

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

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

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

КАБАТ ОЛЕГ СТАНІСЛАВОВИЧ

УДК 620.178.165:678.664

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.17.06 – технологія полімерних та композиційних матеріалів

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О. С. Кабат

Науковий консультант Черваков Олег Вікторович, доктор технічних
наук, професор

Дніпро – 2021

АНОТАЦІЯ

Кабат О.С. Науково-технічні основи технології виготовлення термостійких полімерних композиційних матеріалів триботехнічного призначення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.06 – «Технологія полімерних та композиційних матеріалів» (161 – Хімічні технології та інженерія). – ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпро, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої проблеми 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 існуючих аналогів для триботехнічних вузлів сучасних машин і механізмів, які працюють при дії високого рівня навантажень, швидкостей ковзання і температур.

В роботі проведено системний аналіз науково-технічних джерел інформації щодо сучасних полімерів з високим рівнем термічної стійкості, що випускаються промисловістю, наповнювачів, які здатні покращити їх рівень властивостей і зменшити собівартість та основних підходів до створення нових термостійких ПКМ триботехнічного призначення.

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

Теоретично обґрунтовано та розроблено нову ресурсозберігаючу технологію виготовлення термостійких ПКМ на основі ароматичного поліаміду фенілону С1, фторопласту-4 та дифенілолсульфон-формальдегідного олігомеру (ДФСФО) з рівномірно розподіленим у їх об'ємі дисперсним наповнювачем – силікагелем. Це досягається суміщенням (in

situ) дрібнодисперсних частинок полімерів з наповнювачем в процесі синтезу силікагелю з водного розчину силікату натрію. Розроблена 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 розподілення вихідних компонентів за рахунок виключення ефекту сегрегації, який спостерігається при їх механічному суміщенні.

Теоретично та експериментально визначено характер взаємодії силікагелю з ароматичним поліамідом фенілоном С1, який відбувається за рахунок створення водневих зв'язків між силанольними групами на поверхні наповнювача та полярними молекулами полімеру при їх сумісній переробці у виробі. Адекватність теоретичних розрахунків експериментально доведена за допомогою методу ІЧ-спектроскопії. Визначені структурні зміни у ПКМ, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*) у порівнянні із стандартно отриманими, які полягають у підвищенні упорядкованості їх структурних елементів за рахунок зміни морфології полімерної матриці та наповнювача. Встановлено, що морфологія наповнювача при цьому змінюється з сферичної на ламілярно-стрічкову, що пояснюється особливостями його синтезу в присутності дрібнодисперсних частинок полімерів.

Розроблено технології виготовлення виробів на основі фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО та силікагелю з використанням стандартного підходу до переробки та за допомогою (*in situ*) суміщення. Досліджено вплив технологій суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на якість розподілення силікагелю у фенілоні С1, фторопласті-4 та ДФСФО. Встановлено що ПКМ, отримані за (*in situ*) суміщенням вихідних компонентів полімерних композицій на стадії синтезу силікагелю мають на 25-35% кращу якість розподілення наповнювача у полімерних матрицях за рахунок їх взаємодії на надмолекулярному рівні та виключенні ефекту сегрегації при механічному перемішуванні. Визначено оптимальні параметри

формування брикетів: тиск від 40 до 140 МПа; час витримки від 90 до 210 с в залежності від складів полімерних композицій на основі фенілону С1, фторопласту-4, ДФСФО та силікагелю. Визначено оптимальні навантаження 30 – 40 МПа при пресуванні та температури переробки (для ПКМ на основі фенілону С1 – 327°C, фторопласту-4 – 380°C та ДФСФО – 190°C) розроблених матеріалів у виробі. Надано рекомендації щодо вибору матеріалу та основних геометричних параметрів ріжучої кромки токарних різців для обробки отриманих заготовок з ПКМ на основі фенілону С1 та ДФСФО. Визначено оптимальні параметри режимів різання (швидкість різання $V_p = 1-2,5$ м/с, подача $s = 0,07-0,1$ мм/об, глибина різання $t = 0,5-1,5$ мм) для їх обробки на станках токарної групи.

Проведено системні дослідження з оцінки впливу складів ПКМ та технологій їх переробки на теплофізичні та фізико-механічні властивості виробів з них. Встановлено граничні інтервали експлуатаційних властивостей отриманих ПКМ. Так, матеріали на основі фенілону С1 характеризуються міцністю не більше 280 МПа і температурою експлуатації до 385°C, для ПКМ на основі фторопласту-4 та ДФСФО аналогічні показники складають, відповідно 40 МПа і 475°C, 180 МПа і 375°C.

Описано закономірності впливу основних структурних та морфологічних параметрів сталеві деталі у вузлах тертя термостійкий полімер – сталь на трибологічні властивості фенілону С1 і фторопласту-4 та визначено їхні оптимальні значення. Визначено оптимальні параметри режимів притирання деталей з розроблених термостійких полімерних композитів на основі фенілону С1 та фторопласту-4 при їх фрикційній взаємодії зі сталлю. Установлено, що притирання для розроблених ПКМ необхідно проводити при навантаженнях від 1,25 до 2 МПа та швидкостях ковзання від 1,25 до 1,5 м/с. При цих режимах фрикційне розігрівання вузла тертя не перевищує гранично допустимий для розроблених ПКМ та шлях притирання, необхідний для переходу досліджених пар тертя у нормальний режим роботи, має мінімальні значення.

Проведено оптимізацію складів розроблених ПКМ з точки зору трибологічних властивостей і встановлено, що найменше тертя та зношування мають ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4, які наповнені 10% силікагелю. В результаті проведення морфологічних досліджень поверхонь тертя визначено, що покращення трибологічних властивостей пов'язно зі створенням дискретного антифрикційного покриття на сталевій поверхні при фрикційній взаємодії із розробленими ПКМ. Експериментально встановлено граничні значення інтервалів експлуатації виробів з розроблених ПКМ при їх фрикційній взаємодії з сталеною поверхнею без та із змащуванням і при дії високого рівня температур до 300°C. Так для матеріалів на основі фенілону С1 та фторопласту-4 ці значення дорівнюють $P = 15$ МПа, $V = 1,5$ м/с та $P = 10$ МПа, $V = 1,5$ м/с відповідно.

Розроблено рекомендації щодо впровадження деталей із створених ПКМ у промисловість та виконано їх промислові дослідження на підприємствах ТОВ “Т КОРП ГРУП”, ТОВ “КОДАЦЬКЕ-АГРО”, НПП “СОЮЗ-КОМПОЗИТ”, ТОВ “ХІМПОСТАЧ ДНІПРО”, ТОВ “ІНТЕР АВІА ІНВЕСТ”. Використання розроблених матеріалів у вузлах тертя та герметизації консольного валу апаратів ($V=10$ м³) з тихохідною механічною мішалкою дозволяє збільшити їх загальну довговічність роботи у 3,7 разів. Завдяки цьому вдалося зменшити кількість планово-попереджувальних ремонтів, час простою обладнання та витрати на придбання ремонтних ЗІПів у постачальника обладнання. Використання розроблених матеріалів в якості підшипників ковзання у вузлах тертя посівного комплексу «John Deere 1780» збільшило їх довговічність у роботі у 1,5 рази, що дозволяє робити капітальний ремонт з їх заміною не кожні 2 роки, а один раз на 3 роки. Це дозволило заощадити витрати на 2 ремонти посівного комплексу за період його експлуатації впродовж 12 років. Використання розроблених матеріалів в якості підшипників ковзання лап культиваторів дозволило підвищити їх надійність та продуктивність роботи при високому рівні навантажень, обумовлених глибокою культивацією та використанням знаряддя на

«важких» ґрунтах. Збільшення цих параметрів відбулося завдяки усуненню явища наклепу на поверхні металевих втулок рухомих з'єднань культиватора. Використання розроблених матеріалів в якості напрямних втулок у рухомій траверсі гідравлічного преса для переробки полімерних матеріалів дозволило не зменшуючи високий рівень надійності та довговічності цього вузла відмовитися від його постійного змащування, яке проводилося у кожний малий ремонт при планово-попереджувальному обслуговуванні преса.

Ключові слова: термостійкі полімери, силікагель, ресурсощадна технологія, структура, теплофізичні і фізико-механічні властивості, тертя і зношування, впровадження виробів

ABSTRACT

Kabat O.S. Scientific and Technical Bases of Manufacturing Technology of Heat-resistant Polymeric Composite Materials of Tribotechnical Purpose. – Qualifying scientific work 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» (161 - Chemical Technologies and Engineering). - DHEI "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 systematic analysis of scientific and technical sources of information on modern polymers with a high level of thermal stability, manufactured by industry, fillers that can improve their properties and reduce costs and basic approaches to

creating new heat-resistant PCM tribotechnical purpose was also carried out in the work.

According to the level of properties, cost criteria and prevalence, the choice of polymer matrices (phenylene C1, fluoroplastic-4 and diphenylolsulfon-formaldehyde oligomer), filler (silica gel) and technology of their processing into products to create heat-resistant PCM tribotechnical purpose is justified.

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 at the expense of segregation effect combination.

The nature of the interaction of silica gel with the aromatic polyamide phenylone C1, which occurs due to the creation of hydrogen bonds between silanol groups on the surface of the filler and polar polymer molecules during their joint processing into products, has been determined theoretically and experimentally. The adequacy of theoretical calculations has been experimentally proven using the method of IR-spectroscopy. The structural changes in PCM were obtained by means of combination (in situ) in comparison with the standard ones, which consist in increasing the ordering of their structural elements due to the change of morphology of the polymer matrix and filler. It was established that the morphology of the filler changes from spherical to lamillary-tape, which is explained by the peculiarities of its synthesis in the presence of fine polymer particles.

Technologies for manufacturing products based on phenylon C1, fluoroplastic-4, DFSFO and silica gel using a standard approach for processing and (in situ) combination have been developed. The influence of methods of combining the initial components of polymer compositions on the quality of distribution of silica gel in phenylone C1, fluoroplastic-4 and DFSFO was investigated. It was found that PCM obtained by (in situ) combining the initial components of polymer compositions at the stage of silica gel synthesis have 25-35% better quality of filler distribution in polymer matrices due to their interaction at the supramolecular level and eliminating the effect of segregation by mechanical mixing. The optimal parameters of briquette formation were determined: pressure from 40 to 140 MPa; holding time from 90 to 210 sec depending on the compositions of polymer compositions based on phenylene C1, fluoroplastic-4, DFSFO and silica gel. The optimal loads of 30 - 40 MPa at pressing and processing temperature (for PCM on the basis of phenylon C1 - 327°C, fluoroplastic-4 - 380°C and DFSFO - 190°C) of the developed materials in products were determined. Recommendations for the choice of material and the main geometric parameters of the cutting edge of lathe cutters for processing the obtained work pieces with PCM based on phenylene C1 and DFSFO were presented. The optimal parameters of cutting modes (cutting speed $V_p = 1-2,5$ m/sec, feed $s = 0.07-0.1$ mm/rev, cutting depth $t = 0.5-1.5$ mm) for their lathes processing.

Systematic researches on an estimation of warehouses influence of PCM and technologies of their processing on thermophysical and physical and mechanical properties of products from them were carried out. The limit intervals of operational properties of the obtained PCM were established. Thus, materials based on phenylene C1 are characterized by strength of no more than 280 MPa and operating temperature up to 385°C, for PCM based on fluoroplastic-4 and DFSFO similar figures are 40 MPa and 475°C, 180 MPa and 375°C respectively.

The regularities of the influence of the main structural and morphological parameters of the steel part in the friction units of heat-resistant polymer - steel on the tribological properties of phenylene C1 and fluoroplastic-4 were described and

their optimal values were determined. The optimal parameters of grinding modes of parts from the developed heat-resistant polymer composites on the basis of phenylene C1 and fluoroplastic-4 at their frictional interaction with steel have been determined. It is established that grinding for the developed PCM should be carried out at loads from 1.25 to 2 MPa and sliding speeds from 1.25 to 1.5 m/sec. In these modes the frictional heating of the friction unit does not exceed the maximum allowable for the developed PCM and the grinding path required for the transition of the studied friction pairs to normal operation is minimal.

The compositions of the developed PCM were optimized from the point of view of tribological properties and it was found that the least friction and wear had PCM based on phenylene C1 and fluoroplastic-4, which were filled with 10% silica gel. As a result of morphological studies of friction surfaces it was determined that the improvement of tribological properties was associated with the creation of a discrete antifriction coating on a steel surface with frictional interaction with the developed PCM. The limit values of service intervals of products from the developed PCM at their frictional interaction with a steel surface without and with greasing and at action of a high level of temperatures to 300°C were experimentally established. Thus, for materials based on phenylene C1 and fluoroplastic-4, these values were equal to $P = 15$ MPa, $V = 1.5$ m/sec and $P = 10$ MPa, $V = 1.5$ m/sec respectively.

Proposals on the introduction of details from the created PCM in the industry were developed and their industrial researches at the enterprises of LLC «T TORP GROUP», LLC «KODATSKE-AGRO», NPE «SOYUZ-KOMPOSIT», LLC «KHIMPOSTACH DNIPRO», LLC «INTER AVIA INVEST». The use of the developed materials in the units of friction and sealing of the cantilever shaft of the devices ($V = 10$ m³) with a low-speed mechanical stirrer allows to increase their overall durability by 3.7 times. Due to this, it was possible to reduce the number of scheduled preventive repairs, equipment downtime and the cost of purchasing repair parts from the equipment supplier. The use of the developed materials as sliding bearings in the friction units of the «John Deere 1780» sowing

complex increased their durability in operation by 1.5 times, that allows to make major repairs with their replacement not every 2 years, but once every 3 years. This allowed to save the cost of 2 repairs of the sowing complex for the period of its operation for 12 years. The use of the developed materials as plain bearings for cultivators allowed to increase their reliability and productivity at high levels of loads due to deep cultivation and the use of tools on "heavy" soils. The increase in these parameters was due to the elimination of the phenomenon of hardening on the surface of the metal bushings of the movable joints of the cultivator. The use of the developed materials as guide bushings in the movable traverse of the hydraulic press for processing of polymeric materials allowed without abandoning the high level of reliability and durability of this unit to abandon its permanent lubrication, that was carried out in each small repair during scheduled maintenance of the press.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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).

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.

11. **Кабат, О. С.** Термостойкие полимерные композиты специального назначения для тяжело нагруженных узлов трения [Текст] / **О. С. Кабат**, В.І. Сытар, А.А. Митрохин // Технологические системы. - 2017. - Т. 2 (79). - С. 25-33.

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.

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.

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>

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). - P. 48-53.

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

DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht12.03.326> (Scopus)

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)

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>

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)

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)

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.

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).

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>.

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). - P. 194-201 DOI: <https://doi.org/10.15421/082021> (Scopus).

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>

26. Обґрунтування полімерних матеріалів для використання у конструкціях плугів [Текст] / О.Д. Деркач, **О.С. Кабат**, Д.О. Макаренко, Б.Г. Харченко // Центральноукраїнський 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)

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.

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.

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.

30. **Кабат, О.С.** Полімерний композит для узлов машин и механизмов, работающих при повышении 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.

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”: тези доп. – Ялта, 2009. - С. 53-54.

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.

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.

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”: тези доп. – Ялта, 2010. - С. 130-131.

35. **Кабат, О. С.** Влияния твердости стального контртела на триботехнические свойства пары трения фенилон С2 - сталь 45 [Текст] / **О. С. Кабат**, В. И. Ситар // Материали 6 Українсько-польської конференції

“Полімери спеціального призначення”: тези доп. – Дніпропетровськ, 2010. - С. 69.

36. **Кабат, О. С.** Композиты на основе ароматического полиамида с увеличенным интервалом температур переработки [Текст] / **О. С. Кабат, В. И. Ситар** // Материали 6 Українсько-польської конференції “Полімери спеціального призначення”: тези доп. – Дніпропетровськ, 2010. - С. 70.

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.

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 Всеукраинской научной конференции с международним участием “Инженерные средства и методы оптимизации химических производств”: тези доп. – Днепропетровск, 2011. - С. 73-75.

39. Исследование триботехнических свойств полисульфона [Текст] / Буря А.И., Деркач А.Д., **Кабат О.С.**, ЧэньЮгуан, Линь Иньфан // Материалы тридцать первой международной конференции “Композиционные материалы в промышленности”: тези доп. – Ялта, 2011. - С. 45-48.

40. **Кабат, О.С.** Триботехнические композиты на основе фенилона и кремнеземистых материалов [Текст] / **О.С. Кабат, В.И. Сытар** // Тезисы докладов международной научно-технической конференции “Полимерные композиты и трибология”: тези доп. – Гомель, 2011. - С. 108-109.

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.

42. **Кабат, О.С.** Полимерные композиты на основе феноло-формальдегидной 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.

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.

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.

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.

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

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.

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.

49. Термостійкі полімерні композити на основі дифенілолсульфон- та дифенілолпропанформальдегідних олігомерів та високодисперсних кремнеземів [Текст] / **О. Кабат, Ю. Кобельчук, Ю. Суворова, О. Черваков, М. Адріанова** // 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.

50. Фенольные пластики конструкционного назначения с высоким уровнем термической стойкости [Текст] / **О.С. Кабат, О.В. Черваков, Ю.М. Кобельчук, М. В. Адріанова, Ю.А. Суворова** // I Всеукраїнська наукова конференція “Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів”: тези доп. – Дніпро, 2017. - С. 4-6.

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.

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.

53. **Кабат, О.С.** Матеріали трибо технічного призначення для важко навантажених 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	26
ВСТУП.....	27
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	37
1.1 Сучасні підходи до створення термостійких ПКМ.....	40
1.2 Обґрунтування вибору полімерних матриць для ПКМ з високим рівнем термічної стійкості.....	43
1.3 Обґрунтування вибору наповнювача для термостійких ПКМ триботехнічного призначення.....	54
1.4 Сучасні технології переробки термостійких ПКМ у виробі методом пресування.....	65
1.5 Проблеми та способи забезпечення рівномірності розподілу наповнювача в складі ПКМ.....	68
Висновки до розділу 1.....	75
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	76
2.1 Характеристики вихідних матеріалів.....	76
2.2 Технології переробки та обладнання для отримання ПКМ на основі прес-порошків полімерів (фенілон С1, фторопласт-4,ДФСФО) та сілікагелю.....	84
2.3 Методи досліджень вихідних матеріалів та ПКМ на їх основі.....	88
2.4 Обробка результатів експериментів.....	93
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА НОВИХ ПІДХОДІВ ОТРИМАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ НА ОСНОВІ ТЕРМОСТІЙКИХ ПОЛІМЕРІВ.....	96
3.1 Теоретичне обґрунтування технології отримання сілікагелю в присутності прес-порошків фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО	96

3.2 Розробка технології отримання полімерних композицій з високою якістю розподілення їх вихідних компонентів.....	107
Висновки до розділу 3.....	115
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ МОРФОЛОГІЇ ТА СТРУКТУРИ ТЕРМОСТІЙКИХ ПКМ.....	116
4.1 Теоретичні та експериментальні аспекти взаємодії силікагелю з ароматичним поліамідом.....	117
4.2 Вплив технології отримання на морфологію та структуру ПКМ	125
Висновки до розділу 4.....	142
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕРОБКИ ТЕРМОСТІЙКИХ ПКМ.....	143
5.1 Підготовчий етап переробки термостійких ПКМ у виробі.....	144
5.1.1 Визначення оптимального часу перемішування та якості розподілення силікагелю у полімерних композиціях на основі фенілону С1, фторопласту-4 таДФСФО.....	144
5.1.2 Визначення оптимального тиску та часу витримки при формуванні брикетів з полімерних композицій.....	151
5.2 Основний етап переробки термостійких ПКМ у виробі.....	155
5.2.1 Визначення оптимальних температур та часу сушки полімерних композицій на основі фенілону С1, фторопласту-4 таДФСФО.....	155
5.2.2 Визначення оптимальних тисків, температур та часу витримки при пресуванні виробів з термостійких ПКМ.....	161
5.3 Заклучний етап переробки термостійких ПКМ у виробі.....	168
Висновки до розділу 5.....	179
РОЗДІЛ 6. ВПЛИВ СКЛАДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТЕРМОСТІЙКИХ ПКМ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ	

ВИРОБІВ З НИХ.....	180
6.1 Вплив складів та технології отримання ПКМ на теплофізичні властивості виробів з них	180
6.2 Вплив складів та технології отримання ПКМ на фізико- механічні властивості виробів з них.....	192
Висновки до розділу 6	200
РОЗДІЛ 7. ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБІВ З ТЕРМОСТІЙКИХ ПКМ	202
7.1 Вибір оптимальних структурних та морфологічних параметрів сталевого зразка при терті з ПКМ	203
7.2 Вибір оптимальних режимів притирання пар тертя термостійкий ПКМ-сталь.....	208
7.3 Вплив складів та технології отримання термостійких ПКМ на показники тертя та зношування при фрикційній взаємодії із сталлю.....	219
7.4 Вплив зовнішніх факторів на показники тертя та зношування ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та силікагелю.....	235
7.4.1 Вплив навантаження та швидкості ковзання на тертя та зношування термостійких ПКМ при фрикційній взаємодії із сталлю....	236
7.4.2 Вплив температури та робочого середовища на основні трибологічні властивості розроблених ПКМ.....	242
Висновки до розділу 7.....	259
РОЗДІЛ 8 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ КОМПОЗИТІВ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ПРОМИСЛОВИХ ВИПРОБУВАНЬ	261
8.1 Рекомендації щодо застосування виробів з термостійких ПКМ у конструкційних та трибологічних вузлах машин і механізмів.....	261
8.2 Результати промислових випробувань.....	268

8.2.1 Вузол тертя та герметизації консольного валу якірної мішалки.....	268
8.2.2 Вузли тертя посівного комплексу “John Deere 1780”.....	270
8.2.3 Вузли тертя широкозахватних посівних машин та культиваторів	274
8.2.4 Вузол тертя гідравлічного преса.....	277
8.2.5 Вузол тертя шліфувального верстату.....	278
Висновки за розділом 8.....	280
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	282
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	285
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача	321
ДОДАТОК Б Приклад програми для визначення математичних залежностей коефіцієнта неоднорідності полімерних композицій від часу перемішування та вмісту наповнювача.....	332
ДОДАТОК В Приклад програми для визначення математичних залежностей коефіцієнта тертя ПКМ від навантаження та швидкості ковзання при фрикційній взаємодії із сталлю.....	336
ДОДАТОК Г Акт про впровадження матеріалів і технологій, наукових положень і висновків докторської дисертації (підприємство ТОВ “Т КОРП ГРУП”).....	340
ДОДАТОК Д Акт про впровадження матеріалів і технологій, наукових положень і висновків докторської дисертації (підприємство ТОВ “КОДАЦЬКЕ-АГРО”).....	342
ДОДАТОК Ж Акт випробувань деталей із полімерних композиційних матеріалів на основі ароматичних поліамідів та фтор полімерів в якості підшипників ковзання сільськогосподарської техніки (підприємство НПП Союз-Композит).....	345
ДОДАТОК К Акт випробувань напрямних втулок з полімерних композиційних матеріалів на основі ароматичного поліаміду в	

рухомій траверсі гідравлічного пресу (ПА-63) для переробки полімерів (підприємство ТОВ “Хімпостач Дніпро”)..... 347

ДОДАТОК Л Акт випробувань накладок з полімерних композиційних матеріалів на основі фторопласту-4 на напрямні ковзання рухомого стола шліфувального верстату ОШ 143 (підприємство ТОВ “Інтер Авіа Інвест”)..... 349

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПКМ – полімерний композиційний матеріал

ДФСФО – дифенілолсулфон-формальдегідний олігомери

КТЛР – коефіцієнт термічного лінійного розширення

HRC – твердість за Роквелом

Ra – середнє арифметичне відхилення нерівностей профілю поверхні

Vc – коефіцієнт неоднорідності

ρ - густина

σ_y – напруження при межі текучості при стисканні

a_n – ударна в'язкість

P – навантаження

T – температура

t - час

τ_c – час витримки

Fp – сила різання

T_{БК} – температура розм'якшення за Віка

α – коефіцієнт термічного лінійного розширення

E – модуль пружності при стисканні

HB – твердість за Брінелем

f_{TP} – коефіцієнт тертя

I_m – вагове зношування

V – швидкість ковзання

L – шлях ковзання

I_h – інтенсивність лінійного зношування

HV - мікротвердість

ВСТУП

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 об'єму їх споживання у промисловості, який останнім часом суттєво перевищує об'єм інших матеріалів.

Слід відзначити, що полімери і ПКМ на їх основі, 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 вироби.

Тому актуальним науково-технічним завданням є розробка нових підходів до 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 вироби.

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 теплоакumuлюючих 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 ресурсоощадних 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 вироби для створення термостійких ПКМ триботехнічного призначення;
- розробити науково-технічні основи ресурсоощадної технології отримання термостійких ПКМ триботехнічного призначення з визначенням їх оптимальних параметрів переробки у вироби;
- 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 виробах 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. Розроблені підходи до створення конструкційних полімерних композиційних матеріалів триботехнічного призначення з високим рівнем термічної стабільності базуються на аналізі теоретичних та експериментальних даних, одержаних із застосуванням сучасних методів досліджень. Мікрометричні знімки частинок полімерів, наповнювача, сколів розроблених ПКМ на їх основі, поверхонь тертя отримували за допомогою електронного (Superprobe-733 (Jeol)) та оптичних (МИМ-7, МБР-1 МБС-9) мікроскопів, які оснащені камерами для електронних мікрофотографій. Рівномірність розподілення наповнювача в полімерній композиції оцінювали за рахунок знаходження коефіцієнта неоднорідності. Щільність брикетірованих прес-порошків полімерів та ПКМ на їх основі визначали за ISO 1183 за допомогою методу вимірювання та вивішування на аналітичних вагах ВЛР-200. Густина полімерів та ПКМ на їх основі визначали за ISO 1183 з використанням методу гідростатичного зважування на аналітичних вагах ВЛР-200 з модулем для гідростатичного зважування. Стійкість до дії температури об'єктів дослідження вимірювали з використанням методу термогравіметричного аналізу відповідно до ISO-11358 за методами сканування по температурі та часу на дериватографі TGA Q50. Напруження при межі текучості (σ_y) та модуль пружності (E) при стисканні вихідних полімерів та ПКМ на їх основі визначали за ISO 604 та ГОСТ 9550-81 на універсальній розривній машині 2167 Р-50 у відповідності до ISO 604. Ударну в'язкість (a_n) вихідних полімерів знаходили відповідно до ISO 179 на маятниковому копрі МК-30. Твердість (H) матеріалів визначали за методом вдавлювання шарика на твердомірі 2013 ТШСП у відповідності до

ISO-2039-1. Силу різання при точінні заготовок із розроблених ПКМ визначали за допомогою вимірювального токарного різця. Шорсткість поверхонь виробів із полімерів, ПКМ на їх основі та поверхонь тертя вимірювали у відповідності до ГОСТ 2789-73 на профілометрі 296. Рентгеноструктурний аналіз полімерів та ПКМ на їх основі проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2 у монохроматизованому Cu–K α випромінюванні. Інфрачервоні спектри полімерів та ПКМ на їх основі отримували на Фур'є ІЧ-спектрометрі SPECTRUM ONE (Perkin Elmer). Температуру розм'якшення за Віка T_{VC} визначали на приборі FWV-633/10 відповідно до ISO 1183-1. Вимірювання лінійного теплового розширення α матеріалів виконували згідно з ГОСТом 15173-70 на приборі ДКВ-4. Коефіцієнт тертя та інтенсивність лінійного зношування при фрикційній взаємодії розроблених полімерів та ПКМ на їх основі із сталлю визначали на машині “2070 СМТ-1” при режимі тертя без змащування по схемі диск-колодочка. Використовували сталевий зразок із сталі 45 з шорсткістю Ra = 0,32 мкм і твердістю 45-50 HRC. Температуру на поверхні тертя визначали за допомогою хромель-алюмелевої термопари, яка з'єднана з вимірювальним прибором MASTECH MS6514.

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 представлений 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 сталевій 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^оС 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^оС.

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 ЗПів 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.х.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., с.н.с. 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); Всеукраинской научной конференции 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.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Інтенсивний розвиток сучасного суспільства практично неможливий без прогресу в галузі таких галузей промисловості, як електроенергетична, хімічна і нафтохімічна, металургійна, машинобудівна тощо. Причому останнім часом основним локомотивом розвитку промисловості стали саме електроенергетична (виробництво сучасних машин і механізмів для отримання енергії з поновлюваних та ядерних джерел ресурсів) та машинобудівна галузі у сфері виробництва авіаційної, ракетно-космічної техніки, водяних суден, роботів тощо [1–3].

Серед найбільш суттєвих досягнень сьогодення цих галузей літак на сонячних батареях Solar Impulse SI2 (<https://solarimpulse.com/>), надзвуковий суборбітальний літак класу Space Ship Two, який знаходиться на завершальній стадії випробувань (<https://www.virgingalactic.com/>); суборбітальні, орбітальні та космічні кораблі багаторазового використання Falcon 9, Falconheavy, Dragon (<https://www.spacex.com/>); електроавтомобілі з запасом ходу до 600 км (<https://www.tesla.com/>) 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 впродовж тривалого часу [4–5]. І тому однією з основних проблем при їх розробці і впровадженні є складність у забезпеченні високого рівня надійності та довговічності в роботі.

Так, прикладом деталей та вузлів сучасних машин є:

- деталі вузлів паливної системи (елементи паливних насосів та турбін, магістралей, клапанів газогенераторів тощо) космічних кораблів, які повинні забезпечувати високий рівень надійності та довговічності при роботі з агресивним середовищем (паливо, окислювач тощо), достатній рівень міцності при мінімізації їх ваги, працювати в широкому інтервалі температур

від від'ємних до позитивних (-40 до +50) при фрикційній взаємодії поверхонь без змащування [6; 7];

- деталі вузлів ходової автомобілів, які працюють при дії абразивних та агресивних середовищ та із знакоперемінними навантаженнями у межах декількох сотен МПа і повинні забезпечувати високий рівень надійності та довговічності [8; 9];

- деталі та вузли механізмів для отримання енергії з поновлюваних джерел ресурсів (насоси, турбіни, компресори, теплообмінники, генератори тощо), які повинні забезпечувати надійну та довговічну роботу при навантаженнях до 250 МПа, швидкостях ковзання до десятків тисяч об/хв, температур до 200°C у режимах граничного змащування та при терті без мастила [10; 11];

- деталі та вузли високотехнологічних ліній з виробництва металургійної та полімерної продукції (компресори, насоси, преси, конвеєри, литтєві машини тощо), які працюють при температурах до 250–300°C в агресивних середовищах при граничному змащуванні та дії знакоперемінних навантажень [12; 13];

- деталі та вузли високотехнологічної аграрної техніки (підшипники ковзання, кочення та втулки ґрунтообробних та посівних машин, напрямні, бічі та вушка комбайнів тощо), які повинні забезпечувати високий рівень надійності та довговічності при дії абразивного середовища в режимах роботи без змащування та граничного змащування при дії знакоперемінних навантажень [14; 15]

Для вирішення проблеми підвищення надійності та довговічності в роботі сучасних машин і механізмів є два шляхи:

- розробка нових конструкцій машин з кардинально зміненим принципом та механізмом їх роботи;

- розробка нових конструкційних матеріалів для виготовлення основних елементів сучасних машин, які мають кращий рівень властивостей порівняно із тими, що використовуються зараз.

Розробка нових конструкцій машин з кардинально зміненим принципом та механізмом їх роботи є дуже науко- та ресурсоемним процесом, який займає значний проміжок часу. Тому використання цього варіанта підвищення надійності та довговічності машин на сучасному етапі розвитку автомобіле-, авіа- та ракетобудування не є доцільним. Це й обумовило пріоритетність вирішення проблеми підвищення надійності та довговічності сучасних машин саме за рахунок їх модернізації, яка полягає в заміні конструкційних матеріалів, з яких виготовляють основні вузли та деталі на розроблені аналоги з кращим рівнем властивостей.

Створення нових конструкційних та триботехнічних матеріалів з кращим рівнем властивостей, ніж у наявних згідно з принципами, розробленими Європейською комісією з ключових технологій (European Commision Key Enabling Technologies (KETs)) є однією із найбільш пріоритетних та актуальних завдання сьогодення [16].

У сучасних машинах і механізмах у якості конструкційних та триботехнічних матеріалів використовуються метали та їх сплави, кераміка, полімери та полімерні композиційні матеріали (ПКМ), деревина, скло тощо. Найбільш перспективними з них є саме полімери та ПКМ [17–19], що підтверджується збільшенням об'єму їх споживання всіма галузями промисловості, який останнім часом значно перевищує інші матеріали.

Полімери та ПКМ на їх основі завдяки своїм унікальним властивостям (невисока собівартість виготовлення виробів з них, високий рівень хімічної стійкості, невелика вага, можливість роботи у вузлах тертя без змащування тощо [20–22]) використовуються практично в усіх сферах життєдіяльності людини для виготовлення широкої номенклатури виробів, починаючи з посуду та закінчуючи елементами ракет [23–26].

Полімери та ПКМ на їх основі, що випускаються у промислових масштабах, вже не можуть повною мірою забезпечити нормальну роботу сучасних машин унаслідок недостатнього рівня термічної стабільності, міцності і трибологічних властивостей. Їхні лабораторні аналоги, рівень

властивостей яких відповідає вимогам, що висуваються до деталей сучасних машин, мають досить високу собівартість за рахунок дефіцитності вихідних компонентів та складної технології переробки у вироби.

Тому актуальною науково-прикладною проблемою є розробка нових підходів до створення матеріалів на основі полімерів з високим рівнем теплофізичних, фізико-механічних та трибологічних властивостей і невисокою собівартістю за рахунок використання недефіцитних вихідних компонентів та спрощення технології переробки у вироби.

1.1 Сучасні підходи до створення термостійких ПКМ

Зважаючи на те, що сучасні машини працюють у жорстких умовах експлуатації і досить часто їхні вузли знаходяться під дією високого рівня температур упродовж тривалого часу, необхідно використовувати в якості матеріалів конструкційного та трибологічного призначення такі, деталі з яких здатні забезпечити високий рівень надійності та довговічності вузлів у цілому у вищезазначених умовах [27; 28]. Тому особливу зацікавленість для розробки таких матеріалів викликають полімери та ПКМ з високим рівнем термічної стійкості [29–32].

Термічна стійкість полімерів, ПКМ та виробів з них залежить від двох суттєво різних процесів, які в них проходять з підвищенням температури. Перший з них – це оборотний процес, який залежить тільки від температури і призводить до «розм'якшення» матеріалу при її дії. Другий процес – необоротне розкладання полімеру під дією тепла, який залежить від дії температури, часу та навколишнього середовища, в якому проходить [29; 30].

Термічна стійкість по відношенню до більшості полімерних матеріалів та виробів з них є параметром, який визначається як мінімальна температура з-поміж двох їх температурних характеристик. Перша визначається як межева температура, при якій полімери не розм'якшуються та вироби з них не втрачають свою геометричну форму та механічну міцність (у більшості

випадків відповідає температурі розм'якшення полімерів). Друга визначається як межова температура, при якій у полімері не відбувається хімічна зміна структури протягом деякого часу у визначеному навколишньому середовищі, яка відображається на його властивостях (визначається, як температура, що відповідає початку активної термічної деструкції полімерів).

До найбільш поширених підходів, які використовуються для отримання нових матеріалів на основі полімерів з високим рівнем термічної стійкості слід віднести:

- синтез нових термічно стійких полімерних матеріалів;
- створення нових ПКМ з високим рівнем термічної стійкості.

При синтезі нових термічно стійких полімерних матеріалів за рахунок комбінування різних видів вихідної сировини для їх створення, вибору оптимальних технологічних параметрів їх синтезу тощо вдається отримати полімерні матриці з високим рівнем термічної стабільності.

Так, до таких найбільш сучасних матеріалів слід віднести полімери з триазиновими ароматичними гетероциклами [33], фторвмісні складні ароматичні поліетери [34], деякі співполімери ароматичних поліамідів [35], смоли на основі фенолу та терафталевого альдегіду [36] тощо.

Всі ці матеріали відрізняються високим рівнем термічної стійкості і мають досить високі значення температури початку активної деструкції 380–450°C. Однак на сучасному етапі розвитку промисловості полімерів вони не стали популярними через досить високу собівартість, дефіцитність вихідних компонентів для синтезу, складнощі переробки у виробі високопродуктивними методами. Це обумовило тільки одиничні випадки використання виробів з даних полімерів у наукоємних та найбільш високотехнологічних галузях промисловості (ракетобудуванні та космічній індустрії). Серед недоліків таких полімерів і досить вузький напрям їх використання, оскільки такі матеріали поряд із високим рівнем термічної

стабільності мають досить низьку міцність та не можуть бути використані у триботехнічних вузлах.

При створенні нових ПКМ з високим рівнем термічної стійкості за рахунок підбирання полімерних матриць, наповнювачів, модифікаторів та їх комбінування, розроблення нових технологій отримання ПКМ можливо отримати термічностабільні матеріали з досить високим рівнем фізико-механічних та трибологічних властивостей [37; 38]. При цьому в якості вихідних компонентів, для них можна використовувати недорогі і недефіцитні інгредієнти, які при поєднанні здатні взаємодіяти між собою, створюючи при цьому матеріал з необхідним рівнем властивостей.

Цей підхід до отримання нових матеріалів на основі полімерів з високим рівнем термічної стійкості на сучасному етапі розвитку полімерної промисловості більш прийнятний, ніж синтез нових полімерів внаслідок того, що отримані при цьому продукти мають невисоку собівартість, виробляються з недефіцитної сировини та є матеріалами з досить високим ступенем технологічності при переробці у вироби.

До найбільш поширених підходів, які використовуються для створення ПКМ з високим рівнем термічної стійкості слід віднести:

- вибір термостійкої полімерної матриці;
- вибір наповнювачів чи модифікаторів з високим рівнем термічної стійкості;
- вибір полімерних матриць та наповнювачів, здатних взаємодіяти між собою в процесі переробки у вироби, створюючи при цьому матеріал з високим рівнем термічної стійкості;
- модернізація наявних чи створення нових технологій переробки ПКМ у вироби, що сприяють покращенню рівня їх термічної стійкості.

Всі ці підходи тією чи іншою мірою дозволяють отримувати ПКМ з високим рівнем термічної стійкості. Причому кожен з них має, як свої

недоліки, так і переваги. Однак оптимального та найефективнішого підходу до створення таких матеріалів ще не визначено.

Тому актуальним завданням є створення нового, найбільш ефективного підходу до отримання термостійкого ПКМ за рахунок модернізації та оптимізації відомих.

У роботі запропоновано комбінований підхід до створення ПКМ з високим рівнем термічної стійкості, який включає в себе одночасно найкращі елементи з усіх вище згаданих. Він полягає у створенні ПКМ на основі термостійких полімерних матриць та наповнювачів, здатних до взаємодії при переробці у виробі й отримані згідно з новою ресурсозбережною технологією переробки у виробі.

Для його здійснення необхідно провести огляд наукових публікацій з метою визначення найбільш оптимальних сучасних полімерних матриць, наповнювачів та технологій їх переробки у виробі для створення термостійких полімерних композиційних матеріалів триботехнічного призначення.

1.2 Обґрунтування вибору полімерних матриць для ПКМ з високим рівнем термічної стійкості

Всі полімерні матриці з високим рівнем термічної стійкості для створення полімерних композиційних матеріалів триботехнічного призначення поділяються на термореактивні та термопластичні.

Причому з точки зору термічної стійкості термореактивні полімерні матриці мають перевагу над термопластичними, а з точки зору трибологічних властивостей – навпаки, що є наслідком різниці у їх структурі та хімічній будові [32].

На термічну стійкість полімерних матриць впливають фізичні та хімічні особливості їх структури, зокрема міцність зв'язків між атомами в

полімерній молекулі, будова ланцюгів молекули, наявність бокових груп та розгалужень, ступінь структурування тощо [39].

Міцність зв'язків між атомами в молекулі полімерів залежить як від природи атомів, між якими вони створені, так і від порядку їх поєднання. Її можна охарактеризувати як енергію, необхідну для дисоціації зв'язків між атомами і яка проходить із створенням вільних радикалів. Тобто полімери з більш міцними зв'язками атомів у молекулах складніше руйнуються під дією температури, а відповідно до цього і мають кращі значення термічної стійкості [39; 40].

Полімери з високим рівнем термічної стійкості за будовою головного ланцюга в полімерній макромолекулі бувають гомо- та гетероланцюгові. У більшості випадків до гомоланцюгових належать ті, які мають у головному ланцюзі С-С зв'язок (карболанцюгові полімери). Це є наслідком найбільшого значення енергії цього зв'язку порівняно з іншими елементами, здатними створювати полімерний ланцюг (рис. 1.1).

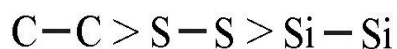


Рисунок 1.1 - Схематичне зображення зв'язків атомів у головному ланцюзі гомоланцюгової полімерної макромолекули згідно зі значеннями енергії їх зв'язку

Відповідно до довідникової літератури [39; 41] значення енергії зв'язку для С-С складає 82 ккал/моль, для S-S- 63 ккал/моль і для Si-Si – 50 ккал/моль.

У гетероланцюгових полімерах молекули основного ланцюга створені з різних елементів, енергія зв'язку між якими має досить великі значення. На рис. 1.2 представлено схематичне їх зображення згідно зі значеннями енергії зв'язку між атомами.

Так, до найбільш міцних зв'язків слід віднести В-О (до 120 ккал/моль), Si-O (до 111 ккал/моль) та В-N (до 105 ккал/моль) [39; 41].

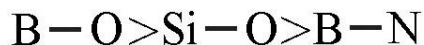


Рисунок 1.2 - Схематичне зображення зв'язків атомів у головному ланцюзі гетероланцюгової полімерної макромолекули згідно зі значеннями енергії їх зв'язку

На термічну стійкість полімерів суттєво впливає міцність зв'язків атомів основного ланцюга з атомами, що обрамляють ці ланцюги. До найбільш міцних зв'язків належать Si-F (до 135 ккал/моль), C-F (до 116 ккал/моль) [39; 41]. Тобто полімери з найбільшими значеннями термічної стійкості є гомоланцюговими зі зв'язком C-C чи гетероланцюговими зі зв'язками B-N, B-O, Si-O у головному ланцюгу. Також високу термічну стійкість мають полімери із зв'язками Si-F, C-F між атомами, що обрамляють головний ланцюг та атомами в головному ланцюзі.

На термічну стійкість полімерів впливає також наявність бокових груп і розгалужень [39]. Так, вони у більшості випадків призводять до зменшення термічної стійкості полімерів, оскільки бокові групи ослабляють зв'язки у головному ланцюзі макромолекули (рис. 1.3).

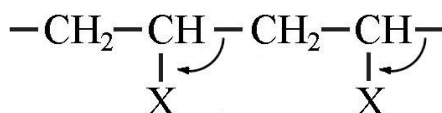
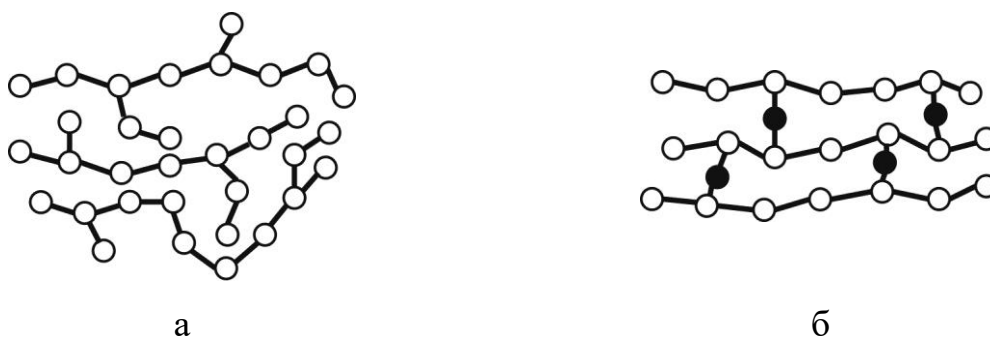


Рисунок 1.3 - Схематичне зображення головного ланцюга полімерної макромолекули з боковими групами (X)

У результаті цього основний ланцюг руйнується при менших температурах. Тобто до найбільш термічно стабільних слід віднести полімери з відсутністю чи мінімальною кількістю бокових груп і розгалужень.

Ступінь структурування полімерних сполук також суттєво впливає на термічну стабільність полімерів. Так, такі високоструктуровані сполуки, як

графіт, кремній тощо мають дуже високий рівень термічної стійкості за рахунок створення великої кількості міжмолекулярних зв'язків, які, на відміну від внутрішньомолекулярних, не залежать від температури в широкому діапазоні температур. Така ж закономірність характерна для термореактивних полімерів, які мають міжмолекулярні зв'язки (зшивки) і з точки зору термічної стійкості вищий рівень властивостей, ніж термопластичні. На рис. 1.4 зображено умовні схеми надмолекулярних структур, характерних для термопластичних (рис. 1.4, а) та реактопластичних полімерів (рис. 1.4, б).



а – термопластичних; б – реактопластичних

Рисунок 1.4 - Умовні схеми надмолекулярних структур полімерів

На термічну стабільність полімерів суттєво впливає також структура макромолекул. Так, полімери, які мають у своєму складі ароматичні кільця, пов'язані один із одним безпосередньо або за допомогою різних груп атомів і є термостабільнішими за рахунок високих значень міцності між атомами зв'язків в ароматичних кільцях [39].

На рис. 1.5 унаочнено зв'язки атомів С-С у головному ланцюзі в ароматичних та аліфатичних полімерах згідно зі значеннями енергії їх зв'язку.

Значення енергії зв'язку для С-С в ароматичному кільці досягає 98 ккал/моль, а в аліфатичному з'єднанні – 82 ккал/моль [39].

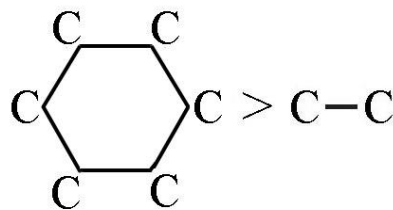


Рисунок 1.5 - Схематичне зображення зв'язків атомів С-С у головному ланцюзі в ароматичних та аліфатичних полімерах згідно зі значеннями енергії їх зв'язку

На термічну стабільність таких полімерів досить суттєво впливають групи чи окремі елементи, які з'єднують ароматичні кільця. Так, найкращими з точки зору термічної стабільності є наступні: С-О, С-Н₂ внаслідок їх досить високих значень енергії зв'язків між атомами. Також слід відзначити, що найбільшу термічну стабільність мають полімери з більшою кількістю ароматичних кілець у ланцюзі полімерної молекули.

Відповідно до цього та спираючись на аналіз наукових публікацій [29–32; 42; 43] можна зробити висновок, що до найбільш поширених полімерних матриць з високим рівнем термічної стійкості трибологічного призначення, що випускаються у промислових масштабах, належать деякі карбо- та карбоциклоланцюгові полімери (фторполімери, поліфенілени, полі-п-ксилілен тощо), гетеро- та гетероциклоланцюгові полімери (ароматичні поліаміди, полііміди, поліефіркетони, поліарилени тощо), фенольні високомолекулярні сполуки.

Фторполімери – це група карболанцюгових фторумісних полімерів. У них в якості замісників виступає один або декілька атомів фтору (разом із фтором можуть бути присутні також хлор, бром та йод). Високий рівень термостійкості цих полімерів обумовлений досить сильним зв'язком між атомами вуглецю та фтору (енергія цього зв'язку дорівнює 116 ккал/моль, що на 16 % вище, ніж енергія зв'язку між атомами вуглецю та водню, яка дорівнює 97 ккал/моль) [41].

Завдяки своїм унікальним властивостям найбільше поширення із полімерів тетрафторетилену отримано наступні матеріали: політетрафторетилен (PTFE, фторопласт-4, Teflon, Algoflon F), політрихлорфторетилен (CTFE, Фторопласт-3, Dyflon, Neoflon); полівініліденфторид (PVDF, Solef, Фторопласт-2), кополімертетрафторетилену з етиленом (ETFE, Фторопласт-40, Hostaflon ET) [44]. У таблиці 1.1 подано основні властивості цих матеріалів.

Таблиця 1.1 – Властивості фторопластів [45]

Матеріал	Густина, кг/ м ³	Напруження при межі текучості при стисканні, МПа	Модуль пружності при стисканні, МПа	Темп. початку активної деструкції, °С	Коеф. тертя по сталі
Фторопласт-4	2150-2190	11-12	670-690	>415	0,04
Фторопласт-3	2090-2160	49-59	1470	>315	0,3
Фторопласт-2	1700-1800	-	-	>350	-
Фторопласт-40	1650-1700	50	до 1270	>350	0,09

Температура початку активної деструкції цих полімерів перевищує 415°C, однак вони мають невисокі значення міцності (до 60 МПа). Вироби із фторопластів знайшли широке застосування у вузлах тертя машин і механізмів, які працюють із змащуванням та без нього в широкому інтервалі навантажень та швидкостей ковзання [45–48]. Завдяки високій хімічній стійкості деталі з фторопластів здатні працювати у вузлах машин і механізмів, що контактують із агресивними середовищами.

Недоліками фторопластів є їх висока собівартість, невисокий рівень технологічності при переробці у вироби і невисокий рівень фізико-механічних властивостей.

Ароматичні поліаміди – це група лінійних гетероциклоланцюгових полімерів, молекули яких складаються із ароматичних фрагментів різної структури, з'єднаних між собою амідними зв'язками. Високий рівень термічної стійкості цих полімерів пояснюється сильною міжмолекулярною

взаємодією, обумовленою наявністю водневих зв'язків між амідними групами молекул полімеру [49; 50]. Найбільш термостійкими є ароматичні поліаміди на основі ароматичних діамінів і ароматичних дикарбонових кислот, оскільки вони мають жорсткі ланцюги у макромолекулах [31]. З них найбільше визнання отримали полімета- та поліпарафеніленізо- чи терефталаміди та їх кополімери (Фенілон, Kevlar, Nomex). У таблиці 1.2 подано основні властивості ароматичних поліамідів.

Таблиця 1.2 - Основні властивості ароматичних поліамідів [31; 49]

Матеріал	Густина, кг/м ³	Напруження при межі текучості при стисканні, МПа	Ударна в'язкість, кДж/м ²	Темп. початку активної деструкції, °С	Коеф. тертя по сталі
Фенілон П	1330	210 – 230	20 – 30	-	-
Фенілон С1	1330	220 – 230	30 – 40	350	0,43
Фенілон С2	1330	210 – 230	40 – 50	350	0,45

Температура початку активної деструкції цих полімерів досягає 350°С, а температура розм'якшення – 300°С. Це сприяє тому, що вироби з ароматичних поліамідів можуть працювати у вузлах машин і механізмів при температурах до 300°С, зберігаючи при цьому свій рівень властивостей і в деяких випадках зберігати свою працездатність при температурах до 350°С [51; 52]. При цьому за механічною міцністю, твердістю, стійкістю до дії знакозмінних та ударних навантажень та зносостійкістю при терті переважають більшість наявних полімерів [53; 54].

Недоліками ароматичних поліамідів є їх висока собівартість та обмежена можливість переробки у вироби високопродуктивними методами (лиття під тиском, екструзія).

Поліаміди – це полімери, які мають в основному ланцюзі макромолекули циклічну імідну групу. Залежно від хімічної будови радикала, що прилягає до неї, поліаміди бувають аліфатичними й ароматичними. Завдяки високому рівню фізико-механічних властивостей та можливості роботи в широкому інтервалі температур найбільше поширилися

ароматичні полііміди [55; 56]. Найбільш поширеними марками поліамідів є Torlon, LARC, Pyralin, АПИ, Kinel, Skybond. У таблиці 1.3 подано основні властивості ароматичних поліімідів.

Таблиця 1.3 - Основні властивості ароматичних поліімідів [31; 57]

Матеріал	Густина, кг/ м ³	Напруження при межі текучості при стисканні, МПа	Модуль пружності при стисканні, МПа	Темп. початку активної деструкції, °С	Коеф. тертя по сталі
Torlon	1400-1600	150-220	4000-4500	410-420	0,1-0,3
Kinel	1400	70-150	2000-3000	350-400	0,42

Температура початку їх активної деструкції яких сягає 430°C. З поліімідів ся деталі конструкційного і триботехнічного призначення, які можуть працювати при температурах до 300°C [58; 59].

Недоліками поліімідів є їх висока собівартість та невисокий рівень технологічності при переробці у виріб (цей недолік значною мірою стосується поліімідів з високим рівнем термічної стійкості).

Полієфіркетони – це ароматичні полімери, молекулярні ланцюги яких побудовані із феніленових циклів, карбонільних груп та атомів кисню. Їх отримують за допомогою реакції електрофільного заміщення з ароматичних сполук, які мають активований атом водню й ароматичних карбонових сполук (ацилування за Фриделем – Крафтсом) чи реакцією неклеофільного заміщення завдяки взаємодії алкоголятів бісфенолів з ароматичними сполуками, що мають у своєму складі атом галогену, активований карбонільною групою [31]. Найбільш поширені марки полієфіркетонів: Victrex, Vetrapek, Hostatek, Kadel, Ultrapek. У таблиці 1.4 подано основні властивості полієферкетонів.

Температура початку активної деструкції цих полімерів досягає 400°C. Деталі з них можуть короткочасно працювати при температурах до 300°C [61; 62].

Полієфіркетони використовуються в якості конструкційних матеріалів для створення деталей машин і механізмів, що працюють при високому рівні навантажень та температур [63]. Завдяки високій хімічній стійкості вони часто використовуються у вузлах, що контактують з агресивними середовищами [64; 65].

Таблиця 1.4 - Основні властивості полієфіркетонів [31; 60]

Матеріал	Густина, кг/м ³	Напруження при межі текучості при стисканні, МПа	Модуль пружності при стисканні, МПа	Темп. початку активної деструкції, °С	Коеф. тертя по сталі
Victrex	1300	100-125	до 4000	до 400	-
Kadel	1400-1470	160	до 3800	до 380	0,2

Недоліки полієфіркетонів – дуже висока собівартість і складність переробки у виробі.

Поліарилени – це група гетеро- та гетероциклоланцюгових полімерів, які мають в основному ланцюзі сірку. Найбільш термостійкі з них – поліарилсульфони, які є продуктом реакції поліконденсації дисульфохлоридів з ароматичними вуглеводами [31]. Найбільш поширеними з поліарилсульфонів є матеріали марок Radel, Veradel та Astrel 360. У таблиці 1.5 подано основні властивості цих матеріалів.

Таблиця 1.5 - Основні властивості поліарилсульфонів [31, 66]

Матеріал	Густина, кг/м ³	Напруження при межі текучості при стисканні σ_y , МПа	Модуль пружності при стисканні, МПа	Темп. початку активної деструкції, °С	Коеф. тертя по сталі
Radel	1290	95-100	-	410-420	-
Veradel	1370	100-110	2680	400-410	-

Вони мають досить високу термостійкість, яка досягає 420°C. Однак відрізняються відносно невисоким рівнем фізико-механічних властивостей (σ_y до 110 МПа) і не використовуються в якості матеріалів для вузлів тертя машин і механізмів.

Деталі з поліарилсульфонів використовуються у легконавантажених конструкційних елементах машин, здатних зберігати високий рівень працездатності при температурах до 220°C і короткочасно працювати при 290–300°C [31].

Фенольні смоли є одними з найстаріших полімерних матеріалів, отримуваних реакцією поліконденсації з фенолів та альдегідів. У якості фенольної сировини поряд із фенолом можливо використовувати також крезолі, ксиленолі, багатоатомні феноли, алкілфеноли, багатоядерні сполуки, наприклад, бісфенол тощо [67; 68]. Затверділі фенольні смоли мають дуже високий рівень термічної стабільності і можуть короткочасно витримувати температури до 700°C [69]. У вихідному вигляді ці смоли практично не використовуються, однак композити на їх основі широко використовуються у промисловості. Фенопласти використовуються в якості покриттів корпусів ракет та інших літальних апаратів, забезпечуючи при цьому їх абляційний захист при входженні у щільні шари атмосфери. У хімічній, металургійній та інших галузях промисловості фенольні композити використовуються для виготовлення деталей конструкційного призначення, що працюють при високому рівні температур (до 350°C) [70; 71].

Недоліком фенольних смол є те, що при їх виробництві, переробці у виріб та експлуатації деталей з них можуть вивільнятися пари вільного фенолу та формальдегіду, небезпечні для довкілля і здоров'я людини. За ступенем дії на організм людини фенол та формальдегід належать до дуже небезпечних сполук (2-й клас небезпечності за ГОСТ 12.1.005) і при перевищенні допустимих концентрацій можуть викликати значне погіршення здоров'я.

Спираючись на аналіз наукових публікацій, можна зробити висновок, що найбільш оптимальними сучасними полімерними матрицями, які випускаються у промислових масштабах, з високим рівнем термічної стійкості для отримання полімерних композиційних матеріалів конструкційного та трибологічного призначення є ароматичні поліаміди, які

за фізико-механічними властивостями наближаються до низьковуглецевих сталей, але у 3–5 разів менші за густиною, що значно зменшує матеріалоемність вузлів машин і механізмів. Ці матеріали мають відносно невисокі значення коефіцієнта тертя по сталі та можуть працювати у вузлах тертя без змащування. Найкращий рівень фізико-механічних, теплофізичних та трибологічних властивостей з ароматичних поліамідів, що випускаються промисловістю, мають полімер марки фенілон С1. Тому для подальших досліджень було вибрано саме його.

З точки зору трибологічних властивостей оптимальними полімерними матрицями з високим рівнем термічної стійкості є фторполімери, які мають найменші значення коефіцієнта тертя та зношування при фрикційній взаємодії зі сталлю порівняно з іншими матеріалами. Деталі з них можуть надійно та довго працювати у вузлах тертя без змащування при досить високому рівні навантажень, швидкостей ковзання і температур. Найкращий рівень термічної стійкості та трибологічних властивостей з фторполімерів, що випускаються промисловістю, має полімер марки фторопласт-4. Тому для подальших досліджень було вибрано саме такий матеріал.

Недоліком ароматичних поліамідів та фторполімерів є їх досить висока собівартість. Тому найбільш оптимальним полімером з високим рівнем термічної стійкості з точки зору собівартості є феноло-формальдегідні смоли, що серед розглянутих полімерів мають найменшу собівартість і досить високий рівень фізико-механічних та теплофізичних властивостей. Однак використання таких полімерів обмежене їх невисокою екологічністю, обумовленою дією вільного фенолу та формальдегіду на довкілля та організм людини як при переробці їх у вироби, так і при використанні виробів з них. Тому з метою зменшення цього недоліку нами обрано полімери на основі дифенілолсульфон-формальдегідних олігомерів, які за рівнем властивостей практично не відрізняються від звичайних фенольних смол, але практично не містять вільного фенолу і поряд з високим рівнем властивостей є екологічно

безпечнішими порівняно із традиційними феноло-формальдегідними олігомерами.

1.3 Обґрунтування вибору наповнювача для термостійких ПКМ триботехнічного призначення

Важливим компонентом для створення полімерних композиційних матеріалів з високим рівнем термічної стабільності є наповнювачі. Їх функції у полімерах досить різноманітні. Так, наповнювачі використовуються для покращення експлуатаційних характеристик полімерів, надання їм різних специфічних властивостей та зменшення собівартості [72; 73]. Тому в якості наповнювачів використовуються різні речовини та матеріали, уміст яких у полімері може змінюватися в досить широких межах.

Наповнювачі для термостійких полімерних матеріалів повинні бути недорогими та недефіцитними, здатними підвищити їх термічну стійкість і підвищити чи залишити на високому рівні фізико-механічні властивості полімерів та композиційних матеріалів на їх основі. Також вони повинні суміщатися з полімером чи диспергуватися в ньому із створенням однорідних композицій, гарно змочуватися розплавом чи розчином полімеру, бути стабільними при зберіганні, переробці та експлуатації матеріалів [74]. Звертаємо увагу, що наповнювачі для термостійких полімерів повинні мати досить високу термічну стійкість, оскільки вони переробляються разом із полімером при температурах 350°C і вище.

Наповнювачі з високим рівнем термічної стійкості класифікуються залежно від хімічної будови (органічні та неорганічні), форми (волокнисті та дисперсні) та розмірів частинок (крупно- середньо- високо- та ультрадисперсні) [75].

У більшості випадків для створення полімерних композиційних матеріалів з високим рівнем термічної стійкості використовуються неорганічні наповнювачі, оскільки температури їх переробки досягають

300°C і більше, що унеможлиблює використання в якості наповнювачів більшості органічних матеріалів.

Волокнисті та дисперсні матеріали однаковою мірою використовуються в якості наповнювачів полімерів з високим рівнем термічної стійкості. Причому дисперсні матеріали є значно дешевшими та технологічно привабливішими для створення полімерних композицій, ніж волокнисті. Однак при використанні волокнистих наповнювачів (у більшості випадків крупно- середньо- високодисперсних) дуже часто вдається отримати матеріали з кращим рівнем властивостей, ніж дисперсних, що обумовлено різницею у структурі та морфології цих наповнювачів. Причому ультрадисперсні волокнисті матеріали у більшості випадків поступаються у підсилювальній дії на матричний полімер аналогічним дисперсним внаслідок складності рівномірного розподілу їх в об'ємі полімеру.

В якості волокнистих наповнювачів для полімерів з високим рівнем термічної стійкості використовуються волокна рублені, довжиною від десятків мікрон до десятків міліметрів, у вигляді безперервних ниток та тканин [37; 76]. Рублені волокна залежно від співвідношення показників механічних властивостей полімеру та наповнювача, розмірів волокон, а також характеру взаємодії на границі розділу матриця-волокно можуть проявляти властивості, як дисперсних, так і армувальних наповнювачів. Вони можуть розташовуватися у полімерній матриці хаотично та орієнтовано [37]. Безперервні волокна часто вводяться у полімерну матрицю шарами, які можуть бути орієнтованими, що дозволяє отримувати вироби з полімерних матеріалів з високим рівнем фізико-механічних властивостей [77]. Ткані волокнисті матеріали використовуються для створення полімерних композиційних матеріалів, які відрізняються значною анізотропією властивостей. Це явище можливо частково усунути, використовуючи тканинні наповнювачі, які виготовляються відповідно до форми виробу, яка фіксується при затвердінні в'язучого [78].

Волокнисті наповнювачі для полімерів бувають органічної і неорганічної природи. Органічні наповнювачі поділяються на природні та синтетичні [79]. До природних належать такі волокна, як бавовняні, лляні, джутові тощо. Вони не використовуються в якості наповнювачів, здатних покращити термо- та теплостійкість полімерних композитів через невисоку термостійкість самих волокон [80].

У якості волокнистих наповнювачів, здатних покращити термічні властивості полімерів, широко використовуються саме синтетичні волокна, які виготовляються із термостійких полімерів (ароматичні поліаміди, полііміди, поліарилени). Найбільш широко використовуються волокна з ароматичних поліамідів та поліариленів [81, 82], які вирізняються дуже високим рівнем міцності, тепло- та термостійкості і хімічної стійкості. Вони мають досить високу адгезію до більшості полімерних в'язучих і композити на основі полімерів та цих волокон відрізняються низькою пористістю, високим рівнем теплофізичних та фізико-механічних властивостей. Недоліком арамідних та поліариленових волокон є їх висока вартість та анізотропія властивостей.

Також до синтетичних волокон можливо віднести вуглецеві волокна, отримувані саме з органічних (поліакрилонітрильні, гідратцелюлозні) та з мезофазних пеків (проміжний продукт переробки нафти та кам'яного вугілля) [83; 84]. Технологія отримання вуглецевих волокон передбачає декілька стадій: окислення, карбонізація, графітизація та у деяких випадках – механічна витяжка органічних волокон чи пеків. Залежно від вихідної сировини можна отримати вуглецеві волокна з досить широким спектром властивостей. До переваг вуглецевих волокон слід віднести їх високий рівень механічних і термічних властивостей. Основним недоліком є висока вартість волокон і низька адгезійна здатність до полімерних в'язучих [85; 86]. Тому в багатьох випадках використовується поверхнева обробка волокон для підвищення їх питомої поверхні та змочуваність полімерним в'язучим, що додатково впливає на вартість волокон [87].

До волокон неорганічної природи належать скляні, базальтові, азбестові, керамічні тощо.

Скляні волокна отримуються витяжкою з однорідної скловидної маси, що є сплавом діоксиду кремнію з оксидами різних металів. Залежно від природи та вмісту оксидів, що входять до складу такого сплаву, можливо отримати скляні волокна з широким спектром властивостей [37].

Недоліками скляних волокон є їх низька адгезійна спроможність до деяких в'язучих, помітне зменшення міцності у вологих середовищах та яскраво виражена анізотропія властивостей виробів, отриманих із термостійких полімерів із скляними волокнами, внаслідок орієнтаційних ефектів при переробці їх у вироби [88; 89].

Базальтові волокна отримуються аналогічно до скляних, але в якості сировини використовуються природний мінерал базальт, який належить до групи алюмосилікатів [90]. За хімічною структурою та властивостями базальтові волокна близькі до скляних, але відрізняються вищою адгезією до деяких видів полімерних матриць, міцністю та модулем пружності. Їх введення у полімерну матрицю покращує її фізико-механічні та теплофізичні властивості [91, 92]. Недоліками є їх забарвлення від зеленуватого до бурого відтінків. Також використання базальтових волокон значно знижує технологічність при переробці полімерних композицій у вироби завдяки складності їх рівномірного розподілення в полімерній матриці.

Азбестове волокно – природний матеріал волокнистої структури, який належить до групи гідратованих силікатів [93]. Є два види силікатів, з яких отримують азбестові волокна, – хризотил та амфібол. Вони відрізняються за властивостями: перший характеризується підвищеною механічною міцністю, другий – хімічною стійкістю. Азбестові волокна дозволяють підвищити тепло-, вогне-, атмосферо- та хімістійкість термостійких полімерів [79]. Основним їх недоліком є канцерогенна дія при потраплянні частинок азбесту у легені людини. Тому у більшості розвинених країн світу використання азбестового волокна заборонено або суттєво обмежено [94]. Також до

недоліків азбестових волокон слід віднести складність переробки композитів з ними у виробі.

Виходячи з огляду використання волокнистих наповнювачів, які виготовляються із термостійких полімерів та вуглецевих волокон, для створення полімерних композиційних матеріалів з високим рівнем термічної стабільності конструкційного та трибологічного призначення їх використання можливе лише в окремих випадках, коли вартість виробу з них не матиме суттєвого значення, як для одиничних виробів у високотехнологічних галузях промисловості (літако- та ракетобудування), і неприйнятно для всіх інших галузей.

З розглянутих волокнистих наповнювачів для полімерів з високим рівнем термічної стійкості найбільш поширеними і доступними за ціною є скляні та базальтові волокна. Вони є реакційноспроможними за рахунок того, що основним їх компонентом є діоксид кремнію, який має на своїй поверхні активні групи, здатні до взаємодії з молекулами полімерів при їх переробці у виробі. Однак до їх недоліків слід віднести значне зменшення технологічності при переробці з полімерними матеріалами, складність у рівномірному розподіленні в об'ємі полімерів за рахунок особливостей морфології волокнистих матеріалів. Також одним із основних недоліків є їх невисокий рівень безпеки для людей та довкілля. Відповідно до висновків Міжнародного агентства з вивчення раку, скляні та базальтові волокна потрапили в групу 2 Б, тобто є канцерогенними для людини та довкілля [95].

Виходячи з огляду публікацій, волокнисті матеріали у якості реакційноспроможних наповнювачів полімерів з високим рівнем термічної стабільності є недоцільними.

У якості дисперсних наповнювачів використовуються матеріали органічного та неорганічного походження з розмірами частинок від сотен нанометрів до сотен мікрометрів. У більшості випадків розміри дрібнодисперсних наповнювачів, що використовуються для промислового отримання полімерних композиційних матеріалів змінюються в інтервалі від

1 до 50 мкм. Але сучасні розробки дозволяють отримувати полімерні композиції з нанорозмірними наповнювачами. Уміст дисперсних наповнювачів у полімерному композиційному матеріалі змінюється в досить широких межах від 5 до 95 % ваг. Причому для наповнення термостійких термопластичних полімерів, у більшості випадків, використовується не більше 40 % ваг. наповнювачів, а наповнення реактопластичних полімерів може досягати 95 % [96; 97].

Серед найбільш важливих вимог, що висуваються до реакційноспроможних дисперсних наповнювачів, слід відзначити їх властивість якісно диспрегуватися у полімері, гарно змочуватися розплавом чи розчином полімеру, відсутність схильності до агломерації, розвинена поверхня, однорідність розмірів частинок, а також низький уміст води. При наповненні реактопластичних полімерів наповнювачі також не повинні виявляти каталітичну дію на процес затвердіння в'язучого.

Для покращення змочування та запобігання агломерації поверхня дисперсних наповнювачів, у деяких випадках, обробляється поверхнево-активними речовинами [98; 99]. Також покращенню взаємодії полімерів з наповнювачами сприяють активні групи на поверхні останніх, які можуть існувати на поверхні наповнювачів чи бути створені штучно [100].

До найбільш поширених дисперсних наповнювачів належать матеріали на основі вуглецю та діоксидів кремнію різних модифікацій. Їх використання в якості наповнювачів для полімерів з високим рівнем термічної стійкості дозволяє отримувати полімерні композиційні матеріали з високим рівнем властивостей, які можливо регулювати в широкому діапазоні й отримувати матеріали як конструкційного, так і трибологічного призначення [101; 102].

До одного з найбільш поширених наповнювачів термостійких полімерів слід віднести дисперсні матеріали на основі вуглецю (графіт, технічний вуглець, кокс, фулерен, вуглецеві нанотрубки, графен) [102–104].

Графіт – це практично чистий вуглець, який має шарувату структуру. Він є мінералом, але також може бути отриманий штучним шляхом з

антрациту при нагріванні його без доступу повітря. Уведення графіту в термостійкі полімери сприяє підвищенню твердості, міцності при стисканні, температуропровідності, хімічній стійкості та зносостійкості отриманих композитів [105–107]. Основним недоліком графіту є значна анізотропія його властивостей.

Технічний вуглець – це дрібнодисперсний матеріал на основі вуглецю, який є продуктом термоокислювального чи термічного розкладення вуглеводнів [108]. Уведення технічного вуглецю у термостійкі полімери дозволяє несуттєво збільшити їх термічні та фізико-механічні властивості [109; 110]. Підсилювальний ефект цього наповнювача пов'язаний із його дисперсністю та питомою поверхнею. У більшості випадків використання технічного вуглецю в якості наповнювача для термо- та реактопластів не сприяє значному покращенню властивостей, тому він часто використовується в якості матеріалу, який помітно зменшує собівартість термостійкого полімеру.

Найбільш сучасними матеріалами на основі вуглецю є фулерени та вуглецеві нанотрубки [111; 112].

Фулерен – це молекула, яка складається із 60 атомів вуглецю і має ікосаедричну симетрію. Також такі молекули можуть мати більшу кількість атомів вуглецю. Відомі фулерени з кількістю атомів вуглецю 70, 76, 78, 80 і більше, які мають різні геометричні структури [113]. Фулерени отримуються за допомогою дугового розряду між графітовими електродами в атмосфері гелію при високому тиску. Тепло, що виділяється при цьому випаровує вуглець із створенням сажі та фулеренів. Технологія отримання фулеренів досить складна та високовартісна, тому концентрація фулеренів у термостійких композиційних матеріалів дуже рідко перевищує 10 % ваг. [114; 115]

Вуглецеві нанотрубки – це циліндричні структури, які складаються з однієї або декількох графенових площин. Вони отримуються методом випаровування у дуговому розряді, лазерної абляції, піролізу,

плазмохімічного осадження й електрохімічними методами [113]. Як і для фулеренів, методи отримання нанотрубок досить складні та високовартісні, що призводить до високої собівартості наповнювача. Уведення вуглецевих нанотрубок у полімерні матриці не сприяє значному покращенню їхніх властивостей [116; 117], тому їх використання в якості наповнювача при створенні термостійких полімерних композиційних матеріалів не набуло значного поширення.

Графен – двовимірна алотропна модифікація вуглецю, створена шаром атомів вуглецю товщиною в один атом [111]. У лабораторних умовах графен отримується за допомогою методів механічного відшарування високоорієнтованого піролітичного графіту. Також його можна отримувати методом термічного розкладення поверхні карбіду кремнію та методом хімічного осадження із газової фази [118]. Графен є досить високовартісним матеріалом, тому використання великої кількості якого при наповненні термостійких полімерів обмежено [104].

Широке використання в якості наповнювачів полімерних матеріалів отримав діоксид кремнію та матеріали на його основі [119; 120]. Це обумовлено їх невисокою собівартістю (до 7 дол. за 1 кг), поширеністю у природі (більше 50 % земної кори складається з цих матеріалів) та спроможністю до підвищення комплексу фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів за рахунок фізичної та хімічної взаємодії з полімерною матрицею.

У природі є до 20 модифікацій діоксидів кремнію, які мають однаковий хімічний склад та відрізняються один від одного ступенем кристалічності, морфологією, походженням [121]. Частина з них використовується в якості дисперсних наповнювачів для створення полімерних композиційних матеріалів з високим рівнем термічної стабільності. Найбільш поширеними є аморфні форми діоксиду кремнію, отримані з гелів чи золів кремнієвої кислоти та при взаємодії газоподібного чотирихлористого кремнію з парами води (силікагелі, білі сажі та аеросили) [122; 123]. Розміри частинок цих

наповнювачів складають від десятків нанометрів до десятків мікрометрів. Вони мають добре розвинену поверхню до $380 \text{ м}^2/\text{г}$ та активні «силанольні» групи на ній, які можуть взаємодіяти з молекулами термостійких полімерів особливо в умовах переробки полімерних композиційних матеріалів у виробі і створювати з ними водневі зв'язки, що сприяє значному покращенню теплофізичних та фізико-механічних властивостей полімерних композитів [124; 125].

У сучасній промисловості поширеними є синтетичні діоксиди кремнію таких марок: аеросил, біла сажа і силікагель. Вони відрізняються один від одного способом отримання, морфологією і хімічним складом (ГОСТ 18307, ГОСТ 14922-77). Аеросил є пірогенним колоїдним діоксидом кремнію (у його складі не менш 99,8 % SiO_2), який отримується полум'яним гідролізом летких кремнійумісних речовин. Біла сажа – це гідратований діоксид кремнію (у його складі не менш 85–95 % SiO_2 , інше – домішки оксидів та гідроксидів заліза, алюмінію, магнію тощо), який отримується з осаду, утворюваного при дії кислот на розчин силікату натрію з подальшим фільтруванням, промиванням та сушінням. Силікагель – висушений гель кремнієвої кислоти (у його складі не менш 85–95 % SiO_2 , інше – домішки), який отримується в результаті взаємодії розчину силікату натрію з кислотою з подальшим сушінням та промиванням створеного продукту.

