

Полімерні композити на основі полікарбонату для виготовлення елементів систем перетворення сонячної енергії на теплову

В. І. Ситар¹⁾, К. М. Сухий¹⁾, О. С. Кабат¹⁾, І. І. Начовний¹⁾

¹⁾ *Український державний хіміко-технологічний університет, вул. Гагаріна, 8, 49005, м. Дніпро, Україна*

Article info:

Paper received:

March 14, 2017

The final version of the paper received:

May 28, 2017

Paper accepted online:

May 30, 2017

Correspondent Author's Address:

amber_udhtu@i.ua

Сучасний розвиток промисловості неможливий без упровадження енергоощадних технологій, що базуються на використанні відновлювальних природних джерел енергії. У передових країнах усе більшого поширення набувають вітрові, гідро- та сонячні електростанції, теплові генератори, сонячні колектори та ін. Одним із таких пристроїв є системи перетворення сонячної енергії на теплову. Вони достатньо дорогі та не мають необхідного рівня надійності й довговічності. Тому актуальним завданням є зменшення їх собівартості та підвищення надійності та довговічності в роботі. Це завдання виконується за рахунок заміни матеріалів конструкційного й триботехнічного призначення основних елементів таких систем на розроблені полімерні композиційні матеріали (ПКМ). Як полімерна матриця для їх створення був вибраний полікарбонат. Для покращення технологічності при переробленні на виріб його модифікували кремнійорганічним каучуком. Це привело до зменшення в'язкості розплаву та розширило інтервал температур перероблення. З метою покращення триботехнічних властивостей отримані ПКМ наповнювали графітом, що привело до значного зменшення коефіцієнта тертя та інтенсивності лінійного зношування розроблених матеріалів порівняно з вихідним полімером. У результаті проведення роботи були отримані ПКМ із високим рівнем технологічності при переробленні на виріб, триботехнічних та фізико-механічних властивостей, деталі з яких можна рекомендувати до впровадження в системи перетворення сонячної енергії на теплову, що дозволить зменшити собівартість і підвищити надійність та довговічність енергоощадного обладнання.

Ключові слова: енергоощадне обладнання, надійність та довговічність, полімерна матриця, наповнювач, модифікатор, полімерні композиційні матеріали, технологічність, триботехнічні та фізико-механічні властивості.

1. ВСТУП

На сучасному етапі розвитку промисловості ефективність використання енергетичних ресурсів та перехід на енергозбережні технології виходять на перший план. У розвинених країнах усе більшого поширення набувають вітрові, гідро- та сонячні електростанції, теплові генератори, сонячні колектори тощо. Більшість із цих пристроїв використовують для одержання енергії відновлювальних джерел, що є досить актуальним на тлі проблем, пов'язаних з обмеженою кількістю класичних енергетичних ресурсів Землі.

Одними з таких пристроїв є системи для перетворення сонячної енергії на теплову, які використовують для підігрівання води, опалення та інших побутових потреб. Ці системи складаються із сонячного колектора, теплообмінників, накопичувальних емностей, циркуляційних насосів і трубної розводки. Основним елементом таких систем є сонячні колектори, завдяки яким відбувається перетворення сонячної енергії на теплову. Їх виготовляють із композитних матеріалів на основі металів та їх сплавів, але вони мають ряд істотних недоліків: високу собівартість, вихідних компонентів, складність у виготовленні,

низьку корозійну стійкість. Одним із найважливіших елементів цих систем є циркуляційні насоси, завдяки яким відбувається рух робочого середовища. Здебільшого з цією метою використовують відцентрові та шестеренчасті насоси. Основними недоліками їх є низькі надійність та довговічність у роботі внаслідок виходу з ладу підшипників ковзання чи кочення. Завдяки цим недолікам системи перетворення сонячної енергії на теплову є досить дорогими та ненадійними в експлуатації. Унаслідок цього основною метою роботи є зменшення їх собівартості, підвищення надійності та довговічності в роботі. Поставлена мета може бути досягнута за рахунок заміни матеріалів деталей сонячного колектора та підшипників шестеренчастого насоса на більш сучасні з кращим рівнем властивостей. Одними з найбільш перспективних матеріалів для цього є полімери та композити на їх основі. Вони є порівняно дешевими, технологічними при переробленні на вироби, мають високий рівень хімічної стійкості та зносостійкості, відносно непогані теплофізичні та фізико-механічні властивості. При цьому залежно від вибору полімерної основи, наповнювачів та модифікаторів можна отримати матеріали з необхідним рівнем властивостей.

