

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»

КАБАТ ОЛЕГ СТАНІСЛАВОВИЧ

УДК 620.178.165:678.664

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ
ТЕРМОСТІЙКИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

05.17.06 – технологія полімерних та композиційних матеріалів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Державному вищому навчальному закладі «Український державний хіміко-технологічний університет», Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Черваков Олег Вікторович, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», завідувач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Євчик Віктор Сидорович, Державне підприємство «Український науково-дослідний конструкторсько-технологічний інститут еластомерних матеріалів і виробів» Державного концерну «Укроборонпром», головний науковий співробітник

доктор технічних наук, професор
Гриценко Олександр Миколайович, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри хімічної технології переробки пластмас

доктор технічних наук, доцент
Вакулюк Поліна Василівна, Національний університет «Києво-Могилянська академія», професор кафедри хімії

Захист дисертації відбудеться «05» травня 2021 року об 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.078.02 в Державному вищому навчальному закладі «Український державний хіміко-технологічний університет» за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 8, аудиторія 132.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет» за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 8.

Автореферат розіслано 02 квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Н.П. Макаrenchenko

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток сучасного суспільства практично неможливий без прогресу в таких галузях промисловості, як електроенергетична, хімічна і нафтохімічна, металургійна, машинобудівна тощо. Причому останнім часом основним локомотивом розвитку промисловості є саме електроенергетична (виробництво сучасних машин і механізмів для отримання енергії з поновлюваних та ядерних джерел ресурсів) і машинобудівна галузі у сфері виробництва авіаційної, ракетно-космічної техніки, роботів тощо.

Серед найбільш досягнень сьогодення цих галузей літак на сонячних батареях Solar Impulse SI2, надзвуковий суборбітального літак класу Space Ship Two, який знаходиться на завершальній стадії випробувань; суборбітальні, орбітальні та космічні кораблі багаторазового використання Falcon 9, Falcon heavy, Dragon; електромобілі з запасом ходу до 600 км тощо.

Загальною особливістю цих машин є те, що їхні вузли і деталі працюють у досить жорстких умовах експлуатації при високому рівні навантажень, швидкостей ковзання, температур, дії абразивних чи агресивних середовищ тощо протягом тривалого часу. І тому однією з основних проблем при їх розробці й упровадженні є складність забезпечення високого рівня надійності і довговічності в експлуатації.

Одним із основних шляхів вирішення проблеми підвищення надійності та довговічності в експлуатації сучасних машин і механізмів є застосування нових конструкційних матеріалів для виготовлення основних елементів сучасних машин, які мають кращий рівень властивостей порівняно з уже використовуваними. Створення таких матеріалів згідно з принципами, розробленими Європейською комісією з ключових технологій (European Commision Key Enabling Technologies (KETs)) є одним з найбільш пріоритетних та актуальних завдань сьогодення.

У сучасних машинах і механізмах у якості конструкційних матеріалів використовуються метали та їх сплави, кераміка, полімери і полімерні композиційні матеріали (ПКМ), деревина, скло тощо. Найбільш перспективними з них є саме полімери та ПКМ, про що свідчить збільшення обсягу їх споживання всіма галузями промисловості, який в останній час значно перевищує інші матеріали.

Існуючі ПКМ, що випускаються у промислових масштабах, вже не можуть повною мірою забезпечити нормальну роботу машин унаслідок недостатнього рівня термічної стійкості, міцності і трибологічних властивостей. Їх лабораторні аналоги, рівень властивостей яких відповідає вимогам, що висуваються до деталей сучасних машин, мають досить високу собівартість за рахунок дефіцитності вихідних компонентів і складної технології переробки у виробі.

Тому актуальним науково-технічним завданням є розробка нових технологій створення матеріалів на основі полімерів з високим рівнем теплофізичних, фізико-механічних і трибологічних властивостей та невисокою

собівартістю за рахунок використання недефіцитних вихідних компонентів і спрощення технології переробки у виробі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота є частиною досліджень, виконаних на кафедрі хімічного машинобудування ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» згідно з планами Міністерства освіти і науки України за держбюджетними темами: № 08/110399 «Підвищення працездатності обладнання шляхом розробки нових композиційних матеріалів, оптимізації конструктивних рішень і високоефективних методів обробки деталей»; № 08/160190 «Енергетичні комплекси поглинання та акумулювання сонячної енергії на основі полімерних колекторів та полімер-неорганічних теплоакумуючих матеріалів» (№ держ. реєстрації 0108U001155); № 08/190599 «Моделювання технологічних процесів та дослідження нових матеріалів для підвищення довговічності та технологічності обладнання» (№ держ. реєстрації 0119U002310); № 08/200699 «Моделювання апаратурно-технологічного оформлення ресурсощадних процесів» (№ держ. реєстрації 0120U102541).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка науково-технічних основ технології виготовлення термостійких ПКМ з низькою собівартістю, доступністю виробництва в умовах підприємств України та кращим рівнем властивостей, які працюють при високих рівнях навантажень, швидкостей ковзання і температур.

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

- обґрунтувати вибір полімерних матриць, наповнювача та технології їх переробки у виробі для створення термостійких ПКМ триботехнічного призначення;

- розробити науково-технічні основи ресурсощадної технології отримання термостійких ПКМ триботехнічного призначення з визначенням їх оптимальних параметрів переробки у виробі;

- дослідити вплив технологій суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на формування структури розроблених ПКМ і якість розподілу наповнювача в полімерних матрицях;

- установити природу взаємодії наповнювача з полімерними матрицями у виробі з розроблених ПКМ;

- дослідити вплив складів термостійких ПКМ триботехнічного призначення і технологій їх переробки на теплофізичні, фізико-механічні та трибологічні властивості виробів з визначенням граничних інтервалів експлуатації;

- провести оптимізацію складів розроблених ПКМ з точки зору трибологічних властивостей і визначити вплив зовнішніх факторів на їх тертя та зношування при фрикційній взаємодії зі сталеною поверхнею;

- розробити рекомендації щодо впровадження деталей зі створених термостійких ПКМ у вузли тертя і герметизації сучасних машин та механізмів і виконати їх промислові дослідження.

Об'єкти дослідження. Теоретичні та експериментальні закономірності створення термостійких ПКМ триботехнічного призначення.

Предмет дослідження. Термостійкі ПКМ триботехнічного призначення на основі фенілону С1, фторопласту-4, дифенілолсульфон-формальдегідного олігомеру (ДФСФО) і силікагелю та технологія виготовлення виробів з них.

Методи дослідження. Експериментальні дані одержані з використанням стандартних методик та сучасних методів досліджень – фізико-механічних, теплофізичних та трибологічних. Використані: електронна та оптична мікроскопія, інфрачервона спектроскопія, дилатометрія, рентгеноструктурний та термогравіметричні аналізи.

Наукова новизна отриманих результатів. Основні наукові результати висунуті на захист, полягають у тому, що було розроблено науково-технічні основи технології виготовлення термостійких ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО та силікагелю з можливістю спрямованого регулювання фізико-механічних, теплофізичних і трибологічних властивостей та отримання на їх основі виробів триботехнічного призначення, які зберігатимуть високий рівень експлуатаційних властивостей у широкому інтервалі навантажень, швидкостей ковзання і температур.

У представленій роботі:

- розроблено науково-технічні основи технології виготовлення виробів з термостійких ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО та силікагелю, які дозволяють відмовитися від механічного суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на підготовчому етапі переробки, що значно спрощує і здешевлює технологію виготовлення деталей з них та дозволяє підвищити на 25-35% якість розподілення наповнювача в полімерних матрицях, сприяє покращенню умов взаємодії на границі розділу фаз полімер – наповнювач за рахунок суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій на стадії синтезу наповнювача;

- виявлено закономірності структуроутворення наповнювача силікагелю при синтезі у присутності дрібнодисперсних частинок фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО, які полягають у його формуванні як в об'ємі гелю, так і на поверхні дисперсних частинок полімерів, що сприяє зміні морфології частинок силікагелю зі сфероподібних на ламілярно-стрічкові;

- виявлено закономірності зміни теплофізичних і фізико-механічних властивостей розроблених ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО та силікагелю в залежності від варіювання їх складів та технологій отримання з визначенням граничних інтервалів експлуатації;

- встановлено закономірності зміни основних трибологічних властивостей пари тертя ПКМ – сталь від технології отримання і вмісту наповнювача силікагелю у фенілоні С1 і фторопласті-4 при фрикційній взаємодії без та зі змащуванням (мастило, вода) в широкому інтервалі температур, навантажень та швидкостей ковзання;

- виявлено особливості зміни морфології та структури сталеві поверхні тертя при фрикційній взаємодії з розробленими ПКМ, які полягають у створенні на ній у результаті трибохімічних реакцій дискретного

антифрикційного покриття, що сприяє зменшенню на тертя та зношування ПКМ залежно від вмісту і морфології наповнювача силікагелю у фенілоні С1 та фторопласті-4;

- отримано математичні залежності, які описують вплив основних зовнішніх факторів (навантаження і швидкість ковзання) на тертя та зношування розроблених ПКМ при їх фрикційній взаємодії зі сталлю і виявлено, що найбільш значущим фактором, який впливає на рівень трибологічних властивостей пар тертя при фрикційній взаємодії ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та силікагелю зі сталлю, є навантаження.

Практичне значення отриманих результатів:

Відповідно до теоретичних та експериментальних досліджень розроблено нову ресурсощадну технологію отримання ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО з рівномірно розподіленим у їх об'ємі дисперсним наповнювачем – силікагелем. Відповідно до неї запропоновано відмовитися від операції механічного суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на підготовчому етапі переробки у вироби і проводити їх суміщення (in situ) в процесі синтезу наповнювача. Це дозволило значно спростити і здешевити технологію отримання виробів з термостійких ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО і сприяло покращенню якості розподілу силікагелю у полімерних матрицях за рахунок їх суміщення на молекулярному рівні.

Розроблено термостійкі ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО і силікагелю, вироби з яких здатні працювати в конструкційних вузлах машин і механізмів при навантаженнях до 260 МПа і температурах до 400°C та вузлах тертя при фрикційній взаємодії зі сталлю в режимах тертя без та зі змащуванням при навантаженнях до 20 МПа і температурах навколишнього середовища до 250°C.

Практичне значення підтверджено результатами промислових випробувань деталей з розроблених ПКМ у вузлах тертя і герметизації хімічного та сільськогосподарського обладнання на підприємствах ТОВ «Т КОРП ГРУП», ТОВ «КОДАЦЬКЕ-АГРО», НПП «СОЮЗ-КОМПОЗИТ», ТОВ «ХІМПОСТАЧ ДНІПРО», ТОВ «ІНТЕР АВІА ІНВЕСТ», а саме:

– використання ущільнення на основі фторопласту-4 та силікагелю у вузлі тертя та герметизації консольного вала апарата з тихохідною якірною мішалкою дозволяє збільшити загальну довговічність його роботи у 3,7 разів; завдяки цьому вдалося зменшити кількість планово-попереджувальних ремонтів, час простою обладнання і витрати на придбання ремонтних ЗІПів у постачальника обладнання;

– використання втулок підшипників ковзання з розробленого матеріалу на основі фенілону С1 у вузлах тертя посівних лап комплексу «John Deere 1780» сприяло підвищенню його довговічності у роботі з 2 до 3 років і дозволило заощадити витрати на 2 капітальні ремонти посівного комплексу за період його експлуатації;

– використання втулок підшипників ковзання з ПКМ на основі фенілону С1 у механізмі демпфування стрілкової лапи культиватора дозволило підвищити його надійність і продуктивність роботи при великому

навантаженні, обумовленому глибокою культивацією та використанням знаряддя на «важких» ґрунтах; збільшення цих параметрів відбулося завдяки усуненню явища наклепу на поверхні металевих втулок рухомих з'єднань культиватора при роботі в парі з розробленим ПКМ;

– використання напрямних втулок з ПКМ на основі фторопласту-4 у рухомій траверсі гідравлічного пресу для переробки полімерних матеріалів дозволило не тільки покращити їх надійність і довговічність у роботі, але й відмовитися від матеріалів для змащування стандартних бронзових втулок;

– використання накладок з ПКМ на основі фенілону С1 на напрямні ковзання рухомого стола шліфувального верстата (ОШ 143) дозволило у 2 рази покращити надійність і довговічність цього вузла тертя в роботі та відмовитися від 2 планово-попереджувальних ремонтів на рік;

Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри інноваційної інженерії на лабораторних заняттях з дисципліни «Технологічне обладнання для виробництва виробів з пластмас та еластомерів» і «Сучасні матеріали в машинобудуванні» для студентів спеціальностей 133 Галузеве машинобудування та 131 Технології машинобудування.

Акти впровадження наукових положень і висновків автора представлено в додатках до рукопису дисертації. Наукову новизну і практичне значення роботи підтверджено трьома патентами України на винахід.

Особистий внесок здобувача полягає у виборі теми, формулюванні загальної проблеми та постановці завдань дослідження, обґрунтуванні методологічних підходів, плануванні й організації експерименту, участі у експериментальних і теоретичних дослідженнях, інтерпретації й узагальненні результатів, підготовці та написанні публікацій, формулюванні висновків дисертаційної роботи. Основні результати дисертаційної роботи отримано здобувачем самостійно. У виконанні й обговоренні експериментальних досліджень брали участь проф. д.т.н. Черваков О.В., проф. Ситар В.І., д.т.н. проф. Сухий К.М., д.т.н. проф. Коваленко І.Л., д.т.н. проф. Кузяєв І.М., д.х.н. проф. Ебіч Ю.Р. к.т.н. доц. Дудка А.М., к.х.н. доц. Кобельчук Ю.М., доц. к.т.н. Черваков Д.О., к.ф.-м.н. с.н.с. Коваль О.Ю., к.ф.-м.н. Баскевич О.С., к.х.н. доц. Токар А.В.

Автор вважає своїм приємним обов'язком висловити особливу глибоку вдячність д.т.н., проф. Червакову О.В. і проф. Ситару В.І. за всебічну підтримку, цінні поради й зауваження під час роботи над дисертацією, а також к.х.н. доц. Токаря А.В. за допомогу в інтерпретації результатів спектроскопічних досліджень.

Апробація роботи. Результати роботи оприлюднено на Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія і сучасні технології» (Дніпропетровськ, 2009, 2010, 2013, 2015, 2019); Международной конференции «Композиционные материалы в промышленности СЛАВПОЛИКОМ» (Ялта, 2009–2011); Міжнародній науково-технічній конференції «Композиційні матеріали» (Київ, 2009); Українсько-польській конференції «Полімери спеціального призначення» (Дніпропетровськ, 2010); Всеукраїнської научної конференції с

международным участием «Инженерные средства и методы оптимизации химических производств» (Днепропетровск, 2011); Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология ПОЛИКОМТРИБ» (Гомель, 2011, 2019); Міжнародній виставці-конференції «Композити та склопластики» (Запоріжжя, 2013); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (Кіровоград, 2013); International research and practice conference «Proceedings of academic science – 2015» (Sheffield, 2015, 2018); International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials NANO» (Lviv, 2016, 2018); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології одержання та переробки полімерних матеріалів ТРМ» (Lviv, 2016, 2019); Всеукраїнській науковій конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» (Дніпро, 2017, 2018, 2019, 2020); Міжнародній конференції «Young coatings and composites» (Дніпро, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Підвищення надійності машин і обладнання» (Кропивницький, 2020); Всеукраїнській науковій конференції студентів та аспірантів «Хімічні Каразінські читання» (Харків, 2020).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 64 наукових працях у тому числі: 26 статей у наукових фахових виданнях (з яких 7 – у виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Scopus); 3 патенти України на винахід; 35 тез та текстів доповіді на міжнародних і вітчизняних конференціях.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 8 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Матеріали викладено на 344 сторінках і містять 12 таблиць, 113 рисунків та 8 додатків. У бібліографії наведено 320 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано вибір та актуальність теми, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено наукову новизну отриманих результатів і їх практичну значимість, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами, конкретизовано особистий внесок здобувача, цінність використання результатів дослідження, подано відомості про апробацію результатів дослідження.

У першому розділі проаналізовано науково-технічні джерела інформації щодо основних підходів до створення термостійких полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) триботехнічного призначення. Визначено, що на сучасному етапі розвитку полімерної промисловості найбільш оптимальним з точки зору ціни й якості є комплексний підхід, який включає основні переваги інших підходів до отримання матеріалів на основі полімерів і реалізується за рахунок не тільки підбирання полімерних матриць з високим рівнем термічної стійкості, які випускаються у промислових масштабах, недефіцитних і недорогих наповнювачів, здатних до взаємодії з ними, але й модернізації чи розробки принципово нової технології переробки ПКМ у вироби.

Було обрано оптимальні з точки зору фізико-механічних, трибологічних властивостей і собівартості полімерні матриці з високим рівнем термічної стійкості (ароматичні поліаміди, фторполімери, фенольні смоли) та недорогий наповнювач (силікагель), здатний не тільки покращити рівень їх властивостей, але й зменшити собівартість виробів з цих матеріалів. Для обраних об'єктів дослідження описано основні технології й особливості переробки у вироби, визначено оптимальний з точки зору ефективності напрямок їх покращення, який полягає в модернізації підготовчого етапу переробки розроблених ПКМ, на якому проходить суміщення їх вихідних компонентів у процесі створення полімерних композицій. Проаналізовано сучасні технології суміщення полімерів з наповнювачами і визначено, що для вибраних об'єктів дослідження найбільш оптимальним з точки зору технологічності та собівартості є технологія суміщення вихідних компонентів полімерної композиції на стадії синтезу наповнювача в присутності полімеру.

У другому розділі описано основні хімічні та фізичні характеристики об'єктів дослідження. У якості полімерних матриць з високим рівнем термічної стійкості взято ароматичний поліамід марки фенілон С1, фторполімер – фторопласт-4, фенольна смола на основі ДФСФО. У якості наповнювача – діоксид кремнію силікагель, отриманий у лабораторних умовах з водного розчину натрій силікату при підкисленні розбавленою соляною кислотою до переходу отриманої системи в аквагель. Створення ксерогелю з нього відбувалося за рахунок висушування, подрібнення і промивання.

Розглянуто стандартні технології переробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) у вироби й оснащення для їх здійснення. Описано методи, згідно з якими проведено дослідження структурних характеристик, фізико-механічних, теплофізичних і трибологічних властивостей вихідних полімерів, наповнювача і ПКМ на їх основі, а також обладнання, яке використовувалося для цього.

У третьому розділі теоретично обґрунтовано доцільність використання нового підходу для отримання полімерних композицій на основі вибраних термостійких полімерів. Відповідно до стандартної технології, переробка у вироби термостійких ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО і силікагелю відбувається у три етапи (підготовчий, основний та завершальний). Для їх проведення необхідно задіяти велику кількість енергоємного обладнання (механічна мішалка, гідравлічні преси, сушильна шафа чи муфельна піч, універсальний механообробний центр тощо), що впливає на собівартість виробів з розроблених ПКМ. Тому його модернізація з метою отримання ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО та силікагелю з аналогічним чи кращим рівнем властивостей, ніж у стандартно отриманих, та меншою собівартістю виготовлення виробів є актуальним завданням. Установлено, що одним із основних етапів переробки термостійких ПКМ є підготовчий, на якому відбувається операція суміщення вихідних компонентів при створенні полімерних композицій. Від цієї операції залежить якість розподілу силікагелю в обраних полімерних матрицях на основі фенілону С1, фторопласту-4 і ДФСДО, що є одним із найважливіших чинників, який впливає на рівень властивостей виробів з розроблених ПКМ. Відповідно до їх стандартної технології переробки у вироби, суміщення відбувається за допомогою механічного методу, при якому практично неможливо отримати високу якість розподілу вихідних компонентів у полімерних композиціях. Це пов'язано з ефектом їх сегрегації, який полягає у примусовому розділі частинок полімерів з наповнювачем, що мають різні морфологічні (розміри, форма) і структурні (густина) характеристики, при дії відцентрових сил, сили тяжіння тощо. Тому в роботі запропоновано замінити операцію суміщення вихідних компонентів полімерних композицій з механічного на суміщення (*in situ*) полімерів з наповнювачем у процесі синтезу останнього. Це не тільки усуне вплив ефекту сегрегації на якість розподілу наповнювача в об'ємі полімерів, що у свою чергу сприятиме її покращенню, але й дозволить суттєво спростити технологію переробки ПКМ, зменшить собівартість виготовлення виробів з них.