Різні способи отримання синтетичних діоксидів кремнію визначають їх властивості: розмір, форму частинок, наявність чи відсутність пор, властивості поверхні. Всі ці матеріали мають досить розвинену поверхню до $380 \text{ г}/\text{м}^2$ з великою кількістю пор, мікро- та субмікропор (рис. 1.6), які сприяють фізичній адсорбції молекул полімеру при переробці ПКМ у виробі.

Розміри елементарних частинок діоксидів кремнію марок «біла сажа» і «аеросил» складають від 5 до 70 нм, що визначає їх досить розвинену поверхню. Це, разом із наявністю великої кількості активних «силанольних» груп на поверхні частинок діоксидів кремнію, призводить до їх активної

агломерації за рахунок фізичної (Ван-Дер-Ваальсових сил, сили електростатичної взаємодії тощо) та слабкої хімічної (водневі зв'язки) взаємодії.

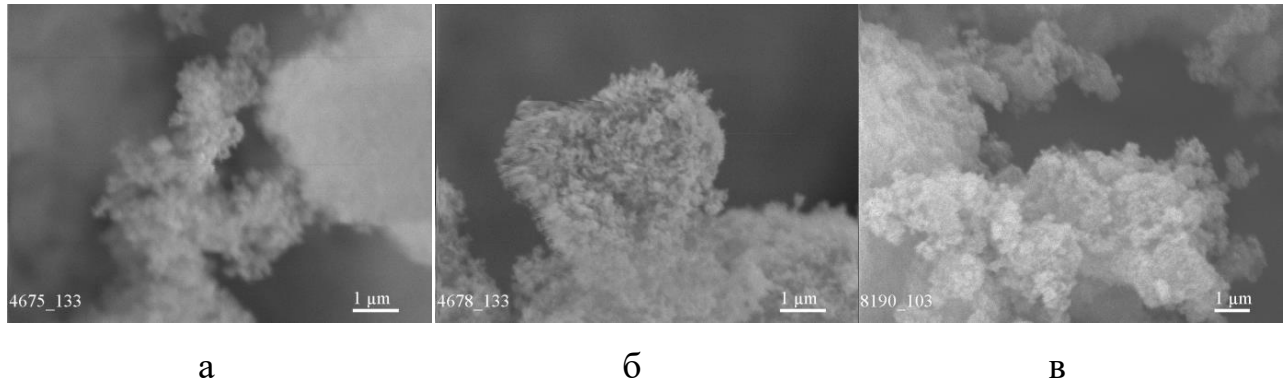


Рисунок 1.6 - Мікрофотографії поверхонь частинок діоксидів кремнію марок: а – біла сажа; б – аеросил; в – силікагель

При цьому розміри отриманих агломератів можуть складати до десятків мкм (рис. 1.7).

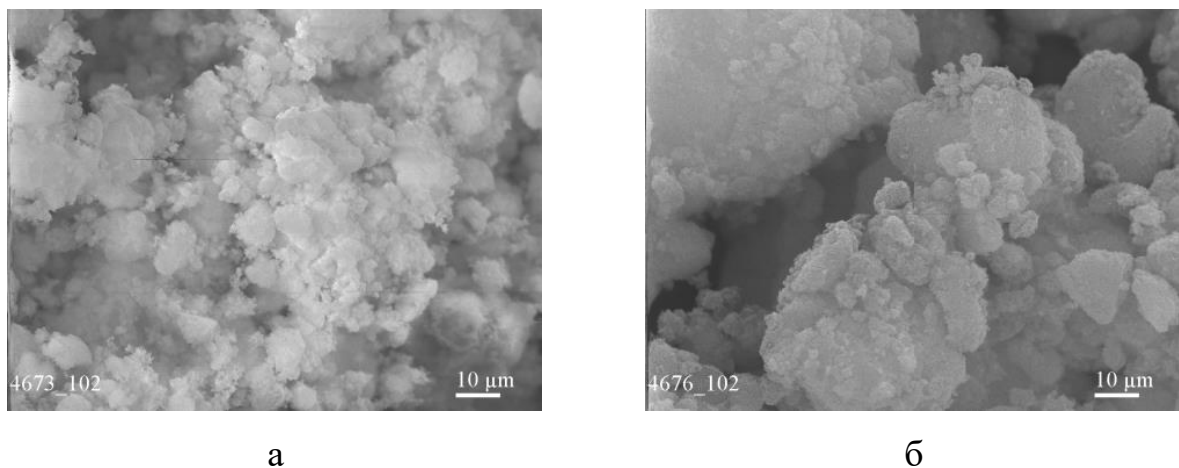


Рисунок 1.7 - Мікрофотографії агломератів діоксидів кремнію марок: а – біла сажа; б – аеросил

При використанні даних матеріалів в якості наповнювачів полімерів не вдається подрібнити їх до елементарних частинок. У процесі отримання полімерної композиції та її переробки у виробі вдається зменшити розміри агломератів діоксидів кремнію марок «біла сажа» і «аеросил» до 10–20 мкм (рис. 1.8).

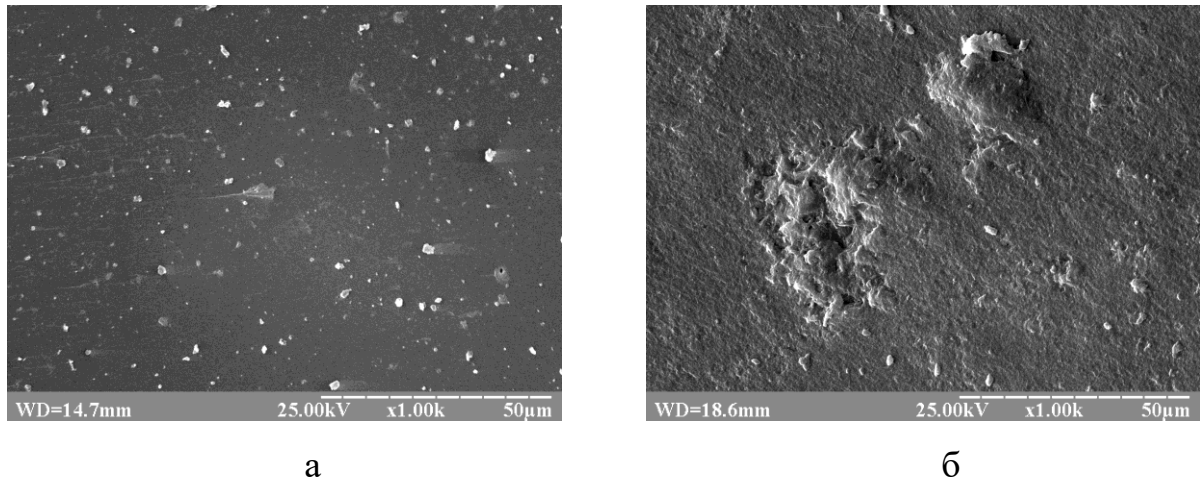


Рисунок 1.8 - Мікрофотографії поверхні сколу вихідного полімеру (а) та ПКМ з діоксидом кремнію марки «біла сажа» (б)

Однак, ураховуючи, те що агломерати діоксиду кремнію марок «біла сажа» та «аеросил» є структурами, що легко руйнуються при дії навантажень, значного підсилювального ефекту від їх використання в якості наповнювача полімерних матриць отримати не вдалося [120].

Діоксид кремнію марки «силікагель» у вихідному вигляді не часто використовується як наповнювач для полімерів внаслідок того, що його промислові види мають розміри частинок від 0,1 до 10 мм. Тому для використання як наповнювача полімерів його подрібнюють до розмірів 5–10 мкм (рис. 1.9, а) [126].

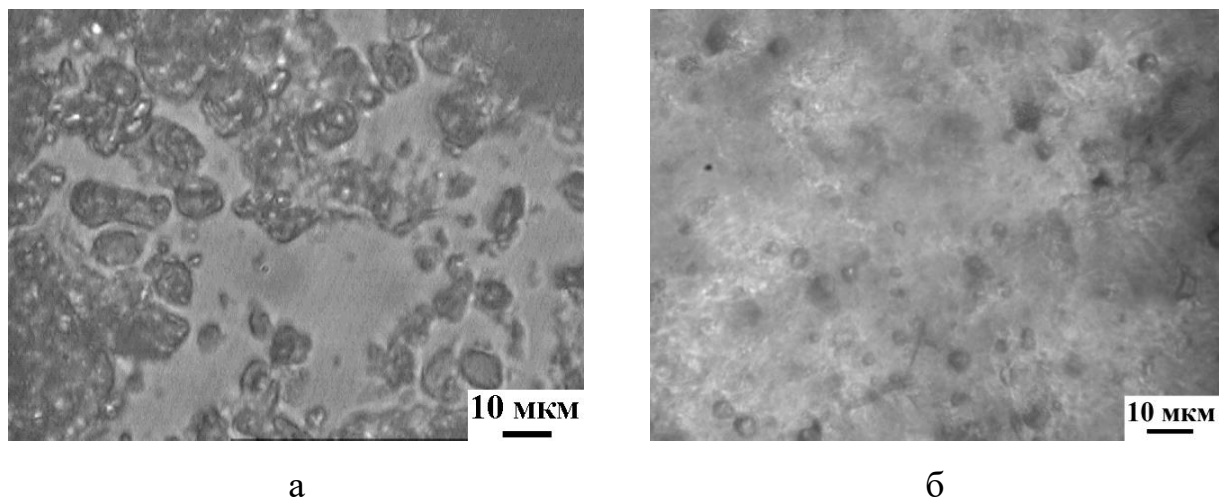


Рисунок 1.9 - Мікрофотографії частинок подрібненого силікагелю (а) та поверхні сколу ПКМ з цим наповнювачем (б)

Частинки подрібненого силікагелю у вихідному вигляді агломеруються, але при переробці разом із полімером на виріб практично всі ці агломерати розбиваються (рис. 1.9, б). Тому використання силікагелю в якості наповнювача полімерних матриць є найбільш доцільним з усіх розглянутих синтетичних діоксидів кремнію. І з урахуванням його спроможності до фізичної та хімічної взаємодії з полімерною матрицею можна зробити висновок, що діоксид кремнію марки силікагель є найбільш оптимальним наповнювачем для створення полімерних композиційних матеріалів з високим рівнем термічної стабільності з усіх розглянутих дисперсних матеріалів.

1.4 Сучасні технології переробки термостійких ПКМ у вироби методом пресування

Переробка полімерів та полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) – це сукупність різних процесів, за допомогою яких ці матеріали перетворюються у вироби з необхідним рівнем властивостей. Нині відомо декілька десятків технологій переробки полімерів та ПКМ. Вибір технології переробки в кожному конкретному випадку визначається наступними факторами: конструктивні особливості виробу, умови його експлуатації, технологічні властивості матеріалу, що переробляється, серійність випуску виробів тощо.

У більшості випадків переробка полімерів та ПКМ на їх основі полягає у формуванні виробів із в'язкотекучого стану. Це лиття під тиском, екструзія, пресування тощо. Є технології, засновані на переробці полімерів та ПКМ із вискоеластичного стану (вакуумформування, пневмоформування тощо). Також знаходять промислове використання технології формування полімерів та ПКМ із розчинів та дисперсій полімерів (полив, заливка тощо). У низці випадків для виготовлення виробів необхідно поєднувати декілька технологій переробки [127–129].

Практично всі технології переробки полімерів та ПКМ проходять у 3 етапи:

- підготовчий;
- основний;
- завершальний.

На підготовчому етапі відбуваються операції, направлені на отримання полімерної композиції (попереднє сушіння, суміщення вихідних компонентів тощо). На основному етапі відбувається безпосередньо процес переробки отриманої полімерної композиції у вироби за допомогою лиття під тиском, екструзії, пресування тощо. На завершальному етапі відбуваються операції надання отриманому виробу необхідного зовнішнього вигляду (механічна та хімічна обробка, фарбування тощо).

Для вибраних полімерів на основі ароматичного поліаміду, фторопласту, фенольної смоли і дисперсного наповнювача силікагелю підготовчий етап переробки полягає у створенні полімерних композицій за рахунок механічного методу їх суміщення за допомогою механічних мішалок [130–132]. Отримані полімерні композиції підлягають операції брикетування для отримання міцних таблеток з метою підвищення технологічності при переробці ПКМ у вироби.

Основний етап переробки полімерів (ароматичний поліамід, фторполімер і фенопласт) та полімерних композиційних матеріалів на їх основі мають деякі відмінності. Так, ароматичний поліамід і фенопласт переробляються на виріб методом компресійного пресування у прес-формах з підігріванням, а фторполімер – методом вільного спікання.

Використання цих технологій переробки полімерів та ПКМ на їх основі у вироби обумовлені їх структурою та хімічною будовою. Так, температура плавлення ароматичного поліаміду дорівнює приблизно 370–400°C, а температура початку активної деструкції – 350–370°C, що унеможливорює переробку у вироби даних матеріалів із в'язкотекучого стану [49]. Для

фторполімеру температура плавлення складає 325–330°C, вище якої він перетворюється на аморфний матеріал, який не переходить з вискоеластичного у в'язкотекучий стан навіть при температурах розкладення (вище 420°C), що у свою чергу теж унеможлиблює його переробку високопродуктивними методами (лиття під тиском, екструзія) з в'язкотекучого стану [45]. Фенольна смола є термореактивним матеріалом, який має дуже високий ступінь наповнення до 80 %, що робить його розплав дуже в'язким і тому його складно переробляти на виріб за допомогою високопродуктивних методів переробки, наприклад, литтям під тиском.

Завершальний етап переробки вибраних полімерів та наповнювача полягає у наданні виробам необхідного вигляду, що включає в себе зняття облою, доведення розмірів деталей до необхідних, надання поверхням деталей необхідної шорсткості тощо.

Виходячи з описаного, можна зробити висновок, що процес переробки полімерів на основі ароматичного поліаміду, фторопласту-4 та фенопласту у виробі досить складний, енергоємний та низькопродуктивний, що суттєво підвищує собівартість виробів з цих полімерів. Тому актуальним завданням є спрощення процесу отримання виробів з них та ПКМ на їх основі з метою значного здешевлення. Це можливо зробити за рахунок модернізації одного чи декількох етапів переробки при отриманні виробів на основі вибраних полімерів та силікагелю. Виходячи з наукових даних [128; 133] можна стверджувати, що найбільш перспективним та досить легкореалізовуваним для цих матеріалів є модернізація підготовчого етапу переробки, зокрема зміна технології суміщення вихідних компонентів при створенні полімерної композиції.

1.5 Проблеми та способи забезпечення рівномірності розподілу наповнювача в складі ПКМ

Якість готового виробу з ПКМ безпосередньо залежить від підбирання оптимальних технологічних параметрів при переробці. Одним із основних факторів, який впливає на якість готових виробів є операція суміщення наповнювача з полімером, яка у більшості випадків відбувається на підготовчому етапі переробки [134; 135]. Якість суміщення визначається за рівномірністю розподілу наповнювача в полімерній матриці за допомогою оптичного, термічного тощо методів з наступною статистичною обробкою отриманих експериментальних даних. Це особливо актуально на сучасному етапі розвитку полімерного матеріалознавства внаслідок використання в якості наповнювачів дисперсних нанорозмірних матеріалів (один із розмірів яких дорівнює від 10 нм до 1000 нм) [136].

При використанні дисперсних матеріалів як наповнювачів полімерних матриць виникають дві суттєві проблеми. Перша пов'язана зі складністю рівномірного розподілення їхніх елементарних частинок в об'ємі полімеру, а друга – із забезпеченням передавання навантаження від полімерної матриці до наповнювача. Для вирішення першого завдання необхідно зруйнувати агрегати наповнювачів, а потім рівномірно розподілити їх у полімерній матриці. Для іншого - забезпечити достатню поверхневу взаємодію на границі «матриця-наповнювач».

Вирішення хоча б одного з цих завдань дозволяє отримувати полімерні композиційні матеріали з високим рівнем фізико-механічних та теплофізичних властивостей. Причому більш пріоритетним є завдання, яке полягає в руйнуванні агрегатів наповнювача з наступним їх рівномірним розподілом в об'ємі полімеру внаслідок того, що при його вирішенні частково буде вирішено і друге – забезпечення достатньої поверхневої взаємодії на границі розділу фаз полімер-наповнювач.

Для рівномірного розподілу елементарних частинок наповнювачів у полімерній матриці використовуються наступні методи:

- суміщення полімерів з наповнювачами за допомогою механічних пристроїв;
- синтез полімеру в присутності частинок наповнювача;
- синтез частинок наповнювача в присутності полімеру;
- суміщення процесу синтезу полімеру та частинок наповнювачів;
- реалізація процесу крейзингу.

Найбільш поширений метод отримання рівномірно розподілених дисперсних наповнювачів у полімерній матриці полягає у суміщенні полімерів з наповнювачами за допомогою механічних пристроїв (механічні змішувачі, екструдери тощо) [137; 138]. Суміщення може відбуватися при додаванні наповнювачів у полімери, які можуть знаходитися у твердому стані (гранули, мікрочастинки) та у вигляді розтопу чи розчину.

При суміщенні наповнювачів із полімерами, які знаходяться у твердому стані, у більшості випадків використовуються механічні змішувальні пристрої, які за рахунок введення механічної енергії у вихідну систему полімер-наповнювач (від двигунів до робочих органів складної форми) створюють хаотичний чи направлений рух вихідних частинок полімерів та наповнювачів, отримуючи при цьому однорідну полімерну композицію [134].

За допомогою таких механічних змішувачів отримується більшість полімерних композицій на основі ароматичних поліамідів, фторполімерів, фенопластів тощо, які знаходяться у вихідному вигляді в якості дисперсних частинок чи гранул з волокнистими чи дисперсними наповнювачами, отримуючи при цьому нормальну якість розподілення вихідних компонентів у полімерних композиціях.

Недоліками такого методу суміщення вихідних компонентів при створенні полімерних композиції є досить низька якість розподілення

наповнювачів з розмірами частинок від 10 нм до 10 мкм у полімерах неможливість подрібнення агломератів таких наповнювачів за допомогою механічних мішалок. Для часткового подолання цього недоліку використовуються електромеханічні мішалки [139, 140] в яких суміщення вихідних компонентів композиції відбувається у замкненому просторі за допомогою розмелювальних тіл, які хаотично обертаються з високою швидкістю під дією електромагнітного поля перемішуючи при цьому вихідну систему полімер-наповнювач. Завдяки використанню таких мішалок вдається отримати полімерні композиції із розмірами агломератів наповнювачів від 1 до 10 мкм.

Суміщення вихідних компонентів полімерної композиції при введенні наповнювачів у розтоп полімеру також є досить поширеним. Цей процес у більшості випадків проводиться за допомогою екструзійних машин, в яких за рахунок дії шнеку на систему полімер-наповнювач виникають великі стискувальні, розтягувальні та зсувні напруження, які призводять до створення прямої, зворотної та обертової течії розропу полімерів за рахунок якої і відбувається перемішування компонентів полімерної композиції [141]. Недоліком цього методу суміщення вихідних компонентів полімерної композиції є неможливість його використання при роботі з жорстколанцюговими полімерами, які переробляються у виробі не з високотекучого, а з вискоеластичного стану (це більшість полімерів з високим рівнем термічної стабільності). Також цей метод суміщення є досить складним та високовартісним і не дозволяє отримувати високу якість розподілення нанорозмірних наповнювачів в об'ємі полімеру.

Ці недоліки частково усуваються завдяки використанню черв'ячно-дискових екструзійних машин, на яких крім вищезгаданих напружень від дії шнеку на систему полімер-наповнювач виникають також великі зсувні напруження у міждисковому просторі, що сприяє більш якісному розподілу наповнювачів в об'ємі полімерів [142, 143].

Досить поширеним є метод суміщення розчинів полімерів із наповнювачами, який відбувається за рахунок розчинення полімерів у розчинниках та додавання у них наповнювачів з подальшим перемішуванням механічним способом отриманої суспензії [144]. Цей метод також широко використовується для отримання композитів на основі реактопластичних полімерів, розчинами яких просочують наповнювачі і готові полімерні композиції стають твердими при подальшій переробці [145, 146].

Недоліками методу суміщення розчинів полімерів із наповнювачами є його невисокий рівень екологічності внаслідок дії розчинників на організм людини та довкілля. Особливо це стосується полімерів з високим рівнем термічної стабільності, тому, що вони в більшості випадків є хімічно стійкими матеріалами, які розчиняються тільки в досить сильних розчинниках з високим рівнем токсичності.

Метод суміщення вихідних складових полімерної композиції, де реалізується синтез полімеру в присутності частинок наповнювача в останні 10–20 років є досить поширеним. Він використовується для отримання композиційних матеріалів на основі як термо-, так і реактопластів, які наповнюються дисперсними частинками різної морфології та природи. І в загальному випадку полягає у додаванні наповнювача у вихідному чи суспензійному вигляді у вихідні продукти для синтезу чи безпосередньо в реакційне середовище в процесі синтезу полімерів [147–149]. Причому рівномірний розподіл наповнювача у них досягається за рахунок використання механічних, ультразвукових тощо змішувачів. Завдяки цьому методу вдається отримувати полімерні композиції з досить високою якістю розподілення наповнювачів в об'ємі полімерів. Вироби з полімерних композицій, отримані методом суміщення наповнювачів та полімерів у процесі синтезу останніх, мають у більшості випадків кращий рівень властивостей, ніж при їх механічному суміщенні. Це пов'язано з тим, що наповнювач, уведений у реакційне середовище, при синтезі полімерів впливає на процес синтезу (може виступати в ролі структуротвірних

зародків, бути ініціатором полімерізації тощо) і взаємодіє з структурами полімерів на молекулярному рівні, сприяючи створенню міцних внутрішньо- та зовнішньо молекулярних зв'язків.

Недоліком цього методу є досить висока складність його реалізації порівняно з попередніми методами.

Також останнім часом досить поширеним є метод отримання полімерних композиційних матеріалів, який полягає у суміщенні їхніх вихідних компонентів за рахунок реалізації синтезу частинок наповнювача в присутності полімеру [150; 151]. У більшості випадків цей метод реалізується за допомогою додавання розчинів полімерів у реакційне середовище, де відбувається синтез наповнювачів.

Полімерні композиції, отримані за цим методом, мають досить високу якість розподілення наповнювачів в об'ємі полімерів. При цьому розміри наповнювачів можуть варіюватися від нано- до мікрометричних. Також слід відзначити можливість взаємодії наповнювачів з полімерами вже на стадії їх суміщення завдяки фізичній та хімічній дії полімерів на процес синтезу наповнювачів.

Метод суміщення вихідних компонентів полімерної композиції, який реалізується у процесі синтезу полімеру та частинок наповнювачів, з'явився відносно недавно, але набуває популярності завдяки отриманню полімерних композиційних матеріалів з високою якістю розподілення наповнювачів у полімерній матриці [152–155]. Він реалізується за допомогою дво- чи багатостадійного процесу, у результаті якого на початкових стадіях синтезується наповнювач у присутності вихідних компонентів для синтезу полімеру, а на завершальних проходить безпосередньо синтез полімеру. Цей метод суміщення вихідних компонентів полімерних композицій створено на основі принципів, за якими відбувається суміщення в процесі синтезу полімерів у присутності частинок наповнювача чи частинок наповнювача в присутності полімерів. І він має всі переваги, характерні для цих двох методів. Недоліком є досить складна технологія отримання, пов'язана із

складністю підбирання вхідних компонентів для синтезу наповнювачів та полімерів, сумісних один з одним.

Останнім часом для отримання якісних полімерних композитів використовується метод крейзингу. В основу цього методу покладено процес одновісного деформування склоподібних та частково кристалічних полімерів у рідинному середовищі. У результаті цього отримується нанопориста полімерна матриця, яка заповнюється іншим компонентом, на основі якого створюється неорганічний чи органічний наповнювач [156–158]. Недоліком даного методу є досить складна його реалізація як з технічної, так і з фінансової точки зору, а також досить великі обмеження до його використання з жорстколанцюговими полімерами (більшістю полімерів з високим рівнем термічної стійкості), які дуже мало деформуються при навантаженнях.

Спираючись на проведений аналіз, можемо стверджувати, що з усіх розглянутих методів суміщення вихідних компонентів для створення полімерних композицій на основі вибраних полімерів з високим рівнем термічної стійкості (ароматичний поліамід, фторполімер, фенольна смола) та дисперсним наповнювачем силікагелем можна використовувати саме метод суміщення за допомогою механічних пристроїв, синтезу полімерів у присутності наповнювачів та синтезу наповнювачів у присутності полімерів. Метод суміщення полімерів та наповнювачів за допомогою механічних пристроїв дозволить отримувати полімерні композиції на основі вибраних полімерів та наповнювача з нормальною якістю розподілу, однак тільки при використанні мікрметричних (більше 5 мкм) частинок останнього. При використанні нанорозмірного наповнювача якісне суміщення вибраних об'єктів дослідження досить складно реалізувати. Тому для отримання якісно суміщених полімерних композицій на основі ароматичного поліаміду, фенопласту, фенольної смоли та силікагелю можливо отримати тільки за методиками, які полягають у суміщенні цих компонентів у процесі синтезу полімерів чи наповнювача.

Проаналізувавши технології синтезу вибраних полімерів та наповнювача [121], можна зробити висновок, що для даних систем найбільш простою в реалізації й екологічно доцільною є технологія отримання силікагелю, яка полягає у процесі отримання золю з кремнієвої кислоти, гелеутворення та сушіння.

Тому суміщення вибраних вихідних компонентів для створення полімерних композицій на основі полімерів з високим рівнем термічної стабільності доцільно проводити відповідно до методу, який полягає в синтезі наповнювача в присутності полімерів. Причому, виходячи з того, що вибрані нами полімерні матриці з високим рівнем термічної стабільності не розчиняються та не розкладаються при дії на них активних компонентів реакційного середовища в процесі синтезу силікагелю, їх можна вводити не у вигляді розчинів, а у твердому дисперсному стані. Це усуває основний недолік такого методу, який полягає в його невисокому рівні екологічності за рахунок використання розчинів полімерів. Також слід відзначити, що використання даного методу дозволяє значно здешевити процес суміщення вибраних вихідних компонентів для створення полімерних композицій за рахунок відмови від операції їх перемішування, яка відбувається в процесі синтезу наповнювача.

Висновки до розділу 1

1 Зроблено системний аналіз літературних джерел щодо сучасних термостійких полімерів, які випускаються у промислових масштабах та наповнювачів, здатних покращити рівень їхніх властивостей та зменшити собівартість. Відповідно до рівня властивостей, критеріїв собівартості та розповсюдженості обґрунтовано вибір полімерних матриць (фенілон С1, фторопласт-4 і ДФСФО), наповнювача (силікагель).

2 Визначено основні недоліки процесу переробки матеріалів на основі ароматичних поліамідів, фторполімерів, фенольних смол та силікагелю у виробі. Обґрунтовано використання нової ресурсоощадної технології отримання виробів з термостійких ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО, згідно з якою запропоновано відмовитись від механічного суміщення вихідних компонентів полімерних композицій і проводити його на стадії синтезу наповнювача.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристики вихідних матеріалів

В якості полімерних матриць для перспективних термостійких ПКМ вибрано наступні полімери: ароматичний поліамід, фторполімер та фенольна смола.

Ароматичний поліамід марки фенілон С1 виробництва Володимирського науково-дослідного інституту синтетичних смол (Володимир). Цей полімер отримується за реакцією поліконденсації при взаємодії діамінів (75 % μ -фенілендіаміну и 25 % p -фенілендіаміну) з дихлорангідридомізофталевої кислоти [31]. Загальна структурна формула полімеру зображена на рис. 2.1.

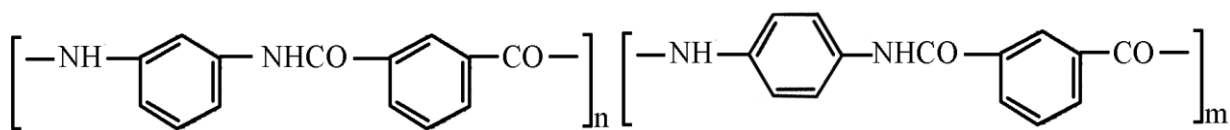


Рисунок 2.1 - Структурна формула ароматичного поліаміду марки фенілон С1

Фенілон С1 у вихідному вигляді являє собою прес-матеріал рожево-білого кольору з насипною щільністю 0,2–0,4 г/см³, який відповідає вимогам ТУ 6-05-221-101-71. Відповідно до проведених мікроскопічних досліджень та побудові за їх результатам гістограми розподілення за розмірами частинок фенілону С1 (рис. 2.2) встановлено, що найбільша кількість частинок полімеру (59 %) припадає на інтервал розмірів від 20 до 40 мкм. Тобто можна стверджувати, що основним розміром частинок прес-порошку фенілону С1 є 20–40 мкм.

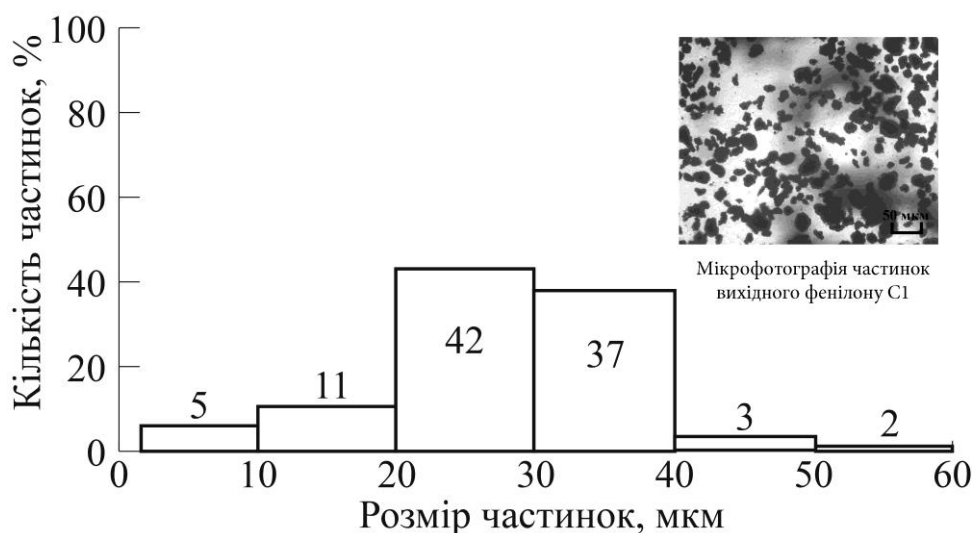


Рисунок 2.2 - Гістограма розподілу за розмірами частинок фенолону С1

Фторполімер марки фторопласт-4 виробництва ТОВ «ГалоПолімерКірово-Чепецьк» (Кірово-Чепецьк). Цей полімер є продуктом полімеризації тетрафторетилену [45]. Загальна структурна формула полімеру зображена на рис. 2.3.

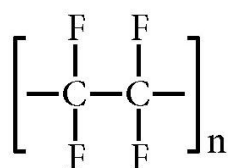


Рисунок 2.3 - Структурна формула фторполімеру марки фторопласт-4

Фторопласт-4 у вихідному вигляді являє собою прес-матеріал білоголубого кольору з насипною щільністю 0,35-0,50 г/см³, який відповідає вимогам ГОСТ 1000780.

Відповідно до проведених мікроскопічних досліджень та побудові за їх результатами гістограми розподілення за розмірами частинок фторопласту-4 (рис. 2.4) встановлено, що найбільша кількість частинок полімеру (85 %) припадає на інтервал розмірів від 30 до 60 мкм. Тобто можна стверджувати, що основним розміром частинок прес-порошку фторопласту-4 є 30–60 мкм.

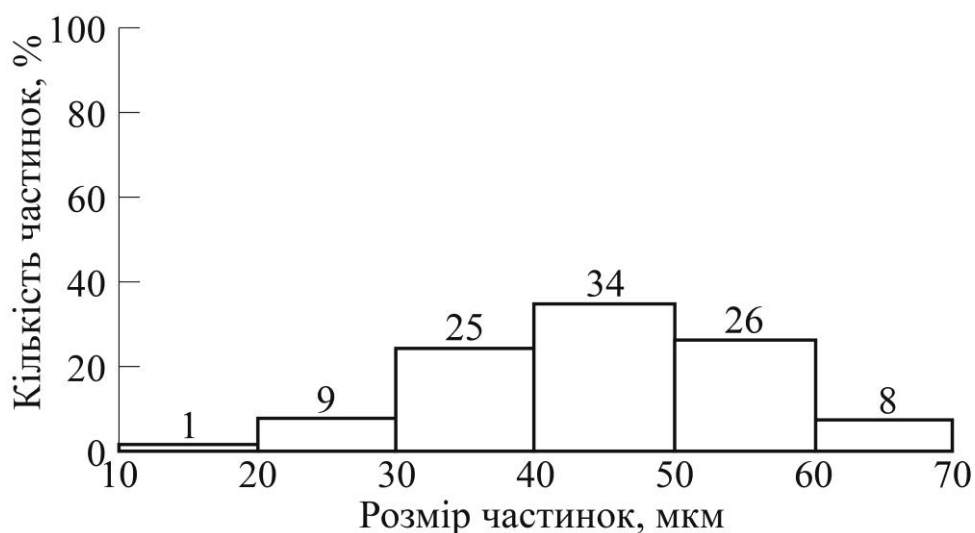


Рисунок 2.4 - Гістограма розподілу частинок фторопласту-4 за розмірами

Фенольна смола – дифеніолсульфон-формальдегідний олігомер (ДФСФО), який синтезовано на кафедрі технології природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро) [68]. Структурну формулу ДФСФО зображено на рисунку 2.5.

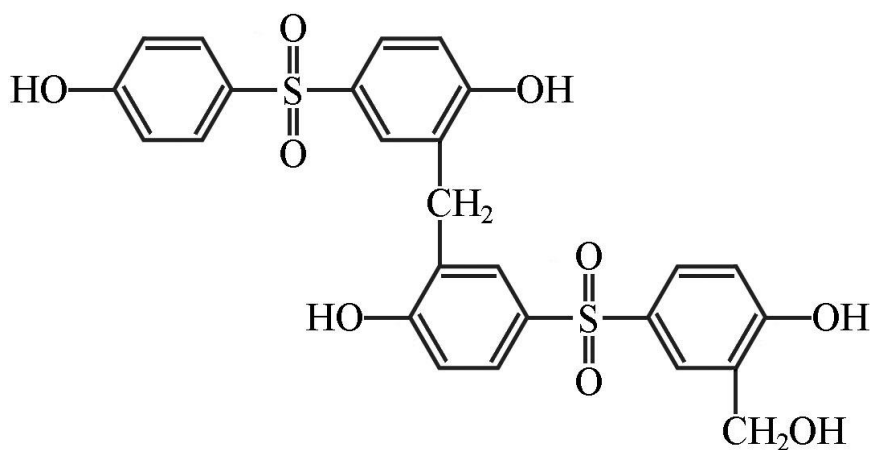


Рисунок 2.5 - Структурна формула ДФСФО

ДФСФО у вихідному вигляді являє собою водневий розчин, призначений для просочення переважно волокнистих та дисперсних

наповнювачів та подальшого отримання на їх основі полімерних композиційних матеріалів.

З метою створення термостійких матеріалів згідно з ресурсозбережною технологією, розробленою в роботі з цього матеріалу, отримано прес-порошок за допомогою операції сушіння та подрібнення отриманого продукту. Для запобігання передчасного зшивання олігомерів сушіння відбувалося при температурі 30°C до досягнення постійної ваги. Отриманий продукт подрібнювався на механічному лопатевому подрібнювачі до отримання дрібнодисперсного прес-порошку.

Відповідно до проведених мікроскопічних досліджень та побудові за їх результатами гістограми, розподілу за розмірами частинок прес-матеріалу на основі ДФСФО (рис. 2.6) встановлено, що найбільша кількість частинок полімеру (72 %) припадає на інтервал розмірів від 20 до 50 мкм. Тобто можна стверджувати, що основним розміром частинок прес-порошку на основі ДФСФО є 20–50 мкм.

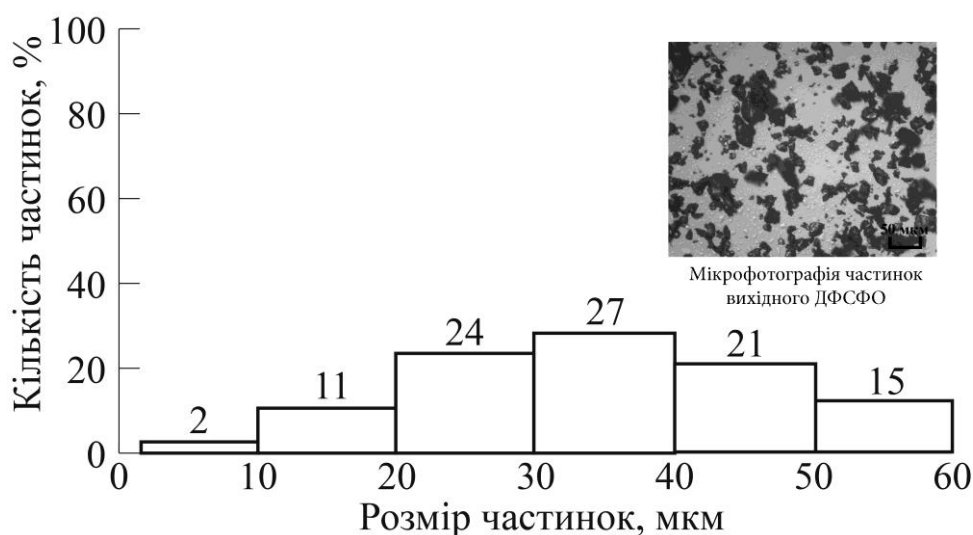


Рисунок 2.6 - Гістограма розподілу частинок ДФСФО за розмірами

В якості наповнювача використано аморфний діоксид кремнію марки силікагель з високим ступенем хімічної чистоти, отриманий у лабораторії полімерних матеріалів та нанокompозитів кафедри інноваційної інженерії

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро). Структурну формулу силікагелю представлено на рис. 2.7.

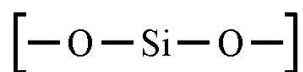


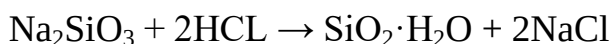
Рисунок 2.7 - Структурна формула силікагелю

Вибір продуктів та режимів синтезу силікагелю проведено відповідно до попередніх досліджень [121; 159] з метою отримання наповнювача з максимально розвиненою питомою поверхнею.

Основним інгредієнтом для отримання діоксиду кремнію марки «силікагель» з високим ступенем хімічної чистоти є натрій силікат розчинний, який, відповідно до ГОСТ Р 50418-92, має до 1 % домішок. Також використано дистильовану воду та водний розчин соляної кислоти (ч.д.а., ГОСТ 3118-77).

Технологія отримання діоксиду кремнію марки «силікагель» з високим ступенем хімічної чистоти була наступною:

- отримання водного розчину натрій силікату;
- створення аквагелю (гель, пори якого заповнені рідиною) за рахунок підкислення водяного розчину натрій силікату водним розчином соляної кислоти до переходу отриманої системи у гелеподібний стан, за реакцією:



- створення ксерогелю (гель, з якого видалено рідку фазу так, що структура стає стиснутою за рахунок сил поверхневого натягання, які діють при видаленні з пор рідини) за рахунок висушування, подрібнення та промивання отриманого аквагелю.

Концентрований водний розчин натрій силікату отримано при розведенні дистильованою водою при температурі 50–55°C. Створений розчин має до 20 % ваг. Na_2SiO_3 (у перерахунку на твердий продукт).

Підкислення розчину натрій силікату відбувалося 10 %-ним водним розчином соляної кислоти, який подається в реактор крапельним способом при постійному перемішуванні реакційного об'єму. При досягненні рН отриманого розчину 6,5–7,5 реакційний об'єм набуває гелеподібного стану. Слід відзначити, що створення силікагелю при даному значенні рН дозволяє отримати матеріал з найбільшою питомою поверхнею (до 500–600 м²/г) [121; 160].

Висушування аквагелю відбувалося у вакуумній шафі при температурі 40–60°C. Сушіння тривало до повного переходу гелю у твердоподібний стан і набуття постійної маси. Отриманий ксерогель подрібнено на дезінтеграторі до мінімально можливих розмірів частинок наповнювача. Подрібнену систему промито у дистильованій воді температурою 70°C упродовж 10 хв. Це дозволило вимити із ксерогелю побічні продукти реакції (сіль NaCl та залишки кислоти).

Для підтвердження видалення побічних продуктів реакції з ксерогелю було проведено його рентгенографічні дослідження до та після промивання у дистильованій воді (рис. 2.8).

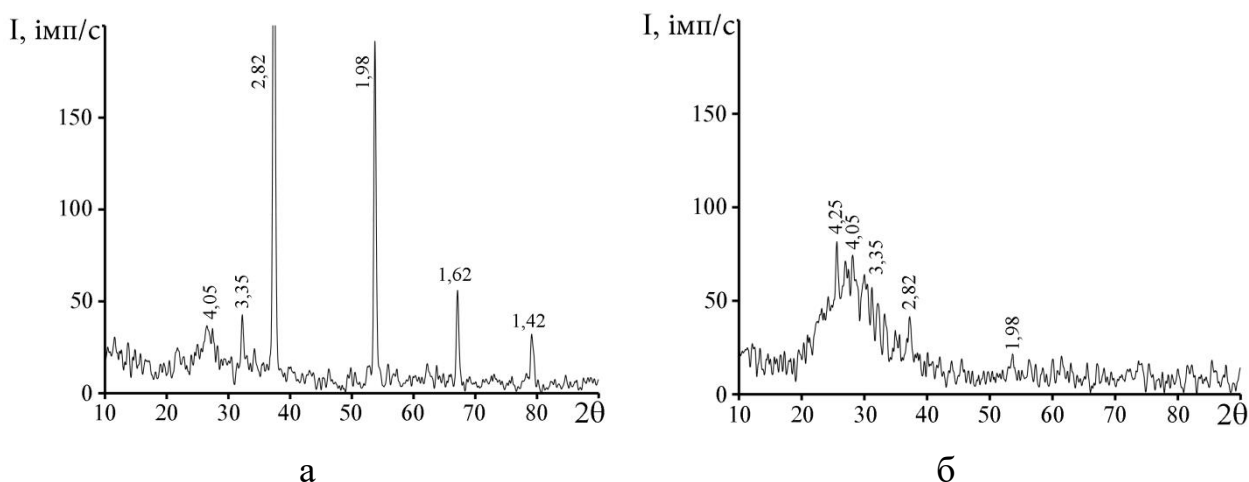


Рисунок 2.8 – Рентгенограми отриманого ксерогелю до (а) та після промивання в дистильованій воді (б)

Отримані рентгенограми мають суттєві відмінності. Так, відповідно до рентгенограми (рис. 2.8, а), ксерогель до промивання в дистильованій воді має виражену структуру матеріалу з високим ступенем кристалічності яка характеризується яскраво вираженими піками області кутів Вульфа-Брегга (2Θ) 26–27, 31–32, 37–38, 53–54, 67–68 та 78–79.

Всі ці піки відповідають визначеним міжплощинним відстаням у кристалах та кристалоподібних структурах окремих речовин. Згідно з довідниковою літературою [161; 162], відповідно до їх інтенсивності та значеннями встановлюємо, що яскраво виражені піки з міжплощинними відстанями 2,82, 1,98 1,62 та 1,42 відповідають солі NaCl, яка є основним побічним продуктом при отриманні силікагелю [121]. Піки з міжплощинним відстаням 4,05, 3,35 характерні для діоксиду кремнію.

Рентгенограма ксерогелю, отриманого після промивання у дистильованій воді (рис. 2.8, б), характерна для матеріалу з невисоким ступенем кристалічності з яскраво вираженими аморфним гало в області кутів Вульфа-Брегга (2Θ) 20-35 та з вираженими піками в області кутів Вульфа-Брегга (2Θ) 25-30, 31-32, 37-38, 53-54. Відповідно до їх інтенсивності і значень міжплощинних відстаней, всі ці піки відповідають діоксиду кремнію різних модифікацій (α -кварц, α -крystalобаліт та α -тридиміт). Причому слід відзначити, що яскраво виражених інтенсивних піків з міжплощинними відстанями, характерними для солі NaCl, вже не спостерігається, що свідчить про видалення цього компонента з ксерогелю, отриманого після подрібнення.

Для визначення основного розміру синтезованого силікагелю використано гістограму розподілу частинок за розмірами, отриману за допомогою мікрофотографій (рис. 2.9).

Оскільки частинки силікагелю мають сферичну форму, то за їх основний розрахунковий розмір узято діаметр.

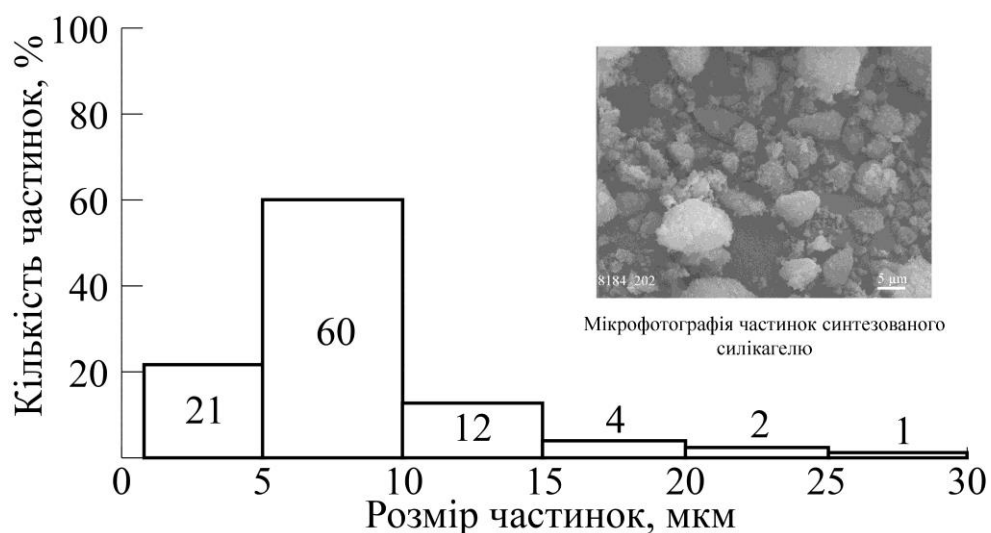


Рисунок 2.9 - Гістограма розподілу частинок синтезованого силікагелю за розмірами

З отриманих гістограми визначено, що найбільша кількість частинок (60 %) припадає на інтервал розмірів від 5 до 10 мкм. Тобто основний розмір частинок силікагелю лежить в інтервалі 5–10 мкм.

Мікроскопічні дослідження поверхні силікагелю засвідчили, що отриманий наповнювач має досить добре розвинену поверхню (рис. 2.10), яка сприяє фізичній адсорбції полімеру при їх переробці у виробі.

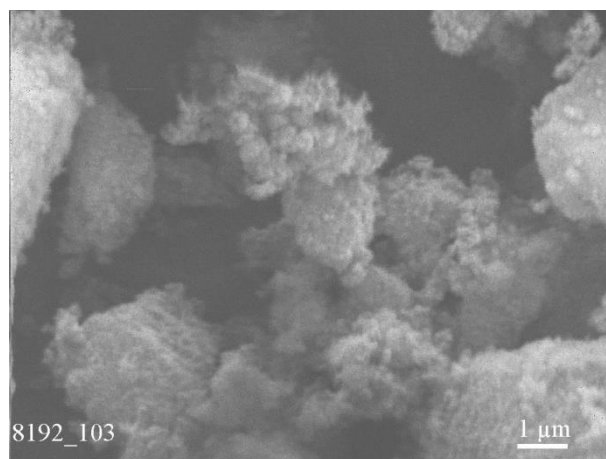
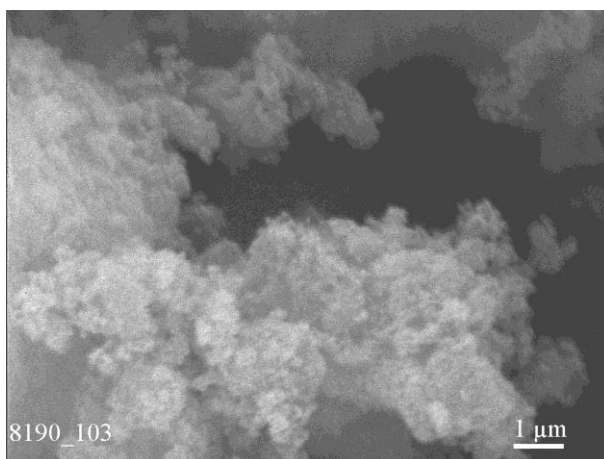


Рисунок 2.10 – Мікрофотографії поверхонь частинок силікагелю

Отриманий діоксид кремнію марки «силікагель» вирізняється високим ступенем хімічної чистоти, його частинки невеликі за розміром і мають добре розвинену поверхню, що дозволяє використовувати цей матеріал в якості наповнювача для полімерних матриць.

2.2 Технології переробки та обладнання для отримання ПКМ на основі прес-порошків полімерів (фенілон С1, фторопласт-4,ДФСФО) та сілікагелю

Відповідно до стандартної технології переробка ароматичного поліаміду, фторопласту та фенольної смоли та ПКМ на їх основі у виробі відбувається у 3 етапи (підготовчий, основний, завершальний) [163; 164]. На підготовчому етапі відбувається створення полімерної композиції, її брикетування, сушіння тощо. На основному етапі переробки відбувається безпосередньо переробка брикетів з отриманих ПКМ, яка полягає в їх підсушуванні, при необхідності, компресійне чи литтєве пресування, спікання тощо. На завершальному етапі відбувається доведення отриманих заготовок із розроблених ПКМ до необхідних розмірів та зовнішнього вигляду. У більшості випадків це відбувається за рахунок механічної обробки їх поверхонь.

Зразки з ароматичних поліамідів та ПКМ на їх основі отримано за наступною технологією: суміщення полімеру з наповнювачем, брикетування отриманої полімерної композиції, підсушування отриманих брикетів, компресійне пресування у формах з підігріванням, охолодження отриманих заготовок, надання їм необхідного зовнішнього вигляду.

На першому (підготовчому) етапі переробки відбувається процес суміщення дисперсних частинок полімеру з наповнювачем в апараті з механічною швидкохідною мішалкою (лінійна швидкість на кінцях лопатей якої досягає 15 м/с) із складною формою лопатей. Процес триває впродовж 1–5 хв до отримання полімерної композиції з високою якістю та рівномірністю розподілу вихідних компонентів суміші. Для підвищення

технологічності та спрощення технології переробки у вироби отримана полімерну композицію брикетується за допомогою прес-форм при тиску від 60 до 150 МПа залежно від складу полімерних композицій та конфігурації майбутнього виробу для отримання суцільного міцного брикету.

На другому (основному) етапі переробки відбувається підсушування отриманих брикетів при температурах від 150–220°C упродовж 20–60 хв до повного видалення з них вологи, яка виступає в ролі агента деструкції при переробці ароматичних поліамідів у вироби. Підсушений брикет перекладається у прес-форму з підігрівом, нагріту до температури 150–200°C, при якій відбувається сушіння брикету з метою унеможливлення всмоктування брикетом вологи з повітря. Подальше нагрівання брикету у прес-формах з підігрівом відбувається із швидкістю 5°C за 1 хв до температур переробки 320–340°. Після нагрівання прес-форми до цієї температури відбувається витримка без тиску брикету впродовж часу, необхідного для повного його прогрівання по всьому об'єму (зазвичай 1 хв на 1 мм виробу).

Після цього необхідно створити тиск у формі від 20 до 60 МПа, необхідний для формування виробу з брикету, та витримати при температурі і тиску переробки впродовж часу, який розраховується відповідно до розмірів майбутнього виробу і складає 1 хв на 1 мм виробу. Після цього відбувається операція охолодження прес-форми із швидкістю 10–20°C на хву до температури, нижчої температури склування полімерної матриці на 20–40°C. Після охолодження виріб вивантажується з прес-форми для подальшої обробки.

На третьому (завершальному) етапі переробки відбувається механічна обробка готового виробу з метою видалення облою, надання виробу остаточних розмірів, шорсткостей та створення необхідного зовнішнього вигляду. Ці операції відбуваються за допомогою спеціального різального інструменту (різці, свердла, розгортки тощо) для полімерних композиційних матеріалів на токарних та свердлильних верстатах.

Зразки з фторопласту-4 та ПКМ на їх основі отримано за наступною технологією: суміщення полімеру з наповнювачем, брикетування отриманої полімерної композиції, спікання у термошафі, охолодження отриманих заготовок, надання їм необхідного зовнішнього вигляду.

На першому (підготовчому) етапі переробки відбувається процес суміщення дисперсних частинок полімеру з наповнювачем, у результаті якого створюються полімерні композиції. Він аналогічний до переробки ПКМ на основі ароматичного поліаміду.

Отримані полімерні композиції брикетуються за допомогою прес-форм при тиску від 20 до 80 МПа залежно від складу полімерних композицій та конфігурації майбутнього виробу для отримання суцільного міцного брикету.

На другому (основному) етапі переробки відбувається спікання отриманих брикетів при температурах 360–390°C у термошафі. При цьому швидкість підняття температури складає 2–10°C за 1 хв. Витримка при оптимальній температурі спікання проходить впродовж 15–30 хв на 1 мм виробу. Охолодження відбувається у термошафі із швидкістю не більше 10–20°C на хв до температури навколишнього середовища (20–30°C). Після охолодження виріб витягається з термошафи для подальшої обробки.

На третьому (завершальному) етапі переробки відбувається механічна обробка готового виробу для надання йому необхідного зовнішнього вигляду. Він відбувається аналогічно, як при переробці ароматичного поліаміду.

Зразки з ДФСФО та ПКМ на їх основі отримано за наступною технологією: суміщення полімеру з наповнювачем, брикетування отриманої полімерної композиції, підсушування брикетів, компресійне пресування у формах із підігрівом, охолодження отриманих заготовок, надання їм необхідного зовнішнього вигляду.

На першому (підготовчому) етапі переробки відбувається процес суміщення дисперсних частинок полімеру з наповнювачем, у результаті

якого створюються полімерні композиції. Він аналогічний до переробки ПКМ на основі ароматичного поліаміду.

Отримані полімерні композиції брикетуються за допомогою прес-форм при тиску від 80 до 240 МПа залежно від складу полімерних композицій та конфігурації майбутнього виробу для отримання суцільного міцного брикету.

На другому (основному) етапі переробки для скорочення часу пресування та підвищення якості виробів відбувається підсушування брикетів при температурах від 50 до 130°C впродовж 10–50 хв залежно від вибраної температури сушіння. Підсушений брикет завантажується у прес-форму, підігріту до температури сушіння. Подальше пресування відбувається при тисках від 10 до 50 МПа при повільному піднятті температури до 160–190°C і витримки при ній впродовж 15–30 хв. Після витримки відбувається вивантаження готового виробу.

На третьому (завершальному) етапі переробки відбувається механічна обробка готового виробу для надання йому необхідного зовнішнього вигляду. Він відбувається аналогічно, як при переробці ароматичного поліаміду.

У роботі в якості формівного інструменту використано прес-форми різної конструкції, що залежить від форми та розмірів виробів, які в ній формуються. Їх схематичне зображення подано на рис. 2.11.

Так, вироби 5 формуються у формах за допомогою матриці 3 та пуансонів 2, які підігріваються за допомогою бокового нагрівача та плит преса 1. Температура у прес-формах вимірюється за допомогою хромель-алюмелевих термопар 4.

Прес-форми виготовлено згідно з рекомендаціями [165] зі сталі 40Х та загартовано до твердості 50–55 HRC. Формівні поверхні при цьому полірувалися до отримання шорсткості поверхні $Ra = 0,67$ мкм.

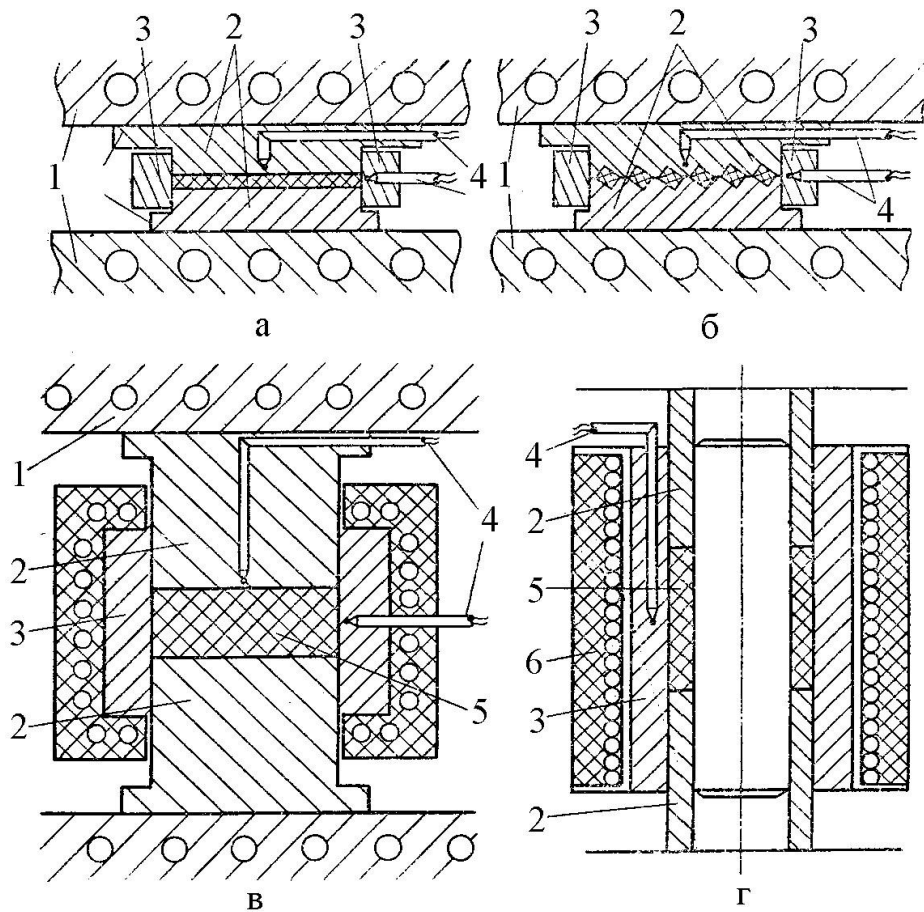


Рисунок 2.11 - Конструкції прес-форм для формування виробів із досліджуваних матеріалів: а,б – форми з нагріванням за допомогою плит преса; в – форми з комбінованим нагріванням за допомогою плит преса та бокового нагрівача; г – форми з нагріванням за допомогою бокового нагрівача.

2.3 Методи досліджень вихідних матеріалів та ПКМ на їх основі

Мікрометричні знімки частинок полімерів, наповнювача, сколів розроблених ПКМ на їх основі, поверхонь тертя отримано за допомогою електронного (Superprobe-733 (Jeol)) та оптичних (МИМ-, МБР-1 МБС-9) мікроскопів, оснащених камерами для електронних мікрофотографій.

Рівномірність розподілу наповнювача в полімерній композиції оцінено за рахунок знаходження коефіцієнта неоднорідності (V_C) [166].

$$V_c = \frac{100}{H} \times \sqrt{\frac{[\sum_{i=1}^n (c_i - H)^2]}{n - 1}} \quad (2.1)$$

де c_i – вміст наповнювача у полімерній композиції, %;

H – вміст наповнювача при ідеальному розподілі, %;

n – загальна кількість проб полімерної композиції.

При ідеальному розподілі вихідних компонентів полімерної композиції коефіцієнт V_c наближається до одиниці. Тобто, чим менші значення коефіцієнта неоднорідності, тим кращий розподіл наповнювача у полімерній композиції.

Уміст неорганічного наповнювача у полімерній композиції визначено за допомогою термічного методу (термічного прокалювання), який дозволяє це зробити за рахунок видалення з полімерної композиції органічного компонента (полімеру) при дії визначеної температури. Підбір температури прокалювання та часу витримки при цій температурі визначено відповідно до термогравіметричного аналізу досліджених полімерних матриць. Їх результати унаочнено на рис. 2.12.

Відповідно до проведених досліджень, наповнювач силікагель втрачає вагу при прокалюванні тільки в початковий період з 60 до 180°C, це пов'язано з видаленням з нього вологи та летких компонентів. При подальшому нагріванні його до 1000°C втрата ваги не спостерігається. Для фенілону С1 в початковий період з 60 до 160°C спостерігається втрата ваги за рахунок видалення вологи та летких компонентів. При подальшому його нагріванні до температури 350°C її значення стабільні і в інтервалі температур від 350 до 880°C спостерігається інтенсивна втрата ваги за рахунок термічної деструкції полімеру. Причому при температурі 880–890°C ароматичний поліамідфенілон С1 повністю розкладається на леткі компоненти, про що свідчить повна його втрата ваги при проведенні термогравіметричного аналізу.

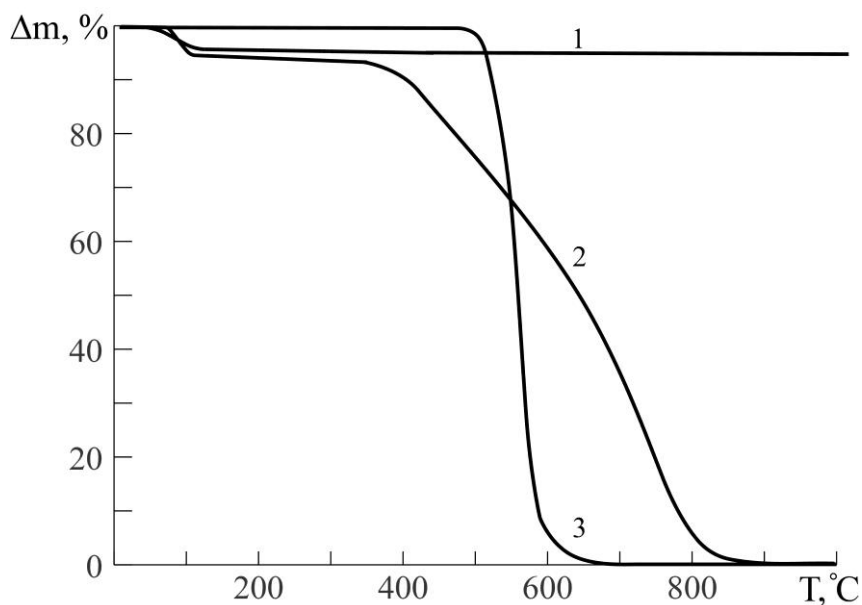


Рисунок 2.12 – Термогравіметричні криві силікагелю (1) та термостійких полімерних матриць: 2 – фенілон С1, 3 – фторопласт-4

Для фторопласту-4 в інтервалі температур від 20 до 490°C втрата ваги не спостерігається. Її інтенсивне зменшення спостерігається вже при температурах 490–650°C. Причому в цьому інтервалі температур спостерігається повне термічне розкладання фторопласту-4, про що свідчить повна його втрата ваги при проведенні термогравіметричного аналізу. Тобто, відповідно до проведених досліджень, термічне прокалювання розроблених полімерних композицій з метою видалення органічної полімерної матриці необхідно проводити при температурах вищих, ніж температури, при яких вони повністю розклалися на леткі компоненти при нагріванні. Тому цей процес проведено при температурі 1000°C (при цій температурі полімерна матриця повністю розкладається і залишається тільки неорганічний наповнювач силікагель).

Для полімерної матриці на основі ДФСФО метод термічного прокалювання не використовувався внаслідок того, що при температурах 1000–1200°C вона карбонізується і її неможливо повністю розділити з наповнювачем силікагелем. Уміст неорганічного наповнювача силікагелю у

полімерній композиції на основі ДФСФО визначено за допомогою мікрометричних знімків поверхонь сколів композитів.

Щільність брикетів із полімерів та ПКМ на їх основі визначено за ISO 1183 за допомогою методу вимірювання і зважування на аналітичних вагах ВЛР–200.

Густина полімерів та ПКМ на їх основі визначено за ISO 1183 за допомогою методу гідростатичного зважування на аналітичних вагах ВЛР–200, з модулем для гідростатичного зважування.

Стійкість до дії температури об'єктів дослідження виміряно за допомогою методу термогравіметричного аналізу, відповідно до ISO-11358, методами сканування за температурою і часом на дериватографі TGA Q50.

Напруження при межі текучості (σ_y) та модуль пружності (E) при стисканні вихідних полімерів та ПКМ на їх основі визначено за ISO 604 та ГОСТ 9550-81 на універсальній розривній машині 2167 Р-50 згідно з ISO 604.

Ударну в'язкість (a_n) вихідних полімерів встановлено відповідно до ISO 179 на маятниковому копрі МК–30.

Твердість (НВ) матеріалів визначено методом вдавлювання кульки на твердомірі 2013 ТШСП відповідно до ISO 2039-1.

Силу різання при точінні заготовок із розроблених ПКМ визначено за допомогою вимірювального токарного різця. Його конструкцію подано на рис. 2.13.

Вимірювальний різець складається із двох основних частин: головки 1 і корпусу 2. На корпусі закріплюються нижня 3 і верхня 4 планки. У них знаходяться осі 7, зафіксовані в отворах. На ці осі кріпиться планка тензодатчика 6. Головка різця прикріплюється до корпусу за допомогою натискного болта 16 і контактує із корпусом за допомогою трьох опорних шариків 9 і 13. Стандартна різальна пластина 12 затискається між верхньою 10 і нижньою 11 прокладками.

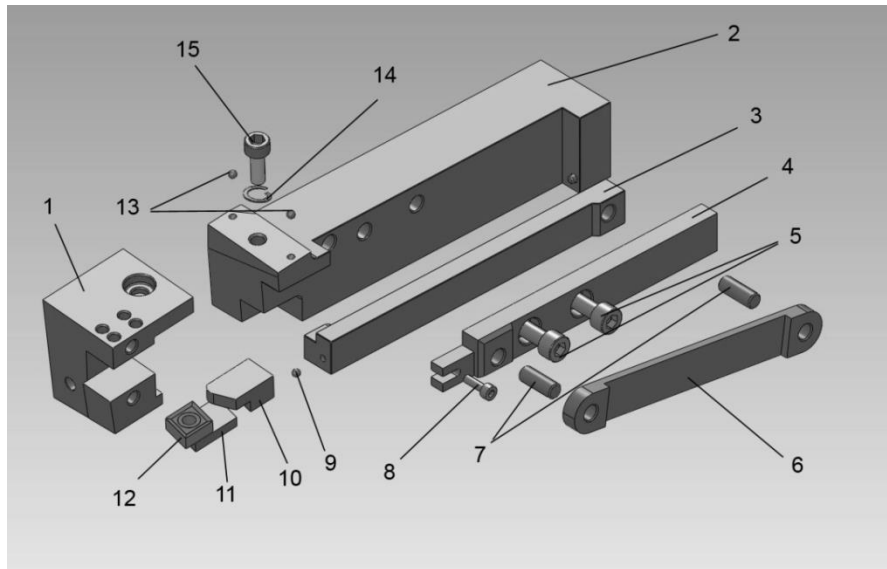


Рисунок 2.13 – Вимірювальний токарний різець: 1 – головка; 2 – корпус; 3 – нижня планка; 4 – верхня планка; 5,8 – болти; 6 – планка тензодатчика; 7 – вісь; 9,13 – опорні кульки; 10 - верхня прокладка; 11 - нижня прокладка; 12 – різальна пластина; 14 – пружина; 15 – натискний болт

Принцип роботи вимірювального різця полягає в тому, що під дією навантаження, яке виникає при різанні, головка різця прагне обернутися навколо своєї осі і тим самим передає зусилля на нижню планку. При цьому нижня планка підлягає деформації стискання. Планка тензодатчика прикріплена за допомогою осей до нижньої та верхньої планки і деформується при роботі різця. Тензодатчики, наклеєні на планку, сприймають деформації і переводить їх в електричний сигнал. За допомогою тензометричного підсилювача сигнал з тензодатчиками підсилюється і передається на вимірювальний мультиметр UNI-T UT70B, з'єднаний з персональним комп'ютером.

Шорсткість поверхонь виробів із полімерів, ПКМ на їх основі та поверхонь тертя виміряно відповідно до ГОСТ 2789-73 на профілометрі 296.

Рентгеноструктурний аналіз полімерів та ПКМ на їх основі проведено на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2 у монохроматизованому Cu–K α

випромінюванні. Об'єктом досліджень були циліндричні зразки розмірами: діаметр $15 \pm 0,2$ мм, висота $10 \pm 0,2$ мм.

Інфрачервоні спектри полімерів та ПКМ на їх основі отримано з таблеток бромиду калію на Фур'є ІК-спектрометрі SPECTRUM ONE (PerkinElmer).

Температуру розм'якшення за Віка T_{BK} визначено на приладі FWV-633/10 відповідно до ISO 1183-1.

Вимірювання лінійного теплового розширення α матеріалів виконано згідно з ГОСТ 15173-70 на приладі ДКВ-4.

Коефіцієнт тертя та інтенсивність лінійного зношування при фрикційній взаємодії розроблених полімерів і ПКМ на їх основі зі сталлю визначено на машині 2070 СМТ-1 при режимі тертя без та зі змащуванням за схемою диск-колодочка. Використано сталевий зразок зі сталі 45 з шорсткістю $R_a = 0,32$ мкм і твердістю 45-50 HRC. Температуру на поверхні тертя визначено за допомогою хромель-алюмелевої термопари, з'єднаної з вимірювальним приладом MASTECHMS6514. Трибологічні дослідження розроблених матеріалів при терті у різних середовищах проведено в спеціальній напіввідкритій камері. Змащування відбувалося за рахунок занурення сталевого зразка у середовище, в якому проведено дослідження, при обертанні якого відбувається його потрапляння в зону тертя. Тертя і зношування при дії різного рівня температур на розроблені матеріали досліджено у спеціальній термічній камері з омичним підігрівом, температура в якій регулюється і підтримується за допомогою системи автоматики.

2.4 Обробка результатів експериментів

Для отримання достовірних результатів дослідження (з заданим ступенем ймовірності) проведено статистичну обробку отриманих результатів експериментів.

Перевірку відтворення експериментів та визначення необхідної кількості паралельних дослідів проведено за допомогою знаходження критеріїв Кохрена за наступною методикою [167]:

– для кожної серії паралельних дослідів підраховано середнє арифметичне значення функції відгуку:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k y_{ji} \quad (2.2)$$

де k – число паралельних дослідів, проведених при однакових умовах.

- підраховано оцінку дисперсії для кожної серії паралельних дослідів:

$$s_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 \quad (2.3)$$

- для перевірки відтворюваності досліджень знайдено відношення найбільшої з оцінок дисперсії до суми всіх оцінок дисперсії (розрахунковий критерій Кохрена):

$$G_p = \frac{\max(s_j^2)}{\sum_{j=1}^N s_j^2} \quad (2.4)$$

Теоретичні значення критерію Кохрена (G) узято з довідникової літератури при довірливій вірогідності $P_0 = 0,95$, з якою і приймається гіпотеза про відтворення дослідів.

Досліди вважаємо відтворюваними, а оцінки дисперсії – однорідними при умові $G_p \leq G$. При невиконанні цієї умови проведено додаткові дослідження з усуненням джерел їх нестабільності.

Планування експериментів та отримання рівнянь регресії, які описують експериментальні дослідження, проведено за допомогою системи автоматичного проектування MathCAD. При цьому використано регресійний аналіз. Приклад такої програми для обчислення подано в додатку Б.

Межі довірливого інтервалу результатів досліджень знайдено з допомогою значень коефіцієнта Стюдента, задаючись довірливою вірогідністю ($P_d = 0,95$) за наступною формулою:

$$\Delta X = \frac{t_s \cdot s}{\sqrt{k}}, \quad (2.5)$$

де t_s – критерій Стюдента;

s – середня квадратична похибка дослідження;

k – кількість паралельних дослідів.

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА НОВИХ ПІДХОДІВ ОТРИМАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ НА ОСНОВІ ТЕРМОСТІЙКИХ ПОЛІМЕРІВ

3.1 Теоретичне обґрунтування технології отримання силікагелю в присутності прес-порошків фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО

Існування сучасної промисловості неможливе без використання полімерів та полімерних композиційних матеріалів на їх основі в якості конструкційних матеріалів для вузлів машин і механізмів [168; 169]. Уже з середини ХХ століття ці матеріали завойовують широкий ареал використання і поступово витісняють такі конструкційні матеріали, як метали та їх сплави, деревину тощо, які традиційно використовуються у промисловості [170]. На сучасному етапі розвитку промислових технологій у більшості легконавантажених вузлів, які працюють при невисоких температурах, вже активно використовуються деталі з полімерів та полімерних композиційних матеріалів на їх основі, що дозволяє значно здешевити їх виробництво та покращити рівень надійності та довговічності в роботі [171; 172]. Це відбулося завдяки унікальному поєднанню їх властивостей: невисоких значень густини, достатнього рівня фізико-механічних та теплофізичних властивостей, високої хімічної стійкості та невисоких значення тертя та зношування при фрикційній взаємодії. Однак ще не вирішеним є питання використання полімерів та полімерних композиційних матеріалів у важконавантажених вузлах машин і механізмів, деталі яких працюють при високих температурах. Так, існують полімери та ПКМ, деталі з яких здатні працювати при навантаженнях до 280 МПа і температурах до 300°C, зберігаючи при цьому необхідний рівень надійності та довговічності, однак вони є досить високовартісні і тому не можуть конкурувати з традиційними конструкційними матеріалами (метали та їх сплави, кераміка тощо). Тому актуальним завданням є не тільки розробка

ПКМ, які будуть відповідати вимогам роботи при високому рівні навантажень і температур, але й здешевлення технології їх переробки у виробі, що, є одним із основних складників собівартості виробів з цих матеріалів.

Вибрані, відповідно до літературного огляду, полімери з високим рівнем термічної стабільності (фенілон С1, фторопласт-4 та ДФСФО), та ПКМ на їх основі, наповнені дисперсним наповнювачем силікагелем переробляються у виробі за досить енергоємною та високовартісною технологією. Вона схематично представлена на рис. 3.1.

Так, на першому, підготовчому етапі (рис. 3.1, а) відбувається створення полімерних композицій за рахунок суміщення вихідних дисперсних полімерів (фенілон С1, фторопласт-4 та ДФСФО) з наповнювачем силікагелем. У більшості випадків суміщення відбувається за допомогою механічних змішувальних пристроїв, які за рахунок складної форми лопатей дозволяють отримувати полімерні композиції з досить високою якістю розподілу вихідних компонентів [120; 173]. Далі з метою покращення технологічності при переробці у виробі з них отримуються тверді суцільні брикети за допомогою компресійних форм.