Елементи сонячного колектора працюють за дії сонячного випромінювання та ерозійного зношування, а деталі циркуляційного насоса – робочого середовища при фрикційній взаємодії в підшипниках ковзання і кочення. Тому підбір полімерної матриці необхідно проводити з урахуванням цих умов експлуатації. Аналіз літературних джерел [1-3] дозволяє зробити висновок, що одним з полімерів, який задовольняє всі ці умови, є ПК. Завдяки поєднанню таких унікальних властивостей, як висока міцність, низька густина, гарні оптичні й теплофізичні властивості, вогнестійкість та зносостійкість виробу з цього полімеру набули великого поширення в будівництві, машинобудуванні, електроенергетиці, медицині тощо [4, 5].

Вибір ПК та полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) на його основі як матеріалів для створення деталей елементів сонячного колектора та циркуляційного насоса обумовлений не лише прийнятним рівнем їх властивостей, а й невисокою собівартістю порівняно з такими традиційними матеріалами, як металеві, фторопластові композити та ін.). Це є наслідком використання більш дешевої сировини й продуктивної технології перероблення їх на виробі.

Для ефективного застосування ПК необхідно комплексно підходити до створення ПКМ на його основі з оптимізацією режимів перероблення та фізико-механічних і експлуатаційних властивостей.

Полікарбонат поряд із комплексом унікальних властивостей має деякі недоліки, а саме відносно невисокий рівень технологічності при переробленні на виріб і триботехнічних властивостей. Для усунення цих недоліків до складу полімеру вводять модифікатори та наповнювачі [6, 7]. Тому для створення ПКМ на основі полікарбонату ми вибрали як наповнювач графіт, а модифікатор – кремнійорганічний каучук. Графіт часто застосовують для покращання триботехнічних властивостей полімерів [8–10]. Його використання більш ефективно порівняно з іншими твердими мастилами, такими як дисульфід молібдену, нітрид бору, фторопласт-4 тощо.

Вибір кремнійорганічного каучуку як модифікатора обумовлений тим, що додавання його до складу композитів покращує поверхневу взаємодію між полімером та наповнювачами [11]. Водночас кремнійорганічні модифікатори сприяють підвищенню текучості розплавів полімерів, що покращує їх умови перероблення на виробі [12]. Завдяки високій теплостійкості вони можуть успішно перероблятися у виробі сумісно з полікарбонатом без термічного розкладання.

Як матричний полімер вибраний полікарбонат (ПК) марки Lехan. Основні характеристики цього матеріалу наведені в таблиці 1.

Як наповнювач вибраний колоїдний графіт марки С-1 (ТУ-113-08-48-63-90). Графіт марки «С» використовують як добавку при створенні змащувальних матеріалів та композитів для вузлів тертя. Основні характеристики графіту С1 наведені в таблиці 2.

Як модифікатор використовували каучук синтетичний термостійкий низькомолекулярний СКТН марки А (ГОСТ 13835-73). У таблиці 3 наведені його основні характеристики.

Таблиця 1 – Основні характеристики виробів із полікарбонату

Характеристика	Значення
Густина, кг/м ³	1 200
Міцність при стисканні, МПа	80
Ударна в'язкість, кДж/м ²	80
Робочі температури експлуатації, °С	–40 до 130

Таблиця 2 – Основні характеристики графіту

Характеристика	Значення
Основний розмір частинок, мкм	7,0–10,0
Вагова частка золи, %, не більше	1,0
Вагова частка вологи, %, не більше	0,5
Залишок на сітці № 0063, %, не більше	0,3

Таблиця 3 – Основні характеристики каучуку синтетичного термостійкого низькомолекулярного

Характеристика	Значення
Зовнішній вигляд	В'язка рідина
Умовна в'язкість, с	90–150
Втрата ваги при 150 °С, %, не більше	2
Термостабільність при 250 °С, %, не більше	2

Показник текучості розплаву (ПТР) вимірювали згідно з ГОСТом 11645-73 за температури перероблення ПК 280 °С.