Виходячи з вищезазначеного, операцію суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на підготовчому етапі технологічного процесу переробки термостійких полімерів (фенілон С1, фторопласт-4 та ДФСФО), наповнених дисперсним наповнювачем силікагелем, модернізовано з урахуванням того, що вихідні дрібнодисперсні полімери додаються до реакційного середовища (наприклад, водний розчин натрій силікату), з якого отримується силікагель, і рівномірно в ньому розподіляються шляхом механічного перемішування у пристрої зі складною формою лопатей. Для створення аквагелю в отриману систему по краплях подається водний розчин кислоти при постійному перемішуванні реакційного середовища. Підкислення відбувається до рН реакційного середовища на рівні 5–7, коли швидкість гелеутворення максимальна. Створена гелеподібна система являє собою аквагель з хаотично розподіленими частинками полімерів у його об'ємі. Подальша переробка гелеподібної системи полягає в її висушуванні з метою отримання ксерогелю, з якого видалено вологу. Слід відзначити, що отриманий

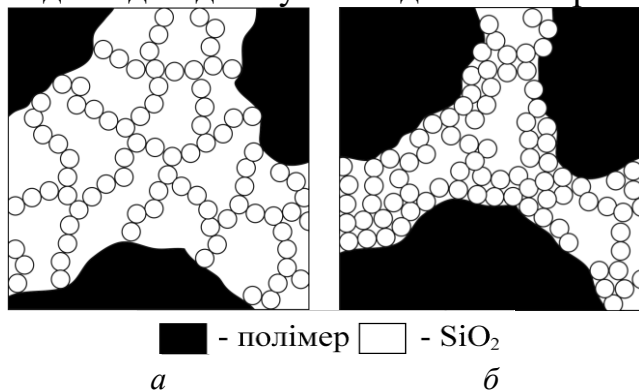


Рисунок 1 – Схематичне зображення процесу створення аквагелю (а) та переходу його у ксерогель (б) в присутності частинок полімерів

частинок і створюють агломерати (рис. 1, б). Підтвердженням цього є мікрофотографії поверхонь частинок вихідного полімеру до і після суміщення (*in situ*) з силікагелем (рис. 2). Відповідно до них, морфологія поверхні частинки вихідного фенілону С1 (рис. 2, а) та його ж у складі полімерної композиції, отриманої з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів (рис. 2, б) мають суттєві відмінності. Так, вихідна частинка полімеру має складну і розвинену поверхню з великою кількістю мікро- та макропор. А поверхня частинки полімеру у складі полімерної композиції, отриманої з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів, частково

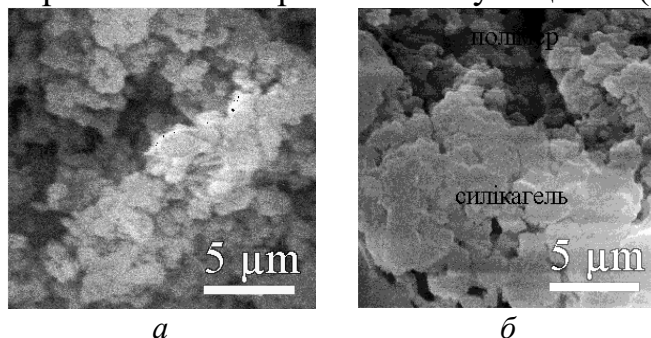


Рисунок 2 – Мікрофотографії поверхонь частинок фенілолу СІ вихідного (а) та у складі полімерної композиції (б), отриманої з використанням суміщення (in situ) її вихідних компонентів

полімер – наповнювач під час переробки розроблених ПКМ у вироби.

Розроблено технологію отримання полімерних композицій на основі фенілону С1, фторопласту-4,ДФСФО і силікагелю з використанням суміщення (in situ) їх вихідних компонентів у процесі синтезу наповнювача. Технологія синтезу силікагелю при цьому практично не відрізняється від вихідної

(див. розділ 2) зі зміною, яка полягає в тому, що у реакційну суміш (водний розчин Na_2SiO_3) додаються дрібнодисперсні частинки полімерів у кількості, визначеній відповідно до виходу діоксиду кремнію з водного розчину метасилікату натрію з метою отримання полімерних композицій з вмістом наповнювача від 10 до 80 % ваг. Отримання полімерної композиції проходить відповідно до схеми, наведеної на рис. 3.

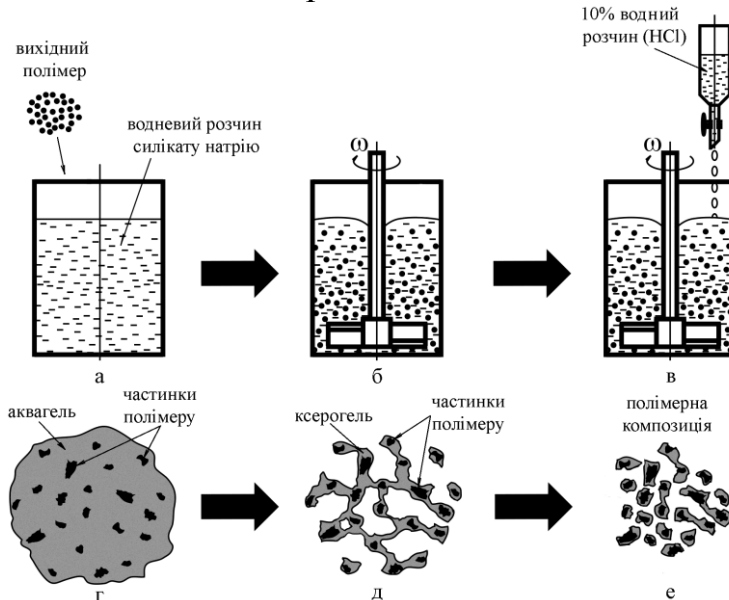


Рисунок 3 - Схема суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій на основі фенілону С1, фторопласту-4,ДФСДО і силікагелю в процесі синтезу наповнювача

Відповідно до неї, дрібнодисперсні частинки вихідних полімерів (фенілон С1, фторопласт-4 і ДФСФО) додаються в реакційне середовище, у якому відбувається синтез силікагелю (рис. 3, а). Виходячи з того, що в роботі для отримання наповнювача використовувалася саме золь-гель технологія, то в якості реакційного середовища було обрано водний розчин силікату натрію. Його отримано при розчиненні у дистильованій воді метасилікату натрію ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), найбільш хімічно чистої форми силікату з тих, що виробляються у промислових масштабах. Для досягнення хаотичного розподілу дрібнодисперсних частинок полімерів у реакційному середовищі (рис. 3, б) використано швидкохідну (до 1000 об/хв) лопатеву механічну мішалку, яка дозволяє отримувати суспензію, що складається з твердих дрібнодисперсних частинок полімерів, які знаходяться у водному розчині силікату натрію. Якість їх розподілу в реакційному середовищі встановлено за допомогою візуального методу – зміною забарвлення суспензії. При постійному перемішуванні в отриману суспензію крапельним шляхом додається 10 % водний розчин соляної кислоти (рис. 3, в). Підкислення отриманої суспензії проводиться до створення стабільного гелю.

Вибір соляної кислоти (HCl) обумовлений тим, що вона поруч із сірчаною найчастіше використовується при синтезі силікагелю. Однак побічні продукти реакції підкислення силікату натрію при використанні соляної кислоти (хлорид натрію NaCl) порівняно із сірчаною (сульфід натрію Na_2SO_4) значно простіше видалити з висушеного аквагелю (ксерогелю) при промиванні

у дистильованій воді, оскільки хлорид натрію набагато краще розчиняється в ній, ніж сульфат. Підкислення отриманої суспензії відбувалося до досягнення рН 6,5–7,5. Це обумовлено тим, що при цих значеннях швидкість створення гелю максимальна і не перевищує декількох секунд, що є необхідною умовою для створення аквагелю з рівномірно розподіленими дисперсними частинками полімерів у ньому. Силікагелі, створені при підкисленні реакційного середовища до значень рН від 6 до 8 мають досить розвинену питому поверхню до $400 \text{ м}^2/\text{г}$. Після підкислення реакційного середовища створений при цьому аквагель являє собою систему, яка складається із відносно стабільної гелю фази, у якій рівномірно розподілено тверді дрібнодисперсні частинки полімерів (рис. 3, г). Після цього отриманий аквагель з частинками полімерів висушено в термошафі до його переходу у ксерогель (гель, з якого видалено рідку фазу так, що структура стає стиснутою за рахунок сил поверхневого натягнення, які діють при видаленні з пор рідини) і набуття постійної ваги (рис. 3, д).

Для визначення оптимальної температури і часу сушіння отриманого аквагелю було проведено його ізотермічний термогравіметричний аналіз, результати якого представлено на рис. 4. Інтервал температур сушіння аквагелю (від 60 до 110°C) обумовлений тим, що при температурах понад 60°C спостерігається помітне видалення вологи з аквагелю, однак сушіння при температурах понад 100°C змінює його морфологію, суттєво зменшуючи поверхню отриманого силікагелю. Відповідно до результатів досліджень встановлено, що зі збільшенням температури і часу сушіння втрата ваги за рахунок видалення вологи та летких компонентів отриманого аквагелю збільшується. Так, при температурах від 60 до 90°C упродовж 180 хв сушіння видалення вологи і летких компонентів із аквагелю відбувається не повністю, що ускладнює подальшу переробку отриманого продукту. Повне їх видалення

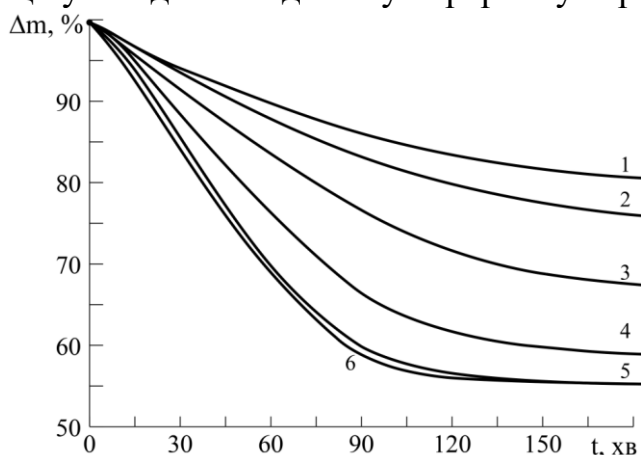


Рисунок 4 - Залежності втрати ваги (вологи та летких компонентів) аквагелем від тривалості (t) сушіння при температурах: 1 – 60°C ; 2 – 70°C ; 3 – 80°C ; 4 – 90°C ; 5 – 100°C ; 6 – 110°C .

можливе при температурі 100 – 110°C , причому видалення вологи з аквагелю при 100°C відбувається впродовж 130 – 160 хв, а при 110°C – за 120 – 150 хв. Тобто, відповідно до проведених досліджень, оптимальною температурою сушіння отриманого аквагелю є 100°C , а повне видалення вологи і летких компонентів з нього відбувається впродовж 120 – 150 хв. Отриманий після сушіння ксерогель (рис. 3, д) було подрібнено на дезінтеграторі до мінімально можливих розмірів частинок, основний розмір яких для

подрібненого ксерогелю з фенілоном С1 складає від 20 до 50 мкм, а для матеріалів із фторопластом-4 та ДФСФО – 30 – 60 мкм. Створений ксерогель являє собою суміш твердих дисперсних частинок полімерів з діоксидом кремнію і побічними продуктами реакції (NaCl і залишки кислоти), які

видалялися з нього при промиванні в дистильованій воді, нагрітій до температури 70°C впродовж 10 хв. Це дозволяє максимально видалити з неї побічні продукти реакції (NaCl і залишки кислоти). Після цього з ксерогель зневоднюється шляхом підсушування до постійної ваги. Отриманий продукт (рис. 3, е) є готовою двокомпонентною полімерною композицією, яка складається з частинок полімерів (фенілон С1, фторопласт-4, ДФСФО) та силікагелю. Подальша її переробка у виробі відбувалася відповідно до стандартної технології.

Основним технологічним параметром при отриманні полімерних композицій є якість розподілу їх вихідних компонентів, яку визначено за коефіцієнтом неоднорідності отриманих сумішей, що показує відношення середнього квадратичного відхилення вмісту вихідних компонентів отриманих полімерних композицій до їх заданих значень. Відповідно до цього, чим краща якість розподілу, тим менші значення має коефіцієнт неоднорідності. У таблиці 1 подано порівняльний аналіз значень коефіцієнтів неоднорідності розроблених полімерних композицій, отриманих за стандартною технологією і з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій. При порівнянні коефіцієнтів неоднорідності полімерних композицій, отриманих з використанням стандартної технології і суміщення (in situ) їх вихідних компонентів встановлено, що останні мають на 10–30 % менші його значення. Це вказує на більш якісний розподіл вихідних компонентів у цих полімерних композиціях, порівняно зі стандартно отриманими.

Отже, запропонована технологія отримання полімерних композицій на основі дисперсних термостійких полімерів (фенілон С1, фторопласт-4, ДФСФО) і силікагелю дозволяє не тільки суттєво спростити процес їх переробки у виробі, але й отримувати органічно-неорганічні системи з високим ступенем гомогенізації вихідних компонентів та покращеними умовами взаємодії на границі розділу фаз дрібнодисперсний полімер – наповнювач.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів неоднорідності полімерних композицій на основі фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО і силікагелю, отриманих за стандартною технологією та з використанням (in situ) суміщення їх вихідних компонентів

Суміщення компонентів полімерних композицій	Значення коефіцієнтів неоднорідності полімерних композицій											
	фенілон С1				Фторопласт-4				ДФСФО			
	вміст наповнювача силікагелю, % ваг.											
	10	20	40	60	10	20	40	60	20	40	60	80
стандартне	1,9	2,2	3,2	3,9	1,9	2,2	3,1	3,6	2,0	3,6	3,9	4,5
in situ	1,7	1,9	2,2	2,5	1,6	1,7	2,1	2,4	1,9	2,4	2,6	3,0

У четвертому розділі розглянуто вплив вмісту і технологій суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на підготовчому етапі переробки розроблених ПКМ у виробі на їх морфологію та структуру. Відповідно до праць Р. Айлера, на поверхні силікагелю наявні одиночні, суміжні та суміжні гідратовані гідроксильні групи, здатні взаємодіяти з полярними молекулами полімерів при їх спільній переробці у виробі. Для доведення цього припущення було проведено теоретичні й експериментальні дослідження щодо можливості взаємодії силікагелю із вибраними полімерними матеріалами з високим рівнем термічної стійкості (на прикладі фенілону С1). На початкових етапах обрано

модельні сполуки, які забезпечували б можливість адекватного відтворення особливостей будови і внутрішньомолекулярної взаємодії, що виникають у системі полімер – наповнювач. Для ароматичного поліаміду фенілону С1 вибрано елементарну ланку полімерної макромолекули, а для силікагелю кращою модельною сполукою у найпростішому наближенні є структура, що являє собою тетрациклічний каркас, побудований з атомів силіцію й кисню, на поверхні якого зосереджено чотири ізольовані одна від одної еквівалентні групи – OH.

Беручи до уваги все вищезазначене, із застосуванням трипараметричного гібридного функціоналу густини в наближенні B3LYP/6-311++G(d,p) в роботі здійснено оптимізацію геометрії модельних сполук (рис. 5) у газовій фазі з одночасним розрахунком відповідних наборів коливальних частот, згідно з якими локалізовані стаціонарні точки охарактеризовано як мінімуми на поверхні потенційної енергії. Розподіл електронної густини з визначенням зарядів на атомах досліджуваних структур вивчено в рамках теорії натуральних зв'язуючих орбіталей.

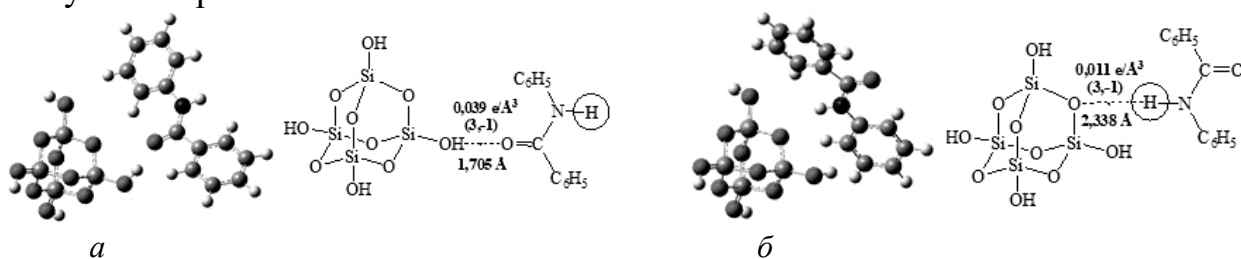


Рисунок 5 - Структури молекулярних комплексів у системі поліамід – силікагель із деякими типовими водневими зв'язками

Слід відзначити, що найбільше на стабілізацію структур, поряд зі слабкими взаємодіями електростатичного характеру, впливають міцні водневі зв'язки, утворені за участю місткової амідної групи та гідроксилу (~77 %), а також атома кисню каркасного фрагменту (~23 %), оцінені у межах АІМ теорії Бейдера. При цьому розраховані енергії стабілізації становлять 32,4 та 12,5 кДж/моль відповідно. Значної уваги також було приділено визначенню загальних енергетичних ефектів гідратації нерелаксованих геометрій міжмолекулярних комплексів із застосуванням методу поляризуючого континууму PCM-B3LYP/6-311++G(d,p)//B3LYP/6-311++G(d,p) ($\epsilon=78.4$) без деталізації будови окремих сольватних оболонок. У цьому випадку різниця енергій для структур (рис. 5, а, б) становила не менше 12,0 кДж/моль на користь взаємодій першого типу.