На другому, основному етапі (рис. 3.1, б) відбуваються операції підсушування отриманих таблеток (для полімерних композицій на основі фенілону С1 та ДФСФО) та їх подальша переробка у виробі за допомогою компресійного пресування (у прес-формах з підігрівом) для всіх досліджених композицій чи за допомогою вільного спікання (для полімерних композицій на основі фторопласту 4). Після цих операцій отримуємо заготовки з розроблених полімерних композиційних матеріалів, які йдуть на подальшу обробку.

На третьому, завершальному етапі (рис. 3.1, в) відбувається механічна обробка, за допомогою якої з отриманої заготовки, за заздалегідь визначеними розмірами та з урахуванням параметрів поверхонь, виготовляється виріб, готовий до використання.

шафа чи муфельна піч, універсальний механообробний центр тощо), що впливає на собівартість виробів з розроблених ПКМ на основі фенілону C1, фторопласту-4 та ДФСФО.

Проаналізувавши наукові дані та розглянувши процес переробки вибраних полімерних матриць і ПКМ на їх основі у виробі, можна зробити висновок, що на рівень властивостей найбільше впливає підготовчий етап переробки ПКМ, зокрема операція суміщення вихідних компонентів при створенні полімерних композицій. Від цієї операції залежить якість розподілу силікагелю в обраних полімерних матрицях на основі фенілону C1, фторопласту-4 та ДФСДО, що є одним із найважливіших чинників, який впливає на рівень властивостей виробів з розроблених ПКМ. Так, при неякісному розподілі наповнювачів у полімерах спостерігатиметься значна анізотропія властивостей отриманих з них виробів, яка разом із великою кількістю мікро- та макродефектів структури негативно вплинуть на рівень їх теплофізичних і фізико-механічних властивостей. Тому якісне суміщення вихідних компонентів полімерних композицій є найважливішим завданням при отриманні виробів з розроблених ПКМ.

Відомо [174], що при механічному суміщенні матеріалів з різними морфологічними (розміри, форма) та структурними (густина) характеристиками практично неможливо отримати якісний розподіл вихідних компонентів у полімерній композиції. Це відбувається за рахунок явища сегрегації, яке полягає у примусовому розділі частинок полімерів з наповнювачем внаслідок дії на них відцентрових сил, сили тяжіння тощо. Реалізацію цього ефекту зображено на рис. 3.2.

Згідно з ним при механічному суміщенні якість розподілу вихідних компонентів полімерних композицій у початковий період збільшується і, досягаючи екстремуму, стабілізується на рівні значно меншому, ніж при ідеальному розподілі. Це призводить до анізотропії властивостей отриманих ПКМ та створення у їх структурі мікро- та макродефектів, які порушують суцільність матеріалу і сприяють зменшенню його експлуатаційних

властивостей. Тому актуальним є вирішення цієї проблеми за рахунок модернізації операції суміщення вихідних компонентів полімерних композицій.

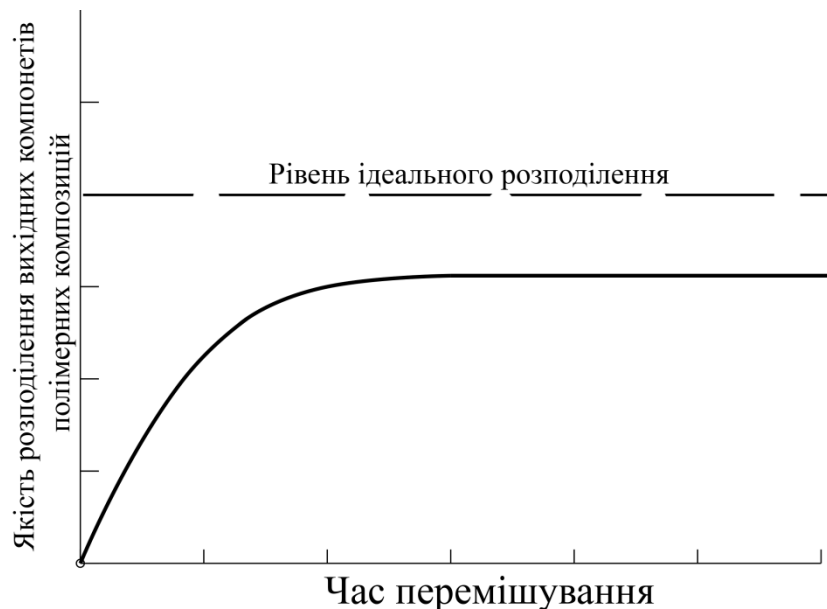


Рисунок 3.2 – Крива перемішування на механічних мішалках при виникненні явища сегрегації

З урахуванням наукових даних запропоновано замінити операцію суміщення вихідних компонентів полімерних композицій з механічного на (in-situ) суміщення полімерів з наповнювачем у процесі синтезу останнього. Це не тільки унеможливить вплив сегрегації на якість розподілу наповнювача в об'ємі полімерів, що у свою чергу сприятиме її покращенню, але й дозволить значно спростити технологію переробки ПКМ та зменшить собівартість виготовлення виробів з них.

Відповідно до того, що в якості наповнювача вибрано силікагель, який є продуктом, отримуваним з гелю кремнієвої кислоти, та саме в процесі його синтезу буде створено полімерну композицію (за рахунок додавання дисперсного полімеру в реакційне середовище), можна зробити висновок, що суміщення (insitu) вихідних полімерів з наповнювачем у процесі синтезу останнього належить до «золь-гель» синтезу. Відомо [175; 176], що «золь-

гель» синтез дозволяє комбінувати фрагменти неорганічних та органічних речовин на молекулярному рівні, виконуючи при цьому направлений синтез нового класу сполук – гібридних органічно-неорганічних композитів. Вихідні «золь-гель» системи знаходяться в більшості випадків у рідинному стані (водневій чи спиртовій розчині тощо), тому «золь-гель» процеси є досить безпечними в екологічному плані. З технологічного боку, операції, які відбуваються при «золь-гель» синтезі досить прості, однак цього не можна сказати про фізико-хімічні процеси, що відбуваються у багатокомпонентних «золь-гель» системах. Гомогенізація і взаємодія вихідних компонентів при створенні золю та гелю відбувається на молекулярному рівні, що уможливлює інтенсивнішу взаємодію між вихідними компонентами суміші порівняно з матеріалами, отриманими за «традиційними» технологіями [177].

З урахуванням вищезазначеного операція суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на підготовчому етапі технологічного процесу переробки термостійких полімерів (фенілон С1, фторопласт-4 таДФСФО), наповнених дисперсним наповнювачем силікагелем модернізується і відбувається за схемою, представленою на рис. 3.3.

Відповідно до неї вдається відмовитися від операції механічного суміщення вихідних компонентів полімерної композиції і проводити його на стадії синтезу наповнювача, що значно спрощує технологію переробки розроблених ПКМ у вироби і зменшує їх собівартість.

Відповідно до зображеної схеми (рис. 3.3), вихідний дрібнодисперсний полімер подається в реакційне середовище (наприклад, концентрований розчин натрій силікат розчинного), з якого отримується силікагель та рівномірно в ньому розподіляється за допомогою механічного перемішувального пристрою зі складною формою лопатей. Для створення гелю в отриману систему по краплинах подається водневий розчин кислоти при постійному перемішуванні реакційного середовища. Підкислення відбувається до отримання рН реакційного середовища на рівні 5–7, коли

відбувається миттєве створення гелеподібної системи з хаотично розподіленими частинками полімерів в її об'ємі.

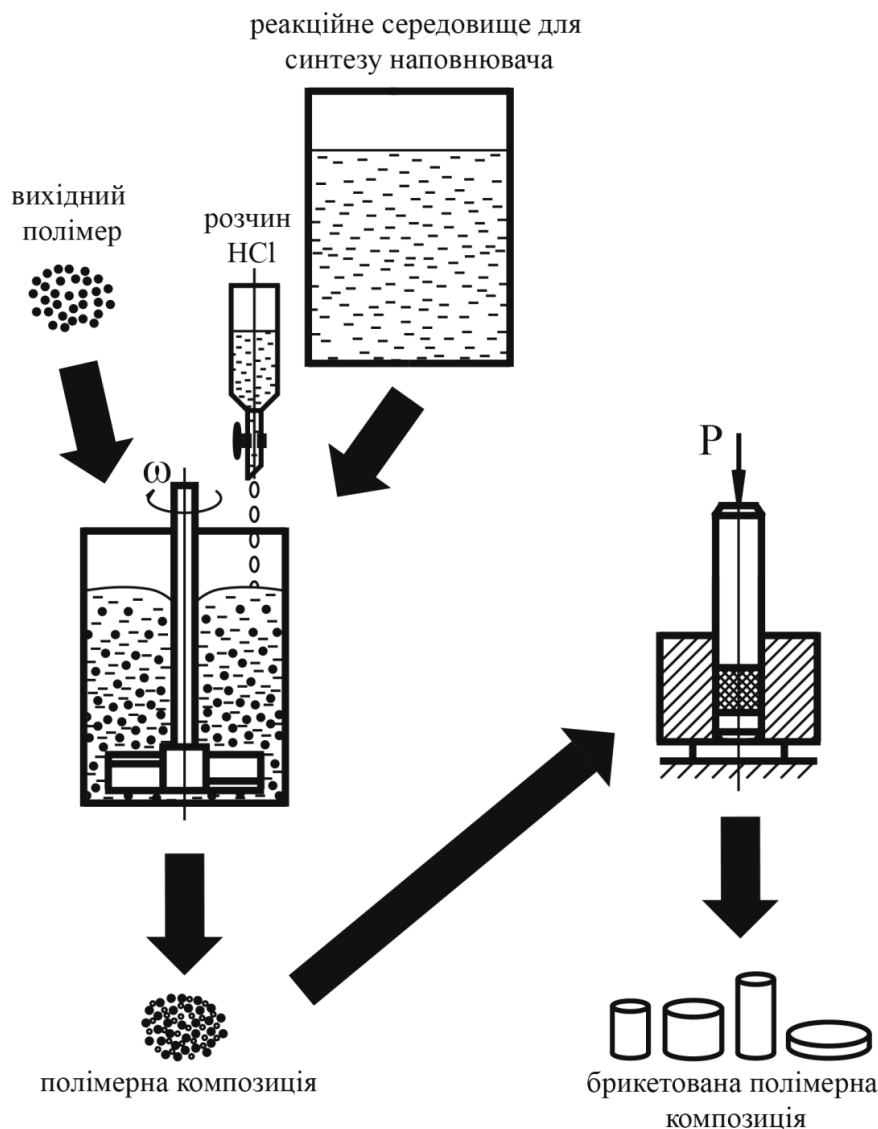


Рисунок 3.3 – Схема підготовчого етапу технологічного процесу переробки полімерів з високим рівнем термічної стійкості (фенілон С1, фторопласт-4 таДФСФО), наповнених дисперсним наповнювачем силікагелем використовуючи суміщення (in situ) вихідних компонентів відповідно до «золь-гель» технології

Для більшої наочності цього процесу було проведено моделювання створення гелеподібної системи з гранулами полімеру (діаметром 1–3 мм) інверсного (яскравого) кольору (рис. 3.4).

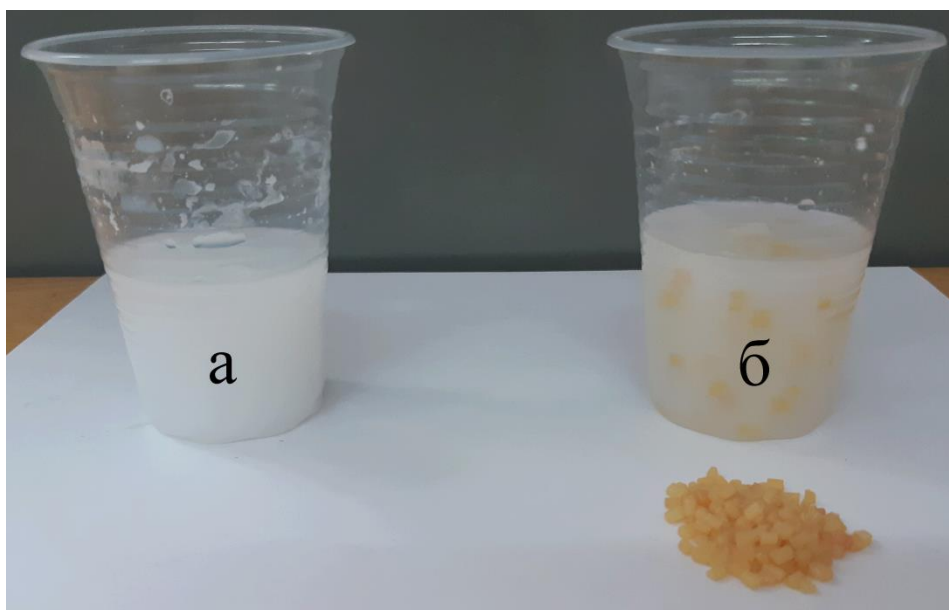


Рисунок 3.4 – Гелеподібна система: а – вихідна; б – з хаотично розподіленими частинками полімерів в її об’ємі

Відповідно до отриманих фото можна побачити, що гранули полімеру хаотично розподілені у створеній гелеподібній системі і знаходяться у нерухомому стані. Це сприятиме високій якості розподілу вихідних компонентів полімерних композицій, які будуть отримані з використанням цієї технології.

Подальша переробка отриманої суміші (гелеподібна система + частинки полімеру) полягає у її висушуванні за рахунок видалення вологи. Відповідно до рекомендацій [121], цю операцію необхідно проводити при температурах до 100°C та при нормальному атмосферному тиску, що сприяє створенню силікагелю з найбільш розвиненою поверхнею.

Гелеподібна система при висушуванні значно зменшується (у 3–4 рази) у розмірах за рахунок усадження (рис. 3.5).

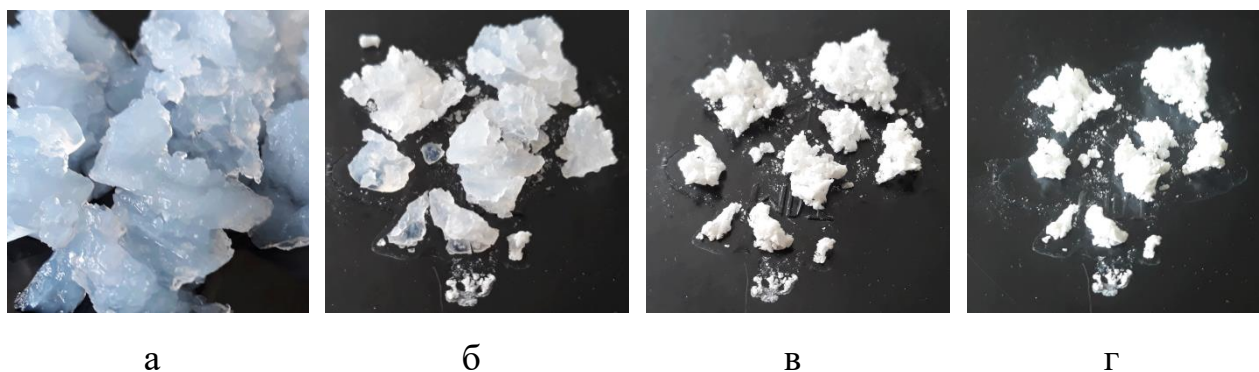


Рисунок 3.5 – Динаміка усадження вихідної гелеподібної системи впродовж визначеного часу (год) а – 0, б – 24; в – 48, г – 72

Це є наслідком створення вакууму при поверхневому натягуванні вологи та летких компонентів у порах частинок діоксиду кремнію при її випаровуванні [121].

Динаміка усадження гелеподібної системи в присутності твердих частинок полімерів відбувається за схемою, поданою на рис. 3.6.

Так, в початковий період (t_1) гелеподібна система з твердими частинками полімерів являє собою суцільну суміш (рис. 3.6, а). При проходженні деякого часу (t_2) вона починає зменшуватися в розмірах та усаджуватися, що призводить до руйнування визначеної кількості зв'язків між кремнеземними частинками, які знаходяться у гелеподібній системі (рисунок 3.6, б) та порушення її суцільності. Подальше усадження при проходженні часу (t_3 та t_4) ще сильніше порушує суцільність гелеподібної системи, створюючи при цьому органічно-неорганічні частинки (полімер-висушений гель), зображені на рис. 3.6, в,г.

Слід відзначити, що висушена гелеподібна система за рахунок значного усадження частково чи повністю охоплює поверхню частинок полімерів, які в ній знаходяться. Це явище може сприяти створенню кращих умов взаємодії на границі розділу фаз полімер – наповнювач за рахунок охоплення гелеподібною системою частинок полімеру при синтезі наповнювача та його усадженні.

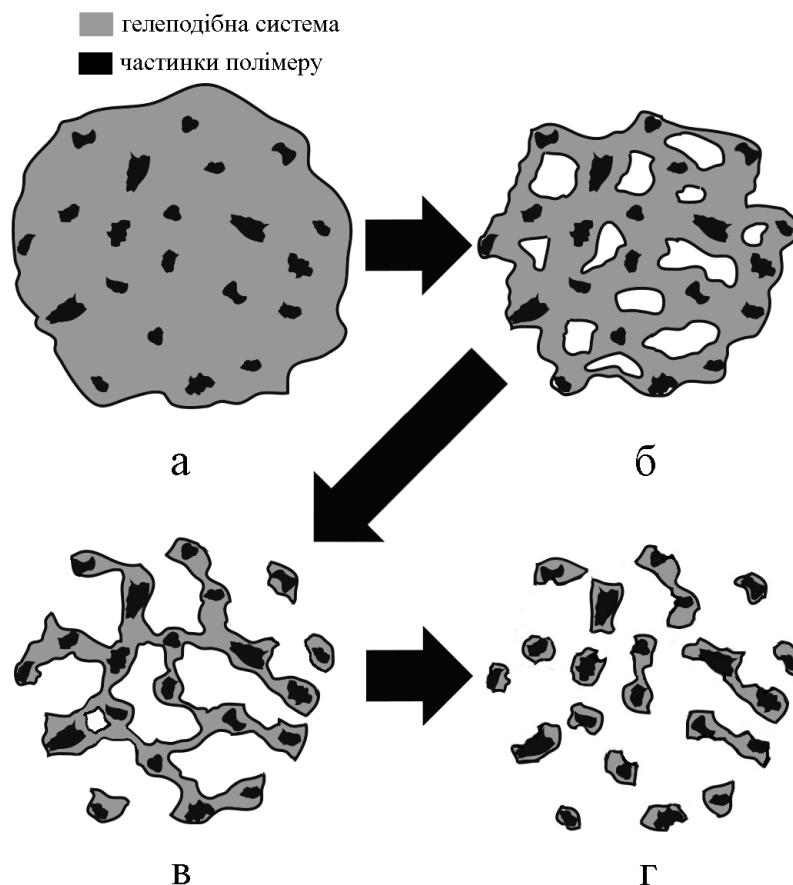


Рисунок 3.6 – Динаміка усадження гелеподібної системи в присутності твердих частинок полімерів упродовж визначеного часу ($t_1 > t_2 > t_3 > t_4$) а – t_1 , б – t_2 ; в – t_3 г – t_4 .

Схематичне зображення процесу створення аквагелю і ксерогелю в присутності частинок полімерів, яке ілюструє процес усадження аквагелю на надмолекулярному рівні при видаленні з нього вологи та летких компонентів, подано на рис. 3.7.

Відповідно до досліджень [121], створення гелю пов'язано із формуванням об'ємної сітки стрічкоподібних ланцюгів діоксиду кремнію (рис. 3.7 а). Причому дисперсні частинки полімерів є, очевидно, центрами структуроутворення аквагелю, подальше видалення вологи з якого призводить до значного усадження гелю, що характеризується деформацією та руйнуванням стрічкоподібних ланцюгів, які в результаті цього охоплюють поверхню полімерних частинок та створюють агрегати по за неї

(рис. 3.7 б). Тобто морфологія частинок силікагелю, створених на поверхні частинок полімерів в об'ємі гелю, очевидно, будуть відрізнятися, що сприятиме зміні структури ПКМ на їх основі і впливатиме на рівень властивостей виробів з них. Для підтвердження цього факту було отримано мікрометричні знімки поверхонь частинок вихідного полімеру до та після суміщення з силікагелем (рис. 3.8.).

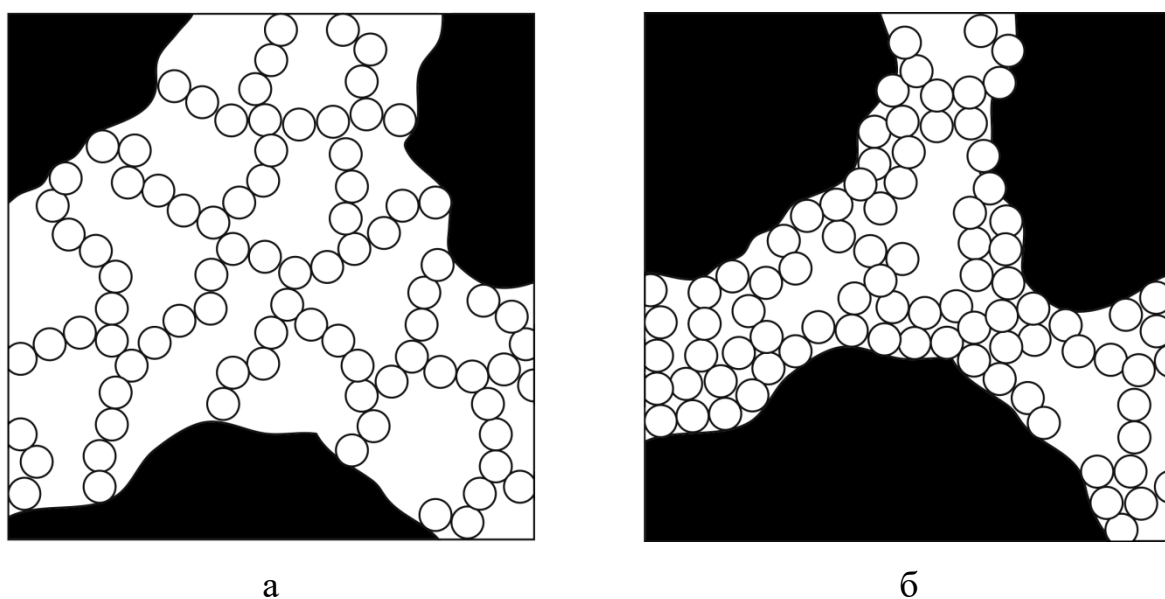


Рисунок 3.7 – Схематичне зображення процесу створення аквагелю (а) та переходу його у ксерогель (б) в присутності частинок полімерів

Відповідно до них, морфології поверхонь частинок вихідного фенілону С1 (рис. 3.8, а) та його ж у складі полімерної композиції, отриманої за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів (рис. 3.8, б), мають суттєві відмінності.

Так, поверхня частинок вихідних фенілону С1 має складну морфологію з великою кількістю мікро- та макропор. А поверхня частинок фенілону С1 у складі полімерної композиції, отриманої за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів, частково вкрита силікагелем, синтезованим у присутності частинок полімерів і отриманий при висушуванні аквагелю, його усадженні та відмиванні від побічних продуктів реакції.

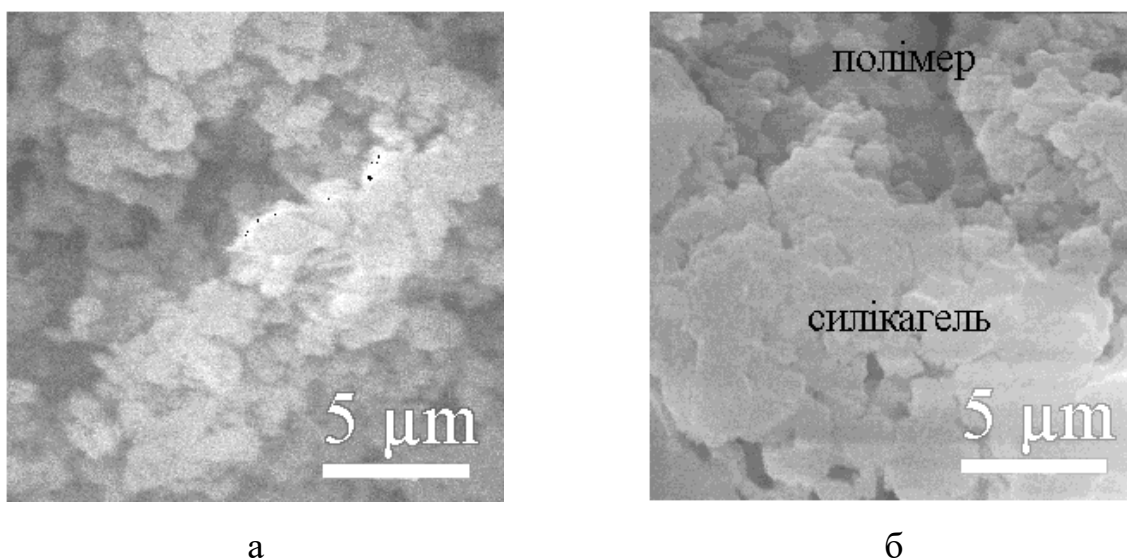


Рисунок 3.8 – Мікрофотографії поверхонь частинок фенілону С1 вихідного (а) та у складі полімерної композиції (б), отриманої з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій

Отже, запропонована золь-гель технологія отримання полімерних композицій на основі дисперсних термостійких полімерів (фенілон С1, фторопласт-4, ДФСФО) та силікагелю дозволяє не тільки значно спростити процес їх переробки у виробі, але й дозволяє отримувати органічно-неорганічні композити з високим ступенем гомогенізації вихідних компонентів, які мають нестандартну морфологію і структуру та покращеними умовами взаємодії на границі розділу фаз полімер – наповнювач за рахунок сил, які виникають при його усадженні й охопленні частинок полімерів при синтезі наповнювача.

3.2 Розробка технології отримання полімерних композицій з високою якістю розподілення їх вихідних компонентів

Технологія переробки ароматичного поліаміду, фторопласту та фенольної смоли та ПКМ на їх основі у виробі за допомогою суміщення (in situ) вихідних компонентів, як і при стандартній технології, відбувається у 3

етапи (підготовчий, основний, завершальний). Причому від стандартної вона відрізняється тільки підготовчим етапом. Операції, що відбуваються на основному та завершальному етапі *in-situ* переробки, повністю співпадають із традиційною технологією.

На підготовчому етапі відбувається створення полімерних композицій, яке полягає в суміщенні (*in situ*) вихідних компонентів полімерної композиції в процесі синтезу наповнювача.

Технологія синтезу силікагелю при цьому практично не відрізняється від вихідної (див. розділ 2) із зміною, яка полягає в тому, що в реакційну суміш (водневий розчин Na_2SiO_3) додаються дисперсні частинки полімеру в кількості, визначеній відповідно до виходу діоксиду кремнію з водневого розчину метасилікату натрію з метою отримання полімерних композицій з вмістом наповнювача від 10 до 80 % ваг. Вихід діоксиду кремнію визначено відповідно до молекулярної ваги компонентів, що входять до складу реакційної суміші.

Отримання полімерної композиції відбувається аналогічно до схеми, зображеній на рис. 3.3.

Згідно з нею, дисперсні вихідні полімери (фенілон С1, фторопласт-4 та ДФСФО) додають у реакційне середовище, в якому відбувається синтез силікагелю (рис. 3.9 а).

Виходячи з того, що в роботі для отримання наповнювача використано саме золь-гель технологію, то в якості реакційного середовища було обрано водневий розчин силікату натрію. Його отримано при розчиненні у дистильованій воді метасилікату натрію ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), який являє собою найбільш хімічно чисту форму силікату з тих, що виробляють у промислових масштабах. Це і було основним критерієм при виборі його в якості основного продукту для отримання силікагелю. Слід відзначити також, що метасилікат натрію ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) є основним і найбільш поширеним комерційним продуктом з гідратів мета- та дисилікатів.

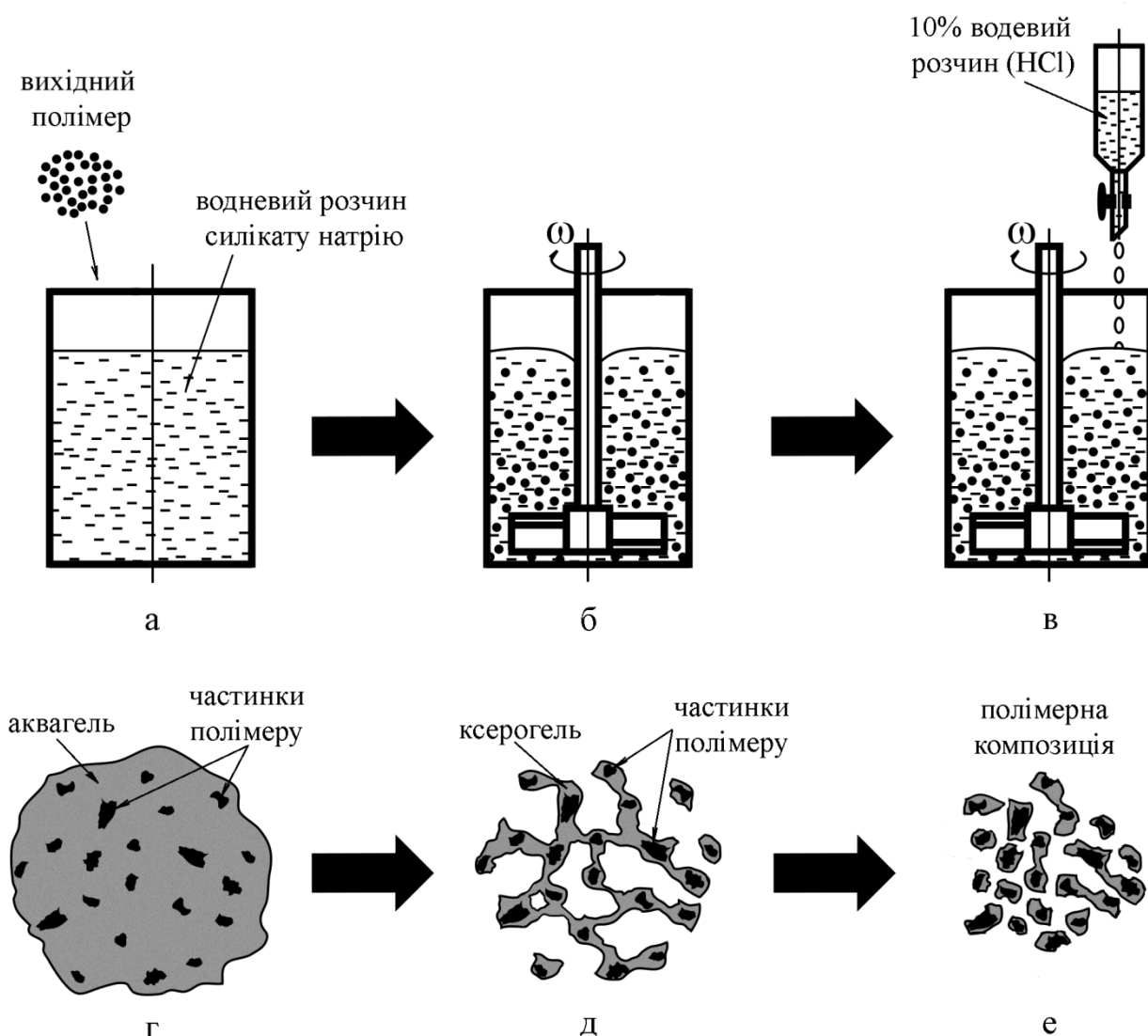


Рисунок 3.9 - Схема суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій на основі фенілону С1, фторопласту-4,ДФСДО і силікагелю у процесі синтезу наповнювача

Для досягнення хаотичного розподілу дрібнодисперсних частинок полімерів у реакційному середовищі (рис. 3.9 б) використано швидкохідну (до 1000 об/хв) лопатеву механічну мішалку, яка дозволяє отримувати суспензію, що складається з твердих дрібнодисперсних частинок полімерів, які знаходяться у водневому розчині силікату натрію. Якість їх розподілу в реакційному середовищі оцінено за допомогою візуального методу за зміною забарвлення суспензії.

При постійному перемішуванні в отриману суспензію крапельним шляхом додається 10 % розчин соляної кислоти (рис. 3.9 в) і підкислення отриманої суспензії проводиться до створення стабільного аквагелю.

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 кислотою (сульфід натрію Na₂SO₄) значно простіше видалити з висушеного аквагелю (ксерогелю) при промиванні у дистильованій воді внаслідок того, що хлорид натрію набагато краще розчиняється у ній, ніж сульфід [41].

Підкислення кислотою отриманої суспензії відбувалося до досягнення рН 6,5–7,5. Це обумовлено тим, що відповідно до попередніх досліджень (рис. 3.10), 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. Слід відзначити, що силікагелі, створені при підкисленні реакційного середовища до значень рН від 6 до 8 мають досить розвинену питому поверхню до 400 м²/г [121].

Після підкислення реакційного середовища створений при цьому аквагель являє собою систему, яка складається із відносно стабільної гелю фази, в якій рівномірно розподілено тверді дрібнодисперсні частинки полімерів (рис. 3.9 г).

Після цього отриманий аквагель з частинками полімерів висушується в термошафі до його переходу у ксерогель (гель, з якого видалено рідку фазу так, що структура стає стиснутою за рахунок сил поверхневого натягування, які діють при видаленні з пор рідини) і набуття постійної ваги (рис. 3.9 д).

Для визначення оптимальної температури та часу сушіння отриманого аквагелю було проведено його ізотермічний термогравіметричний аналіз. Його результати унаочнено на рис. 3.11. Інтервал температур сушіння аквагелю обирно відповідно до наукових даних [121]. Він становить від 60 до

110°C і обумовлений тим, що при температурах понад 60°C спостерігається помітне видалення води з аквагелю, однак сушіння при температурах понад 100°C призводить до зміни його морфології, значно зменшуючи поверхню отриманого силікагелю.

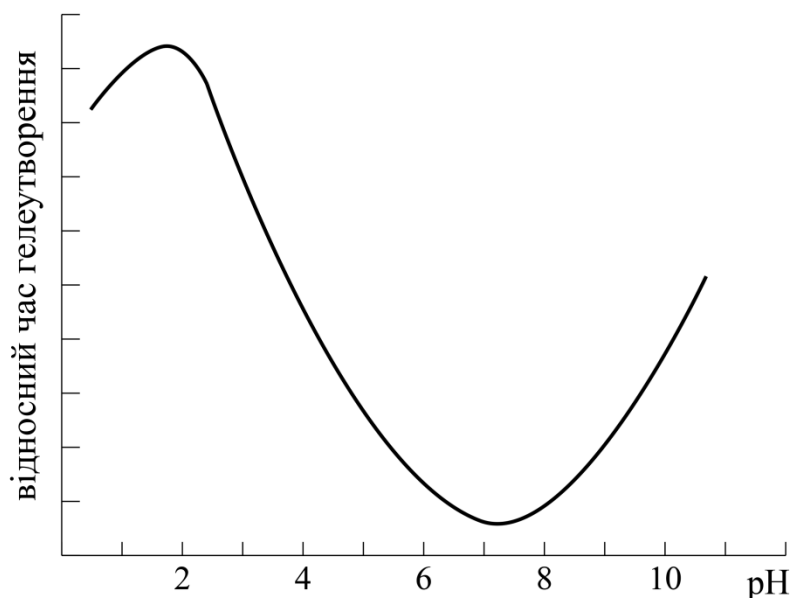


Рисунок 3.10 – Залежність відносного часу гелеутворення при синтезі силікагелю від pH водневого розчину силікату натрію [121]

Відповідно до результатів досліджень установлено, що зі збільшенням температури і часу сушіння втрата ваги за рахунок видалення води та летких компонентів отриманого аквагелю збільшується. Так, при температурах від 60 до 90°C упродовж 180 хв сушіння видалення води і летких компонентів із аквагелю відбувається не повністю, що ускладнює подальшу переробку отриманого продукту. Повне їх видалення можливе при температурах 100–110°C, про що свідчить стабілізація втрати ваги. Причому видалення води з аквагелю при 100°C відбувається впродовж 130–160, а при 110°C – 120–150 хв. Тобто, відповідно до літературних рекомендацій [121; 160] та проведених досліджень, оптимальною температурою сушіння отриманого аквагелю є 100°C і повне видалення води та летких компонентів з нього відбувається впродовж 120–150 хв.

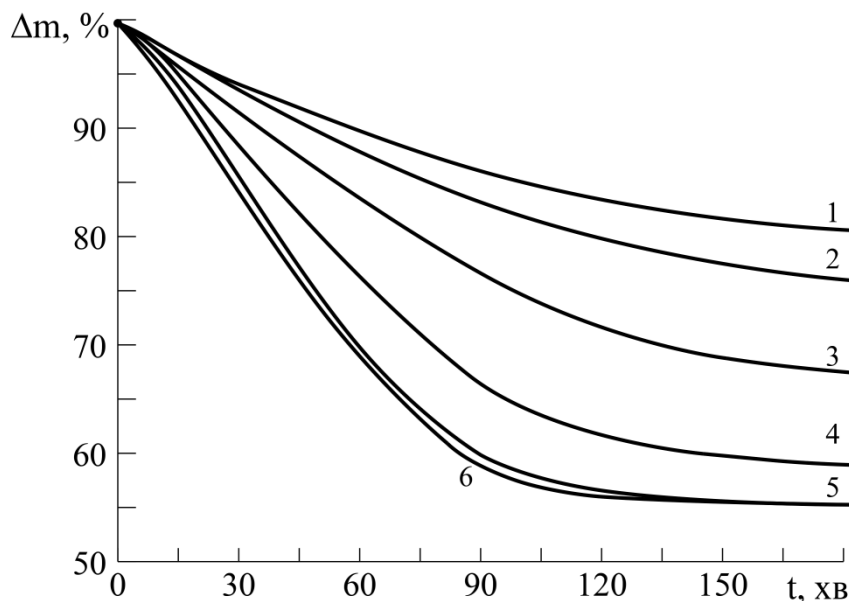
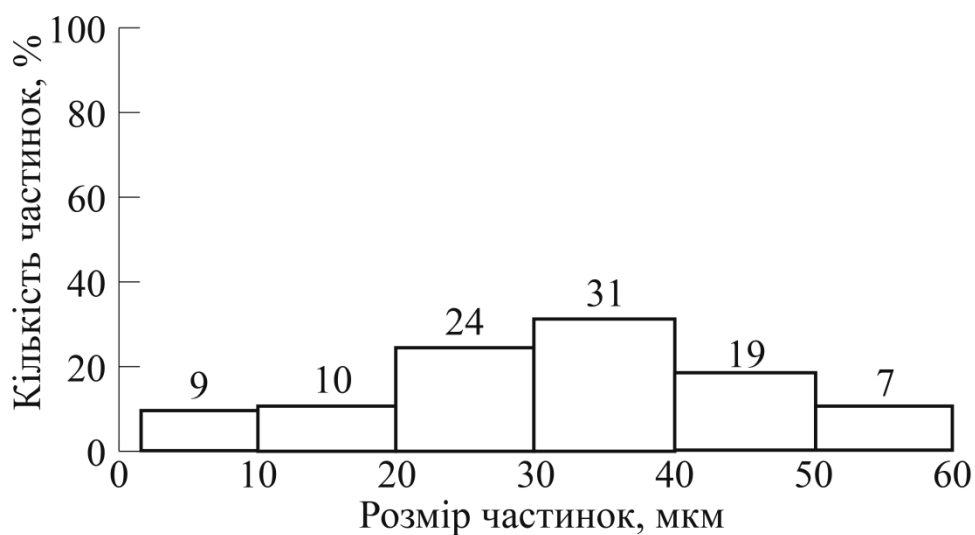


Рисунок 3.11 - Залежності втрати ваги (вологи та летких компонентів) аквагелю від часу (t) сушіння при визначених температурах: 1 – 60°C; 2 – 70°C; 3 – 80°C; 4 – 90°C; 5 – 100°C; 6 – 110°C.

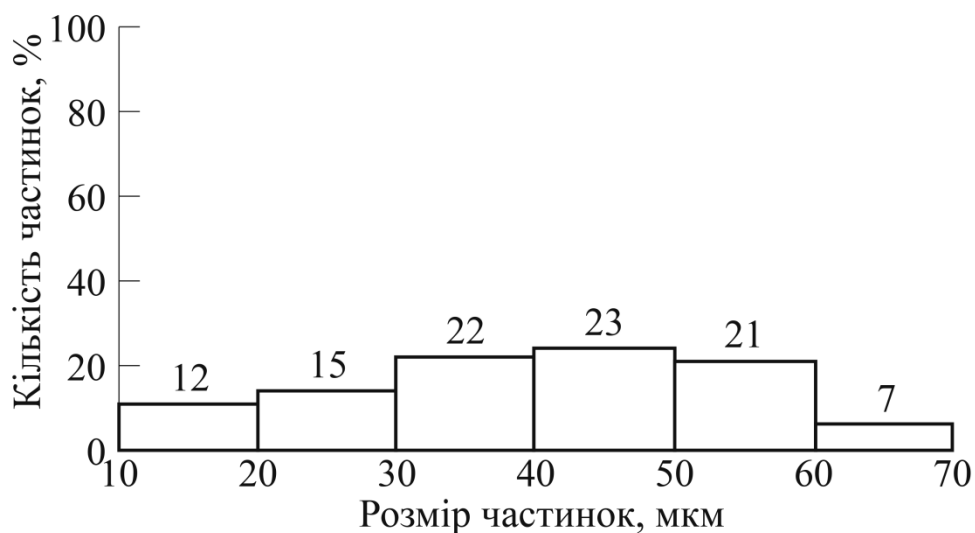
Отриманий після сушіння ксерогель (рис. 3.9 д) подрібнено на дезінтеграторі до мінімально можливих розмірів частинок. На рис. 3.12 подано гістограму розподілу його частинок за розмірами.

Відповідно до досліджень встановлено, що основний розмір частинок подрібненого ксерогелю з фенілоном С1 складає від 20 до 50 мкм, а для матеріалів із фторопластом-4 та ДФСФО – 30–60 мкм.

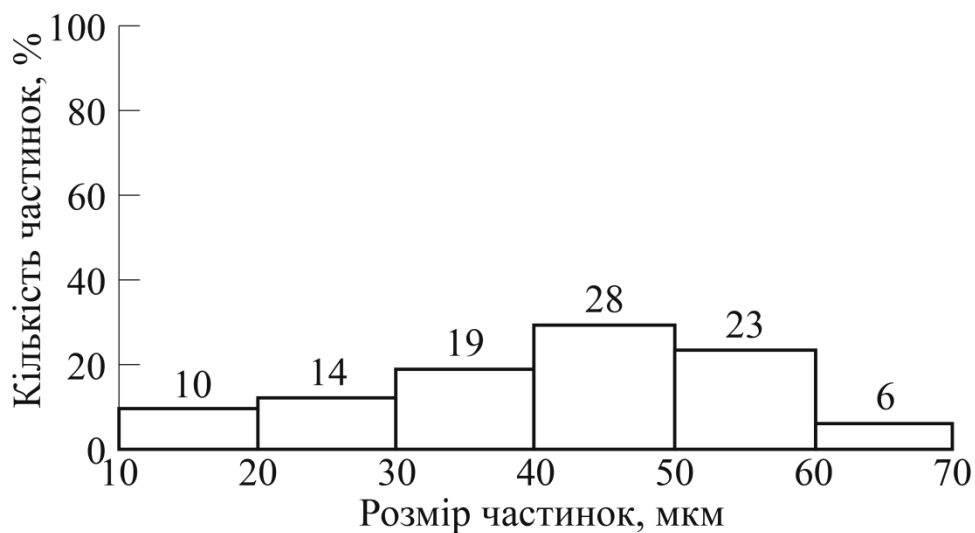
Створений ксерогель являє собою суміш твердих дисперсних частинок полімерів з діоксидом кремнію та побічними продуктами реакції (NaCl та залишки кислоти), які необхідно видалити з нього. Ці продукти добре розчиняються у воді і можуть бути видалені з дисперсної суміші за рахунок взаємодії з нею. Для цього дисперсну систему було промито в дистильованій воді температурою 70°C упродовж 10 хв. Це дозволяє повністю видалити з неї побічні продукти реакції (підтвердженням цього є рентгенографічні дослідження отриманого ксерогелю до та після промивання в дистильованій воді, подані в розділі 2 на рис. 2.8).



а



б



в

Рисунок 3.12 – Гістограми розподілу частинок по розмірах подрібненого ксерогелю у склад якого входить фенілон С1 (а), фторопласт-4 (б) та ДФСФО (в)

Після видалення побічних продуктів реакції (NaCl та залишки кислоти) з ксерогелю він зневоднюється за допомогою підсушування до постійної ваги. Отриманий при цьому продукт (рис. 3.9 е) є готовою двокомпонентною полімерною композицією, яка складається з частинок полімерів (фенілон С1, фторопласт-4, ДФСФО) та силікагелю. Їх мікрофотографії представлено рис. 3.13.

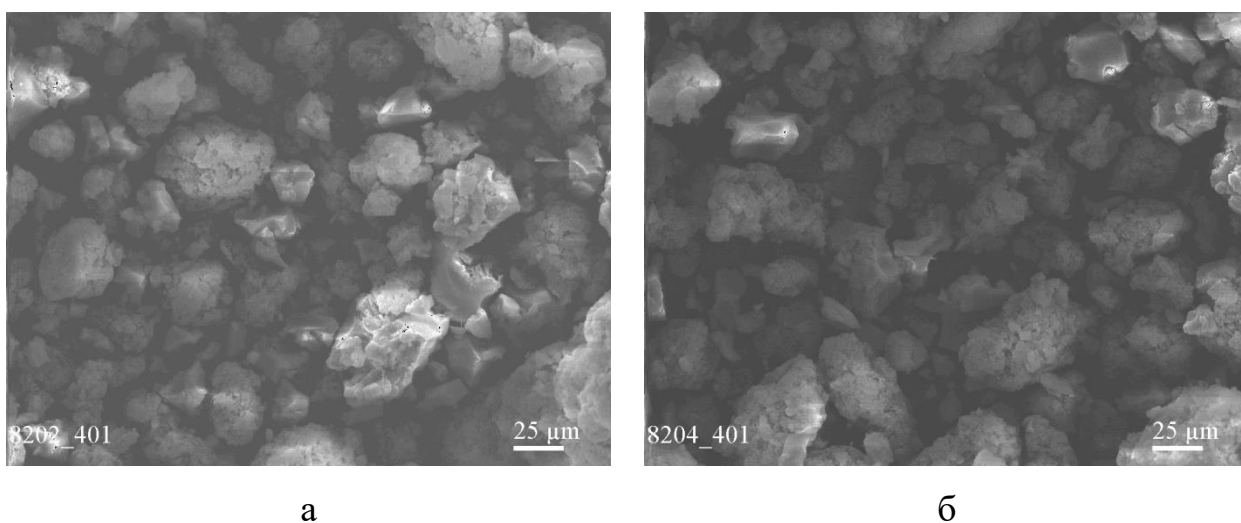


Рисунок 3.13 – Мікрофотографії полімерних композицій отриманих за допомогою суміщення (in situ) їх вихідних компонентів

Подальша переробка отриманих полімерних композицій відбувається відповідно до стандартної технології.

Даний підхід до переробки ПКМ на основі ароматичного поліаміду, фторопласту та фенольної смоли, наповнених силікагелем, дозволяє значно спростити технологію отримання виробів із них за рахунок виключення операції перемішування вихідних компонентів на підготовчому етапі переробки, а відповідно до цього і знизити собівартість виробів з отриманих ПКМ.

Висновки до розділу 3

1 Теоретично обґрунтовано доцільність використання нової ресурсоощадної технології отримання термостійких ПКМ триботехнічного призначення. 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.

2 Розроблено нову технологію отримання полімерних композицій з високою якістю розподілення їх вихідних компонентів на основі фенілона С1, фторопласта-4 та ДФСФО на стадії синтезу силікагелю та визначені її основні технологічні параметри.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ МОРФОЛОГІЇ ТА СТРУКТУРИ ТЕРМОСТІЙКИХ ПКМ

Сучасний розвиток машин та механізмів спричиняє інтенсифікацію їх роботи та збільшення навантажень на основні вузли, що призводить до погіршення їх надійності та довговічності в роботі. Тому розробка нових матеріалів, вироби з яких будуть мати кращий рівень властивостей, ніж наявні та забезпечувати надійну та довговічну роботу сучасних вузлів машин та механізмів є актуальним завданням.

При їх створенні головною метою є покращення властивостей та здешевлення порівняно з наявними. Причому надмолекулярна структура таких матеріалів поруч з їх хімічним складом та будовою на молекулярному рівні помітно впливає на рівень властивостей отриманих з них виробів. Відомо [178], що матеріали з ідеальною чи близькою до ідеальної структурою мають найвищий рівень властивостей. Однак отримати такі структури на даному етапі розвитку науки досить складно.

Структура ПКМ умовно поділяється на молекулярну та надмолекулярну. Молекулярна структура визначається хімічним складом ПКМ та його будовою на молекулярному рівні. Надмолекулярна структура оприявнює спосіб упаковки молекул та наповнювачів у просторово виділених елементах, розміри і форму таких елементів і їх взаємне положення у просторі [179].

Молекулярна структура полімерів та ПКМ на їх основі визначається за допомогою методів спектрального аналізу (фотоелектрична спектрофотометрія, ІЧ спектрометрія, радіоспектроскопія тощо), термічного аналізу (диференційно термічний аналіз, диференційно-сканувальна калориметрія тощо) тощо.

Надмолекулярна структура полімерів та ПКМ на їх основі визначається за допомогою інтегральних, візуальних та інтерференційно-дифракційних методів.

До інтегральних методів належать ті, які засновані на вимірюванні залежностей фізичних властивостей матеріалу від його структури (наприклад, метод вимірювання густини і т.д.). До візуальних належать ті, які дозволяють побачити кожен елемент надмолекулярної структури ПКМ та розрізнити його форму та границі (наприклад, світова й електронна мікроскопія). Інтерференційно-дифракційні методи – це ті, які дозволяють оцінити взаємне положення великої кількості упорядкованих у просторі елементів надмолекулярної структури. До цих методів належить дифракція рентгенівських променів під великими та малими кутами (рентгеноструктурний аналіз), дифракція електронів та нейтронів (електроно- та нейтронографія) та розсіювання світла.

4.1 Теоретичні та експериментальні аспекти взаємодії силікагелю з ароматичним поліамідом

Молекулярна структура об'єктів досліджень: вихідних полімерних матриць (фенілон С1, фторопласт-4, ДФСФО); наповнювача (силікагель); полімерних композиційних матеріалів на їх основі, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*) визначалися за допомогою ІЧ-спектроскопічних досліджень, які дозволяють визначити не тільки якісний склад матеріалів, а і взаємодію елементів у них.

Хімічну взаємодію силікагелю з вибраними полімерними матрицями розглянуто на прикладі ароматичного поліаміду. Так, вона можлива за рахунок утворення водневих зв'язків між реакційноздатними гідроксильними групами на поверхні наповнювача (рис. 4.1) та молекулами полімерної матриці.

У низці робіт [180; 181] описано ПКМ, наповнені силікагелем із підтвердженням їх фізичної або хімічної взаємодії, причому останню раніше визначено лише опосередковано, тобто відштовхуючись від зростання рівня фізико-механічних та теплофізичних властивостей композитів.

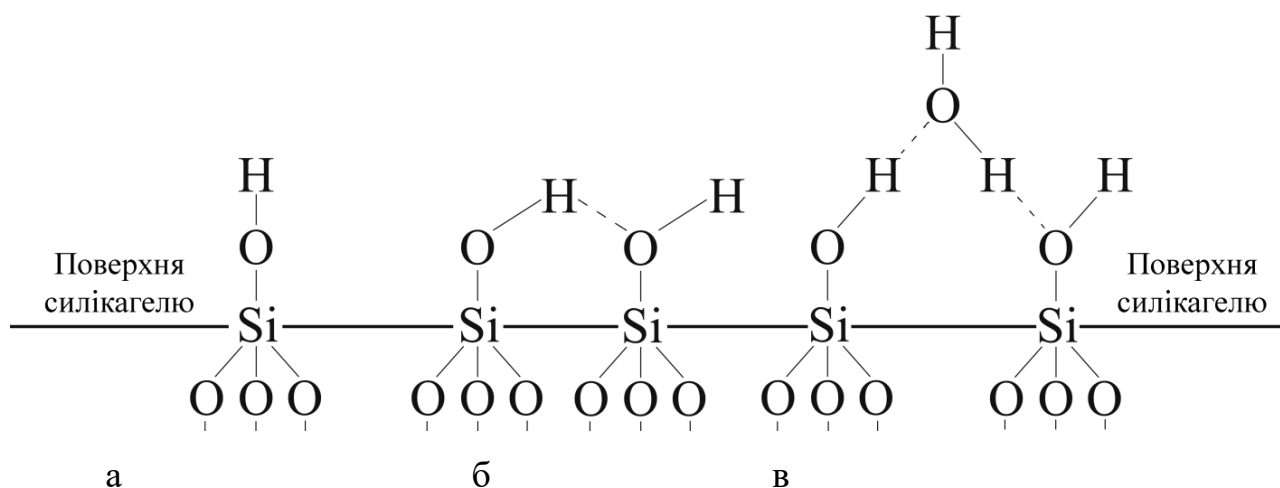


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення поверхні силікагелю з реакційно спроможними гідроксильними групами [121]: а – одиночна вільна; б – суміжна; в – суміжна гідратована

Тому актуальним є пошук теоретичних та експериментальних підтверджень хімічної природи взаємодії силікагелю із ароматичним поліамідом. Для вирішення цієї проблеми необхідно було детально вивчити особливості міжмолекулярних взаємодій, що виникають на рівні окремих ланок макромолекул із застосуванням широких можливостей квантово-хімічних розрахункових методів, а також коливальної спектроскопії.

На початкових етапах дослідження принципового значення набуває питання вибору типових модельних сполук, які б забезпечували можливість адекватного відтворення особливостей будови та міжмолекулярних взаємодій, що виникають у досліджуваних системах, й одночасно характеризувалися такими важливими рисами, як простота та зручність з точки зору проведення квантово-хімічних розрахунків. У цьому випадку першочерговим завданням постає створення таких теоретичних моделей, які б ураховували наявність базових структурних фрагментів макромолекул та характеристичних взаємодій між ними без значної деталізації внутрішньої будови окремих складових супермолекулярних систем. Як свідчать проведені нами раніше дослідження будови полімерних композитів на основі арамідних матриць та наповнювачів [182; 183], структура N-фенілбензаміду цілком

відповідає складу мономерної ланки полімерів такого типу (рис. 4.2 (1)), що ж стосується наповнювача, яким у межах цієї роботи виступав силікагель, кращою модельною сполукою в найпростішому наближенні може слугувати структура складу $H_4[Si_4O_{10}]$ (рис. 4.2 (2)), що являє собою тетрациклічний каркас, побудований із атомів силіцію та кисню, на поверхні якого зосереджено чотири ізольовані одна від одної еквівалентні групи $-OH$.

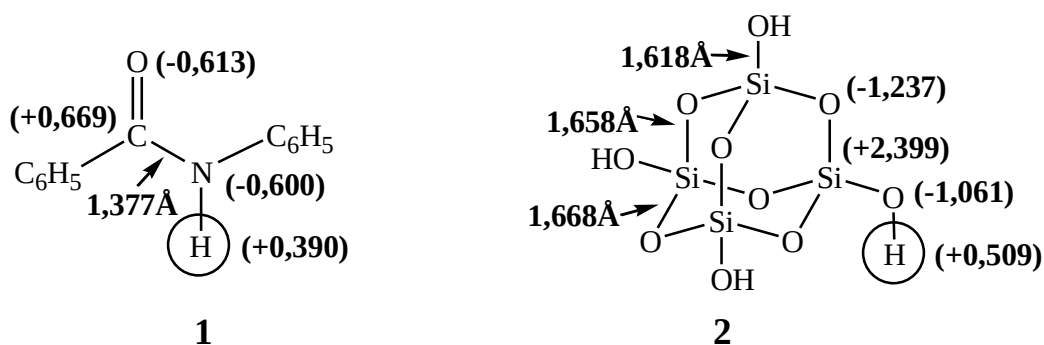


Рисунок 4.2 - Структури модельних сполук із деякими значеннями NBO зарядів на атомах та довжинами зв'язків: 1 - N-фенілбензамід; 2 – діоксид кремнію.

Беручи до уваги аморфний характер силікагелю, для якого характерними є прояви лише елементів локальної симетрії в певних фрагментах структури (кластерах), такий підхід до вибору модифікованої молекулярної моделі, на нашу думку, є виправданим. З іншого боку, кластерний метод є ефективним не лише при моделюванні локалізованих станів, але й численних поверхневих ефектів, які можуть мати принципове значення в умовах активних міжмолекулярних взаємодій [184]. Беручи до уваги усе вищезазначене, із застосуванням трипараметричного гібридного функціоналу густини в наближенні B3LYP/6-311++G(d,p) нами було здійснено оптимізацію геометрії модельних сполук у газовій фазі із одночасним розрахунком відповідних наборів коливальних частот, згідно з якими локалізовані стаціонарні точки було охарактеризовано як мінімуми на поверхні потенційної енергії. Розподіл електронної густини із визначенням

зарядів на атомах досліджуваних структур вивчали у рамках теорії натуральних в'язучих орбіталей (NBO) [185; 186].

Одержані дані викликають значну зацікавленість як з точки зору будови окремих ділянок – структурних фрагментів полімерної матриці фенілону, так і їх взаємодії із силікагелем з можливим утворенням типових водневих зв'язків. Спираючись на це припущення, нами було запропоновано теоретичні моделі, що відтворюють безпосередню взаємодію молекул N-фенілбензаміду із тетрациклічною каркасною структурою складу $H_4[Si_4O_{10}]$.

Розділення рівноважної геометрії димерів на окремі складові з їх подальшою оптимізацією в наближенні B3LYP/6-311++G(d,p) призводило до утворення «ізольованих» структур, які було одержано раніше. Розрахунок коливальних частот для всіх міжмолекулярних комплексів свідчив про відсутність уявних коливань, що дозволило охарактеризувати їх як мінімуми на поверхні потенційної енергії. При оцінюванні енергетичних параметрів локалізованих структур до уваги бралися спеціальні поправки на похибку суперпозиції базисних наборів за процедурою Бойза - Бернарді [187]. Результати розрахунків представлено на рис. 4.3.

Слід відзначити, що на стабілізацію структур (рис. 4.3 (3,4)), поряд зі слабкими взаємодіями електростатичного характеру, найбільше впливають міцні водневі зв'язки, утворені за участю місткової амідної групи та гідроксилу (~77 %), а також атома кисню каркасного фрагменту (~23 %), оцінені у межах AIM теорії Бейдера [188]. 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 поляризувального 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. 4.3 (3,4)) становила не менше 12.0 кДж/моль на користь взаємодій першого типу.

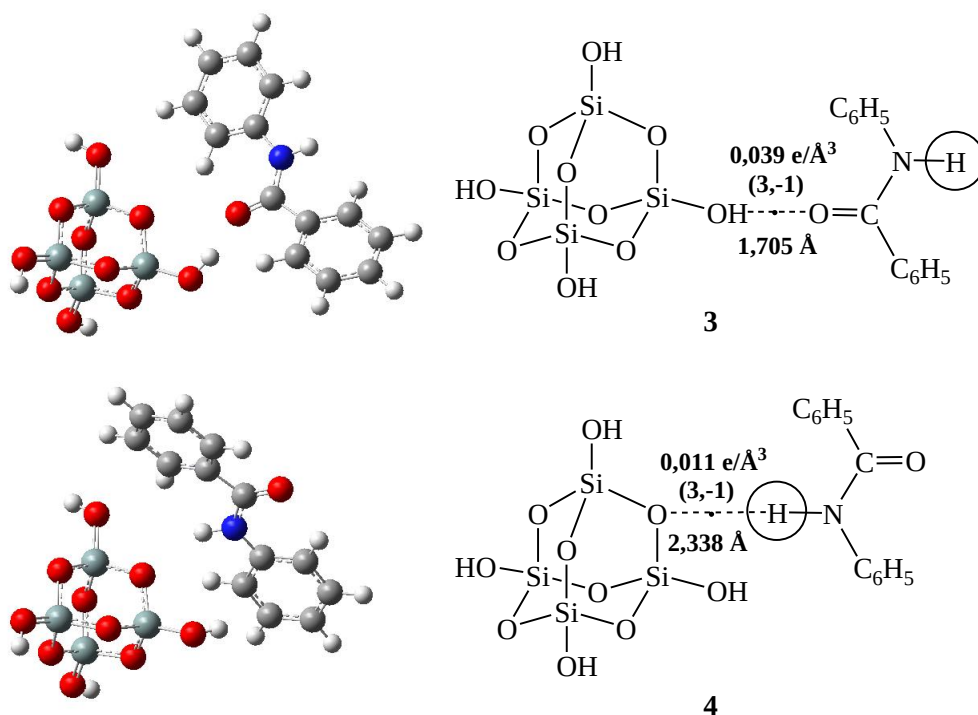


Рисунок 4.3 - Структури молекулярних комплексів у системі «поліамід-силікагель» із деякими типовими водневими зв'язками

Для підтвердження вирішальної ролі ефектів водневого зв'язування у структурі ПКМ нами було здійснено детальний аналіз коливальних спектрів описаних раніше ізолюваних (рис. 4.1 (1,2)) та димеризованих (рис. 4.2 (3,4)) форм з метою їх подальшого зіставлення між собою, а також із експериментальними даними. Останні теоретичні моделі цілком адекватно відображають структурну ситуацію, за якої взаємодіючі молекули поряд зі зв'язаними водневим зв'язком групами ($>C=O$) та ($>NH$) містять також їх незв'язані аналоги. Як відомо, розраховані методами квантової хімії гармонійні коливальні частоти зазвичай є більшими за аналогічні параметри, одержані експериментальним шляхом. При цьому головним джерелом помилок є нехтування ефектами ангармонійності, а також відсутність повноти описання електронних кореляцій у зв'язку із застосуванням обмежених наборів базисних функцій [189]. Для підвищення точності розрахункових даних у їх відтворенні головних спектральних характеристик досліджуваних було використано допоміжні значення масштабувальних

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 [190]. Одержані результати представлено у таблиці 4.1, а також на рисунку 4.4.

За науковими даними [191; 192], структурна ідентифікація аліфатичних поліамідів включає розгляд характеристичних смуг поглинання з надійним віднесенням сигналів в областях 3280, 2900, 1640, 1550 та 1545 cm^{-1} . Аналіз одержаних нами результатів (таблиця 4.1) свідчить про присутність широких смуг при 3267 або 3345 cm^{-1} , які відповідають валентним коливанням зв'язків (NH) амідних груп. В області $\sim 1650 \text{ cm}^{-1}$ знаходиться інтенсивна смуга «Амід I», що є характерною для карбонілу зі значним внеском водневого зв'язування. Дійсно, у випадку розрахованих структур (рис. 4.3 (3,4)) спостерігається помітне зміщення цієї смуги поглинання з 1673 cm^{-1} для «ізольованої» групи ($>\text{C}=\text{O}$) до 1647 cm^{-1} у комплексі із водневим зв'язком. Аналогічне зміщення сигналу $\nu(\text{NH})$ відбувається з 3507 до 3459 cm^{-1} . Зрештою, в області $\sim 1530 \text{ cm}^{-1}$ спостерігається смуга «Амід II», що відповідає валентним коливанням карбон-карбонових зв'язків арильних фрагментів за участю $\delta(\text{NH})$.

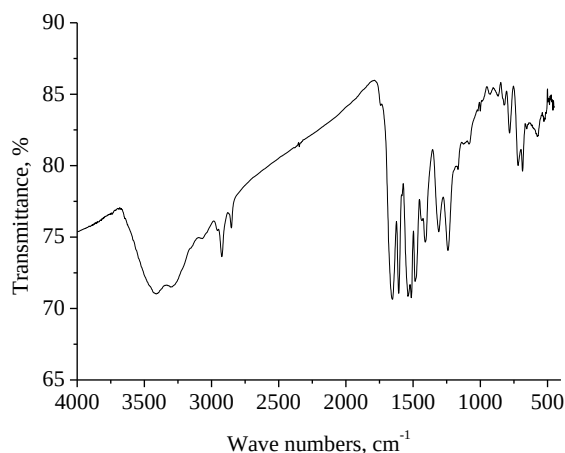
Характеристична смуга «Амід III» спостерігається поблизу 1237 cm^{-1} та відповідає $\nu(\text{CN})$ за участю $\delta(\text{CH})$ бензинових кілець. З цієї точки зору принципового значення набуває також якісна ідентифікація сигналів силікагелю, представлених широкою та інтенсивною смугою в області $\sim 1090 \text{ cm}^{-1}$, а також вузькими смугами поглинання меншої інтенсивності при 780 та 460 cm^{-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.

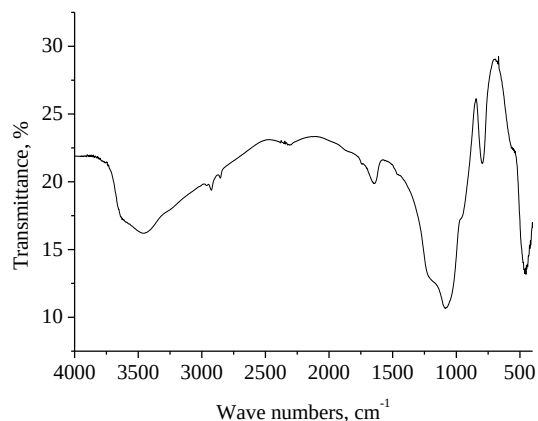
Таблиця 4.1 - Гармонійні коливальні частоти (cm^{-1}), одержані експериментальним шляхом, а також розраховані в наближенні DFT-B3LYP/6-311++G(d,p)

Відносна інтенсивність, форма смуги	Експериментальні дані				Модельна сполука (рисунок 4.3 (3))	Модельна сполука (рисунок 4.3 (4))	Пояснення
	Фенілон C1	Силікагель	85 % фенілон C1 + 15 % силікагель	70 % фенілон C1 + 30 % силікагель			
w., wd.	3405	3460	3410	3419	3788	3790	$\nu(\text{OH})$ of cage fragment or capacity of moisture
	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 $\delta(\text{CH})$ бензольних кілець
v. s., wd.	—	1087	1084	1091	1056	1024	$\nu(\text{SiO})$ of cage fragment
w.	—	796	782	785	781	767	$\delta(\text{OH})$ of cage fragment
	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	$\delta(\text{SiO})$ of cage fragment
a s. – strong; w. – weak; wd. – wide; v. – very; c v – валентні коливання; δ – деформаційні коливання							

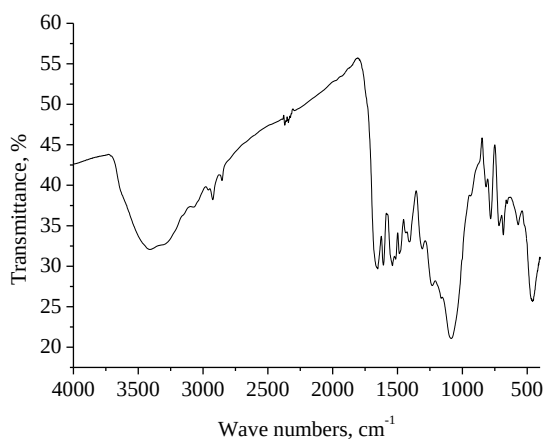
Слід зауважити, що валентні коливання гідроксильних груп також можуть знаходити своє відображення на ділянці спектру $3405\text{--}3419\text{ cm}^{-1}$, яка зазвичай відповідає за присутність слідових кількостей води у досліджуваних зразках полімеру та композитів.



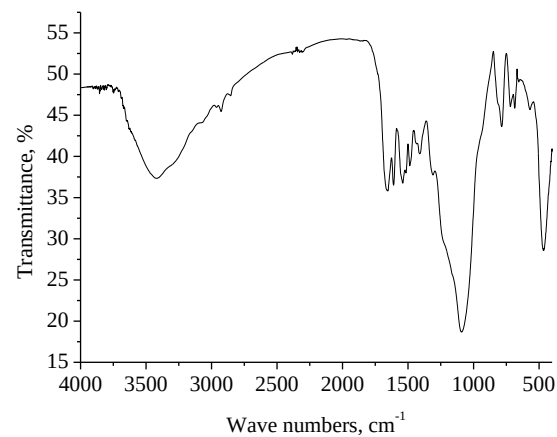
а



б



в



г

Рисунок 4.4- ІЧ-спектри поглинання вихідного фенілону С1 (а), силікагелю (б), а також композитів на їх основі з умістом силікагелю: в – 15 %, г – 30 %.

Таким чином, отримані результати квантово-хімічних розрахункових досліджень теоретично підтверджують наявність хімічної взаємодії між поверхнею силікагелю та 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.

4.2 Вплив технології отримання на морфологію та структуру ПКМ

Однією з основних властивостей, яка описує структуру полімерів та ПКМ на їх основі є густина, що є фізичною величиною, яка визначається для однорідних речовин їхньою вагою в одиниці об'єму, а для неоднорідних – співвідношенням ваги і об'єму, коли останній стягується до точки, в якій вимірюється густина [32].

Розроблені нами ПКМ є неоднорідними речовинами внаслідок того, що вони складаються з мінімум двох компонентів (полімерна матриця та наповнювач). Їх густина залежить від умісту вихідних компонентів та методів отримання полімерних композицій, технології переробки у виробі тощо.

Значення густини неоднорідних речовин суттєво впливають на їх рівень властивостей унаслідок того, що при створенні цих речовин неможливо уникнути мікро- та макродефектів структури, її орієнтації тощо. Відомо [32], що матеріали з більшим значенням густини мають вищий рівень фізико-механічних та теплофізичних властивостей.

Відповідно до цього викликає зацікавленість визначення густини розроблених ПКМ та дослідження впливу вмісту вихідних компонентів та технологій отримання полімерних композицій на неї. На рис. 4.5 представлено результати досліджень густини матеріалів на основі фенілону С1 та силікагелю, отриманими за різними технологіями порівняно з адитивними їх значеннями.

Відповідно до результатів досліджень встановлено, що зі збільшенням концентрації силікагелю в полімерній матриці густина збільшується з 1330 до 1550-1750 кг/м³ залежно від технології отримання ПКМ. Це пояснюється суміщенням матеріалів із різними значеннями густини (полімерна матриця – 1330 кг/м³, наповнювач – 1890 кг/м³). Причому слід відзначити, що значення густин отриманих ПКМ менші, ніж адитивні. Це пояснюється тим, що в отриманих ПКМ присутні мікро- та макродефекти структури. Слід

відзначити, що матеріали отримано за допомогою суміщення (in situ) мають на 5–10 % вищі значення густини, ніж отримані за стандартною технологією, що свідчить про більш суцільну структуру з меншою кількістю макро- та мікродефектів.

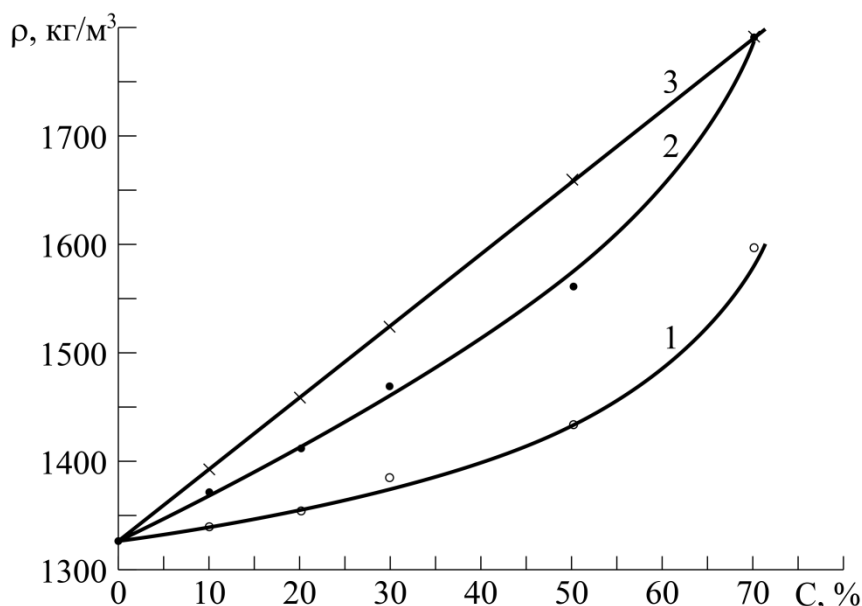


Рисунок 4.5 – Залежність експериментальної (1,2) та адитивної (3) густини ρ від умісту силікагелю у ПКМ на основі фенілону С1, отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Результати досліджень густини матеріалів на основі фторопласту-4 та силікагелю, отримані за різними технологіями порівняно з адитивними їх значеннями представлено на рис. 4.6.

Установлено, що зі збільшенням концентрації силікагелю в полімерні матриці густина отриманого ПКМ зменшується з 2150 до 1830–1930 кг/м³ залежно від технології отримання ПКМ. Це пояснюється суміщенням матеріалів із різними значеннями густини. Для вихідної полімерної матриці значення густини становить 2150 кг/м³, а для наповнювача – 1890 кг/м³. Слід відзначити, що значення густин ПКМ на основі фторопласту менші, ніж адитивні. Це пояснюється тим, що в отриманих ПКМ присутні мікро- та

макродефекти структури. Слід відзначити, що матеріали, отримані за допомогою суміщення (in situ), мають на 5–7 % вищі значення густини, ніж отримані за стандартною технологією, що свідчить про більш суцільну структуру з меншою кількістю дефектів.

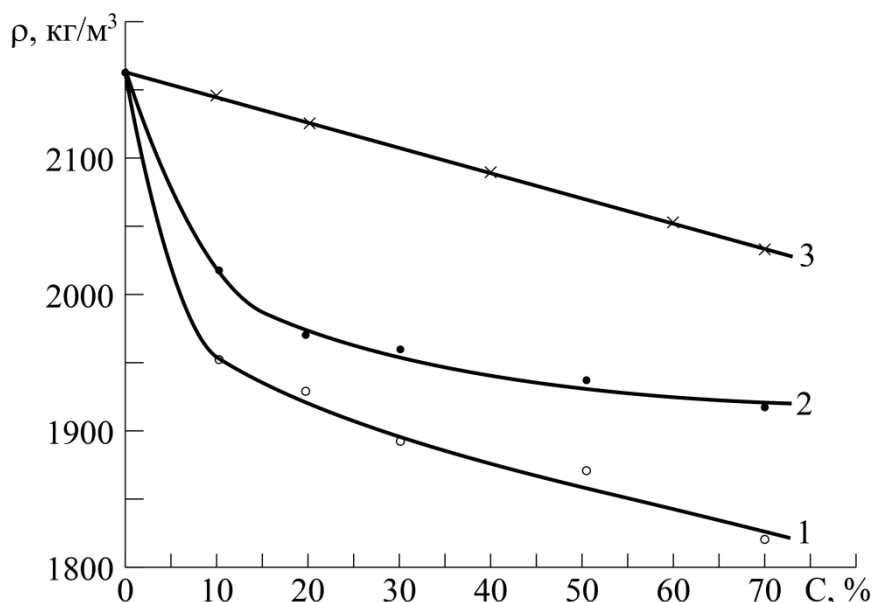


Рисунок 4.6 – Залежність експериментальної (1,2) та адитивної (3) густини ρ від умісту силікагелю у ПКМ на основі фторопласту-4, отримані за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

На рис. 4.7 представлено результати досліджень густини матеріалів на основі ДФСФО та силікагелю, отриманих за різними технологіями порівняно з адитивними їх значеннями.