Стійкість полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) до дії температури визначали за допомогою термогравіметричного аналізу відповідно до ISO 11358.

Триботехнічні характеристики ПКМ при фрикційній взаємодії зі сталлю визначали на машині тертя СМЦ-2. Дослідження проводили за схемою диск-колодка. Режими тертя: питоме навантаження – від 1–4 МПа, швидкість ковзання – 0,75 м/с. Матеріал диска – сталь 45 із шорсткістю робочої поверхні $Ra = 0,32$ мкм та твердістю 45–50 HRC.

Напруження під час стискання при межі текучості та модуль пружності визначали згідно з ISO 604.

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Результати досліджень

Виготовлення виробів із розроблених ПКМ на основі полікарбонату можна здійснювати методом лиття під тиском та екструзією з в'язкотекучого стану. Тому важливо дослідити вплив кремнійорганічного каучуку та графіту на в'язкісні характеристики розплаву розроблених композицій. У сучасній технологічній практиці для визначення таких характеристик великого поширення набув ПТР. За допомогою цього показника найбільш просто оцінювати текучість та моделювати реальний процес перероблення полімерів. Чим більші значення ПТР, тим полімерний матеріал є більш технологічним під час перероблення на виробі. На рисунку 1 наведені результати експериментальних досліджень ПТР для ПК та ПКМ на його основі.

Як свідчать наведені результати досліджень, наявність у складі ПК кремнійорганічного модифікатора та графіту підвищує технологічність під час перероблення ПКМ на виробі за рахунок значного зменшення в'язкості їх розплаву. Це відбувається внаслідок впливу СКТН та графіту на процеси структуроутворення при переробленні ПК.

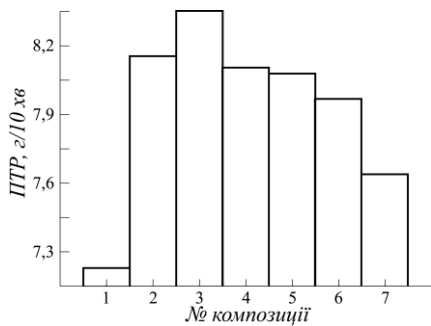


Рисунок 1 – Показник текучості розплавів (ПТР) вихідного ПК (1) та композитів на його основі: 2 – 98 % ПК + 2 % СКТН; 3 – 95 % ПК + 5 % СКТН; 4 – 95 % ПК + 2 % СКТН + 3 % графіт; 5 – 93 % ПК + 2 % СКТН + 5 % графіт; 6 – 88 % ПК + 2 % СКТН + 10 % графіт; 7 – 78 % ПК + 2 % СКТН + 20 % графіт

У результаті розміщення на поверхні надмолекулярних утворень ці речовини сприяють полегшенню переміщення структур у процесі деформування за температур, коли композит перебуває у в'язкотекучому стані. Макромоллекули модифікатора відрізняються значною гнучкістю, рухомістю та високою термічною стабільністю, що полегшує їх проникнення між структурними утвореннями та сприяє зменшенню енергії міжмолекулярної взаємодії в матричному полімері.

З отриманих ПТР та попередніх експериментів [8] для подальших досліджень вибрані такі ПКМ: 98 % ПК + 2 % СКТН; 88 % ПК + 2 % СКТН + 10 % графіт.

Для порівняння технологічності під час перероблення на виріб ПК та ПКМ на його основі з великотоннажними полімерами є важливим визначення енергії активації в'язкої течії їх розплаву. Значення цього параметра визначають в'язкісні характеристики і, як наслідок, технологічність при переробленні на вироби. Відповідно до теорії Я. Френкеля і Г. Ейрінга [13] в'язка течія рідин обумовлена переміщенням окремих сегментів молекул у сусідні не зайняті вакансії в результаті флуктуації руху під дією теплової енергії. В'язка течія виникає тоді, коли на рідину діє певне зусилля. Особливістю її є те, що ланцюги макромолекул не можуть переміщатися як єдине ціле, і деформація в'язкої течії відбувається внаслідок послідовного переміщення сегментів макромолекул.