Для підтвердження вирішальної ролі ефектів водневого зв'язування у структурі ПКМ було проведено їх ІЧ-спектроскопічні дослідження і здійснено детальний аналіз їх коливальних спектрів. Для підвищення точності розрахункових даних у їх відтворенні головних спектральних характеристик досліджуваних систем було використано допоміжні значення масштабних множників, які у випадку трипараметричного гібридного функціоналу B3LYP становили 0,9580 та 0,9688 для базисних наборів 6-311+G(d) та 6-311+G(d,p), відповідно. Одержані результати представлено в таблиці 2

Таблиця 2 - Гармонійні коливальні частоти (см^{-1}), одержані експериментальним шляхом, а також розраховані в наближенні DFT-B3LYP/6-311++G(d,p)

Відносна інтенсивність, форма смуги ^a	Експериментальні дані				Модельна сполука (рис. 5, а)	Модельна сполука (рис. 5, б)	Пояснення
	Фенілон C1	Силікагель	85 % фенілон C1 + 15 % силікагель	70 % фенілон C1 + 30 % силікагель			
w., wd.	3405	3460	3410	3419	3788	3790	$\nu_{(\text{OH})}$ ОН груп чи наявність води
	3267	—	3345	3345	3507	3459	$\nu_{(\text{NH})}$ амідних груп
v. w.	2921	—	2925	3000	3092	3093	$\nu_{(\text{CH})}$ бензольних кілець
	2851	—	2914	2897	3084	3086	(те ж саме)
s.	1649	—	1652	1655	1647	1673	$\nu_{(\text{CO})}$ амідних груп
v. s.	1605	—	1609	1611	1586	1588	$\nu_{(\text{CC})}$ бензольних кілець з $\delta_{(\text{NH})}$ амідних груп
	1526	—	1539	1539	1567	1568	
	1474	—	1486	1486	1517	1520	
s.	1412	—	1408	1412	1480	1479	$\delta_{(\text{CH})}$ бензольних кілець
	1307	—	1319	1319	1423	1420	(те ж саме)
	1237	—	1250	1224	1305	1294	$\nu_{(\text{CN})}$ з $\delta_{(\text{CH})}$ бенз. кілець
v. s., wd.	—	1087	1084	1091	1056	1024	$\nu_{(\text{SiO})}$
w.	—	796	782	785	781	767	$\delta_{(\text{OH})}$
	719	—	717	719	697	698	$\delta_{(\text{CH})}$ бензольних кілець
	684	—	684	686	688	689	(те ж саме)
v. w.	570	—	568	571	586	624	$\delta_{(\text{NH})}$ амідних груп
s.	—	452	459	467	341	343	$\delta_{(\text{SiO})}$

^a s. — сильна; w. — слаба; wd. — середня; v. — дуже; ν — валентні коливання; δ — деформаційні коливання

Аналіз одержаних нами результатів свідчить про присутність широких смуг при 3267 або 3345 см^{-1} , які відповідають валентним коливанням зв'язків (NH) амідних груп. В області $\sim 1650 \text{ см}^{-1}$ знаходиться інтенсивна смуга «Амід I», що є характерною для карбонілу зі значним внеском водневого зв'язування. Дійсно, у випадку розрахованих структур (рис. 5) спостерігається помітне зміщення цієї смуги поглинання з 1673 см^{-1} для «ізолюваної» групи ($>\text{C}=\text{O}$) до 1647 см^{-1} у комплексі із водневим зв'язком. Аналогічне зміщення сигналу $\nu(\text{NH})$ відбувається з 3507 до 3459 см^{-1} . Зрештою, в області $\sim 1530 \text{ см}^{-1}$ спостерігається смуга «Амід II», що відповідає валентним коливанням карбон-карбонових зв'язків арильних фрагментів за участю $\delta(\text{NH})$. Характеристична смуга «Амід III» спостерігається поблизу 1237 см^{-1} та відповідає $\nu(\text{CN})$ за участю $\delta(\text{CH})$ бензенових кілець.

З цієї точки зору принципового значення набуває також якісна ідентифікація сигналів силікагелю, що представлені широкою й інтенсивною смугою в області $\sim 1090 \text{ см}^{-1}$, а також вузькими смугами поглинання меншої інтенсивності при 780 та 460 см^{-1} . Причому, у першому випадку переважають внески валентних коливань окремих зв'язків (Si–O), а у другому — $\delta(\text{OH})$ та $\delta(\text{SiO})$ в умовах ефективного водневого зв'язування. Слід зауважити, що валентні коливання гідроксильних груп також можуть знаходити своє відображення на ділянці спектру 3405–3419 см^{-1} , яка зазвичай відповідає за

присутність слідових кількостей води у досліджуваних зразках полімеру і композитів.

Таким чином, отримані результати квантово-хімічних розрахункових досліджень теоретично підтверджують наявність взаємодії між поверхнею силікагелю і молекулами фенілону С1. Результати розрахунків добре узгоджуються зі спектральними даними щодо будови досліджуваних полімерних матеріалів та можуть мати принципове значення з точки зору попередньої оцінки спорідненості окремих компонентів при створенні нових композиційних матеріалів на їх основі.

Однією з основних властивостей, яка описує структуру полімерів та ПКМ на їх основі, є густина. Її значення для неоднорідних систем (якими є розроблені ПКМ) суттєво впливають на їх рівень властивостей унаслідок того, що при створенні ПКМ неможливо уникнути мікро- та макродефектів структури, її орієнтації тощо. Результати досліджень густини матеріалів на основі фенілону С1, фторопласту-4 і ДФСФО, наповнених силікагелем і отриманих різними технологіями порівняно з адитивними їх значеннями зображено на рис. 6. Відповідно до проведених експериментів адитивна густина для матеріалів на основі термостійких полімерів (фенілон С1 та фторопласт-4) має більші значення, ніж експериментальна, що пояснюється наявністю в отриманих ПКМ макро- та мікродефектів структури у виробках з розроблених ПКМ, які негативно впливають на рівень їх фізико-механічних властивостей. Слід відмітити, що густина всіх досліджених ПКМ, отриманих з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерної композиції, має на 5–15 % більші значення, залежно від умісту наповнювача в полімері, ніж для ПКМ, отриманих стандартною технологією.

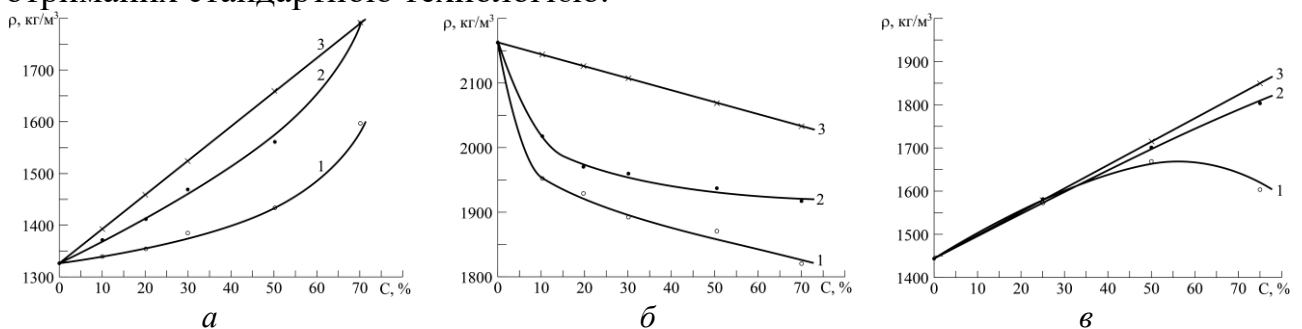


Рисунок 6 - Залежності експериментальної (1,2) та адитивної (3) густини ρ від вмісту силікагелю у ПКМ на основі фенілону С1 (а), фторопласту-4 (б) і ДФСФО (в), отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Це пояснюється, з одного боку, зменшенням мікро- та макродефектів структури, що є наслідком взаємодії полімерної матриці з більшою кількістю частинок наповнювача за рахунок більш якісного його розподілу в об'ємі полімеру. З іншої боку, більші значення густини ПКМ, отримані з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів пояснюються їх структурними перетвореннями порівняно з матеріалами, отриманими за стандартною технологією. Для підтвердження даного припущення було проведено рентгеноструктурні дослідження отриманих ПКМ. На рис. 7 представлено рентгенограми ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4,

отриманих за стандартною технологією та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій.

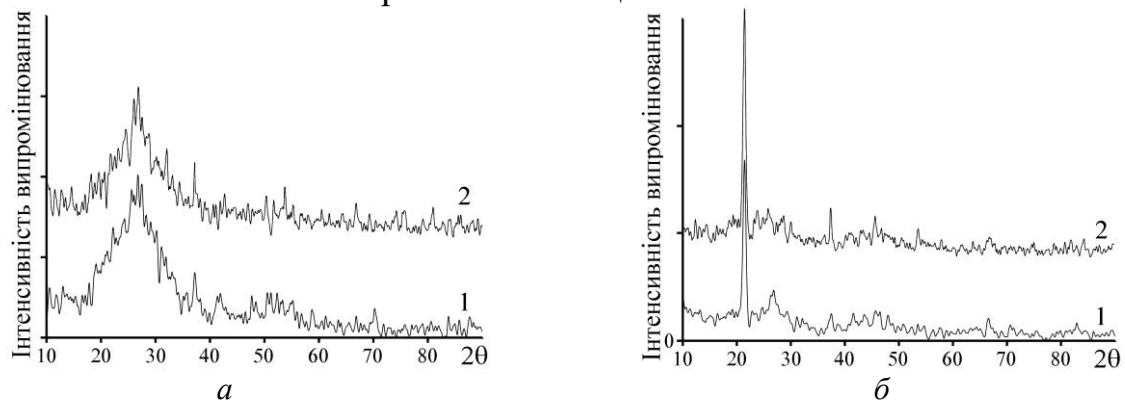


Рисунок 7 - Рентгенограми ПКМ на основі фенілону C1 (а), фторопласту-4 (б) та силікагелю, отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Рентгенограми досліджених ПКМ, отриманих за стандартною технологією та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів, мають подібний характер з деякими відмінностями. На них зображено 2 яскраво виражених аморфних гало в області кутів Вульфа – Бреґґа (2θ) 15-30 та 40–60, які вказують на наявність аморфної фази в розроблених ПКМ і характерні як для досліджених полімерних матриць, так і для наповнювача. Також на рентгенограмах зображено три яскраво виражені піки в області кутів (2θ) 20–21, 25–27, 37–38 та 53–55, які характеризують кристалічну фазу досліджених ПКМ. Проводячи підрахунок міжплощинних відстаней структурних елементів ПКМ, які відповідають даним пікам, і порівнявши їх значення із довідниковими, робимо висновок, що пік в області кутів Вульфа – Бреґґа (2θ), який відповідає 20–21, характерний для фторопласту-4, а піки 25–27, 37–38 та 53–55 - для діоксиду кремнію різних модифікацій (α -кварц і α -кristобаліт). Слід відзначити, що на рентгенограмах ПКМ, отриманих з використанням (*in situ*) суміщення вихідних компонентів, спостерігаються більш інтенсивні піки в діапазоні кутів Вульфа-Бреґґа (2θ) 20-30, що свідчить про більш високу ступінь кристалічності цих ПКМ порівняно з матеріалами отриманими за стандартною технологією.

Викликає зацікавленість більш докладно дослідити морфологію наповнювача силікагелю у ПКМ, отриманих за стандартною технологією та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій. Мікрофотографії поверхонь сколів цих матеріалів приведено на рис. 8. На рис. 8, а, б подано мікрофотографії сколів ПКМ, отримані за стандартною технологією. Відповідно до них, наповнювач має сферичну форму (виноска А з рис. 8, а, б) та за своєю морфологією дуже подібний до вихідного силікагелю. Тобто, відповідно до проведених досліджень можна стверджувати, що при стандартній технології отримання ПКМ морфологія та структура наповнювача силікагелю суттєво не змінюється. На рис. 8, в, г подано мікрофотографії сколів ПКМ, отриманих з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій, на яких морфологія наповнювача значно відрізняється від вихідного силікагелю. Він має як

звичайну сферичну, так і ламілярно-стрічкову структуру (виноска А з рис. 8, в, г) на відміну від сферичної для наповнювача у полімерах, отриманих стандартною технологією. Зміна морфології силікагелю пов'язана з особливостями його структуроутворення при синтезі в присутності дисперсного полімеру.

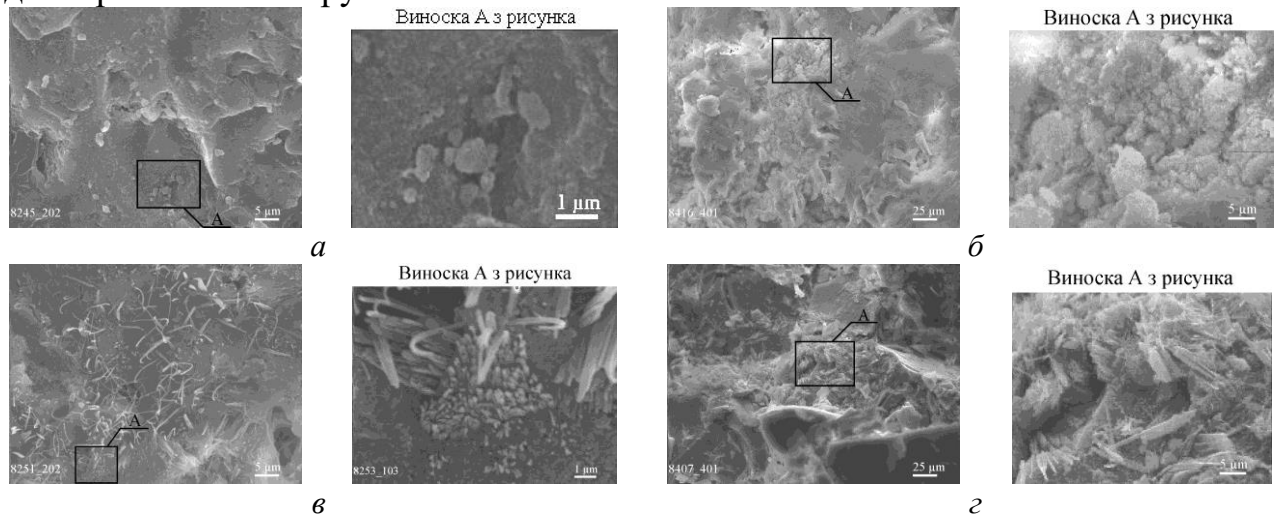


Рисунок 8 - Мікрофотографії поверхонь сколів ПКМ на основі фенілону С1 (а, в), фторопласту-4 (б, г), наповнених силікагелем та отриманих за стандартною технологією (а, б) і з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (в, г)

Для остаточного визначення форми та морфології наповнювача у ПКМ, отриманих з використанням суміщення (in situ), було видалено полімерну матрицю методом прокалювання у муфельній печі за температури 1000°C. Мікрофотографії неорганічного наповнювача, отриманого після видалення полімерної матриці з ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4, приведені на рис. 9.

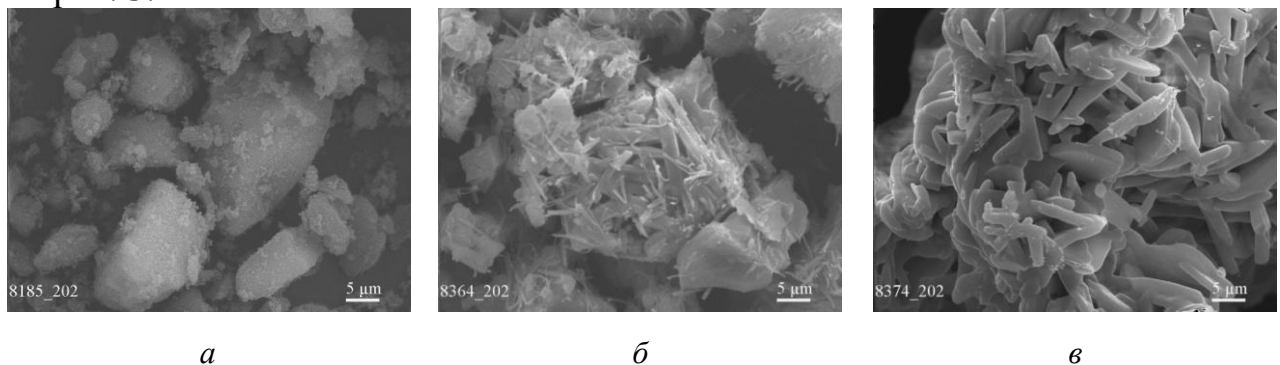


Рисунок 9 – Мікрофотографії силікагелю після прокалювання зразків з ПКМ на основі фенілону С1 (а, б) та фторопласту-4 (в), отриманих за стандартною технологією (а) і з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (б, в)

З отриманих знімків видно, що наповнювач у ПКМ, отриманих за стандартною технологією, має сферичну форму, яка співпадає із вихідним силікагелем, а матеріали, отримані з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій, мають як сферичну, так і ламілярно-стрічкову структуру. Тобто синтез силікагелю в присутності полімерних частинок змінює його морфологію, що суттєво впливає на

структуру термостійких ПКМ і безпосередньо – на рівень фізико-механічних і теплофізичних властивостей виробів з них.

Для підтвердження цього факту було проведено рентгенофазові дослідження частинок силікагелю, видалених з розроблених термостійких ПКМ. Їх результати наведено на рис. 10.

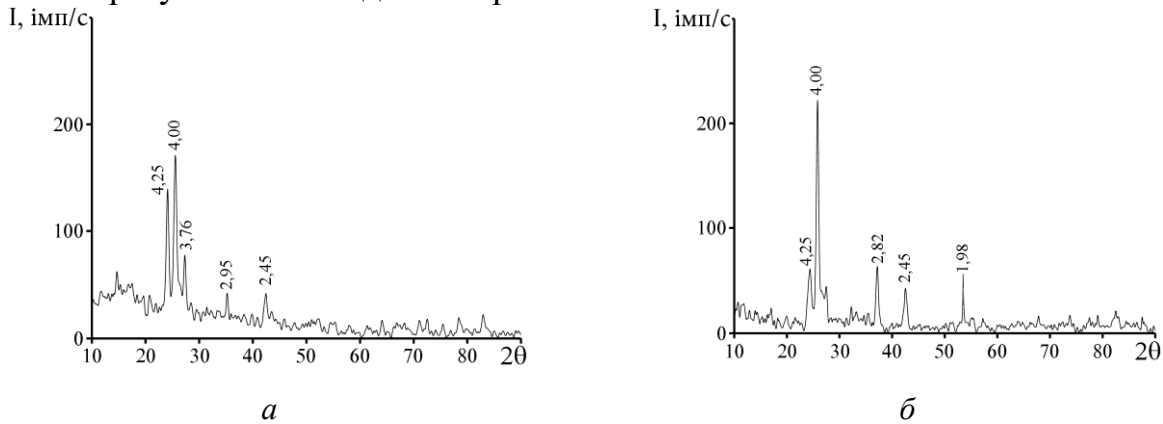


Рисунок 10 - Рентгенограми силікагелю, отриманого прокалюванням полімерних композицій на основі фторопласту-4 та силікагелю, отриманих за стандартною технологією (а) і з використанням суміщення (in situ) їх вихідних компонентів (б)

Рентгенограми наповнювача, отриманого в результаті прокалювання полімерних композицій на основі фторопласту-4 та силікагелю, створених за стандартною технологією та з використанням суміщення (in situ), мають подібний характер з деякими відмінностями. Так, вони є матеріалами з високим ступенем кристалічності з яскраво вираженими піками в області кутів Вульфа – Брега (2θ) 22–28 та 41–43. Причому, інтенсивність піків у наповнювача, отриманого з полімерної композиції, створеної з використанням суміщення (in situ), значно вища, ніж у силікагелю з полімерної композиції, отриманої за стандартною технологією. Також слід відзначити наявність нових піків в області кутів Вульфа–Брега (2θ) 38–39 та 53–54 у силікагелю з матеріалу, отриманого з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій. Відповідно до результатів проведеного рентгенографічного аналізу, силікагель, видалений методом прокалювання з полімерних композицій на основі фторопласту-4, створених за стандартною технологією, має найбільш інтенсивні піки, які відповідають наступним міжплощинним відстаням (4,25; 4,0; 3,76; 2,95; 2,45). Відповідно до довідникових матеріалів, міжплощинні відстані 4,25 і 2,45 відповідають діоксиду кремнію у формі α -кварцу, 4,00 та 2,95 - діоксиду кремнію у формі α -кристобаліту і 3,76 - діоксиду кремнію у формі α -тридиміту. Для силікагелю, отриманого в результаті прокалювання полімерних композицій на основі фторопласту-4, створених з використанням суміщення (in situ), найбільш інтенсивні піки відповідають наступним міжплощинним відстаням (4,25; 4,0; 2,82; 2,45; 1,98). Відстані 4,25; 2,45 та 1,98 відповідають діоксиду кремнію у формі α -кварцу, 4,0 та 2,82 95 - діоксиду кремнію у формі α -кристобаліту. Тобто можна зробити висновок, що отриманий наповнювач є сумішшю діоксидів кремнію різних поліморфних модифікацій, а саме α -кварцу, α -

кристобаліту та α -тридіміту, подібних за хімічною будовою та різних за кристалічною структурою, а відповідно до цього, і рівнем властивостей.

