

УДК 621.454

Кабат О. С. \*, Ситар В. І. \*, Єрмаченко Д. В. \*, Давидов С. О. \*\*, Геті К. В.\*\*

\* *Український державний хіміко-технологічний університет*

\*\* *Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара*

## **ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ КОСМІЧНОЇ ТА АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ**

Проведено аналіз полімерів та полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) на їх основі, які в залежності від полімерної основи, наповнювачів, модифікаторів та інших компонентів забезпечують необхідний рівень показників властивостей. Розроблено ПКМ на основі фенольного зв'язуючого і графіту. Встановлено вплив концентрації та марки наповнювача на триботехнічні властивості розроблених ПКМ. Представлено рекомендації щодо використання розроблених ПКМ в якості матеріалу для виготовлення деталей, що працюють у вузлах тертя машин і механізмів у космічній техніці, літакобудуванні та інших високотехнологічних галузях промисловості.

**Ключові слова:** *полімер, полімерний композиційний матеріал, концентрація, наповнювач, високотехнологічна галузь промисловості.*

Проведен анализ полимеров и полимерных композиционных материалов (ПКМ) на их основе, которые в зависимости от полимерной основы, наполнителей, модификаторов и других компонентов обеспечивают необходимый уровень показателей свойств. Разработан ПКМ на основе фенольного связующего и графита. Установлено влияние концентрации и марки наполнителя на триботехнические свойства разработанных ПКМ. Представлены рекомендации по использованию разработанных ПКМ в качестве материала для изготовления деталей, работающих в узлах трения машин и механизмов в космической технике, самолетостроении и других высокотехнологичных отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** *полимер, полимерный композиционный материал, концентрация, наполнитель, высокотехнологическая отрасль промышленности.*

The analysis of polymers and polymer composite materials (PCM) on their basis, which, depending on the polymer base, fillers, modifiers and other components, provide the necessary level of properties of properties. PCM is developed on the basis of phenolic binder and graphite. The influence of concentration and grade of filler on the tribotechnical properties of the PCM have been developed. Recommendations on the use of PCM developed as material for the manufacture of parts working at the nodes of friction machines and mechanisms in space technology, aircraft engineering and other high-tech industries are presented.

**Keywords:** *polymer, polymer composite material, concentration, filler, high-tech industry.*

**Вступ.** Сучасні космічна, авіаційна та машинобудівні галузі промисловості відчувають нестачу матеріалів триботехнічного призначення з яких виготовляють деталі машин і механізмів, здатні працювати при високих рівнях навантажень, швидкостей ковзання та температур у режимах тертя без змащування [1-3]. Ці матеріали повинні виготовлятися за дешевими технологіями з недефіцитної сировини, бути безпечними для людини та навколишнього середовища, мати високий рівень фізико-механічних та теплофізичних властивостей. Тому актуальним є їх створення з урахуванням усіх вищезазначених вимог.

Одним із таких матеріалів є полімери та полімерні композиційні матеріали (ПКМ) на їх основі, які в залежності від полімерної основи, наповнювачів, модифікаторів та інших компонентів здатні забезпечувати необхідний рівень показників властивостей. Так для створення матеріалів триботехнічного призначення з високим рівнем фізико-механічних та теплофізичних властивостей в якості полімерних основ використовують фторполімери, поліаміди, фенольні та епоксидні смоли та інш [4-6]. У вихідному вигляді вони практично не використовуються тому їх наповнюють та модифікують дисперсними, волокнистими наповнювачами, рідкими мастилами та інш. До найбільш розповсюджених наповнювачів відносяться графіт, дисульфід молібдену, нітрид бору, слюда, бентоніт, тальк, вуглецеві волокна, полісилоксанові рідини.

Одними з найбільш дешевих та недефіцитних полімерних матеріалів, які мають досить високий рівень фізико-механічних та теплофізичних властивостей є фенольні полімери [7]. Вони бувають резольного та новолачного типів. Більш технологічними при отриманні виробів триботехнічного призначення є фенольні полімери новолачного типу. Прес-порошки з яких, на відміну від резольних, можна використовувати у якості сировини для створення ПКМ та виробів з них впродовж декількох місяців без втрати їх рівня властивостей.

