використовуються для потреб авіа- та космічної галузі, у електроніці й медицині. Особливе місце композити займають у машинобудуванні. Строк служби машин і безвідмовне функціонування у переважній більшості випадків визначаються довговічністю вузлів тертя, на відновлення яких витрачаються значні кошти. Інтенсивне підвищення навантажень і швидкостей, температури, ускладнення умов експлуатації рухливих з'єднань потребують від матеріалів, що використовуються, постійного підвищення їх експлуатаційного ресурсу [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наявність величезного числа конструкцій вузлів тертя і різноманіття умов їх застосування не дозволяють винайти універсальний матеріал, який здатний вирішити всі існуючі в машинобудуванні проблеми. Це призвело до необхідності створення композитів на основі самих різних матеріалів – металів, полімерів, силікатів, які оптимально поєднують в собі кращі властивості складових компонентів. До таких матеріалів відносять композиційні матеріали на полімерній основі, серед яких найбільш перспективними є волокнисті полімерні композити (ВПК). ВПК з високоміцними, високомодульними волокнами

являються конструкційними матеріалами, що відрізняються низькою густиною і високою питомою міцністю при розтягуванні (до 260 км). Армовані пластики, наприклад склопластики, найчастіше відрізняються великою жорсткістю, але руйнуються при незначному (~1%) відносному подовженні [3]. Одна з основних умов отримання ВПК з високими фізико-механічними властивостями являється забезпечення необхідної міцності адгезійного зв'язку на межі поділу фаз полімерна матриця – наповнювач, з мінімальними внутрішніми напруженнями. Тому особлива увага приділяється вибору в'язучого для ВПК, що забезпечить монолітність композиту і перерозподіл основних навантажень на волокна. Переважає більшість промислових пластмас за комплексом фізико-механічних показників ароматичний поліамід фенілон. При цьому матеріали на його основі володіють високими показниками міцності, пластичності, зносостійкості й стійкості до ударних навантажень [4]. Однак високі показники коефіцієнта тертя в режимі без змащування обмежують його експлуатаційний ресурс. Введення до складу фенілону наповнювачів твердих змазок (наприклад, фторопласту, графіту і інших) одночасно покращують антифрикційні властивості і знижують міцнісні показники [5-8].

Постановка задачі досліджень. Враховуючи вищесказане, метою даною роботи являлось вирішення задачі розробки ефективного наповнення фенілону дискретними високомодульними волокнами різної природи, з метою направленою регулювання його властивостей.

Об'єкти та методи дослідження. В якості в'язучого був обраний ароматичний поліамід фенілон С-1 (ТУ 6-05-221-101-71). Для армування використовували суміш дискретних волокон: органічного, марки Танлон (довжина 3 мм; модуль пружності при розтягуванні 7,45 ГПа, густина 1,42 г / см³) та вуглецевого, марки Торейка (довжина 3 мм, модуль пружності при розтягуванні 220 - 230 ГПа, густина 1,76-1,80 г / см³).

Приготування композиції певного складу (табл. 1) здійснювали методом сухого змішування в обертальному електромагнітному полі (0,12 Тл). Формування готових композицій у виробі циліндричної форми (10 x 15 мм) проводилася методом компресійного формування. Цей метод переробки ароматичного поліаміду є кращим, в силу того, що полімер, поміщений в завантажувальну камеру, відчуває в основному деформацію стиску, сильні зсувні деформації практично відсутні. Особлива увага також приділялася вибору і підтримці з високою точністю температур переробки.

Таблиця 1

Склад гібридної композиції [9]

Позначення складу	Вміст волокна, мас. %		Вміст полімерної матриці, мас. %	
К 1	-	-	-	100
К 2	4	5	Ароматичний поліамід фенілон С-1	91
К 3	5	7		88
К 4	5	15		80
К 5	15	5		80

Дослідження мікроструктури проводили за допомогою мікроскопа Біолам М на спеціально підготовлених зразках, при збільшенні 200. Густину зразків експериментально визначали згідно ГОСТ 15139-69. Визначення руйнівного напруження та межі текучості при стисненні, відносних деформацій при руйнуванні та межі текучості проводили відповідно ГОСТ 4651-78 на універсальній дослідній машині FP-100. Вивчення трибологічних властивостей гібридних матеріалів проводилися на дискової машині тертя в режимі сухого тертя за схемою «диск-пальчик» при питомому тиску $P = 0,6$ МПа і швидкості ковзання 1 м / с, шлях склав 1000 м.