У п'ятому розділі проведено оптимізацію технологічних параметрів при переробці термостійких ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4,ДФСФО та силікагелю у виробі. Для розроблених ПКМ технологія переробки у виробі складається з 3 етапів: підготовчого, основного та завершального. На підготовчому етапі відбуваються операції суміщення вихідних компонентів полімерних композицій та їх брикетування. Операція суміщення є однією з основних при переробці ПКМ, оскільки вона визначає якість розподілу вихідних компонентів у ПКМ, що суттєво впливає на рівень властивостей отриманих виробів з них. У розділі розглянуто як стандартну технологію суміщення (з використанням механічних перемішувальних пристроїв), так і розроблену з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій на стадії синтезу наповнювача. Основною характеристикою при суміщенні вихідних компонентів полімерних композицій на механічних перемішувальних пристроях є інтенсивність перемішування, яка визначається часом, необхідним для отримання полімерних композицій з їх якісним розподілом їх вихідних компонентів. Відповідно до проведених досліджень встановлено, що оптимальним часом, необхідним для якісного суміщення компонентів досліджених полімерних композицій є 90–150 с залежно від вмісту наповнювача в полімері.

Для підвищення технологічності при переробці полімерних композицій на основі досліджених полімерів (фенілон С1, фторопласт-4 та ДФСФО) у виробі їх попередньо брикетують. Ця операція відбувається за допомогою прикладання певного зусилля впродовж деякого часу, необхідного для створення суцільного брикету з достатнім рівнем міцності. За оптимальний тиск і час витримки узяті такі значення, при яких досягаються максимальні значення щільності, відповідно, і міцності створюваних брикетів. Встановлено, що оптимальними значеннями тиску брикетування і часу витримки брикетів під тиском для матеріалів на основі фенілону С1 складають від 120 до 180 МПа при витримці впродовж 150–200 с, для матеріалів на основі фторопласту-4 від 40 до 80 МПа при витримці впродовж 120–180 с і для матеріалів на основі ДФСФО від 160 до 220 МПа при витримці впродовж 210–240 с залежно від вмісту наповнювача у полімерній матриці.

На основному етапі переробки ПКМ відбуваються операції термообробки брикетів (при необхідності), операція пресування за заздалегідь визначеною методикою й охолодження готових виробів. У результаті проведення термогравіметричного аналізу полімерних матриць визначено, що фторопласт-4 є гідрофобним, а фенілон С1 та ДФСФО - гідрофільними матеріалами, які поглинають до 10 % вологи з навколишнього середовища, що є негативним фактором при переробці ПКМ на їх основі у виробі завдяки тому, що волога може виступати в якості каталізатора їх передчасної деструкції. Тому з брикетів на основі фенілону С1, ДФСФО видалено вологу шляхом їх попереднього підсушування. Вибір оптимальних температур і часу підсушування відбувався в

результаті проведення термогравіметричного аналізу брикетованих прес-матеріалів при заданій температурі впродовж визначеного часу (рис. 11).

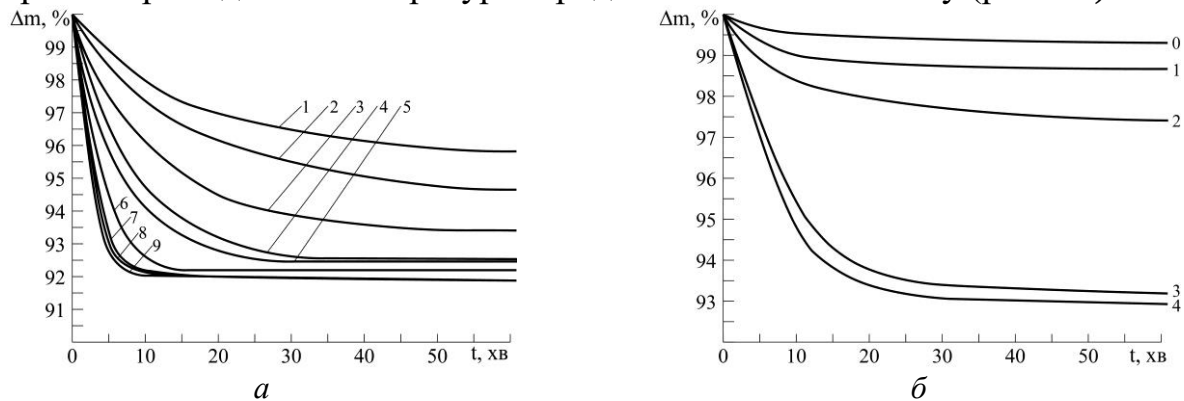


Рисунок 11 - Залежності втрати ваги брикетованого прес-матеріалу на основі фенілону С1 (а) та ДФСФО (б) від часу підсушування (t) при визначених температурах: 0 – 50°C; 1 – 70°C; 2 – 90°C; 3 – 110°C; 4 – 130°C; 5 – 150°C; 6 – 170°C; 7 – 190°C; 8 – 210°C; 9 – 230°C

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що оптимальним інтервалом температур підсушування брикетів на основі фенілону С1 є 190–230°C, при якій вдається найбільш повно видалити вологу з брикетів (рис. 11, а). Причому залежно від обраної температури буде відрізнятися і тривалість сушіння. Вибір температури з оптимального інтервалу, а відповідно, і часу сушіння брикетів обумовлений технологічними можливостями виробництва й економічною доцільністю проведення операції. Слід відзначити, що час, необхідний для видалення води і летких компонентів із брикетів різної форми, буде відрізнятися, що пов'язано з необхідністю досягнення повного їх прогрівання по всьому об'єму до вибраної температури.

Для брикетів на основі ДФСФО було встановлено, що найбільша втрата води та летких компонентів спостерігається при температурах від 110 до 130°C (рис. 11, б). Причому втрата ваги брикетів при цих температурах суттєво не відрізняється, тому в якості оптимальної температури сушіння можна порекомендувати температуру 110°C, що дозволяє отримати максимальний ефект при мінімальних витратах електричної енергії на процес сушіння. Оптимальним часом сушіння при цій температурі є 30–35 хв, упродовж якого спостерігається повне виділення води і летких компонентів з брикетів на основі фенольної смоли.

Наступна операція основного етапу переробки розроблених ПКМ є їх безпосереднє формування при визначених тисках і температурах. Для матеріалів на основі фенілону С1 і ДФСФО вона полягає у пресуванні у формах з підігрівом, а для матеріалів на основі фторопласту-4 – у спіканні у термошафах. До основних параметрів переробки розроблених ПКМ у виробі належать температура переробки, тиск і час витримки. Визначення температури і тиску при переробці ароматичного поліаміду проведено шляхом вивчення їх впливу на фізико-механічні властивості отриманих виробів. За оптимальну температуру і тиск взято ті, при яких отримані вироби мають найбільш високий рівень властивостей. Результати досліджень наведено на рис. 12.

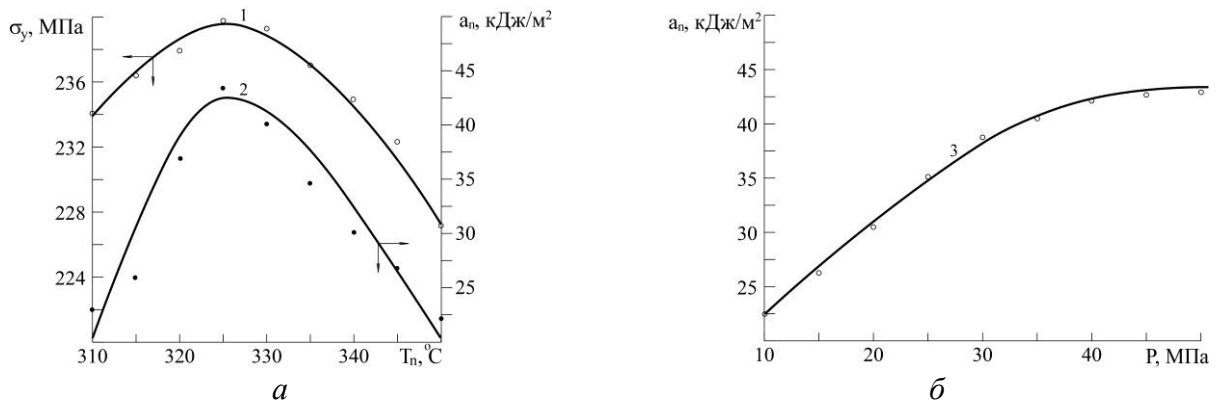


Рисунок 12 – Залежності напруження при межі текучості при стисканні σ_y (1) та ударної в'язкості a_n (2,3) від температури T_n (а) та тиску пресування P (б) при переробці матеріалу на основі фенілону С1

Відповідно до отриманих залежностей, оптимальними значеннями температур переробки та тиску для фенілону С1 є 323–327°С та 40 МПа. Після витримки під тиском відбувається охолодження виробів до температури нижче 270°С (температура склування фенілону). Швидкість охолодження не повинна бути більшою, ніж 20°С/хв, інакше це може призвести до значних внутрішніх напружень у готових виробах, які у свою чергу негативно вплинуть на фізико-механічні властивості.

Подальша переробка брикетів на основі фторопласту-4 полягає у їх спіканні. Одними із основних параметрів даної операції є температура спікання і час витримки при визначеній температурі. Для знаходження оптимальних значень даних параметрів було проведено дослідження їх впливу на фізико-механічні характеристики матеріалів на основі фторопласту-4 (рис. 13).

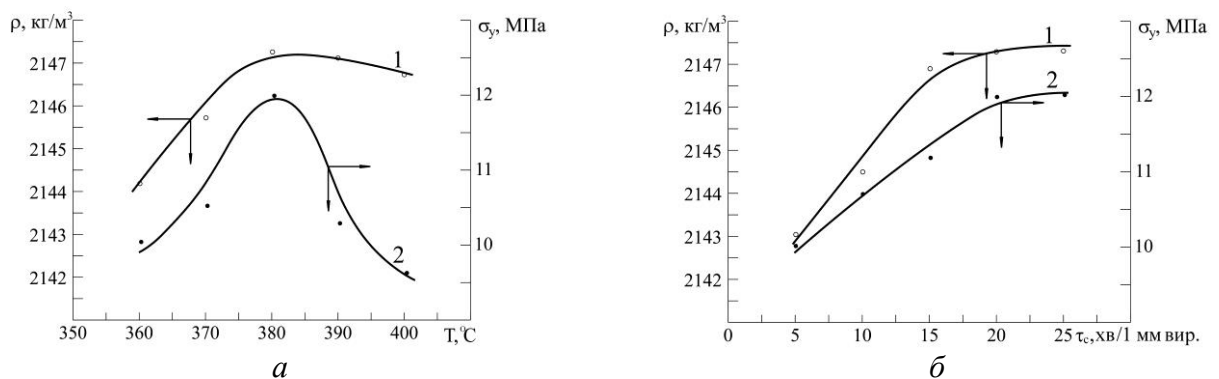


Рисунок 13 - Залежності густини ρ (1) та напруження при межі текучості при стисканні σ_y (2) від температури T (а) та часу витримки τ_c (б) при спіканні матеріалу на основі фторопласту-4

Відповідно до проведених досліджень (рис. 13), оптимальними значеннями температур переробки і часу витримки для фторопласту-4 є 375–385°С та 20 хв на 1 мм виробу.

Підсушені брикети на основі фенольної смоли переробляються у вироби за допомогою компресійного пресування у формах з підігрівом. При даному методі переробки таких полімерів на якість виробів найбільше впливають температура і час витримки під тиском, які встановлювалися відповідно до значень напруження при межі текучості при стисканні зразків з отриманої фенольної смоли. Для цього було проведено експерименти для знаходження

напруження при межі текучості при стисканні дослідженої фенольної смоли залежно від температури переробки і часу витримки (рис. 14). Відповідно до проведених досліджень зі збільшенням температури переробки і часу витримки

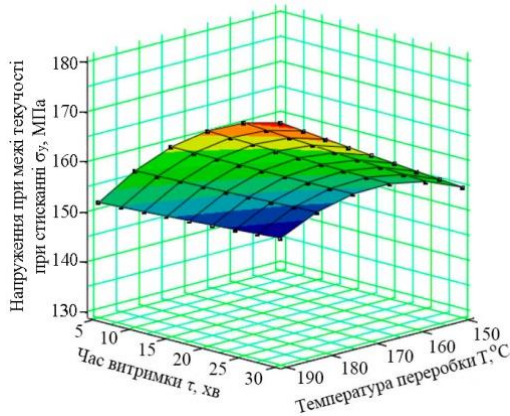


Рисунок 14 – Залежність напруження при межі текучості при стисканні σ_y ДФСФО від температури переробки T і часу витримки τ при переробці у виробі

збільшується напруження при межі текучості при стисканні. Причому температура переробки більше впливає на його збільшення, ніж час витримки. Тому, відповідно до проведених досліджень, оптимальною температурою переробки та часом витримки є 185–190°C та 15–20 хв. При даних параметрах пресування вдається досягти максимального значення напруження при межі текучості при стисканні 172 МПа. Подальше збільшення температури і часу витримки суттєво не впливає на досліджену характеристику. На завершальному етапі переробки вироби із отриманих матеріалів підлягають механічній обробці для надання

поверхням деталей необхідних характеристик і зовнішнього вигляду. У більшості випадків для цього використовується токарна обробка на універсальних металорізальних верстатах і токарних автоматах. Для її проведення було обрано токарний різець з твердих сплавів (ВК4, ВК8, Т15К6 тощо) з наступними параметрами різальної кромки різця: задній кут $\alpha = 20^\circ$, передній кут 10° , головний кут в плані $\phi = 45^\circ$, допоміжний 3° , кут нахилу різальної кромки $\lambda = 0^\circ$. У результаті експериментальних досліджень значень сил різання при точінні розроблених ПКМ визначено оптимальні значення режимів різання. Так, оптимальними інтервалом швидкостей різання при токарній обробці ароматичного поліаміду фенілону С1 і фенопласту на основі ДФСФО є 1 до 2,5 м/с та 2,5 до 4 м/с; глибини різання від 0,5 до 2 мм та подачі при різанні фенілону С1 є значення з інтервалу 0,07–0,14 мм/об, а для фенопласту із 0,07–0,10 мм/об.

У шостому розділі описано результати системних досліджень впливу складів термостійких ПКМ і технології їх переробки на теплофізичні та фізико-механічні властивості виробів з них.

Розроблені ПКМ позиціонуються як матеріали з високим рівнем термічної стабільності, яка визначається як температура, при якій полімери не розм'якшуються та вироби з них не втрачають свою геометричну форму, механічну міцність при дії визначеного навантаження (теплостійкість), і при якій у полімері не відбувається хімічна зміна структури протягом деякого часу у визначеному навколишньому середовищі, що відображається на його властивостях (стійкість до дії температури). Вибір цих температур при визначенні термічної стабільності полімерів і ПКМ на їх основі обумовлений умовами використання деталей з них.

Проведено дослідження для встановлення теплостійкості розроблених ПКМ на основі фенілону С1 і фторопласту-4, яка визначається як температура розм'якшення за методом Віка (рис. 15).

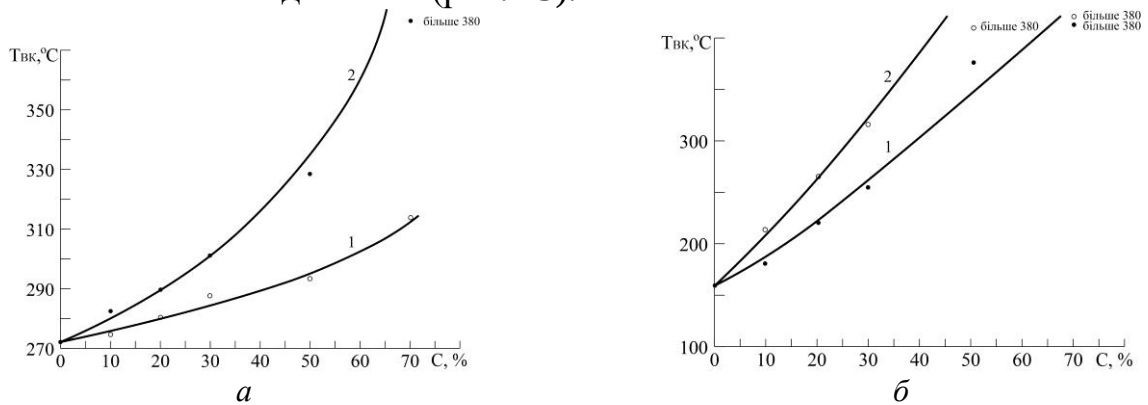


Рисунок 15 – Залежність температури розм'якшення за методом Віка (T_{VK}) від вмісту силікагелю у ПКМ на основі фенілону С1 (а) та фторопласту-4 (б), отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що температури розм'якшення за методом Віка з підвищенням вмісту наповнювача у полімерній матриці збільшується, що розширює температурний інтервал експлуатації розроблених ПКМ на основі фенілону С1 на 5–120°C та фторопласту-4 на 20–230°C залежно від умісту наповнювача і технології отримання ПКМ. Причому, слід відзначити, що матеріали, отримані з використанням (in situ) суміщення мають на 10–30 % більші значення цього параметра, що обумовлено кращою взаємодією полімерів з наповнювачем на границі розділу фаз у даних матеріалах порівняно з стандартно отриманими.

Для визначення температур, при яких у матеріалах не відбуваються суттєві хімічні перетворення впродовж визначеного часу, що впливають на рівень їх властивостей, було проведено термогравіметричні дослідження вихідних полімерів та ПКМ на їх основі. Результати представлено на рис. 16.

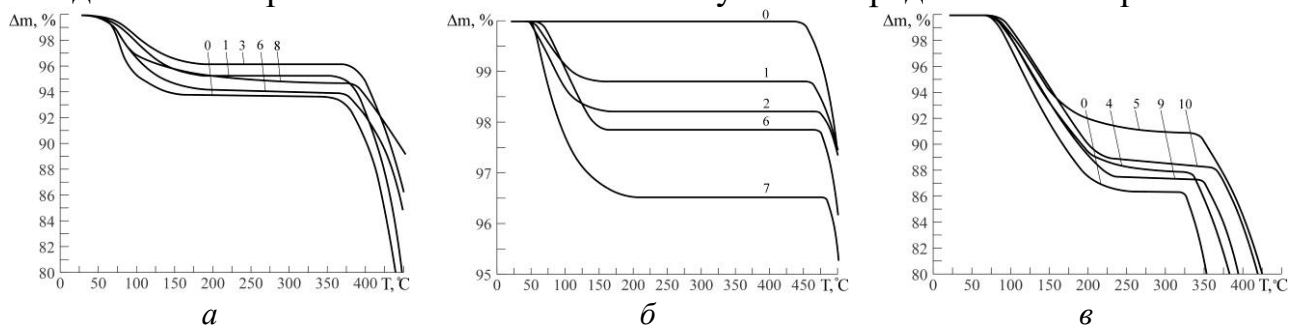


Рисунок 16 - Термогравіметричні криві (0) вихідних фенілону С1 (а), фторопласту-4 (б), ДФСФО (в) та ПКМ, отриманих за стандартною технологією (1-5) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (6-10) із вмістом силікагелю (% ваг): 1,6 – 10; 2,7 – 20; 3,8 – 30; 4,9 – 50; 5,10 – 75

Отримані термогравіметричні криві досліджених матеріалів мають подібний характер. Утрата ваги цих матеріалів, яка спостерігається при температурах 50–200°C пов'язана із виділенням з матеріалів вологи та летких компонентів, а починаючи з температури 320–350°C для всіх досліджених

матеріалів спостерігається різка втрата ваги, пов'язана із хімічними процесами розпаду макромолекул полімерів.

Температура, яка призводить до запуску цих процесів і є температурою початку активної термічної деструкції досліджених полімерів та ПКМ на їх основі. Слід відзначити, що введення силікагелю до складу фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО призводить до зміщення цієї температури в бік вищих температур, що пояснюється можливістю взаємодії макромолекул полімерів із поверхнею силікагелю, яка має велику кількість пор, мікропор та субмікропор з активними силанольними групами.