За результатами досліджень встановлено, що зі збільшенням умісту силікагелю в полімерній матриці густина збільшується з 1450 до 1600–2000 кг/м³ залежно від способу отримання ПКМ. Це пояснюється суміщенням матеріалів із різними значеннями густини. Для вихідної полімерної матриці значення густини становить 1450 кг/м³, а для наповнювача – 1890 кг/м³. Слід відзначити, що значення густин ПКМ на основі ДФСФО, отримані за стандартною технологією, менші, ніж адитивні.

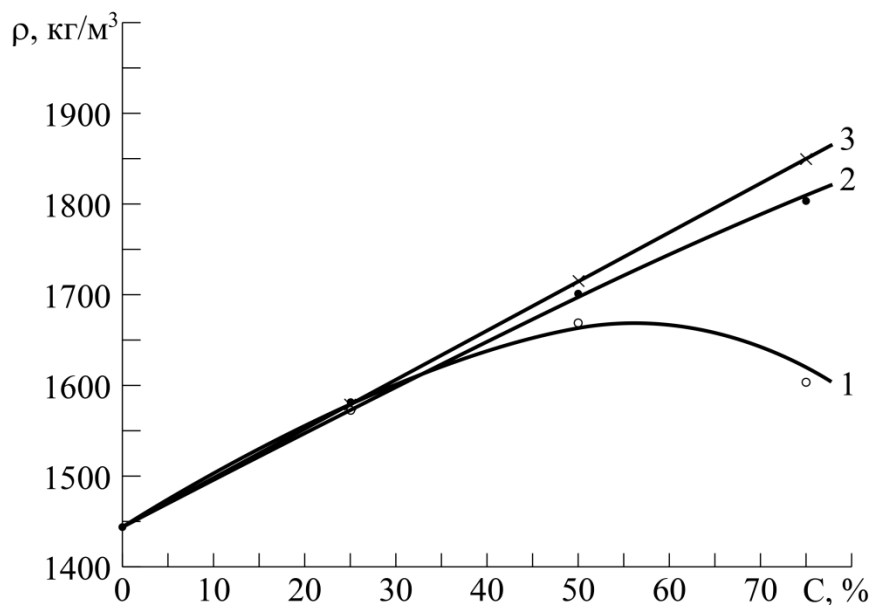


Рисунок 4.7 – Залежність експериментальної (1,2) й адитивної (3) густини (ρ) від умісту силікагелю у ПКМ на основі ДФСФО, отримані за стандартною технологією (1) та за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Причому при вмісту наповнювача від 0 до 25 % їх значення практично співпадають, а при подальшому збільшенні вмісту наповнювача спостерігаються зменшення значень щільності у ПКМ порівняно з адитивними. Це пояснюється наявністю мікрODEфектів структури у ПКМ, кількість яких зі збільшенням умісту наповнювача в полімері збільшується. Значення густини ПКМ, отриманих з використанням суміщення (*in situ*) знаходяться близько до адитивної щільності для цих матеріалів. Це пояснюється не тільки зменшенням мікро- та макродефектів структури ПКМ, а і зміною їх структури.

Відповідно до проведених досліджень, введення силікагелю у термостійкі полімерні матриці призводить до підвищення чи зменшення густини отриманих ПКМ залежно від полімерної основи, відповідно до значень густини полімерів та силікагелю. Слід відзначити, що всі ПКМ, отримані за допомогою суміщення (*in situ*) мають більші значення густини, ніж отримані за стандартною технологією. 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 іншого боку, більші значення густини ПКМ, отримані за допомогою суміщення (*in situ*), пояснюються їхніми структурними перетвореннями порівняно з матеріалами, отриманими за стандартною технологією. Для підтвердження даного припущення було проведено електронно-мікроскопічні дослідження морфології поверхонь сколів вихідних полімерів та отриманих ПКМ на їх основі.

На мікрофотографіях (рис. 4.8, а,б) унаочнено загальний вигляд наповнювача силікагелю та поверхні сколу вихідного полімеру фенілону С1. А на рис. 4.8 (б,в) представлено ПКМ на основі фенілону та силікагелю, отримані за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*). Відповідно до них поверхня сколу вихідної полімерної матриці (рис. 4.8 б) відрізняється від аналогічної для ПКМ на її основі (рис. 4.8, в,г), що є наслідком впливу наповнювача на структуру отриманих матеріалів. При порівнянні поверхонь сколів ПКМ, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*) (рис. 4.8, в,г), встановлено значні відмінності, як у характері поверхні сколу ПКМ, так і у зовнішньому вигляді наповнювача.

Поверхня сколу ПКМ отриманих за допомогою суміщення (*in situ*) (рис. 4.8, г) відрізняється від отриманих за стандартною технологією (рис. 4.8, в) більш крихким характером сколу, що характерно для речовин з високим ступнем кристалічності.

Для підтвердження цього припущення було проведено рентгенографічні дослідження ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та силікагелю, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (рис. 4.9).

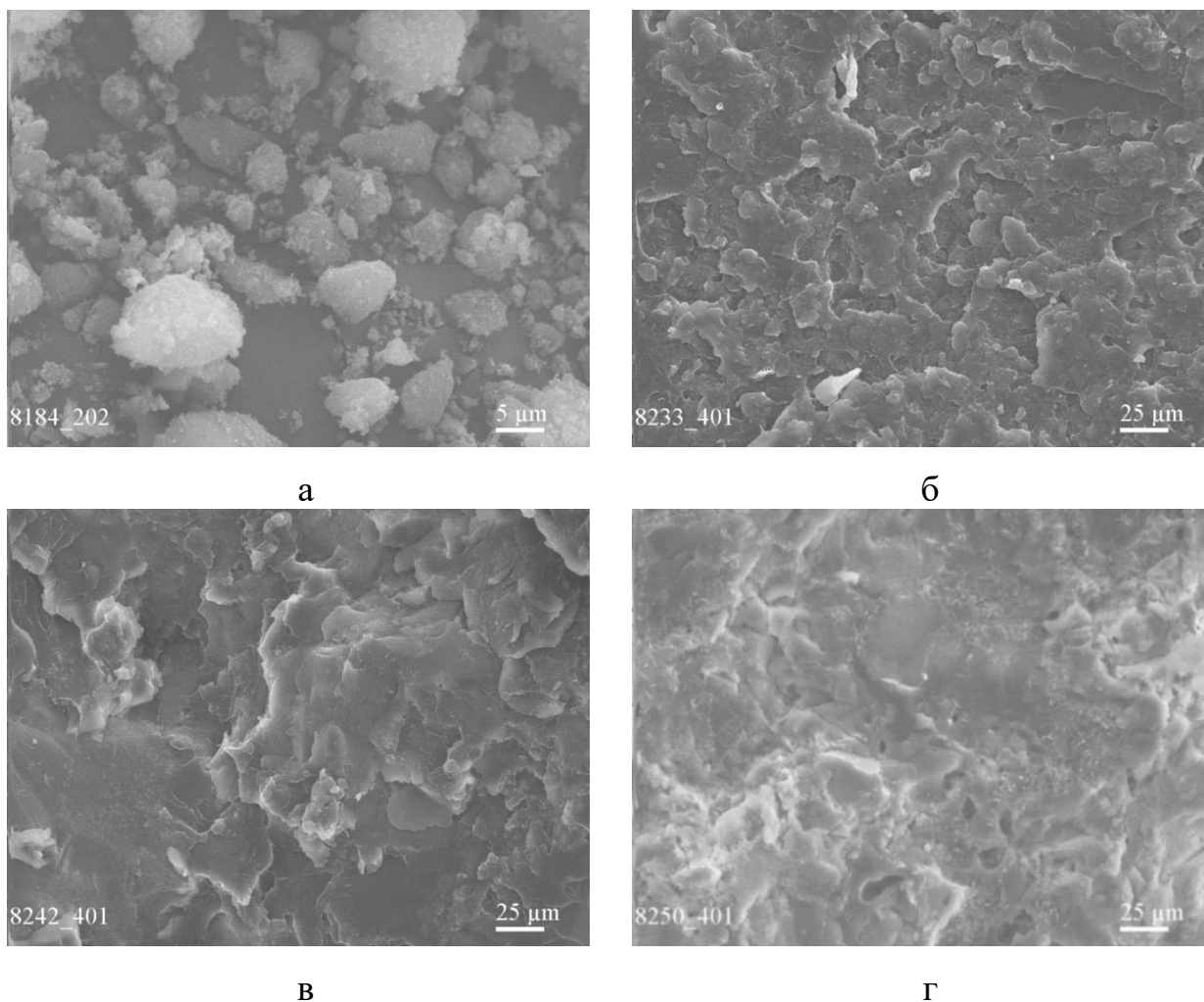


Рисунок 4.8 – Мікрофотографії силікагелю (а) та поверхонь сколів (б,в,г) вихідного фенілону С1 (б) та ПКМ на основі фенілону С1 та силікагелю, отриманих за стандартною технологією (в) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (г)

Рентгенограми досліджених ПКМ, отримані за стандартною технологією та за допомогою суміщення (in situ) мають подібний характер з деякими відмінностями. На них зображені 2 яскраво виражених аморфних гало в області кутів Вульфа-Брегга (2Θ) 15-30 та 40-60, які показують 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 довідником [192], робимо висновок, що пік в області кутів Вульфа-Брегга (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 и α -кристобалит).

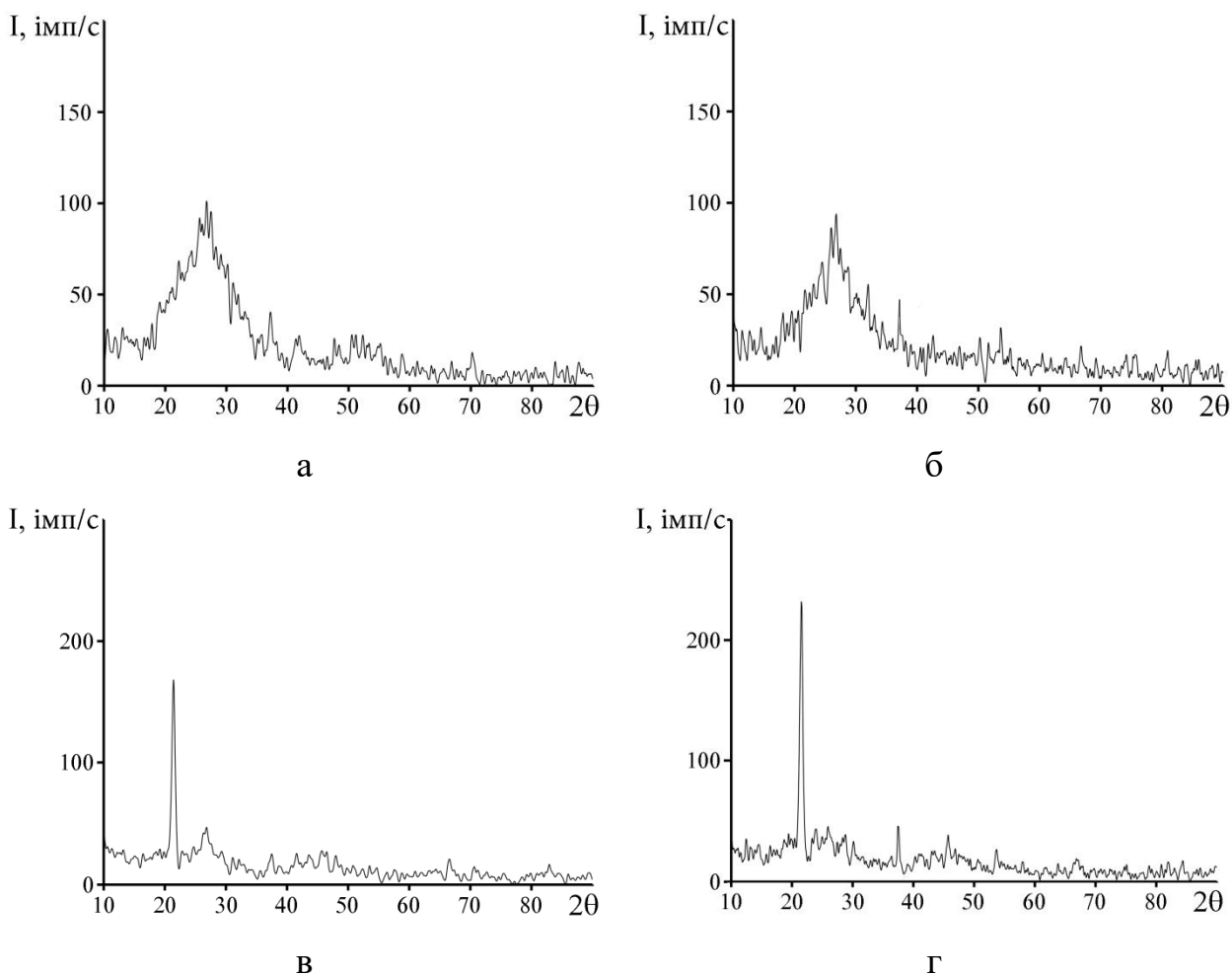


Рисунок 4.9 – Рентгенограми ПКМ на основі фенілону С1 (а,б), фторопласту-4 (в,г) та силікагелю, отриманих за стандартною технологією (а,в) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (б,г)

Слід відзначити, що на рентгенограмах ПКМ, отриманих з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів, спостерігаються більш інтенсивні піки в діапазоні кутів Вульфа-Брегга (2Θ) 20–30. Це

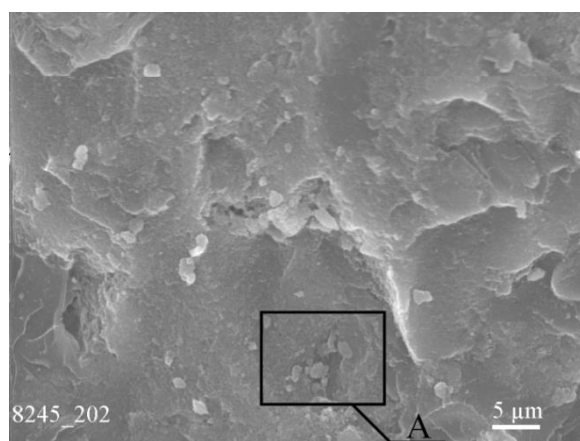
свідчить про більші значення співвідношення кристалічної та аморфної фаз цих ПКМ порівняно з матеріалами отриманими за стандартною технологією.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що піки, характерні для наповнювача силікагелю у ПКМ й отримані за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*), відрізняються інтенсивністю, що свідчить про різницю у структурі та морфології силікагелю у ПКМ, отриманих за різними технологіями. Тому викликає зацікавленість більш докладно дослідити морфологію наповнювача силікагелю у ПКМ, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*) їх вихідних компонентів.

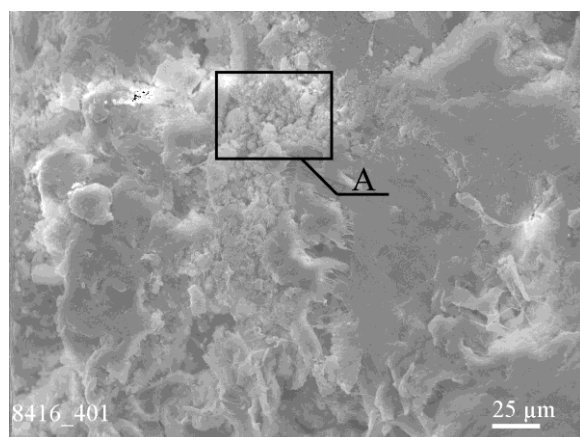
Для цього з використанням електронної мікроскопії було отримано мікрофотографії поверхонь сколу ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО, наповнених силікагелем та отриманих за стандартною технологією і за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (рис. 4.10–4.11).

Відповідно до знімків ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4 (рис. 4.10 а,б) видно, що наповнювач має сферичну форму та за своєю морфологією дуже подібний до вихідного силікагелю (див. рис. 4.8, а).

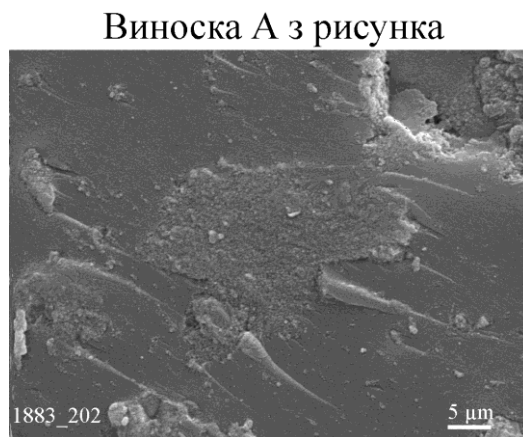
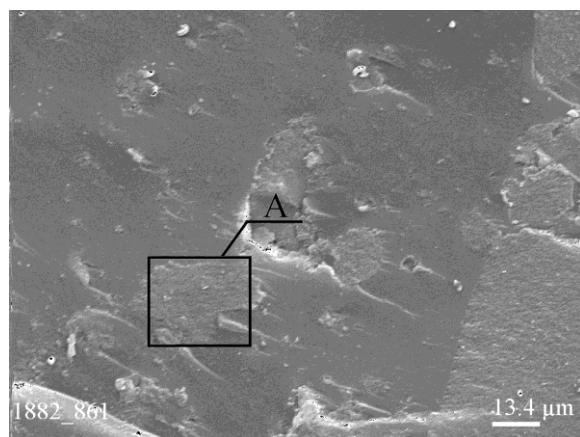
Для ПКМ на основі ДФСФО (рис. 4.10, в) в форму наповнювача не вдалося встановити внаслідок когезійного характеру руйнування ПКМ, на відміну від адгезійного для ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4. Тобто, відповідно до проведених досліджень, можна стверджувати, що при стандартній технології отримання ПКМ не відбувається суттєвої зміни морфології та структури наповнювача силікагелю.



а



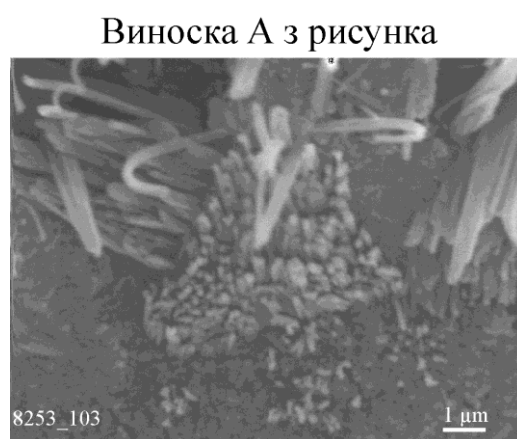
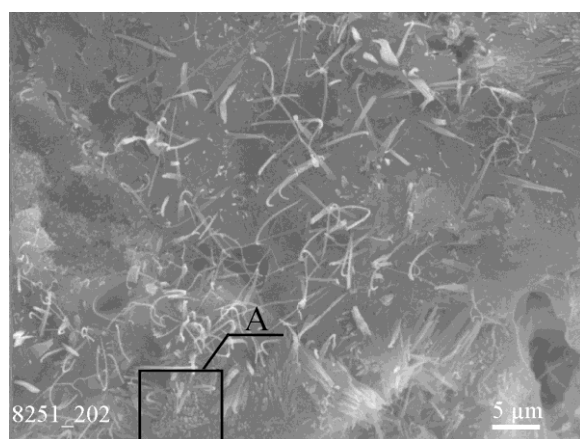
б



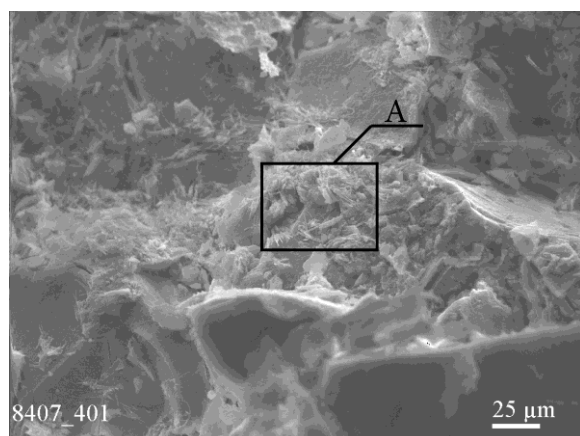
в

Рисунок 4.10 – Мікрофотографії поверхонь сколу ПКМ на основі фенілону С1 (а), фторопласту-4 (б) та ДФСФО (в), наповнених силікагелем та отриманих за стандартною технологією

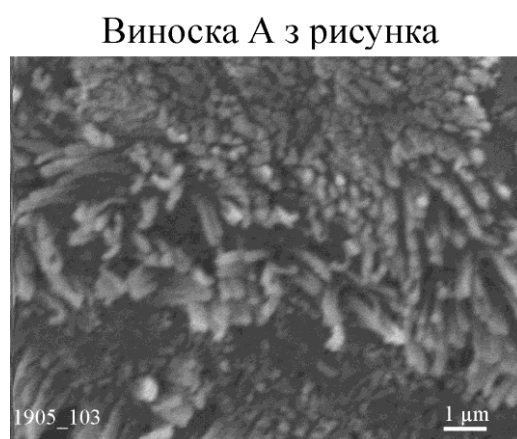
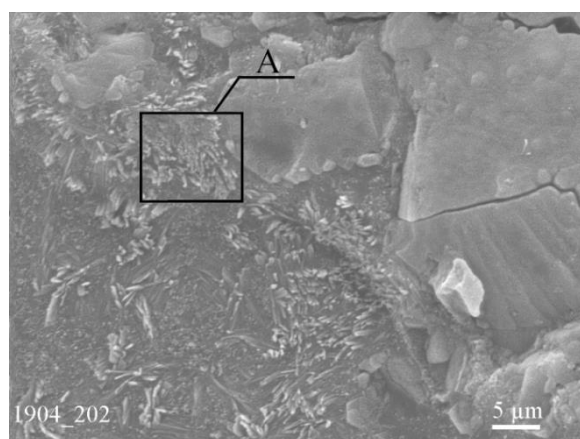
На рис. 4.11 подано мікрофотографії сколів ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО, наповнених силікагелем та отриманих за допомогою суміщення (in situ).



а



б



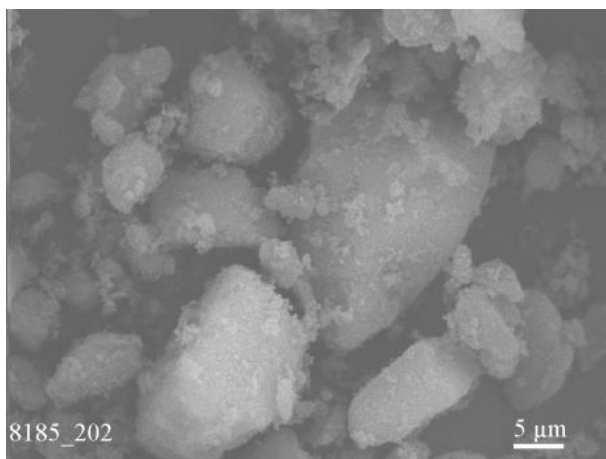
в

Рисунок 4.11 – Мікрофотографії поверхонь сколу ПКМ на основі фенілону С1 (а), фторопласту-4 (б) та ДФСФО (в), наповнені силікагелем та отримані з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій

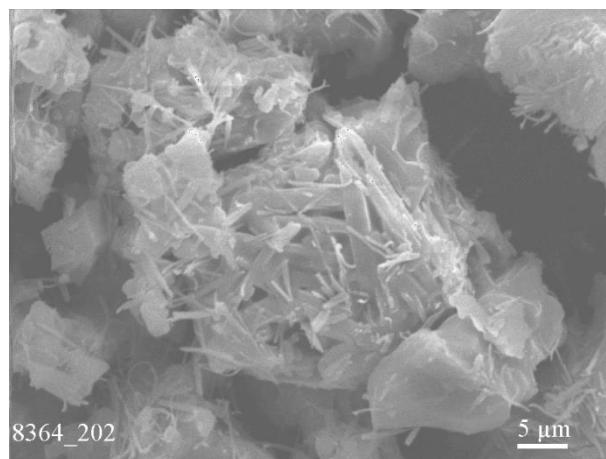
З фотографій видно, що структура наповнювача значно відрізняється від вихідного силікагелю (рис. 4.8, а). Він має як звичайну сферичну, так і ламілярно-стрічкову структуру (виноска А) на відміну від сферичної для наповнювача у полімерах, отриманих за стандартною технологією.

Для остаточного визначення форми та морфології наповнювача, у ПКМ, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій, проведено операцію видалення полімерної матриці з отриманих композитів. Це можна зробити за рахунок хімічного або термічного методу сепарації полімерної матриці та наповнювача, які дозволяють позбутися органічної полімерної матриці, залишаючи при цьому неорганічний наповнювач. Хімічний метод полягає в обробці розроблених ПКМ різними розчинниками, при яких вдається повністю видалити органічну полімерну матрицю і залишити тільки неорганічний нерозчинний у вибраних матеріалах наповнювач. Термічний метод полягає у високотемпературній обробці отриманих ПКМ, при якій органічна полімерна матриця повністю розкладається до елементарних газоподібних сполук, які видаляються з матеріалу і залишається тільки неорганічний наповнювач.

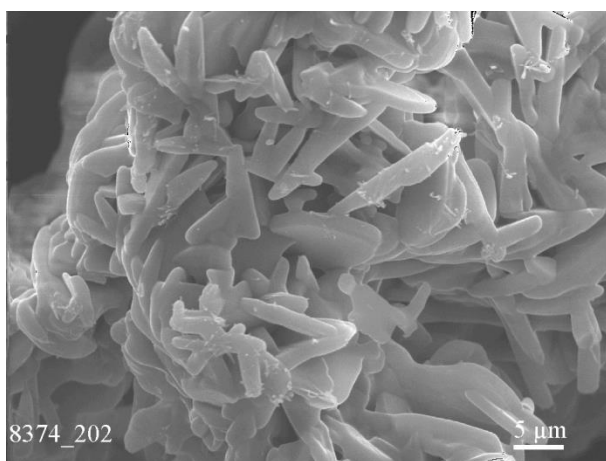
Для розроблених ПКМ використання хімічного методу сепарації полімерної матриці та наповнювача є не досить доцільним, оскільки вибрані полімерні матриці досить стійкі до дії різних розчинників. Так, ароматичний поліамід та фторопласт-4 розчиняються тільки в концентрованих кислотах та деяких органічних розчинниках, а фенольна смола знаходиться у зшитому нерозчинному та неплавкому вигляді. Тому для видалення полімерної матриці зі складу розроблених ПКМ було використано термічний метод, який полягає у прокалюванні (при 1000°C впродовж 1 години). Мікрофотографії неорганічного наповнювача отримано після прокалювання ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4і подано на рис. 4.12.



а



б



в

Рисунок 4.12 – 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 силікагель 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-стручкову структуру. Тобто наповнювач після синтезу в присутності полімерних частинок являє собою суміш діоксидів кремнію різної морфології та структури, які суттєво впливають на структуру отриманих ПКМ, що буде безпосередньо визначати рівень властивостей деталей вироблених з них.

Для підтвердження цього факту було проведено рентгенофазові дослідження отриманих наповнювачів після термічного прокалювання. Їх результати унаочнено на рис. 4.13.

Аналіз рентгенограм (рис. 4.13) свідчить, що силікагель, отриманий за технологією суміщення (*in situ*) на поверхні частинок полімерів за структурою відрізняється від вихідного і характеризується більш високим ступенем кристалічності. Слід відмітити, що досліджені матеріали мають досить високий ступень кристалічності, на відміну від вихідного аморфного наповнювача, що є наслідком їх кристалізації в процесі прокалювання в інтервалі температур від 650–750°C [193].

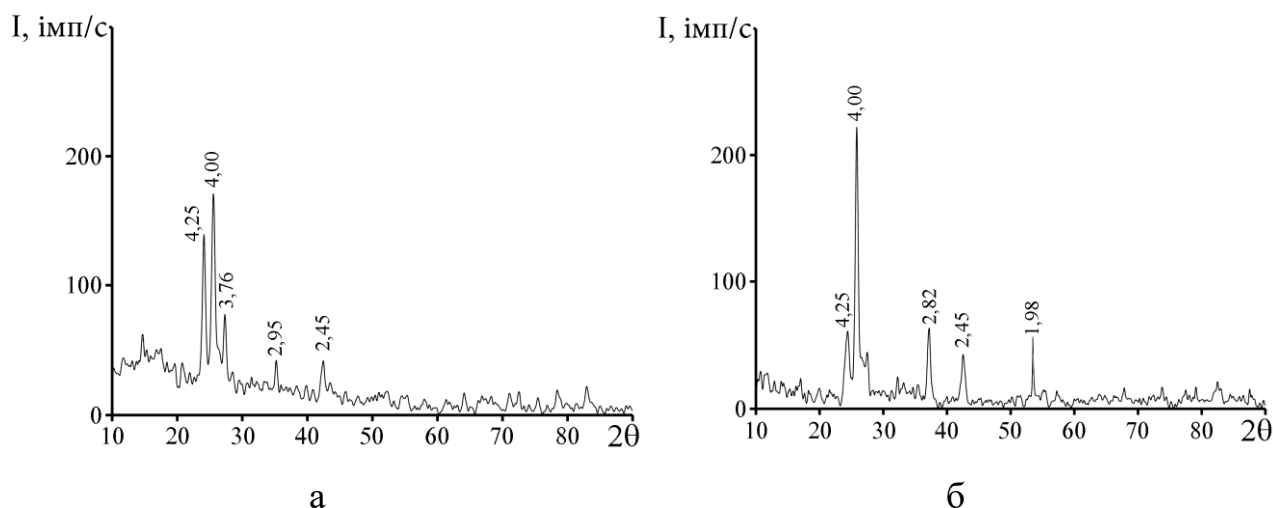


Рисунок 4.13- Рентгенограми силікагелю, отриманого в результаті прокалювання ПКМ на основі фторопласту-4 та силикагелю, створених за стандартною технологією (а) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (б)

Рентгенограми наповнювача, отриманого в результаті прокалювання полімерних композицій на основі фторопласту-4 та силикагелю, створених за стандартною технологією та за допомогою 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 – Бреґґа (2θ) 22–28 та 41–43. Причому, інтенсивність піків у

наповнювача, отриманого з полімерної композиції, створеної за допомогою суміщення (*in situ*) (рис. 4.13, б), значно вища, ніж у силікагелю з полімерної композиції, отриманої за стандартною технологією. Також слід відзначити наявність нових піків в області кутів Вульфа-Брегга (2Θ) 38–39 та 53–54 у силікагелю з матеріалу, отриманого за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій. Всі ці піки відповідають визначеним міжплощинним відстаням у кристалах та кристалоподібних структурах окремих речовин. І разом з їх інтенсивністю можна провести якісний аналіз з метою визначення речовин та з'єднань, які входять в об'єкти досліджень. Відповідно до результатів проведеного рентгенографічного аналізу силікагель отримано в результаті прокалювання 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 [195; 196], 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 -тридіміту. Для силікагелю, отриманого в результаті прокалювання полімерних композицій на основі фторопласту-4, створених за допомогою (*in-situ*) суміщення, 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, які подібні за хімічною будовою та відрізняються різною кристалічною структурою, а відповідно до цього і рівнем властивостей.

Зміна морфології силікагелю також пов'язана з особливостями його структуроутворення при синтезі в присутності дисперсного полімеру. Та обумовлена умовами висушування отриманого гелю, в якому в хаотичному

порядку знаходяться частинки полімерів. Так, по мірі висушування отриманого продукту відбувається його значне усадження, яке призводить до формування частинок наповнювача як в об'ємі гелю, так і на поверхні частинок полімерів у вигляді тонких шарів гелю. Подальше сушіння отриманої системи призводить до остаточного формування сферичних частинок наповнювача та розтріскування шарів гелю на поверхні полімерних частинок з утворенням ламілярно-стрічкової структури наповнювача. Створення подібної структури силікагелю на інертній поверхні було експериментально доведено в роботі [194]. Схему формування аквагелю при синтезі силікагелю без та в присутності частинок полімерів подано на рис. 4.14.

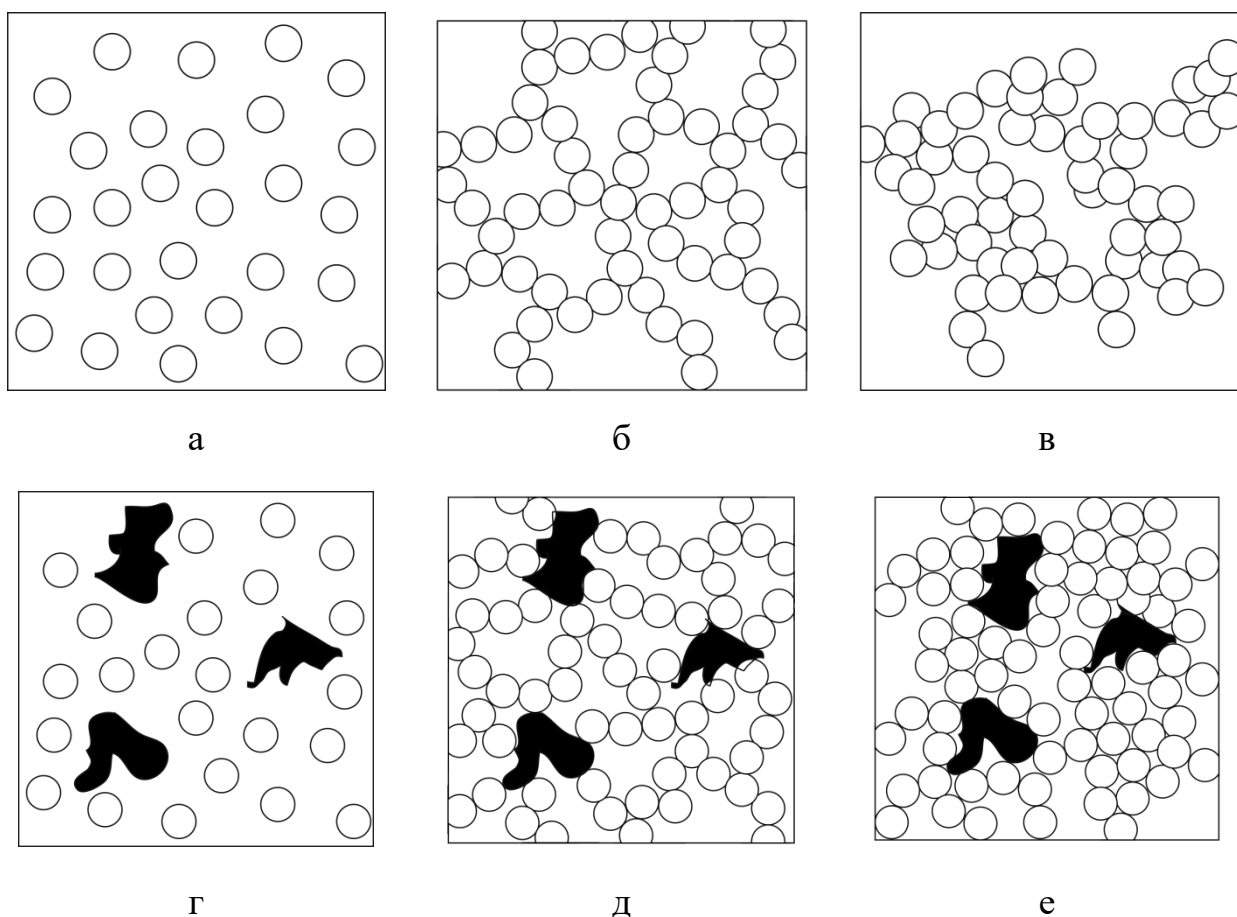


Рисунок 4.14 - Схема формування аквагелю при синтезі силікагелю без (а,б,в) та в присутності частинок полімеру (г, д, е): а, г – реакційне середовище (наприклад, водневий розчин силікату натрію); б, д – сітка сформованого аквагелю; в, г – висушений аквагель (ксерогель)

Відповідно до теорії, формування гелю при створенні силікагелю відбувається за схемою, поданою на рис. 4.14 (а, б, в). У початковий період діоксид кремнію хаотично розподілений по всьому об'єму реакційного середовища (рис. 4.14, а). При його поступовому підкисленні частинки діоксиду кремнію структуруються і при створенні аквагелю формують об'ємну сітку стрічкоподібних ланцюгів (рис. 4.14, б). Після видалення з аквагелю вологи за рахунок його значного усадження стрічкоподібні ланцюги деформуючись змінюють свою форму на сферо подібні (рис. 4.14, в). Це і є основним чинником при формуванні сфероподібних частинок вихідного силікагелю.

При введенні частинок полімерів у реакційне середовище формування гелю при створенні силікагелю відбувається за іншою схемою (рис. 4.14, г, д, е). У початковий період частинки полімерів та діоксид кремнію хаотично розподілені по всьому об'єму реакційного середовища (рис. 4.14, г). Під час формування аквагелю вони структуруються, створюючи об'ємну сітку стрічкоподібних ланцюгів із частинками полімеру, які, очевидно, є центрами структуроутворення аквагелю (рис. 4.14, д). Після випаровування вологи з отриманої системи (рис. 4.14, е) стрічкоподібні ланцюги за рахунок усадження створюють як сфероподібну структуру (у місцях віддалених від частинок полімеру), так і ламілярно-стрічкову (охоплюючи поверхню полімерних частинок).

У нашому випадку доведення створення ламілярно-стрічкової структури наповнювача при його синтезі в присутності полімерів досить складне, оскільки частинки полімерів мають досить невеликий розмір та складний рельєф поверхні. Тому для ілюстрації цього процесу в якості полімерної поверхні було обрано пласку скляну поверхню на яку нанесли тонкий шар отриманого гелю і після цього проведено його висушування. Отримані результати показано на рис. 4.15.

Як можна побачити з мікрофотографій, поступове формування наповнювача на пласкій скляній поверхні відбувається за рахунок його

усадження, яке призводить до втрати суцільності гелю при його когезійному руйнуванні. Остаточна форма частинок наповнювача, які створюються на плоскій скляній поверхні, нагадує плоскі ламелі, у яких у тривимірному просторі два розміри, що описують площину частинки, значно більші, ніж розмір, що описує її товщину. Створення стрічкової структури, напевно, пов'язано із тим, що поверхня реальної полімерної частинки має досить складний рельєф, який сприяє частковій зміні форми ламелі наповнювача на стрічки.

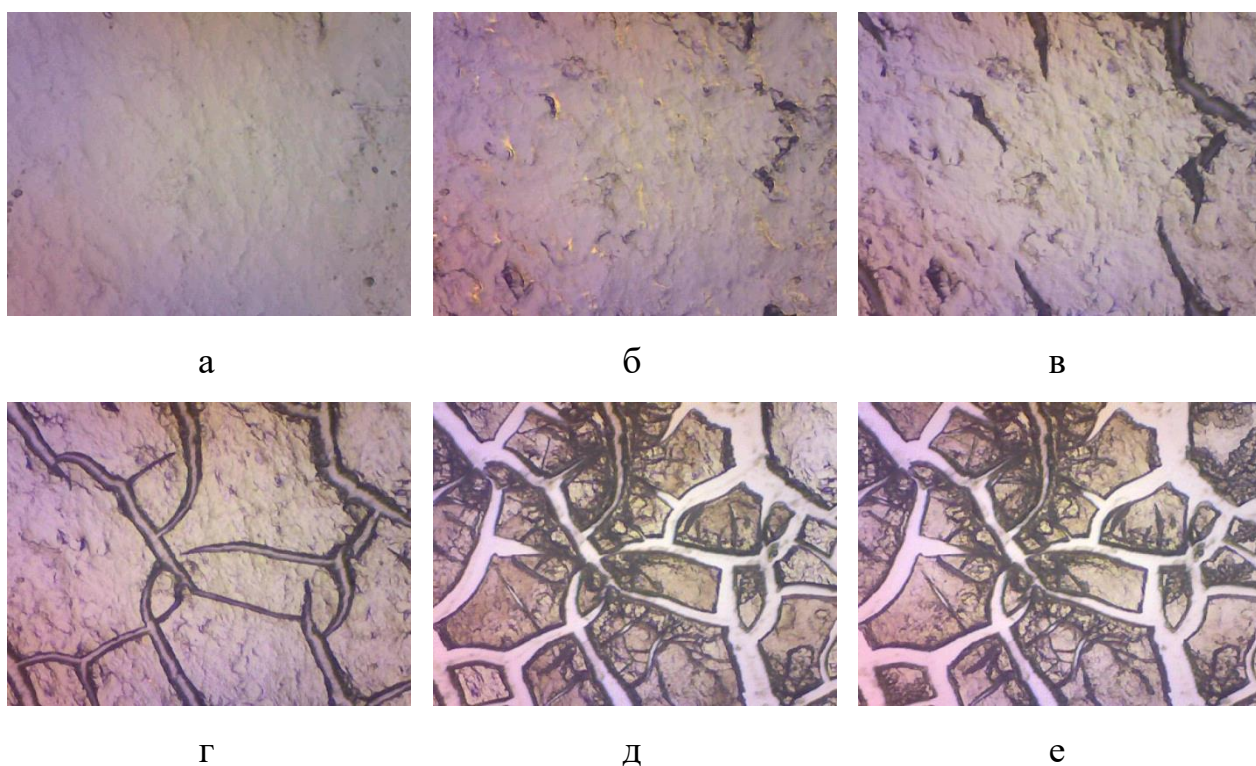


Рисунок 4.15 – Процес створення наповнювача з гелю на плоскій скляній поверхні при витримці його визначений час (хв): а – 0; б – 10; в – 20; г – 30; д – 40; е – 60. Мікрофотографії отримано зі збільшенням у 100 разів

Висновки до розділу 4

1 За допомогою квантово-хімічних розрахункових методів теоретично встановлено, що взаємодія силікагелю з термостійким полімером має хімічний характер і відбувається за рахунок створення водневих зв'язків між «силанольними» групами на поверхні наповнювача з реакційноспроможними атомами полімеру. Адекватність теоретичних розрахунків експериментально доведено за допомогою методу ІК-спектроскопії.

2 Установлено закономірності зміни густини розроблених термостійких ПКМ від концентрації наповнювача та технології отримання полімерних композицій. Виявлено, що ПКМ, отримані за допомогою суміщення *in situ*, мають більші значення густини, ніж стандартно отримані, що пояснюється зменшенням мікро- та макродефектів у їх структурі.

3 Визначено структурні зміни у ПКМ, отриманих за допомогою (*in-situ*) суміщення, порівняно із стандартно отриманими, які полягають у підвищенні упорядкованості їх структурних елементів за рахунок зміни морфології полімерної матриці та наповнювача.

4 Установлено, що морфологія наповнювача у ПКМ, отриманих за допомогою (*in-situ*) суміщення відрізняється від стандартного силікагелю. Так, у цих матеріалах він має, як звичайну для силікагелю сферичну, так і ламілярно-стрічкову морфологію, що пояснюється особливостями його синтезу в присутності дрібнодисперсних частинок полімерів.

5 Доведено, що наповнювач у ПКМ, отриманих за допомогою (*in-situ*) суміщення, має структурні відмінності від стандартно отриманого силікагелю. Так, він має більш упорядковану структуру з умістом різної кількості поліморфних модифікацій діоксиду кремнію, а саме α -кварцу, α -кристобаліту та α -тридиміту, і подібні за хімічною будовою, але відрізняються різною кристалічною структурою.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕРОБКИ ТЕРМОСТІЙКИХ ПКМ

Переробка полімерів та полімерних композиційних матеріалів у виробі являє собою сукупність різних процесів, за допомогою яких вихідний полімер та ПКМ на його основі перетворюється у вироби з визначеними експлуатаційними властивостями [197–199].

Є багато технологій переробки у виробі полімерних матеріалів, вибір яких визначається як конструктивними особливостями та умовами експлуатації, технологічними властивостями матеріалів, що переробляються, а також деякими економічними чинниками (обсяг, вартість тощо). У загальному випадку більшість технологій переробки полімерів та ПКМ на їх основі у виробі відбувається з формування виробів із в'язкотекучого та вискоеластичного стану (лиття під тиском, екструзія, пресування, каландрування, вакуумформування, пневмоформування). Також використовуються технології формування виробів із розчинів і дисперсій полімерів, поливу тощо. У низці випадків виготовлення виробів відбувається при суміщенні деяких технологій переробки [200; 201].

Переробка полімерів та ПКМ на їх основі у виробі у більшості випадків складається з трьох етапів: підготовчий, основний та завершальний [129; 200].

На підготовчому етапі відбуваються операції, пов'язані із отриманням напівфабрикатів, заготовок та покращенням технологічних властивостей перероблюваних матеріалів і включають у себе брикетування прес-порошків, сушіння, попереднє підігрівання тощо.

На основному етапі здійснюється операція пресування за заздалегідь визначеною методикою й охолодження готових виробів.

Завершальний етап пов'язаний із наданням готовим виробам визначеного зовнішнього вигляду. Він включає в себе операції механічної

обробки, зварювання чи склеювання, нанесення декоративних покриттів тощо.

5.1 Підготовчий етап переробки термостійких ПКМ у вироби

5.1.1 Визначення оптимального часу перемішування та якості розподілення силікагелю у полімерних композиціях на основі фенілону С1, фторопласту-4 таДФСФО

Вибрані термостійкі полімерні матриці (ароматичний поліамід, фторопласт та фенольна смола) та наповнювач (силікагель) являють собою дисперсні порошки, які на підготовчому етапі переробки суміщаються за допомогою механічного чи фізико-хімічного методів та брикетуються для більш зручної подальшої переробки [202; 203].

Операція суміщення вихідних компонентів полімерної суміші є однією з основних при отриманні виробів із ПКМ, тому що від якості суміщення вихідних компонентів композиції залежить рівень їх властивостей [204]. Відомо, що однією з основних характеристик, які визначають якість суміщення вихідних компонентів полімерних композицій, є їхня рівномірність розподілу. Тому викликає інтерес визначення основних технологічних параметрів суміщення та впливу методів суміщення вихідних компонентів ПКМ на рівномірність їхнього розподілу.

Механічне суміщення вихідних компонентів розроблених полімерних композицій полягає в їх перемішуванні на швидкохідних механічних мішалках. Унаслідок того, що перемішування в них проходить із використанням відцентрової сили, найвищу якість розподілу вихідних компонентів полімерних композицій можливо досягти при перемішуванні частинок з близькими значеннями розмірів та густини. Частинки використаних нами полімерів мають основні розміри від 20–60 мкм, а наповнювач від 5–10 мкм. При цьому густина полімерів змінюється від 1,2 до

2,2 г/см³, а густина наповнювача дорівнює 1,8–1,9 г/см³. Відповідно до цього можна зробити висновок, що вибрані нами полімери та наповнювач будуть добре розподілятися при механічному перемішуванні.

При механічному суміщенні вихідних компонентів полімерної композиції основний вплив на рівномірність їх розподілу має ефективність перемішувального пристрою (яка характеризує якість проведення процесу перемішування) й інтенсивність перемішування (визначається часом, необхідним для якісного перемішування) [174].

До найбільш ефективних мішалок для суміщення досліджених дисперсних матеріалів належать апарати із швидкохідними механічними мішалками із складною формою лопатей [205]. Мішалки даного типу відрізняються високою ефективністю при перемішуванні дисперсних матеріалів розмірами 10–100 мкм за короткий термін часу.

Інтенсивність перемішування на механічних мішалках визначається часом перемішування, який є основним технологічним параметром при проведенні процесу суміщення вихідних компонентів полімерних композицій.

Оптимальний час перемішування досліджених полімерних композицій на даних мішалках визначався відповідно до значень їх коефіцієнтів неоднорідності, дані для розрахунку яких було отримано за допомогою термічного прокалювання зразків готових полімерних композицій. На рис. 5.1 унаочнено результати цих досліджень.

Виходячи із проведених досліджень можна побачити, що для всіх досліджених матеріалів зі збільшенням часу перемішування з 0 до 150 секунд відбувається зменшення коефіцієнта неоднорідності, що свідчить про суттєве підвищення якості перемішування полімерних композицій. Слід відзначити, що для всіх досліджених композицій у початковий період з 0 до 90 с відбувається різке зменшення коефіцієнта неоднорідності, що свідчить про високу інтенсивність процесу перемішування в цей період. У завершальний період з 90 до 150 с, спостерігається його стабілізація, що свідчить про

досягнення максимально можливої якості перемішування досліджених полімерних композицій на використаній лабораторній мішалці. Подальше збільшення часу перемішування (понад 150 с) не буде суттєво впливати на значення коефіцієнта неоднорідності, тобто продовження процесу перемішування довше, ніж визначений час, не дозволяє значно покращити якість розподілу наповнювачів у полімерах і не є недоцільним.

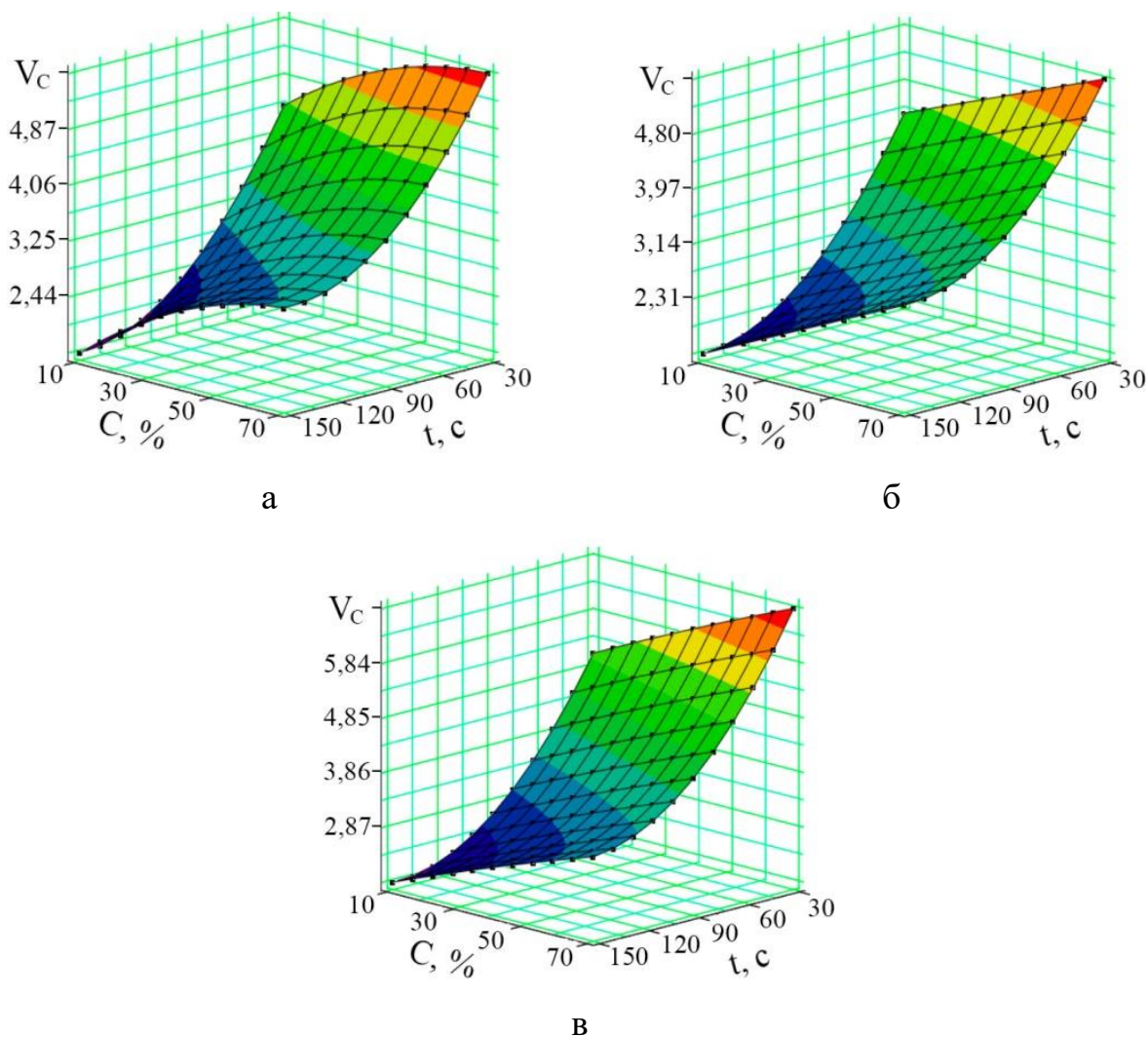


Рисунок 5.1- Залежності коефіцієнта неоднорідності V_C полімерних композицій, отриманих механічним суміщенням вихідних компонентів, від часу перемішування t та вмісту C силікагелю в композиції на основі фенілона С1 (а), фторопласту-4 (б) і ДФСФО (в)

Слід відзначити, що для всіх досліджених полімерних композицій спостерігається досить висока якість перемішування. Так, при концентраціях

наповнювача до 40 % для полімерних композицій на основі ароматичного поліаміду, фторопласту та фенольної смоли коефіцієнт неоднорідності складає від 2 до 4,5, що відповідає добрій якості змішування. При підвищенні вмісту наповнювача до 80 % коефіцієнт неоднорідності для всіх полімерних композицій збільшується до 5–6.

За результатами досліджень було отримано математичні залежності [206], які описують вплив часу перемішування та концентрації наповнювача у полімерній композиції на основі ароматичного поліаміду (1), фторопласту (2) та фенольної смоли (3) на коефіцієнт неоднорідності полімерних композицій.

$$V_C = 1,988 \times 10^{-4} \cdot t^2 - 3,172 \times 10^{-4} \cdot C^2 + 2,564 \times 10^{-5} \cdot t \cdot C - 0,06 \cdot t + 0,045 \cdot C + 5,631 \quad (5.1)$$

$$V_C = 1,896 \times 10^{-4} \cdot t^2 - 2,589 \times 10^{-6} \cdot C^2 + 2,95 \times 10^{-5} \cdot t \cdot C - 0,058 \cdot t + 0,021 \cdot C + 5,683 \quad (5.2)$$

$$V_C = 2,303 \times 10^{-4} \cdot t^2 - 4,112 \times 10^{-5} \cdot C^2 - 4,86 \times 10^{-5} \cdot t \cdot C - 0,068 \cdot t + 0,034 \cdot C + 6,586 \quad (5.3)$$

Отримані формули значно спрощують процес вибору оптимального часу перемішування досліджених полімерних композицій відповідно до значень їх коефіцієнтів неоднорідності.

Відповідно до проведених досліджень визначено оптимальний час змішування для отримання полімерних композицій на основі ароматичного поліаміду, фторопласту та фенольної смоли з силікагелем залежно від умісту наповнювача у полімері складає від 90 до 150 с. При менших значеннях часу перемішування якість розподілення наповнювача в полімері не є високою, а при більших значеннях часу перемішування вона практично не зростає, що свідчить про досягнення максимально можливої якості перемішування компонентів досліджених полімерних композицій на використаній лабораторній мішалці. Тобто можна стверджувати, що за допомогою механічного суміщення, при оптимальних значеннях часу перемішування, можна отримати високу якість розподілу вихідних компонентів досліджених полімерних композицій.

Використання даного методу механічного суміщення вихідних компонентів полімерних композицій є досить енергоємним і суттєво підвищує собівартість готового виробу з розроблених термостійких ПКМ. І тому актуальним є спрощення чи вилучення операції механічного суміщення полімерів з наповнювачами. Це можливо за рахунок використання фізико-хімічного методу суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій, що дозволяє відмовитися від операції механічного суміщення й отримати готові полімерні композиції на основі термостійких полімерів та силікагелю на стадії синтезу наповнювача [207; 208]. Це значно зменшить собівартість готових виробів із розроблених термостійких ПКМ. Викликає зацікавленість дослідження рівномірності розподілу вихідних компонентів полімерних композицій, отриманих за цим методом.

При використанні суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій якість їх розподілу не залежить від часу перемішування і визначається фізико-хімічними процесами, які проходять при суміщенні вихідних компонентів композицій. Розраховується вона також відповідно до значень коефіцієнта неоднорідності полімерної композиції. Результати експериментальних досліджень для знаходження коефіцієнтів неоднорідності полімерних композицій залежно від умісту наповнювача представлено на рис. 5.2.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що зі збільшенням вмісту наповнювача коефіцієнт неоднорідності полімерних композицій збільшується. Причому його значення не перевищують 3,0. Це значення відповідає добрій якості змішування вихідних компонентів полімерних композицій.

При порівнянні коефіцієнтів неоднорідності полімерних композицій, отриманих за допомогою механічного та фізико-хімічного (*in-situ*) суміщення встановлено, що останні мають значно менші значення цього параметра, що є свідченням більш якісного розподілу вихідних компонентів полімерних композицій. Це відбувається за рахунок взаємодії на молекулярному рівні

дрібнодисперсних частинок вихідних термостійких полімерів з наповнювачем при його синтезі.

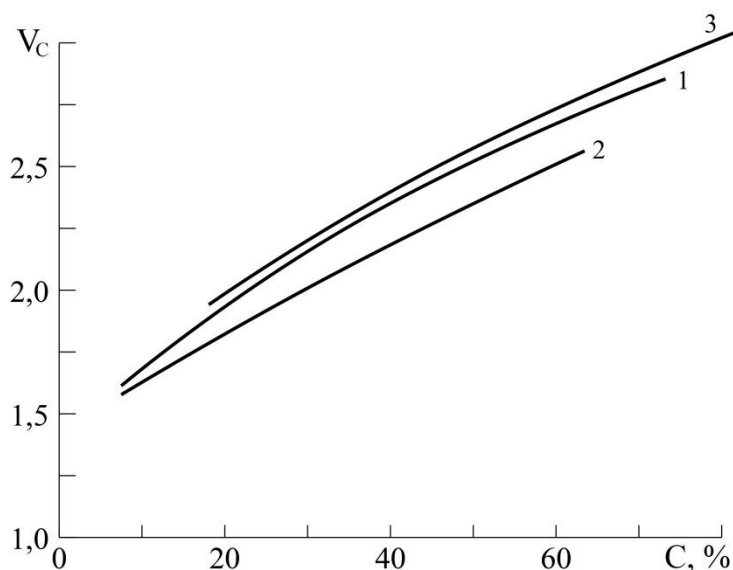
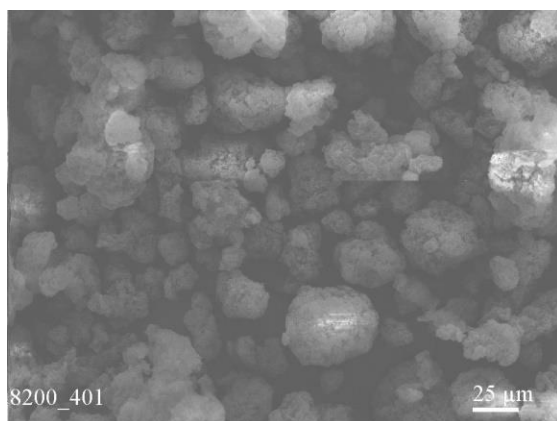


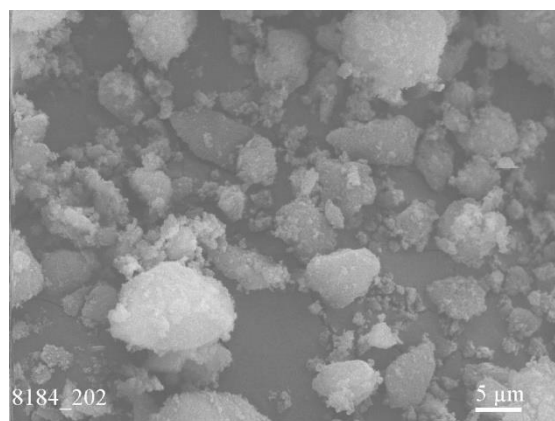
Рисунок 5.2 - Залежності коефіцієнта неоднорідності V_c полімерних композицій, отриманих з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів від умісту C силікагелю в композиції на основі фенілона С1 (1), фторопласту-4 (2) і ДФСФО (3)

Відповідно до проведених досліджень можна зробити висновок, що використання як механічного, так і фізико-хімічного методів суміщення вихідних компонентів досліджених полімерних композицій дозволяють отримувати досить високу якість розподілу наповнювача в полімерних композиціях, що додатково підтверджується даними електронної мікроскопії (рис. 5.3).

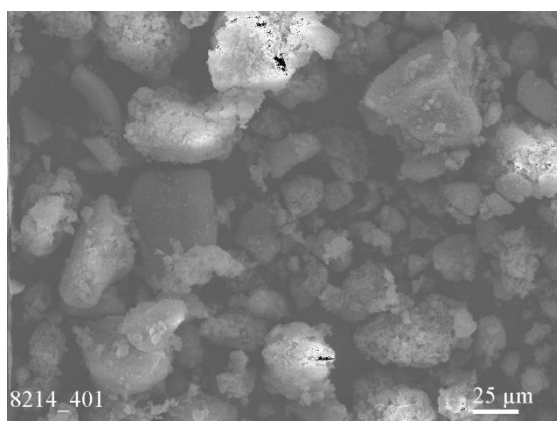
Аналіз отриманих мікрофотографій свідчить про високу рівномірність розподілу наповнювача у полімерних композиціях, що дозволяє використовувати методи механічного та фізико-хімічного суміщення (in situ) їх вихідних компонентів для створення полімерних композицій на основі термостійких полімерів.



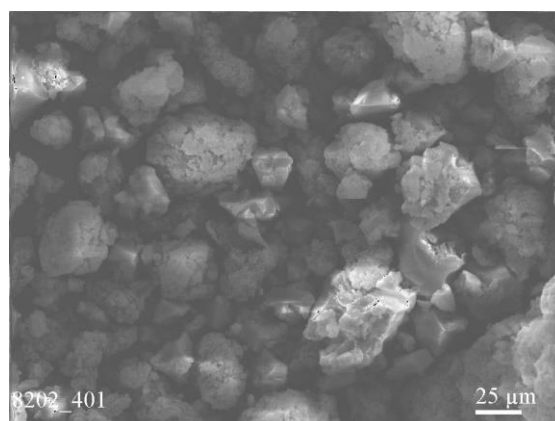
а



б



в



г

Рисунок 5.3 - Мікрофотографії вихідного фенілону C1 (а), силікагелю (б) та полімерних композицій на їх основі, отриманих за механічним (в) та фізико-хімічним методом суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (г)

Однак при використанні методу фізико-хімічного суміщення (in situ) для отримання полімерних композицій вдається суттєво зменшити собівартість готових виробів з розроблених ПКМ за рахунок відмови від операції змішування й отримання готових полімерних композицій на стадії синтезу наповнювача.

5.1.2 Визначення оптимального тиску та часу витримки при формуванні брикетів з полімерних композицій

Для підвищення технологічності при переробці полімерних композицій на основі досліджених полімерів (ароматичний поліамід, фторопласт та фенольна смола) у виробі їх попередньо брикетують [209; 210]. Ця операція відбувається за умови прикладення певного зусилля, що створює необхідний тиск у прес-формі для брикетування. Причому цей тиск необхідно витримувати певний час для кращого формування заготовок із розроблених полімерних композицій.

Готові брикети повинні бути суцільними та мати достатній рівень міцності для запобігання руйнуванню при подальшому використанні. Тому викликає інтерес визначення тиску у прес-формі, який необхідно створити для отримання таких брикетів. Найбільш доцільно приймати такий тиск, при якому досягаються максимальні значення щільності, а відповідно і міцності брикетів із досліджених полімерних композицій. Результати цих досліджень наведено в таблиці 5.1.

Виходячи з результатів досліджень з підвищенням тиску у формі, щільність брикетів з термостійких полімерів збільшується. Причому інтенсивне підвищення для різних полімерів відбувається при різних тисках, що обумовлено різною структурою та морфологією їх вихідних частинок. Так, для ароматичних поліамідів цей тиск дорівнює 120, для фторопластів 30, а для фенольної смоли - 140 МПа. Подальше його збільшення суттєво не впливає на значення щільності отриманих брикетів, тому не є раціональним. Отже, оптимальний тиск у формі при отриманні брикетів з вихідних частинок ароматичного поліаміду, фторопласту та фенольної смоли дорівнює 120, 30 та 140 МПа відповідно.

Таблиця 5.1 – Значення щільності (г/см³) брикетів з прес-матеріалів на основі термостійких полімерів залежно від тиску у прес-формі при їх формуванні

Прес-матеріал	Тиск у прес-формі Р, МПа								
	20	30	40	60	80	100	120	140	160
	Щільність г/см ³								
Фенілон С1	-	-	0,75	0,81	0,87	0,92	0,94	0,95	0,95
Фторопласт-4	1,73	1,79	1,80	1,80	-	-	-	-	-
ДФСФО	-	-	0,72	0,79	0,83	0,88	0,91	0,98	0,99

У роботі використано не тільки вихідні полімери, а і ПКМ на їх основі, тому доцільно визначити оптимальні значення тисків для отримання брикетів з розроблених ПКМ. Дослідження значень щільностей брикетів із розроблених ПКМ на основі ароматичного поліаміду, фторопласту, фенольної смоли та силікагелю, подано в таблиці 5.2.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що для брикетування полімерних композиції з більшим умістом наповнювача до досягнення постійної щільності необхідно прикладати більше навантаження. Так, наприклад, для брикету з найбільшою щільністю з полімерної композиції на основі ароматичного поліаміду, наповненого 10 % силікагелю, достатньо створити тиск у прес-формі 120–140 МПа, а для брикетування матеріалу із 60 % умістом силікагелю – 180–200 МПа. Така ж закономірність спостерігається і для інших термостійких полімерних композиційних матеріалів на основі фторопласту та фенольної смоли. Слід звернути увагу, що найпростіше отримати брикети з полімерних композицій на основі фторопласту (тиск у прес-формі від 40–80 МПа), а найбільш складно створити брикети на основі фенольної смоли (тиск у прес-формі від 160 до 220 МПа).

Таблиця 5.2 - Значення щільності (г/см³) брикетів з досліджених термостійких полімерів, наповнених силікагелем залежно від тиску у прес-формі при їх формуванні

Полімерна матриця	Уміст наповн.	Тиск у прес-формі, МПа											
		20	30	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
Фенілон С1	10	-	-	-	-	0,74	0,81	0,87	0,88	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	0,74	0,93	0,98	1,10	1,11	-	-	-
	30	-	-	-	-	1,10	1,15	1,21	1,3	1,31	-	-	-
	40	-	-	-	-	1,15	1,18	1,22	1,31	1,33	-	-	-
	50	-	-	-	-	1,16	1,19	1,22	1,36	1,38	1,38	-	-
	60	-	-	-	-	-	1,2	1,24	1,37	1,38	1,39	1,39	-
Фторопласт-4	10	1,89	1,96	1,97	1,97	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	1,87	1,94	1,97	1,97	-	-	-	-	-	-	-	-
	30	1,84	1,91	1,95	1,96	-	-	-	-	-	-	-	-
	40	1,82	1,89	1,95	1,95	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	1,79	1,84	1,89	1,95	1,95	-	-	-	-	-	-	-
ДФСФО	20	-	-	-	-	-	1,31	1,36	1,42	1,43	1,43	-	-
	40	-	-	-	-	-	-	1,39	1,42	1,46	1,50	1,51	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	1,50	1,54	1,59	1,6	-
	80	-	-	-	-	-	-	-	1,57	1,6	1,69	1,69	1,7

Для оптимізації технології отримання брикетів необхідно визначити не тільки оптимальний тиск брикетування, а й час витримки під цим тиском. Для його визначення було проведено дослідження для визначення щільності брикетів, розроблених полімерних композицій, отриманих при оптимальних тисках упродовж деякого часу. Результати досліджень подано в таблиці 5.3

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що для брикетування полімерних композиції із більшим умістом наповнювача до досягнення постійної щільності, необхідно витратити більше часу.

Таблиця 5.3 - Значення щільності (г/см³) брикетів з досліджених термостійких полімерів, наповнених силікагелем залежно від часу витримки у прес-формі при їх формуванні

Полімерна матриця	Уміст наповн.	Час витримки під тиском, с							
		30	60	90	120	150	180	210	240
Фенілон С1	10	-	0,71	0,76	0,82	0,87	0,88	-	-
	20	-	0,82	0,86	1,00	1,10	1,10	-	-
	30	-	1,21	1,23	1,27	1,31	1,31	-	-
	40	-	1,24	1,26	1,28	1,32	1,33	-	-
	50	-	-	1,29	1,31	1,34	1,38	1,38	-
	60	-	-	1,30	1,33	1,36	1,39	1,40	-
Фторопласт-4	10	1,89	1,93	1,96	1,97	1,97	-	-	-
	20	1,87	1,94	1,97	1,97	1,98	-	-	-
	30	-	1,91	1,94	1,96	1,96	-	-	-
	40	-	1,84	1,89	1,93	1,95	1,95	-	-
	50	-	1,84	1,88	1,93	1,94	1,95	-	-
ДФСФО	20	-	1,32	1,37	1,40	1,43	1,43	-	-
	40	-	-	1,40	1,43	1,46	1,51	1,51	-
	60	-	-	-	1,47	1,51	1,54	1,59	1,6
	80	-	-	-	1,62	1,66	1,68	1,7	1,7

Так, наприклад, для отримання міцного брикету з найбільшою щільністю з полімерної композиції на основі ароматичного поліаміду, наповненого 10 % силікагелю, достатньо його витримати під тиском упродовж 150–180 с, а для брикетування матеріалу із 60 % умістом силікагелю – 180–210 с. Така ж закономірність спостерігається і для інших термостійких полімерних композиційних матеріалів на основі фторопласту та фенольної смоли. Слід звернути увагу, що найменше часу втрачається при отриманні брикетів з полімерних композицій на основі фторопласту (час витримки у прес-формі від 120–180 с), а найбільш складно отримати брикети на основі фенольної смоли (час витримки у прес-формі від 210–240 с).

Відповідно до проведених досліджень, визначено оптимальні значення тисків та часу витримки у прес-формах для отримання суцільних брикетів із термостійких полімерів (ароматичний поліамід, фторопласт, фенольна смола) наповнених силікагелем із достатнім рівнем міцності для запобігання руйнуванню при подальшому використанні. Причому для брикетів на основі різних полімерів значення тисків та часу витримки у прес-формі відрізняються. Це обумовлено різною структурою і морфологією отриманих полімерних композицій на основі досліджених термостійких полімерів (ароматичний поліамід, фторопласт, фенольна смола) наповнених силікагелем.

Слід відзначити, що визначений тиск та час витримки у прес-формі буде несуттєво відрізнятися для брикетів різної форми і розмірів. Це є наслідком внутрішнього тертя прес-порошку по стінках форми та тим, що він не є ідеально пружним матеріалом. Особливо це стосується виготовлення брикетів з великими значеннями лінійних розмірів. Тому для їх отримання необхідно використовувати форми із двостороннім прикладенням навантаження [211].

5.2 Основний етап переробки термостійких ПКМ у вироби

5.2.1 Визначення оптимальних температур та часу сушки полімерних композицій на основі фенілону С1, фторопласту-4 таДФСФО

Брикети для подальшої переробки з отриманих ПКМ є гідрофільними матеріалами, які поглинають велику кількість вологи з повітря [199]. При цьому волога може негативно впливати на полімер при переробці отриманих брикетів у вироби. Тому досить цікаво дослідити вологопоглинання прес-порошків термостійких полімерів методом термогравіметричного аналізу (рис. 5.4).

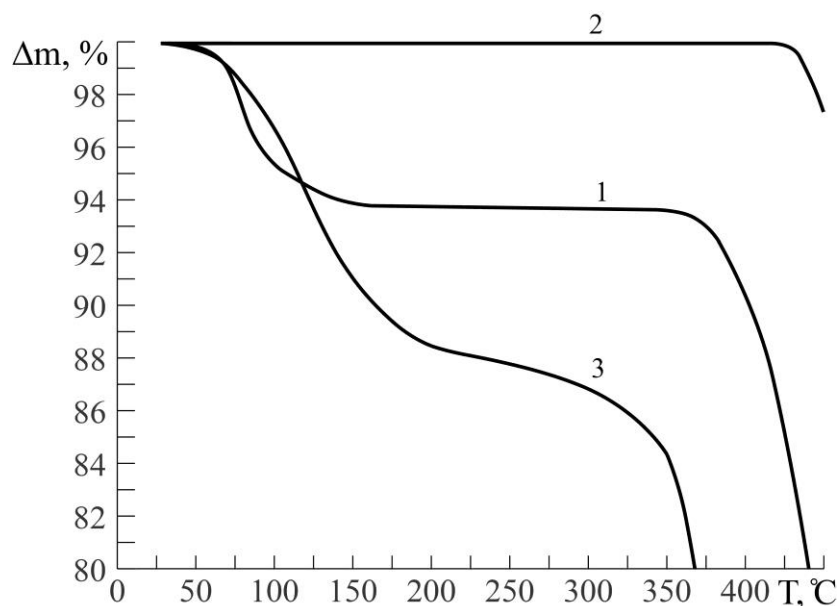


Рисунок 5.4 – Термогравіметричний аналіз прес-порошків термостійких полімерів: 1 – фенілон С1; 2 – фторопласт-4; 3 – ДФСФО

На термогравіметричній кривій ароматичного поліаміду в інтервалі температур від 70 до 180°C спостерігається інтенсивна втрата ваги, що пов'язано із видаленням з нього адсорбованої вологи та летких сполук [212]. Слід відзначити, що їх уміст у досліджуваних ароматичних поліамідах склав до 6 %. В інтервалі температур від 180 до 345°C значення ваги прес-матеріалів суттєво не змінюється. Інтенсивна її втрата починається при температурах 345–350°C що пов'язано із початком активної термічної деструкції досліджуваних матеріалів.

Відомо [29], що волога в ароматичних поліамідах сприяє їх деструкції, пов'язаній із гідролітичними процесами, що відбуваються при високих температурах під час переробки полімерів у виробі у замкненому просторі формівного інструмента. Тому брикети на основі ароматичного поліаміду необхідно підсушувати при визначеній температурі впродовж певного часу.

На термогравіметричній кривій фторопласту до температури 430°C не спостерігається втрата ваги, тобто матеріал є гідрофобним. Інтенсивна її втрата починається при температурах 425–430°C що пов'язано з початком активної термічної деструкції фторопласту [213; 214]. Брикети на основі

фторопласту, внаслідок високої гідрофільності матеріалу підсушувати немає необхідності.