ПКМ на основі фенольних полімерів новолачного типу використовують в якості корпусних деталей, тіл обертання, підшипників ковзання і кочення у космічній, авіаційній та машинобудівній галузях промисловості[8].

**Об'єкти та методи досліджень.** В якості полімерної матриці було вибрано новолачне фенольне зв'язуюче, у вигляді прес-порошку марки СФП – 011Л (ТУ 2257-111-05015227-2006) виробництва ОАО “Уралхимпласт”. Яке являє собою суміш твердої феноло-формальдегідної смоли і уротропіну, отриману в процесі їх одночасного механічного подрібнення. За зовнішнім виглядом – це дрібнодисперсний порошок від білого до темно-коричневого кольору. Основні його характеристики приведені у таблиці 1.

Таблиця 1  
Характеристики прес-порошку СФП – 011Л

Найменування показника	Значення
Масова частка уротропіну, %	6 - 10
Рухливість розплаву, мм	40 - 90
Залишок на ситі з сіткою № 0,1 К, %, не більше	2,0

В якості наповнювачів були обрані графіти різних модифікацій наступних марок: графіт ГЛ-1(ГОСТ 5279-74) та С-1(ТУ У26.8-05394618-018-2003) виробництва ОАО "Мариупольский графитовый комбинат" та марки GRMC-2 виробництва "Glorious resources CO., Limited". Ці наповнювачі являють собою дрібнодисперсні порошки темно-сірого, близького до металевому кольору. Основні їх характеристики приведені у таблиці 2.

Таблиця 2  
Характеристики графітів марок ГЛ-1, С-1 та GRMC-2

Найменування показника	Марка графіту		
	ГЛ-1	С-1	GRMC – 2
Зольність, %, не більше	13	0,5	13
Вагова доля вологи, %, не більше	1,0	0,5	1,0
Масова доля залишку, %, не більше, на ситі с сіткою, №:			
016	40	не нормується	-
100	-	не нормується	20

**Методика приготування композитів.** Для проведення досліджень зразки отримували за наступною схемою: змішування полімеру з графітом; брикетування; гаряче пресування.

Суміщення полімеру з графітом відбувалося за допомогою операції змішування на лабораторній мішалці лопатевого типу. Отримані полімерні композиції брикетували до отримання суцільного препрегу із щільністю не менше 0,7 г/см<sup>3</sup>. Виготовлення зразків здійснювалося методом гарячого пресування у прес-формах з підігрівом при температурі 353 К і питомому тиску 25 МПа.

В даній роботі використовували форми для прямого пресування з комбінованим нагріванням від плит преса та боковим омічним нагрівачем. Її схематичне зображення приведено на рисунку 1.

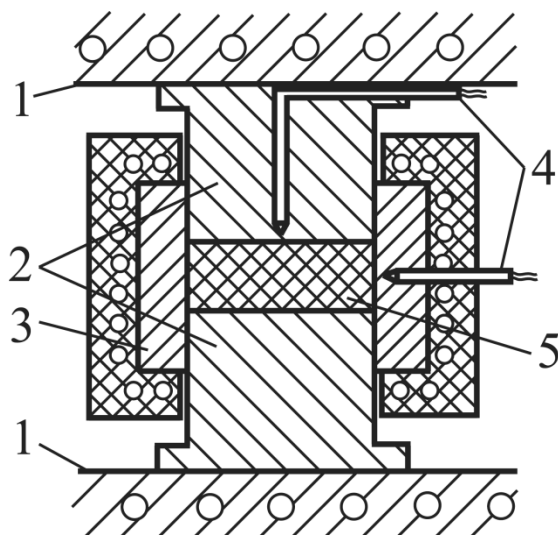


Рис.1. Схематичне зображення прес-форми з комбінованим нагріванням від плит преса та боковим омичним нагрівачем: 1 – нагрівальні плити преса; 2 – пуансон верхній та нижній; 3 – матриця; 4 – термопара; 5 – брикет, що переробляється

**Методи досліджень.** Мікрофотографії отримували за допомогою оптичного мікроскопу “МБР-1Е”, який оснащено цифровою камерою SCORPTEK DEM-130.