Якщо кількість сегментів не змінюється з температурою, то закономірності, що визначають імовірність переміщення, будуть характеризувати зміну в'язкості, яка визначається за формулою

$$\eta = A + e^{\frac{U}{RT}}, \quad (1)$$

де η – ефективна в'язкість; A – передекспоненціальний множник, що залежить від в'язкості та молекулярної ваги полімеру; T – температура; R – універсальна газова стала; U – енергія активації в'язкої течії.

Виконанням операції логарифмування виразу (1) одержуємо

$$\ln \eta = \ln A + \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{T}. \quad (2)$$

Графічна залежність $\ln \eta$ від $1/T$ має вигляд прямих, тангенс кута нахилу яких дає можливість розрахувати U за рівнянням

$$U = \operatorname{tg} \alpha \cdot R, \quad (3)$$

де α – кут нахилу одержаних прямих.

Розрахункові значення енергії активації в'язкої течії для ПК та ПКМ на його основі порівняно з великотоннажними полімерами наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Значення енергії активації в'язкої течії деяких великотоннажних полімерів та розроблених ПКМ

Матеріал	U , кДж/моль
Поліетилен	46
Полістирол	96
Полівінілхлорид	146
Ацетат целюлози	292
Вихідний ПК	92
98 % ПК + 2 % СКТН	61
88 % ПК + 2 % СКТН + 10 % графіт	72

Енергія активації в'язкої течії композитів на основі ПК значно менша, ніж вихідного полімеру та наближається до таких технологічних при переробленні на виріб пластиків, як поліетилен та полістирол.

В умовах одержання, перероблення та експлуатації виробів із полімерів та ПКМ на їх основі може відбуватися деструкція, тобто руйнування молекул. Деструкція може проходити під дією тепла, кисню, хімічних агентів (зокрема, води), світла, випромінювань високої енергії, механічних напружень тощо як окремо, так і в сукупності. Вона супроводжується зменшенням молекулярної ваги, виділенням газоподібних і низькомолекулярних продуктів, зміною фарбування матеріалу та появою запаху. Деструкція може супроводжуватися не лише руйнуванням макромолекул, а й зшиванням (структуруванням), тобто утворенням поперечних хімічних зв'язків між макромоллекулами, що спричиняє збільшення в'язкості розплаву. У результаті цього деструкція полімерів при переробленні призводить до порушення стабільності їх властивостей. Тому знаходження температури початку активної деструкції полімерів та ПКМ на їх основі є одним із головних завдань при визначенні технологічного процесу перероблення на вироби. З цієї метою проведено термогравіметричний аналіз ПК та розроблених ПКМ на його основі (рисунок 2).

Як конструкційний матеріал із високими показниками фізико-механічних властивостей вихідний полікарбонат має низькі триботехнічні властивості при фрикційній взаємодії зі сталлю, особливо у вузлах, що працюють без змащування. Тому було цікаво дослідити вплив дрібнодисперсного графіту на тертя та зношування ПКМ на основі полікарбонату.

Дослідження залежностей триботехнічних показників від концентрації графіту в складі полікарбонату свідчать про те, що збільшення вмісту графіту сприяє зниженню коефіцієнта тертя та зменшенню інтенсивності лінійного зношування (рисунок 3).

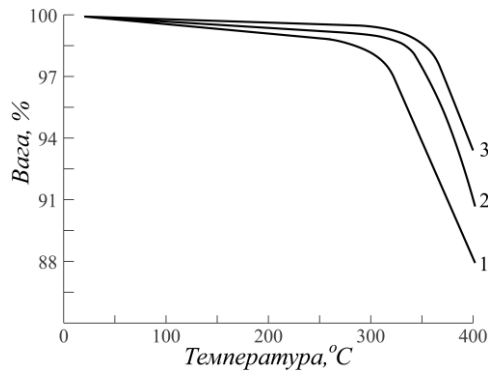


Рисунок 2 – Термогравіметричні криві ПК (1) та ПКМ на його основі: 2 – 98 % ПК + 2 % СКТН; 3 – 88 % ПК + 2% СКТН + 10 % графіт