На термогравіметричній кривій фенольної смоли в початковий період від 50 до 130°C інтенсивна втрата ваги прес-порошку фенольної смоли обумовлена видаленням з нього вільної та зв'язаної вологи, а також летких продуктів (формальдегід, розчинник). Утрата ваги при температурах 130–150°C пов'язана із видаленням вологи, яка створюється при взаємодії метилових груп $-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-$, які у свою чергу при 150–180°C перетворюються у метиленові $-\text{CH}_2-$, що супроводжується створенням формальдегіду $\text{CH}_2=\text{O}$ [19; 20]. При температурах, починаючи з 310°C спостерігається інтенсивна втрата ваги фенольної смоли, що відбувається внаслідок руйнування дифеніолсульфонових фрагментів розробленої фенольної смоли, яка відповідає початку їх активної деструкції.

Відповідно до класичної технології переробки, брикети на основі фенольної смоли можна підсушувати під час їх переробки у вироби у прес-формах за рахунок багатостадійної переробки [215-217]. Однак це значно ускладнює та підвищує витрати на процес переробки ПКМ на основі фенольної смоли у вироби. Тому попереднє підсушування брикетів на основі фенольної смоли дозволяє помітно скоротити тривалість пресування і зменшити собівартість виробництва виробів з них.

Підсушування брикетів із ПКМ на основі ароматичних поліамідів будуть відбуватися відповідно до сушіння вихідного полімеру внаслідок того, що він є основним компонентом у полімерній композиції.

Виходячи із результатів термогравіметричних досліджень (рисунок 5.4), можна зробити висновок, що нижньою межею інтервалу температур сушіння вихідного фенолону є 70°C. Це температура, при якій починається втрата ваги дослідженого матеріалу за рахунок видалення з нього вологи та летких компонентів. За верхню межу інтервалу приймаємо 270°C. Це температура силування фенолону [218], при якій матеріал брикетів буде переходити із

склоподібного у вискоеластичний стан і внаслідок цього брикет буде деформуватися та втрачати свою вихідну форму.

Для встановлення оптимальної температури та часу сушіння брикетів проведено їх ізотермічний термогравіметричний аналіз, результати якого подано на рис. 5.5.

Відповідно до результатів досліджень встановлено, що за допомогою сушіння (при атмосферному тиску) в інтервалі температур від 70 до 170°C видалення вологи та летких компонентів із брикетів здійснюється не повною мірою, що є негативним фактором для подальшої переробки полімеру. Повне їх видалення можливо провести при більших температурах, верхньою межею яких є 230°C. Проведення видалення вологи та летких компонентів при температурах вище зазначеної є економічно недоцільним внаслідок затрати великої кількості енергії. У результаті досліджень установили, що оптимальним інтервалом температур сушіння брикетів ароматичних поліамідів є 190–230°C. Причому залежно від вибраної температури буде відрізнятися і тривалість сушіння. Так, для видалення вологи та летких компонентів із брикетів при температурі 190°C необхідно витратити 15 хв, а при температурі 230°C – 10 хв. 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 вологи та летких компонентів із брикетів, залежно від їх форми буде відрізнятися. Це пов'язано із необхідністю досягнення повного їх прогрівання по всьому об'єму до вибраної температури. Час прогрівання брикетів визначається відповідно до їх температуропровідності за методикою [49], і складає для брикету з фенілону С1 з товщиною (для плоского) та діаметром (для циліндричного) 6–50 мм від 1,8 до 80 хв.

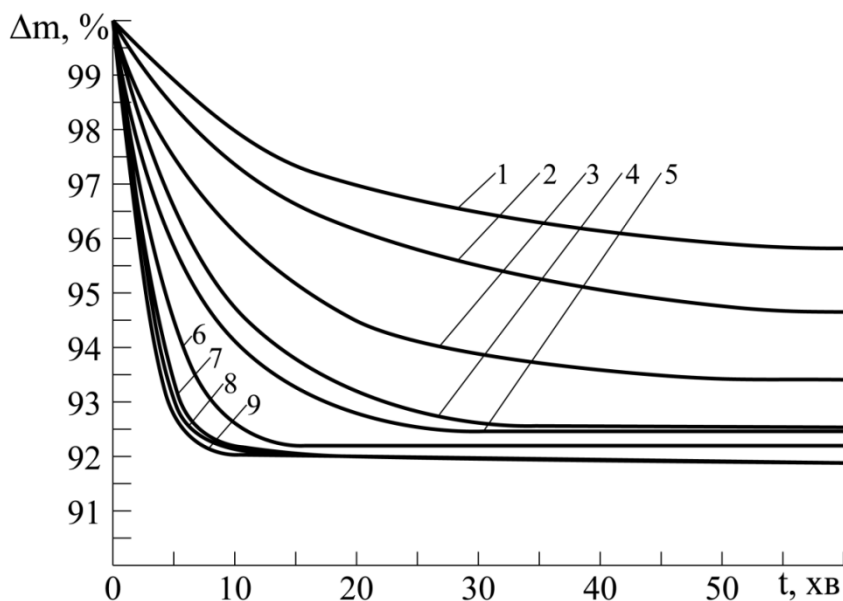


Рисунок 5.5 – Залежності втрати ваги брикетованого прес-матеріалу фенілону С1 від часу t сушіння при визначених температурах: 1 – 70°C; 2 – 90°C; 3 – 110°C; 4 – 130°C; 5 – 150°C; 6 – 170°C; 7 – 190°C; 8 – 210°C; 9 – 230°C

Підсушування брикетів із ПКМ на основі фенольної смоли будуть відбуватися відповідно до сушіння вихідного полімеру внаслідок того, що він є основним компонентом у ПКМ.

Виходячи із результатів термогравіметричних досліджень (рисунок 4), можна зробити висновок, що нижньою межею інтервалу температур сушіння фенольної смоли є 50°C. Це температура, при якій починається втрата ваги полімеру за рахунок видалення з нього води та летких компонентів. За верхню межу інтервалу приймаємо 130°C. Це температура, при якій починається реакція конденсації фенольного олігомерного продукту, яка призводить до його переходу у неплавкий та нерозчинний стан.

Для встановлення оптимальної температури та часу сушіння брикетів на основі фенольної смоли проведено їх ізотермічний термогравіметричний аналіз, результати якого подано на рис. 5.6.

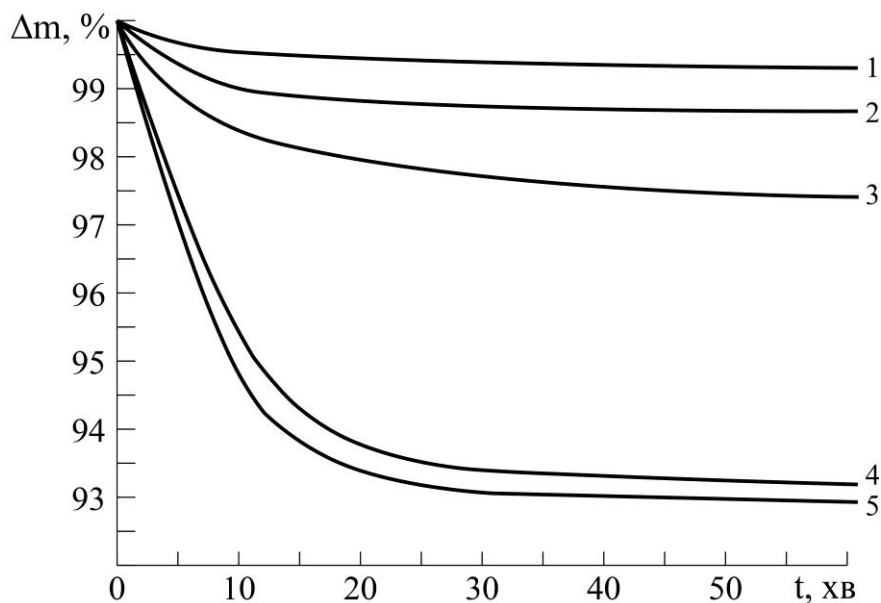


Рисунок 5.6 – Залежності втрати ваги брикетованого прес-матеріалу на основі ДФСФО від часу t сушіння при визначених температурах: 1 – 50°C; 2 – 70°C; 3 – 90°C; 4 – 110°C; 5 – 130°C

Відповідно до результатів досліджень встановлено, що зі збільшенням температури та часу сушіння видалення води та летких компонентів із брикетів збільшується. Причому найбільше впливає саме температура сушіння. Так, при температурах 50 і 70°C вага брикетів зменшується на 0,8–1 %, при 90°C зменшення досягає 2,5 %. Найбільш інтенсивна втрата ваги спостерігається при температурах 110 і 130°C і дорівнює 6,5–7 %. Це пояснюється інтенсивною втратою води з брикету, яка починається при температурах вище температури кипіння води – 100°C. Час сушіння брикетів менше впливає на випаровування води та летких компонентів з них, ніж температура. Для всіх матеріалів спостерігається різке зменшення ваги брикетів у початковий період сушіння (0–10 хв), та його стабілізація впродовж наступного часу. Так, при температурах 50 і 70°C стабілізація ваги брикетів спостерігається після 45 хв сушіння, при температурі 90°C при 40 хв, а при температурах 110 і 130°C при 30–35 хв.

Відповідно до проведених досліджень втрати ваги брикетованого прес-матеріалу на основі фенольної смоли від температури та часу сушіння

встановлено, що температура сушіння, при якій виділяється найбільша кількість води та летких компонентів з них, лежить у межах 110 до 130°C. Причому втрата ваги брикетів при цих температурах помітно не розрізняється, 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 виділення води та летких компонентів з брикетів на основі фенольної смоли.

5.2.2 Визначення оптимальних тисків, температур та часу витримки при пресуванні виробів з термостійких ПКМ

Після проведення сушіння брикетів на основі ароматичних поліамідів здійснюється операція їх компресійного пресування у формах з підігрівом. Брикети завантажуються у прес-форму, попередньо нагріту до температури, що на 10–15°C перевищує температуру сушіння. Це пов'язано з тим, що висушені брикети не повинні охолоджуватися нижче температури сушіння, щоб унеможливити поглинання води при їх переробці. Після цього він підігрівається до температури переробки полімеру із швидкістю 5°C/хв, що обумовлено необхідністю його прогрівання по всьому об'єму рівномірно та одночасно з підвищенням температури.

Температура переробки для ароматичного поліаміду фенілону С1 повинна бути вищою, ніж температура його склування і нижчою, ніж температура початку активної деструкції. Виходячи із термогравіметричних досліджень (рис. 5.4) для фенілону С1, ця температура становить 345°C. Визначення температури переробки ароматичного поліаміду проведено шляхом вивчення її впливу на фізико-механічні властивості отриманих виробів. За оптимальну температури прийнято ту, при якій отримані вироби мають найбільш високий рівень властивостей. Тиск та час витримки при

пресуванні склав 40 МПа та 60 с на 1 мм готового виробу. Результати досліджень представлено на рис. 5.7.

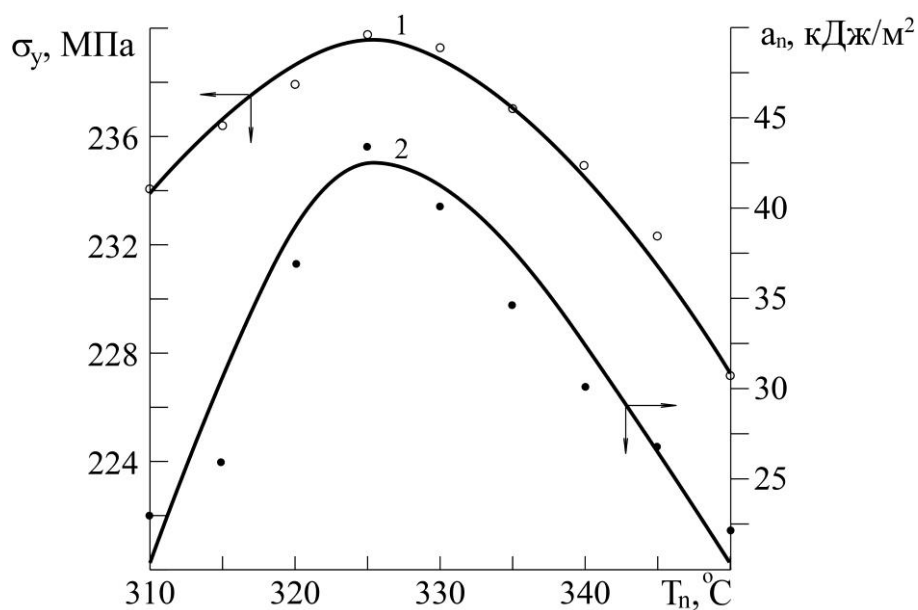


Рисунок 5.7 – Залежності напруження при межі текучості при стисканні σ_y (1) та ударної в'язкості a_n (2) від температури T_n переробки матеріалу на основі ароматичного поліаміду феноліону С1

Отримані залежності мають подібний характер з явно вираженими екстремумами в області температур переробки 323–327°C для феноліону С1. При цих температурах спостерігаються максимальний рівень показників напруження при межі текучості при стисканні (до 240 МПа) та ударної в'язкості (до 42 кДж/м²) готових виробів. Тобто ці температури і є найбільш доцільними для переробки феноліону С1.

Однією з основних характеристик при переробці полімерів методом компресійного пресування є формівний тиск, який необхідно створювати для отримання суцільних виробів. Для встановлення оптимальних його значень проведено дослідження впливу формівного тиску на ударну в'язкість отриманих виробів. Температура переробки та час витримки при пресуванні

дорівнює 326°C та 60 с на 1 мм готового виробу відповідно. Результати досліджень представлено на рис. 5.8.

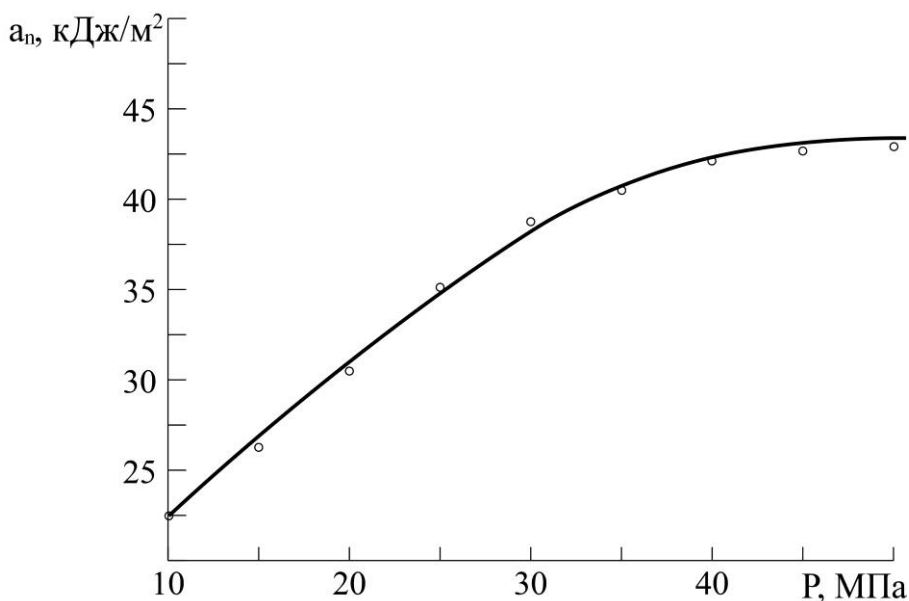


Рисунок 5.8 – Залежність ударної в'язкості a_n від формівного тиску при пресуванні вихідного ароматичного поліаміду фенілону С1

Відповідно до отриманих даних, збільшення формівного тиску при пресуванні дає підвищення показників ударної в'язкості виробів з фенілону С1. Причому, інтенсивне зростання цього параметра відбувається при тисках до 40 МПа і потім стабілізується, досягаючи значень 42,5–43 МПа. Подальше зростання тиску до 60 МПа суттєво не впливає на фізико-механічні властивості полімерів. Тому, виходячи з економічної доцільності, оптимальним формівним тиском при переробці феніона С1 у вироби є 40 МПа.

Час витримки полімерів під тиском визначається необхідністю їх повного прогрівання по всьому об'єму до температури переробки та часом, необхідним для заповнення формівної порожнини. Виходячи із закономірностей [49], він залежить від виду та розмірів виробів і складає від 30 до 60 с на 1 мм готового виробу.

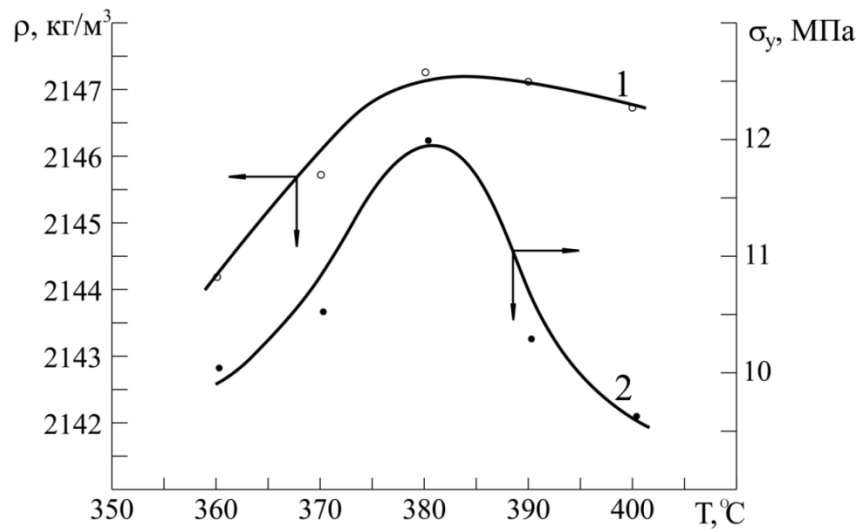
Після витримки під тиском відбувається охолодження виробів до температури, нижчої 270°C (температура силювання фенілону). Швидкість охолодження не повинна бути більшою, ніж $20^{\circ}\text{C}/\text{хв}$, в іншому випадку це може призвести до значних внутрішніх напружень у готових виробах, які у свою чергу негативно впливають на фізико-механічні властивості.

Подальша переробка брикетів на основі фторопласту-4 полягає у їх спіканні. Одними із основних параметрів даної операції є температура спікання та час витримки при визначеній температурі. Для знаходження оптимальних значень даних параметрів було проведено дослідження їх впливу на фізико-механічні характеристики матеріалів на основі фторопласту (рис 5.9).

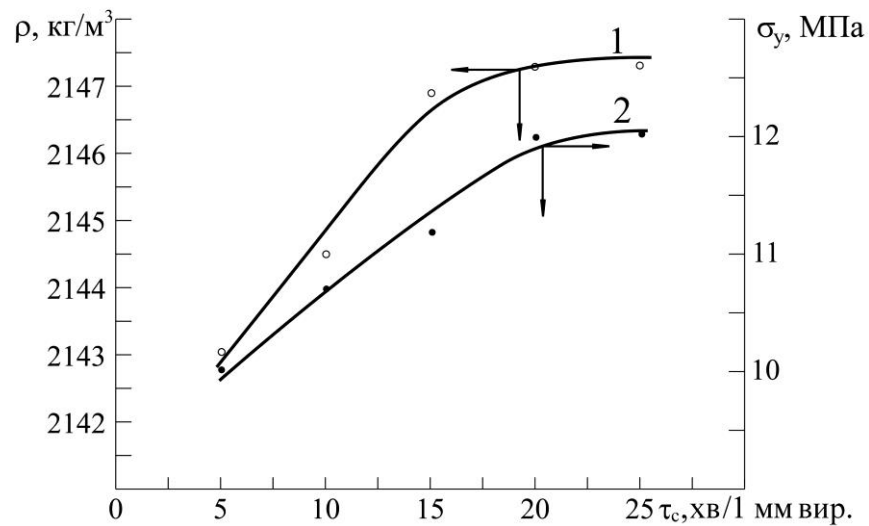
У результаті їх проведення (рис. 5.9, а) встановлено, що залежність густини та напруження при межі текучості при стисканні фторопласту-4 від температури спікання має екстремальний характер. Причому найбільші значення досліджених фізико-механічних характеристик спостерігаються при температурах від 375 до 385°C . Цей інтервал температур і є оптимальним при спіканні полімерів на основі фторопласту-4 в процесі переробки їх у вироби.

Густина та напруження при межі текучості при стисканні фторопласту-4 залежно від часу витримки (рис. 5.9, б) інтенсивно зростають і досягають максимуму при часу витримки 20 хв на 1 мм виробу. При подальшому збільшенні цього параметра значення досліджених фізико-механічних властивостей стабілізуються. Відповідно до цього можна зробити висновок, що оптимальним часом витримки при спіканні є 20 хв на 1 мм виробу.

Після проведення операції спікання готові вироби повільно охолоджуються у печі до кімнатної температури із швидкістю не більше, ніж $10\text{--}15^{\circ}\text{C}/\text{хв}$, в іншому випадку це може призвести до зміни їх структури, що негативно впливає на рівень фізико-механічних властивостей отриманих виробів.



а



б

Рисунок 5.9 - Залежності густини ρ (1) та напруження при межі текучості при стисканні σ_y (2) фторопласту-4 від температури T (а) та часу витримки τ_c при спіканні (б)

Підсушені брикети на основі фенольної смоли переробляються у вироби за допомогою компресійного пресування у формах з підігрівом. При данній технології переробки таких полімерів на якість виробів найбільше впливає температура, тиск при переробці та час витримки під тиском [217]. Тому визначення цих параметрів для розроблених нами фенольних полімерів є актуальним завданням.

Відомо [219], що зі збільшенням температури переробки тривалість отвердіння фенольної смоли зменшується. Однак температуру не можна значно підвищувати внаслідок того, що при високих температурах прес-матеріал втрачає текучість, необхідну для заповнення форми. Зазвичай температура переробки фенольної смоли обирається із меж 150–190°C залежно від хімічної та фізичної структури смоли.

Температуру переробки та час витримки для отвердіння виробу при даній температурі можна вибирати відповідно до значень напруження при межі текучості при стисканні зразків із отриманої фенольної смоли. Для цього нами було проведено експерименти для установлення напруження при межі текучості при стисканні дослідженої фенольної смоли залежно від температури переробки та часу витримки (рис. 5.10).

Відповідно до проведених досліджень зі збільшенням температури переробки та часу витримки, 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 не впливає суттєв на досліджену характеристику [220].

Також важливою характеристикою є тиск при пресуванні. Цей параметр залежить від текучості використаних прес-матеріалів і форми виробів. Зазвичай для фенольних смол вибирається тиск у межах від 10 до 50 МПа. Температуру переробки та час витримки при пресуванні брали відповідно 185–190°C та 15–20 хв. На рис. 5.11 показано результати даних досліджень.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що зі збільшенням тиску при пресуванні підвищуються значення фізико-механічних властивостей виробів із фенольної смоли. Причому слід відзначити, що це збільшення є незначним.

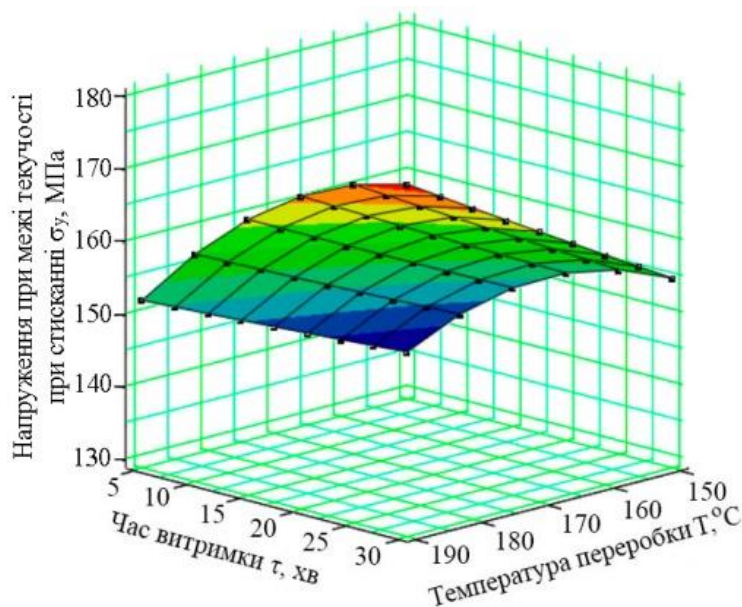


Рисунок 5.10 – Залежність напруження при межі текучості при стисканні σ_y ДФСФО від температури переробки T та часу витримки τ її при переробці у виробі

Так, при мінімальному тиску у 10 МПа значення щільності та напруження при межі текучості при стисканні складають відповідно 1430 кг/м^3 та 161 МПа, а при максимальному (40 МПа) – 1437 кг/м^3 та 172 МПа. Поступове збільшення фізико-механічних властивостей спостерігається до тиску 30 МПа, після якого їх значення стабілізуються, що свідчить про те, що даний тиск є оптимальним при переробці виробів із дослідженої фенольної смоли.

Після проведення операції компресійного пресування у формах з підігрівом виробі з фенольної смоли та ПКМ на її основі твердіють (за рахунок поліконденсації фенольної смоли до стану резиту) і готовий виріб витягується із форми.

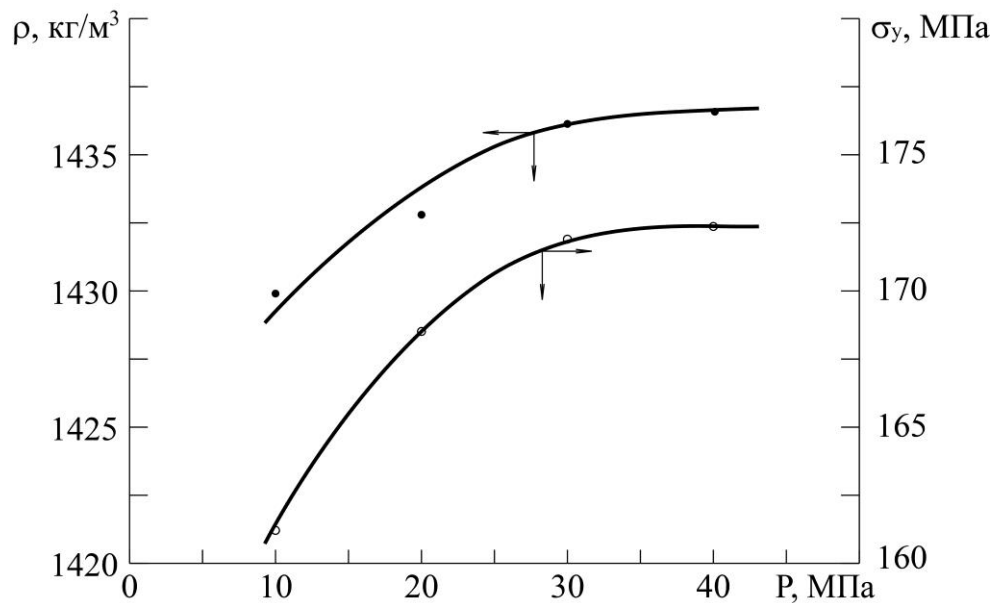


Рисунок 5.11 – Залежність густини ρ та напруження при межі текучості при стисканні σ_y від тиску при пресуванні P виробів із ДФСФО

5.3 Заключний етап переробки термостійких ПКМ у вироби

У більшості випадків, після формування, вироби із полімерів підлягають механічній обробці для надання поверхням деталей необхідних службових характеристик та необхідного зовнішнього вигляду. Механічна обробка також використовується у тих випадках, коли необхідно виготовити вироби складної форми, які досить складно формуються [221, 222], наприклад, шестерні, деталі підшипників, панелі, корпуси різних механізмів тощо. А також у випадках одиничного чи дрібносерійного виробництва, коли партія виготовлюваних деталей є невеликою та виготовлення для них високовартісних формівних інструментів економічно не доцільне.

При механічній обробці полімерів слід урахувати особливості їх структури і фізико-механічні властивості. Низька щільність та твердість, невисока теплостійкість, дуже низька теплопровідність, високий рівень опору дії вібрацій, інтенсивна абразивна дія на різальний інструмент – все це

необхідно брати до уваги при виборі різального інструменту та призначенні режимів різання при механічній обробці полімерів та ПКМ на їх основі.

Більшість матеріалів на основі полімерів непогано піддаються обробці різанням на звичайному металорізальному обладнанні. Однак різальний інструмент та основні параметри при різанні (швидкість та глибина різання, подавання) мають значні відмінності від обробки металів і підбираються залежно від властивостей оброблюваного матеріалу. При механічній обробці полімерів та ПКМ на їх основі слід звернути особливу увагу на температурний режим у зоні різання, оскільки можливі великі деформації деталей, деструкція оброблюваного матеріалу, виділення шкідливих газоподібних продуктів та пилу.

Токарна обробка деталей із полімерів зазвичай ведеться на універсальних металорізальних станках та токарних автоматах при високих швидкостях різання, але із зніманням тонкої стружки. У більшості випадків охолоджувальна рідина не використовується, однак при обробці термопластичних матеріалів допустима температура в зоні різання не повинна перевищувати 100–120°C, а для термореактивних – 200–300°C. Слід ураховувати, що температура в зоні різання визначається не тільки швидкістю різання, подачею, глибиною різання, властивостями оброблюваного матеріалу, але й правильним вибором та якістю заточки різального інструменту та властивостями матеріалу різального клину. При токарній обробці деталей із полімерів та ПКМ на їх основі використовуються різці, різальний клин яких виготовляється із швидкорізальної сталі марок (P9, P12, P6M3, P10K5Ф5 тощо), твердих сплавів (BK4, BK8, T15K6 тощо), металокераміки (ЦМ332), кубічного нітриду бору (ельбор) та алмазів, тобто тих матеріалів, які мають високу теплостійкість та теплопровідність [222].

Виходячи з того, що розроблені нами ПКМ, наповнені досить твердими частинками на основі діоксиду кремнію (причому вони мають досить високий ступінь наповнення до 80 %), для їх обробки необхідно вибирати

різці із різальним клином із твердих сплавів, які є відносно недорогими і стійкими до зношування матеріалами.

Відповідно до рекомендацій [223], при обробці полімерів та ПКМ на їх основі необхідно збільшувати задній кут α різця до $15...25^\circ$, оскільки внаслідок високих пружних властивостей полімерів збільшується площа контакту різця з деталлю, що призводить до швидкого зношування різальної кромки різця і підвищеному тепловиділенню. Для матеріалів із зливною стружкою, наприклад, як у термопластів, оптимальний передній кут різця знаходиться у межах $10...20^\circ$. При обробці термореактивних матеріалів з ломкою стружкою передній кут α слід вибрати у межах $0...5^\circ$, а вершину різця – з радіусом $1,5...3,0$ мм. Головний кут ϕ в плані для прохідних різців складає 45° , а допоміжний $0...5^\circ$, кут нахилу різальної кромки $\lambda=0^\circ$.

Виходячи з рекомендацій для механічної обробки виробів із досліджених нами полімерів та ПКМ на їх основі, було вибрано різець з заднім кутом $\alpha = 20^\circ$, передній кут 10° , головний кут у плані ϕ дорівнює 45° , а допоміжний 3° , кут нахилу різальної кромки $\lambda=0^\circ$.

Досить важливим є також вибір оптимальних режимів різання (швидкість різання, подавання, глибина різання) для розроблених нами полімерів та ПКМ на їх основі. У довідковій літературі вказано оптимальні режими різання більшості промислових полімерів [224]. Так, заготовки на основі фторопласту необхідно обробляти при швидкостях різання ($6\text{--}8$ м/с), подаваннях ($0,1\text{--}0,3$ мм/об) з глибиною різання ($0,5\text{--}2$ мм). Однак у довідниках немає інформації про режими різання таких полімерів, як ароматичні поліаміди та фенопласти на основі ДФСФО. Тому актуальним завданням є вибір оптимальних режимів різання при виготовленні деталей із цих полімерів. Оптимальні значення режимів різання будемо вибирати, виходячи із значень сил різання, які виникають при точінні досліджуваних матеріалів.

Для встановлення залежності сили різання від швидкості різання при точінні ароматичного поліаміду та фенопласту глибину різання і подавання

вибрано рівними відповідно оптимальними значеннями при точінні аліфатичних поліамідів ($t = 1$ мм; $s = 0,07$ мм), як матеріалів, які найбільш близькі за фізико-механічними характеристиками до досліджуваних матеріалів. Залежність сили різання від швидкості різання при точінні фенілону та фенопласту подано на рис. 5.12.

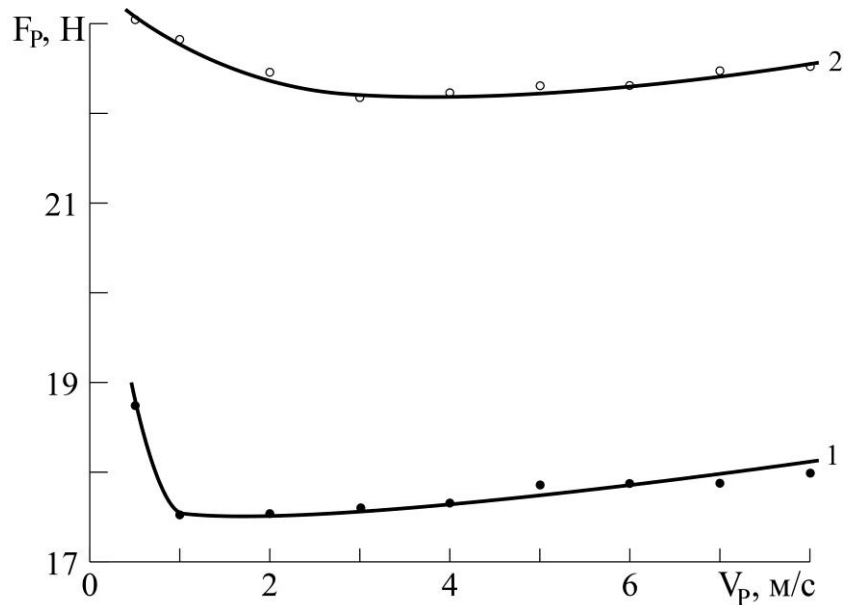


Рисунок 5.12 – Залежність сили різання F_p при токарній обробці деталі з ароматичного поліаміду фенілону С1 (1) та фенопласту на основі ДФСФО (2) від швидкості різання V_p

Як можна побачити із графіка, залежності сил різання від швидкості різання при токарній обробці деталей з досліджуваних матеріалів мають екстремальний характер. Так, при точінні заготовки на основі ароматичного поліаміду фенілону С1 при швидкостях різання до 1 м/с значення сили різання досягає 18,8 Н. А вже при швидкостях різання від 1 до 2,5 м/с сила різання зменшується до 17,5 Н. При подальшому збільшенні швидкості різання від 2,5 до 8 м/с спостерігається поступове збільшення сили різання, значення якої досягає 18 Н.

При точінні матеріалу на основі фенольної смоли спостерігається подібний характер із зміщенням оптимальних значень сил різання у бік

більших швидкостей різання. Так, при точінні заготовки з фенопласту на основі ДФСФО при швидкостях різання до 2,5 м/с значення сили різання досягає 23 Н. А вже при швидкостях різання від 2,5 до 4 м/с сила різання зменшується до 22 Н. При подальшому збільшенні швидкості різання від 4 до 8 м/с спостерігається поступове збільшення сили різання, значення якої досягає 22,7 Н.

Зменшення сили різання при точінні досліджених матеріалів відбувається внаслідок зміни їх фізико-механічних характеристик (твердість, міцність тощо) у зоні різання в результаті тертя різальної кромки різця по полімерах, яке призводить до збільшення температури. Зі збільшенням швидкості різання температура в зоні різання підвищується і полімери в локальних зонах контакту перегріваються, що призводить до можливого переходу досліджених матеріалів у в'язкотекучий стан (фенілон С1) і навіть деструкції (фенілон С1, ДФСФО) та впливає на збільшення сили, необхідної для подолання опору матеріалів руйнуванню, що у свою чергу відображається на збільшенні сили різання.

Для підтвердження цього факту полімерну стружку, отриману після точіння при різних швидкостях різання було досліджено на стійкість до дії температури. Використано при цьому термогравіметричний аналіз, у результаті якого встановлено температури початку активної деструкції стружки із досліджених матеріалів. Результати досліджень подано на рисунку 5.13.

Як можна побачити із отриманих результатів, графіки температури початку активної деструкції полімерної стружки, отриманої при різних швидкостях різання при токарній обробці деталей з досліджуваних матеріалів мають екстремальний характер. Так, температура початку активної деструкції стружки з ароматичного поліаміду, отриманої при швидкостях різання до 1 м/с дорівнює 343–344°C. В інтервалі швидкостей різання від 1 до 2,5 м/с цей параметр збільшується і досягає значень 347°C.

При подальшому збільшенні швидкості різання від 2,5 до 8 м/с спостерігається поступове зменшення температури початку активної деструкції стружки з ароматичного поліаміду і при 8 м/с цей параметр досягає 335°C.

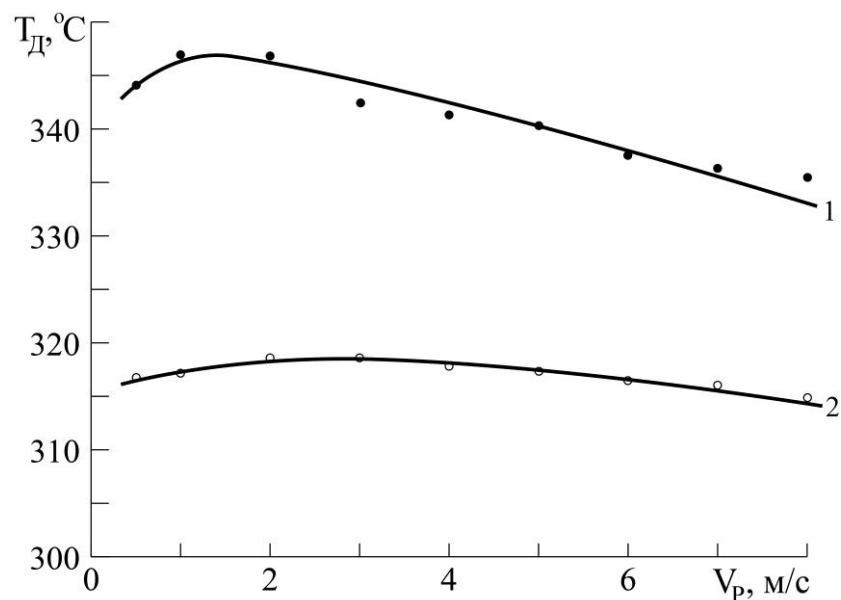


Рисунок 5.13 – Залежність температури початку активної деструкції T_d стружки, отриманої після токарної обробки деталі з ароматичного поліаміду фенолону С1 (1) та фенопласту на основі ДФСФО (2) від швидкості різання V_p

Для стружки, отриманої із ДФСФО, спостерігається подібний характер графіка із зміщенням максимальних значень температур початку активної деструкції у бік більших швидкостей різання. Так, значення температури початку активної деструкції стружки при швидкостях різання до 2,5 м/с досягають 316–317°C, а вже при швидкостях різання від 2,5 до 4 м/с збільшуються до 319°C. Подальше збільшення цього параметра від 4 до 8 м/с призводить до зменшення значень початку активної деструкції стружки з фенопласту до 315°C.

Слід відзначити, що інтервали швидкостей різання, при яких фіксуються екстремальні значення сил різання при точінні досліджуваних полімерів та температур початку активної деструкції полімерної стружки,

отриманої при точінні співпадають. Це дає змогу стверджувати, що оптимальними значеннями швидкостей різання для заготовок на основі ароматичного поліаміду є від 1 до 2,5 м/с, а для матеріалів на основі фенопласту від 2,5 до 4 м/с. В цих інтервалах для досліджених матеріалів спостерігаються мінімальні значення сил різання, що полегшує навантаження на станок та максимальні значення температур початку активної деструкції стружки, що свідчить про найкращі умови, які створюються у зоні різання і не призводять до значної механічної та термічної деструкції заготовок із досліджених матеріалів. Це, у свою чергу, сприятим покращенню чистоти поверхні виробу отриманого з досліджених матеріалів при точінні.

Для підтвердження цього припущення проведено дослідження, які описують вплив швидкості різання на шорсткість поверхонь деталей із досліджених матеріалів на основі ароматичного поліаміду та фенольної смоли. В якості параметра, який описує шорсткість поверхні було вибрано параметр R_a (середнє квадратичне відхилення нерівностей профілю поверхні). Результати досліджень подано на рис. 5.14.

Із отриманих залежностей видно, що параметр шорсткості R_a поверхонь полімерних деталей після токарної обробки зменшується із підвищенням швидкості різання. Слід відзначити, що для обох полімерних деталей спостерігаються екстремуми в області швидкостей різання заготовок на основі ароматичного поліаміду від 1 до 2,5 м/с, а для матеріалів на основі фенопласту – від 2,5 до 4 м/с. Причому екстремум більш яскраво виражений при обробці деталей із ароматичного поліаміду. Значення параметрів шорсткості для деталей із ароматичного поліаміду при однакових режимах різання у 2,5–4 рази менші, ніж для деталей із фенопласту, що пояснюється різним фізико-механічними властивостями оброблюваних матеріалів.

Для досягнення менших значень шорсткості дані матеріали необхідно обробляти іншими методами (чистове точіння, шліфування, полірування тощо).

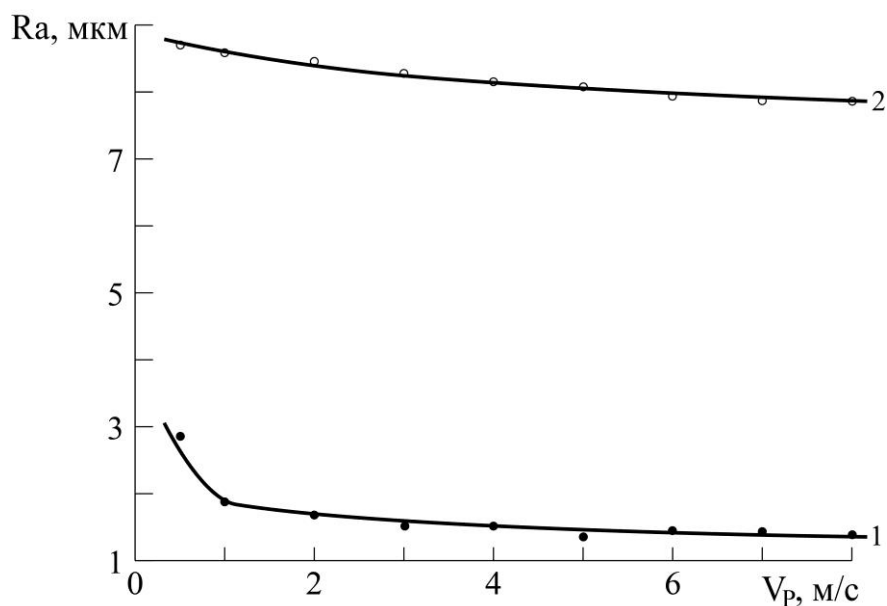


Рисунок 5.14 – Залежність шорсткості поверхні полімерної деталі Ra після токарної обробки заготовки з ароматичного поліаміду фенілону C1 (1) та фенопласту на основі ДФСФО (2) від швидкості різання V_p

Виходячи з проведених досліджень, можна зробити висновок, що оптимальна швидкість різання для матеріалів на основі ароматичного поліаміду фенілону C1 лежить в інтервалі від 1 до 2,5 м/с, а для фенопласту на основі ДФСФО - 2,5 до 4 м/с. При цих швидкостях різання сили різання мають найменші значення і вдається досягти оптимальної шорсткості поверхні для ароматичного поліаміду $Ra = 1,9$ мкм, а для фенопласту – 8,8 мкм.

Важливими є досліді для встановлення впливу глибини різання на сили різання при точінні матеріалів на основі ароматичного поліаміду фенілону C1 та фенопласту. Отримані результати представлено на рис. 5.15.

Як можна побачити із отриманих результатів, графіки залежностей сили різання при токарній обробці досліджених деталей від глибини різання мають подібний характер, який в інтервалі досліджених глибин різання наближається до лінійного.

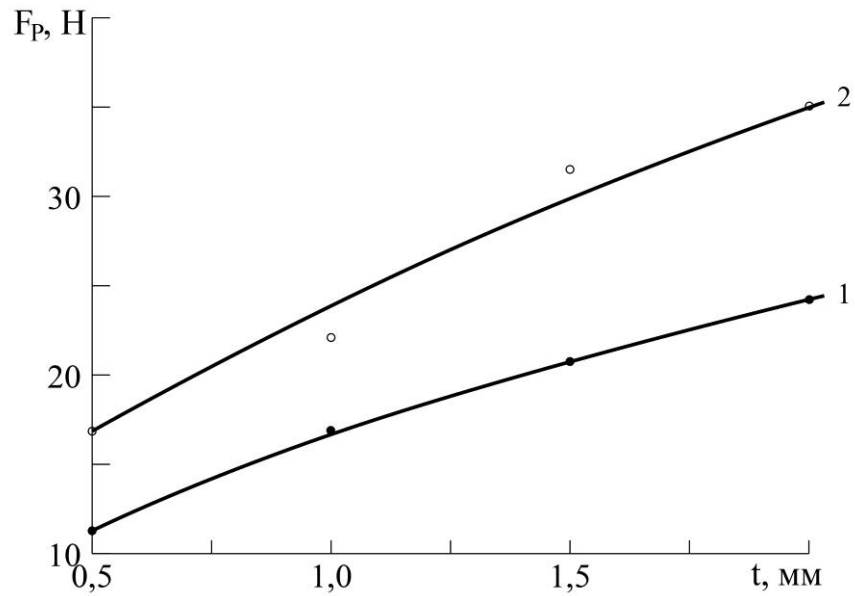


Рисунок 5.15 – Залежність сили різання F_p при токарній обробці деталі з ароматичного поліаміду фенілону С1 (1) ($V_p = 1,5$ м/с, $s = 0,07$ мм/об) та фенопласту на основі ДФСФО (2) ($V_p = 3$ м/с, $s = 0,07$ мм/об) від глибини різання t

Зі збільшенням глибини різання спостерігається збільшення сили різання. Так, при токарній обробці ароматичного поліаміду при збільшенні глибини різання з 0,5 до 2 мм сила різання збільшується з 11 до 23 Н, а для фенопласту – з 17 до 35 Н. Це пояснюється більшим опором різанню при знятті більш глибокого шару матеріалу. Причому слід відзначити, що матеріал на основі фенілону краще підлягає обробці, ніж фенопласт внаслідок менших сил різання, які виникають при механічній обробці матеріалу.

Проведено дослідження для встановлення впливу подавання різця на силу різання при точінні ароматичного поліаміду та фенопласту. Отримані результати представлено на рис. 5.16.

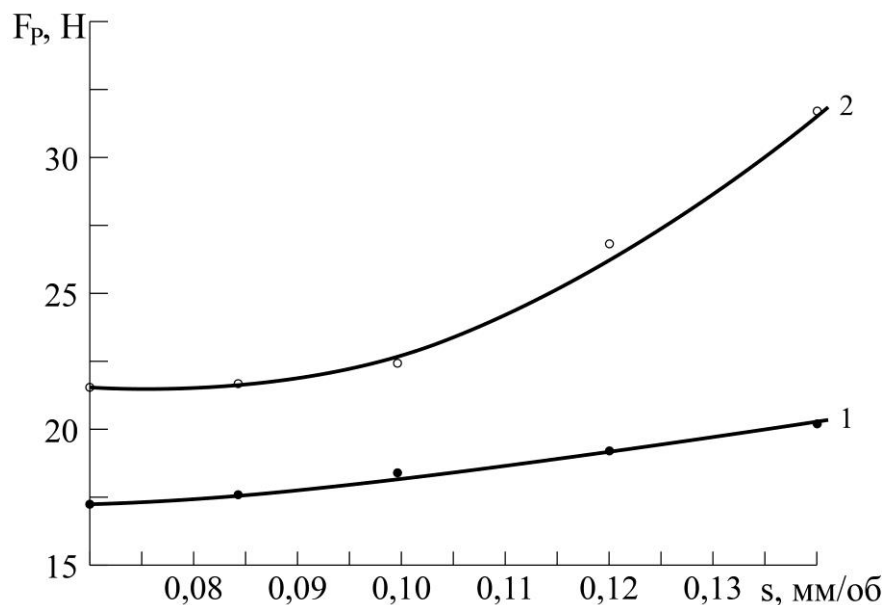


Рисунок 5.16 – Залежність сили різання F_p при токарній обробці деталі з ароматичного поліаміду фенілону С1 (1) ($V_p = 1,5$ м/с, $t = 1$ мм) та фенопласту на основі ДФСФО (2) ($V_p = 3$ м/с, $t = 1$ мм) від подавання s

Отримані графіки залежностей сил різання при токарній обробці деталей з ароматичного поліаміду фенілону С1 та фенопласту на основі ДФСФО від подавання мають подібний характер. З підвищенням подавання збільшується сила різання для всіх досліджених матеріалів.

Так, для ароматичного поліаміду зі збільшенням подавання з 0,07 до 0,14 мм/об збільшується сила різання з 17,4 до 20,2 Н, а для фенопласту з 22 до 32 Н. Причому слід відзначити, що для ароматичного поліаміду спостерігається приблизно рівномірне збільшення сили різання протягом дослідженого інтервалу подавання, а для фенопласту спостерігається різке збільшення сил різання при подаванні понад 0,10 мм/об. Це пояснюється тим, що фенопласт є більш крихким матеріалом, ніж ароматичний поліамід і зі збільшенням подавання швидко руйнується за рахунок сколів, які негативно впливають на процес різання.

У результаті проведення досліджень встановлено, що оптимальним інтервалом швидкостей різання при токарній обробці ароматичного поліаміду фенілону С1 та фенопласту на основі ДФСФО є 1 до 2,5 м/с та 2,5

до 4 м/с відповідно. При даних значеннях швидкостей різання досліджуваних матеріалів сили різання мають мінімальні значення, а відповідно до цього і досягаються найкращі умови при механічній обробці. Установлено, що при обробці ароматичного поліаміду та фенопласту при оптимальних швидкостях різання вдається досягти шорсткості $R_a = 1,9$ мкм для ароматичного поліаміду та $R_a = 8,8$ мкм для фенопласту. Ці параметри відповідають досить високій чистоті обробки поверхні.

Досліджено вплив глибини різання на силу різання ароматичного поліаміду і фенопласту. Установлено, що з підвищенням цього параметра сила різання підвищується лінійно. Причому в зоні точіння не спостерігається аварійного підвищення сили різання. Відповідно до цього глибину різання для досліджених матеріалів можна вибирати з інтервалу від 0,5 до 2 мм, зберігаючи при цьому нормальний характер різання.

Досліджено вплив подавання на силу різання ароматичного поліаміду і фенопласту. Установлено, що з підвищенням цього параметра сила різання збільшується. Причому для ароматичного поліаміду це збільшення у дослідженому інтервалі від 0,07 до 0,14 мм/об не є значною, а для фенопласту, починаючи з 0,10 мм/об, сила збільшується у 1,5–2 рази. Тобто оптимальним подаванням при різанні фенілону С1 є значення з інтервалу 0,07–0,14 мм/об, а для фенопласту – з 0,07–0,10 мм/об.

Висновки до розділу 5

1 Розроблено технології виготовлення виробів на основі фенілону С1, фторопласту-4,ДФСФО та силікагелю з використанням стандартного підходу до переробки та за допомогою (in-situ) суміщення.

2 Визначено закономірності впливу часу перемішування та вмісту наповнювача на якість його розподілу в полімерній матриці при механічному способі суміщення та вмісту наповнювача при фізико-механічному (in-situ) суміщенні вихідних компонентів розроблених полімерних композицій. Установлено, що композиції, отримані за допомогою (in-situ) суміщення мають кращу якість розподілу вихідних компонентів порівняно з механічно отриманими, що є наслідком особливостей їх взаємодії, які виникають на молекулярному рівні при суміщенні дисперсних частинок термостійких полімерів з наповнювачем на стадії його синтезу.

3 З'ясовано оптимальні параметри формування (тиск та час витримки під тиском) брикетів з розроблених полімерних композицій на основі фенілону С1, фторопласту-4,ДФСФО та силікагелю від умісту в них наповнювача.

4 Описано закономірності впливу основних параметрів переробки досліджених термостійких полімерів та ПКМ на їх основні фізико-механічні властивості. Відповідно до цього, визначено оптимальні значення тисків, температур та часових інтервалів переробки розроблених ПКМ у виробі.

5 Надано рекомендації щодо вибору матеріалу та основних геометричних параметрів різальної кромки токарних різців для обробки отриманих заготовок з розроблених термостійких ПКМ. Визначено оптимальні параметри режимів різання (швидкість різання, подавання, глибина різання) для обробки заготовок з термостійких полімерів на основі фенілону С1, фторопласту-4,ДФСФО та силікагелю.

РОЗДІЛ 6. ВПЛИВ СКЛАДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТЕРМОСТІЙКИХ ПКМ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБІВ З НИХ

6.1 Вплив складів та технології отримання ПКМ на теплофізичні властивості виробів з них

Хімічне машинобудування практично неможливе без прогресу в галузі розробки якісно нових матеріалів конструкційного призначення. Одними із таких матеріалів є полімери, які, завдяки невеликій питомій вазі, високому рівню хімічної стійкості та невисокій собівартості виготовлення деталей перспективно використовувати у промисловості [225–228].

Основним недоліком таких матеріалів, який обмежує їх широке використання у промисловості, є відносно невисокий рівень їх теплофізичних властивостей, обумовлений природою та структурою полімерних матеріалів. Одним із варіантів подолання цього недоліку є вибір в якості полімерної основи матеріалів з високим рівнем термостійкості та наповнення їх матеріалами, здатними покращити рівень теплофізичних властивостей полімерної матриці [229; 230] та виступати в ролі матеріалів для направленоного регулювання рівня властивостей отриманих ПКМ. До найбільш термостійких полімерів належать ароматичні поліаміди, фторполімери та фенольні смоли. Тому їх і було обрано в якості полімерних матриць для створення термостійких ПКМ. Дані матеріали було наповнено силікагелем, який, завдяки своїй розвиненій поверхні та активним силанольним групам на ній, здатний до фізичної та хімічної взаємодії з молекулами вибраних полімерів [231].

Однією з основних теплофізичних характеристик ПКМ є їх термічна стабільність, яка визначається, як температура, при якій полімери не розм'якшуються і вироби з них не втрачають свою геометричну форму та механічну міцність при дії визначеного навантаження (теплостійкість), і при

якій у полімері не відбувається хімічна зміна структури протягом деякого часу у визначеному навколишньому середовищі, яка впливає на його властивості (стійкість до дії температури) [29; 30]. Вибір цих температур при визначенні термічної стійкості полімерів та ПКМ на їх основі обумовлений умовами використання деталей з них.

Знаходження першої температури (теплостійкості) полягає у визначенні температури розм'якшення за методом Віка [232; 233]. Для знаходження другої температури (стійкості до дії температури) необхідно проводити термогравіметричний аналіз досліджених матеріалів [233].

Результати визначення температури розм'якшення за методом Віка від умісту силікагелю у ПКМ на основі термостійких полімерів, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (in situ), подано на рис. 6.1–6.2.

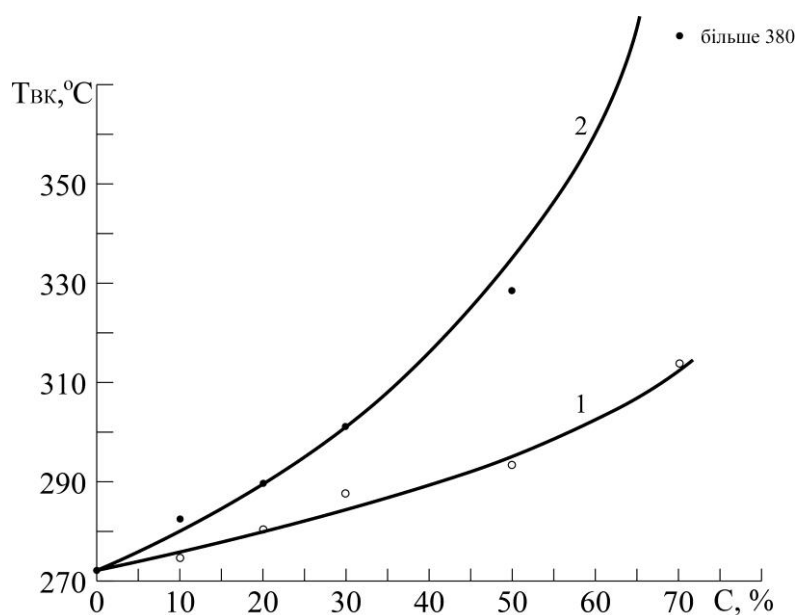


Рисунок 6.1 – Залежність температури розм'якшення за методом Віка T_{BK} від умісту силікагелю у ПКМ на основі фенілону С1, отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що характер залежностей температури розм'якшення за методом Віка від умісту силікагелю у ПКМ на основі фенілону С1, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (in situ), подібний. Так, зі збільшенням умісту силікагелю у ПКМ температура розм'якшення за Віка збільшується. Причому більш інтенсивне збільшення цього параметра спостерігається у матеріалах, отриманих за допомогою (in-situ) суміщення, порівняно з ПКМ, отриманими за стандартною технологією. Так, температури розм'якшення за методом Віка для матеріалів, отриманих за стандартною технологією, збільшується з 272 (для вихідного полімеру) до 310°C (для ПКМ з 70 % умістом наповнювача), а для матеріалів, отриманих за допомогою (in-situ) суміщення, – з 272 (для вихідного полімеру) до температур понад 380°C (для ПКМ з 70 % умістом наповнювача). Отримати більш точне значення цих температур не вдалося внаслідок обмежень, накладених дослідницькою апаратурою.

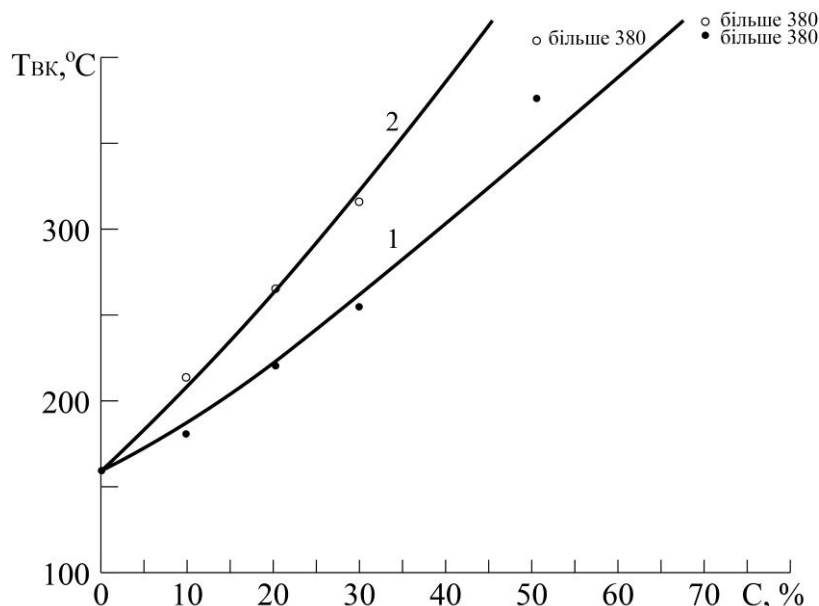


Рисунок 6.2 – Залежність температури розм'якшення за методом Віка T_{BK} від умісту силікагелю у ПКМ на основі фторопласт-4, отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

При проведенні досліджень впливу вмісту силікагелю у ПКМ на основі фторопласту-4 та технології їх отримання на температуру розм'якшення за методом Віка встановлено, що отримані залежності мають подібний характер. Збільшення вмісту силікагелю у ПКМ призводить до зміщення температур розм'якшення за Віка в бік більших значень. Причому більш інтенсивне збільшення цього параметра спостерігається в матеріалах, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*), порівняно з ПКМ, отриманими за стандартною технологією. Так, температури розм'якшення за методом Віка для матеріалів, отриманих за стандартною технологією та за допомогою (*in-situ*) суміщення, збільшується з 164 (для вихідного полімеру) до температур понад 380°C (для ПКМ з 70 % умістом наповнювача).

Збільшення температури розм'якшення за методом Віка обумовлено фізичною та хімічною взаємодією молекул досліджених полімерів з активною поверхнею наповнювача, внаслідок якої обмежується рухомість макромолекул фенілону С1 та фторопласту-4 при дії на них температури, що і сприяє збільшенню значень теплостійкості [29]. Загальне підвищення цього параметра розширює температурний інтервал експлуатації розроблених ПКМ на основі фенілону С1 на 5–120°C та фторопласту-4 на 20–230°C залежно від вмісту наповнювача та технології отримання ПКМ.

Причому слід відзначити, що матеріали, отримані за допомогою суміщення (*in situ*), мають на 10–30 % вищі значення температури розм'якшення за методом Віка, 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 [234]. Результати подано на рис. 6.3–6.5

Термогравіметричні криві фенілону та ПКМ на його основі (рис. 6.3), отриманих різними технологіями, мають подібний характер. Так, суттєва втрата ваги цих матеріалів починається з температури 55–60°C і триває до температур 150–200°C залежно від умісту силікагелю та технології отримання ПКМ. Зважаючи на те, що ароматичні поліаміди є полярними матеріалами, які насичуються великою кількістю вологи, ця втрата ваги пов'язана з її випаровуванням. Причому вільна волога випаровується при температурах від 55 до 120°C, а зв'язана від 120 до 200°C.

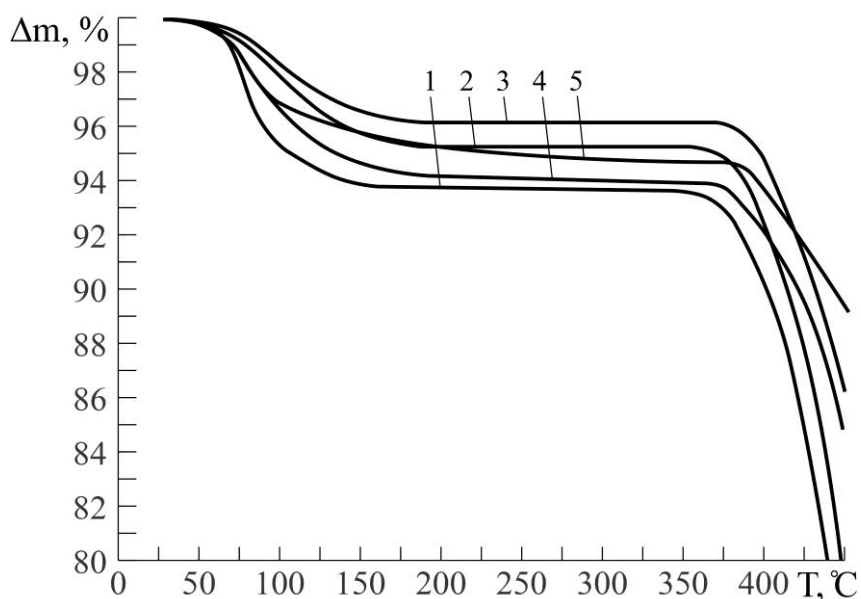


Рисунок 6.3 – Термогравіметричні криві вихідного фенілону С1 (1) та ПКМ 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель (2,4) та 70 % фенілон С1 + 30 % силікагель (3,5), отриманих за стандартною технологією (2,3) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (4,5)

При подальшому підвищенні температури з 200 до 350°C втрата ваги досліджуваними матеріалами не спостерігається. Починаючи з температури 350°C, для всіх досліджених матеріалів спостерігається різка втрата ваги, яка ймовірно пов'язана з процесами розпаду поліаміду за реакціями гідролізу, амінолізу та конденсації [49]. Слід відзначити, що введення силікагелю до складу фенілону С1 призводить до зміщення цієї температури у бік вищих

температур. Так, температура початку активної деструкції ПКМ на основі фенілону на 5–15°C (для ПКМ з 10 % наповненням) і на 20–30°C (для ПКМ з 30 % наповненням) вища, ніж у вихідного фенілону С1. Слід зазначити, що матеріали, отримані за допомогою (in-situ) суміщення, мають на 7–15°C більші значення температури початку активної деструкції, ніж ПКМ, отримані за стандартною технологією.

Термогравіметричні криві фторопласту-4 та ПКМ на його основі, отриманих різними технологіями, мають деякі відмінності (рисунок 6.4). А саме в області температур від 55 до 200°C у вихідного фторопласту-4 не спостерігається втрата ваги, на відміну від ПКМ на його основі. Це пояснюється тим, що фторопласт-4 є гідрофобним матеріалом, який не має у своєму складі вільної та зв'язаної вологи чи її кількість є незначною [235].

Полімерні композиційні матеріали на основі фторопласту-4 мають у своєму складі силікагель, поверхня якого насичена зв'язаною та вільною вологою, тому в цих матеріалів спостерігається зменшення ваги при температурах з 55 до 200°C. При подальшому підвищенні температур до 430°C характеризується незмінною вагою досліджуваних матеріалів. І вже починаючи з температури 430°C, для фторопласту-4 і 450°C для ПКМ на його основі спостерігається різка втрата ваги, пов'язана із деполімеризацією макромолекули фторопласту-4 з виділенням тетрафторетилену [45]. Тобто за температуру початку активної деструкції фторопласту-4 та ПКМ на його основі слід вважати саме ці температури. Слід звернути увагу, що при збільшенні вмісту силікагелю ця температура зміщується у сторону вищих температур.

Так, для матеріалів з 10 та 20 % наповненням силікагелем температури активної деструкції знаходяться в інтервалах від 450 до 465°C і від 465 до 477°C відповідно залежно від способу отримання ПКМ, що на 20–50°C вище, ніж для вихідного фторопласту-4. Слід зазначити, що матеріали, отримані за допомогою суміщення (in situ), мають на 10–15°C вищі значення температури

початку активної деструкції, ніж ПКМ, отримані за стандартною технологією.

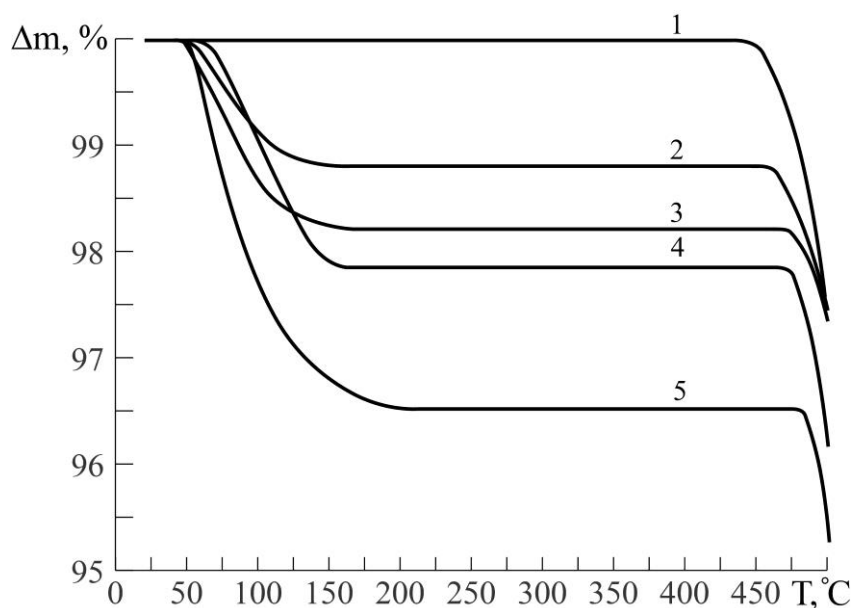


Рисунок 6.4 – Термогравіметричні криві вихідного фторопласту-4 (1) та ПКМ 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель (2,4) та 80 % фторопласт-4 + 20 % силікагель (3,5), отримані за стандартною технологією (2,3) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (4,5)

Результати термогравіметричних досліджень ДФСФО та ПКМ на його основі, отримані за стандартною технологією і за допомогою суміщення (*in situ*), унаочнено на рис. 6.5.

Характер цих кривих для вихідного полімеру та ПКМ на його основі є подібним. Так, у початковий період від 60 до 225°C інтенсивна втрата ваги ДФСФО та ПКМ на його основі пов'язана із видаленням вільної та зв'язаної води, а також летких компонентів (формальдегід тощо), які не вступили в реакцію зшивання олігомерного продукту при його переробці у виробі.

При температурах, починаючи з 320°C, спостерігається інтенсивна втрата ваги досліджених матеріалів, пов'язана із руйнуванням дифенілолсульфонових фрагментів фенольної матриці [236].

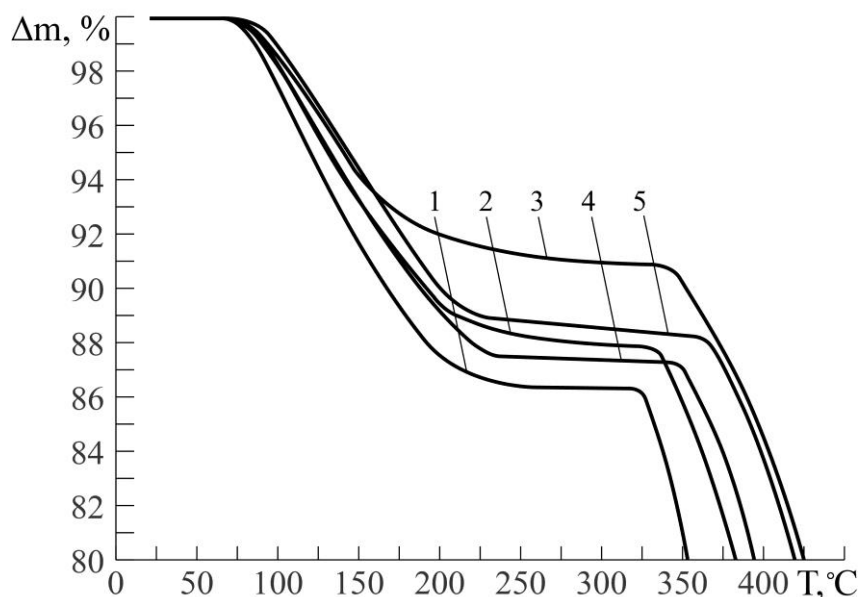


Рисунок 6.5 – Термогравіметричні криві вихідного ДФСФО (1) та ПКМ 50 % ДФСФО + 50 % силікагель (2,4) та 25 % ДФСФО + 75 % силікагель (3,5), отриманих за стандартною технологією (2,3) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (4,5)

Слід відзначити, що зі збільшенням концентрації силікагелю в ДФСФО температура початку активної деструкції зміщується в область вищих температур. Так, для матеріалу 50 % ДФСФО + 50 % силікагель ця температура лежить в інтервалі від 325–340°C, а для матеріалу 25 % ДФСФО + 75 % силікагель – від 335 до 360°C залежно від способу отримання ПКМ. Слід зазначити, що матеріали, отримані за допомогою суміщення (*in situ*) мають на 25–35°C вищі значення температури початку активної деструкції, ніж ПКМ, отримані за стандартною технологією.

Підвищення температури початку активної деструкції ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО, наповнених силікагелем, порівняно із вихідними полімерними матрицями пояснюється хімічною (за рахунок створення водневих зв'язків) та фізичною (за рахунок адсорбції) взаємодією макромолекул полімерів із активною поверхнею силікагелю, яка має велику

кількість пор, мікропор та субмікропор, покриті активними «силанольними» групами [237; 238].

Також це підвищення розширяє інтервал температур експлуатації розроблених ПКМ на 20–50°C залежно від складу матеріалу та технології його отримання.

Однією із основних теплофізичних властивостей деталей із розроблених ПКМ є їх теплове розширення, яке полягає у зміні розмірів та форми деталей під дією температури і визначається за значенням коефіцієнта термічного лінійного розширення [239]. Для більшості полімерів значення теплового розширення в 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.

На рис. 6.6 подано залежності коефіцієнта термічного лінійного розширення (КТЛР) від умісту силікагелю у ПКМ на основі фенілону С1, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій. КТЛР для матеріалів на основі фенілону С1 визначено при 200°C.

Отримані залежності КТЛР ПКМ на основі фенілону С1 залежно від умісту силікагелю та технології їх отримання мають подібний характер. Так, зі збільшенням умісту наповнювача в полімерній матриці спостерігається зменшення лінійного розширення отриманих ПКМ. Для вихідного фенілону С1 КТЛР дорівнює $390 \times 10^{-7} 1/^{\circ}\text{C}$, для ПКМ, залежно від технології їх отримання, з 10 % силікагелю – $330 \div 360 \times 10^{-7} 1/^{\circ}\text{C}$, а вже для матеріалів з 30 % наповнювача – $320 \div 340 \times 10^{-7} 1/^{\circ}\text{C}$.

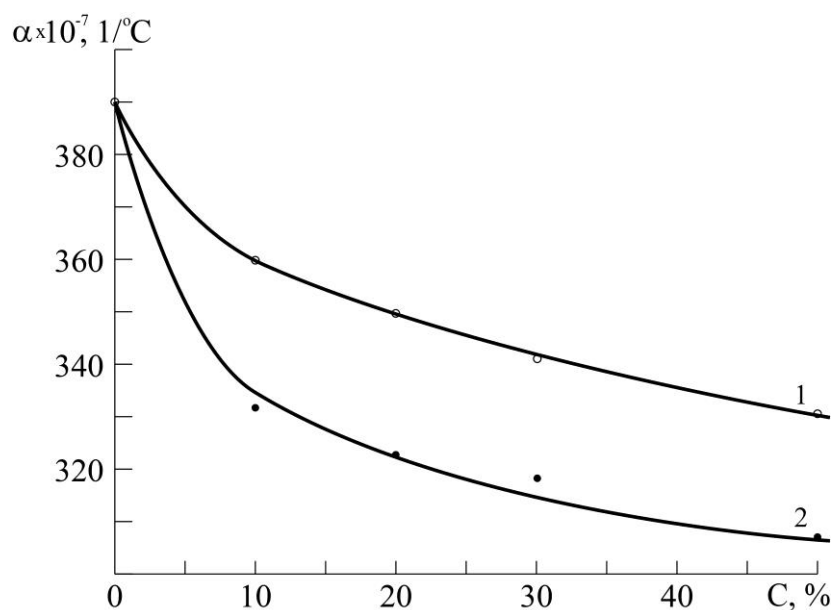


Рисунок 6.6 – Залежності коефіцієнта термічного лінійного розширення α від умісту силікагелю у ПКМ на основі фенілону С1, отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Причому слід відзначити, що матеріали, отримані за допомогою (*in situ*) суміщення, мають на 9–11 % кращі значення КТЛР, що обумовлено кращою взаємодією полімерів з наповнювачем на границі розділу фаз у даних матеріалах порівняно з стандартно отриманими.

Залежності КТЛР від умісту силікагелю у ПКМ на основі фторопласту-4, отриманих за стандартною технологією та за допомогою (*in situ*) суміщення подано на рис. 6.7. Ці залежності отримано за значеннями КТЛР, який установлено при температурі 120°C.