Також це підвищення розширяє інтервал температур експлуатації розроблених ПКМ на 20–50°C залежно від складу матеріалу і технології його отримання. Слід зазначити, що матеріали, отримані з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій мають на 10–20°C більші значення температури початку активної деструкції ніж ПКМ, отримані за стандартною технологією, що є свідченням кращого рівня взаємодії їх вихідних компонентів на границі розділу фаз полімер – наповнювач.

Однією із основних теплофізичних властивостей деталей із розроблених ПКМ є їх теплове розширення, яке полягає у зміні розмірів і форми деталей під дією температури і визначається за значенням коефіцієнта термічного лінійного розширення. Для більшості полімерів значення теплового розширення у десятки разів перевищують аналогічні для металів та їх сплавів. І при роботі у парі з металами при підвищених значеннях температури це може сприяти виникненню великих навантажень, які можуть призвести до виходу вузлів із ладу. Тому визначення теплового розширення деталей з розроблених ПКМ та дослідження впливу силікагелю на його значення є актуальним завданням. У таблиці 3 подано результати цих досліджень.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів термічного лінійного розширення ($\alpha \times 10^{-7} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$) вихідних фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО і ПКМ на їх основі, наповнених силікагелем та отриманих за стандартною технологією і з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій

Суміщення компонентів полімерних композицій	Значення коефіцієнтів термічного лінійного розширення														
	фенілон С1					Фторопласт-4					ДФСФО				
	вміст наповнювача силікагелю, % ваг.														
	0	10	20	30	50	0	10	20	30	50	0	20	40	60	75
стандартне	390	360	355	344	335	940	590	485	390	320	375	300	260	250	230
in situ		332	323	320	310		500	410	340	300		270	230	220	205

Відповідно до проведених досліджень введення до складу фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО силікагелю сприяє зменшенню їх термічного теплового розширення на 10–60 % залежно від виду полімерної матриці та вмісту в ній силікагелю. Зменшення коефіцієнтів термічного теплового розширення ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО при наповненні силікагелем порівняно з вихідними полімерними матрицями пояснюється меншим термічним розширенням ПКМ за рахунок зменшення рухомість макромолекул досліджених полімерних матриць при взаємодії з силікагелем. Також порівняльний аналіз значень коефіцієнтів термічного теплового розширення ПКМ, отриманих за різними технологіями свідчить, що

матеріали, отримані з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій, мають на 10–15 % менші значення термічного розширення, що є свідченням кращої взаємодії полімерів із наповнювачем на границі розділу фаз. Для ПКМ зменшення термічного лінійного розширення сприяє покращенню міцнісних властивостей ПКМ при підвищених температурах за рахунок меншого порушення адгезійної взаємодії на границі розділу фаз полімер – наповнювач при дії температури. Зменшення температурного розширення ПКМ дозволяє використовувати деталі з них у вузлах машин і механізмів, при взаємодії з матеріалами різної природи, зберігаючи при цьому високий рівень надійності та довговічності цих вузлів.

Проведено дослідження фізико-механічних властивостей вихідних полімерів та ПКМ на їх основі, отриманих з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій. На рис. 17 подано значення напружень при межі текучості та модуля пружності при стисканні вихідних полімерів та ПКМ на їх основі, отриманих за стандартною технологією суміщення і за технологією суміщення (in situ) вихідних компонентів.

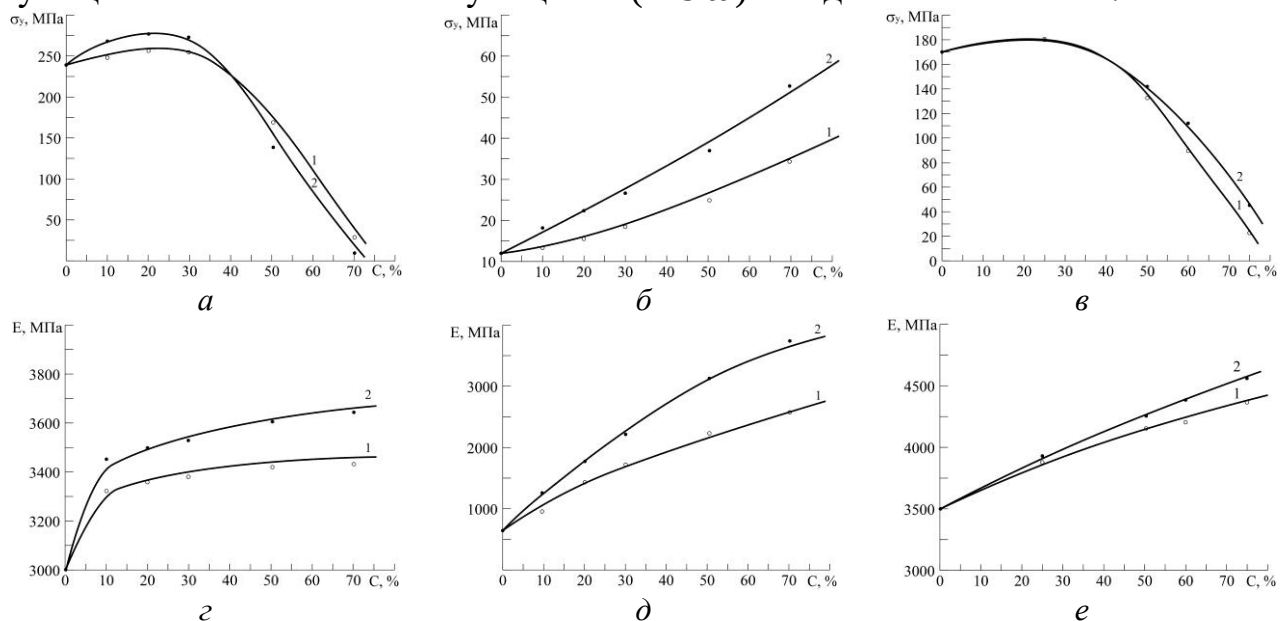


Рисунок 17 – Залежності напруження при межі текучості σ_y (а,б,в) та модуля пружності E (г,д,е) при стисканні від вмісту силікагелю C у ПКМ на основі фенілону С1 (а,г), фторопласту-4 (б,д) та ДФСФО (в,е), отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Відповідно до проведених досліджень, введення силікагелю у полімерні матриці на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО приводить до збільшення напруження при межі текучості та модуля пружності при стисканні отриманих при цьому ПКМ на 20–40 МПа та 600–1500 МПа відповідно залежно від полімерної матриці і вмісту наповнювача в них. Збільшення напруження при межі текучості і модуля пружності при стисканні ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО, наповнених силікагелем порівняно із вихідними полімерними матрицями, пояснюється підсилюючою дією наповнювача на полімер, яка полягає в їх фізичній і хімічній взаємодії. Фізична взаємодія пов'язана з адсорбцією молекул полімерів на поверхні силікагелю. При цьому створюються високоорієнтовані адсорбційні шари, які сприяють

покращенню механічної міцності розроблених матеріалів. Хімічна взаємодія пов'язана із можливістю утворення водневих зв'язків між атомами молекул полімерів та активними силанольними групами на поверхні силікагелю.

Також встановлено, що залежності напруження при межі текучості при стисканні від умісту силікагелю в досліджених полімерах для ПКМ, отриманих за стандартною технологією та з використанням суміщення (*in situ*) мають подібний характер. І визначено, що останні мають на 10 % кращі значення напруження при межі текучості та модуля пружності при стисканні порівняно зі стандартно отриманими ПКМ.

Це пояснюється більш якісним розподілом наповнювача в об'ємі полімерів, отриманих з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій, що попереджає передчасне руйнування матеріалів за рахунок менш інтенсивного розповсюдження тріщин у них при адгезійному чи когезійному руйнуванні.

Результати досліджень твердості матеріалів на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО подано в таблиці 4.

*Таблиця 4 – Значення твердості (НВ, МПа) вихідних фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО та ПКМ на їх основі, наповнених силікагелем і отриманих за стандартною технологією та з використанням (*in situ*) суміщення вихідних компонентів полімерних композицій*

Суміщення компонентів полімерних композицій	Значення твердості														
	фенілон С1					Фторопласт-4					ДФСФО				
	вміст наповнювача силікагелю, % ваг.														
	0	10	20	30	50	0	10	20	30	50	0	20	40	60	75
стандартне	203	235	202	180	150	42	48	54	58	65	140	189	191	120	80
in situ		247	230	202	155		50	56	60	67		198	250	289	301

Відповідно до цих результатів встановлено, що значення твердості отриманих ПКМ збільшуються з уведенням силікагелю в усі полімерні матриці на 15–50 % залежно від умісту наповнювача. Слід відзначити, що значення твердості для всіх досліджених матеріалів, отриманих з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій, мають більші значення, ніж стандартно отримані матеріали.

У цьому розділі описано комплексні дослідження трибологічних властивостей розроблених термостійких ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4 при фрикційній взаємодії зі сталлю в різних середовищах в широкому інтервалі навантажень, швидкостей ковзання і температур.

Одним із основних факторів, які впливають на надійність і довговічність у роботі вузлів тертя, є їх притирання у початковий період роботи. У цей час в парах тертя виникають великі значення сил тертя і зношування. Це обумовлено тим, що поверхні тертя мають різні геометричні параметри, які на початку взаємодії інтенсивно змінюються. Ця зміна відбувається до моменту створення «рівновісної шорсткості», коли геометричні параметри поверхонь тертя вирівнюються. Після цього явища закінчується період притирання матеріалів і настає режим їх нормальної роботи (тобто сили тертя та зношування в парі тертя стабілізується). Неналежне проведення притирання вузлів тертя може призвести до їх перегрівання з подальшим заклинюванням у початковий період

роботи, що значно зменшить надійність і довговічність їх загалом. Тому проведено дослідження щодо вибору оптимальних режимів притирання в початковий період експлуатації вузлів тертя.

Період притирання пар тертя можна визначати за зміною сил тертя (які визначаються коефіцієнтом тертя) у них упродовж визначеного шляху ковзання. Шлях ковзання залежить від великої кількості факторів, найбільш важливими з яких є навантаження і швидкість ковзання, при яких проходить притирання. Тому в результаті досліджень визначено, що оптимальні значення навантажень і швидкостей ковзання при притиранні матеріалів на основі фенілону С1 є $P = 1,25$ МПа, $V = 1,25$ м/с, а для матеріалів на основі фторопласту-4 $P = 2,00$ МПа, $V = 1,50$ м/с.

У роботі полімерні матриці наповнювалися дрібнодисперсним силікагелем, який впливав на рівень їхніх трибологічних властивостей і змінював характер тертя, що у свою чергу вплинуло на процес їх притирання. Тому було проведено дослідження впливу його вмісту в полімерних матрицях на шлях ковзання необхідний для притирання цих матеріалів при навантаженнях і швидкостях ковзання, які є оптимальними для притирання полімерних матриць на основі фенілону С1 ($P = 1,25$ МПа, $V = 1,25$ м/с) та фторопласту-4 ($P = 2,00$ МПа, $V = 1,50$ м/с). Вибір обумовлений тим, що полімерні матриці мають найбільший вплив на рівень властивостей ПКМ на їх основі. Відповідно до отриманих результатів дослідження встановлено оптимальні шляхи притирання, які залежать як від природи полімерної матриці так і від умісту в ній наповнювача і для розроблених ПКМ складають від 250 до 370 м (для ПКМ на основі фенілону С1) і від 150 до 250 м (для ПКМ на основі фторопласту-4).

Основними трибологічними характеристиками розроблених ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4 при їх фрикційній взаємодії зі сталлю є коефіцієнт тертя, температура на поверхні тертя і зношування ПКМ та сталю зразка пари тертя. Ці характеристики унаочнено на рис. 18.

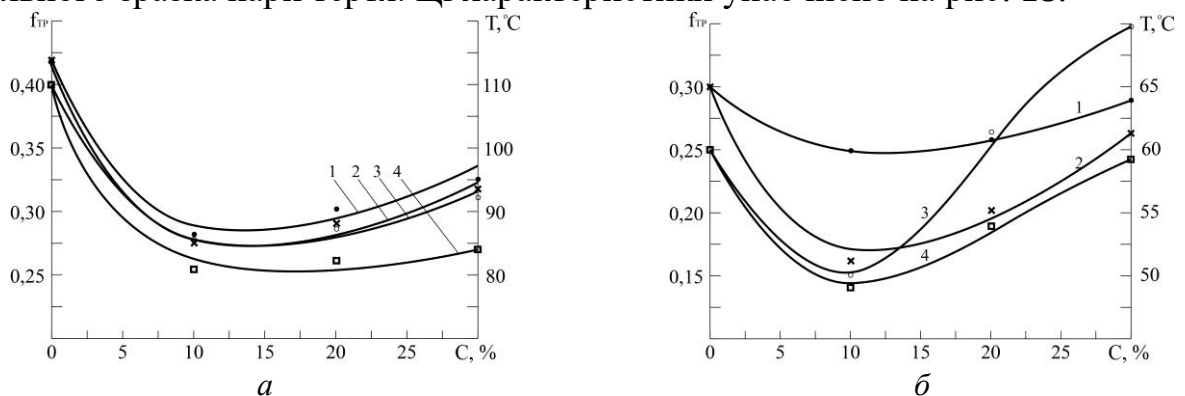


Рисунок 18 – Залежності коефіцієнта тертя $f_{тр}$ (1,2) та температури на поверхні тертя T (3,4) при фрикційній взаємодії ПКМ на основі фенілону С1 (а) та фторопласту-4 (б) зі сталлю від вмісту C силікагелю у ПКМ, отриманих за стандартною технологією (1,3) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2,4)

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що залежності коефіцієнта тертя та температури на поверхні тертя у парах тертя ПКМ-сталь від умісту силікагелю у полімерній матриці мають подібний характер для

матеріалів на основі фенілону С1 та фторопласту-4. На всіх отриманих залежностях спостерігається екстремум при вмісті наповнювача у полімері в області 9–12 %.

Зменшення коефіцієнта тертя і температури на поверхні тертя для матеріалів на основі фенілону С1 та фторопласту-4 складає 40–50 % і 10–20 % відповідно. Слід відзначити, що матеріали, отримані з використанням суміщення (*in situ*) мають значно менші значення коефіцієнта тертя і температури на поверхні тертя впродовж усього дослідженого інтервалу концентрацій наповнювача у полімерах, порівняно з матеріалами, отриманими за стандартною технологією. Це пояснюється різницею в морфології та структурі розроблених ПКМ, отриманих за різними технологіями. Так, у попередніх розділах показано, що матеріали, отримані за суміщенням (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій, мають більші значення ступеня кристалічності, ніж отримані за стандартною технологією. При цьому відомо, що матеріали з більш упорядкованою структурою мають кращі трибологічні властивості. Також у попередньому розділі встановлено, що силікагель у ПКМ, отриманих за суміщенням (*in situ*), має частково ламілярно-стрічкову структуру на відміну від звичайної сферичної для наповнювача у полімерах, отриманих за стандартною технологією. А відповідно до теорій тертя, матеріали з ламілярною структурою набагато ефективніше впливають на покращення трибологічних властивостей ПКМ при фрикційній взаємодії зі сталлю.

На рис. 19 представлено залежності зміни інтенсивності лінійного зношування ПКМ на основі досліджених полімерів і сталевго зразка при їх фрикційній взаємодії від умісту силікагелю у ПКМ, отриманих за стандартною технологією та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій.

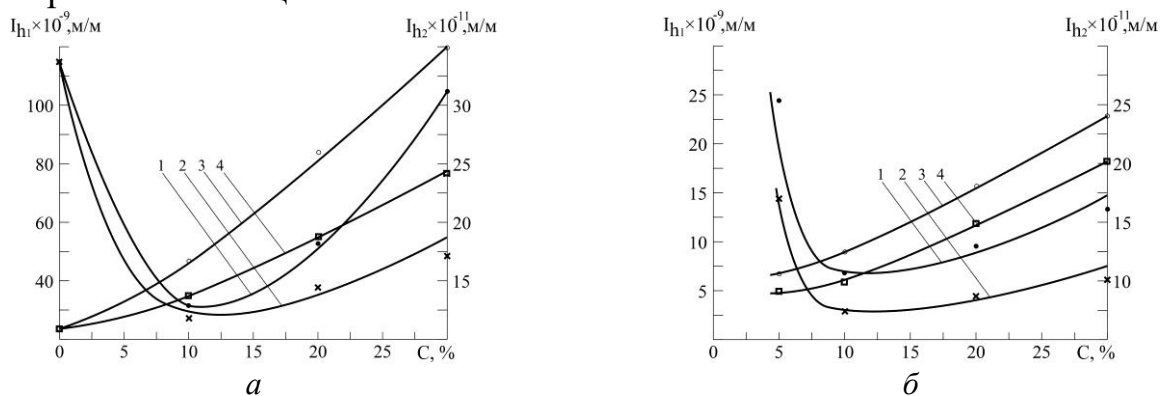


Рисунок 19 – Залежності інтенсивності лінійного зношування I_{h1} (1,2) ПКМ на основі фенілону С1 (а), фторопласту-4 (б) та сталевго зразка I_{h2} (3,4) при їх фрикційній взаємодії від вмісту C силікагелю у ПКМ, отриманих за стандартною технологією (1,3) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (2,4)

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що характер залежностей інтенсивності лінійного зношування ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4 у парах тертя ПКМ – сталь від умісту силікагелю у полімерній матриці подібний. На них спостерігається яскраво виражений екстремум в області вмісту наповнювача 9–12 %. Такий характер залежності інтенсивності лінійного зношування від вмісту наповнювача у ПКМ при їх

фрикційній взаємодії зі сталлю пояснюється створенням оптимальних умов тертя при 10 % вмісту наповнювача у ПКМ, при яких його вплив на характер тертя при фрикційній взаємодії ПКМ зі сталлю найкращий. Це може як бути наслідком створення антифрикційної плівки на сталевій поверхні тертя, так і зміни фізико-механічних характеристик ПКМ у досліджених парах тертя.

Слід відзначити, що матеріали, отримані з використанням суміщення (*in situ*) мають значно меншу інтенсивність лінійного зношування, ніж отримані за стандартною технологією. Це дозволяє стверджувати про їх кращу зносостійкість. Так, при оптимальному вмісті наповнювача 10 % у матеріалах, отриманих з використанням суміщення (*in situ*) у ПКМ на основі фенілону С1 цей параметр на 25 %, а в ПКМ, отриманих на основі фторопласту-4, на 60 % має кращі значення, ніж у ПКМ, отриманих за стандартною технологією. Це пояснюється різницею у структурі ПКМ та морфології наповнювача в них при отриманні з використанням суміщення (*in situ*) та стандартною технологією.

Також встановлено, що зі збільшенням вмісту силікагелю в полімерах спостерігається збільшення інтенсивності лінійного зношування сталевго зразка при фрикційній взаємодії розроблених ПКМ зі сталлю. Слід відзначити, що це зношування є невеликим і при максимальному вмісті силікагелю складає для ПКМ на основі фенілону С1 - 35×10^{-11} м/м, а для матеріалу на основі фторопласту-4 - 25×10^{-11} м/м. У загальному випадку збільшення інтенсивності лінійного зношування сталевго зразка пов'язано з абразивною дією на нього дисперсного наповнювача. Слід відмітити нелінійний характер збільшення даної характеристики. Так, інтенсивність лінійного зношування сталевго зразка при фрикційній взаємодії з ПКМ із умістом наповнювача до 10 % значно менша, ніж при терті з матеріалами з умістом наповнювача 10–30 %. Це, очевидно, пов'язано зі зміною характеру тертя у ПКМ при збільшенні вмісту наповнювача в ньому. Також слід відзначити, що зношування сталевго зразка при фрикційній взаємодії з матеріалами, отриманими з використанням суміщення (*in situ*) має значно менші значення, ніж при взаємодії з матеріалами, отриманими за стандартною технологією. Так, при фрикційній взаємодії ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4, отриманих з використанням суміщення (*in situ*), інтенсивність лінійного зношування сталевго зразка на 30–60 % (залежно від умісту наповнювача) менша, ніж для матеріалів, отриманих за стандартною технологією. Це пояснюється зміною в морфології частинок силікагелю з сферичної для ПКМ, отриманих за стандартною технологією, на ламілярно-стрічкову для ПКМ, отриманих з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій. Частинки з ламілярно-стрірковою морфологією виявляють значно меншу абразивну дію на сталеві зразки, ніж зі сферичною.