Як свідчать одержані результати наявність графіту в ПКМ приводить до покращання триботехнічних властивостей. Це пояснюється особливістю тертя та зношування графітових матеріалів. Частинки графіту під дією навантажень проникають у поверхню сталевго зразка (контртіла), оскільки твердість їх у напрямку площини спайності більш високого порядку, ніж у металів. У подальшому ці частинки є осередками, навколо яких здійснюється нарощування твердої плівки за рахунок проходження процесів хемосорбції й адсорбції продуктів зношування. Внаслідок цього процес сухого тертя реалізується між поверхнею полімерного зразка й твердою плівкою, що утворюється на поверхні сталевго зразка і виконує функцію твердого мастила. Цим і пояснюється покращання триботехнічних характеристик графітонаповненого полікарбонату при фрикційній взаємодії зі сталлю в режимі тертя без змащування.

Також було досліджено вплив СКТН на триботехнічні властивості полікарбонату, що містить у своєму складі графіт. Як свідчать попередні дослідження, найбільш доцільним є введення до складу полікарбонату до 10 % ваг. графіту. У зв'язку з цим вибрано композицію саме з таким умістом наповнювача.

Досліджено вплив СКТН на тертя та зношування графітонаповненого полікарбонату. Порівняльний аналіз одержаних результатів свідчить про те, що

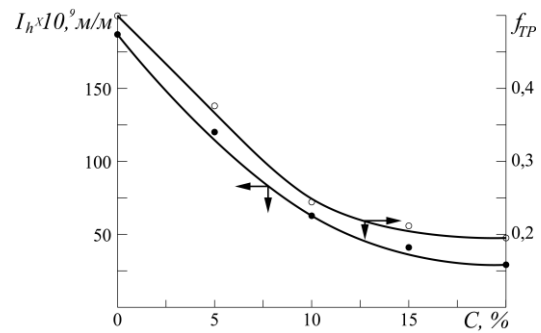


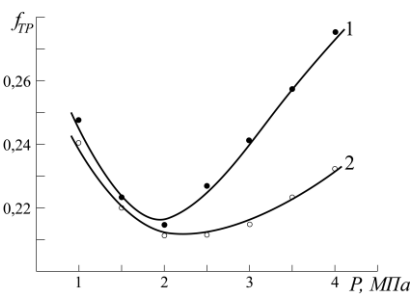
Рисунок 3 – Концентраційні залежності інтенсивності лінійного зношування (I_h) та коефіцієнта тертя (f_{TP}) композитів на основі ПК і графіту

наявність модифікатора позитивно впливає на триботехнічні властивості ПКМ (рисунок 4).

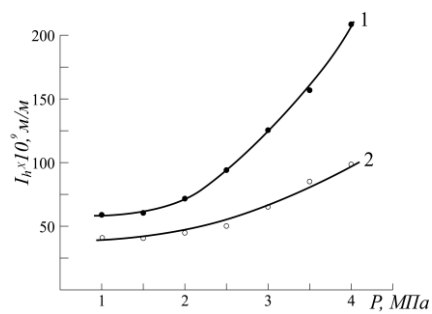
Покращання значень коефіцієнта тертя та інтенсивності лінійного зношування ПКМ, що містять СКТН, пов'язано з тим, що кремнійорганічний модифікатор має добрі змащувальні властивості. У зоні тертя він є додатковим мастилом, що сприяє покращанню умов тертя та зношування. Одержані результати досліджень свідчать про те, що розроблені композити можуть бути рекомендовані для впровадження у вузли тертя, що працюють без змащування при навантаженнях до 3 МПа.

При порівнянні значень коефіцієнтів тертя та інтенсивності лінійного зношування ПКМ на основі ПК, які ми розробили, з такими традиційними матеріалами триботехнічного призначення, як фторопласти, поліаміди та ПКМ на їх основі [14, 15], можна зробити висновок, що за своїми триботехнічними властивостями вони перебувають на одному рівні, однак значно дешевші та більш технологічні при переробленні на виробі.