Отримані залежності КТЛР від умісту силікагелю у ПКМ та способу їх отримання мають подібний характер. Зі збільшенням неорганічного наповнювача в полімері зменшується значення КТЛР. Причому це зменшення досить суттєве порівняно з вихідним полімером. Так, для фторопласту-4 значення КТЛР дорівнює $980 \times 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$, а для матеріалів на

його основі залежно від умісту наповнювача в ПКМ та способу їх отримання – від 300 до $600 \times 10^{-7} 1/^{\circ}\text{C}$, що на $40\text{--}70\%$ менше, ніж у вихідного полімеру.

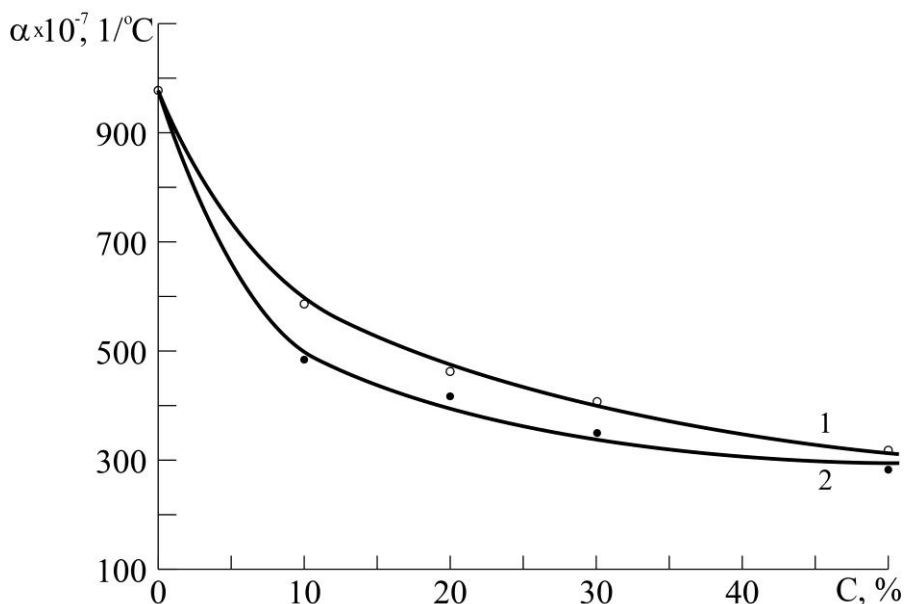


Рисунок 6.7 – Залежності коефіцієнта термічного лінійного розширення (α) від умісту силікагелю у ПКМ на основі фторопласту-4, отримані за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Відповідно до проведених досліджень також встановлено, що технологія отримання ПКМ впливає на значення КТЛР. Так, матеріали, отримані за допомогою суміщення (in situ), мають на $10\text{--}20\%$ менші значення КТЛР порівняно із ПКМ, отриманими за стандартною технологією.

Значення КТЛР для ДФСФО та ПКМ на його основі подано на рис. 6.8. Значення КТЛР для матеріалів на основі ДФСФО визначено при температурі 200°C .

Залежності КТЛР ПКМ, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (in situ), від умісту силікагелю мають подібний характер. Зі збільшенням умісту силікагелю в полімері з 0 до 75% спостерігається зменшення значень КТЛР. так, для вихідного ДФСФО КТЛР дорівнює $380 \times 10^{-7} 1/^{\circ}\text{C}$, для матеріалу з умістом наповнювача 25% - $260\text{--}280 \times 10^{-7} 1/^{\circ}\text{C}$ і при вмісті наповнювача 75% - $210\text{--}240 \times 10^{-7} 1/^{\circ}\text{C}$.

Слід відзначити, що за своїми значеннями КТЛР ПКМ, отримані за допомогою суміщення (in situ), перевищують аналогічні, отримані за стандартною технологією.

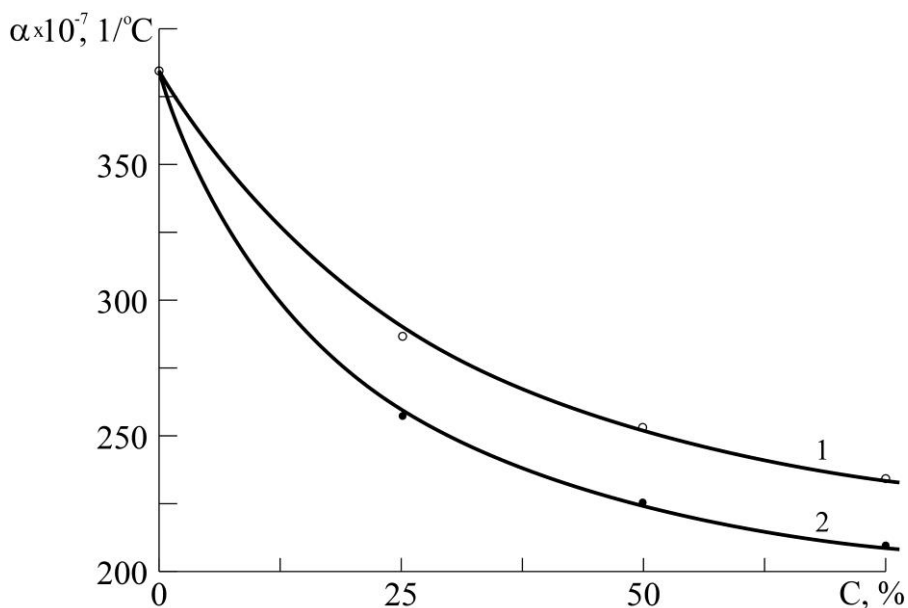


Рисунок 6.8 – Залежності коефіцієнта термічного лінійного розширення (α) від вмісту силікагелю у ПКМ на основі ДФСФО, отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Зменшення КТЛР ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО при наповненні силікагелем порівняно із вихідними полімерними матрицями пояснюється меншим термічним розширенням ПКМ за рахунок зменшення рухомість макромолекул досліджених полімерних матриць при взаємодії із силікагелем. 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 [2].

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 [240].

6.2 Вплив складів та технології отримання ПКМ на фізико-механічні властивості виробів з них

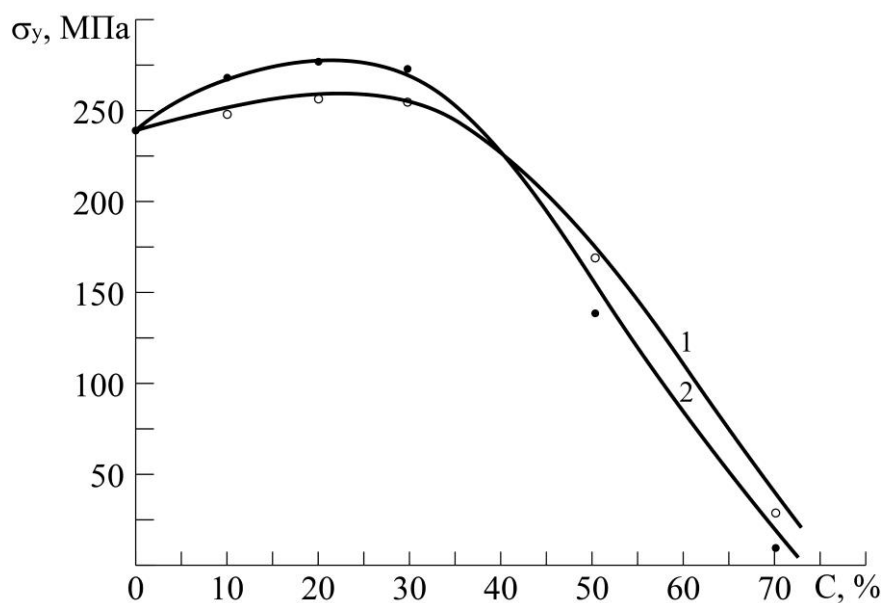
Деталі з розроблених нами ПКМ на основі термостійких полімерів та силікагелю можуть використовуватися в різних конструкційних вузлах машин і механізмів, на які, у більшості випадків, діють статичні та динамічні навантаження [241–243], що призводять до їх незворотної деформації з наступним руйнуванням. Уведення активного наповнювача силікагелю у склад термостійких матеріалів повинно підвищити рівень фізико-механічних властивостей отриманих ПКМ, що дозволить використовувати деталі з них у більш жорстких умовах роботи, зберігаючи при цьому високий рівень надійності та довговічності машин і механізмів.

Основними фізико-механічними властивостями є напруження на межі текучості при стисканні, модуль пружності та твердість [244]. Тому актуальним завданням є дослідження впливу вмісту силікагелю у ПКМ, отриманих за різними технологіями та їх рівень цих властивостей.

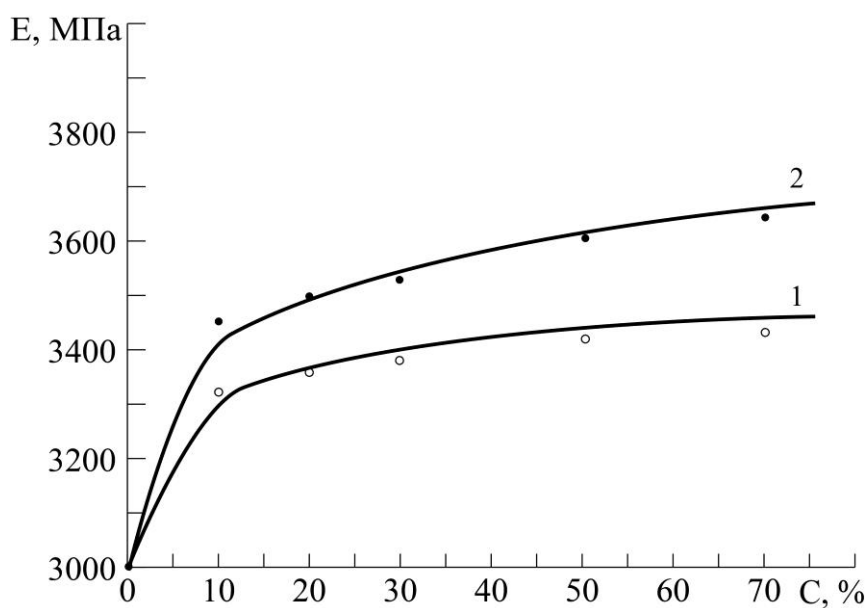
На рис. 6.9 унаочнено залежності напруження при межі текучості та модуля пружності при стисканні від умісту силікагелю у фенілоні С1.

Відповідно до проведених досліджень залежності напруження при межі текучості при стисканні від умісту силікагелю у фенілоні С1 для ПКМ, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*), мають подібний характер. Причому в області наповнення ПКМ силікагелем 15–25 % для всіх досліджених матеріалів спостерігається екстремум властивостей. Так, напруження при межі текучості при стисканні при вмісті наповнювача від 0 до 20 % збільшується від 242 до 268–282 МПа для матеріалів, отриманих за різними технологіями. Подальше збільшення вмісту наповнювача призводить до зменшення цього параметра і при 70 %

наповненні він складає 10-20 МПа. Слід відзначити, що матеріали, отримані за допомогою суміщення (*in situ*), мають на 10–15 МПа кращі значення напруження при межі текучості при стисканні, ніж отримані за стандартною технологією.



а



б

Рисунок 6.9 - Залежності напруження при межі текучості σ_y (а) та модуля пружності E (б) при стисканні від умісту силікагелю C у фенілоні С1 для ПКМ, отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Залежності модуля пружності при стисканні від умісту силікагелю у фенілоні С1 для ПКМ, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*), мають також подібний характер. Зі збільшенням концентрації наповнювача модуль пружності збільшується. Причому більш інтенсивне його збільшення спостерігається при збільшенні вмісту наповнювача з 0 до 10 % з 3000 до 3250–3450 МПа для матеріалів, отриманих за різними технологіями. При подальшому збільшенні вмісту наповнювача до 70 % модуль пружності збільшується до 3400–3620 МПа. Значення модуля пружності для матеріалів, отриманих за різними технологіями, відрізняються. Так, матеріали, отримані за допомогою (*in-situ*) суміщення, мають на 5–7 % більші значення цього параметра, ніж отримані за стандартною технологією.

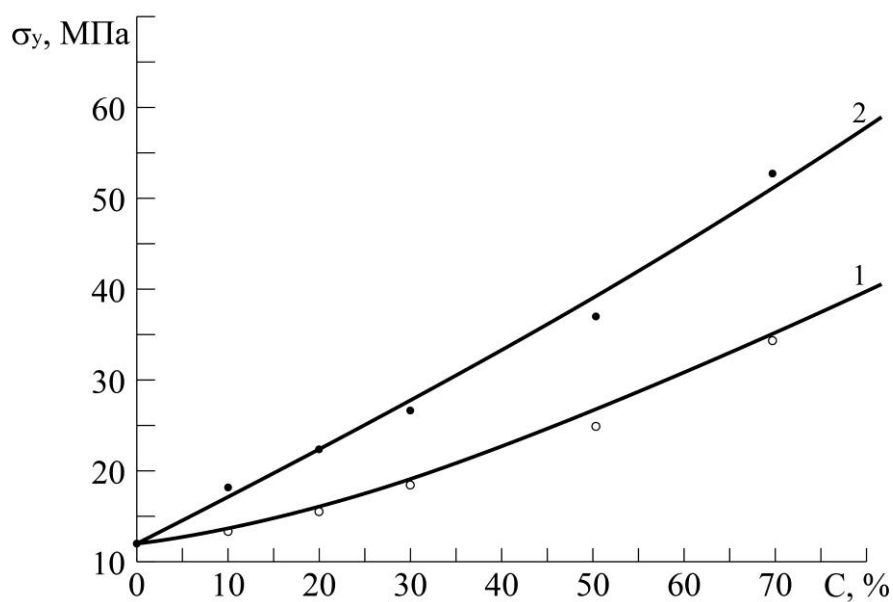
На рис. 6.10 представлено залежності напруження при межі текучості та модуля пружності при стисканні від умісту силікагелю у фторопласті-4.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що залежності напруження при межі текучості при стисканні від умісту силікагелю у фторопласті-4 для ПКМ, отриманих за стандартною технологією та за допомогою (*in-situ*) суміщення, мають подібний характер.

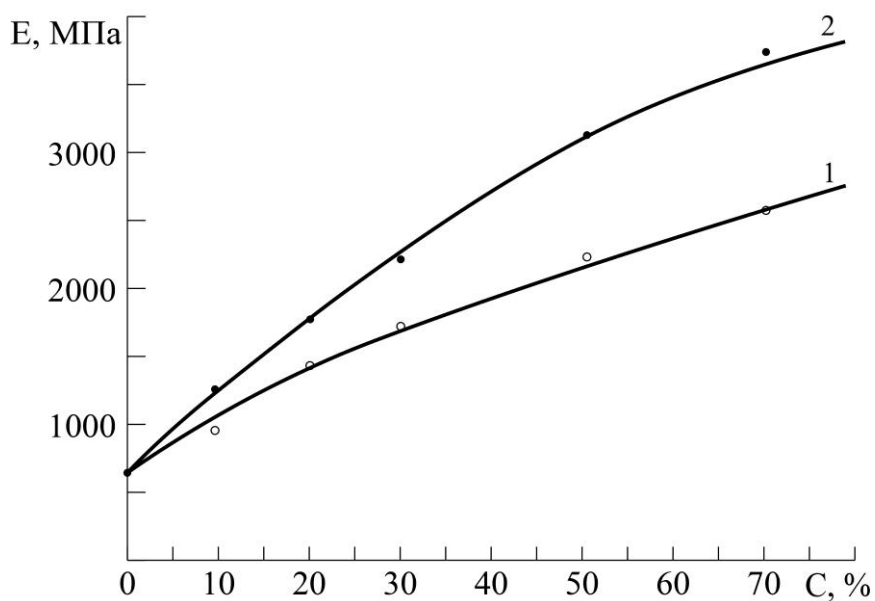
Так, зі збільшенням вмісту силікагелю у фторопласті збільшується значення напруження при межі текучості при стискання. Так, для вихідного фторопласту-4 цей параметр складає 12 МПа, а вже при 70 % наповненні – 40–60 МПа для матеріалів, отриманих за різними технологіями. Слід відзначити, що значення межі текучості при стисканні для ПКМ, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*), на 10–30 %, залежно від умісту наповнювача, кращі, ніж у матеріалів, отриманих за стандартною технологією.

Залежності модуля пружності при стисканні від умісту силікагелю у фторопласті-4 для ПКМ, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*) мають подібний характер. Зі збільшенням вмісту наповнювача з 0 до 70 % модуль пружності збільшується з 610 до

2500–3500 МПа залежно від технології отримання ПКМ. Причому матеріали, отримані за допомогою суміщення (*in situ*) мають більші значення модуля пружності, ніж стандартно отримані ПКМ.



а



б

Рисунок 6.10 - Залежності напруження при межі текучості σ_y (а) та модуля пружності E (б) при стисканні від умісту силікагелю C у фторопласті-4 для ПКМ, отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

На рис. 6.11 представлено залежності напруження при межі текучості та модуля пружності при стисканні від умісту силікагелю у ДФСФО.

Залежності межі текучості при стисканні ПКМ на основі ДФСФО та силікагелю, отриманих за стандартною технологією та за допомогою (in-situ) суміщення, мають подібний характер з екстремумом в області наповнення 20–30 %. При цьому при збільшенні вмісту силікагелю в ДФСФО з 0 до 25 % спостерігається збільшення цього параметра з 170 до 181 МПа. При подальшому збільшенні вмісту наповнювача до 75 % спостерігається поступове зменшення межі текучості при стисканні досліджуваних матеріалів до 25–45 МПа залежно від технології отримання ПКМ. Значення цього параметра для матеріалів, отриманих за допомогою суміщення (in situ), при наповненні від 0 до 45 % дорівнюють стандартно отриманим матеріалам. Починаючи з 45 %, спостерігається різниця в цих значеннях, яка складає від 7 до 50 % залежно від умісту наповнювача. Так, при максимальному наповненні 75 % напруження при межі текучості при стисканні для матеріалів, отриманих за допомогою (in-situ) суміщення, дорівнює 45 МПа, а для матеріалів, отриманих за стандартною технологією 22 МПа.

Залежності модуля пружності при стисканні досліджуваних матеріалів на основі ДФСФО та силікагелю, отриманих за стандартною технологією та за допомогою (in-situ) суміщення, мають подібний характер. Так, зі збільшенням умісту наповнювача у полімері спостерігається збільшення цього параметра. Так, у вихідної фенольної смоли модуль пружності при стисканні дорівнює 3500 МПа, а при максимальному 75 % наповненні він дорівнює 4600 МПа для матеріалів, отриманих за допомогою суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій. Для цих матеріалів він на 150–250 МПа має більші значення, ніж для ПКМ, отриманих за стандартною технологією.

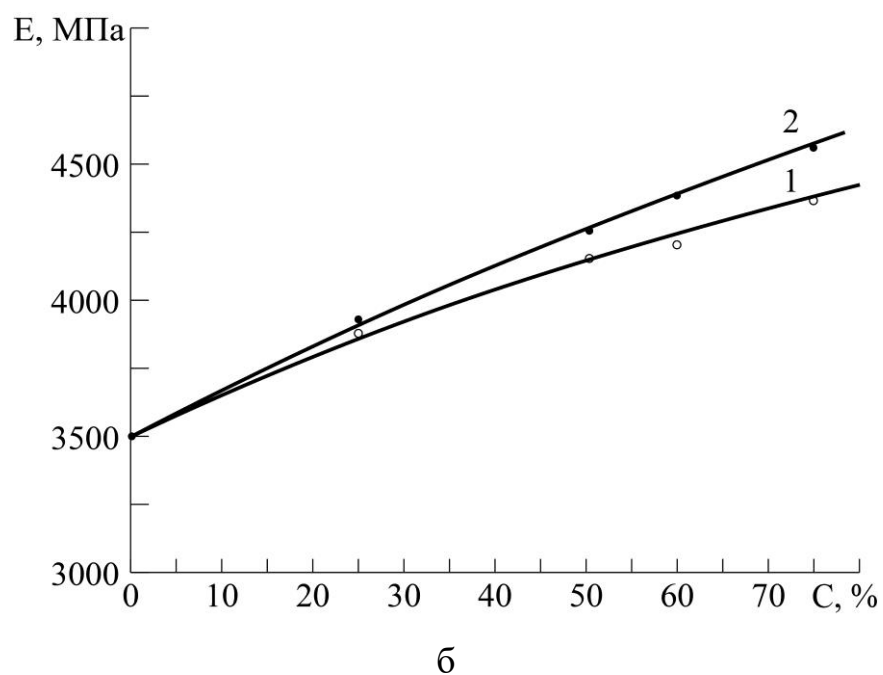
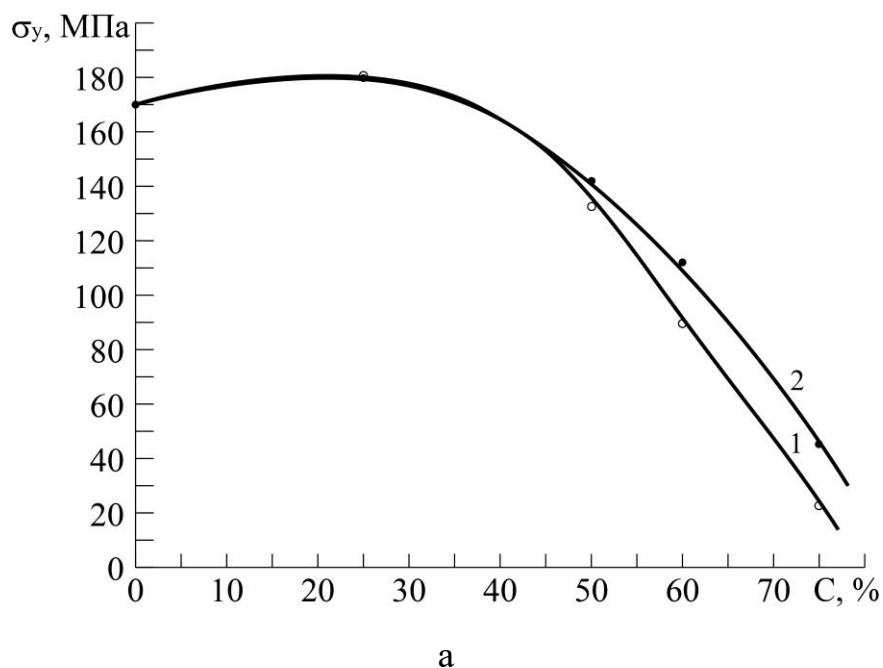


Рисунок 6.11 - Залежності напруження при межі текучості σ_y (а) та модуля пружності E (б) при стисканні від умісту силікагелю C у ДФСФО для ПКМ, отриманих за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2)

Збільшення напруження при межі текучості та модуля пружності при стисканні ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО, наповнені силікагелем, порівняно із вихідними полімерними матрицями пояснюється

підсилювальною дією наповнювача на полімер, яка полягає в їх фізичній та хімічній взаємодії. Фізична взаємодія пов'язана із адсорбцією молекул полімерів на поверхні силікагелю. При цьому створюються високоорієнтовані адсорбційні шари, які сприяють покращенню механічної міцності розроблених матеріалів. Хімічна взаємодія пов'язана із створенням водневих зв'язків між атомами молекул полімерів та активними силанольними групами на поверхні силікагелю [245].

Результати досліджень твердості матеріалів на основі фенілону С1, фторопласту-4 таДФСФО подано в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Твердість ПКМ на основі термостійких полімерів, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій

Матеріал	Уміст силікагелю	Твердість НВ, (МПа) матеріалів, отриманих за	
		стандартною технологією	суміщення in situ
Фенілон С1 + силікагель	0	203	
	10	235	247
	20	202	230
	30	180	202
	50	150	155
Фторопласт-4 + силікагель	0	42	
	10	48	50
	20	54	56
	30	58	60
	50	65	67
ДФСФО + силікагель	0	140	
	25	191	198
	50	192	250
	75	80	301

Відповідно до цих результатів встановлено, що значення твердості збільшуються з уведенням силікагелю в усі полімерні матриці. Так, для ПКМ на основі фенілону С1 це збільшення складає 15–20 %, на основі фторопласту-4 – 35–37 %, на основі ДФСФО – 39–50 % залежно від технології отримання ПКМ порівняно з ненаповненими полімерами. Причому для ПКМ на основі фенілону С1 найбільші значення твердості

мають матеріали, наповнені 10 % силікагелю, для ПКМ на основі фторопласту – 50 %, для матеріалів на основіДФСФО – 50 % (ПКМ отримані за стандартною технологією) та – 75 % (для ПКМ, отримані за допомогою (in situ) суміщення). Слід відзначити, що значення твердості для всіх досліджених матеріалів, отриманих за допомогою (in-situ) суміщення, мають більші значення, ніж стандартно отримані матеріали.

Твердість розроблених ПКМ зростає порівняно із вихідними полімерами за рахунок того, що до складу полімеру вводиться наповнювач з високим значенням твердості, який взаємодіє з молекулами полімеру, підсилюючи при цьому отримані ПКМ.

Висновки до розділу 6

1 З'ясовано закономірності щодо впливу вмісту силікагелю та технології отримання ПКМ на основі термостійких полімерів (фенілон С1, фторопласт-4, ДФСФО) на їх рівень теплофізичних та фізико-механічних властивостей.

2 Визначено, що введення силікагелю у фенілон С1, фторопласт-4 та ДФСФО сприяє збільшенню температури розм'якшення за методом Віка і температури початку активної деструкції та зменшенню температурного розширення отриманих ПКМ, що обумовлено фізичною та хімічною взаємодією молекул досліджених полімерів з активною поверхнею наповнювача, унаслідок якої обмежується рухомість макромолекул полімерів при дії на них температури. Це сприяє покращенню експлуатаційних характеристик деталей з розроблених ПКМ за рахунок розширення інтервалу їх робочих температур та покращення умов експлуатації в парах зі сталлю, кольоровими металами та їх сплавами.

3 Описано вплив технологій отримання термостійких ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО на їх теплофізичні властивості і визначено, що ПКМ, отримані за допомогою (in-situ) суміщення мають на 10–20 % кращі значення температури розм'якшення за методом Віка, температури початку активної деструкції та лінійного розширення, що обумовлено кращою взаємодією полімерів з наповнювачем на границі розділу фаз у даних матеріалах порівняно з стандартно отриманими.

4 Визначено, що введення силікагелю у фенілон С1, фторопласт-4 та ДФСФО сприяє покращенню значень межі текучості, модуля пружності при стисканні та твердості на 10–20 %, що є наслідком підсилювальної дії наповнювача на полімер, яка полягає у фізичній та хімічній взаємодії його поверхні з молекулами полімерів. Знайдено оптимальний уміст наповнювача у полімерах (для фенілону С1 – 10–15 %, для ДФСФО – 30–40 %), при якому

спостерігається максимальні значення фізико-механічних властивостей розроблених ПКМ.

5 Установлено закономірності впливу технологій отримання термостійких ПКМ на їх фізико-механічні властивості. Так, матеріали, отримані за допомогою (in-situ) суміщення, мають на 5–10 % вищий рівень межі текучості, модуля пружності при стисканні та твердості порівняно з стандартно отриманими, що пояснюється кращим розподілом наповнювача в об'ємі полімеру, зміною структури ПКМ та покращення за рахунок цього взаємодії на границі розділу фаз полімер-наповнювач.

РОЗДІЛ 7. ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБІВ З ТЕРМОСТІЙКИХ ПКМ

Споживча спроможність сучасного суспільства підвищується із року в рік. Для її задоволення підприємства всіх галузей промисловості використовують машини і механізми з високим рівнем продуктивності, які, у більшості випадків, є досить енергоємними (відомо, що енергія, яка споживається обладнанням на 70–80 % витрачається на компенсацію втрат на тертя у вузлах машин і механізмів) [246]. Підвищення продуктивності машин і механізмів досить часто відбувається за рахунок інтенсифікації роботи їх основних вузлів, що у свою чергу призводить до зменшення їх надійності.

Тому зменшення втрат на тертя у вузлах машин і механізмів та підвищення рівня їх надійності є важливими і актуальними завданнями.

Є два основних шляхи їх вирішення:

- розробка та впровадження нових конструкцій вузлів тертя машин і механізмів;
- створення нових матеріалів з високим рівнем трибологічних властивостей для вузлів тертя.

Розробка та впровадження нових конструкцій вузлів тертя машин і механізмів є досить складним з технічної та матеріальної точки зору завданням. У більшості випадків це призводить до значної зміни конструкції наявного обладнання та підвищення його собівартості. Тому такий варіант не завжди є доцільним.

Створення нових матеріалів для вузлів тертя машин і механізмів не потребує значних капіталовкладень, пов'язаних зі зміною їхніх конструкцій, і в деяких випадках дозволяє не тільки зменшити опір при терті, підвищити надійність машин і механізмів, але й покращити їхні експлуатаційні характеристики. Це відбувається за рахунок спроможності роботи таких матеріалів при високому рівні навантажень, температур та швидкостей

ковзання, в агресивних, абразивних середовищах та в режимах тертя без змащування і з граничним змащуванням.

Одним із найбільш перспективних матеріалів, спроможних зменшити тертя та підвищити рівень надійності вузлів машин і механізмів, є полімери та ПКМ на їх основі [247–251]. Порівняно із традиційними матеріалами, що використовуються у вузлах тертя (металами та їх сплавами) вони мають меншу вагу, більш технологічні при переробці у вироби (відповідно мають меншу вартість), можуть працювати при дії агресивних та абразивних середовищ при терті без змащування і в режимах із граничним змащуванням.

До полімерів, які мають найкращий рівень трибологічних властивостей належать ароматичні поліаміди, фторполімери та ПКМ на їх основі. Для покращення трибологічних властивостей ароматичні поліаміди і фторполімери наповнюють шаруватими матеріалами (графіт, дисульфід молібдену, нітрид бору тощо), органічними та неорганічними волокнами, дисперсними металами тощо [252–256]. Однак ці композити мають низку недоліків: достатньо високий рівень собівартості та невисокий рівень фізико-механічних і теплофізичних властивостей. Тому актуальним завданням є розробка ПКМ на основі ароматичних поліамідів і фторполімерів без цих недоліків та можуть бути використані у вузлах тертя машин і механізмів, які працюють при високому рівні навантажень і температур.

7.1 Вибір оптимальних структурних та морфологічних параметрів сталевого зразка при терті з ПКМ

Деталі з розроблених ПКМ на основі ароматичного поліаміду і фторполімеру у вузлах тертя машин і механізмів у більшості випадків працюють у парі зі сталлю. Найчастіше деталі з полімерів використовуються в якості підшипників ковзання і кочення, напрямних втулок, елементів торцевих ущільнень [257–259]. Стальні деталі, з якими вони контактують, зазвичай виготовляються із вуглецевих та легованих сталей, із заздалегідь

визначеними структурними та морфологічними параметрами. Основним структурним параметром сталевій деталі у вузлах тертя є його твердість, яка змінюється в інтервалі від 10 до 54 HRC, а основним морфологічним параметром є шорсткість, яка змінюється в інтервалі від 0,3 до 2,5 мкм залежно від призначення та технічної характеристики вузла загалом [260]. Тому доцільно дослідити вплив цих параметрів на основні трибологічні властивості термостійких полімерів (фенілон С1 та фторопласт-4) при фрикційній взаємодії зі сталлю, а також визначити їх оптимальні значення.

Результати досліджень впливу твердості сталевій деталі пари тертя полімер – сталь на коефіцієнт тертя та вагове зношування унаочнено на рис. 7.1. Експерименти було проведено при значеннях шорсткості сталевій деталі пари тертя $R_a = 1,25$ мкм.

Відповідно до результатів досліджень встановлено, що характер графіків залежностей коефіцієнта тертя та вагового зношування фенілону С1 та фторопласту-4 від твердості сталевій деталі при фрикційній взаємодії полімерів зі сталлю є подібним. Зі збільшенням твердості значення триботехнічних характеристик досліджених пар тертя збільшуються. Причому найінтенсивніше зміна твердості впливає на трибологічні властивості полімеру фенілону С1, ніж фторопласту-4. Так, коефіцієнт тертя при фрикційній взаємодії фенілону С1 зі сталлю змінюється від 0,39 до 0,47, а для фторопласту-4 – від 0,21 до 0,26 при підвищенні твердості сталю зразка від 10 до 55 HRC. Масове зношування для ароматичного поліаміду фенілону змінюється від 0,032 до 0,12, а для фторопласту – від 0,022 до 0,058.

Кращі значення триботехнічних характеристик у парах тертя із фторопластом-4 пояснюються тим, що фторопласт є більш інертним полімером, ніж фенілон С1 і при фрикційній взаємодії зі сталлю не виявляє активної дії до неї [261]. При цьому внаслідок своєї структури при терті фторопласту по сталевій поверхні спостерігається створення продуктів фрикційної взаємодії, які швидко формують острівця перенесення полімеру

на сталеву поверхню, сприяючи при цьому зменшенню значень тертя та зношування полімеру [262].

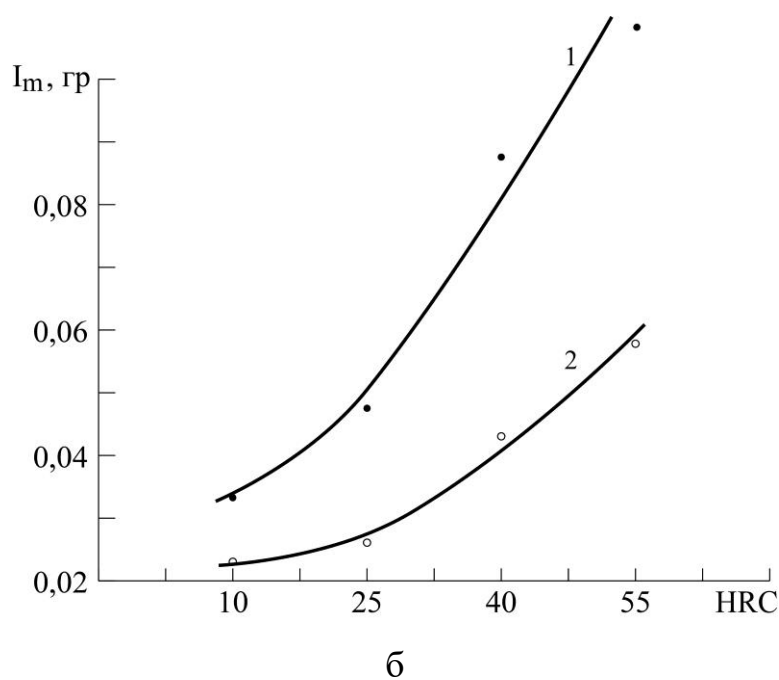
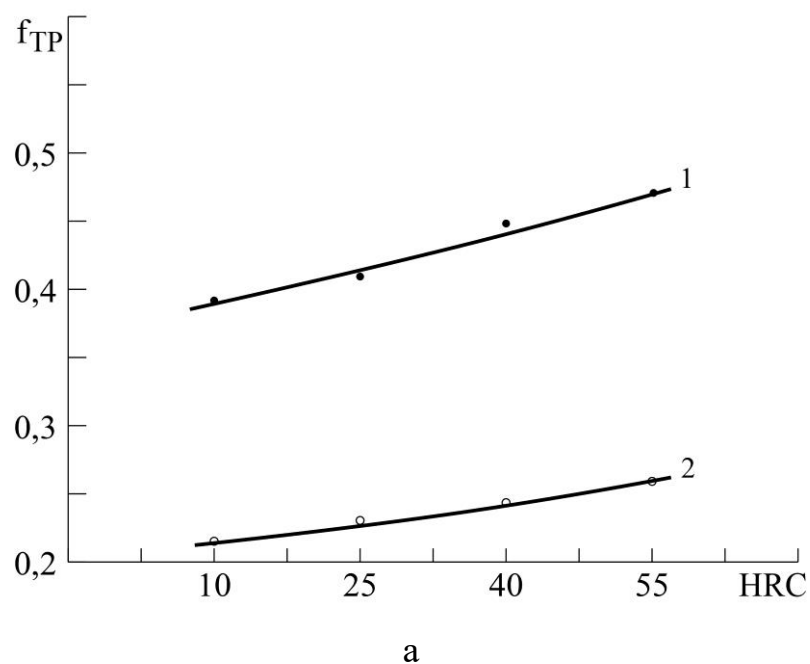


Рисунок 7.1 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та вагового зношування I_m (б) фенілону C1 (1) та фторопласту-4 (2) від твердості HRC сталеві деталі при фрикційній взаємодії полімерів зі сталлю

У більшості випадків [263] полімерні деталі у вузлах тертя працюють у парі зі сталлю, яка має твердість від 40 до 50 HRC, тому для подальших досліджень було вибрано сталеві зразки саме з таким значенням твердості.

Також проведено дослідження впливу шорсткості сталеві деталі пари тертя полімер – сталь на коефіцієнт тертя та вагове зношування полімерів. Результати подано на рис. 7.2. Експерименти проведено при значеннях твердості сталеві деталі пари тертя 50 HRC.

Відповідно до результатів досліджень встановлено, що характер графіків залежностей коефіцієнта тертя та вагового зношування фенілону С1 та фторопласту-4 від шорсткості сталеві деталі при фрикційній взаємодії полімерів зі сталлю є подібним. Для залежностей коефіцієнта тертя від шорсткості сталеві деталі спостерігається екстремум в області шорсткостей від 0,32 до 0,6 мкм за Ra. Причому для пари тертя із фенілоном С1 екстремум більш чітко виражений. Так, при шорсткостях від 0,3 до 0,6 спостерігається зменшення коефіцієнта тертя для фенілону С1 з 0,475 до 0,44, для фторопласту-4 з 0,250 до 0,247. При подальшому збільшенні шорсткостей з 0,6 до 2,5 мкм коефіцієнт тертя для фенілону С1 збільшується з 0,44 до 0,48, а для фторопласту-4 з 0,247 до 0,260. Також слід відзначити, що зміна шорсткості більше впливає на тертя фенілону С1, ніж фторопласту-4, що пояснюється більш стабільним характером тертя фрикційної пари фторопласт-4 – сталь.

Для залежностей вагового зношування від шорсткості сталеві деталі спостерігається збільшення цього параметра зі збільшенням шорсткостей на всьому дослідженому інтервалі. Так, при фрикційній взаємодії фенілону С1 зі сталлю вагове зношування збільшується з 0,1 до 0,35 г, а у парі з фторопластом це збільшення складає від 0,05 до 0,06 г.

Слід відзначити, що отримані залежності мають екстремум в області шорсткостей сталю зразка від 1,2 до 1,5 мкм, де інтенсивність зношування різко змінюється. Так, при шорсткостях сталю деталі від 0,3 до 1,4 мкм для досліджених полімерів спостерігається незначне збільшення вагового

зношування від 0,1 до 0,13 для пар тертя із фенілоном С1 і від 0,05 до 0,06 для фторопласту-4.

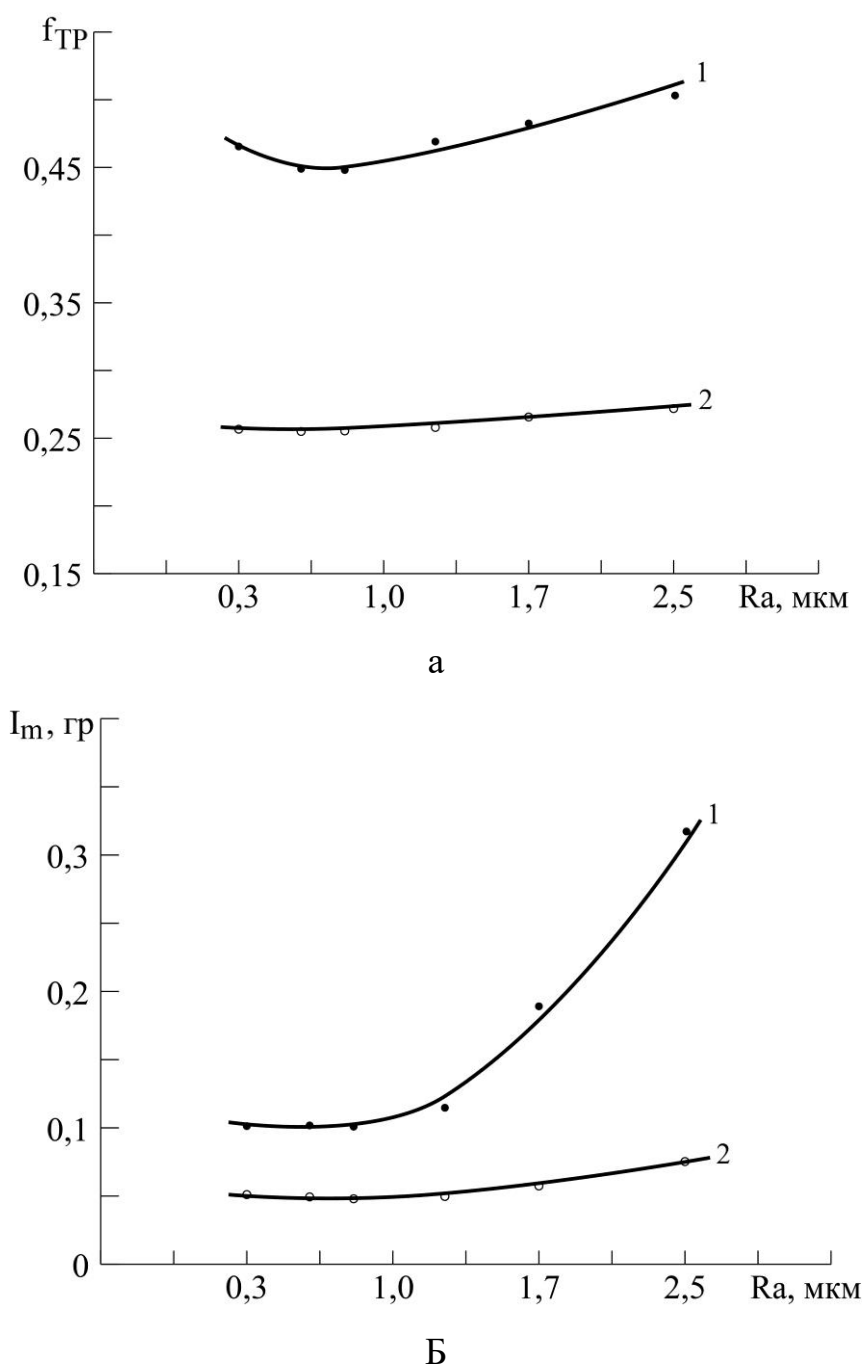


Рисунок 7.2 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та вагового зношування I_m (б) фенілону С1 (1) та фторопласту-4 (2) від шорсткості Ra сталевій деталі при фрикційній взаємодії полімерів зі сталлю

А вже починаючи з шорсткості $Ra = 1,4$ мкм, інтенсивність зношування значно зростає і дорівнює при максимальних значеннях шорсткості сталевій деталі для фенілону С1 0,35 г, а для фторопласту-4 - 0,06 г. Причому слід відзначити, що в парі тертя із фенілоном С1 інтенсивність вагового зношування значно перевищує аналогічний параметр при терті із фторопласту-4.

У результаті досліджень встановлено вплив основних структурних та морфологічних параметрів сталевій деталі у вузлах тертя термостійкий полімер – сталь на трибологічні властивості фенілону С1 і фторопласту-4 та визначено їх оптимальні значення. Так, зі збільшенням твердості та шорсткості сталевій деталі спостерігається збільшення коефіцієнтів тертя та вагового зношування фенілону С1 та фторопласту-4. Причому для фторопласту-4 інтенсивність збільшення основних трибологічних властивостей значно менша, ніж у парах тертя із фенілоном С1. Оптимальні значення твердості сталевій деталі у вузлах тертя термостійкий полімер – сталь, відповідно до проведених досліджень та практичного досвіду, лежать в інтервалі від 40 до 50 HRC. Оптимальні значення шорсткості лежать в інтервалі від 0,32 до 0,6 мкм за Ra , що відповідає мінімальним значенням коефіцієнта тертя та вагового зношування досліджених полімерів при фрикційній взаємодії зі сталлю.

7.2 Вибір оптимальних режимів притирання пар тертя термостійкий ПКМ-сталь

Одним із основних факторів, які впливають на надійність та довговічність у роботі вузлів тертя є їх притирання у початковий період роботи [264–266]. У цей час у парах тертя виникають великі значення сил тертя та зношування. Це обумовлено тим, що поверхні тертя мають різні геометричні параметри, які на початку взаємодії інтенсивно змінюються [267]. Ця зміна відбувається до моменту створення «рівноважної

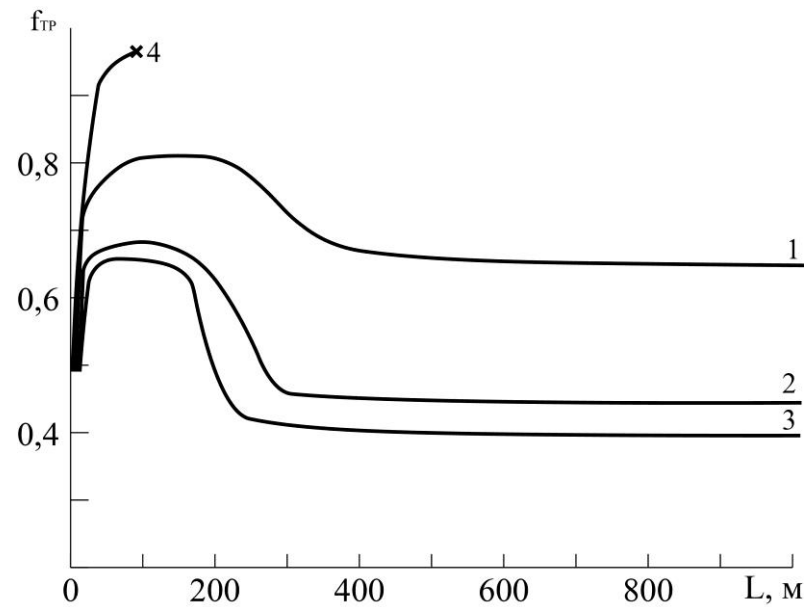
шорсткості», коли геометричні параметри поверхонь тертя вирівнюються (тобто їх параметри шорсткості дорівнюють один одному) [268; 269]. Після цього явища закінчується період притирання матеріалів і настає режим їх нормальної роботи (тобто сили тертя та зношування у парі тертя стабілізується) [270]. Неналежне проведення притирання вузлів тертя може призвести до їх перегрівання з подальшим заклинюванням під час роботи, що значно зменшить ненадійність та довговічність їх загалом. Тому актуальним є дослідження впливу та вибір 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 [271]. Шлях ковзання залежить від великої кількості факторів, найбільш важливими з яких є навантаження та швидкості ковзання, при яких відбувається притирання. Тому доцільно визначити вплив цих параметрів на шлях ковзання досліджуваних матеріалів і встановити оптимальні значення навантажень та швидкостей ковзання, при яких необхідно проводити їх притирання.

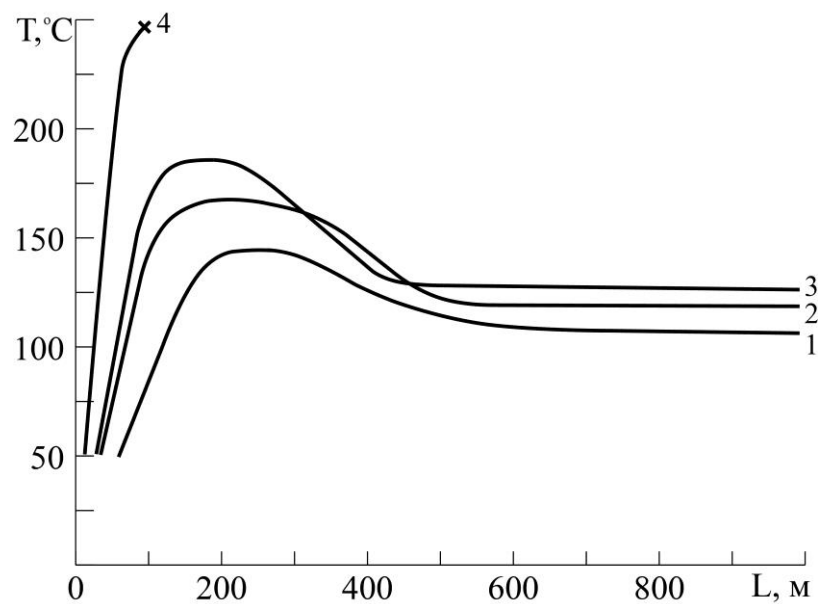
Для попередніх досліджень було обрано вихідні полімери на основі ароматичного поліаміду фенілону С1 та фторопласту-4. Вибір обумовлений тим, що на період притирання розроблених матеріалів в основному будуть впливати саме полімерні матриці.

Граничні значення навантажень та швидкостей ковзання при притиранні фенілону С1 та фторопласту-4 знайдено відповідно до наукових публікацій [271; 272], де подано рекомендовані максимальні значення навантажень та швидкостей ковзання, при яких вузли тертя з дослідженими полімерами можуть працювати впродовж визначеного часу роботи. Для ароматичного поліаміду це навантаження $P = 1,5$ МПа та швидкість ковзання $V = 1,25$ м/с. Для фторопласту це $P = 2,5$ МПа та швидкість ковзання $V = 1,5$ м/с.

На рис. 7.3 подано залежності коефіцієнта тертя та температури на поверхні тертя від шляху ковзання в парі тертя фенілон С1 – сталь при постійній швидкості ковзання $V = 1$ м/с та перемінних навантаженнях P , МПа: 1 – 0,75; 2 – 1; 3 – 1,25; 4 – 1,5.



а



б

Рисунок 7.3 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та температури на поверхні тертя T (б) від шляху ковзання L у парі тертя фенілон С1 – сталь при постійній швидкості ковзання $V=1$ м/с та перемінних навантаженнях P , МПа: 1 – 0,75; 2 – 1; 3 – 1,25; 4 – 1,5

Відповідно до проведених експериментів встановлено, що отримані залежності мають подібний характер. Так, початковий період роботи (від 0 до 300 м) пари тертя фенілон С1 – сталь характеризується різким збільшенням коефіцієнта тертя і температури на поверхні тертя, що відповідає активному процесу притирання їх поверхонь. Подальше збільшення шляху ковзання призводить до зменшення цих параметрів та їх стабілізації, що свідчить про закінчення притирання та перехід до нормального режиму роботи вузла тертя. Слід відзначити, що зі збільшенням навантаження на вузол тертя вдається скоротити шлях ковзання, необхідний для притирання. Так, при навантаженні 0,75 він дорівнює 470–500 м, а при навантаженні 1,25 МПа 280–300 м.

Процес притирання супроводжується різким виділенням тепла і розігріванням поверхонь тертя (рис. 7.3, б). Так, при навантаженні 1,5 МПа температура на поверхні тертя досягає 250°C, що значно вище температури розм'якшення полімерної матриці [49] і внаслідок цього спостерігається підплавлення полімерної деталі з подальшим заклинюванням вузла тертя в цілому. При менших значеннях навантажень температура на поверхні тертя не перевищує 180°C, що суттєво не впливає на властивості полімерної матриці [49]. Тобто, виходячи з проведених досліджень, встановлено, що фенілон С1 необхідно притирати при навантаженнях, менших, ніж 1,5 МПа. А враховуючи те, що процес притирання відбувається швидше при більших навантаженнях можна стверджувати, що оптимальним значенням навантаження для притирання пари тертя фенілон С1 – сталь є 1,25 МПа. Відповідно до цього подальші дослідження для встановлення оптимальної швидкості ковзання при притиранні пари тертя фенілон С1 – сталь необхідно проводити саме при цьому навантаженні.

На рис. 7.4 подано залежності коефіцієнта тертя та температури на поверхні тертя від шляху ковзання у парі тертя фенілон С1 – сталь при постійному навантаженні $P = 1,25$ МПа та перемінних швидкостях ковзання V , м/с: 1 – 0,75; 2 – 1; 3 – 1,25.

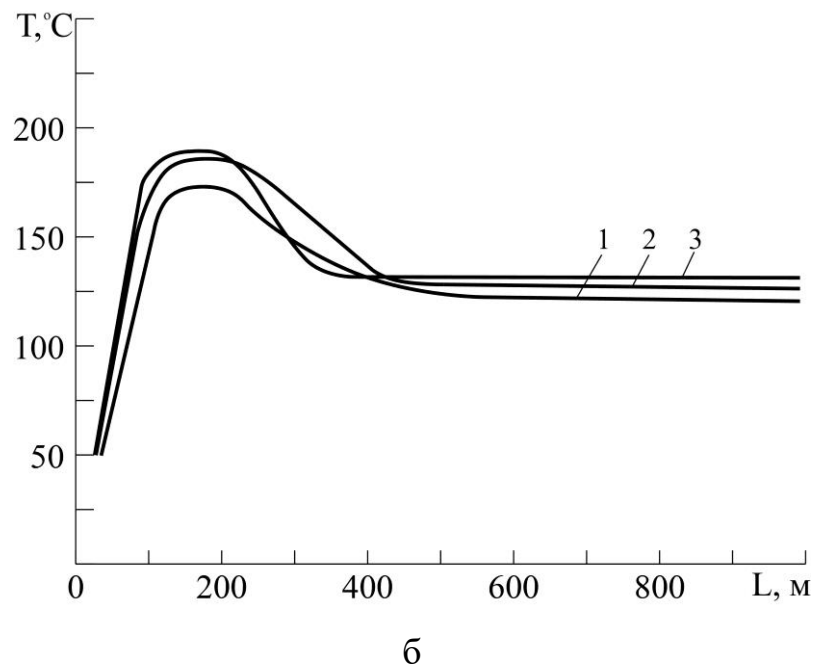
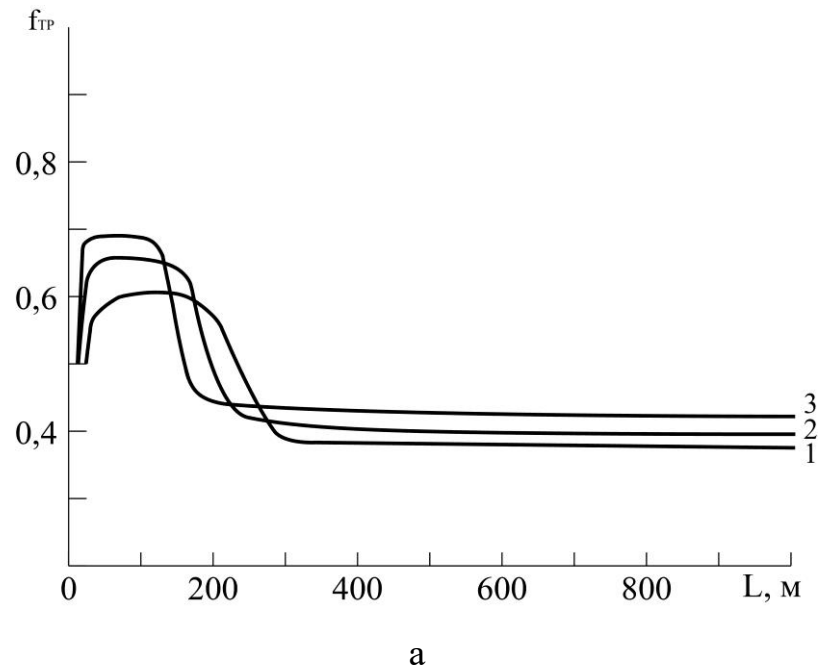


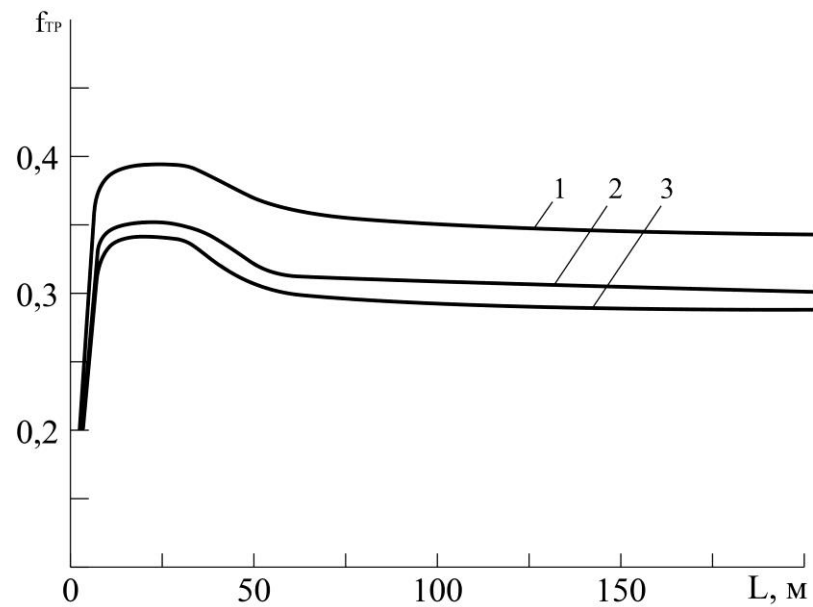
Рисунок 7.4 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та температури на поверхні тертя T (б) від шляху ковзання L у парі тертя фенілон С1 – сталь при постійному навантаженні $P=1,25$ МПа та перемінних швидкостях ковзання V , м/с: 1 – 0,75; 2 – 1; 3 – 1,25

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що отримані залежності мають подібний характер. Початковий період роботи характеризується високими значеннями коефіцієнтів тертя та температур на

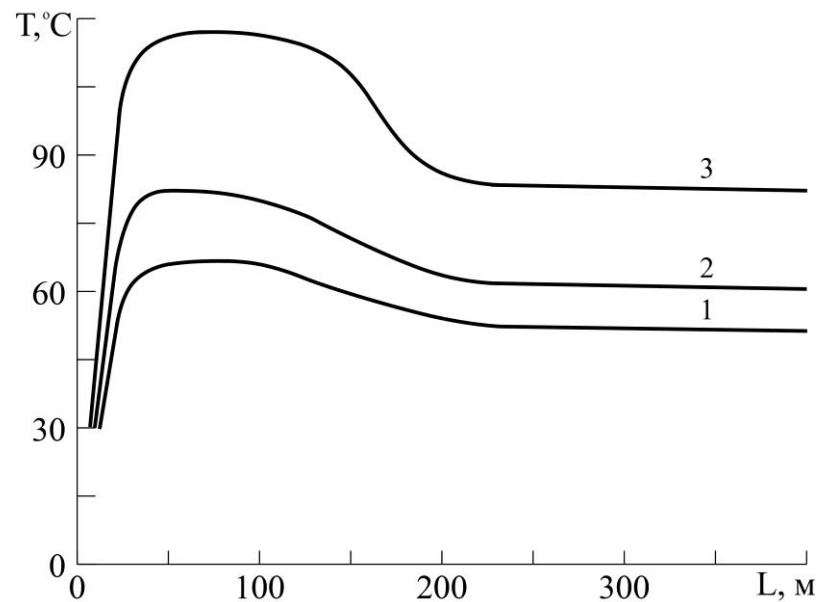
поверхні тертя до 0,7 та 190°C. Значення яких після 200–500 м шляху ковзання, залежно від швидкості ковзання, стабілізуються, що свідчить про закінчення процесу притирання та настання нормального режиму роботи вузла тертя. З підвищенням швидкості ковзання спостерігається зменшення шляху ковзання, необхідного для притирання пари тертя фенілон С1 – сталь. Так, при швидкості ковзання 0,75 м/с притирання відбувається впродовж 325–350 м, а при 1,25 м/с – 200–225 м. При цьому при всіх досліджених швидкостях ковзання температура на поверхні тертя знаходиться в допустимих межах та не перевищує температуру розм'якшення полімерної матриці. Тому відповідно до проведених досліджень можна зробити висновок, що оптимальною швидкістю притирання при фрикційній взаємодії фенілону С1 зі сталлю є 1,25 м/с. При цій швидкості ковзання для притирання необхідний мінімальний шлях ковзання і в період притирання температура на поверхні тертя не підіймається більше 190°C, що є допустимо для пари тертя фенілон С1 – сталь.

На рис. 7.5 подано залежності коефіцієнта тертя та температури на поверхні тертя від шляху ковзання у парі тертя фторопласт-4 – сталь при постійній швидкості ковзання $V = 1$ м/с та змінних навантаженнях P , МПа: 1 – 1,5; 2 – 2,0; 3 – 2,5.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що отримані залежності мають подібний характер. На початковому періоді роботи спостерігається різке збільшення коефіцієнта тертя та температури на поверхні тертя при фрикційній взаємодії фторопласту 4 зі сталлю. Це явище є наслідком притирання вихідних поверхонь пари тертя, що досліджується. У подальшому коефіцієнт тертя та температура на поверхні тертя зменшуються і стабілізуються, що свідчить про закінчення притирання та настання режиму нормальної роботи вузла тертя фторопласт-4 – сталь.



а



б

Рисунок 7.5 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та температури на поверхні тертя T (б) від шляху ковзання L у парі тертя фторопласт-4 – сталь при постійній швидкості ковзання $V=1$ м/с та перемінних навантаженнях P , МПа: 1 – 1,5; 2 – 2,0; 3 – 2,5

При збільшенні навантаження на вузол тертя вдається зменшити шлях ковзання, необхідний для його притирання. так, при навантаженні 1,5 МПа він дорівнює 75–100 м, а при навантаженні 2,5 МПа 50–60 м. Слід відзначити

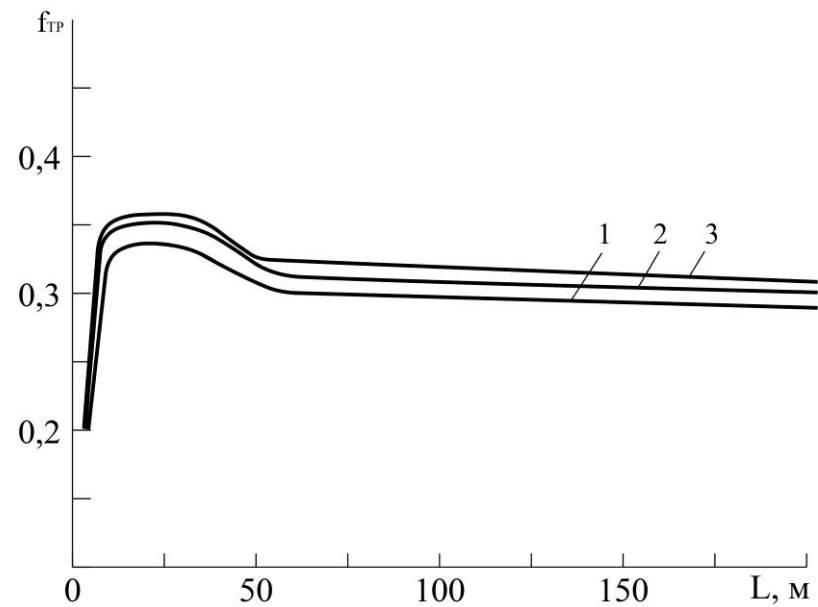
досить високі значення температури на поверхні тертя, у вузлі тертя при притиранні з навантаженням 2,5 МПа. Ця температура наближається до 120°C, що для вихідного фторопласту-4 є граничною температурою експлуатації [28].

Виходячи з цього, оптимальним навантаженням при притиранні пари тертя фторопласт-4 – сталь є 2,0 МПа. При цьому навантаженні притирання відбувається впродовж 60–75 м, що всього на 10–15 м більше, ніж при 2,5 МПа і температура на поверхні тертя не перевищує 80°C, що є допустимим при притиранні фторопласту-4.

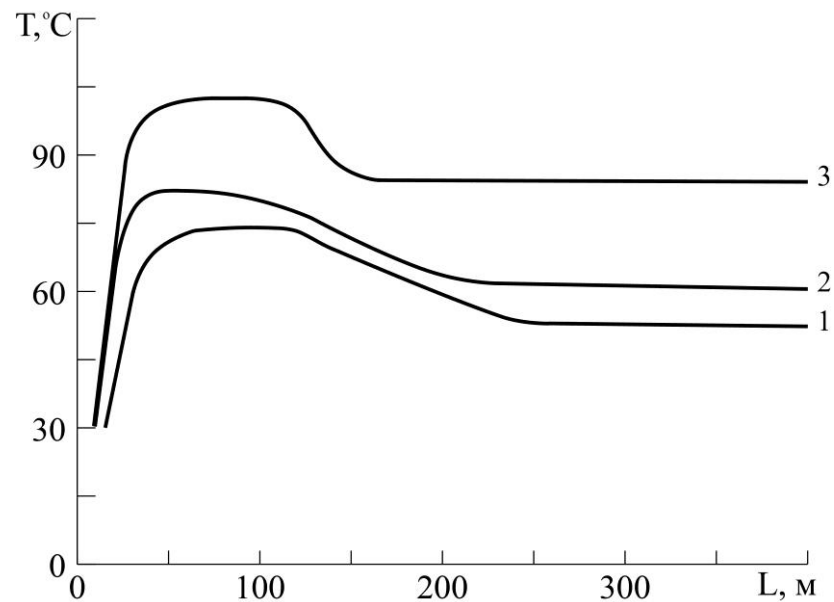
Подальші дослідження для встановлення оптимальної швидкості ковзання при притиранні пари тертя фторопласт-4 – сталь проведено при навантаженні 2,0 МПа.

На рис. 7.6 подано залежності коефіцієнта тертя та температури на поверхні тертя від шляху ковзання в парі тертя фенілон С1 – сталь при постійному навантаженні $P = 2,0$ МПа та перемінних швидкостях ковзання V , м/с: 1 – 0,75; 2 – 1; 3 – 1,25.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що отримані залежності мають подібний характер. Спочатку спостерігається різке збільшення коефіцієнтів тертя до 0,36 та температур на поверхні тертя до 105°C з наступним зменшенням до стабільних значень, що відповідає закінченню періоду притирання досліджуваних матеріалів. З підвищенням швидкості ковзання спостерігається незначне зменшення шляху ковзання, необхідного для притирання пари тертя фторопласт-4 – сталь. Так, при швидкості ковзання 0,5 м/с притирання відбувається впродовж 60–75 м, а при 1,5 м/с – 45–55 м. Слід відзначити, що при максимальній швидкості притирання (1,5 м/с) температура на поверхні тертя досягає 104–106°C, що межує з температурою експлуатації при терті фторопласт-4, однак не перевищує її. Тому за оптимальну швидкість притирання взято 1,5 м/с.



а



б

Рисунок 7.6 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та температури на поверхні тертя T (б) від шляху ковзання L у парі тертя фторопласт-4 – сталь при постійному навантаженні $P=2$ МПа та перемінних швидкостях ковзання V , м/с: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5

При порівнянні режимів притирання ароматичного поліаміду з фторполімером встановлено, що для притирання пар тертя із фторопластом матеріали проходять набагато менший шлях ковзання та мають кращі

триботехнічні характеристики (коефіцієнт тертя та температура на поверхні тертя), ніж у парах тертя із фенілоном С1. Це пов'язано з відмінностями у структурі та властивостях полімерних матриць на основі фенілону С1 та фторопласту-4.

У роботі термостійкі полімерні матриці наповнювалися дрібнодисперсним силікагелем, який впливає на рівень їх трибологічних властивостей і змінює характер тертя, що у свою чергу впливає на процес їхнього притирання. Тому доцільно дослідити вплив концентрації наповнювача у полімерних матрицях на шлях ковзання, необхідний для притирання цих матеріалів.

Для проведення досліджень були вибрано навантаження та швидкості 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 [274].

На рис. 7.7 подано результати досліджень зміни шляху притирання, необхідного для притирання ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4 при фрикційній взаємодії зі сталлю, від концентрації силікагелю у ПКМ.

Відповідно до отриманих результатів дослідження встановлено, що зі збільшенням умісту наповнювача у полімерах шлях притирання – збільшується. Так, для ПКМ на основі фенілону С1 це збільшення складає 60-70 %, а на основі фторопласту-4 – 180–200 %. Це відбувається внаслідок того, що матеріали, наповнені силікагелем, мають вищий рівень фізико-механічних властивостей, що ускладнює процес їхнього притирання при фрикційній взаємодії зі сталлю. Слід відзначити, що отримані залежності мають нелінійний характер, при якому найбільш інтенсивний приріст шляху притирання спостерігається при вмісту силікагелю в фенілоні С1 та фторопласті-4 від 0 до 12 %. З подальшим збільшенням умісту наповнювача у полімерах до 30 % не спостерігається значного збільшення цього параметра. Це пояснюється тим, що матеріали з умістом наповнювача від 0

до 12 % мають найкращий рівень фізико-механічних властивостей і така кількість силікагелю сприяє найкращим умовам тертя при фрикційній взаємодії розроблених ПКМ зі сталлю.

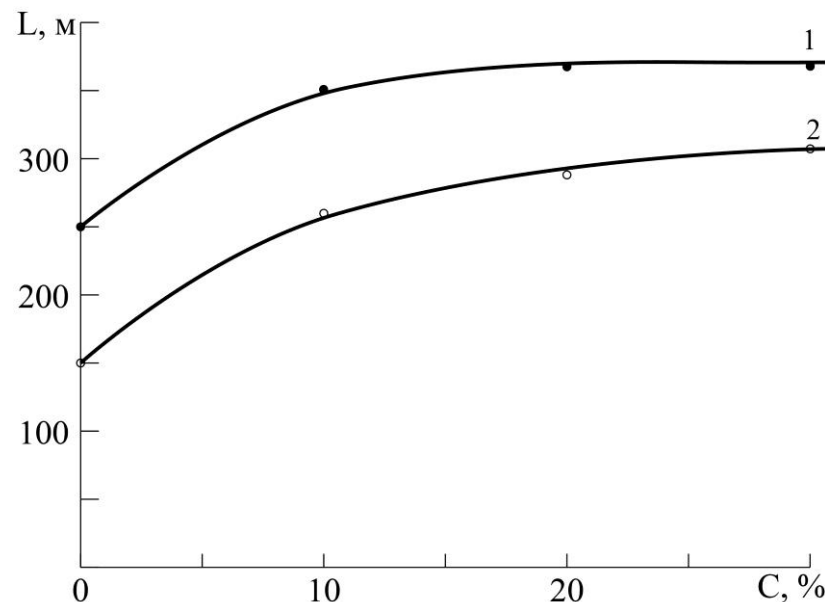


Рисунок 7.7 – Залежність зміни шляху притирання ПКМ на основі фенілону С1 (1) та фторопласту-4 (2) при фрикційній взаємодії зі сталлю, від вмісту (С) силікагелю у ПКМ (для ПКМ на основі фенілону С1 ($P = 1,25$ МПа, $V = 1,25$ м/с; для ПКМ на основі фторопласту-4 ($P = 2,00$ МПа, $V = 1,5$ м/с)

Відповідно до проведених досліджень, було встановлено оптимальні значення навантажень та швидкостей ковзання, необхідні для притирання пар тертя полімер (фенілон С1, фторопласт-4) – сталь. Так, притирання фрикційної пари тертя фенілону С1 – сталь необхідно проводити при навантаженні $P = 1,25$ МПа та швидкості ковзання $V = 1,25$ м/с. При цих зовнішніх параметрах притирання пройде впродовж шляху ковзання 200–225 м при цьому температура на поверхні тертя не буде перевищувати 190°C , що є допустимо для пари тертя фенілон С1 – сталь. Для притирання пари тертя фторопласт 4 – сталь необхідно створити навантаження $P = 2,0$ МПа та швидкість ковзання $V = 1,5$ м/с. При цих експлуатаційних параметрах

притирання пройде впродовж шляху ковзання 45–55 м при цьому температура на поверхні тертя не буде перевищувати 106°C, що є допустимо для пари тертя фторопласт-4 – сталь. Установлено оптимальний шлях притирання, необхідний для переходу в режим нормальної роботи ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнених силікагелем. Він знаходиться в межах 150–450 м залежно від складу ПКМ.

7.3 Вплив складів та технології отримання термостійких ПКМ на показники тертя та зношування при фрикційній взаємодії із сталлю

З метою створення термостійких полімерних композиційних матеріалів з високим рівнем трибологічних властивостей було отримано матеріали на основі ароматичного поліаміду фенілону С1 та фторопласту-4, наповнених дисперсним силікагелем та отриманих за стандартною технологією та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій. Унаслідок того, що ці матеріали розробляються для вузлів тертя машин і механізмів необхідно провести дослідження впливу складів та технології отримання ПКМ на їхні трибологічні властивості при фрикційній взаємодії зі сталлю. Відповідно до попередніх досліджень [275; 276] уміст наповнювача у ПКМ варіювався в інтервалі від 0 до 30 %. До основних трибологічних властивостей досліджених пар тертя слід віднести коефіцієнт тертя, температуру на поверхні тертя та інтенсивність лінійного зношування матеріалів пари тертя [277].

Трибологічні дослідження розроблених ПКМ проведено з урахуванням режимів їх притирання, отримуючи трибологічні характеристики пар тертя при нормальному режимі роботи.