Покращення трибологічних властивостей розроблених ПКМ порівняно з вихідним полімером при фрикційній взаємодії зі сталлю є наслідком впливу наповнювача як на властивості ПКМ, так і на характер тертя. Для його встановлення було проведено дослідження морфології і структури сталевго поверхні тертя до та після фрикційної взаємодії з фенілоном С1, фторопластом-4 і ПКМ на їх основі (рис. 20).

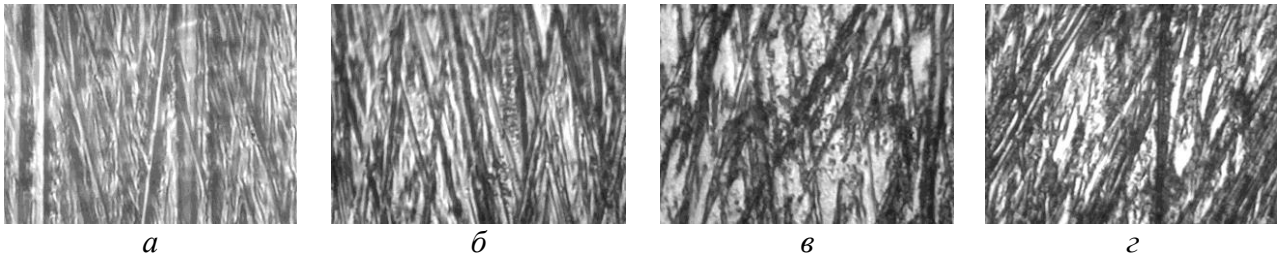


Рисунок 20 - Мікрофотографії сталевих поверхонь до (а) та після (б) фрикційної взаємодії з фенілоном С1 і ПКМ на його основі із вмістом наповнювача (%; ваг.): в – 5; г – 10

Відповідно до мікрофотографії (рис. 20, а) установлено, що поверхня сталевих зразків до фрикційної взаємодії з полімерами та ПКМ на їх основі має вихідні значення нерівностей (виступи і впадини), отримані при його механічній обробці під час підготовки зразків до проведення експериментів. Поверхня сталевих зразків після взаємодії з фенілоном С1 (рис. 20, б) практично не відрізняється від вихідної (рис. 20, а) і зміна її морфології пов'язана із зміною геометрії виступів та впадин шорсткості поверхні в процесі притирання у початковий період тертя. Поверхні сталевих зразків після тертя із ПКМ на основі фенілону С1 (рис. 20, в, г) мають суттєві відмінності від поверхонь, отриманих після тертя з вихідними полімером. Які обумовлені фрикційним перенесенням компонентів ПКМ на неї і створенням в результаті трибохімічних реакцій «антифрикційного покриття», яке змінює характер тертя і сприяє зменшенню коефіцієнта тертя, температури на поверхні тертя та інтенсивності лінійного зношування розроблених ПКМ порівняно із вихідним полімером при фрикційній взаємодії зі сталлю. Створення «антифрикційного покриття» сталевих поверхонь після тертя при фрикційній взаємодії з ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4 підтверджується також дослідженнями зміни її морфологічних та структурних параметрів (рис. 21).

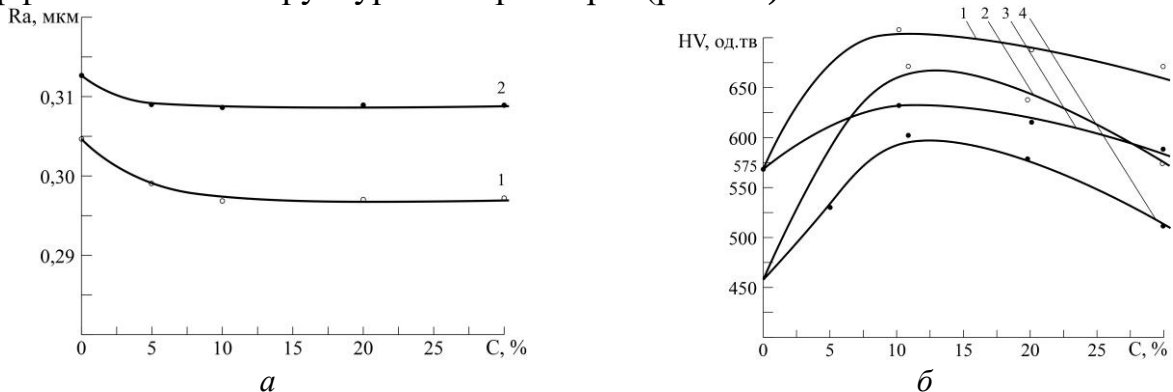


Рисунок 21 – Залежності шорсткості R_a (а) та мікротвердості HV (б) поверхні сталевих зразків при фрикційній взаємодії з ПКМ на основі фенілону С1 (1,3) і фторопласту-4 (2,4) від вмісту C в них силікагелю, отриманих за стандартною технологією (1,2) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (3,4)

Відповідно до проведених досліджень установлено, що залежності шорсткості сталевих зразків при фрикційній взаємодії з ПКМ від умісту в них силікагелю мають подібний характер. Так зі збільшенням вмісту силікагелю в досліджених ПКМ при фрикційній взаємодії зі сталевим зразком спостерігається зменшення шорсткості поверхні останнього (рис. 21, а). Причому слід відмітити нелінійний характер зменшення. Так, більш інтенсивно воно проходить у парах тертя із ПКМ із умістом наповнювача від 0 до 10 %, що

пояснюється інтенсивним створенням «антифрикційного покриття». А вже при 10–30 % вмісті наповнювача шорсткість сталевій деталі практично не зменшується і стабілізується, що є наслідком створення стабільного «антифрикційного покриття», яке займає практично всю поверхню тертя. «Антифрикційне покриття» складається із «острівців перенесення» продуктів фрикційної взаємодії при терті ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4, наповнених силікагелем по сталі, які створюються в результаті трибохімічних реакцій, які відбуваються в зоні тертя. У наслідок того, що в даних реакціях бере участь силікагель створені «острівців перенесення», як видно, є металокерамічними сполуками, які сприяють зміні характеру тертя досліджених матеріалів за рахунок зменшення активності поверхні сталевго зразка і підвищення його твердості. Це явище підтверджено при дослідженні мікротвердості сталевій поверхні тертя після фрикційної взаємодії з розробленими ПКМ (рис. 21, б). На отриманих залежностях спостерігається яскраво визначений екстремум мікротвердості поверхні сталевго зразка в області 9–11 % вмісту наповнювача у ПКМ, що пояснюється створенням стабільного «антифрикційного покриття». Результати досліджень мікротвердості повністю корелюють з раніше проведеними триботехнічними дослідженнями пари тертя ПКМ – сталь, мікрометричними знімками сталевій поверхні тертя і дослідженнями її шорсткості при терті з розробленими ПКМ і підтверджують гіпотезу щодо створення в результаті трибохімічних реакцій «острівців перенесення» з металокерамічних сполук, які разом утворюють стабільне «антифрикційне покриття», сприяючи при цьому зміні характеру тертя досліджених матеріалів за рахунок зменшення активності поверхні сталевго зразка та підвищення його твердості. Також слід відзначити, що при терті ПКМ, отриманих з використанням суміщення (*in situ*), мікротвердість сталевго зразка на 10–15% має більші значення, ніж у матеріалів, отриманих за стандартною технологією. Це пояснюється створенням більш стабільного «антифрикційного покриття» при терті даних матеріалів по сталі. Для підтвердження цього припущення було отримано знімки сталевій поверхні тертя, на яких детально представлено особливості її морфології після фрикційної взаємодії сталі з розробленими ПКМ, отриманими за стандартною технологією і з використанням (*in situ*) суміщення вихідних компонентів полімерних композицій (рис. 22).

Морфологія поверхні тертя на отриманих мікрофотографія має чітко виражені виступи і впадини шорсткості поверхні, які створюються в результаті притирання вихідних поверхонь тертя. Причому у впадинах спостерігаються скупчення частинок, які є продуктом трибохімічних реакцій при фрикційній взаємодії розроблених ПКМ зі сталлю. Ці частинки і створюють «антифрикційне покриття» на сталевій поверхні, яке сприяє покращенню умов тертя в досліджених парах тертя. Вони, найбільш вірогідно, є металокерамічними сполуками, які мають досить високі значення твердості і впливають на збільшення твердості поверхні тертя. Це повністю корелює із результатами досліджень мікротвердості сталевих поверхонь тертя після фрикційної взаємодії з матеріалами на основі фенілону С1, фторопласту-4 та

силікагелю. Слід відзначити, що більша кількість цих частинок спостерігається на сталевій поверхні терті після фрикційної взаємодії з ПКМ, отриманим з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій. Це підтверджує припущення щодо створення більш стійкого «антифрикційного покриття» при фрикційній взаємодії ПКМ, отриманих з використанням суміщення (in situ) порівняно з матеріалами, отриманими за стандартною технологією.

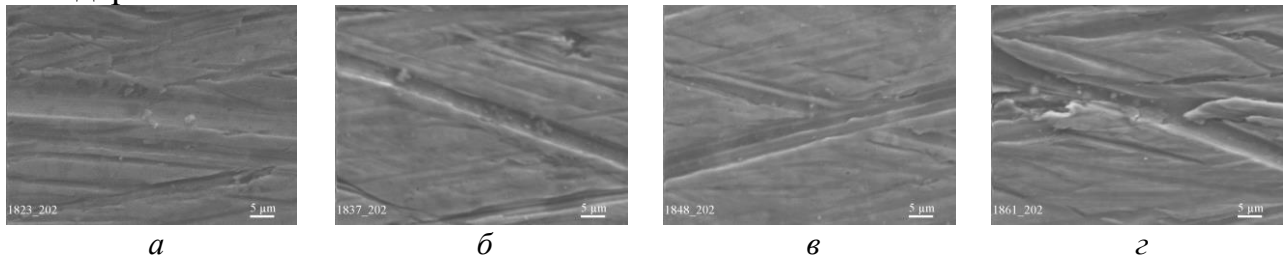


Рисунок 22 - Мікрофотографії сталевих поверхонь після фрикційної взаємодії з розробленими ПКМ на основі фенілону С1 (а, б) та фторопласту-4 (в, г), отриманих за стандартною технологією (а,в) і з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (б,г)

Спираючись на проведені дослідження, маємо всі підстави стверджувати, що найкращими матеріалами на основі фенілону С1 і фторопласту-4 з точки зору трибологічних властивостей є ті, що наповнені 10% силікагелю й отримані з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій. Тому подальші дослідження впливу зовнішніх факторів на тертя і зношування розроблених матеріалів проведено саме на них. Основними зовнішніми факторами, що впливають на пару тертя, є тиск, швидкість ковзання, температура довкілля та середовище, в якому відбувається тертя.

Відповідно до попередніх досліджень максимальні навантаження та швидкості ковзання при яких розроблені ПКМ працюють у нормальному режимі роботи для матеріалів на основі фенілону С1 дорівнюють 1,5 МПа та 1,25 м/с – і 2,5 МПа та 1,5 м/с – для матеріалів на основі фторопласту-4. Результати впливу цих факторів на тертя і зношування полімерів, наповнених силікагелем, зображено на рис. 23.

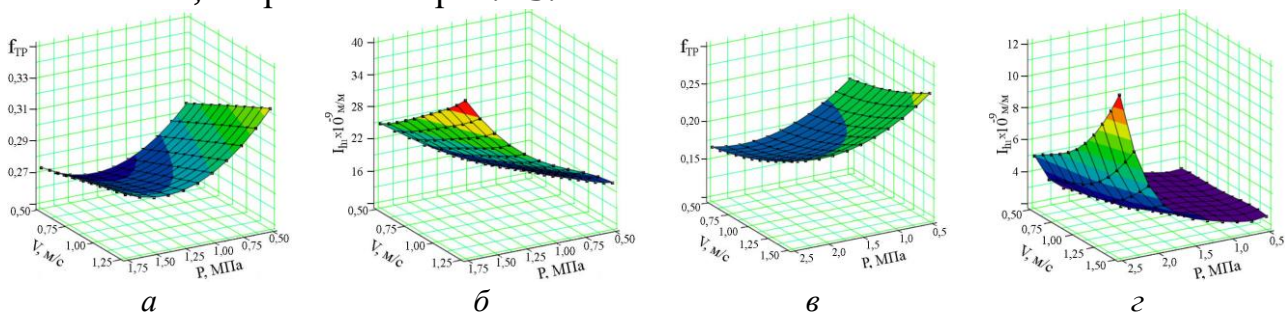


Рисунок 23 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а,в) та інтенсивності лінійного зношування I_{h1} (б,г) ПКМ на основі фенілону С1 (а,б) і фторопласту-4 (в,г), наповнених 10 % силікагелю і отриманих з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що залежності коефіцієнта тертя й інтенсивності лінійного зношування від навантаження та швидкості ковзання для матеріалів на основі фенілону С1 та фторопласту-4, отриманих з використанням суміщення (in situ), мають подібний характер.

Причому характер отриманих залежностей аналогічний до отриманих при терті ПКМ на основі фенілону С1 і фторопласту-4, отриманих за стандартною технологією. Так, зменшення коефіцієнта тертя для ПКМ на основі фенілону С1 спостерігається в інтервалі навантажень від 0,5 до 1,5 МПа, а для ПКМ на основі фторопласту-4 - в інтервалі навантажень від 0,5 до 2,00 МПа впродовж всього інтервалу швидкостей ковзання. При подальшому збільшенні навантажень до 1,75 МПа для ПКМ на основі фенілону С1 і до 2,5 МПа для матеріалів на основі фторопласту-4 спостерігається підвищення значень коефіцієнтів тертя в досліджуваних парах тертя. Збільшення швидкості ковзання від 0,5 до 1,25 м/с для матеріалів на основі фенілону С1 і від 0,5 до 1,5 м/с для матеріалів на основі фторопласту-4 на всьому інтервалі досліджених навантажень призводить до збільшення значень коефіцієнта тертя. Причому слід відзначити, що більший вклад у збільшення коефіцієнта тертя для всіх досліджених матеріалів уносить навантаження, ніж швидкість ковзання.

Інтенсивність лінійного зношування для досліджуваного ПКМ зростає зі збільшенням навантаження і швидкості ковзання у вузлі тертя. Причому при навантаженнях від 0,5 до 1,5 МПа для матеріалів на основі фенілону С1 і від 0,5 до 2 МПа для матеріалів на основі фторопласту-4 спостерігається невисока інтенсивність зношування, а вже при більших значеннях навантажень вона зростає. При швидкості ковзання від 0,5 до 1 м/с для матеріалів на основі фенілону С1 та від 0,5 до 1,25 м/с для матеріалів на основі фторопласту-4 спостерігається незначне збільшення інтенсивності зношування, а вже при підвищенні її до 1,25 та 1,5 м/с інтенсивність зношування значно збільшується.

Збільшення інтенсивності підвищення коефіцієнта тертя і зношування при збільшенні навантажень та швидкостей ковзання пов'язано з переходом з нормального режиму роботи вузла тертя на аварійний, при якому вузли тертя не працюють і досить швидко виходять з ладу.

Тобто, відповідно до проведених досліджень, граничними умовами експлуатації для матеріалів, отриманих з використанням суміщення (in situ) є $P = 1,5$ МПа та $V = 1,0$ м/с для ПКМ 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель і $P = 2,00$ МПа та $V = 1,25$ м/с для матеріалу 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель.

Відповідно до проведених досліджень було виведено математичні залежності, які описують вплив режимів експлуатації (навантаження і швидкості ковзання) пари тертя на основні триботехнічні параметри при терті ПКМ, отриманих з використанням суміщення (in situ) при фрикційній взаємодії із сталлю. Формули 1 і 2 для ПКМ на основі фенілону С1 та 3 і 4 для ПКМ на основі фторопласту-4.

$$f_{TP} = 0,051 \cdot P^2 - 1,33 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 - 0,015 \cdot P \cdot V - 0,126 \cdot P + 0,047 \cdot V + 0,327 \quad (1)$$

$$I_{hl} = 6,571 \cdot P^2 + 4,667 \cdot V^2 + 6,354 \cdot P \cdot V - 6,946 \cdot P - 2,849 \cdot V + 12,141 \quad (2)$$

$$f_{TP} = 0,023 \cdot P^2 + 0,024 \cdot V^2 + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot V - 0,098 \cdot P - 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot V + 0,261 \quad (3)$$

$$I_{hl} = 2,164 \cdot P^4 - 4,736 \cdot V^4 - 11,673 \cdot P^3 + 16,699 \cdot V^3 + 22,268 \cdot P^2 - 19,17 \cdot V^2 - 18,611 \cdot P + 7,863 \cdot V + 1,12 \cdot P^3 \cdot V + 2,507 \cdot P \cdot V^3 + 2,155 \cdot P^2 \cdot V^2 - 6,37 \cdot P^2 \cdot V - 11,069 \cdot P \cdot V^2 + 14,887 \cdot P \cdot V + 4,628 \quad (4)$$

Вузли тертя працюють у різних робочих середовищах (мастила, вода тощо) які, у більшості випадків, використовуються в якості агентів, що чинять змащувальну та охолоджуючу дію на вузол тертя. Це сприяє покращенню його

роботи, підвищення надійності та довговічності за рахунок значного зменшення сил тертя і зношування елементів пари тертя, що дозволяє працювати вузлам тертя у значно жорсткіших умовах (великі значення навантажень і швидкостей ковзання), ніж при терті без змащування. Тому з метою встановлення граничних режимів роботи в різних робочих середовищах (індустріальне мастило і вода) вузлів тертя розроблений ПКМ-сталь було проведено дослідження їх основних трибологічних властивостей. Результати подано на рис. 24.

Відповідно до проведених досліджень, при фрикційній взаємодії у мастилі встановлено, максимальним навантаженням і швидкістю ковзання, при якій вузол тертя досліджений ПКМ – сталь при фрикційній взаємодії у середовищі мастила буде працювати у нормальному режимі роботи є 15 МПа та 1 м/с (для ПКМ на основі фенілону С1) і 7,5 МПа та 1,5 м/с (для матеріалу на основі фторопласту-4).

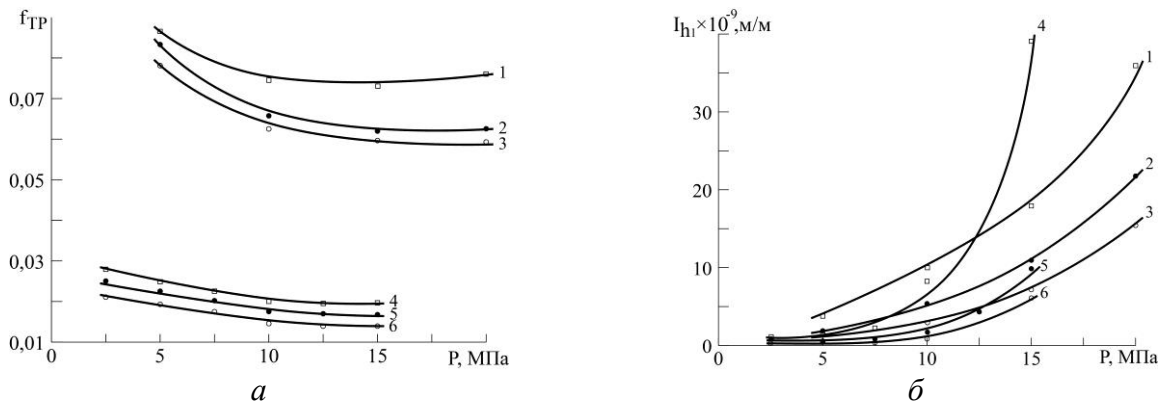


Рисунок 24 - Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та інтенсивності лінійного зношування I_{hl} (б) ПКМ на основі феніону С1 (1-3) та фторопласту-4 (4-6), наповнених 10 % силікагелю від навантаження P при фрикційній взаємодії зі сталлю в індустріальному мастилі (І-20) при швидкостях ковзання V , м/с: 1 – 1,5; 2 – 1; 3 – 0,5

Відповідно до проведених досліджень при фрикційній взаємодії у воді встановлено, максимальним навантаженням і швидкістю ковзання, при якій вузол тертя досліджений ПКМ – сталь при фрикційній взаємодії у водному середовищі буде працювати у нормальному режимі роботи є 7,5 МПа та 1,5 м/с (для ПКМ на основі фенілону С1) і 10 МПа та 1,5 м/с (для матеріалу на основі фторопласту-4).