У зв'язку з тим, що розроблені ПКМ на основі ПК передбачається застосовувати як матеріали для елементів сонячного колектора та підшипників шестеренчастого насоса, що працюють у жорстких умовах експлуатації, виконані дослідження їх міцнісних властивостей (таблиця 5).



а



б

Рисунок 4 – Залежність (а) коефіцієнта тертя (f_{TP}) та (б) інтенсивності лінійного зношування (I_h) від питомого навантаження (P), для ПКМ: 1 – 90 % ПК + 10 % графіту; 2 – 88 % ПК + 2 % СКТН + 10 % графіту

Таблиця 5 – Фізико-механічні властивості ПК та ПКМ на його основі

Склад матеріалу	Властивість	
	напруження при межі текучості під час стискання σ_y , МПа	модуль пружності під час стискання E , МПа
Полікарбонат	80	1 800
98 % полікарбонат + 2 % СКТН	73	1 650
88 % полікарбонат + 10 % графіт + 2 % СКТН	61	2 240

Як показали результати досліджень, введення до складу ПК силіконового каучуку істотно не впливає на міцнісні властивості ПКМ. Деяке зниження напруження при межі текучості під час стискання та модуля пружності обумовлено тим, що модифікатор відіграє роль пластифікатора і відповідно сприяє підвищенню рухомості структурних елементів полімеру при прикладенні навантаження. Додавання до

складу ПК дисперсного графіту сприяє деякому зниженню міцнісних властивостей ПКМ, однак їх значення залишаються на достатньо високому рівні.

3. ВИСНОВКИ

Розроблені ПКМ із високим рівнем технологічності при переробленні на вироби, триботехнічних та фізико-механічних властивостей для виготовлення елементів сонячного колектора та підшипників шестеренчастого насоса систем перетворення сонячної енергії на теплову, використання яких значно зменшить собівартість, підвищить надійність та довговічність у роботі таких систем.

Установлено оптимальний склад ПКМ та вивчено вплив СКТН і графіту на рівень технологічності при переробленні на вироби, триботехнічні та фізико-механічні властивості розроблених матеріалів.

Polymeric compositional materials based on polycarbonate for units of devices for transform solar into thermal energy

V. I. Sytar¹⁾, K. M. Sukhyy¹⁾, O. S. Kabat¹⁾, I. I. Nachovnyi¹⁾

¹⁾ *Ukrainian State University of Chemical Technologies, 8 Gagarina St., 49005, Dnipro, Ukraine*

Modern development of the industry is complicated without introduction of energy-saving technologies based on renewable natural energy sources. Solar and wind power plants, heat generators, solar collectors are wide spread in developed countries. One of it is device for transform solar into thermal energy. It is costly devices with low level of reliability and durability. Therefore actual tasks of this work are reduction cost of device for transform solar into thermal energy and increase it level of reliability and durability. These tasks are carried out by the way of substitution the main elements of device for transform solar into thermal energy by development polymeric compositional materials (PCM). As the polymer matrix is selected polycarbonate. This matrix is modified by silicon rubber and filled by graphite. The silicon rubber increase technological effectiveness by procedure of obtaining PCM. Graphite significantly increase tribotechnical properties of PCM in friction units with steel. Developed PCM can be recommended for application in main elements of device for transform solar into thermal energy, that lead to increasing of it level of reliability and durability.

Keywords: energy-saving equipment, reliability and durability, polymer matrix, filler, modifier, polymeric compositional materials, technological effectiveness, tribotechnical and physical-mechanical properties.

Полимерные композиты на основе поликарбоната для изготовления элементов преобразования солнечной энергии в тепловую

В. И. Ситар¹⁾, К. М. Сухий¹⁾, О. С. Кабат¹⁾, И. И. Начовный¹⁾

¹⁾ Украинский государственный химико-технологический университет,
ул. Гагарина, 8, 49005, г. Днепр, Украина