На рис. 7.8 подано результати досліджень зміни коефіцієнта тертя та температури на поверхні тертя при фрикційній взаємодії матеріалів на основі фенілону С1 та фторопласту-4 зі сталлю від умісту силікагелю у ПКМ,

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

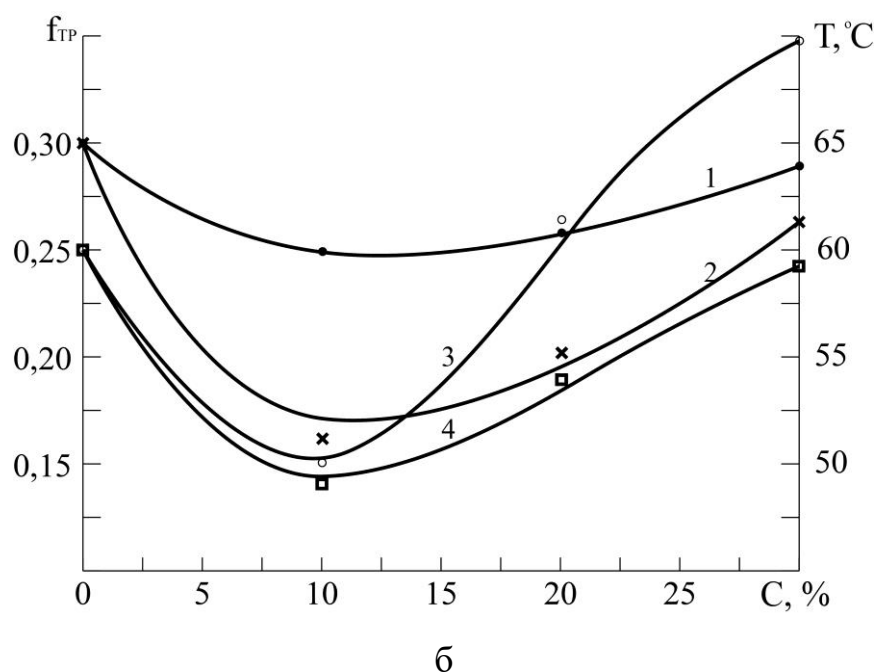
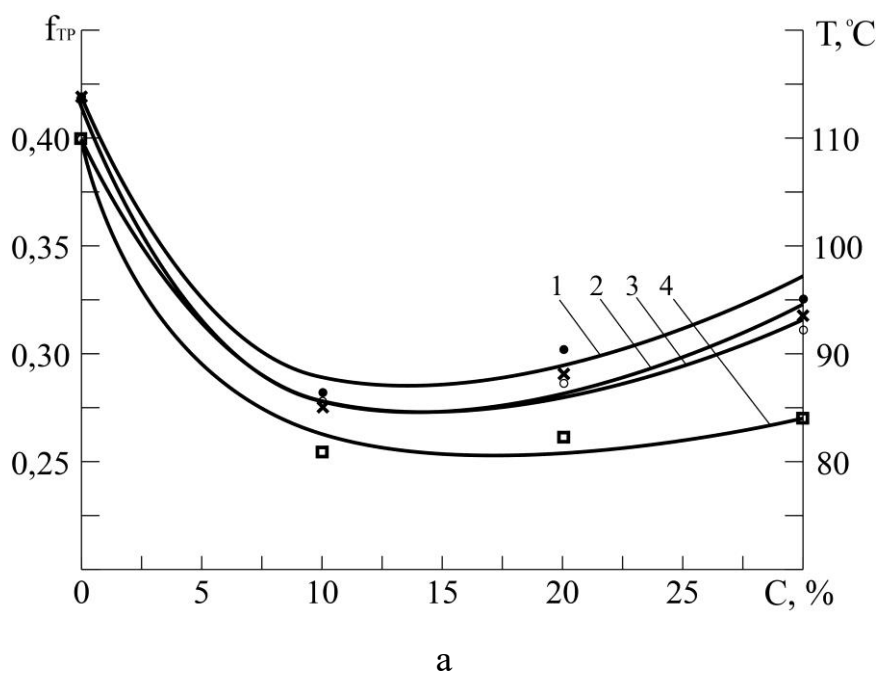


Рисунок 7.8 – Залежності зміни коефіцієнта тертя f_{TP} (1,2) та температури на поверхні тертя T (3,4) при фрикційній взаємодії матеріалів на основі фенілону С1 (а) та фторопласту-4 (б) зі сталлю від умісту C силікагелю у ПКМ, отриманих за стандартною технологією (1,3) та з використанням суміщення (in 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.

Причому слід відзначити, що дані залежності для матеріалів, отриманих за різними технологіями (стандартна та з використанням суміщення (*in situ*)) також мають подібний характер. На всіх отриманих залежностях спостерігається екстремум при вмісті наповнювача у полімері в області 9-11 %.

У досліджених матеріалах, отриманих за стандартною технологією при вмісті наповнювача від 0 до 10 % спостерігається зменшення значень коефіцієнта тертя для матеріалів на основі фенілону С1 з 0,43 до 0,29, для матеріалів на основі фторопласту-4 з 0,3 до 0,25. А вже зі збільшенням наповнювача вмісту наповнювача з 10 до 30 % спостерігається його повільне збільшення для матеріалів на основі фенілону С1 з 0,29 до 0,34, для матеріалів на основі фторопласту-4 з 0,25 до 0,29. Значення температури на поверхні тертя корелює із значеннями коефіцієнта тертя внаслідок того, що збільшення температури викликано саме фрикційним розігрівом вузла тертя, який виникає при вивільненні енергії при терті досліджених матеріалів. Так, при вмісті наповнювача до 10 % спостерігається зменшення температури на поверхні тертя з 110 до 86 для ПКМ на основі фенілону С1 та з 60 до 53 для ПКМ на основі фторопласту-4.

У матеріалів, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*), при вмісті наповнювача від 0 до 10 % спостерігається зменшення коефіцієнта тертя для ПКМ, а основі фенілону С1 з 0,43 до 0,27, для матеріалів на основі фторопласту 4 з 0,3 до 0,17. Подальше збільшення коефіцієнта тертя для фенілону С1 та фторопласту-4 до 0,33 та 0,25 відповідно, спостерігається при збільшенні вмісту наповнювача у полімерах до 30 %. Мінімальні значення температури на поверхні тертя спостерігаються при вмісті наповнювача 9–11 % і складають для ПКМ на основі фенілону С1 82°C, для ПКМ на основі

фторопласту-4 48°C, що пояснюється мінімальними значеннями сил тертя у вузлах тертя ПКМ – сталь, при 10 % вмісту наповнювача у полімерах. Максимальні значення спостерігаються при терті ПКМ з умістом наповнювача 30 % і складають для матеріалів на основі фенілону C1 – 84°C, а для матеріалів на основі фторопласту-4 – 58°C.

Слід відзначити, що матеріали, отримані за допомогою (in-situ) суміщення, мають значно менші значення коефіцієнта тертя та температури на поверхні тертя впродовж усього дослідженого інтервалу концентрацій наповнювача у полімерах, порівняно із матеріалами, отриманими за стандартною технологією. Це пояснюється різницею в морфології та структурі розроблених ПКМ, отриманих за різними технологіями. Так, у попередніх главах (глава 4) показано, що матеріали, отримані за суміщенням (in situ), мають більші значення ступені кристалічності, ніж отримані за стандартною технологією. При цьому відомо, що матеріали з більш упорядкованою структурою мають кращі трибологічні властивості [278]. Також встановлено, що наповнювач у ПКМ, отриманих за (in-situ) суміщенням, 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 [278].

Також одними із основних трибологічних характеристик при фрикційній взаємодії пар тертя є їх зношування [279]. У більшості випадків зношування визначається за величиною інтенсивності лінійного зношування, яка враховує як зміну геометричних параметрів матеріалів, що труться, так і їх природу. Результати досліджень зміни інтенсивності лінійного зношування ПКМ та сталі при їх фрикційній взаємодії від умісту наповнювача у ПКМ представлено на рис. 7.9.

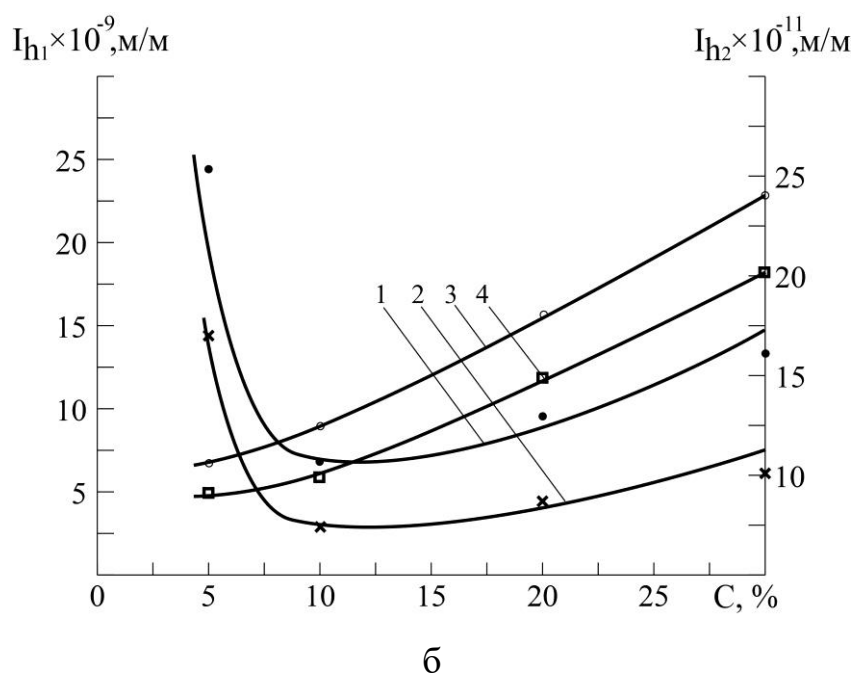
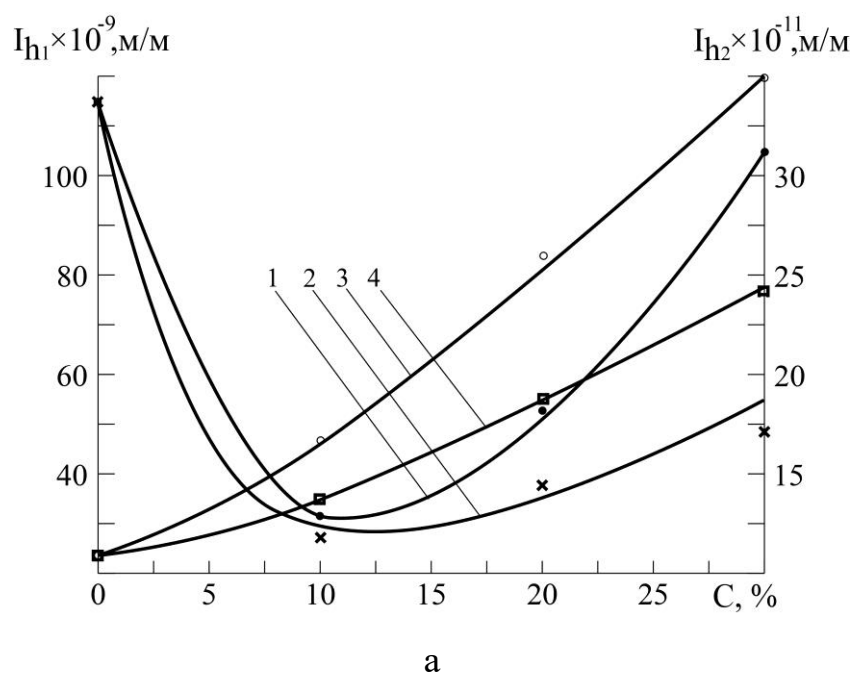


Рисунок 7.9 - Залежності зміни інтенсивності лінійного зношування I_{h1} (1,2) ПКМ на основі фенілону С1 (а), фторопласту-4 (б) та сталевого зразка I_{h2} (3,4) при їх фрикційній взаємодії від умісту (C) силікагелю у ПКМ, отриманих за стандартною технологією (1,3) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2,4)

Відповідно до проведених досліджень установлено, 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 9–11 %. Зі збільшенням умісту силікагелю з 0 до 9 % у полімерних матрицях спостерігається зменшення інтенсивності лінійного зношування досліджуваних матеріалів.

Так, для ПКМ на основі фенілону С1 це зменшення склало від 117×10^{-9} м/м для вихідного полімеру до 25×10^{-9} м/м для ПКМ з умістом наповнювача 10 %, а для ПКМ на основі фторопласту-4 – від 240×10^{-9} м/м, для вихідного фторопласту-4 до 7×10^{-9} м/м для ПКМ із 10 % вмістом силікагелю.

При подальшому збільшенні вмісту наповнювача до 30 % для розроблених ПКМ спостерігається збільшення інтенсивності лінійного зношування для матеріалів на основі фенілону С1 до 100×10^{-9} м/м та для матеріалів на основі фторопласту-4 до 15×10^{-9} м/м.

Такий характер залежності інтенсивності лінійного зношування від умісту 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, що може бути наслідком як створення антифрикційної плівки на сталевій поверхні тертя, так і зміни міцнісних характеристик ПКМ у досліджених парах тертя [280].

Слід відзначити, що матеріали, отримані за допомогою суміщення (*in situ*), мають значно меншу інтенсивність лінійного зношування, ніж отримані за стандартною технологією, що дозволяє стверджувати про їх кращу зносостійкість. Так, при оптимальному вмісті наповнювача 10 % у матеріалах, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*), у ПКМ на основі фенілону С1 цей параметр на 25 %, а у 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 за допомогою суміщення (*in situ*) та стандартної технології.

Досить важливою характеристикою при фрикційній взаємодії ПКМ зі сталлю є інтенсивність лінійного зношування сталю зразка. Це пов'язано з тим, що у більшості пар тертя деталі зі сталі є значно дорожчими, ніж полімерні (наприклад, у підшипниках ковзання сталеві деталі – вал, а полімерні – втулки; у напрямних сталеві деталі – корпус, а полімерні – напрямні і т.д.) і вони не повинні підлягати інтенсивному зношуванню щоб уникнути їх частішої заміни [281]. Відомо [282], що дисперсні тверді частинки наповнювачів можуть виявляти абразивну дію на сталеві деталі пар тертя, що значно зменшує їх термін служби. Однак у дослідженні [277] стверджується, що наповнювачі з розміром частинок до 10 мкм не виявляють суттєву абразивну дію на сталевий зразок. У нашій роботі синтезований наповнювач силікагель має основні розміри, які лежать в області 5–10 мкм, що дозволяє використовувати його в якості наповнювача для ПКМ триботехнічного призначення. Доцільно дослідити вплив умісту силікагелю в ПКМ, отриманих за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*), на інтенсивність лінійного зношування сталю зразка при фрикційній взаємодії ПКМ – сталь. Результати досліджень подано на рис. 7.9.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що зі збільшенням вмісту силікагелю в полімерах спостерігається збільшення інтенсивності лінійного зношування сталю 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 сталю зразка пов'язано із абразивною дією дисперсного наповнювача на нього. Слід відзначити нелінійний характер збільшення даної характеристики. Так, інтенсивність лінійного зношування сталю зразка при фрикційній взаємодії із ПКМ з вмістом наповнювача до 10 %

значно менша, ніж при терті з матеріалами з вмістом наповнювача 10–30 %, що, очевидно, пов'язано із зміною характеру тертя у ПКМ при збільшенні вмісту наповнювача в ньому. Також слід відзначити, що зношування сталевго зразка при фрикційній взаємодії із матеріалами, отриманими за допомогою 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 за допомогою 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 у морфології частинок силікагелю з сфероподібної для ПКМ, отриманих стандартною технологією на ламілярно-стрічкову структуру для ПКМ, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій. Відомо [283], що частинки з ламілярно-стрірковою структурою виявляють значно меншу абразивну дію на сталеві зразки, ніж з сфероподібною.

Покращення трибологічних властивостей розроблених ПКМ порівняно із 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 та структури сталевго поверхні тертя до та після фрикційної взаємодії із фенілоном С1, фторопластом-4 та ПКМ на їх основі (рис. 7.10).

Відповідно до мікрофотографії (рисунок 7.10, а) встановлено, що поверхня сталевго зразка до фрикційної взаємодії із полімерами та ПКМ на їх основі має вихідні значення нерівностей (виступи та впадини), які були отримані при його механічній обробці під час підготовки зразків до проведення експериментів. На рис. 7.10 б, є показана поверхня сталевго зразка після фрикційної взаємодії із вихідними полімерами фенілоном С1 та фторопластом-4. При їх порівнянні із вихідною поверхнею до експериментів можна стверджувати, що несуттєво змінилася морфологія поверхні за

рахунок фрикційної взаємодії із полімерами і виникненні слідів фрикційного перенесення полімерів на сталюу поверхню.

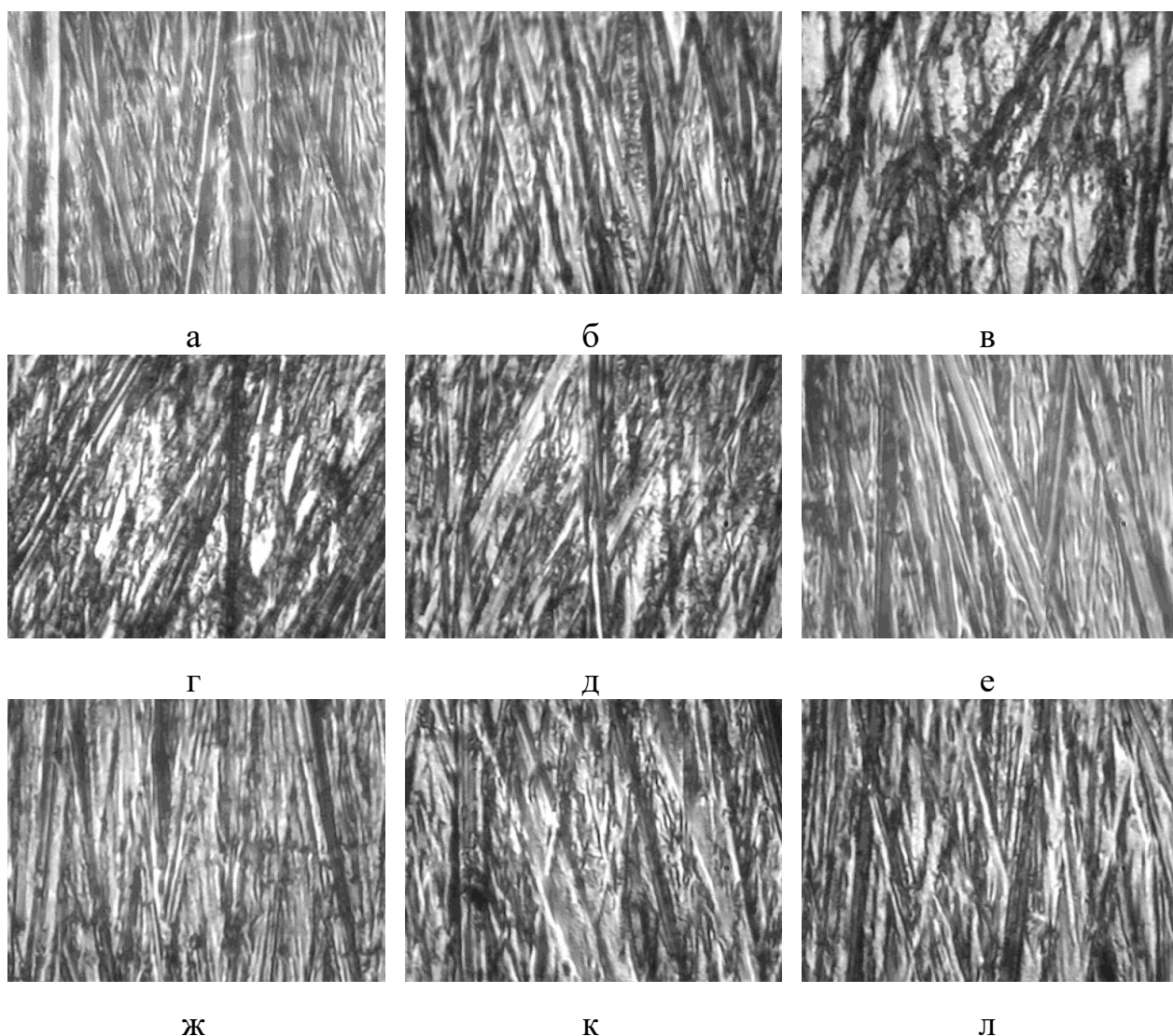


Рисунок 7.10 - Мікрофотографії сталевих поверхонь (а) до та після фрикційної взаємодії з фенілоном С1 (б), фторопластом-4 (е) та ПКМ на основі фенілону С1 (в, г, д) та на основі фторопласту-4 (ж,к,л) з умістом наповнювача: в,ж – 5 %; г,к – 10 %; д,л – 20 %

Поверхні сталюого зразка після тертя із ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4 (рисунок 7.10 в, г, д, ж, к, л) мають суттєві відмінності від поверхонь, отриманих після тертя з вихідними полімерами, обумовлені фрикційним перенесенням компонентів ПКМ на неї і створенням у

результаті трибохімічних реакцій «антифрикційного покриття», яке впливає на зміну характеру тертя і сприяє зменшенню коефіцієнта тертя, температури на поверхні тертя й інтенсивності лінійного зношування розроблених ПКМ порівняно із вихідним полімером при фрикційній взаємодії зі сталлю.

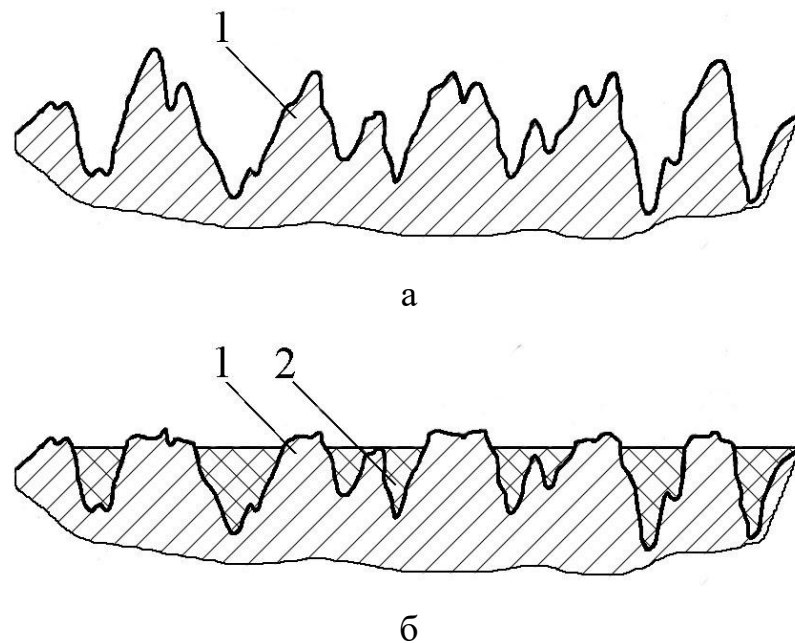
Слід звернути увагу на різну площу поверхні сталюого зразка, яку заповнює «антифрикційне покриття» при фрикційній взаємодії із ПКМ з різним умістом наповнювача. Так, для ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнених 5 % силікагелю, спостерігається часткове заповнення сталювої поверхні тертя продуктами фрикційного перенесення компонентів ПКМ (рис. 10, в, ж). А вже при підвищенні вмісту наповнювача у полімерах до 10 % (рис. 10, г,к) спостерігається практично повне заповнення сталювої поверхні тертя «антифрикційним покриттям». Мікрофотографії поверхні сталюого зразка після взаємодії із ПКМ з 20 % вмістом наповнювача (рис. 10, д,л) практично не відрізняються від фото, отриманих при взаємодії із ПКМ з 10 % вмістом наповнювача.

Відповідно до отриманих мікрофотографій можна зробити висновок, що найбільшу площу заповнення «антифрикційним покриттям» має поверхня сталюого зразка при фрикційній взаємодії із ПКМ з умістом наповнювача 10 % і більше. Тобто створюється стабільне «антифрикційне покриття», яке сприяє покращенню умов тертя і максимально покращує основні триботехнічні параметри пари тертя ПКМ – сталь. Це корелює з даними досліджень впливу вмісту наповнювача у розроблених ПКМ при фрикційній взаємодії зі сталлю на основні триботехнічні властивості досліджених пар тертя. Відповідно до них, мінімальні значення коефіцієнта тертя, температури на поверхні тертя й інтенсивності лінійного зношування ПКМ мають саме при вмісту наповнювача 10 %. Подальше погіршення трибологічних властивостей зі збільшенням вмісту наповнювача з 10 до 30 % пов'язане зі зменшенням міцнісних властивостей розроблених ПКМ.

Створення стабільного «антифрикційного покриття» сталювої поверхні тертя при фрикційній взаємодії із ПКМ на основі фенілону С1 та

фторопласту-4 підтверджується також дослідженнями зміни геометрії сталевій поверхні, яка визначається параметром шорсткості R_a . Відомо [284], що «антифрикційне покриття» заповнює впадини шорсткості поверхні (рис. 7.11), що значно їх зменшує. Це впливає на зміну шорсткості поверхні тертя, яка визначається за параметром R_a , що оприявнює середнє арифметичне відхилення значень довжин нерівностей (виступів та впадин) поверхні. Відповідно до цього було проведено дослідження зміни шорсткості поверхні сталевого зразка при фрикційній взаємодії із ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4 від умісту в них силікагелю. Результати досліджень подано на рис. 7.12.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що залежності шорсткості сталевого зразка при фрикційній взаємодії із ПКМ від умісту в них силікагелю мають подібний характер.



1 – профіль сталевій поверхні; 2 – «антифрикційне покриття»

Рисунок 7.11 – Схематичне зображення профілю поверхні сталевий зразка до (а) та після фрикційної взаємодії із ПКМ (б)

Так, зі збільшенням вмісту силікагелю в досліджених ПКМ при фрикційній взаємодії зі сталевим зразком спостерігається зменшення шорсткості поверхні останнього.

Причому слід відзначити нелінійний характер зменшення. Так, більш інтенсивно воно проходить у парах тертя із ПКМ з умістом наповнювача від 0 до 10 %, що пояснюється інтенсивним створенням «антифрикційного покриття». А вже при 10–30 % вмісту наповнювача шорсткість сталеві деталі практично не зменшується і стабілізується, що є наслідком створення стабільного «антифрикційного покриття», яке займає практично всю поверхню тертя. Результати досліджень шорсткості поверхні тертя сталеві деталі після фрикційної взаємодії з розробленими ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4 повністю корелюють із мікрометричними знімками цих поверхонь і підтверджують припущення щодо створення стабільного «антифрикційного покриття» на поверхні сталевого зразка при фрикційній взаємодії із ПКМ з 10 % вмістом наповнювача.

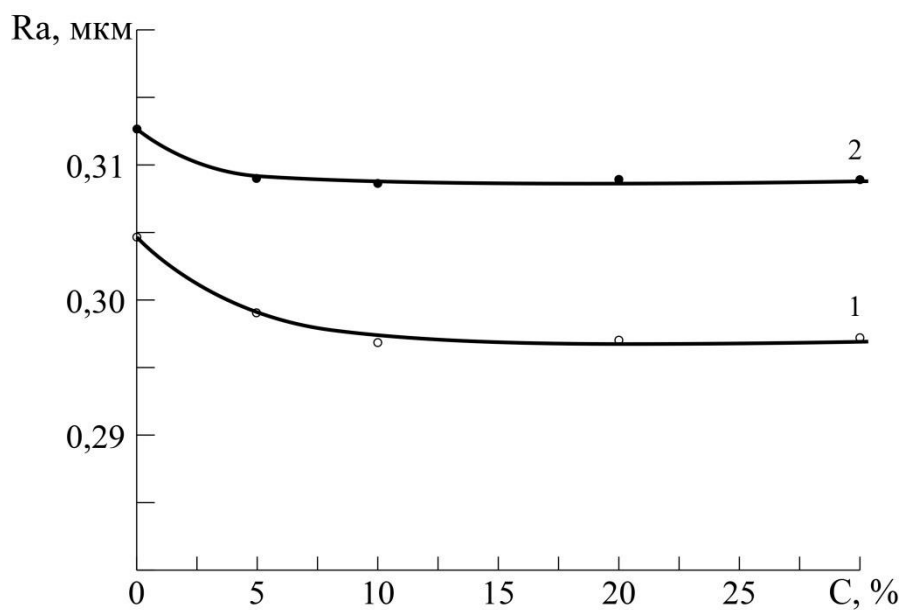


Рисунок 7.12 - Залежності шорсткості R_a сталевого зразка при фрикційній взаємодії із ПКМ на основі фенілону С1 (1) та фторопласту-4 (2) від вмісту C в них силікагелю

«Антифрикційне покриття» складається з «острівців переносу» 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. Унаслідок того, що в даних реакціях бере участь силікагель, створені «острівця переносу», як видно, є металокерамічними сполуками, які змінюють характер тертя досліджених матеріалів за рахунок зменшення активності поверхні сталевих зразків та підвищення його твердості. Тому доцільно дослідити вплив вмісту силікагелю у ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4 на мікротвердість сталевих зразків при фрикційній взаємодії ПКМ зі сталлю. Результати досліджень подано на рис. 7.13.

Відповідно до проведених досліджень, отримано залежності мікротвердості сталевих зразків при фрикційній взаємодії із ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4 від умісту в них силікагелю мають подібний характер. На них спостерігаються екстремальні значення мікротвердості в області 9–11 % вмісту наповнювача у ПКМ. Так, при терті ПКМ з умістом наповнювача від 0 до 10 % спостерігається збільшення мікротвердості поверхні сталевих зразків від 575 до 627 одиниць твердості для ПКМ на основі фенілону С1 та від 455 до 578 одиниць твердості для матеріалів на основі фторопласту-4.

Подальше збільшення вмісту наповнювача у полімерах призводить до зменшення мікротвердості сталевих поверхонь при фрикційній взаємодії із ПКМ до 590 та 520 одиниць твердості для матеріалів на основі фенілону С1 та фторопласту відповідно. Збільшення мікротвердості сталевих поверхонь при концентраціях наповнювача у ПКМ від 0 до 10 % пояснюється створенням на ній «антифрикційного покриття», яке є найбільш стабільним при вмісті наповнювача 10 %. Подальше зменшення мікротвердості при збільшенні вмісту наповнювача з 10 до 30 % пов'язане із абразивною його дією на пару тертя, при якій отримане стабільне «антифрикційного покриття» частково руйнується.

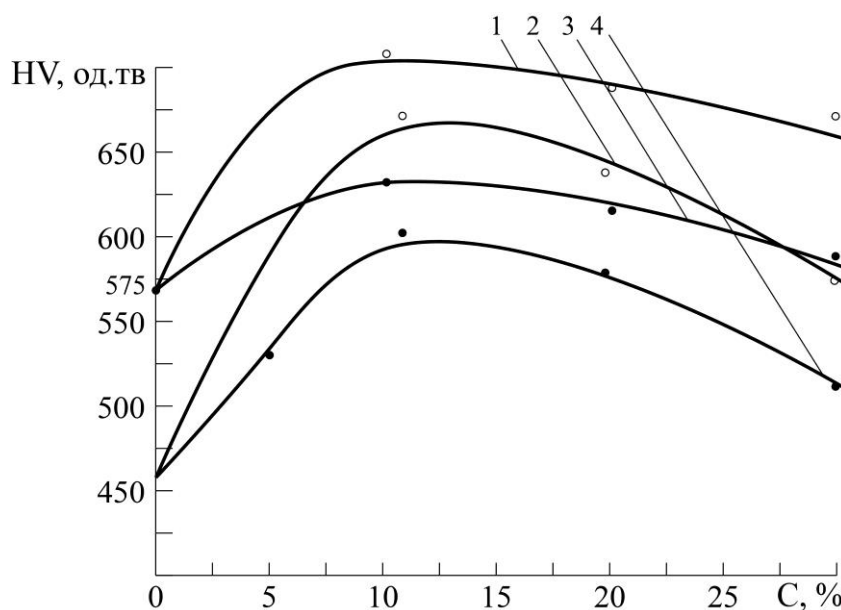


Рисунок 7.13 - Залежності мікротвердості HV сталевго зразка при фрикційній взаємодії із ПКМ на основі фенілону C1 (1,3) та фторопласту-4 (2,4) від умісту C в них силікагелю, отриманих за стандартною технологією (1,2) та з використанням суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (3,4)

Результати досліджень мікротвердості повністю корелюють з раніше проведеними триботехнічними дослідженнями пари тертя ПКМ – сталь, мікрометричними знімками сталевго поверхні тертя та дослідженнями її шорсткості при терті із розробленими ПКМ і підтверджують гіпотезу щодо створення в результаті трибохімічних реакцій «острівців переносу» 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 за допомогою суміщення (*in situ*), мікротвердість сталевго зразка на 10–15 % має більші значення, ніж у матеріалів, отриманих за стандартною технологією, що пояснюється створенням більш стабільного «антифрикційного покриття» при терті даних матеріалів по сталі. Для підтвердження цього припущення було

отримано знімки сталевих поверхні тертя, на яких детально представлено особливості її морфології після фрикційної взаємодії сталі з розробленими ПКМ, отриманими за стандартною технологією і за допомогою (*in situ*) суміщення (рис. 7.14).

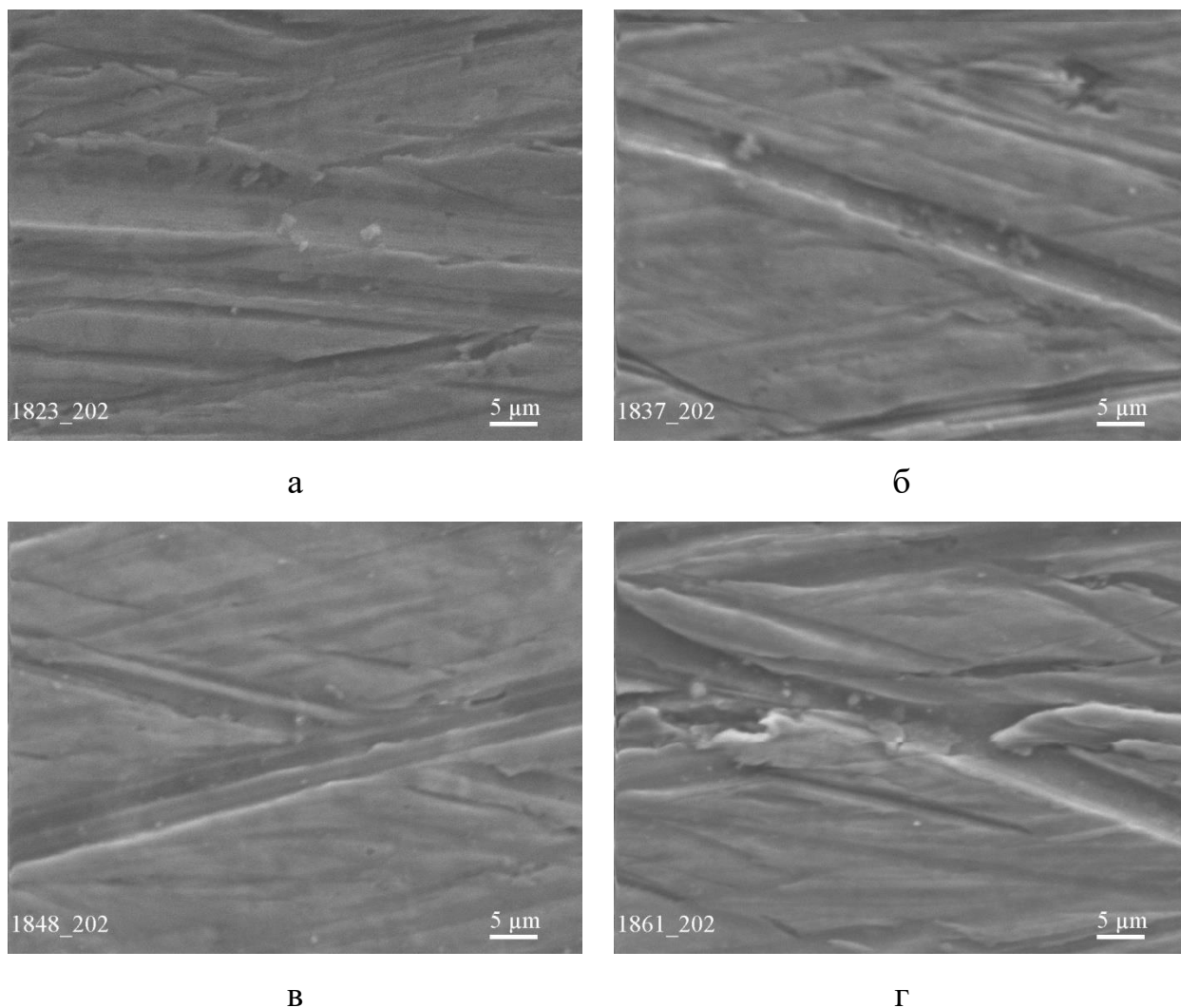


Рисунок 7.14 – Мікрофотографії сталевих поверхонь після фрикційної взаємодії з розробленими ПКМ на основі фенілону С1 (а, б) та фторопласту-4 (в, г), отриманих за стандартною технологією (а, в) і викорисовуючи суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій (б, г)

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, що повністю корелює із результатами досліджень мікротвердості сталевих поверхонь тертя після фрикційної взаємодії із матеріалами на основі фенілону C1, фторопласту-4 та силікагелю.

Слід відзначити, що більша кількість цих частинок спостерігається на сталевій поверхні терті після фрикційної взаємодії із ПКМ, отриманим за допомогою суміщення (*in situ*), що підтверджує припущення щодо створення більш стійкого «антифрикційного покриття» при фрикційній взаємодії ПКМ, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*), порівняно із матеріалами, отриманими за стандартною технологією.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що оптимальним вмістом силікагелю у фенілоні C1 та фторопласті є 10 % ваг. При терті ПКМ з цим вмістом наповнювача по сталі у вузлах тертя спостерігаються мінімальні значення коефіцієнта тертя для матеріалів на основі фенілону C1 - 0,29, для матеріалів на основі фторопласту - 0,25. Відповідно до цього температура на поверхні тертя не перевищує 82°C для ПКМ на основі фенілону C1 і 48°C для ПКМ на основі фторопласту-4. Характер залежності інтенсивності лінійного зношування ПКМ та сталі при їх фрикційній взаємодії повністю корелюють із залежностями за визначенням коефіцієнта тертя та температури на поверхні тертя від вмісту наповнювача у ПКМ. При 10 % вмісті силікагелю спостерігаються мінімальні значення інтенсивності лінійного зношування для матеріалів на основі фенілону C1 - 25×10^{-9} м/м, для матеріалів на основі фторопласту - 7×10^{-9} м/м. Покращення триботехнічних характеристик досліджених пар тертя пояснюється створенням «антифрикційного покриття» на сталевій деталі, що

підтверджується її мікрофотографіями та дослідженнями шорсткості і мікротвердості після фрикційної взаємодії із вихідними полімерами та ПКМ на їх основі. Кращі значення триботехнічних характеристик у парах тертя із ПКМ, отриманими за допомогою суміщення (*in situ*), пояснюються створенням більш стабільного «антифрикційного покриття» на сталевій поверхні, ніж після тертя із ПКМ, отриманими за стандартною технологією, що підтверджується різницею в морфології сталевих поверхонь тертя після фрикційної взаємодії досліджуваних матеріалів.

7.4 Вплив зовнішніх факторів на показники тертя та зношування ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та силікагелю

Розвиток науки і техніки в останні десятиріччя беззаперечно засвідчив, що вирішення питань підвищення надійності та довговічності машин повинно ґрунтуватися на комплексному підході, до якого входять теоретичні та прикладні аспекти основних етапів створення машин, починаючи від проєктування до їх експлуатації [285; 286].

У багатьох випадках визначальну роль мають прикладні завдання тертя та зношування елементів машин, це так звані триботехнічні завдання, пов'язані зі створенням нових композитних матеріалів із заздалегідь заданими властивостями й оптимізацією конструкцій вузлів тертя і герметизації.

Відповідно до проведених трибологічних досліджень встановлено, що оптимальним вмістом силікагелю у фенілоні С1 та фторопласті-4 є 10 % ваг. При терті цих ПКМ по сталі спостерігаються мінімальні значення коефіцієнтів тертя, температури на поверхні тертя та зношування. Тому для подальших досліджень з виявлення впливу зовнішніх факторів на тертя та зношування розроблених ПКМ при фрикційній взаємодії зі сталлю було обрано матеріали із 10 % вмістом наповнювача. Основними зовнішніми факторами, що впливають на пару тертя, є тиск, швидкість ковзання,

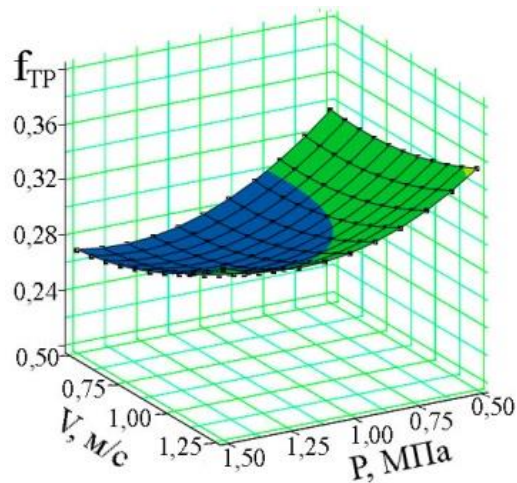
температура довкілля та середовище, в якому відбувається тертя [287]. Залежно від призначення вузли тертя можуть працювати при дії всіх цих факторів. Тому доцільно визначити їхній вплив на триботехнічні характеристики та встановити граничні умови експлуатації пар тертя розроблений ПКМ – сталь.

7.4.1 Вплив навантаження та швидкості ковзання на тертя та зношування термостійких ПКМ при фрикційній взаємодії із сталлю

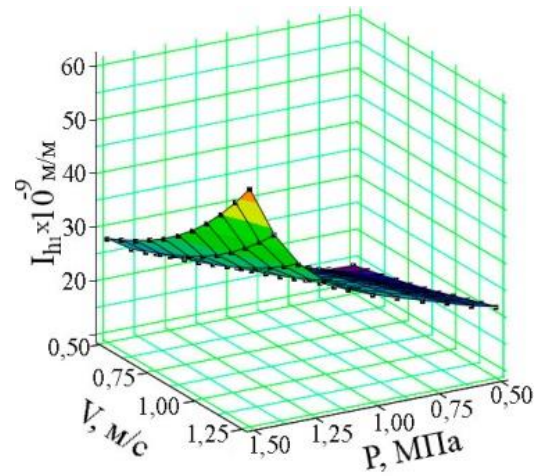
Відповідно до попередніх досліджень тертя та зношування вихідних полімерів при фрикційній взаємодії зі сталлю встановлено, що граничними тисками та швидкостями ковзання, до яких спостерігається нормальний режим роботи вузла тертя фенілон С1 – сталь є $P = 1,25$ МПа та $V = 1,00$ м/с і фторопласт-4 – сталь $P = 2,0$ МПа та $V = 1,25$ м/с. При збільшенні хоча б одного з цих параметрів режим тертя з нормального перетворюється на аварійний. Тому попередні дослідження трибологічних властивостей пари тертя на основі фенілону С1 проведено в інтервалах навантажень від 0,5 до 1,25 МПа та швидкостей ковзання від 0,5 до 1,5 м/с і на основі фторопласту-4 в інтервалах навантажень від 0,5 до 2,0 МПа та швидкостей ковзання від 0,5 до 1,5 м/с. При збереженні нормального режиму роботи в цьому інтервалі режимів експлуатації збільшувалися їхні значення до настання аварійного режиму. Результати досліджень впливу навантажень та швидкостей ковзання на коефіцієнт тертя й інтенсивність лінійного зношування ПКМ на основі фенілону С1 і фторопласту-4, наповнених 10 % силікагелю та отриманих за стандартною технологією, подано на рис. 7.15.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що залежності коефіцієнта тертя й інтенсивності лінійного зношування від навантаження і швидкості ковзання для матеріалів на основі фенілону С1 та фторопласту-4 мають подібний характер. Так, зменшення коефіцієнта тертя для ПКМ на основі фенілону С1 спостерігається в інтервалі навантажень від 0,5 до

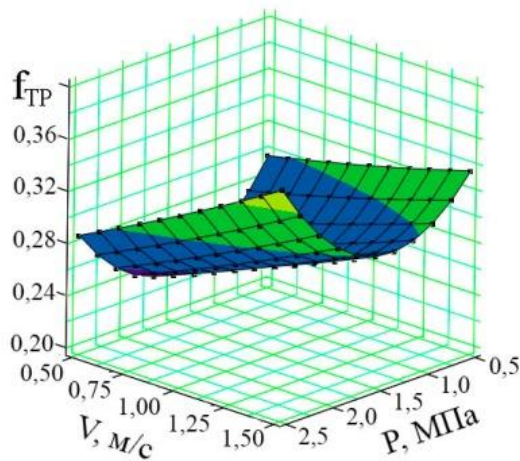
1,25 МПа, а для ПКМ на основі фторопласту-4 - в інтервалі навантажень від 0,5 до 2,00 МПа впродовж всього інтервалу швидкостей ковзання.



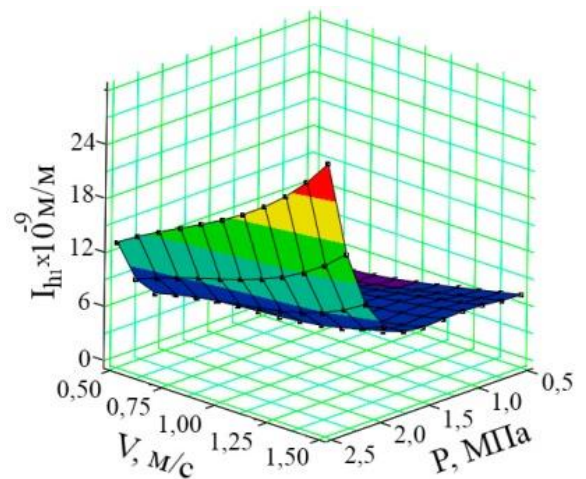
а



б



в



г

Рисунок 7.15 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а, в) та інтенсивності лінійного зношування I_{hl} (б, г) ПКМ на основі фенілону С1 (а,б) та фторопласту-4 (в, г), наповнених 10 % силікагелю і отриманих за стандартною технологією

Така поведінка коефіцієнта тертя характерна для матеріалів антифрикційного призначення [33], коли зростання сили тертя не таке інтенсивне, як зростання питомого навантаження. Подальше збільшення навантаження для матеріалів на основі фенілону С1 до 1,5 МПа та матеріалів

на основі фторопласту-4 до 2,5 МПа призводить до зростання коефіцієнта тертя. Збільшення швидкості ковзання від 0,5 до 1,25 м/с для ПКМ на основі фенілону С1 і від 0,5 до 1,5 м/с для ПКМ на основі фторопласту-4 призводить до зростання коефіцієнта тертя впродовж всього інтервалу навантажень.

З підвищенням навантаження та швидкості ковзання для всіх досліджених матеріалів спостерігається збільшення зношування ПКМ. Причому для матеріалів на основі фенілону С1 при навантаженнях від 0,5 до 1,25 МПа і для матеріалів на основі фторопласту-4 при навантаженнях від 0,5 до 2,0 МПа спостерігається невисока інтенсивність зношування, а вже при більших навантаженнях вона значно зростає. Збільшення швидкості ковзання від 0,5 до 1,00 м/с для ПКМ на основі фенілону С1 і від 0,5 до 1,25 м/с для ПКМ на основі фторопласту-4 призводить до незначного збільшення інтенсивності лінійного зношування впродовж всього інтервалу навантажень. А вже при подальшому збільшенні швидкості ковзання збільшення інтенсивності лінійного зношування ПКМ більш інтенсивне.

Різке збільшення коефіцієнта тертя й інтенсивності лінійного зношування матеріалів на основі фенілону С1 при навантаженнях понад 1,25 МПа і швидкості ковзання понад 1,00 м/с та для матеріалів на основі фторопласту-4 при навантаженнях понад 2,00 МПа і швидкості ковзання понад 1,25 м/с пов'язано із переходом від нормального режиму роботи досліджуваних вузлів тертя до аварійного, при якому спостерігається швидке руйнування матеріалу та можливе заклинювання вузла тертя, в якому він працює [25]. Тобто граничними умовами експлуатації для матеріалу 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель є $P = 1,25$ МПа та $V = 1,0$ м/с, а для матеріалу 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель - $P = 2,00$ МПа та $V = 1,25$ м/с.

Подальше збільшення навантаження та швидкості ковзання призводить до значного підвищення коефіцієнта тертя й інтенсивності лінійного зношування ПКМ, що свідчить про початок аварійного режиму тертя, при якому спостерігається швидке руйнування матеріалу та можливе заклинювання вузла тертя, в якому він працює.

Для спрощення визначення основних триботехнічних параметрів при терті розроблених ПКМ по сталі за допомогою програми MathCAD (додаток В) було отримано математичні залежності коефіцієнта тертя та інтенсивності лінійного зношування від навантаження та швидкості ковзання у вузлах тертя з ПКМ на основі фенілону С1 (7.1, 7.2) та фторопласту-4 (7.3, 7.4). Ці залежності подано нижче:

$$f_{TP} = 0,1 \cdot P^2 + 0,064 \cdot V^2 + 0,038 \cdot P \cdot V - 0,284 \cdot P - 0,104 \cdot V + 0,478 \quad (7.1)$$

$$I_{hl} = 16 \cdot P^2 + 5,6 \cdot V^2 + 19,52 \cdot P \cdot V - 29,28 \cdot P - 12,6 \cdot V + 26,65 \quad (7.2)$$

$$f_{TP} = 0,058 \cdot P^2 + 0,0075 \cdot V^2 + 0,023 \cdot P \cdot V - 0,191 \cdot P + 0,013 \cdot V + 0,363 \quad (7.3)$$

$$I_{hl} = 4,292 \cdot P^5 - 1,738 \cdot V^5 - 26,082 \cdot P^4 + 31,088 \cdot V^4 + 54,856 \cdot P^3 - 90,22 \cdot V^3 - 52,401 \cdot P^2 + 98,896 \cdot V^2 + 28,686 \cdot P - 44,869 \cdot V + 1,12 \cdot P^4 \cdot V - 0,427 \cdot P \cdot V^4 + 2,24 \cdot P^3 \cdot V - 19,291 \cdot P \cdot V^3 + 5,642 \cdot P^2 \cdot V + 50,065 \cdot P \cdot V^2 - 2,133 \cdot P^3 \cdot V^2 + 10,057 \cdot P^2 \cdot V^3 - 19,755 \cdot P^2 \cdot V^2 - 31,181 \cdot P^1 \cdot V^1 + 6,679 \quad (7.4)$$

Використовувати формули 7.1–7.4 можна не тільки для визначення коефіцієнта тертя й інтенсивності лінійного зношування ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнених 10 % силікагелю, при фрикційній взаємодії зі сталлю у досліджуваному інтервалі навантажень та швидкостей ковзання, але й для передбачення поведінки пари тертя за зовнішніх умов роботи, які виходять за межі дослідженого інтервалу.

Результати досліджень впливу навантажень та швидкостей ковзання на коефіцієнт тертя та інтенсивність лінійного зношування ПКМ на основі фенілону С1 і фторопласту-4, наповнених 10 % силікагелю й отриманих за допомогою суміщення (in situ), подано на рис. 7.16.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що залежності коефіцієнта тертя й інтенсивності лінійного зношування від навантаження і швидкості ковзання для матеріалів на основі фенілону С1 та фторопласту-4, отриманих за допомогою суміщення (in situ), мають подібний характер. Причому характер отриманих аналогічний до залежностей, отриманих при терті ПКМ на основі фенілону С1 та 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.

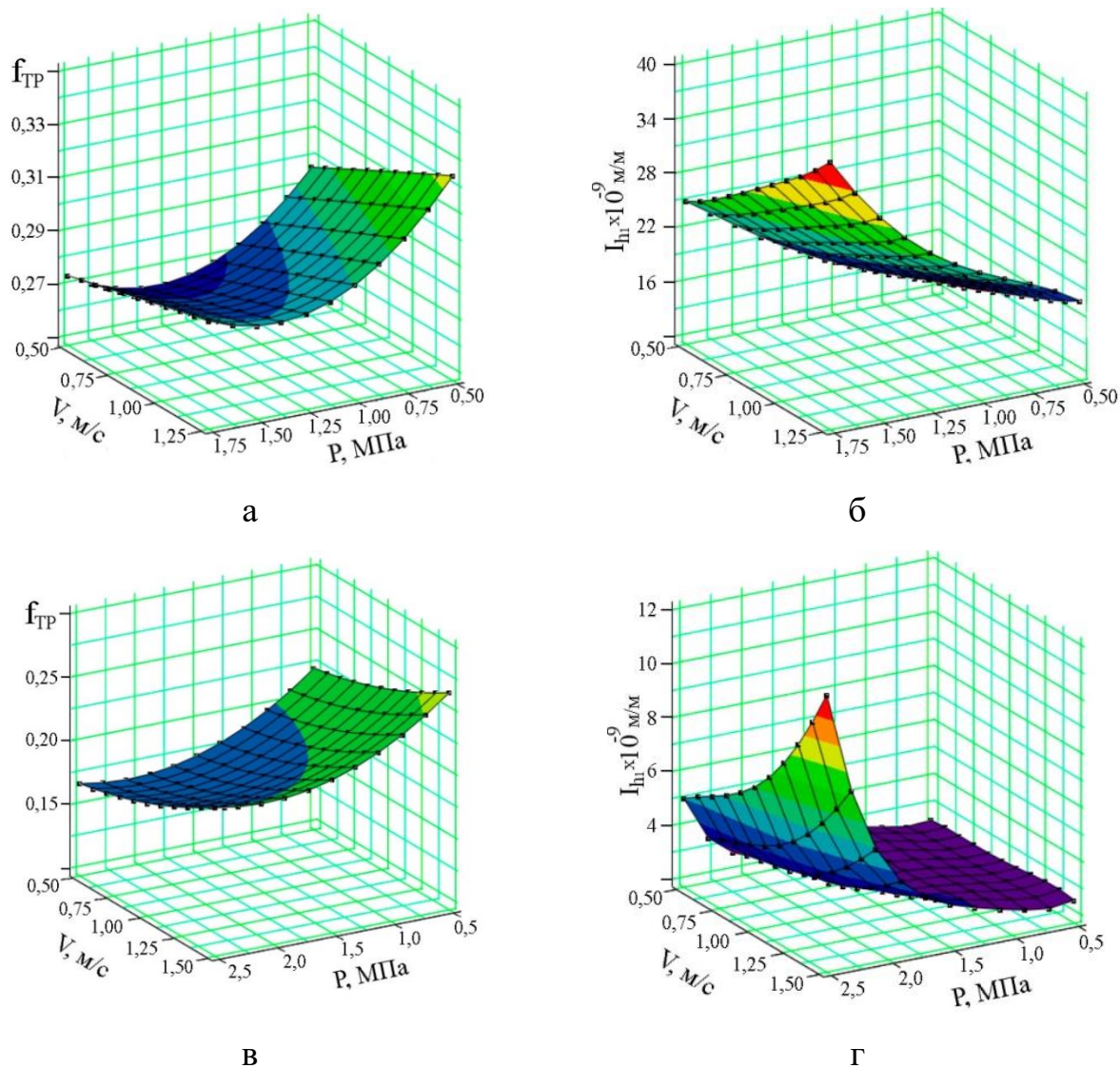


Рисунок 7.16 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а, в) та інтенсивності лінійного зношування I_{hl} (б, г) ПКМ на основі фенілону С1 (а, б) та фторопласту-4 (в, г), наповнених 10 % силікагелю і отриманих використовуючи суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій

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 у 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 на збільшення коефіцієнта тертя для всіх досліджених матеріалів більше впливає навантаження, ніж швидкість ковзання.

Інтенсивність лінійного зношування для досліджуваного ПКМ збільшується 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 та зношування при збільшенні навантажень та швидкостей ковзання пов'язано із переходом з нормального режиму роботи вузла тертя на аварійний, при якому вузли тертя не працюють і досить швидко виходять із ладу.

Тобто відповідно до проведених досліджень граничними умовами експлуатації для матеріалів, отриманих за допомогою 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.

За отриманими залежностями було виведено математичні формули, які описують вплив режимів експлуатації (навантаження та швидкості ковзання) пари тертя на основні триботехнічні параметри при терті ПКМ, отриманих за допомогою (*in-situ*) суміщення по сталі. Формули 6.5 і 6.6 для ПКМ на основі фенілону С1 та 6.7 і 6.8 для ПКМ на основі фторопласту-4.

$$f_{TP} = 0,051 \cdot P^2 - 1,33 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 - 0,015 \cdot P \cdot V - 0,126 \cdot P + 0,047 \cdot V + 0,327 \quad (7.5)$$

$$I_{h1} = 6,571 \cdot P^2 + 4,667 \cdot V^2 + 6,354 \cdot P \cdot V - 6,946 \cdot P - 2,849 \cdot V + 12,141 \quad (7.6)$$

$$f_{TP} = 0,023 \cdot P^2 + 0,024 \cdot V^2 + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot V - 0,098 \cdot P - 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot V + 0,261 \quad (7.7)$$

$$I_{h1} = 2,164 \cdot P^4 - 4,736 \cdot V^4 - 11,673 \cdot P^3 + 16,699 \cdot V^3 + 22,268 \cdot P^2 - 19,17 \cdot V^2 - 18,611 \cdot P + 7,863 \cdot V + 1,12 \cdot P^3 \cdot V + 2,507 \cdot P \cdot V^3 + 2,155 \cdot P^2 \cdot V^2 - 6,37 \cdot P^2 \cdot V - 11,069 \cdot P \cdot V^2 + 14,887 \cdot P \cdot V + 4,628 \quad (7.8)$$

7.4.2 Вплив температури та робочого середовища на основні трибологічні властивості розроблених ПКМ

Актуальність впливу температурного фактора на триботехнічні характеристики матеріалів пар тертя зумовлена не тільки впливом зовнішнього середовища, але й низкою кінематичних, технологічних і конструкційних факторів [288]. Так, при високих швидкостях ковзання і питомих навантаженнях у зонах фактичної взаємодії елементів пар тертя суттєво підвищується температура, а це у свою чергу, призводить до підвищення об'ємної температури деталей. Різниця між температурою об'ємною та температурою в зонах фактичного контакту залежить від геометрії контактуючих поверхонь, їх твердості, теплофізичних характеристик, параметрів режимів тертя та розмірів відповідних деталей [288].

Найбільшою мірою температурний фактор може впливати на триботехнічні характеристики матеріалів пар тертя (коефіцієнт тертя, температура й інтенсивність зношування матеріалів), що пов'язано з особливостями адгезійної взаємодії матеріалів, яка сприяє розвитку процесів схоплювання та заїдання, або деструкції в зонах контактної взаємодії. Тобто, зміна температури в зоні контактної взаємодії елементів пар тертя призводить не тільки до зміни інтенсивності зношування матеріалів, але і до можливої зміни виду зношування.

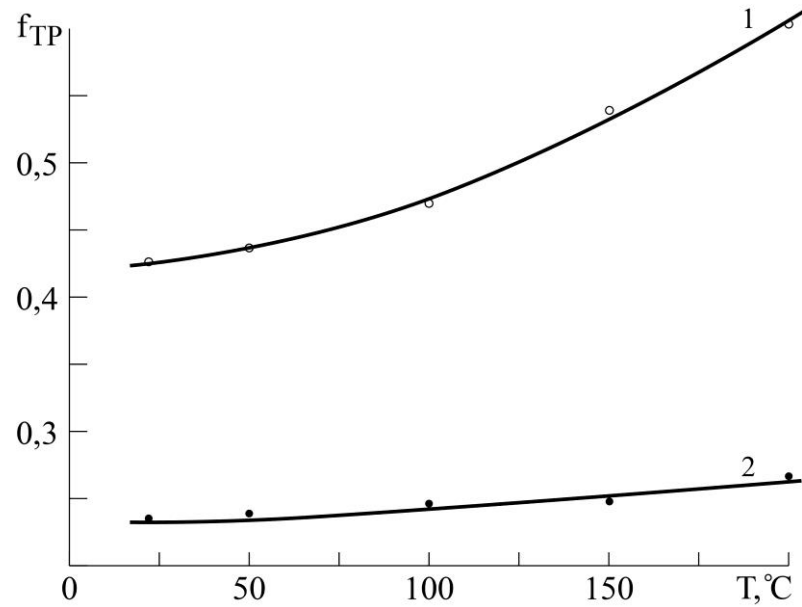
Робота окремих вузлів тертя машин і механізмів при підвищених температурах є характерною для компресорних, валкових і черв'ячних машин, двигунів внутрішнього згорання, хімічних реакторів, виробів літаків та ракетобудування, рухомих з'єднань печей, елементів гальмівних пристроїв машин тощо [289; 290]. Проблема підвищення надійності та довговічності такого обладнання в багатьох випадках пов'язана з недостатньою працездатністю пар тертя при жорстких умовах експлуатації.

Тому нашою метою є дослідження впливу температури на триботехнічні властивості композитних матеріалів на основі термостійких полімерів (фенілон С1, фторопласт-4) з дисперсним наповнювачем силікагелем та вибір максимальної робочої температури для цих ПКМ.

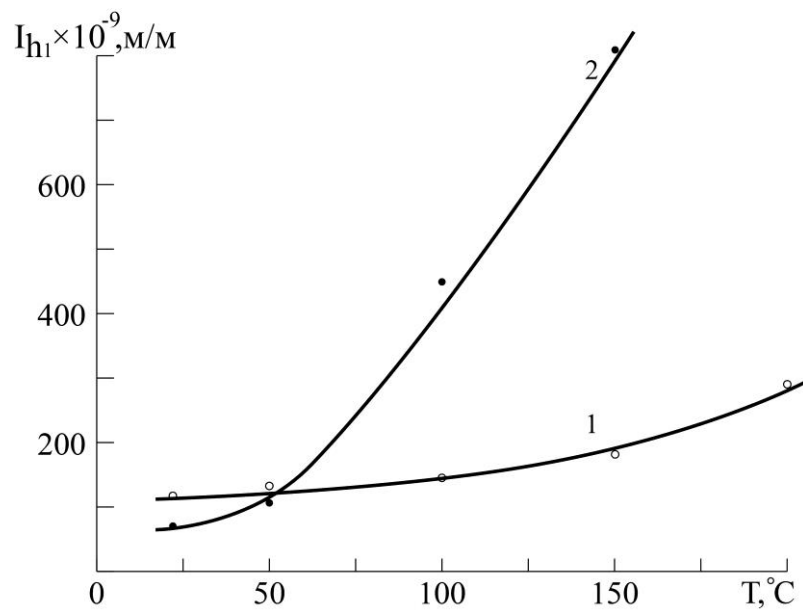
Внаслідок того, що в якості полімерних матриць було вибрано полімери з високим рівнем термо- та теплостійкості деталі з яких можуть працювати при високих температурах, зберігаючи при цьому високий рівень надійності та довговічності. Для визначення цих температур було проведено дослідження зміни коефіцієнтів тертя й інтенсивностей лінійного зношування вихідних полімерів на основі фенілону С1 та фторопласту-4 від дії температури навколишнього середовища. Їх результати подано на рис. 7.17.

Відповідно до проведених досліджень можна побачити, що залежності коефіцієнта тертя досліджених матеріалів від температури навколишнього середовища при фрикційній взаємодії зі сталлю мають подібний характер. Так, зі збільшенням температури спостерігається збільшення коефіцієнтів тертя. Для матеріалу на основі фенілону С1 він збільшується з 0,43 до 0,58, а для матеріалів на основі фторопласту з 0,24 до 0,26 при збільшенні температури навколишнього середовища з 20 до 200°C. Це відбувається внаслідок підвищення адгезійного складника сили тертя при фрикційній взаємодії поверхонь за рахунок деформації полімерної деталі і збільшення площі контакту в парі тертя. Слід відзначити, що зростання коефіцієнта тертя при фрикційній взаємодії фенілону С1 зі сталлю більш інтенсивне, ніж у

фторопласту-4, що пояснюється тим, що фенілон С1 є більш полярним матеріалом, ніж фторопласт-4, який при терті проявляє більшу активність до сталевій поверхні.



а



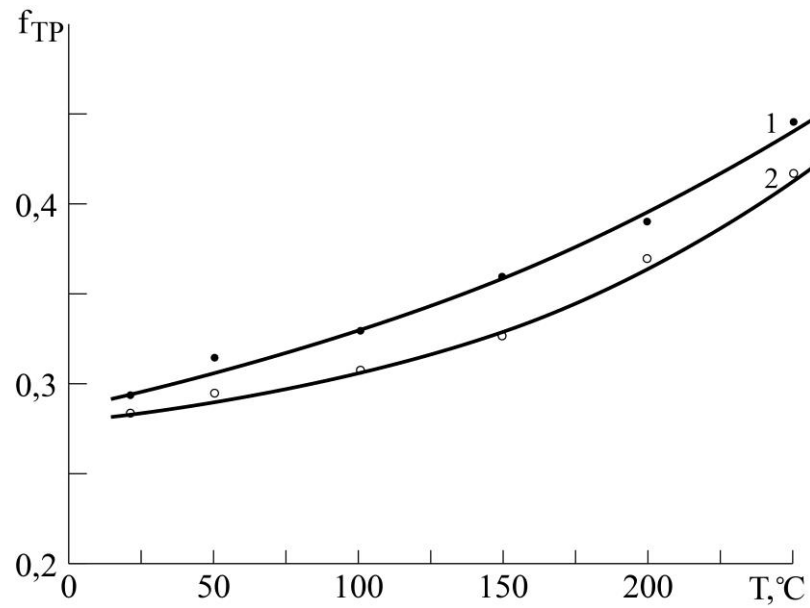
б

Рисунок 7.17 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та інтенсивності лінійного зношування I_{hl} (б) вихідних полімерних матеріалів на основі фенілону С1 (1) та фторопласту-4 (2) від температури навколишнього середовища T при фрикційній взаємодії зі сталлю

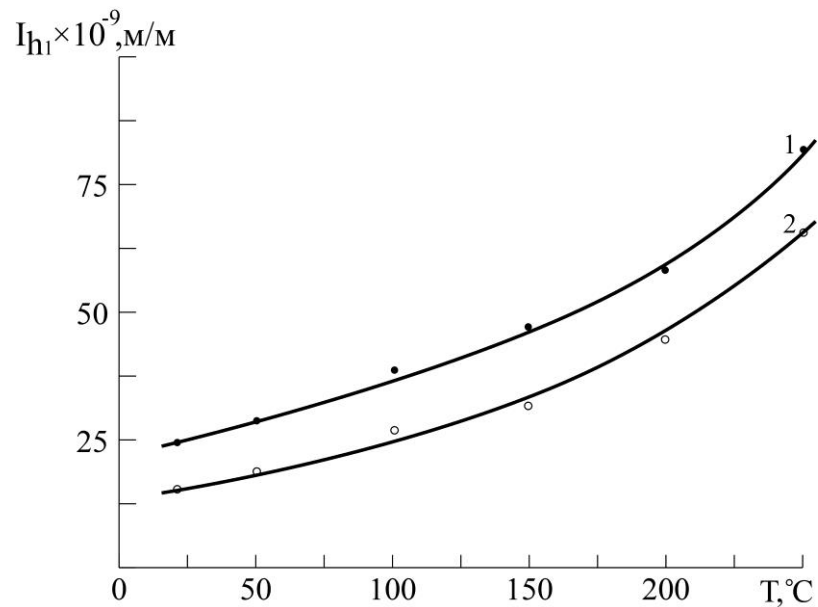
Залежності інтенсивності лінійного зношування досліджених полімерів також мають подібний характер. Так, зі збільшенням температури спостерігається збільшення інтенсивності лінійного зношування досліджених полімерів. Для матеріалу на основі фенілону С1 вона збільшується з 120×10^{-9} до 280×10^{-9} м/м, при збільшенні температури навколишнього середовища з 20 до 200°C. А для матеріалів на основі фторопласту з 72×10^{-9} до 810×10^{-9} м/м при збільшенні температури навколишнього середовища з 20 до 150°C. Слід відзначити, що інтенсивність зростання зношування для фенілону С1 набагато менша, ніж для фторопласту-4, що пов'язано із різною структурою та морфологією досліджених матеріалів.

Також за результатами досліджень можна побачити, що залежності інтенсивності лінійного зношування досліджених полімерних матеріалів від температури навколишнього середовища при терті по сталі, мають екстремуми в області температур для фенілону С1 140-150°C і для фторопласту-4 60–65°C. В цих інтервалах спостерігається значне збільшення інтенсивності лінійного зношування, яке може призводити до аварійного режиму роботи вузлів тертя з досліджених матеріалів. Тобто можна стверджувати, що межові температури роботи досліджених вузлів тертя при яких зберігається їх високий рівень надійності та довговічності, дорівнюють для фенілону С1 – 140–150°C, для фторопласту-4 – 60–65°C. Деталі з досліджених матеріалів можуть працювати і при більших температурах, однак будуть мати досить великий рівень зношування і можуть не забезпечити високий рівень довговічності в роботі вузла загалом.

У даній роботі встановлено, що найкращий рівень трибологічних властивостей мають ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнені 10 % силікагелю. Тому доцільно дослідити вплив температури навколишнього середовища на тертя та зношування даних матеріалів. Результати досліджень подано на рис. 7.18, 7.19.



а

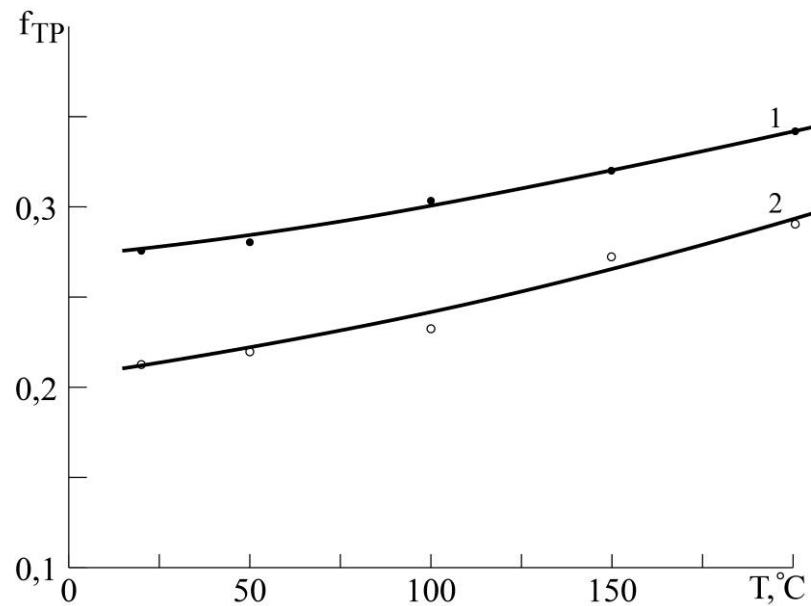


б

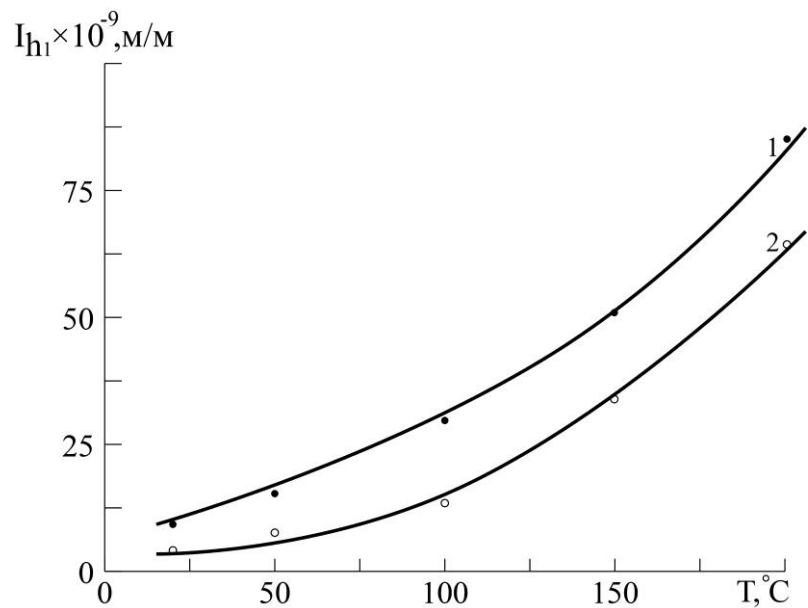
Рисунок 7.18 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та інтенсивності лінійного зношування I_{hl} (б) ПКМ 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель, отриманого за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2), від температури навколишнього середовища T при фрикційній взаємодії зі сталлю

Відповідно до проведених досліджень можна стверджувати, що залежності коефіцієнта тертя ПКМ 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель,

отриманого за стандартною технологією та за допомогою суміщення (in situ), від температури навколишнього середовища при фрикційній взаємодії зі сталлю мають подібний характер.



а



б

Рисунок 7.19 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та інтенсивності лінійного зношування I_{hl} (б) ПКМ 90 % фторопласт -4 + 10 % силікагель, отриманого за стандартною технологією (1) та з використанням суміщення (in situ) вихідних компонентів полімерних композицій (2), від температури навколишнього середовища T при фрикційній взаємодії зі сталлю

Зі збільшенням температури навколишнього середовища з 20 до 250°C спостерігається підвищення коефіцієнта тертя з 0,29 до 0,45 для матеріалів отриманих за стандартною технологією і з 0,28 до 0,41 для матеріалів, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій.

Залежності інтенсивності лінійного зношування ПКМ 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель, отриманого за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*) від температури навколишнього середовища при фрикційній взаємодії зі сталлю мають також подібний характер.

Так, зі збільшенням температури навколишнього середовища з 20 до 250°C спостерігається підвищення інтенсивності лінійного зношування з 25×10^{-9} до 82×10^{-9} м/м для матеріалів, отриманих за стандартною технологією, і з 14×10^{-9} до 62×10^{-9} м/м для матеріалів, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій.

Причому слід відзначити, що отримані залежності мають екстремум в області температур 165–175°C. Тобто деталі з дослідженого матеріалу будуть працювати в нормальному режимі роботи та забезпечувати високий рівень надійності та довговічності вузлів тертя при температурах навколишнього середовища від 20 до 175°C.

Подальша їх експлуатація при температурах до 250°C можлива при врахуванні зменшеного терміну служби вузла тертя.

Слід відзначити, що розроблені ПКМ на основі фенілону С1 та силікагелю можуть працювати у вузлах тертя при температурах експлуатації, які на 30–35°C перевищують аналогічні при терті фенілону С1. Тобто введення силікагелю в ароматичний поліамід дозволяє розширити інтервал температур експлуатації цього матеріалу на 15 %.

Залежності коефіцієнта тертя ПКМ 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель, отриманого за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*), від температури навколишнього середовища при

фрикційній взаємодії зі сталлю мають також подібний характер. Збільшенням температури навколишнього середовища з 20 до 200°C спостерігається підвищення коефіцієнта тертя з 0,27 до 0,35 для матеріалів, отриманих за стандартною технологією і з 0,21 до 0,28 для матеріалів, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій.

Залежності інтенсивності лінійного зношування ПКМ 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель, отриманого за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*), від температури навколишнього середовища при фрикційній взаємодії зі сталлю мають також подібний характер. Так, зі збільшенням температури навколишнього середовища з 20 до 200°C спостерігається підвищення інтенсивності лінійного зношування у з 10×10^{-9} до 80×10^{-9} м/м для матеріалів, отриманих за стандартною технологією, і з 4×10^{-9} до 64×10^{-9} м/м для матеріалів, отриманих за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій.

Отримані залежності мають екстремум в області температур 110–120°C, після якого спостерігається різке збільшення досліджених трибологічних параметрів. Це дозволяє стверджувати, що деталі з матеріалу 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель при фрикційній взаємодії зі сталлю мають нормальним режимом роботи в інтервалі температур навколишнього середовища від 20 до 110°C. Подальша їх експлуатація при температурах до 200°C можлива при врахуванні зменшеного терміну служби вузла тертя.

Відповідно до проведених досліджень можна стверджувати, що деталі з розроблених ПКМ на основі фенілону С1 та силікагелю можуть працювати у вузлах тертя при температурах експлуатації, які перевищують аналогічні при терті фторопласту-4 на 40–45°C. Тобто введення силікагелю у фторполімер дозволяє розширити інтервал температур експлуатації цього матеріалу на 40 %.