Щільність  $\rho$  композитів визначали відповідно до ISO 1183-1(method A. Immersion Method), використовуючи аналітичні ваги “ВЛР-200”. Напруження при стисканні при межі текучості  $\sigma_y$  та модуль пружності  $E$  визначали відповідно до ISO 604 на універсальній розривній машині “Heckert FP 100/1”. Твердість композитів  $H$  визначали відповідно до методу вдавлювання шарика за ISO 1183-1 на машині “2013 ТШСП”.

Коефіцієнт тертя та інтенсивність лінійного зношування при фрикційній взаємодії розроблених полімерних композиційних матеріалів із сталлю визначали на машині “2070 СМТ-1” при режимі тертя без змащування по схемі диск-колодочка. Сталевий зразок виготовляли із сталі 45 з шорсткістю поверхні  $Ra = 0,32$  мкм та твердістю 45-50 HRC.

**Результати досліджень.** Відповідно до попередніх досліджень [9,10] вміст дисперсних наповнювачів у ПКМ конструкційного та триботехнічного призначення не перевищує 30%. Тому для подальших досліджень були вибрані саме такі концентрації компонентів у ПКМ.

Вихідний фенольний прес-порошок та наповнювачі є дрібнодисперсними матеріалами, які суміщаються один з одним за допомогою операції змішування. Вибір правильної методики та обладнання для проведення цієї операції є досить важливим тому, що якість отриманого виробу залежить від рівномірності розподілення дисперсного наповнювача в об’ємі полімеру. Для змішування складових полімерної композиції використовували швидкохідну механічну мішалку зі складною формою лопатей, яка дозволяє інтенсивно та якісно проводити процес суміщення її вихідних компонентів. Безпосередньо процес

переміщення проводили у дві стадії. На першій стадії суміщення компонентів відбувалося впродовж 5 хвилин в сталому режимі роботи мішалки. На другій стадії впродовж 2 хвилин при режимі короткочасного її “ввімкнення-вимикнення”.

Рівномірність розподілення наповнювачів у полімерній матриці визначали за допомогою мікрофотографій поверхонь отриманих ПКМ, проводячи їх математичну оцінку за допомогою знаходження коефіцієнтів неоднорідності. Коефіцієнт неоднорідності ( $V_c$ ) ПКМ визначали за формулою:

$$V_c = \frac{100}{H} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - H)^2}{n - 1}},$$

де  $c_i$  – концентрація одного з компонентів;

$H$  – концентрація того ж компонента при ідеальному розподілі;

$n$  – кількість дослідів.

Вважається [11,12] що коефіцієнт неоднорідності двокомпонентних систем з високим рівнем рівномірності розподілення наповнювача у полімерній матриці лежить в інтервалі від 0 до 4, причому чим менші він має значення тим суміш більш однорідна.