Современное развитие промышленности затруднено без внедрения энергосберегающих технологий, основанных на использовании возобновляемых природных источников энергии. В передовых странах все большее распространение получают ветровые, гидро- и солнечные электростанции, тепловые генераторы, солнечные коллекторы и т. д. Одним из таких устройств являются системы преобразования солнечной энергии в тепловую. Они достаточно дорогие и не обладают необходимым уровнем надежности и долговечности. Поэтому актуальной задачей является снизить их стоимость и повысить надежность и долговечность в работе. Эта задача выполняется за счет замены материалов конструкционного и триботехнического назначения основных элементов таких систем на разработанные полимерные композиционные материалы (ПКМ). В качестве полимерной матрицы для их создания был выбран поликарбонат. Для улучшения технологичности при переработке в изделие его модифицировали кремнийорганическим каучуком. Это привело к уменьшению вязкости расплава и расширило интервал температур переработки. С целью улучшения триботехнических свойств полученные ПКМ наполняли графитом, что привело к значительному уменьшению коэффициента трения и интенсивности линейного износа разработанных материалов в сравнении с исходным полимером. В результате проведения работы были получены ПКМ с высоким уровнем технологичности при переработке в изделия, триботехнических и физико-механических свойств, детали из которых, можно рекомендовать к внедрению в системы преобразования солнечной энергии в тепловую, что позволит уменьшить стоимость и повысить надежность и долговечность энергосберегающего оборудования.

Ключевые слова: энергосберегающее оборудование, надежность и долговечность, полимерная матрица, наполнитель, модификатор, полимерные композиционные материалы, технологичность, триботехнические и физико-механические свойства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Илькун В. И. Конструкционные материалы для деталей машин. Книга 1 : справочно-методическое издание в 2 книгах / В. И. Илькун, Г. А. Ульява, М. Р. Каленов. – Караганда : АО «Карагандинская полиграфия», 2009. – 512 с.
2. Справочник по конструкционным материалам / под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 640 с.
3. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / под ред. А. А. Берлина. – Санкт-Петербург : Профессия, 2008. – 560 с.
4. Поликарбонат в машиностроении / Л. Н. Магазинова, В. П. Кестельман, М. С. Акутин, А. М. Карапатницкий. – Москва : Машиностроение, 1971. – 174 с.
5. Буря А. И. Применение полимерных материалов и композитов на их основе в автомобилестроении : монография / А. И. Буря, О. П. Чигвинцева. – Днепропетровск : Изд-во «Федорченко А. А.», 2010. – 236 с.
6. Бондалетова Л. И. Полимерные композиционные материалы : монография / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
7. Курта С. А. Наповнювачі – синтез, властивості та використання / С. А. Курта. – Івано-Франківськ : Вид-во Прикарпатського національного ун-ту ім. В. Стефаніка, 2012. – 296 с.
8. Оптимизация состава композиции по комплексу триботехнических характеристик / В. И. Ситар, И. М. Кузьяев, А. И. Буря и др. // Трение и износ. – 2004. – Т. 25, № 2. – С. 219–222.
9. Wear reduction mechanism of graphite and MoS₂ in epoxy composites / X. Li, Y. Gao, J. Xing et al. // Wear. – 2004. – Vol. 257. – P. 279–283.
10. Polyethylene, Grafted polyethylene, Graphite nanocomposites: Preparation, structure and electrical properties / J.-W. Shen, W.-Yi Huang, S.-W. Zuo, J. Hou // Journal of Applied Polymer Science. – 2005. – Vol. 97. – P. 51–59.
11. Park Y.-W. Mechanical, surface, and thermal properties of polyamideimide-polydimethylsiloxane nanocomposites fabricated by sol-gel process / Y.-W. Park, D.-S. Lee, S.-H. Kim // Journal of Applied Polymer Science. – 2004. – Vol. 91. – P. 1774–1783.
12. Ситар В. І. Дослідження реології розплаву модифікованих систем на основі фенілолу / В. І. Ситар, І. М. Кузьяев, Д. С. Данилін // Вопросы химии и химической технологии. – 2003. – № 2. – С. 104–107.
13. Баргеньев Г. М. Определение энергии активации вязкого течения полимеров по экспериментальным данным / Г. М. Баргеньев // Высокомолекулярные соединения. – 1964. – № 2. – С. 335–340.
14. Кабат О. С. Исследование свойств триботехнических композитов на основе фенилона и фторопласта / О. С. Кабат, В. И. Ситар, А. Н. Дудка // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – № 2. – С. 57–60.
15. Дослідження триботехнічних характеристик полімерних композитів для термонавантажених вузлів тертя машин і апаратів хімічного обладнання / А. М. Дудка, В. І. Ситар, І. І. Начовний, О. С. Кабат // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – № 6. – С. 148–151.