Результати і аналіз досліджень. Поєднання компонентів різної природи (органічні та вуглецеві волокна) та здатність полімеру просочити їх являється досить важкою задачею, в силу відмінної жорсткості та густини волокон. Аналіз мікроструктури отриманих зразків, показав, що обраний спосіб змішування та формування виробів не порушує рівномірний розподіл як органічних так і вуглецевих волокон в полімерній матриці (рис. 1).

В теперішній час одним з ряду найважливіших завдань, є зниження маси конструкції, цього можна досягти замінюючи металеві деталі полімерними, так як вони мають значно нижчу густину, при цьому, нітрохи не поступаючись за механічними характеристиками. Було встановлено, що розроблені ВПК відрізняються низькою густиною (рис. 2), а саме: її значення змінюються в межах 1,34 - 1,39 г / см³, що майже в 7 і 6 разів нижче бронзи Бр О5Ц5С5 (найбільш широко використовується для виготовлення деталей в вузлах тертя) і сталі відповідно.

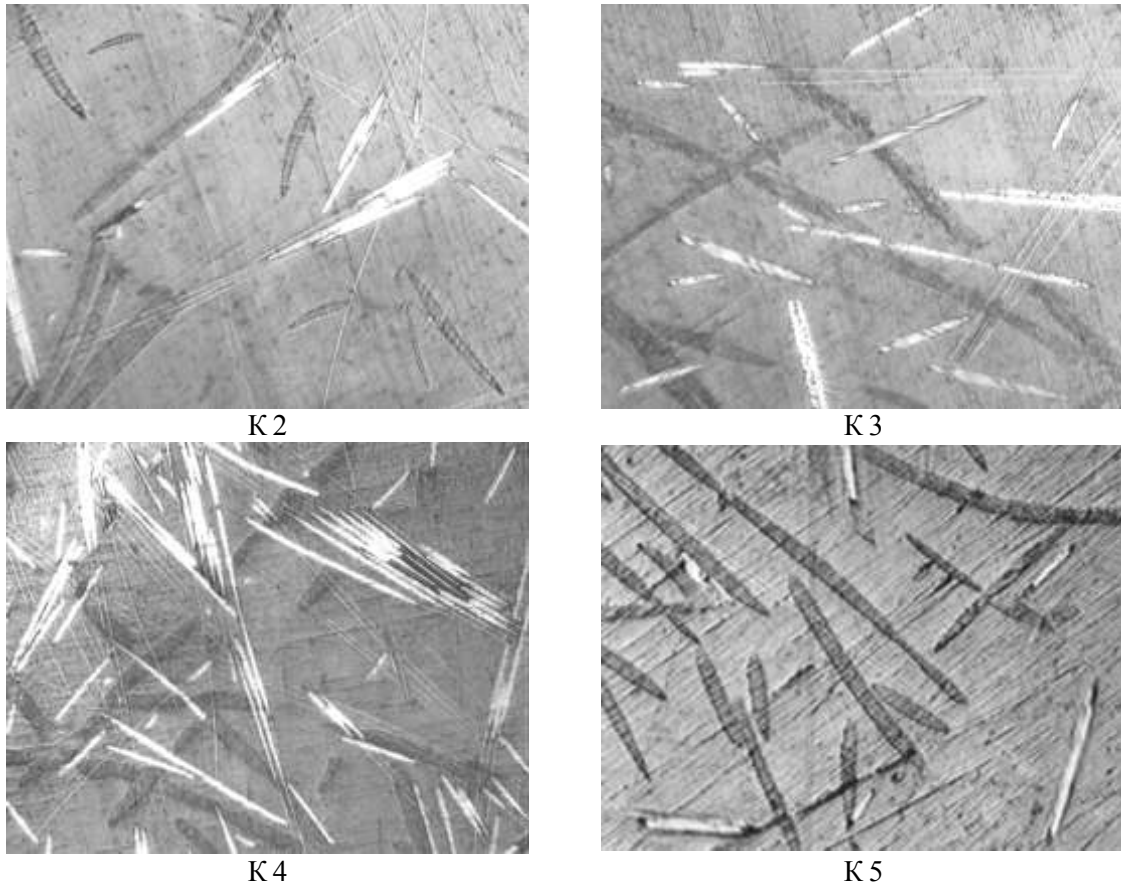


Рис. 1. Мікроструктура волокнистих гібридних композитів ($\times 200$)

Отриманні експериментально криві навантаження - деформація дали змогу оцінити характер деформаційних процесів, що протікають у вихідному матеріалі та гібридних композитах при випробуванні на стиснення (рис. 3).