У восьмому розділі подано рекомендації щодо застосування розроблених ПКМ з високим рівнем термічної стійкості в конструкційних вузлах та вузлах тертя технологічного обладнання. Описано проведені промислові випробування деталей з розроблених ПКМ у вузлах тертя і герметизації обладнання хімічної та сільськогосподарської промисловості на підприємствах ТОВ «Т КОРП ГРУП», ТОВ «КОДАЦЬКЕ-АГРО», НПП «СОЮЗ-КОМПОЗИТ», ТОВ «ХІМПОСТАЧ ДНІПРО», ТОВ «ІНТЕР АВІА ІНВЕСТ». Відповідно до їх результатів та економічного складника визначено, що їх доцільно використовувати у досліджених вузлах за рахунок покращення рівня надійності та довговічності у роботі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу проблему, пов'язану з розробкою науково-технічних основ технології виготовлення термостійких ПКМ триботехнічного призначення, вироби з яких вирізняються низькою собівартістю за рахунок використання недефіцитних вихідних компонентів і спрощення технології їх переробки, доступністю виробництва в умовах підприємств України та кращим рівнем властивостей ніж у наявних аналогів.

1 Відповідно до рівня властивостей, критеріїв собівартості та розповсюдженості обґрунтовано вибір полімерних матриць (фенілон С1, фторопласт-4 і ДФСФО), наповнювача (силікагель) та технології їх переробки у вироби для створення термостійких ПКМ триботехнічного призначення.

2 Розроблено нову ресурсоощадну технологію отримання термостійких ПКМ триботехнічного призначення і теоретично обґрунтовано доцільність її використання для отримання матеріалів на основі фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО і силікагелю. Згідно з нею запропоновано відмовитися від операції механічного суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на підготовчому етапі переробки у вироби і проводити її на стадії синтезу силікагелю. Визначено оптимальні параметри переробки (тиск, температура переробки) розроблених матеріалів у вироби, які для ПКМ на основі фенілону С1 дорівнюють $P = 40$ МПа, $T = 328^{\circ}\text{C}$, фторопласту-4 $P = 20$ МПа, $T = 380^{\circ}\text{C}$ та ДФСФО $P = 30$ МПа, $T = 185^{\circ}\text{C}$.

3 Теоретично обґрунтовано й експериментально (за допомогою електронної мікроскопії) доведено зміну морфології наповнювача силікагелю у полімерних матрицях на основі фенілону С1, фторопласту-4 і ДФСФО зі сфероподібної на ламілярно-стрічкову, яка відбувається внаслідок особливостей структуроутворення наповнювача на поверхні дрібнодисперсних частинок полімерів, введених у реакційне середовище при його синтезі.

4 Досліджено вплив технологій суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на якість розподілення силікагелю у фенілоні С1, фторопласті-4, ДФСФО і встановлено, що ПКМ, отримані за суміщенням (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій на стадії синтезу силікагелю мають на 25–35 % кращу якість розподілу наповнювача в полімерних матрицях за рахунок усунення ефекту сегрегації, який спостерігається при механічному суміщенні.

5 Теоретично й експериментально підтверджено фізичну і хімічну природу взаємодії силікагелю з фенілоном С1, фторопластом-4 і ДФСФО, яка відбувається за рахунок адсорбції молекул полімерів розвиненою поверхнею силікагелю при переробці у вироби та створенням водневих зв'язків між силанольними групами на поверхні силікагелю і полярними молекулами полімеру при їх переробці у вироби.

6 Досліджено вплив складів ПКМ і технологій переробки на теплофізичні та фізико-механічні властивості виробів з них. Установлено, що введення силікагелю у фенілон С1, фторопласт-4 і ДФСФО сприяє їх 10–30 % покращенню за рахунок взаємодії наповнювача з полімерами та зміні структури

ПКМ, створеними з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій порівняно з стандартно отриманими. У результаті цього спостерігається розширення граничних інтервалів експлуатації в бік більших навантажень і температур експлуатації виробів з матеріалів на основі фенілону С1 до 280 МПа і 385°C, на основі фторопласту-4 до 40 МПа і 475°C і на основі ДФСФО до 180 МПа і 375°C.

7 Проведено оптимізацію складів розроблених ПКМ з точки зору трибологічних властивостей у результаті якої встановлено, що найменший рівень тертя ($f_{\text{тр}} = 0,16 \div 0,17$) і зношування ($I_{\text{н1}} = 20 \div 25 \times 10^{-9}$ м/м) мають ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнених 10 % силікагелю. Це є свідченням морфологічних і структурних перетворень у зоні тертя при фрикційній взаємодії розроблених ПКМ зі сталлю, які полягають у виникненні в результаті трибохімічних реакцій стабільного дискретного покриття на сталевій поверхні, що сприяє покращенню трибологічних властивостей досліджених пар тертя.

8 Експериментально визначено вплив зовнішніх факторів (навантаження, швидкість ковзання, температура тощо) на тертя і зношування розроблених ПКМ та знайдено граничні значення інтервалів експлуатації виробів з них при фрикційній взаємодії зі сталеву поверхню без та зі змащуванням. Так, для матеріалів на основі фенілону С1 і фторопласту-4 вони дорівнюють $P = 15$ МПа, $V = 1,5$ м/с та $P = 10$ МПа, $V = 1,5$ м/с відповідно.

9 Розроблено рекомендації для впровадження деталей зі створених ПКМ у промисловість. Проведено їх промислові дослідження на підприємствах ТОВ «Т КОРП ГРУП», ТОВ «КОДАЦЬКЕ-АГРО», НПП «СОЮЗ-КОМПОЗИТ», ТОВ «ХІМПОСТАЧ ДНІПРО», ТОВ «ІНТЕР АВІА ІНВЕСТ». Установлено економічну доцільність використання деталей з розроблених ПКМ у вузлах тертя і герметизації консольного вала апарата ($V=10$ м³) з тихохідною механічною мішалкою, гідравлічного преса для переробки полімерних матеріалів, посівного комплексу «John Deere 1780» та культиваторів для обробки просапних культур.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Розробка теплостійких композиційних матеріалів на основі фторопласту-4 для вузлів тертя і герметизації обладнання хімічних виробництв [Текст] / А.М. Дудка, В.І. Ситар, І.І. Начовний, О.С. Кабат, О.І. Єрмолаєва // Вопросы химии и химической технологии. - 2008. - №6. - С.167-170. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання досліджень на тертя та зношування ПКМ, написання статті)*

2. Кабат, О.С. Исследование свойств триботехнических композитов на основе фенилона и фторопласта [Текст] / О.С. Кабат, В.И. Сытар, А.Н. Дудка // Вопросы химии и химической технологии. - 2010. - №2. - С. 57-60. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання досліджень на тертя та зношування ПКМ, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

3. 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. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, виконання фізико-механічних та трибо логічних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

4. Оптимизация режимов резанья при механической обработке ароматического полиамида фенилон [Текст] / О.С. Кабат, А.Л. Чуприна, В.И. Сытар, В.В. Анисимов // Вопросы химии и химической технологии. - 2011. - №5. - С. 201-204. *(Особистий внесок здобувача: планування експериментів, виконання експериментів, виконання експериментальних досліджень по знаходженню сил різання при точінні, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

5. Исследование триботехнических характеристик пары трения фенилон-сталь 45 при различных значениях твердости и шероховатости стали [Текст] / О.С. Кабат, В.И. Сытар, Н.М. Евдокименко, А.П. Клименко // Вопросы химии и химической технологии. - 2011. - №6. - С. 207-210. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання експериментів на тертя та зношування пар тертя полімер-сталь, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

6. Кабат, О.С. Полимерные композиционные материалы на основе ароматического полиамида и высокодисперсных кремнеземов [Текст] / О.С. Кабат, В.И. Сытар, Н.М. Евдокименко // Полимерный журнал. - 2012. - Т.34 - №1. - С. 37-42. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання фізико-механічних та теплофізичних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

7. Вивчення кінетики поверхневих змін і механізму руйнування при терті фенілону [Текст] / В.І. Ситар, А.В. Лобаденко, А.М. Дудка, О.С. Кабат // Вопросы химии и химической технологии. - 2012. - №5. - С. 101-104. *(Особистий внесок здобувача: планування експериментів, аналіз та інтерпретація результатів)*

8. Дослідження захисного шару, утвореного силікато-фулереновим геомодифікатором [Текст] / О.Д. Деркач, Б.Г. Харченко, О.С. Кабат, Д.О. Макаренко, Г.Я. Міщенко // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - 2014. - Випуск 145. - С. 217-221. *(Особистий внесок здобувача: планування експериментів, виконання експериментів, аналіз та інтерпретація результатів)*

9. Кабат, О. С., Термостойкие композиты на основе фенилона с высоким уровнем технологичности при переработке в изделия [Текст] / О. С. Кабат, В.І. Ситар // Вопросы химии и химической технологии. - 2016. - Т. 3 (107). - С. 60-64 (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання фізико-механічних та*

теплофізичних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)

10. Конструкционные фенопласты с высоким уровнем термической стабильности [Текст] / О. С. Кабат, О. В. Черваков, Ю. М. Кобельчук, М. В. Андриянова, Ю. А. Суворова // Технологические системы. - 2017. - Т. 2 (79). - С. 33-39. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання фізико-механічних та теплофізичних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

11. Кабат, О. С. Термостойкие полимерные композиты специального назначения для тяжело нагруженных узлов трения [Текст] / О. С. Кабат, В.И. Сытар, А.А. Митрохин // Технологические системы. - 2017. - Т. 2 (79). - С. 25-33. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, виконання фізико-механічних та трибо логічних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

12. Кабат, О.С. Визначення оптимальних технологічних параметрів при переробці прес-порошків ароматичних поліамідів у виробі [Текст] / О.С. Кабат, В.І.Ситар, К.М. Сухий // Полимерный журнал. - 2017. - № 4. - С. 248-252. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання фізико-механічних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

13. Полімерні композиційні матеріали для вузлів тертя космічної та авіаційної техніки [Текст] / О. С. Кабат, В. І. Ситар, С. О. Давидов, К. В. Геті, Д. В. Єрмаченок // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: збірник наукових праць Дніпровського національного університету ім. О. Гончара. - 2017. - Том XXIII. - С. 40-48. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання експериментів, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

14. Кабат, О.С. Полімерні композиційні матеріали спеціального призначення на основі фторопласту [Текст] / О.С. Кабат, М.В.Душейко // Технологические системы. - 2017. - Т. 4 (81). - С. 63-67. DOI: <http://dx.doi.org/10.29010/081.8> *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, виконання трибологічних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

15. Polymer composite materials with a high level of thermal stability based on phenolic resins and disperse silica fillers [Text] / O.S. Kabat, Y.M. Kobelchuk, D.O. Chervakov, O.V. Chervakov // Наука, Технології, Інновації. - 2018. - №. 2 (6). - Р. 48-53. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання фізико-механічних та теплофізичних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

16. Kabat, O. Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black [Text] / O. Kabat, V.Sytar, K. Sukhyu // Chemistry & Chemical Technology. - 2018. - Vol. 12 (3). - P. 326-330

DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht12.03.326> (Scopus) *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, виконання експериментів на*

тертя та зношування розроблених ПКМ, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)

17. Полимерные композиционные материалы на основе фторопласта и метод их получения [Text] / О.С. Кабат, Б.Г. Харченко, А.Д. Деркач, В.В. Артемчук, В.Г. Бабенко // Вопросы химии и химической технологии. - 2019. - № 3. - С. 116-122. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-3-116-122> (Scopus) *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання фізико-механічних та теплофізичних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті)*

18. Polymeric composites of tribotechnical purpose based on fluoropolymers [Text] / O.S. Kabat, O.D. Derkach, N.V. Pavlushkina, I.I. Pikula // Problems of Tribology. - 2019. - VOL. 92 (2). - P. 75-81.

DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-92-2-75-81> (Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання трибологічних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті).

19. Recycling of constructional plastics with additives of exhausted polyethylene [Text] / A.S. Kobets, O.D. Derkach, O.S. Kabat, V.L. Kovalenko, V.A. Kotok // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. - 2019. - Vol. 14 (13). - P. 2397-2406 (Scopus) *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, виконання експериментів, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті).*

20. Fillers on the silica base for polymer composites of constructional purpose [Text] / O. S. Kabat, K. V. Heti, I. L. Kovalenko, A. M. Dudka // Journal of chemistry and technologies. - 2019. - Vol. 27(2). - P. 247-254.

DOI: <https://doi.org/10.15421/08192702> (Scopus) *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, проведення морфологічних, фізико-механічних та теплофізичних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті).*

21. Чигвинцева, О.П. Изучение трибологических свойств органопластика на основе ароматического полиамида фенилон С-1 [Текст] / О.П. Чигвинцева, О.С. Кабат, Ю.В. Бойко // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»). - 2019. - Вип. 68. - С. 142-146. *(Особистий внесок здобувача: планування експериментів, виконання трибологічних досліджень, написання статті)*

22. Investigation friction and wear of constructional plastics based on aromatic polyamide [Text] / A.S. Kobets, O. D. Derkach, O. S. Kabat, I. A. Volovyk, V. L. Kovalenko, V. A. Kotok, V. V. Verbitskiy // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. - 2020. - Vol. 15 (10). - P. 1189-1195 (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, проведення трибологічних досліджень при дії широкого інтервалу навантажень та швидкостей ковзання, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті).*

23. Кабат, О. С. Вплив методів отримання полімерних композицій на основі термостійких полімерів на якість суміщення їх вихідних компонентів

[Текст] / О. С. Кабат, В. А. Карпенко, В. Г. Бабенко // Вісник київського національного університету технологій та дизайну. - 2020. - № 1 (142). - С. 94-102. DOI: <https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2020.1.9>. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, планування експериментів, визначення якості суміщення, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті).*

24. Токар, А.В. Квантово-хімічне дослідження міжмолекулярних взаємодій у комплексних системах «поліамід-силікагель» [Текст] / А.В. Токар, О. С. Кабат // Journal of chemistry and technologies. - 2020. - Vol. 28 (2). - Р. 194-201 DOI: <https://doi.org/10.15421/082021> (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: проведення фізико-механічних досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, написання статті).*

25. Application of polymer composites in the design of agricultural machines for tillage [Text] / V.V. Aulin, O. D. Derkach, O.S. Kabat, D.O. Makarenko, A.V. Hryniv, D.I. Krutous // Problems of Tribology. - 2020. - V. 25(2). - С. 49-58 DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-96-2-49-58> *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, аналіз та інтерпретація результатів).*

26. Обґрунтування полімерних матеріалів для використання у конструкціях плугів [Текст] / О.Д. Деркач, О.С. Кабат, Д.О. Макаренко, Б.Г. Харченко // Центральнотериторіальний науковий вісник. Технічні науки. - 2020. - Вип. 3(34). - С. 102-107

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).102-107](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).102-107) *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення фізико-механічних та теплофізичних досліджень ПКМ, написання статті).*

27. Пат. 87781 Україна, МПК C08L 27/18. Полімерна композиція [Текст] / Дудка А. М., Ситар В. І., Кабат О. С., Єрмолаєва О. І. - № а200807544; Заявл. 12.05.2009; Опубл. 10.08.2009. Бюл. № 9 – 6 с. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів патентування, проведення фізико-механічних, теплофізичних та трибо логічних досліджень, написання патенту).*

28. Пат. 94825 Україна, МПК C08L 77/10. Полімерна композиція [Текст] / Ситар В. І., Кабат О. С., Мельніков Б. І., Олейніков В. Г. - № а201000112; Заявл. 11.01.2010; Опубл. 10.06.2011. Бюл. № 11 – 4 с. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів патентування, аналіз та інтерпретація результатів теплофізичних та фізико-механічних властивостей ПКМ, написання патенту).*

29. Пат. 121913 Україна, МПК C08L 77/06, C08K 3/105, C08K 3/26. Газонаповнена полімерна композиція на основі ароматичного поліаміду фенілону з низькою питомою вагою [Текст] / Ситар В.І., Кабат О.С., Коляда Д.В., Хоренко Д.І. - № а201806469; Заявл. 11.06.2018; Опубл. 10.08.2020. Бюл. № 15 – 4 с. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів патентування, аналіз та інтерпретація результатів, написання патенту).*

30. Кабат, О.С. Полімерний композит для узлов машин и механизмов, работающих при повышенном уровне температур [Текст] / О.С. Кабат, В.И. Сытар, Н.В. Лашко // IV Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Хімія і сучасні технології”: тези доп. –

Дніпропетровськ, 2009. - С. 258. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення термогравіметричного аналізу, написання тези).*

31. Кабат, О. С. Исследование триботехнических свойств полимерного композита на основе фенилона и высокодисперсного вспученного перлита [Текст] / О. С. Кабат, В. И. Ситар, А. А. Митрохин // Материалы двадцать девятой международной конференции “Композиционные материалы в промышленности”: тезисы доп. – Ялта, 2009. - С. 53-54. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення трибологічних досліджень, написання тези).*

32. Кабат, О.С. Исследование триботехнических свойств полимерных композитов, модифицированных высокодисперсными материалами на основе диоксида кремния [Текст] / О.С. Кабат, В.И. Ситар // Материалы IV міжнародної науково-технічної конференції “Композиційні матеріали”: тези доп. – Київ, 2009. - С. 165-166. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, дослідження тертя та зношування ПКМ, написання тези).*

33. Лашко, Н.В. Триботехнічний теплостійкий полімерний композит для вузлів тертя і герметизації хімічного обладнання [Текст] / Н.В. Лашко, С.О. Богомаз, О. С. Кабат // Збірка тез доповідей учасників Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт: тези доп. – Донецьк, 2010. - С. 80-83. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення трибологічних досліджень, написання тези).*

34. Кабат, О. С. Выбор оптимального режима приработки пары трения полимерный композит-сталь [Текст] / О. С. Кабат, В. И. Ситар, А. А. Митрохин // Материалы тридцатой международной конференции “Композиционные материалы в промышленности”: тезисы доп. – Ялта, 2010. - С. 130-131. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, вибір оптимальних значень навантажень та швидкостей ковзання при притиранні ПКМ, написання тези).*

35. Кабат, О. С. Влияния твердости стального контртела на триботехнические свойства пары трения фенилон С2 - сталь 45 [Текст] / О. С. Кабат, В. И. Ситар // Материалы 6 Українсько-польської конференції “Полімери спеціального призначення”: тези доп. – Дніпропетровськ, 2010. - С. 69. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, визначення впливу твердості стального зразка на тертя та зношування ПКМ, написання тези).*

36. Кабат, О. С. Композиты на основе ароматического полиамида с увеличенным интервалом температур переработки [Текст] / О. С. Кабат, В. И. Ситар // Материалы 6 Українсько-польської конференції “Полімери спеціального призначення”: тези доп. – Дніпропетровськ, 2010. - С. 70. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, визначення оптимальних температур переробки ароматичного поліаміду, написання тези).*

37. Кабат, О. С. Выбор оптимальных режимов резанья ароматического полиамида фенилон С2 [Текст] / О. С. Кабат, В.И. Ситар, О. В. Волошин // V-th International conference of chemistry and modern technology for students and post-graduate students “Inc-hem-Tec”: tes. of sp. – Dnepropetrovsk, 2011. - С. 380. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, визначення оптимальних значень швидкості різання, подачі та глибини різання, написання тезису).*

38. Влияние нарузок и скоростей скольжения на триботехнические характеристики пары трения полимерный композит-сталь [Текст] / О. С. Кабат, В.И. Ситар, А.А. Митрохин, А. В. Волошин // Материали Всеукраїнської наукової конференції з міжнародним участям “Інженерні засоби і методи оптимізації хімічних виробств”: тези доп. – Дніпропетровськ, 2011. - С. 73-75. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, визначення впливу навантажень та швидкостей ковзання на тертя та зношування ПКМ, написання тезису).*

39. Исследование триботехнических свойств полисульфона [Текст] / Буря А.И., Деркач А.Д., Кабат О.С., ЧэньЮгуан, Линь Иньфан // Материали тридцять першої міжнародної конференції “Композиційні матеріали в промисловості”: тези доп. – Ялта, 2011. - С. 45-48. *(Особистий внесок здобувача: проведення трибо логічних досліджень, написання тезису).*

40. Кабат, О.С. Триботехнические композиты на основе фенилона и кремнеземистых материалов [Текст] / О.С. Кабат, В.И. Сытар // Тезиси докладов міжнародної науково-технічної конференції “Полимерні композити і трибологія”: тези доп. – Гомель, 2011. - С. 108-109. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення трибологічних та морфологічних досліджень, написання тезису).*

41. Кабат, О.С., Термостойкие композиты на основе ароматического полиамида и технического углерода [Текст] / О.С. Кабат, В.И. Сытар, А.А. Мартыненко // Тези доповідей VI науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Хімія та сучасні технології”: тези доп. – Дніпропетровськ, 2013. - С. 97. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення трибо логічних досліджень розроблених ПКМ, написання тезису).*

42. Кабат, О.С. Полимерные композиты на основе фенолоформальдегидной смолы для узлов трения и герметизации каландров [Текст] / О.С. Кабат, Д.В. Скляр // Тези доповідей VI науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Хімія та сучасні технології”: тези доп. – Дніпропетровськ, 2013. - С. 98. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення фізико-механічних та теплофізичних досліджень, написання тезису).*

43. Исследование трения и изнашивания ароматического полиамида (полисульфона) [Текст] / А.И. Буря, О.Д. Деркач, О.С. Кабат, Чэнь Югуан, Линь Иньфан // V міжнародна виставка-конференція “Композити та склопластики”: тези доп. – Запоріжжя, 2013. - С. 214-217. *(Особистий внесок здобувача:*

проведення досліджень на тертя та зношування в широких інтервалах навантажень та швидкостей ковзання, написання тезису).