REFERENCES

1. Ilkun, V. I., Uleva, G. A., Kalenov, M. R. (2009). Konstruktsionnyie materialyi dlya detaley mashin. [Constructional materials for details of machines and mechanisms]. Book 1. Karaganda : AO "Karagandinskaya poligrafiya" [in Russian].
2. Arzamasov, B. N., Soloveva, T. V. (2005). Spravochnik po konstruktsionnyim materialam [Reference book of constructional materials]. Moscow : N. E. Bauman MGTU Publishing House [in Russian].
3. Berlin, A. A. (2008). Polimernye kompozitsionnyie materialyi: struktura, svoystva, tehnologiya [Polymeric composite materials: structure, properties, technology]. Saint-Petersburg : Professiya [in Russian].
4. Magazinova, L. N. (1971). Polikarbonat v mashinostroenii [Polycarbonate in mechanical engineering]. Moscow : Mashynostroyeniye [in Russian].
5. Burya, A. I., Chigvintseva, O. P. (2010). Primenenie polimernykh materialov i kompozitov na ih osnove v avtomobilestroenii: monografiya [Usage of polymeric materials and composites based on it in automobile industry: monograph]. Dnepropetrovsk: Fedorchenko A. A. Publishing House [in Russian].
6. Bondaletova, L. I., Bondaletov, V. G. (2013). Polimernye kompozitsionnyie materialyi: monografiya [Polymeric composite materials: monograph]. Tomsk : Tomsk Polytechnic University [in Russian].
7. Kurta, S. A. (2012). Napovnyuvachi – syntez, vlastyvoli ta vykoristannya [Fillers – synthesis, properties and application]. Ivano-FrankIvsk : V. Stefanyk Precarpathian National University [in Ukraine].
8. Sytar, V. I., Kuzyaev, I. M., Burya, A. I. (2004). Optimizatsiya sostava kompozitsii po kompleksu tribotekhnicheskikh harakteristik [Optimization of structure of composition on a complex of tribotechnical properties]. Friction and Wear, Vol. 25, No. 2, 219–222 [in Russian].
9. Li, X., Gao, Y., Xing, J. (2004). Wear reduction mechanism of graphite and MoS₂ in epoxy composites. Wear, Vol. 257, 279–283.
10. Shen, J.-W., Zuo, S.-W., Hou, J. (2005). Polyethylene, Grafted polyethylene, Graphite nanocomposites: Preparation, structure and electrical properties. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 97, 51–59.
11. Park, Y.-W., Lee, D.-S., Kim, S.-H. (2005). Mechanical, surface, and thermal properties of polyamideimide-polydimethylsiloxane nanocomposites fabricated by sol-gel process. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 91, 1774–1783.
12. Syitar, V. I., Kuzyaev, I. M., DanilIn, D. S. (2003). Doslidzhennya reologii rozplavu modyfikovanykh system na osnovi fenilonu [Research of a rheology of fusion of the modified systems basic on phenol]. The issues of chemistry and chemical technology, Vol. 2, 104–107 [in Ukraine].
13. Bartenev, G. M. (1964). Determination of energy of activation of a flow of polymers on experimental data. Vysokomolekulyarnyye soedineniya. Polymer Science, Vol. 2, 335–340 [in Russian].
14. Kabat, O. S. (2010) Issledovanie svoystv tribotekhnicheskikh kompozitov na osnovе fenilona i fluoroplasta [Research properties of tribotechnical materials based on phenol and teflon]. The issues of chemistry and chemical technology, 2, 57–60 [in Russian].
15. Dudka, A. M. (2010) Doslidzhennya trybotekhnichnykh kharakterystyk polimernykh kompozytiv dlya termonavantazhenykh vuzliv tertya mashyn i aparativ khimichnoho obladnannya [Research of tribotechnical properties of composites for hard loading units of machines and mechanisms]. The issues of chemistry and chemical technology, Vol. 6, 148–151 [in Ukraine].