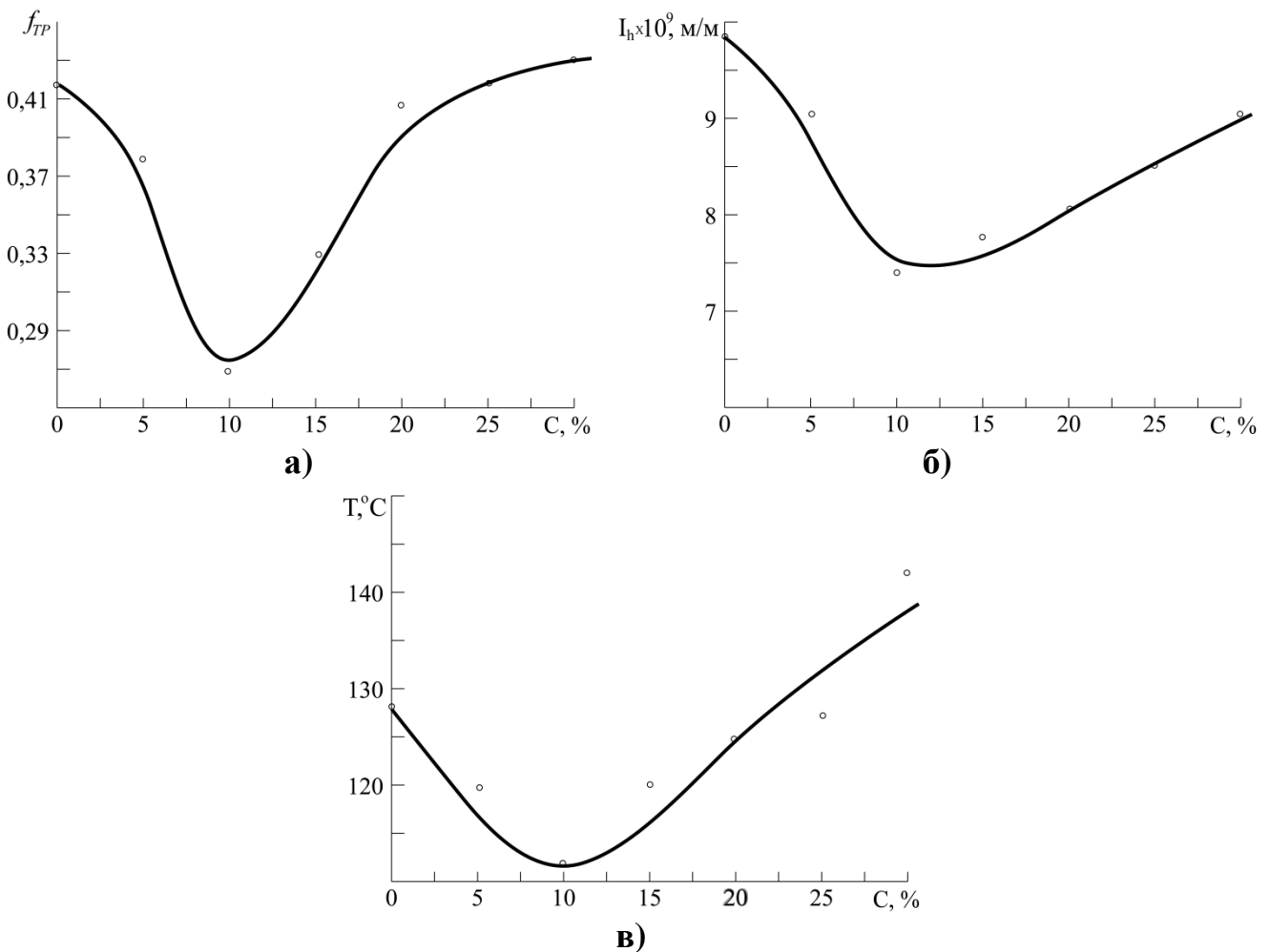
Результати оцінки рівномірності розподілення наповнювача у полімерній матриці за допомогою коефіцієнта неоднорідності приведені в таблиці 3

*Таблиця 3*  
Значення коефіцієнтів неоднорідності розроблених ПКМ

ПКМ	Концентрація наповнювача, ваг%	Коефіцієнт неоднорідності
Фенольна смола + графіт (ГЛ-1)	5	3,79
	10	3,78
	15	3,75
	20	3,99
	25	3,9
	30	3,86
Фенольна смола + графіт (ГС-1)	5	2,86
	10	2,98
	15	2,95
	20	3,2
	25	3,31
	30	3,28
Фенольна смола + графіт (GRMC-2)	5	3,10
	10	3,23
	15	3,67
	20	3,64
	25	3,78
	30	3,92

З отриманих результатів видно, що для всіх ПКМ, що досліджувалися, коефіцієнти неоднорідності не перевищували значення 3,99, що відповідає досить високому рівню рівномірності розподілення наповнювачів у полімерній матриці. Тобто методика та обладнання, що були використані для суміщення вихідних компонентів ПКМ дозволяють отримати досить однорідний якісний матеріал.