44. Деркач, О.Д. Реалізація інноваційних складних композитних матеріалів у рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки [Текст] / О.Д. Деркач, О.С. Кабат, Д.О. Барабаш // IX Міжнародна науково-практична конференція “Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки”: тези доп. – Кіровоград, 2013. - С. 177-179. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення трибо логічних досліджень ПКМ, написання тезису).*

45. Изучение процессов трения и изнашивания органопластиков на основе пентапласта [Текст] / О.П. Чигвинцева, Е.В. Клименко, К.Е. Варлан, О.С. Кабат, С.В. Заварина // XI International research and practice conference “Proceedings of academic science 2015” tes. of sp. – Sheffield, 2015. - С. 73-76. *(Особистий внесок здобувача: проведення трибологічних досліджень та їх інтерпретація).*

46. Полимерные композиты на основе дифенилолпропан-формальдегидного полимера, диоксидов кремния и титана [Текст] / Э.В. Подгорный, О.Е. Дембицкий, О.С. Кабат, О.В. Черваков, М.В. Андриянова, Ю.А. Суворова // Тези доповідей VII науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Хімія та сучасні технології”. Том.4. : тези доп. – Дніпропетровськ, 2015. - С. 149. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення термогравіметричного аналізу і визначення фізико-механічних властивостей розроблених ПКМ, написання тезису).*

47. 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, 2016. - P. 95-96. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення термогравіметричного аналізу, написання тезису).*

48. Кабат, О. Полімерні композити на основі ароматичного поліаміду і технічного вуглецю [Текст] / О. Кабат, В.Ситар // Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні технології одержання та переробки полімерних матеріалів” (ТРМ-2016): тези допов. Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні технології одержання та переробки полімерних матеріалів” – Львів, 2016. - С. 28. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення фізико-механічних та трибологічних властивостей, написання тезису).*

49. Термостійкі полімерні композити на основі дифенілолсульфон- та дифенілолпропанформальдегідних олігомерів та високодисперсних кремнеземів [Текст] / О. Кабат, Ю. Кобельчук, Ю. Суворова, О. Черваков, М. Адріянова // Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні технології одержання та переробки полімерних матеріалів” (ТРМ-2016): тези допов. Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні технології одержання та переробки полімерних матеріалів” – Львів, 2016. - С. 93. *(Особистий внесок*

здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення теплофізичних та фізико-механічних досліджень розроблених ПКМ, написання тезису).

50. Фенольные пластики конструкционного назначения с высоким уровнем термической стойкости [Текст] / О.С. Кабат, О.В. Черваков, Ю.М. Кобельчук, М. В. Адриянова, Ю.А. Суворова // I Всеукраїнська наукова конференція “Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів”: тези доп. – Дніпро, 2017. - С. 4-6. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення термогравіметричного аналізу та інтерпретація результатів, написання тезису).*

51. Кабат, О.С. Термостойкие полимерные композиционные материалы специального назначения на основе ароматических полиамидов [Текст] / О.С. Кабат, В.И. Сытар // I Всеукраїнська наукова конференція “Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів”: тези доп. – Дніпро, 2017. - С. 7-8. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, визначення трибологічних та фізико-механічних властивостей розроблених ПКМ, написання тезису).*

52. Кабат, О.С. Полимерные композиционные материалы специального назначения на основе ароматического полиамида [Текст] / О.С. Кабат, В.И. Сытар, О.И. Янченко // III Міжнародна конференція “Young coatings and composites 3”: тези доп. – Дніпро, 2017. - С.17-18. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, визначення фізико-механічних та теплофізичних властивостей розроблених ПКМ, написання тезису).*

53. Кабат, О.С. Матеріали триботехнічного призначення для важконавантажених вузлів тертя [Текст] / О.С. Кабат, В.І. Ситар, Р.О. Кондраток, І.А. Дворецький // II Всеукраїнська наукова конференція “Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів”: тези доп. – Дніпро, 2018. - С. 18-19. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, аналіз та інтерпретація результатів, написання тезису).*

54. Kabat, O. Heat-resistant polymeric composites with nano-sized silica [Text] / O. Kabat, A. Kolomiets, S. Nazarov / International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO-2018): abstracts of the International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials”- Kyiv, 2018. - P. 341. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, проведення теплофізичних досліджень ПКМ, інтерпретація результатів, написання тезису).*

55. Tribological properties of aromatic polyamide phenylon C-1 [Text] / O.P. Chigvintseva, O.S. Kabat, I.V. Rula, Yu.V. Boyko // XIII International research and practice conference “Conduct of modern science. 2018”: tes. of sp. – Sheffield, 2018. - P. 8-10. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об'єктів дослідження, визначення коефіцієнту тертя, зношування та температури на поверхні тертя при фрикційній взаємодії фенілона C1 із сталлю, написання тезису).*

56. Кабат, О.С. Визначення тиску при брикетуванні прес-матеріалів на основі ароматичних поліамідів [Текст] / О.С. Кабат, В.І. Ситар, А.А. Жаріков // III Всеукраїнська наукова конференція “Теоретичні та експериментальні

аспекти сучасної хімії та матеріалів”: тези доп. – Дніпро, 2019. - С. 15-16. *(Особистий внесок здобувача: Визначення оптимальних параметрів при брикетуванні виробів із ПКМ на основі фенілона С1, написання тезису).*

57. Ситар, В.І. Полімерні композити на основі полівінілового спирту із біодеградуючими властивостями [Текст] / В.І. Ситар, О.С. Кабат, К.М. Сухий // III Всеукраїнська наукова конференція “Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів”: тези доп. – Дніпро, 2019. - С. 25-27. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об’єктів дослідження, аналіз та інтерпретація результатів, написання тезису).*

58. Пікула, І. І. Визначення оптимальних технологічних параметрів при переробці прес порошків на основі фторопласта-4 [Текст] / І. І. Пікула, О. С. Кабат // IX Міжнародна науково-технічна конференція «Хімія та сучасні технології»: тези доп. – Дніпро, 2019. - С. 39. *(Особистий внесок здобувача: визначення оптимальних значень навантажень при формуванні брикетів із фторопласту-4 та температур його переробки у виробі написання тезису).*

59. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения для тяжело нагруженных узлов машин и механизмов [Текст] / А.С. Кобец, О.С. Кабат, А.Д. Деркач, С.В. Зотов, К.В. Овчинников // Международная научно-техническая конференция полимерные композиты и трибология (Поликомтриб-2019): тези доп. – Гомель, 2019. - С. 190. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об’єктів дослідження, аналіз та інтерпретація результатів, написання тезису).*

60. Кабат, О.С., Метод отримання термостійких полімерних композиційних матеріалів з використанням суміщення in situ вихідних компонентів [Текст] / О.С. Кабат, О.В.Черваков, В.І. Ситар // II Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні технології одержання та переробки полімерних матеріалів»: тези доп. – Львів, 2019. - С. 21. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об’єктів дослідження, розробка нового методу отримання термостійких ПКМ, написання тезису).*

61. Кабат, О.С. Полімерні композиційні матеріали триботехнічного призначення на основі фторопласта-4 і силікагелю [Текст] / О.С. Кабат, М. С. Ляшевська, Н.В. Павлушкіна // II Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні технології одержання та переробки полімерних матеріалів»: тези доп. – Львів, 2019. - С. 63. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об’єктів дослідження, визначення коефіцієнта тертя та інтенсивності лінійного зношування ПКМ при фрикційній взаємодії із сталлю).*

62. Кабат, О.С. Визначення тиску при брикетуванні прес-матеріалів на основі ароматичних поліамідів [Текст] / О.С. Кабат, В.І. Ситар // III Всеукраїнська наукова конференція “Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів”: тези доп. – Дніпро, 2020. - С. 27-28. *(Особистий внесок здобувача: Визначення оптимального тиску при брикетуванні виробів на основі фенілону С1).*

63. Кабат, О.С. Обґрунтування режимів експлуатації полімерного композиційного матеріалу на основі фенілону С1 [Текст] / О.С. Кабат, О.Д. Деркач, С.В. Зотов // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції

“Підвищення надійності машин і обладнання”: тези доп. – Кропивницький, 2020. - 273 с. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об’єктів дослідження, визначення граничних значень навантажень та швидкостей ковзання розроблених ПКМ).*

64. Токар, А. В. Міжмолекулярні взаємодії у комплексних системах «поліамід-силікагель»: квантово-хімічна інтерпретація [Текст] / А. В. Токар, Л. В. Детюк, О. С. Кабат // Матеріали XII Всеукраїнська наукова конференція студентів та аспірантів "Хімічні Каразінські читання. 2020": тези доп. – Харків, 2020. - С. 79-80 *(Особистий внесок здобувача: обґрунтування об’єктів дослідження, написання тезису).*

АНОТАЦІЯ

Кабат О. С. Науково-технічні основи технології виготовлення термостійких полімерних композиційних матеріалів триботехнічного призначення. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.06– технологія полімерних та композиційних матеріалів. – Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпро, 2021.

У дисертаційній роботі вирішено важливу проблему створення науково-технічних основ технології виготовлення термостійких полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) з невисокою собівартістю, доступністю виробництва в умовах підприємств України та кращим рівнем властивостей, ніж у наявних аналогів для триботехнічних вузлів сучасних машин і механізмів, які працюють при високих навантаженнях, швидкості ковзання і температурі.

Теоретично обґрунтовано і розроблено нову ресурсощадну технологію виготовлення термостійких ПКМ на основі ароматичного поліаміду фенілону С1, фторопласту-4 та дифенілолсульфонформальдегідного олігомеру (ДФСФО) з рівномірно розподіленим у їх об’ємі дисперсним наповнювачем – силікагелем. Це досягається суміщенням (*in situ*) дрібнодисперсних частинок полімерів з наповнювачем у процесі синтезу силікагелю з водного розчину силікату натрію. Запропонована технологія дозволяє відмовитися від операції механічного перемішування вихідних компонентів полімерних композицій на підготовчому етапі переробки, що значно спрощує та здешевлює технологію виготовлення деталей з розроблених ПКМ і сприяє отриманню полімерних композицій з високою якістю розподілу вихідних компонентів.

Проведено системні дослідження з оцінки впливу складів ПКМ і технологій їх переробки на теплофізичні, фізико-механічні та трибологічні властивості виробів з них. Виконано оптимізацію складів розроблених ПКМ з точки зору трибологічних властивостей.

Розроблено рекомендації для впровадження деталей зі створених ПКМ у промисловість. Проведено їх промислові дослідження на підприємствах ТОВ «Т КОРП ГРУП», ТОВ «КОДАЦЬКЕ-АГРО», НПП «СОЮЗ-КОМПОЗИТ», ТОВ «ХІМПОСТАЧ ДНІПРО», ТОВ «ІНТЕР АВІА ІНВЕСТ».

Ключові слова: *термостійкі полімери, силікагель, ресурсоощадна технологія, структура, теплофізичні і фізико-механічні властивості, тертя і зношування*

ABSTRACT

Kabat O.S. Scientific and Technical Bases of Manufacturing Technology of Heat-resistant Polymeric Composite Materials of Tribotechnical Purpose. – On the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.17.06– «Technology of Polymeric and Composite Materials». - Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, 2021.

This dissertation is based on the solution of an important problem of creation of scientific and technical bases of manufacturing technology of heat-resistant polymeric composite materials (PCM) with low prime cost and available production in the conditions of the companies of Ukraine and with the best level of properties than the existing analogs have for tribotechnical units of modern machines and mechanisms that works at high loads levels, sliding speeds and temperatures.

A new resource-saving technology for the production of heat-resistant PCM on the basis of aromatic polyamide phenylon C1, fluoroplastic-4 and diphenylolsulfon-formaldehyde oligomer (DFSFO) with evenly distributed in their volume dispersed material was theoretically substantiated and developed. This is achieved by combining (in situ) fine particles of polymers with a filler in the synthesis of silica gel from an aqueous solution of sodium silicate. The developed technology allows to refuse operation of mechanical mixing of initial components of polymeric compositions at a preparatory stage of processing that considerably simplifies and cheapens technology of manufacturing of details from the developed PCM and promotes reception of polymeric compositions with high quality of distribution of initial components

Systematic researches on an estimation of influence of PCM structures and technologies of their processing on thermophysical, physical-mechanical and tribological properties of products from them were carried out. The optimization of the compositions of the developed PCM from the point of view of tribological properties was performed.

Recommendations for introduction of details from the created PCM in the industry were developed. Their industrial researches were carried out at the enterprises of LLC « T TORP GROUP», LLC «KODATSKE-AGRO», NPE «SOYUZ-KOMPOSIT», LLC «KHIMPOSTACH DNIPRO», LLC « INTER AVIA INVEST».

Keywords: *heat-resistant polymers, silica gel, resource-saving technology, structure, thermophysical and physical-mechanical properties, friction and wear*

АННОТАЦИЯ

Кабат О.С. Научно-технические основы технологии изготовления термостойких полимерных композиционных материалов триботехнического назначения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.06 - технология полимерных и композиционных материалов. - Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», Днепр, 2021.

В диссертации решена важная проблема создания научно-технических основ технологии изготовления термостойких полимерных композиционных материалов (ПКМ) с невысокой себестоимостью, доступностью производства в условиях предприятий Украины и лучшим уровнем свойств чем у существующих аналогов для триботехнических узлов современных машин и механизмов, работающих при воздействии высокого уровня нагрузок, скоростей скольжения и температур.

В работе проведен системный анализ научно-технических источников информации о современных полимерах с высоким уровнем термической стойкости, выпускаемых промышленностью и наполнителей, которые способны улучшить их уровень свойств и уменьшить себестоимость и основных подходов к созданию новых термостойких ПКМ триботехнических назначения.

Теоретически обоснована и разработана новая ресурсосберегающая технология изготовления термостойких ПКМ на основе фенилона С1, фторопласта-4 и дифенилсульфон-формальдегидного олигомера (ДФСФО) с равномерно распределенным в их объеме дисперсным наполнителем - силикагелем. Что достигается совмещением (*in situ*) мелкодисперсных частиц полимеров с наполнителем в процессе синтеза силикагеля из водного раствора силиката натрия. Разработанная технология позволяет отказаться от операции механического перемешивания исходных компонентов полимерных композиций на подготовительном этапе переработки, что значительно упрощает и удешевляет технологию изготовления деталей из них.

Теоретически и экспериментально определен характер взаимодействия силикагеля с фенилоном С1, который происходит за счет создания водородных связей между силанольными группами на поверхности наполнителя и полярными молекулами полимера при их совместном переработке в изделия. Адекватность теоретических расчетов экспериментально доказана с помощью метода ИК-спектроскопии. Установлены закономерности изменения морфологии силикагеля с сферической на ламинарно-ленточную в присутствии дисперсных частичек полимеров.

Разработаны технологии изготовления изделий на основе фенилона С1, фторопласта 4, ДФСФО и силикагеля с использованием стандартного подхода к переработке и с помощью (*in situ*) совмещения. Исследовано влияние технологий совмещения исходных компонентов полимерных композиций на качество распределения силикагеля в фенилони С1, фторопласт-4 и ДФСФО.

Проведено системные исследования по оценке влияния составов ПКМ и технологий их переработки на теплофизические и физико-механические свойства изделий из них. Установлены предельные интервалы эксплуатационных свойств полученных ПКМ. Так, материалы на основе фенилона С1 характеризуются прочностью не более 280 МПа и температурой эксплуатации до 385°C, для ПКМ на основе фторопласта-4 и ДФСФО аналогичные показатели составляют, соответственно 40 МПа и 475°C, 180 МПа и 375°C.

Проведена оптимизация составов разработанных ПКМ с точки зрения трибологических свойств и установлено, что меньшие значения трения и износа наблюдаются у ПКМ на основе фенилона С1 и фторопласта-4, которые наполнены 10% силикагеля. В результате проведения морфологических исследований поверхностей трения определено, что улучшение трибологических свойств связано с созданием дискретного антифрикционного покрытия на стальной поверхности при фрикционном взаимодействии с разработанными ПКМ. Экспериментально установлены предельные значения интервалов эксплуатации изделий из разработанных ПКМ при их фрикционном взаимодействии со стальной поверхностью без и со смазыванием. Так для материалов на основе фенилона С1 и фторопласта-4 эти значения равны $P = 15$ МПа, $V = 1,5$ м/с и $P = 10$ МПа, $V = 1,5$ м/с соответственно.

Разработаны рекомендации по внедрению деталей из созданных ПКМ в промышленность и выполнены их промышленные исследования на предприятиях ООО "Т КОРП ГРУПП", ООО "Кодацкий-АГРО", НПП "Союз-КОМПОЗИТ", ООО "ХИМПОСТАЧ ДНЕПР", ООО "ИНТЕР АВИА ИНВЕСТ" в узлах трения и герметизации технологического оборудования.

Ключевые слова: *термостойкие полимеры, силикагель, ресурсосберегающая технология, структура, теплофизические и физико-механические свойства, трения и изнашивания*

Підписано до друку 01.04.2021. Формат 60×84 1/16. Папір ксерокс. Друк різнограф. Умов. друк. арк. 2,23. Тираж 100 прим. Замовлення № 4.

Свідоцтво ДК №5026 від 16.12.2015.

ДВНЗ УДХТУ, 49005, м. Дніпро-5, просп. Гагаріна, 8.

Редакційно-видавничий відділ