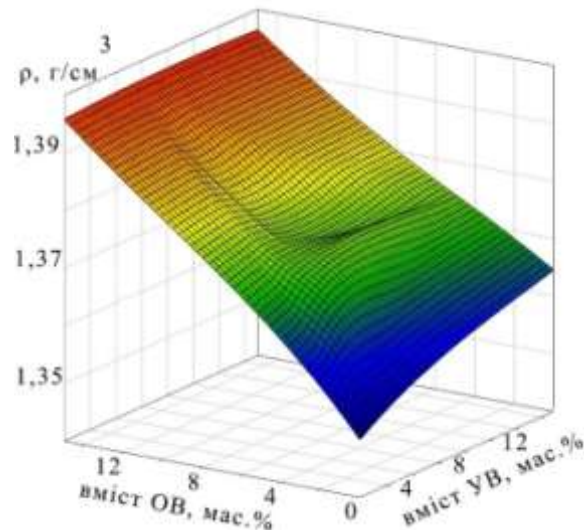


Рис. 2. Вплив вмісту наповнювача на густину гібридних композитів

Загальний вигляд кривих $\sigma - \epsilon$ властивий полімерним матеріалам, однак деформування гібридних композитів протікає за двома різними процесами. За класифікацією Херцберга їх відносяться до II та V типу, що описують пружну гомогенно-пластичну та пружну гетерогенно-пластичну поведінку матеріалів відповідно [10]. Оборотною природою деформації матеріалів характеризується прямолінійною ділянкою кривих для K1; K2; K5 до значень близьких до 200 МПа та кривих 3; 4 \approx 250 МПа (рис. 3), що говорить про більш пружні властивості гібридних композитів K3 і K4. Надалі хід кривих 2 та 4 описує параболічну ділянку, що характеризується

процесами гомогенної пластичної деформації. Слід відзначити, що крива 4 при значеннях напруження до 280 МПа продовжує опиратись росту пластичної деформації, максимальні значення опору інших гібридів та вихідного матеріалу коливаються в межах 230-260 і 200-210 МПа відповідно.

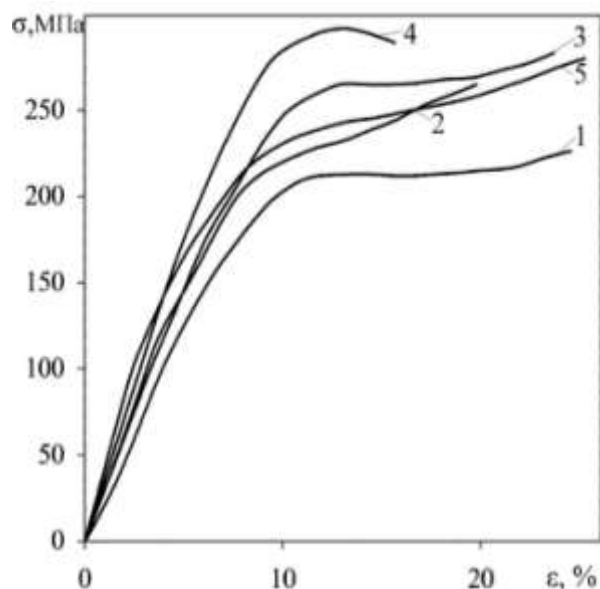


Рис. 3. Експериментальні криві навантаження - деформація фенолону (1) та гібридних композитів (2 - 5 : К2 – К5)

Криві V типу властиві для деяких кристалічних полімерів, тобто природа фенолону і гібридних композитів на кривих 1, 3 та 5 характеризується конкурентним розвитком двох різних процесів. З одного боку, пластичною течією з руйнуванням вихідної структури та утворенням зони течії, яка обумовлена стабілізацією значень навантаження (фенолону - 210 МПа, гібридів – 240 -260 МПа). З іншого – перебудовою структури (видозміною аморфних полімерних ланцюгів) в нову більш міцну, причому чим більша кількість ділянок переходить в нову структуру, тим вищим стає опір матеріалу деформаціям. Наслідком чого є деформаційне зміцнення і криві знову починають рости.