Для встановлення оптимального вмісту наповнювачів в об'ємі полімеру були проведені дослідження тертя та зношування розроблених ПКМ при їх фрикційній взаємодії із сталлю (рисунок 1).



**Рис. 2.** Концентраційні залежності (а) коефіцієнту тертя, (б) температури на поверхні тертя та (в) інтенсивності лінійного зношування ПКМ на основі фенольного зв'язуючого та графіту ГЛ-1

З результатів досліджень видно, що введення графіту призведе до покращення антифрикційних властивостей розроблених ПКМ. Так коефіцієнт тертя, температура на поверхні тертя та інтенсивність лінійного зношування у розроблених ПКМ у 1,2-2 рази кращі ніж у вихідного полімеру.

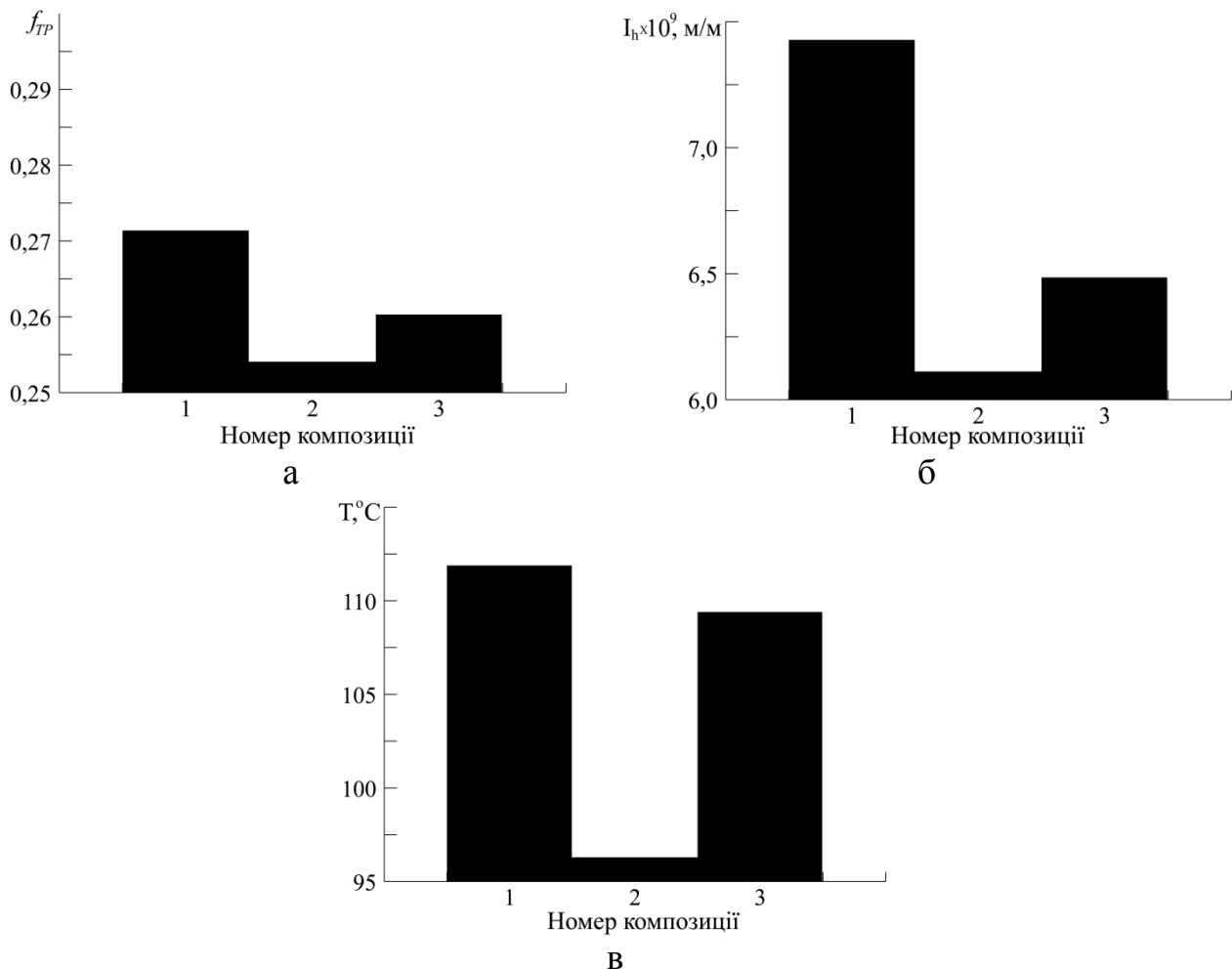
Слід відмітити, що отримані концентраційні залежності мають екстремальний характер, який спостерігається в області значень концентрацій