Слід відзначити, що поведінка протікання деформаційних процесів тісно пов'язана з концентрацією та природою волокна в композитах. З ростом органічної частки матеріалу в ВПК видозмінюються криві $\sigma - \epsilon$. Криві 2 та 4, що містять 4 - 5 мас.% органічного волокна танлон відповідно відносяться до II типу кривих деформації, а вихідний матеріал та гібрид з вмістом 15 мас.% ОВ - до V типу. Крива 3 займає майже посереднє значення на графіку $\sigma - \epsilon$ (рис. 3) та характеризується співвідношенням компонентів 5:7 ОВ до УВ відповідно. Характер видозміни зразків після проведення експерименту представлені на рис. 4.

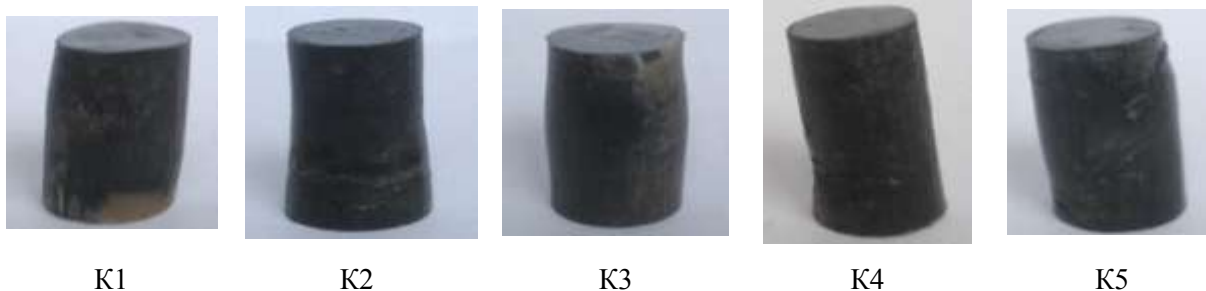


Рис. 4. Характер видозміни зразків фенолону та гібридних композитів після проведення експерименту на стиснення

На підставі отриманих експериментально кривих $\sigma - \epsilon$ були розраховані міцнісні характеристики гібридних композитів, значення яких дає змогу оцінити фізико-механічні властивості матеріалів в різних напрямках розвитку деформації під навантаженням.

Порівняно з фенілоном С-1 спостерігалось підвищення модулів пружності, зсуву та об'ємного 1,4; 1,9 та 1 рази відповідно, підвищення межі текучості на 45 %, коефіцієнт поперечної деформації коливався в межах 0,18 – 0,23 (табл. 2).

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості гібридних композитів

Показники	К1	К2	К3	К4	К5
Модуль Юнга (E), МПа	2500	3100	3000	3500	2700
Модуль зсуву (G или μ), МПа	1000	1950	1500	1960	1400
Модуль об'ємної пружності (K), МПа	1400	1280	1240	1470	1150
Коефіцієнт Пуассона (ν)	0,21	0,23	0,19	0,2	0,18
Межа текучості при стисненні (σ_T), МПа	204	228	265	297	242
Відносне подовження при стисненні (ϵ), %	12,8	11,7	14,2	13,2	16

Аналіз отриманих фізико-механічних властивостей показав, що природа наповнювача та концентрація його у в'язучому суттєво впливають на міцнісні характеристики. Характер та швидкість плинущої деформації в гібридних зразках різний, а значить і молекулярна структура відмінна. Найбільш сильною взаємодією молекул та більш орієнтованих новоутворень на межі поділу полімер – волокно характеризуються гібридні композити з 9 – 12 мас.% суміші волокна у співвідношенні ОВ до УВ – 4:5 та 5:7. При більшому вмісті армуючих компонентів у фенілоні фізико-механічні показники матеріалів знижуються.

Значна увага приділялась вивченню трибологічних властивостей отриманих матеріалів. При проведенні випробувань за визначенням триботехнічних характеристик, було встановлено, що інтенсивність зношування отриманих композицій на порядок нижча чим у вихідного фенілону, при одночасному зниженні коефіцієнта тертя на 50 - 60 % (табл. 3). Такий ефект досягався за рахунок, оригінального гібридного наповнювача - суміші органічного та вуглецевого волокон, яка виступала в ролі інгібітору, що гальмувала процес руйнування полімерного в'язучого при терті без змащування по сталевому диску, за рахунок конкуруючої адсорбції з волокнами - активаторами і утворенням на металевому контртілі поверхні захисних адсорбційних плівок.

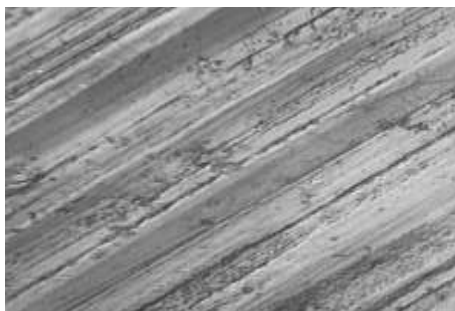
Таблиця 3

Трибологічні властивості гібридних композитів

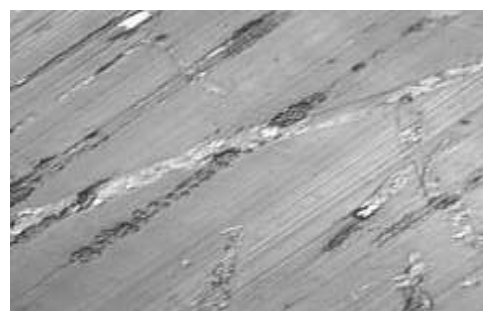
Показники	К 1	К 2	К 3	К 4	К 5
Коефіцієнт тертя	0,52	0,26	0,29	0,31	0,32
Інтенсивність лінійного зношування	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$2,43 \cdot 10^{-9}$	$1,36 \cdot 10^{-9}$	$1,94 \cdot 10^{-9}$	$3,9 \cdot 10^{-9}$

Введення волокнистого наповнювача в полімерну матрицю гібридних композитів забезпечило протікання втомлюваного процесу тертя з утворенням локальних мікроділянок пластично деформованих у напрямку ковзання. Дослідження мікроструктури ВПК поверхні тертя наглядно показало, характерний для ароматичних та аліфатичних поліамідів [11], псевдопружній механізм стирання, про що свідчить зменшення борозен і доріжок тертя, а поверхня тертя стає майже дзеркальною (рис. 5).

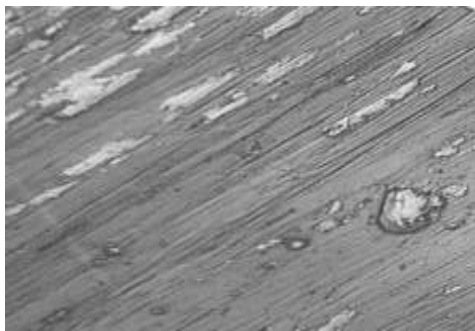
Позитивні результати досліджень дозволили перейти до використання розроблених гібридних композитів в натурних експериментальних умовах.