10% ваг. Коефіцієнт тертя та інтенсивність лінійного зношування ПКМ з такою концентрацією наповнювача складають відповідно 0,27 та  $6 \times 10^{-9}$  м/м. Температура на поверхні тертя цього композиту не перевищувала  $112^\circ\text{C}$ , що є допустимим для полімерної матриці на основі фенольного зв'язуючого [10].

Покращення показників триботехнічних властивостей розроблених ПКМ при терті по сталі пояснюється створенням антифрикційної плівки на сталій поверхні, яка сприяє покращенню умов тертя матеріалів, що досліджуються.

Відповідно до проведених досліджень можна зробити висновок, що оптимальним вмістом графіту у розроблених ПКМ є 10% ваг. Композити з таким вмістом наповнювача мають найкращий рівень триботехнічних властивостей при фрикційній взаємодії із сталлю і деталі з них можуть використовуватися у антифрикційних вузлах машин і механізмів.

Для встановлення впливу марки графіту на рівень триботехнічних властивостей композиту з оптимальним вмістом наповнювача (10% ваг.) були проведені дослідження їх тертя та зношування при фрикційній взаємодії із сталлю (рисунок 2).



**Рис. 2. Значення (а) коефіцієнту тертя, (б) температури на поверхні тертя, (в) інтенсивності лінійного зношування композиту 90% фенольне зв'язуюче + 10% графіт: 1 - ГЛ – 1; 2 - GRMC – 2; 3 - графіт С – 1**

Як можна побачити з результатів досліджень найкращий рівень триботехнічних властивостей мають композити із графітом марок GRMC та С-1. Так значення їх коефіцієнту тертя та інтенсивності лінійного зношування на 5-15% кращі ніж у композиту з графітом ГЛ – 1. Це пов'язано із кращою змащувальною властивістю цих графітів, яка обумовлена їх меншими розмірами частинок, особливостями структури та морфології.

На деталі що працюють у вузлах тертя машин і механізмів діють стискаючі, розтягуючі, згинаючі та інші види навантажень, які можуть призводити до їх незворотної деформації та руйнування. Тому являє зацікавленість дослідити фізико-механічні властивості розроблених ПКМ з оптимальним вмістом графіту марок GRMC та С-1. Результати цих досліджень представлені в таблиці 4

Таблиця 4

Показники фізико-механічних властивостей композиту 90% фенольне зв'язуюче + 10% графіт

Показник властивостей	Марка графіту	
	GRMC	ГС-1
Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1315	1310
Твердість НВ, МПа	228	228
Напруження при межі текучесті при стисканні $\sigma_y$ , МПа	150	155
Модуль пружності $E$ , МПа	2900	3050

Відповідно до результатів досліджень розроблені ПКМ мають досить високий рівень фізико-механічних властивостей. Так їх твердість та напруження при межі текучості при стисканні досягають 228 та 155 МПа. Значення цих параметрів знаходяться на рівні та перевищують аналогічні для крупнотонажних полімерних композитів триботехнічного призначення. Модуль пружності розроблених композитів наближається до 3050 МПа, що дозволяє отримати матеріал, деталі з якого будуть зберігати свою форму у допустимих межах навіть при суттєвих навантаженнях. Слід відмітити, що поряд із такими високими значеннями міцнісних характеристик густина розроблених ПКМ складає 1315 кг/м<sup>3</sup>. Що дозволяє рекомендувати до застосування такі матеріали у космічній техніці, літакобудуванні та у машинах і механізмах для яких зменшення загальної ваги є одним із визначальних факторів.