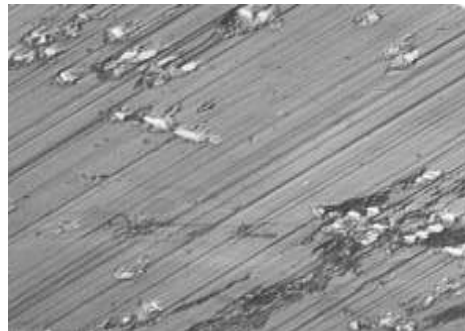
К1



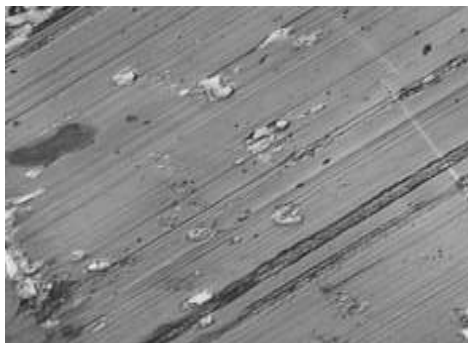
К2



К3



К 4



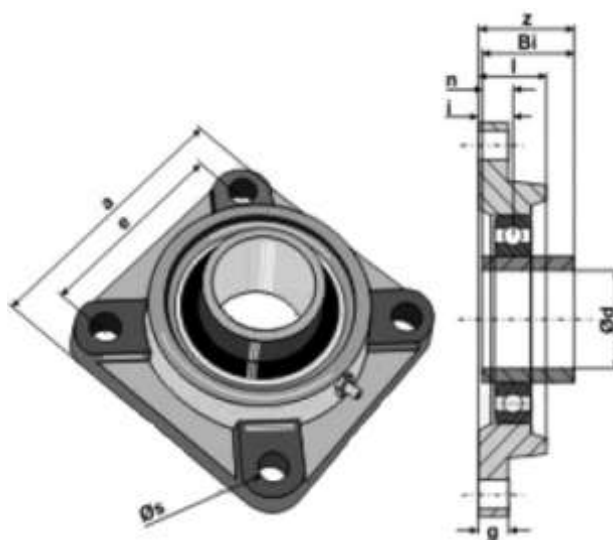
К5

Рис.5. Поверхня тертя полімерних гібридних композитів (x200)

Експериментальні підшипники ковзання, виготовлені з полімерного композиційного матеріалу на основі фенілону, армованого дискретними хімічними волокнами було встановлено на заміну серійним підшипникам кочення UCF 212 в опорних вузлах шнекової сушарки ШС-1 (рис. 6), в умови тертя без змащування, підвищеної запиленості та високих температур (473-503 К).



а



б

Рис. 6. Загальний вид сушарки ШС-1(а) та підшипника UCF 212 (б)

За результатами технічної експертизи, що проводились сумісно спеціалістами ДДТУ та ТОВ «САС ІНВЕСТ» протягом експлуатаційного періоду виявили, що підшипники ковзання, виготовлені з ВПК придатні для використання у опорних вузлах шнекової сушарки ШС-1, та потребують продовження експерименту для визначення ресурсу надійності та довговічності роботи вузла.

Висновки. Таким чином, розроблені та досліджені матеріали на основі термостійкого поліаміду фенілон, армованого різними за хімічною природою волокнами, володіючи відмінним поєднанням фізико- механічних і триботехнічних показників, а саме: модулем Юнга, межею текучості, що перевершують вихідний пластик в 1,4 і 1,45 рази відповідно, на порядок вищою зносостійкістю і в 2 рази нижчим коефіцієнтом тертя можуть застосовуватись в якості деталей конструкційного призначення і будуть мати до 7 разів нижчу масу

Список використаних джерел:

1. Белый В.А. Проблема создания композиционных материалов и управление их фрикционными свойствами // Трение и износ. — 1982 (3). - № 3. – С. 389—395.
2. Исследование трибологических свойств органопластиков на основе тканого армирующего наполнителя / Г.С. Кулагина [та ін.] // Труды ВИАМ. – 2016. - №11 (47). – С. 47 – 55.
3. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты / К.Е. Перепелкин. - М.: Изд-во Научные основы и технологии, 2009. - 658 с.
4. Функциональные наполнители для пластмасс / Под ред. Марино Ксантос, пер. с англ. под ред. В.Н. Кулезнева. - М.: Изд-во Научные основы и технологии, 2010. - 462 с.
5. Термостойкие ароматические полиамиды / Л.Б. Соколов, В.Д. Герасимов, В.М. Савинов, В.К. Беляков. - М.: Химия, 1975. - 256 с.
6. Burya A.I. properties and industrial application of hybride composites based on polyamide // Prace naukowe Katedry Budowy Maszyn, Seria: konferencje “Polymery I Kompozyty Konstrukcyjne”, 6-9.10.98. – vol.2. – P. 51 - 54.
7. Исследование термостойкости органопластиков на основе политетрафторэтилена, армированного волокном танлон / А.И. Буря [и др.] // Научный альманах. – 2015. - №10-3 (12). – С. 53 - 57.
8. Буря А.И. Трение и износ органопластиков на основе ароматического полиамида фенілон / А.И. Буря, Набережная О.А. // Трение и износ. - 2016. - Т. 37. № 3. - С. 335-339.
9. Пат. №113813 України, МПК (2017.01), C08J 5/16 (2006.01), C08G 77/00, C08K 7/02 (2006.01) Зносостійка полімерна композиція / Буря О.І., Набережна О.О., Томіна А.-М. В., Козоріз В. С.; заяв.28.03.2016; опубл. 10.03.2017 бюл. №5.
10. Херцберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р. В. Херцберг; Пер. с англ. А. М. Бернштейна; Под ред. М. Л. Бернштейна, С. П. Ефименко. - М.: Металлургия, 1989. - 575 с.
11. Погосян А.К. Трение и износ наполненных полимерных материалов- М.: Наука, 1977. – 140 с.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2017