**Висновки.** В результаті проведення роботи розробили ПКМ на основі фенольного зв'язуючого і графіту. Встановили вплив концентрації та марки наповнювача на триботехнічні властивості розроблених ПКМ. Відповідно до проведених досліджень, визначили ПКМ з оптимальним вмістом вихідних компонентів і провели дослідження його фізико-механічних характеристик. компонентів і провели дослідження його фізико-механічних характеристик.



Надали рекомендації щодо використання розроблених ПКМ в якості матеріалу для виготовлення деталей, що працюють у вузлах тертя машин і механізмів у космічній техніці, літакобудуванні та інших високотехнологічних галузях промисловості.

### Бібліографічні посилання

1. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці [Текст] / [Джур Є.О., Кучма Л.Д., Манько Т.А., и др]. – К.: Вища освіта, 2003.– 399 с.
2. Солнцев, Ю.П. Специальные материалы в машиностроении [Текст] / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, В.Ю. Пирайнен. – СПб: ХИМИЗДАТ, 2004. – 640 с.
3. Михайлин, Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике [Текст] / Ю.А. Михайлин. – СПб: Научные основы и технологии, 2013. – 720 с.
4. Polymer composites in tribology [Text] / Myshkin N.K., Pesetskii S.S., Grigoriev A.Ya. // VIII International scientific conference "BALTRIB 2015". – Kaunas. – 2015. – P.152-156.
5. Кабат, О.С. Исследование свойств триботехнических композитов на основе фенолона и фторопласта [Text] // О.С. Кабат, В.И. Сытар, А.Н. Дудка // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №2. – С. 57-60.
6. Кабат, О.С. Триботехнические композиты на основе фенолона и кремнеземистых материалов [Текст] / О.С. Кабат, В.И. Сытар // Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Полимерные композиты и трибология". – Гомель. - 2011. – С. 108-109.
7. Kabat, O. S. Heat-resistant compositional materials based on difenilolsulfonformaldehyde oligomer and silicon oxide [Text] / O. S. Kabat, Y. M. Kobelchuk, O. V. Chervakov // International research and practice conference "Nanotechnology and nanomaterials" (NANO-2016) : abstracts of the International research and practice conference "Nanotechnology and nanomaterials" (Lviv, Ukraine, 24-27 August 2016). - Lviv (Ukraine), 2016. - P. 95-96.
8. Кноп, А. Фенольные смолы и материалы на их основе [Текст] / А. Кноп, В. Шейб. – М.: Химия, 1983. – 280с.
9. Дослідження триботехнічних характеристик полімерних композитів для термонавантажених вузлів тертя машин і апаратів хімічного обладнання [Текст] / А.М. Дудка, В.І. Ситар, І.І. Начовний, О.С. Кабат // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №6. – С. 148-151
10. Конструкционные фенопласты с высоким уровнем термической стабильности [Текст] / О.С. Кабат, О.В. Черваков, Ю. М. Кобельчук [и др.] // Технологические системы. – 2017. – Т. 2 (79) – С. 33-39.
11. Стрелов, К.К. Технология огнеупоров [Текст] / К.К. Стрелов, И.Д. Кащеев, П.С. Мамыкин – М.: Металлургия, 1988. – 528 с.
12. Богданов, В.В. Методы исследования технологических свойств пластмасс [Текст] / В.В. Богданов – Л.: Из-во Ленинградского ун-та, 1978. – 176 с.

Надійшла до редколегії 30.07.2017