Отже, наповнення силікагелем фенілону С1 та фторопласту-4 сприяло розширенню інтервалів температур експлуатації даних матеріалів на 15 та 40 % відповідно порівняно із вихідними полімерами. Це дозволило отримати матеріали, деталі з яких можуть забезпечувати високий рівень надійності та довговічності вузлів тертя при температурах до 175°C для ПКМ на основі фенілону С1 та до 110°C для ПКМ на основі фторопласту-4. Також встановлено, що ПКМ, отримані за допомогою суміщення (*in situ*), мають кращі трибологічні властивості при фрикційній взаємодії зі сталлю при різних температурах навколишнього середовища, ніж отримані за стандартною технологією. Тому для подальших досліджень впливу робочого середовища та триботехнічні характеристики пари тертя ПКМ – сталь було вибрано саме матеріали на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнені 10 % силікагелю й отримані за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій.

Досить часто вузли тертя працюють у різних робочих середовищах (мастила, вода тощо) які, у більшості випадків, використовуються в якості агентів, що чинять змащувальну та охолоджувальну дію на вузол тертя [291–293]. Це призводить до покращення 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 та швидкостей ковзання), ніж при терті без змащування [294; 295].

Результати досліджень впливу навантажень та швидкостей ковзання на трибологічні властивості матеріалів на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнених силікагелем й отриманих за допомогою суміщення (*in situ*), при їх фрикційній взаємодії зі сталлю в мастилі представлено на рис. 7.20, 7.21.

Дослідження проведено в інтервалі навантажень від 5 до 20 МПа та швидкостей ковзання від 0,5 до 1,5 м/с відповідно до попередніх досліджень [296].

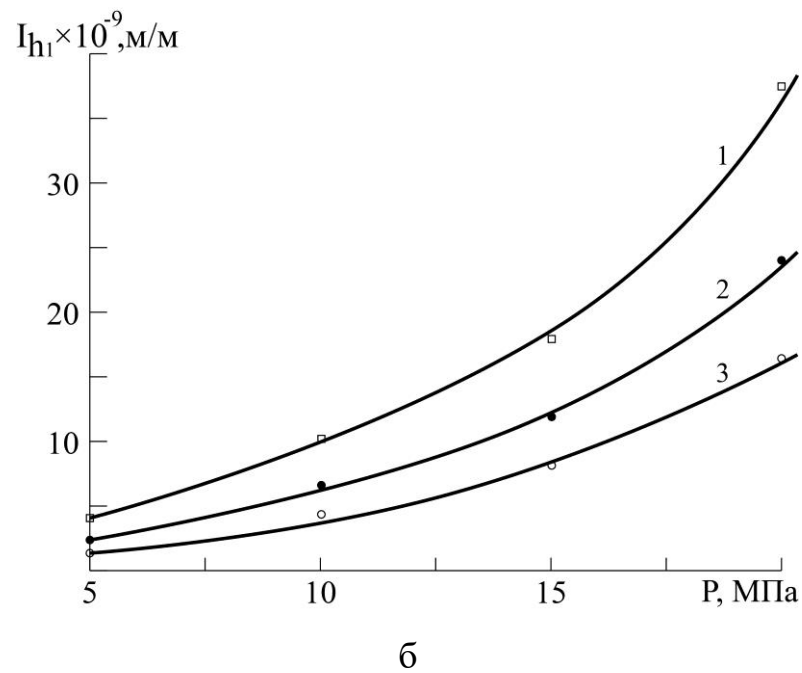
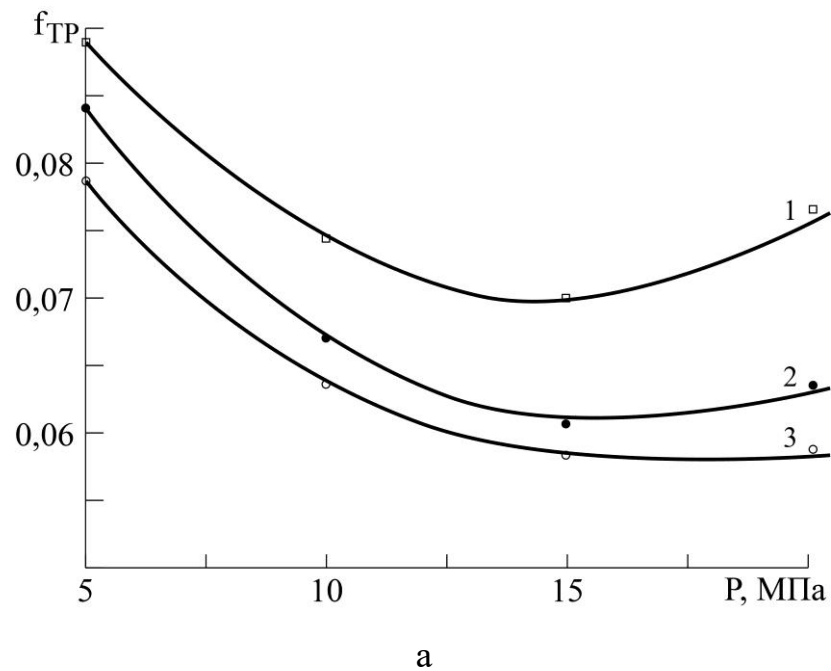


Рисунок 7.20 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та інтенсивності лінійного зношування I_{hl} (б) ПКМ 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель від навантаження P при фрикційній взаємодії зі сталлю у мастилі при швидкостях ковзання (V , м/с): 1 – 1,5; 2 – 1; 3 – 0,5

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що коефіцієнт тертя для дослідженої пари тертя зменшується в інтервалі навантажень від 5 до 15 МПа на 20–25 % залежно від різних швидкостей ковзання. При подальшому підвищенні навантаження спостерігається збільшення коефіцієнта тертя для всіх досліджених швидкостей ковзання. Причому інтенсивніше збільшення спостерігається при більших швидкостях. Так, при швидкості ковзання 1,5 м/с це збільшення становить 10 %, а при швидкості 0,5 м/с – до 1 %.

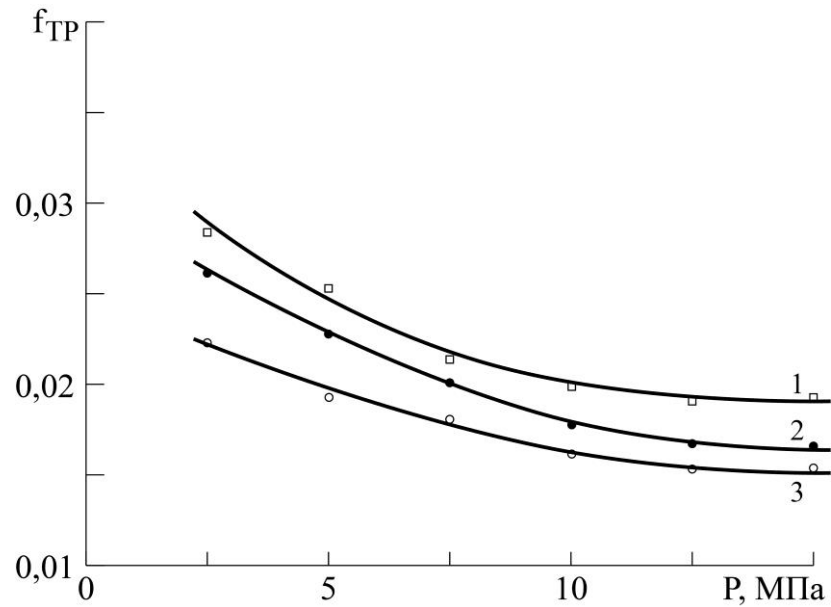
Інтенсивність лінійного зношування ПКМ 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель при фрикційній взаємодії зі сталлю у середовищі мастила збільшується зі збільшенням навантаження від 5 до 20 МПа та швидкості ковзання з 0,5 до 1,5 МПа. Причому більш інтенсивне зростання зношування відбувалося при дії навантажень понад 15 МПа та швидкості ковзання понад 1 м/с, що дає можливість стверджувати, що при цих навантаженнях та швидкостях ковзання у дослідженому вузлі тертя спостерігається початок аварійного періоду роботи. Тобто максимальним навантаженням та швидкістю ковзання, при якій досліджуваний вузол тертя ПКМ – сталь при фрикційній взаємодії у середовищі мастила буде працювати у нормальному режимі роботи є 15 МПа та 1 м/с.

Дослідження впливу навантаження та швидкості ковзання на трибологічні властивості ПКМ 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель проведено в інтервалі навантажень від 2,5 до 15 МПа та швидкостей ковзання від 0,5 до 1,5 м/с.

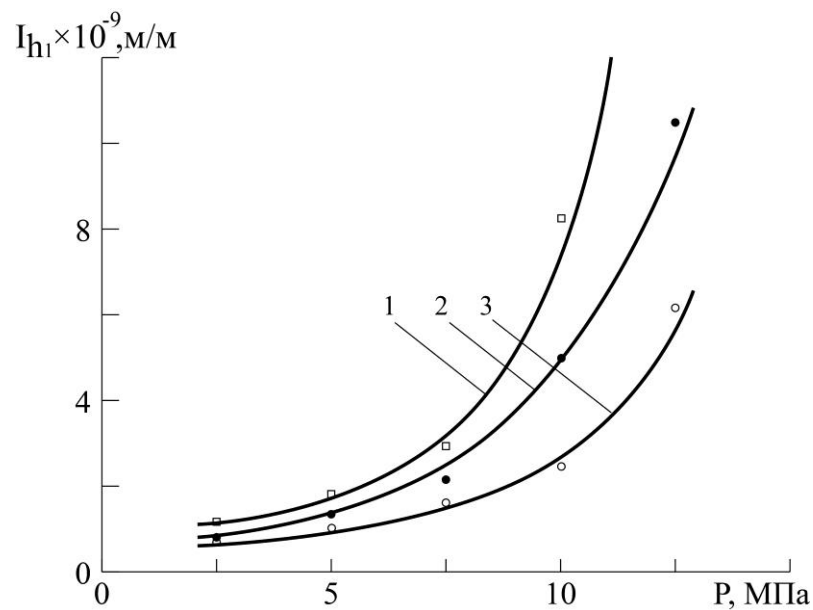
Це обумовлено міцністю ПКМ матеріалу при стисканні, яка складає 18 МПа. Залежності коефіцієнта тертя при фрикційній взаємодії матеріалу 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель зі сталлю у середовищі мастила від навантаження мають подібний характер для всіх досліджених швидкостей ковзання.

Так, зі збільшенням навантажень від 2,5 до 15 МПа спостерігається зменшення коефіцієнта тертя. Причому більш інтенсивне його зменшення

спостерігається при навантаженнях від 2,5 до 10 МПа. З подальшим збільшенням навантаження до 15 МПа спостерігається менш інтенсивне його зменшення. З підвищенням швидкостей ковзання від 0,5 до 1,5 м/с спостерігається збільшення коефіцієнта тертя.



а



б

Рисунок 7.21 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та інтенсивності лінійного зношування I_{h1} (б) ПКМ 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель від навантаження P при фрикційній взаємодії зі сталлю у мастилі при швидкостях ковзання V , м/с: 1 – 1,5; 2 – 1; 3 – 0,5

Інтенсивність лінійного зношування цього ПКМ з підвищенням навантаження від 2,5 до 12,5 МПа та швидкостей ковзання від 0,5 до 1,5 м/с збільшується. Причому слід відзначити, що при навантаженнях від 2,5 до 7,5 МПа інтенсивність підвищення зношування значно менша, ніж після 7,5 МПа. Це пояснюється переходом від нормального режиму роботи до аварійного в дослідженому вузлі тертя. З підвищенням швидкості ковзання з 0,5 до 1,5 спостерігається збільшення інтенсивності лінійного зношування на 40–60 %, що не є критичним підвищенням.

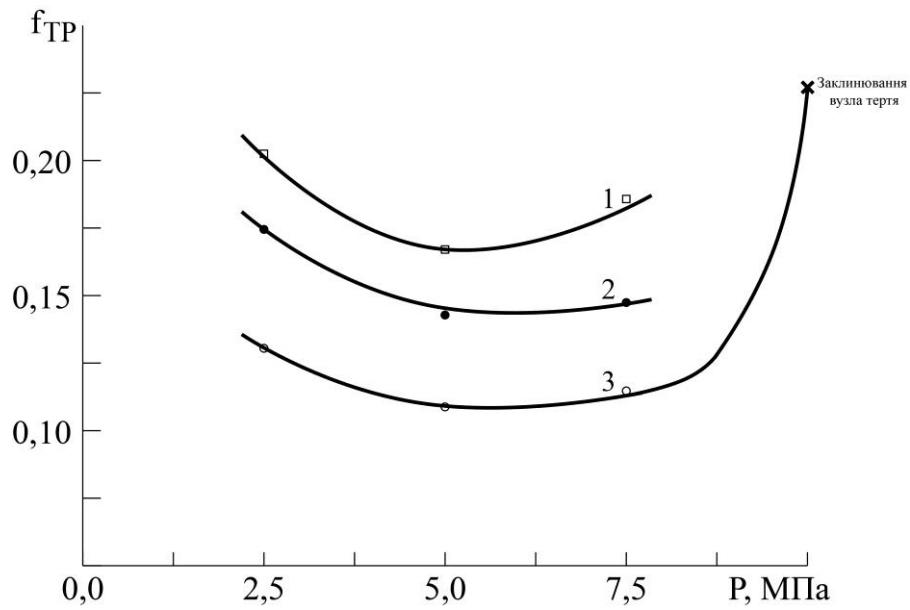
Тобто можна зробити висновок, що деталі з розробленого ПКМ на основі фторопласту-4 при терті у мастилі можуть забезпечувати високий рівень надійності та довговічності при навантаженнях до 7,5 МПа і швидкостях ковзання до 1,5 м/с.

Результати досліджень впливу навантажень та швидкостей ковзання на трибологічні властивості матеріалів на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнених силікагелем й отриманих за допомогою (in-situ) суміщення, при їх фрикційній взаємодії зі сталлю в дистильованій воді представлено на рис. 7.22, 7.23.

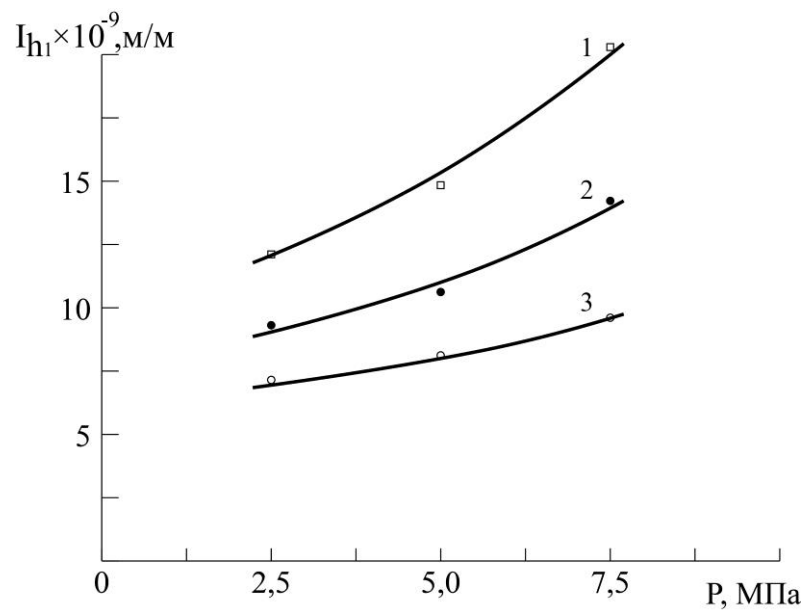
Установлено, що отримані залежності коефіцієнта тертя ПКМ 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель від навантаження при фрикційній взаємодії зі сталлю у дистильованій воді мають подібний характер при всіх досліджених швидкостях ковзання.

Так, зі збільшенням навантаження з 2,5 до 5,0 МПа спостерігається поступове зменшення коефіцієнта тертя.

А вже починаючи з 5 МПа, коефіцієнт тертя починає поступово збільшуватися і при 10 МПа досягає максимальних значень, при яких досліджений вузол тертя заклинює і виходить із ладу. Також слід відзначити, що зі збільшенням швидкості ковзання з 0,5 до 1,5 МПа коефіцієнт тертя збільшується на 40–50 %.



а



б

Рисунок 7.22 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та інтенсивності лінійного зношування I_{hl} (б) ПКМ 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель від навантаження P при фрикційній взаємодії зі сталлю у дистильованій воді при швидкостях ковзання V , м/с: 1 – 1,5; 2 – 1; 3 – 0,5

Залежності інтенсивності лінійного зношування ПКМ 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель від навантаження при фрикційній взаємодії зі сталлю у

дистильованій воді мають також подібний характер при всіх досліджених швидкостях ковзання.

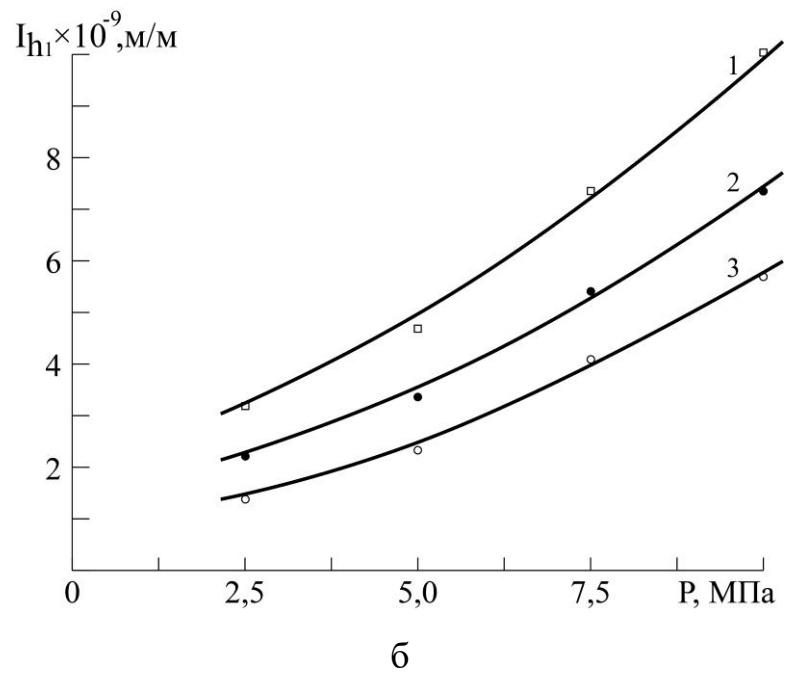
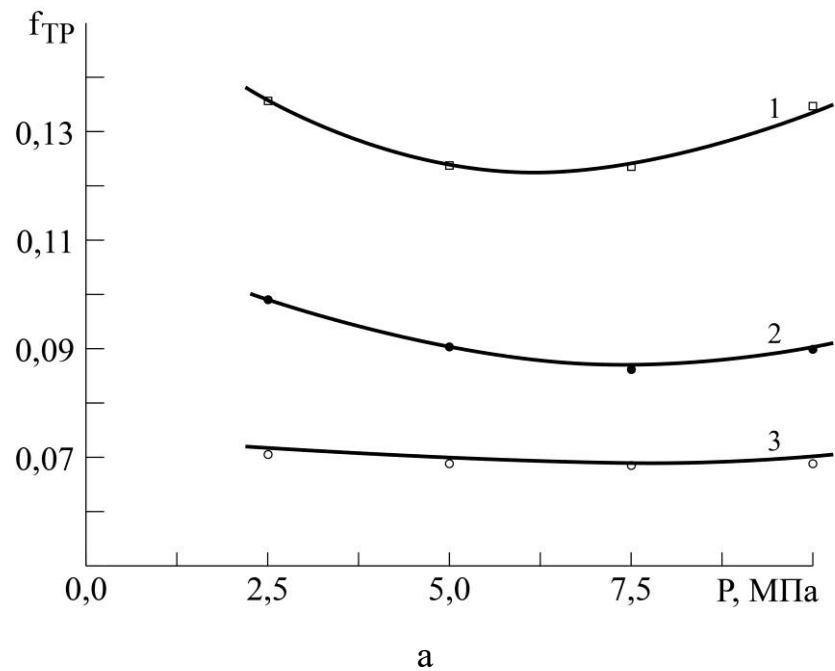


Рисунок 7.23 – Залежності коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та інтенсивності лінійного зношування I_{hl} (б) ПКМ 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель від навантаження P при фрикційній взаємодії зі сталлю у дистильованій воді при швидкостях ковзання V , м/с: 1 – 1,5; 2 – 1; 3 – 0,5

Протягом всього дослідженого інтервалу навантажень з 2,5 до 7,5 МПа інтенсивність лінійного зношування збільшується на 20–40 % залежно від швидкості ковзання. Зі збільшенням швидкості ковзання з 0,5 до 1,5 м/с інтенсивність лінійного зношування зростає на 40–60 %. Відповідно до проведених досліджень можна стверджувати, що деталі з ПКМ 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель при фрикційній взаємодії зі сталлю у водному середовищі будуть працювати надійно та довговічно при навантаженнях до 7,5 МПа та швидкостях ковзання до 1,5 м/с.

При дослідженні впливу навантаження і швидкості ковзання на основні триботехнічні характеристики вузла тертя ПКМ 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель – сталь при терті у водному середовищі встановлено, що зі збільшенням навантаження до 7,5 МПа спостерігається зменшення коефіцієнта тертя. Подальше підвищення навантаження з 7,5 до 10 МПа призводить до зростання цього параметра. З підвищенням швидкостей ковзання від 0,5 до 1,5 м/с спостерігається збільшення коефіцієнта тертя на 30–45 %. Збільшення навантаження та швидкості ковзання також призводить до підвищення інтенсивності лінійного зношування дослідженого ПКМ. Так, при підвищенні навантаження з 2,5 до 10 МПа збільшення зношування складає 60–70 %, що не є критичними значеннями.

З підвищенням швидкості ковзання з 0,5 до 1,5 м/с збільшення інтенсивності лінійного зношування складає 50–60 %. Характер отриманих графіків дозволяє стверджувати, що при навантаженнях та швидкостях ковзання понад 10 МПа та 1,5 м/с починається режим аварійного зношування дослідженої пари тертя. Тобто, відповідно до проведених досліджень, можна стверджувати, що деталі з ПКМ 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель при фрикційній взаємодії зі сталлю у водному середовищі будуть працювати надійно та довговічно при навантаженнях до 10 МПа та швидкостях ковзання до 1,5 м/с.

У результаті проведення досліджень щодо визначення впливу зовнішніх факторів на тертя та зношування термостійких полімерних

КОМПОЗИТИВ встановлено вплив навантаження та швидкості ковзання на основні трибологічні властивості ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнених 10 % силікагелю, отриманих стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*), при їхній фрикційній взаємодії зі сталлю. Установлено граничні умови експлуатації, при яких деталі з досліджених ПКМ працюють у нормальному режимі роботи. Для матеріалу 90 % фенілон С1 + 10 % силікагель є $P = 1,25$ МПа та $V = 1,0$ м/с, а для матеріалу 90 % фторопласт-4 + 10 % силікагель - $P = 2,00$ МПа та $V = 1,25$ м/с. Отримано математичні залежності, які описують вплив навантаження та швидкості ковзання на коефіцієнт тертя та інтенсивність лінійного зношування досліджених ПКМ при фрикційній взаємодії зі сталлю. Досліджено вплив температури навколишнього середовища на розроблені ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 та силікагелю. Установлено межові температури експлуатації розроблених ПКМ, при яких деталі з них можуть працювати у вузлах тертя при нормальному режимі роботи і забезпечувати високий рівень надійності та довговічності вузла тертя. Так, межева температура експлуатації матеріалів на основі фенілону С1 складає 175°C , а для фторопласту-4 – до 110°C . Установлено вплив робочих середовищ (мастило, вода) на основні трибологічні дослідження ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнених 10 % силікагелю при їх фрикційній взаємодії зі сталлю. Установлено межові значення навантажень та швидкостей ковзання, при яких деталі з досліджених ПКМ здатні працювати у вузлах тертя без відмов та забезпечувати високий рівень їхньої надійності та довговічності. Так, при терті у мастилі межові навантаження та швидкості ковзання дорівнюють відповідно 15 МПа та 1,5 м/с для матеріалу на основі фенілону С1 і 10 МПа та 1,5 м/с для ПКМ на основі фторопласту-4. При терті у воді межові навантаження і швидкості ковзання дорівнюють відповідно 7,5 МПа та 1,5 м/с для матеріалу на основі фенілону С1 і 10 МПа та 1,5 м/с для ПКМ на основі фторопласту-4.

Висновки до розділу 7

1 Описано закономірності впливу основних структурних та морфологічних параметрів сталеві деталі у вузлах тертя термостійкий полімер – сталь на трибологічні властивості фенілону С1 і фторопласту-4 та визначено їхні оптимальні значення. Так, оптимальні значення твердості сталеві деталі у вузлах тертя термостійкий полімер – сталь, відповідно до проведених досліджень, лежать в інтервалі від 40 до 50 HRC, шорсткості – в інтервалі від 0,32 до 0,6 мкм за Ra, що відповідає мінімальним значенням коефіцієнта тертя та вагового зношування досліджених полімерів при фрикційній взаємодії зі сталлю.

2 Визначено оптимальні параметри режимів притирання деталей з розроблених термостійких полімерних композитів на основі фенілону С1 та фторопласту-4 при їх фрикційній взаємодії зі сталлю. Установлено, що притирання для розроблених ПКМ необхідно проводити при навантаженнях від 1,25 до 2 МПа та швидкостях ковзання від 1,25 до 1,5 м/с. При цих режимах фрикційне розігрівання вузла тертя не перевищує гранично допустимий для розроблених ПКМ та шлях притирання, необхідний для переходу досліджених пар тертя у нормальний режим роботи, має мінімальні значення.

3 Установлено закономірності, які описують вплив вмісту силікагелю у фенілоні С1 і фторопласті-4 та технології отримання полімерних композиційних матеріалів на основні трибологічні властивості досліджених пар тертя. Визначено, що оптимальним вмістом силікагелю у фенілоні С1 та фторопласті є 10 % ваг. При терті ПКМ з цим умістом наповнювача по сталі у вузлах тертя спостерігаються мінімальні значення коефіцієнтів тертя, температури на поверхні тертя й інтенсивності лінійного зношування. Доведено, що покращення триботехнічних характеристик досліджених пар тертя пов'язано зі створенням «антифрикційного покриття» на сталевій деталі пари тертя, що підтверджується її мікрофотографіями та

дослідженнями шорсткості і мікротвердості після фрикційної взаємодії із вихідними полімерами та ПКМ на їх основі.

4 З'ясовано, що матеріали, отримані за допомогою (in-situ) суміщення, мають кращий рівень трибологічних властивостей порівняно зі стандартно отриманими за рахунок створенням більш стабільного «антифрикційного покриття» на сталевій поверхні, що підтверджується різницею у морфології сталевих поверхонь тертя після фрикційної взаємодії досліджуваних матеріалів.

5 Визначено закономірності впливу зовнішніх факторів на тертя та зношування термостійких полімерних композиційних матеріалів на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнених силікагелем. Визначено граничні умови експлуатації (навантаження, швидкості ковзання, температура навколишнього середовища), при яких деталі з досліджених ПКМ працюють у нормальному режимі роботи. Для матеріалу на основі фенілону вони дорівнюють $P = 1,25 \text{ МПа}$, $V = 1,0 \text{ м/с}$, $T = 175^\circ\text{C}$, а для матеріалу на основі фторопласту-4 - $P = 2,00 \text{ МПа}$, $V = 1,25 \text{ м/с}$ та $T = 110^\circ\text{C}$.

6 Отримано математичні залежності, які описують вплив навантаження та швидкості ковзання на коефіцієнт тертя й інтенсивність лінійного зношування досліджених ПКМ при фрикційній взаємодії зі сталлю.

7 Установлено закономірності впливу робочих середовищ (мастило, вода) на основні трибологічні дослідження ПКМ на основі фенілону С1 та фторопласту-4, наповнених 10 % силікагелю, при їх фрикційній взаємодії зі сталлю. Визначено граничні значення навантажень та швидкостей ковзання, при яких деталі з досліджених ПКМ здатні працювати у вузлах тертя без відмов та забезпечувати їх високий рівень надійності та довговічності. Для матеріалу на основі фенілону вони дорівнюють $P = 15 \text{ МПа}$, $V = 1,5 \text{ м/с}$ при терті у мастилі і $P = 7,5 \text{ МПа}$, $V = 1,5 \text{ м/с}$ при терті у воді, а для матеріалу на основі фторопласту-4 - $P = 10 \text{ МПа}$, $V = 1,5 \text{ м/с}$ при терті у мастилі та воді.

РОЗДІЛ 8. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ КОМПОЗИТИВ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ПРОМИСЛОВИХ ВИПРОБУВАНЬ

8.1 Рекомендації щодо застосування виробів з термостійких ПКМ у конструкційних та трибологічних вузлах машин і механізмів

У сучасній промисловості необхідною вимогою для випуску продукції є використання значної кількості машин і механізмів, що складаються з конструкційних вузлів, на які діють високі та низькі температури, статичні та динамічні напруження тощо [297–299]. Традиційні конструкційні матеріали (метали та їх сплави), які використовуються у вузлах машин і механізмів, витримують всі зовнішні дії на них, однак мають низку недоліків: невисока корозійна стійкість, високі значення густини та досить високовартісна технологія отримання деталей з них [300; 301]. Тому актуальним завданням є розробка таких конструкційних матеріалів, які поряд із високим рівнем теплофізичних та фізико-механічних властивостей не мають недоліків «традиційних» конструкційних матеріалів.

У роботі запропоновано термостійкі полімерні композиційні матеріали на основі фенілону С1, фторопласту-4 та ДФСФО, наповнені силікагелем й отримані за стандартною технологією та за допомогою суміщення (*in situ*) вихідних компонентів полімерних композицій. Так, введення силікагелю та розробка технології суміщення (*in situ*) вихідних компонентів ПКМ дозволило покращити рівень фізико-механічних та теплофізичних властивостей розроблених матеріалів. Ці властивості подано в таблиці 8.1.

Відповідно до поданих даних можна зробити висновок, що за своїми теплофізичними властивостями розроблені ПКМ є одними з найбільш термостійких з усіх відомих полімерів та ПКМ, які випускаються промисловістю.

Таблиця 8.1 – Порівняльна таблиця фізико-механічних і теплофізичних властивостей розроблених ПКМ із закордонними аналогами, сталями та металевими сплавами [302–307]

Властивості	Показники властивостей						
	Розроблені ПКМ на основі			Вугл. сталі	Баббити, бронзи	Аналоги	
	феніло-ну С1	фторопласту 4	ДФСФО			Noryl GTX	Torlon, Duraton T
Температура розм'якш. за методом Віка $T_{ВК}, ^\circ\text{C}$	290-330	210-300	-	Більше 1000	300-440 (темпл. плавл)	190-220	270-280
Температура початку активної деструкції, $^\circ\text{C}$	355-380	465-480	340-370	-	-	-	-
КТЛР $\alpha \times 10^{-7}, 1/^\circ\text{C}$	310-330	320-500	210-270	100-120	150-220	600-800	250-300
Густина $\rho, \text{кг/м}^3$	1375-1575	1950-2000	1500-1900	7700-7900	7000-9000	1050-1210	1350-1450
Напруження при межі текучості при стисканні $\sigma_y, \text{МПа}$	260-280	20-35	140-180	210-260	50-120	60-90	160-180
Модуль пружності при стисканні $E, \text{МПа}$	3450-3600	1250-2000	4000-4500	20000	10000	2000-5000	4500-5000
Твердість НВ, МПа	200-250	50-67	250-300	190-250		-	-

Так, деталі з них можуть працювати при температурах до 400°C та не втрачати свої експлуатаційні характеристики до температури $320\text{--}330^\circ\text{C}$.

За фізико-механічними характеристиками розроблені ПКМ перевищують такі конструкційні матеріали, як бронза і бабіти, та наближаються до вуглецевих сталей. Причому значення їх густини, у 3–4 рази менші, ніж у найбільш поширених конструкційних матеріалів (металів та їх сплавів), що значно зменшує вагу деталей з них та дозволяє використання в судо-, літако- та ракетобудуванні. Деталі з розроблених ПКМ можуть працювати при статичних та знакозмінних навантаженнях до

280 МПа і забезпечувати при цьому надійну та довговічну роботу вузлів, в яких вони встановлюються.

Тобто розроблені ПКМ на основі фенілону С1, фторопласту-4 таДФСФО, наповнені силікагелем, можна рекомендувати до використання у конструкційних вузлах машин та механізмів, що працюють при високому рівні температур та здатні витримувати високий рівень навантажень замість найбільш поширених конструкційних матеріалів (метали та сплави).

Найбільш ненадійними та недовговічними вузлами машин і механізмів є вузли тертя. Відомо, що до 70–80 % поломок у них пов'язані саме з цими вузлами [308; 309]. Тому створення матеріалів для вузлів тертя з високим рівнем трибологічних властивостей є актуальним завданням.

Проведені трибологічні дослідження розроблених ПКМ встановили, що введення силікагелю у термостійкі полімери сприяє покращенню їхніх трибологічних властивостей порівняно з вихідними полімерами. Однак не для всіх вузлів тертя цього буде достатньо і для ще більшого їх покращення до складу розроблених ПКМ необхідно вводити традиційні антифрикційні наповнювачі. До найбільш поширених належать вуглецеві матеріали, дисульфід молібдену, нітрид бору, каолін тощо [310].

З усіх цих наповнювачів найкращим за співвідношенням ціна-якість є вуглецеві матеріали. Їх застосування в якості матеріалів, які покращують тертя та зношування вузлів тертя набуло широкого визнання [292; 311]. Для цих цілей використовуються вуглецеві матеріали різної природи та морфології, які є дисперсними (технічний вуглець, графіт, фулерен) та волокнистими (вуглецеве волокно) наповнювачами.

Відомі ПКМ триботехнічного призначення, наповнені технічним вуглецем [17]. Ці матеріали мають невисокі значення коефіцієнта тертя до $0,21 \div 0,22$ та зношування до 15×10^{-9} м/м. Досить поширеним в якості антифрикційного наповнювача є графіт [312]. Завдяки своїй шаруватій структурі він виступає у ролі сухого змащувального матеріалу і дозволяє зменшити коефіцієнт тертя ПКМ до 0,1 та зношування до $2,5 \times 10^{-9}$ м/м при

«сухому» режимі тертя. У сучасній трибології для покращення трибологічних властивостей полімерних матеріалів використовуються фулерени, нанотрубки, графен [313, 314], однак вони є досить високовартісними матеріалами. Використання вуглецевих волокон [315] також дозволяє покращити трибологічні властивості матеріалів, однак їх досить висока ціна не дозволяє широко використовувати такі матеріали в якості антифрикційних наповнювачів. Тому для наповнення розроблених ПКМ в якості антифрикційного наповнювача було вибрано технічний вуглець і графіт.

Сучасна промисловість випускає розмаїття марок технічного вуглецю та графіту. Тому доцільно вибрати ту, яка найкраще вплине на значення трибологічних властивостей термостійких ПКМ.

В якості технічного вуглецю вибрано матеріал наступних марок: N220, N550, N650, вироблені на ВАТ «Кременчуцький завод технічного вуглецю». У вихідному вигляді він являє собою гранули темного кольору з розмірами 0,5–2 мм. Використання наповнювача з такими розмірами частинок не дозволяє отримати ПКМ з високим рівнем фізико-механічних властивостей, тому його було подрібнено на механічному швидкохідному млині. Основний розмір технічного вуглецю після подрібнення склав 7–10 мкм.

За результатами досліджень [316] встановлено, що оптимальним вмістом технічного вуглецю у фенілоні С1 та фторопласті-4 є 15 %. Тому подальші дослідження з визначення марки технічного вуглецю, яка найбільше покращує трибологічні властивості (коефіцієнт тертя й інтенсивність лінійного зношування) ПКМ проведено з використанням матеріалу з 15 % вмістом технічного вуглецю. Їх результати подано на рис. 8.1.

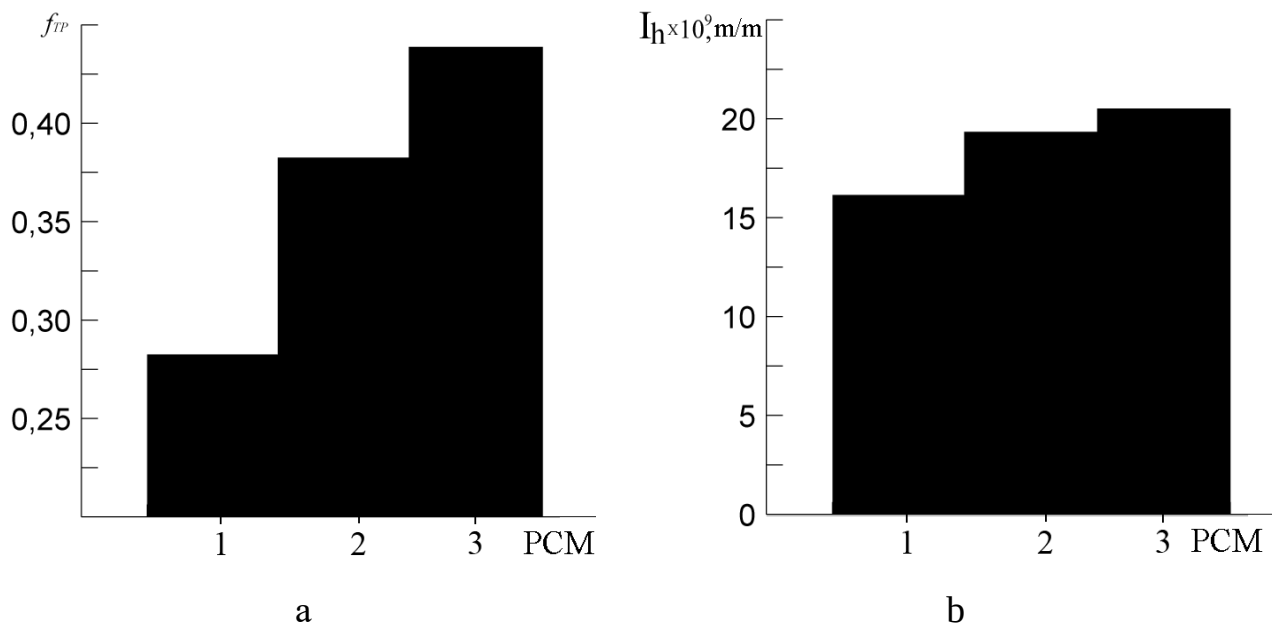


Рисунок 8.1 - Значення коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та інтенсивності лінійного зношування I_h (б) композиту 85 % фенілон С1 + 15 % подрібнений технічний вуглець марок: 1 – N220; 2 – N550; 3 – N660

У результаті досліджень встановлено, що найкращий рівень триботехнічних властивостей при терті по сталі має композит, наповнений подрібненим технічним вуглецем марки N220. Коефіцієнт тертя й інтенсивність лінійного зношування цього композиту відповідно на 35–50 та 15–25 % мають менші значення, ніж для композитів, наповнених технічним вуглецем марок N550 та N650.

Це пояснюється кращою взаємодією молекул полімеру з подрібненим технічним вуглецем марки N220 за рахунок його більшої питомої поверхні та меншого розміру частинок, порівняно із наповнювачами марок N550 та N650. Відомо [2], що наповнювачі з розвиненою поверхнею грають роль адсорбентів, на поверхні яких створюються високоорієнтовані шари полімеру, що сприяють покращенню механічної міцності і відповідно зносостійкості ПКМ при терті. При всіх однакових характеристиках наповнювачі з більш розвиненою поверхнею мають кращий підсилювальний ефект на полімерний композит, ніж з менш розвиненою.

Уведення графіту в досліджені ПКМ також дозволяє значно покращити рівень їх трибологічних властивостей. Відомо [317; 318], що найкращий рівень трибологічних властивостей мають ПКМ на основі фенілону С1 і фторопласту-4, наповнені 15–20 % графіту. Для фенольних смол оптимальний вміст наповнювача складає 10–12 % [319].

Сучасна промисловість випускає велику кількість марок графітів, тому доцільно визначити ту марку, уведення якої дозволить максимально покращити рівень трибологічних властивостей ПКМ.

В якості графітів було вибрано матеріали різних модифікацій наступних марок: графіт ГЛ–1(ГОСТ 5279-74) та С–1(ТУ У26.8-05394618-018-2003) виробництва ВАТ «Маріупольський графітовий комбінат» та марки GRMC–2 виробництва «Glorious resources CO., Limited». Ці наповнювачі являють собою дрібнодисперсні порошки темно-сірого, близького до металевому кольору. Основні їх характеристики подано у таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 – Характеристики графітів марок ГЛ–1, С–1 та GRMC–2

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

Для встановлення впливу марки графіту на рівень трибологічних властивостей ПКМ з оптимальним вмістом наповнювача (10 % ваг.) було проведено дослідження їх тертя та зношування при фрикційній взаємодії зі сталлю (рис. 8.2).

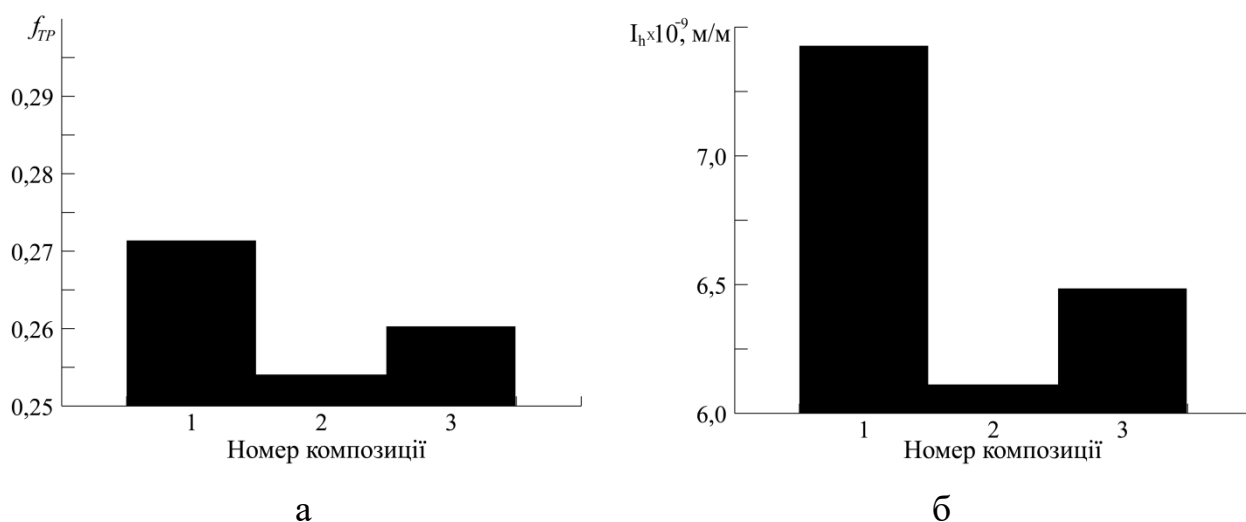


Рисунок 8.2 - Значення коефіцієнта тертя f_{TP} (а) та інтенсивності лінійного зношування I_h (б) композиту 85 % фенольна смола + 10 % графіт марок: 1 – ГЛ–1; 2 – С–1; 3 – GRMC–2

Як можна побачити з результатів досліджень, найкращий рівень трибологічних властивостей мають композити з графітом марок GRMC і С–1. Так, значення їх коефіцієнта тертя й інтенсивності лінійного зношування на 5–15 % кращі, ніж у композиту з графітом ГЛ – 1. Це пов'язано із кращою змащувальною властивістю цих графітів, обумовленою їх меншими розмірами частинок, особливостями структури і морфології. Причому різниця у триботехнічних властивостях ПКМ з цими графітами при фрикційній взаємодії зі сталлю є невеликою, а зважаючи на те, що графіт С–1 випускається в Україні, а GRMC–2 в Китаї, то для використання в якості наповнювача ПКМ на основі термостійких полімерів доцільно використовувати саме графіт С–1.

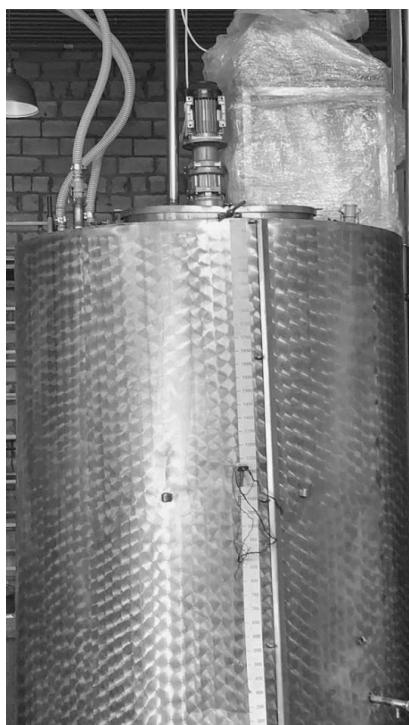
Відповідно до проведених досліджень в якості антифрикційних наповнювачів розроблених ПКМ доцільно використовувати подрібнений технічний вуглець марки N220 та графіт марки С–1. Причому графіт за рахунок шаруватої структури має кращі змащувальні властивості, ніж технічний вуглець [320], однак його введення суттєво зменшує рівень фізико-

механічних властивостей ПКМ. Тому антифрикційні наповнювачі для розроблених термостійких ПКМ слід обирати, ураховуючи цей фактор.

8.2 Результати промислових випробувань

8.2.1 Вузол тертя та герметизації консольного валу якірної мішалки

Протягом 2017 – 2019 років доцентом кафедри машинобудування та інженерної механіки ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» Кабатом О. С. спільно з представниками підприємства ТОВ «Т КОРП ГРУП» проведено промислові дослідження деталей вузлів тертя і герметизації консольного вала якірних мішалок (рис. 8.3) лінії з виробництва емульсій технічного призначення, виготовлені з розроблених Кабатом О.С. полімерних композиційних матеріалів на основі фторопласту, наповненого силікагелем.



а



б

Рисунок 8.3 – Загальний вигляд якірної мішалки (а) і вузла тертя та герметизації її консольного вала (б)

Відповідно до результатів промислових досліджень установлено, що деталі з розробленого матеріалу працювали у вузлах тертя та герметизації консольного вала якірних мішалок впродовж 22 місяців, створюючи при цьому необхідний рівень герметизації апарата та працюючи без відмов. Деталь з ПКМ, розробленого Кабатом О.С. вузла тертя та герметизації консольного вала механічної мішалки представлено на рис. 8.4.

Відповідно до технічного паспорта на механічну мішалку, стандартні деталі (що постачаються разом із мішалкою) повинні замінюватися один раз кожні 6 місяців. Тобто використання деталей з розроблених Кабатом О.С. матеріалів дозволяє збільшити загальну довговічність роботи вузлів тертя та герметизації консольного вала якірної мішалки у 3,7 разів. Завдяки цьому вдалося зменшити кількість планово-попереджувальних ремонтів, час простою обладнання та витрати на придбання ремонтних ЗІПів у постачальника обладнання.



Рисунок 8.4 - Деталь з ПКМ на основі фторопласту-4 та силікагелю вузла тертя та герметизації консольного вала механічної мішалки

Очікуваний економічний ефект від упровадження матеріалів і технологій, наукових положень і висновків докторської дисертації Кабата Олега Станіславовича склав 21 тис. гривень за рік на одну одиницю обладнання (додаток Г).

8.2.2 Вузли тертя посівного комплексу «John Deere 1780»

З березня 2016 до березня 2019 року на агрофірмі ТОВ «КОДАЦЬКЕ-АГРО» спільно з доцентом кафедри машинобудування та інженерної механіки ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» проведено випробування деталей із розробленого Кабатом О.С. полімерного композиційного матеріалу у вузлах тертя посівного комплексу «John Deere 1780» (рис. 8.5).



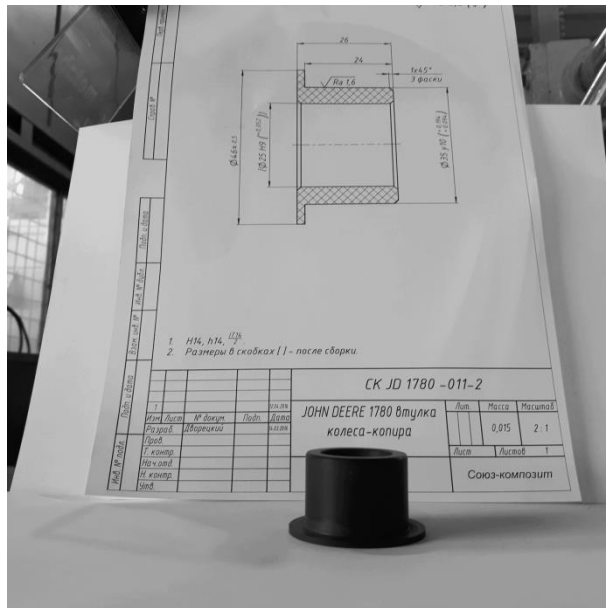
Рисунок 8.5 - Посівний комплексу «John Deere 1780» (на зберіганні під час простою)

Даний агрегат має 25 посівних лап, які являють собою важільну систему для копіювання нерівностей ґрунту. На кожну посівну лапу припадає 40 рухомих з'єднань. Тобто на весь посівний комплекс припадає до 400 вузлів тертя.

У цих вузлах в якості втулок підшипників ковзання використовуються деталі з полімерного композиційного матеріалу УПА 6-30 (ТУ 6-12-31-654-89). Середній строк служби даних вузлів залежить від наробітку посівного комплексу і становить 10000 га. В умовах агрофірми ТОВ «КОДАЦЬКЕ-АГРО» посівний комплекс отримує такий наробіток упродовж двох років. Тобто кожні два роки відбувається його плановий ремонт, що передбачає обслуговування вузлів тертя, при якому відбувається заміна всіх полімерних деталей на нові. Кошторис даного ремонту складає від 90 до 100 тис. гривень.

Тому підвищення надійності та довговічності вузлів тертя посівного комплексу є актуальним завданням, вирішення якої дозволить заощадити кошти на планові ремонти. Кабат О.С. запропонував використовувати в якості матеріалу для виготовлення вузлів тертя в лапах посівного комплексу розроблених ним матеріалів на основі ароматичного поліаміду. Відповідно до лабораторних досліджень ці матеріали за фізико-механічними, теплофізичними та триботехнічними властивостями значно переважають матеріал УПА 6-30, але коштують на 20 % більше.

Полімерні деталі з аналогу (УПА 6-30) та розробленого ПКМ на основі фенілону С1, наповненого силікагелем та графітом, виготовлено з заготовок за допомогою точіння. На рис. 8.6 представлено ці деталі.



а



б

Рисунок 8.6 – Втулки підшипників ковзання лап посівного комплексу «JohnDeere 1780» з аналогу (УПА 6-30) (а) та розробленого ПКМ (б)

Отримані деталі запресовувалися в обойми важелів лап посівного комплексу «JohnDeere 1780» і збиралися за однаковою технологією (рис. 8.7).



а



б



в

Рисунок 8.7 – Технологія збирання лап посівного комплексу «JohnDeere 1780»: а – запресування втулки з ПКМ; б – монтаж важелів на посівну лапу; в – посівна лапа у зборі

Заміна деталей з УПА 6-30 на запропонований Кабатом О.С. матеріал дозволила підвищити довговічність роботи вузлів тертя посівного комплексу. Так, при їх розбиранні в період поточного ремонту (після 2 років роботи) на

деталях з УПА 6-30 спостерігаються сколи та подряпини, які є наслідком початку їх аварійного зношування, що може призвести до руйнування та заклинювання вузлів тертя (рис. 8.8). Тому їх було замінено на нові. А деталі з запропонованого матеріалу не мають таких пошкоджень і залишаються працювати у вузлах тертя.

Наступне розбирання посівного комплексу відбулося через один рік, і встановлено, що деталі з запропонованого Кабатом О.С. матеріалу не мають суттєвих пошкоджень на поверхні, однак їх розмір вже не відповідає необхідним параметрам, тобто вони потребують заміни.

Відповідно до проведених промислових досліджень встановлено, що деталі на основі ароматичного поліаміду зберігають свою працездатність на один рік більше, ніж стандартні із матеріалу УПА 6-30, що дозволяє робити капітальний ремонт з їх заміною не кожні 2 роки, а один раз на 3 роки. Це дозволить заощадити витрати на 2 ремонти посівного комплексу за період його експлуатації впродовж 12 років.



а



б

Рисунок 8.8 – Втулки підшипників ковзання лап посівного комплексу «JohnDeere 1780» після роботи впродовж 2 років (а) з аналогу (УПА 6-30) та (б) розробленого ПКМ

Економічний ефект від впровадження деталей з матеріалів на основі ароматичного поліаміду, розроблених Кабатом О.С., у вузли тертя лап посівного комплексу складає 150 тис. грн (за період експлуатації агрегату 12 років) (додаток Д).

8.2.3 Вузли тертя широкозахватних посівних машин та культиваторів

Для широкозахватних посівних машин (рис. 8.9) відбувалася повна реконструкція і модернізація вузлів маятникових і паралелограмних важелів з використанням деталей із розроблених Кабатом Олегом Станіславовичем матеріалів.



Рисунок 8.9 – Широкозахватна посівна машина «Turbosem- 2»

Вузли тертя висівних секцій посівної машини відповідно до паспорта на її обслуговування повинні підлягати змащуванню кожні 500 га наробітку. Внаслідок того, що ця машина має понад 400 штук рухомих з'єднань, то

процедура їх змащування займає до 4 годин робочого часу, під час яких машина зупиняється, що є негативним фактором при посівних роботах, так, як розтягнення їх у часі може суттєво вплинути на рівномірність сходження рослин і їх подальший розвиток відповідно до технологічних карт на вирощування. Деталі з розроблених Кабатом Олегом Станіславовичем ПКМ на основі фенілону С1 не потребують змащування при фрикційній взаємодії зі сталлю. Вони наведені на рис. 8.10.



Рисунок 8.10 – Деталі з ПКМ на основі фенілону С1 для вузлів тертя висівних секцій широкозахватної посівної машини «Turbosem- 2»

І тому вдалося значно спростити технологію обслуговування широкозахватних посівних машин завдяки відмові від змащування її рухомих з'єднань. При цьому довговічність роботи рухомих з'єднань широкозахватної посівної машини збільшилася з 2000 до 6000 га наробітку.

Для стійок культиваторних лап культиваторів із стрілочастими лапами було проведено заміна підшипника ковзання механізму демпфування стрілкової лапи на аналогічний за конструкцією виготовлений із

розробленого Кабатом Олегом Станіславовичем полімерного композиційного матеріалу (рис. 8.11).

Це дозволило підвищити надійність та продуктивність роботи культиватора при високому рівні навантажень, обумовлених глибокою культивацією та використанням знаряддя на «важких» ґрунтах. Збільшення цих параметрів відбулося завдяки усуненню явища наклепу на поверхні металевих втулок рухомих з'єднань культиватора.

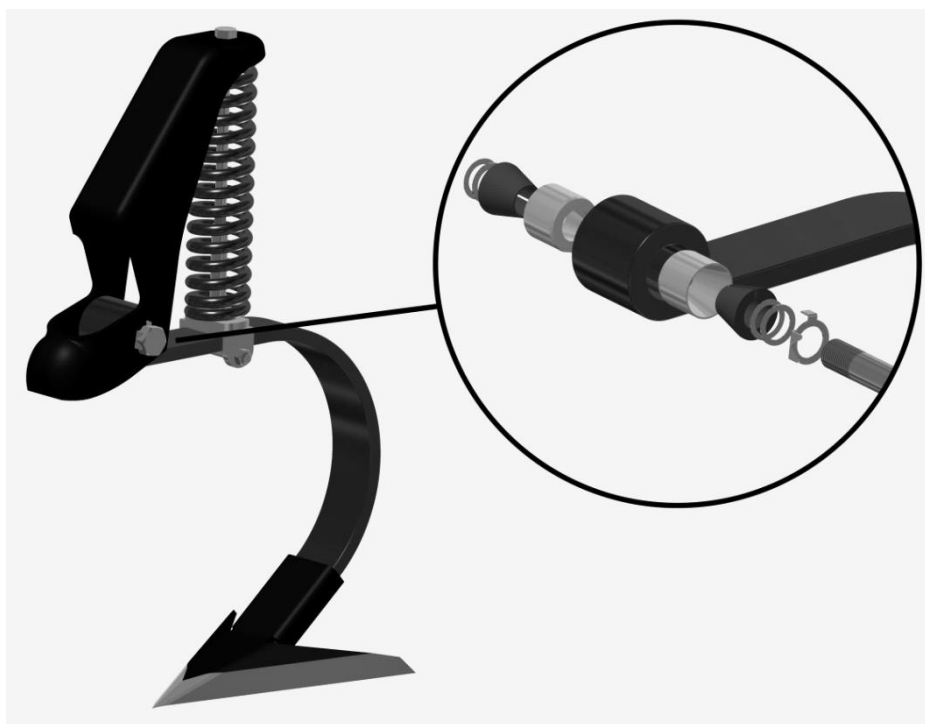


Рисунок 8.11 – Стійка культиваторної лапи культиватора та підшипник ковзання механізму демпфування стрільчастої лапи

Це, у свою чергу, дозволило зменшити люфти у парах тертя знаряддя, які призводять до їх радіального биття та передчасного аварійного зношування. Використання підшипників ковзання із розроблених Кабатом Олегом Станіславовичем полімерних композиційних матеріалів дозволило збільшити довговічність роботи механізму демпфування стрільчастої лапи культиватора у 4–5 разів порівняно з немодернізованою моделлю (додаток Ж).

8.2.4 Вузол тертя гідравлічних пресів

Протягом 2018 – 2019 років доцентом кафедри машинобудування та інженерної механіки ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» Кабатом О. С. спільно з представниками підприємства ТОВ «Хімпостач Дніпро» було проведено промислові дослідження надійності і довговічності в роботі напрямних втулок у рухомій траверсі гідравлічного преса для переробки полімерних матеріалів (рис. 8.12).



а



б

Рисунок 8.12 – Загальний вигляд гідравлічного преса (а) та вузла переміщення траверси (б)

У вихідному вигляді напрямні втулки виготовляються із бронзи марки БрАЖ 94 і потребують постійного змащування консистентними змащувальними матеріалами. При недостатньому змащуванні суттєво зростає вірогідність заклинювання вузла тертя напрямна втулка – колона, що призводить до виходу преса з ладу за рахунок зупинки його рухомої

траверси. Кабатом О.С. було запропоновано виготовляти ці втулки з полімерного композиційного матеріалу на основі ароматичного поліаміду. Деталі вузлів тертя з цього матеріалу можуть працювати при навантаженнях до 1,5 МПа та швидкостях ковзання 1,5 м/с і забезпечують надійну та довговічну роботу вузлів тертя, що працюють із та без змащування. Слід відзначити, що заклинювання вузлів з цими матеріалами менш вірогідне, ніж при використанні бронзи внаслідок того, що вони мають кращий рівень трибологічних властивостей при терті по сталі.

При заміні втулок з бронзових на запропонований полімерний композиційний матеріал встановлено, що вони зберігають високий рівень працездатності впродовж періоду дослідження з 2018 до 2019 року. Причому не потребують постійного змащування (проведено тільки при встановленні цих втулок), на відміну від бронзових, які необхідно змащувати при кожному малому ремонті при проведенні планово-попереджувального обслуговування преса, що дозволяє зекономити на змащувально-мастильних матеріалах не зменшуючи при цьому високий рівень надійності та довговічності вузлів тертя в рухомій траверсі гідравлічного преса (додаток К).

8.2.5 Вузол тертя шліфувального верстату

Протягом 2017–2020 років доцентом кафедри машинобудування та інженерної механіки ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» Кабатом О. С. спільно з представниками підприємства ТОВ «Інтер Авіа Інвест» було проведено промислові випробування роботи накладок з полімерних композиційних матеріалів на основі фторопласту-4 на напрямні ковзання рухомого стола шліфувального верстату (ОШ 143).

У вихідному вигляді напрямні втулки виготовляються з антифрикційної бронзи і потребують постійного змащування мастилом, що забруднює поверхні тертя і призводить до налипання на них твердих абразивних частинок з шліфувального круга з подальшим інтенсивним

абразивним зношуванням вузла тертя. Кабатом О.С. було запропоновано використання накладок на напрямні ковзання з полімерних композиційних матеріалів на основі фторопласту-4, силікагелю та графіту, які можуть працювати у вузлах тертя без змащування, забезпечуючи при цьому високий рівень його надійності та довговічності. Використання даних накладок практично унеможливило абразивне зношування напрямних ковзання за рахунок того, що дрібні абразивні частинки практично не налипають на напрямні ковзання рухомого стола шліфувального верстату і досить легко з них видаляються.

Використання накладок з розробленого полімерного композиційного матеріалу замість бронзових протягом 2018–2020 років дозволило значно зменшити зношування напрямних ковзання рухомого стола шліфувального верстату. За рахунок чого відпала необхідність у проведенні їх відновлюваного ремонту, який за графіком ППР (планово-попереджувальних ремонтів) проводиться один раз на рік. Тобто вдалося зекономити кошти, які витрачаються на проведення двох ППР (за період з 2018–2020 років) і зменшити простоювання обладнання на період цих ремонтів (додаток Л).

Висновки до розділу 8

1 Подано рекомендації щодо застосування розроблених термостійких полімерних композитів у конструкційних вузлах та вузлах тертя технологічного обладнання. Представлено порівняльний аналіз властивостей розроблених полімерних композиційних матеріалів з вуглецевими сталями, сплавами кольорових металів та кращими закордонними аналогами полімерних композитів. Установлено, що за своїми фізико-механічними властивостями розроблені полімерні композиційні матеріали наближаються до вуглецевих сталей і перевищують сплави кольорових металів та кращі закордонні аналоги полімерних композитів.

2 Проведено промислові випробування деталей з розроблених термостійких полімерних композитів у вузлах тертя та герметизації консольного вала якірної мішалки. Це дозволило збільшити загальну довговічність його роботи у 3,7 разів. Завдяки чому вдалося зменшити кількість планово-попереджувальних ремонтів, час простою обладнання і витрати на придбання ремонтних ЗІПів у постачальника обладнання.

3 Проведено промислові випробування деталей з розроблених термостійких полімерних композитів у вузлах тертя широкозахватного посівного комплексу «JohnDeere 1780». Установлено, що деталі на основі ароматичного поліаміду зберігають свою працездатність на 1 рік більше, ніж стандартні із матеріалу УПА 6-30, що дозволяє проводити капітальний ремонт з їх заміною не кожні 2 роки, а один раз на 3 роки. Це дозволило заощадити витрати на 2 ремонти посівного комплексу за період його експлуатації впродовж 12 років.

4 Проведено промислові випробування деталей з розроблених термостійких полімерних композитів у вузлах тертя широкозахватних посівних машин та культиваторів. Установлено, що при цьому довговічність роботи рухомих з'єднань широкозахватної посівної машини збільшилася з 2000 до 6000 га наробітку. Установлено, що заміна матеріалу стандартної

втулки на полімерний композит на основі ароматичного поліаміду сприяє збільшенню довговічності роботи механізму демпфування стрілкової лапи культиватора у 4–5 разів.

5 Проведено промислові випробування деталей з розроблених термостійких полімерних композитів у вузлах тертя гідравлічного преса. Установлено, що заміна напрямних втулок у рухомій траверсі гідравлічного преса з бронзи марки БрАЖ 9 4 на розроблений полімерний композит на основі фенілону С1 дозволяє зекономити на змащувально-мастильних матеріалах, не зменшуючи при цьому високий рівень надійності і довговічність вузлів тертя в рухомій траверсі гідравлічного преса.

6 Проведені промислові випробування деталей з розроблених термостійких полімерних композитів у якості накладок з полімерних композиційних матеріалів на основі фторопласту-4 на напрямні ковзання рухомого стола шліфувального верстату (ОШ 143) для обробки підшипників кочення. Установлено, що заміна напрямних втулок у рухомій траверсі гідравлічного преса з антифрикційної бронзи на розроблений полімерний композит на основі фторопласту-4 дозволяє відмовитися від змащування даного вузла та підвищити довговічність у роботі мінімум у 2 рази.

ЗАГАЛЬНІ 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 ($I_{\text{hl}} = 20 \div 25 \times 10^{-9}$ 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 сталеною поверхнею 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fuchs, G.F.L. Suborbital space flight: Technical aspects. Chapter from: Promoting Productive Cooperation Between Space Lawyers and Engineers [Text] / G.F.L. Fuchs. - USA: IGI Global, 2019. - P. 43-63.

https://doi.org/10.1007/12_2018_43

2. Design and system integration of a hybrid inland push boat powered by hydrogen fuel cells and Li-ion NMC batteries and the challenge of providing a bunkering infrastructure [Text] / O. Haase, S. Apenbrink, S. R. Krebs, [et al.] // Ship Technology Research. - 2020. - Vol. 67, Issue 2. – P. 61-68.

<https://doi.org/10.1080/09377255.2018.1523979>

3. Solar thermal hybrids for combustion power plant: A growing opportunity [Text] / G.J. Nathan, M. Jafarian, B.B. Dally, [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. - 2018. - Vol. 64. - P. 4-28.

<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.08.002>

4. Chang, J., Design of High Ratio Gear Reducer Using Vernier Differential Theory [Text] / J. Chang, In. Chang // Journal of mechanical design. - 2021. - Vol. 143(2) <https://doi.org/10.1115/1.4047347>

5. Chang, J. Kinematic Reliability Analysis of Robotic Manipulator [Text] / J. Chang, In. Chang // Journal of mechanical design. - 2020. - Vol. 142(4)

<https://doi.org/10.1115/1.4044436>

6. Берлин, А.А. Перспективные материалы и технологии для ракетно-космической техники [Текст] / А.А. Берлин, И.Г. Ассовский. - М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. - 456 с.

7. Aziz, F. The Effectiveness of Reinforcement and Processing on Mechanical Properties, Wear Behavior and Damping Response of Aluminum Matrix Composites [Text] / F. Aziz, R. Rozhbiany // High Temperature Materials and Processes. - 2019. - Vol. 38 - P. 927-939.

<https://doi.org/10.1515/htmp-2019-0039>

8. Буря, А.И. Применение полимерных материалов и композитов на их основе в автомобилестроении [Текст] / А.И. Буря, О.П. Чигвинцева. – Днепропетровск: Из-во “Федорченко А.А.”, 2010. – 236 с.

9. Design of Automotive Metal and Composite Chassis Structure [Text] / J. C. England, H. Hadavinia, D. R. Marchant, A. Aboutorabi // Recent Patents on Mechanical Engineering. - 2010. - Vol. 3. – P.211-225.

DOI: 10.2174/1874477X11003030211

10. Пластинин, П.И. Поршневые компрессоры [Текст] / П.И. Пластинин. - Москва: "Колосс", - 2006. - 456 с.

11. Mauricio, A. Condition Monitoring of Wind Turbine Planetary Gearboxes Under Different Operating Conditions [Text] / A. Mauricio, S. Sheng, K. J. Gryllias // Eng. Gas Turbines Power. - 2020. - Vol. 142(3)

<https://doi.org/10.1115/1.4044683>

12. Kyogoku, H. New Development of Metal Laser Additive Manufacturing Technology [Text] / H. Kyogoku, T.-T. Ikeshoji // Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. - 2019. - Vol. 66(2). – P. 89-96

<https://doi.org/10.2497/jjspm.66.89>

13. Инженерная оптимизация прессового и литейного оборудования [Текст] / [А.С. Клинков, М.В. Соколов, В.И. Кочетов и др.]. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 80 с.

14. Кобец, А.С. Повышение эффективности использования и срока службы посевных комплексов семейства turbosem (Украина) [Текст] / А.С. Кобец, А.Д. Деркач, Д.А. Макаренко и др. // Agricultural machinery. - 2020. - Vol. 1/7. - P. 20-25.

15. Bulgakov, V. Research of properties of constant technological track of a bridge-type field machine [Text] / V. Bulgakov, V. Kuvachov, S. Ivanovs and oth. // TECHNOFORUM 2020 «New Trends in Machinery and Technologies for Biosystems». - 2020. - P. 26–33.

16. URL: https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/industrial-technologies/industrial-research-strategy-key-enabling-technologies_en (дата звернення: 25.01.2020)

17. Liu, Q. Design, preparation, and application of ordered porous polymer materials [Text] / Q. Liu, Z.Tang, B.Ou and oth. // Materials Chemistry and Physics. - 2014. - Vol. 144, Issue 3. – P.213-225.

<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.01.013>

18. Friedrich, K. Polymer composites for tribological applications [Text] / K. Friedrich // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. - 2018. - Vol. 148. - P. 3–39.

<https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2018.05.001>

19. Zhao, W. Shape memory polymers and their composites in biomedical applications [Text] / W. Zhao, L. Liu, F. Zhang and oth. // Materials Science and Engineering: C. - 2019. - Vol. 97. - P. 864-883

<https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.12.054>

20. Bernède, J.C. Materials for Erasable Optical disks [Text] / J.C. Bernède // Materials Chemistry and Physics. - 1992. - Vol. 32, Issue 2. - P.189-195

[https://doi.org/10.1016/0254-0584\(92\)90276-E](https://doi.org/10.1016/0254-0584(92)90276-E)

21. Chiechi, R.C. Modern plastic solar cells: materials, mechanisms and modeling [Text] / R.C. Chiechi, R.W.A. Havenith, J. C. Hummelen and oth. // Materials Today. - 2013. - Vol. 16, Issue 7-8. - P. 281-289

<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.07.003>

22. Berry, D.H. Aerospace and Marine Environments as Design Spaces for Contamination-Mitigating Polymeric Coatings. Chapter from: Advances in Polymer Science [Text] / D.H. Berry, C.J. Wohl. – Berlin: Springer, 2018. P. 1-16.

https://doi.org/10.1007/12_2018_43

23. Zhong, Y. Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review [Text] / Y. Zhong, P. Godwin, Y. Jin and oth. // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. – 2020. - Vol. 3, Issue 1. - P. 27-35

<https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.002>

24. Kabat, O. Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black [Text] / O.Kabat, V. Sytar, K. Sukhyy // Chemistry & Chemical Technology. - 2018. - Vol. 12 (3). - P. 3-39.

<https://doi.org/10.23939/chcht12.03.326>

25. Sukhyy, K. M. Obtaining technology for nanocomposites based on polyamide-6 and organomodified montmorillonite [Text] / K. M. Sukhyy, E. A. Belyanovskaya, M. P. Sukhyy and oth. // Journal of Chemistry and Technologies. - 2018. - Vol. 26, Issue 1. - P.9-19

<https://doi.org/10.15421/081802>

26. Chervakov, D. O. Modified Polypropylene with Improved Physical-Mechanical Properties [Text] / D. O. Chervakov, P. I. Bashtanyk, M. V. Burmistr // Mechanics of Composite Materials. - 2015. - Vol. 51. - P.93-98

<https://doi.org/10.1007/s11029-015-9479-6>

27. Крыжановский, В.К. Пластмассовые детали технических устройств [Текст] / В.К. Крыжановский. – М: Научные основы и технологии, 2013. - 456 с.

28. Вашуков, Ю.А. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов [Текст]: мультимедийный образовательный модуль / Ю.А. Вашуков. - Самара: Изд-во Самар. Гос. Аэрокосм. Ун-та, 2012. - 185 с.

29. Коршак, В. В. Термостойкие полимеры [Текст] / В. В. Коршак. - Москва: Наука, 1969. - 381 с.

30. Фрейзер, А. Г. Высокотермостойкие полимеры [Текст] / А. Г. Фрейзер. - Москва: Химия, 1971. - 296 с.

31. Михайлин, Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы [Текст] / Ю. А. Михайлин. - СПб: Профессия, 2006. - 624 с.

32. Кабанов, В.А. Энциклопедия полимеров. Том 3 [Текст] / В.А. Кабанов, М.С. Акутин, Н.Ф. Бакеев. - Москва: Советская энциклопедия, 1977. - 1152 с.

33. Zhou, J. s-Triazine-based functional monomers with thermocrosslinkable propargyl units: Synthesis and conversion to the heat-resistant polymers [Text] / J. Zhou, J. Wang, K. Jin and oth. // Polymer. - 2016. - Vol. 102. - P. 301-307.

<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.09.027>

34. González-Díaz, M. O. Novel fluorinated aromatic polymers with ether-bond-free aryl backbones for pure and mixed gas separation [Text] / M. O. González-Díaz, E. Cetina-Mancilla, R. Sulub-Sulub and oth. // Journal of Membrane Science. - 2020. - Vol. 606

<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118114>

35. Kholkhoev, B. Ch. Robust thermostable polymer composition based on poly[*N,N'*-(1,3-phenylene)isophthalamide] and 3,3-bis(4-acrylamidophenyl)phthalide for laser 3D printing [Text] / B. Ch. Kholkhoev, K. N. Bardakova, N. V. Minaev and oth. // Mendeleev Communications. - 2019. - Vol. 29(2). - P. 223-225.

36. Granado, L. Catalysis for highly thermostable phenol-terephthalaldehyde polymer networks [Text] / L. Granado, R. Tavernier, G. Foyer and oth. // Chemical Engineering Journal. - 2020. - Vol. 379.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122237>

37. Михайлин, Ю. А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике [Текст] / Ю. А. Михайлин. - Санкт-Петербург: НОТ, 2013. - 720 с.

38. Lightweight Polymer Composite Structures: Design and Manufacturing Techniques [Text] / S.M. Rangappa, J. Parameswaranpillai, S. Siengchin, L. Kroll. - London: CRC Press, 2021. - 411 p.

39. Коршак, В. В. Химическое строение и температурные характеристики полимеров [Текст] / В. В. Коршак. - Москва: Наука, 1970. - 419 с.

40. Павлова, С.-С.А. Термический анализ органических и высокомолекулярных соединений [Текст] / С.-С.А. Павлова, И.В. Журавлева, Ю.И. Толчинский. - Москва: Химия, 1983. - 120 с.

41. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник. Издание 2-е, исправленное и дополненное [Текст] / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. – Л: Химия, 1978. - 392 с.
42. Бюллер, К.-У. Тепло- и термостойкие полимеры. [Текст] / К.-У. Бюллер. - М: Химия, 1984. - 1056 с.
43. Михайлин, Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов [Текст] / Ю.А. Михайлин. - СПб: Научные основы и технологии, 2011. - 416 с.
44. Drobny, J.G. Technology of fluoropolymers [Text] / J.G. Drobny. - London: CRC Press LLC, 2001. - 172 p.
45. Паньшин, Ю.А. Фторопласты [Текст] / Ю.А. Паньшин, С.Г. Малкевич, Ц.С. Дунаевская. - Л: Химия, 1978. - 232 с.
46. He, Y. Fluoropolymer composite coating for condensing heat exchangers: Characterization of the mechanical, tribological and thermal properties [Text] / Y. He, D. Walsh, C. Shi // Applied Thermal Engineering. - 2015. - Vol. 91. - P. 387-398. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.035>
47. Golchina, Ar. Break-away friction of PTFE materials in lubricated conditions [Text] / Ar. Golchina, G. F. Simmons, S. B. Glavatskiha // Tribology International. - 2012. - Vol. 48. - P.54-62.
48. Дудка, А.М. Дослідження триботехнічних характеристик полімерних композитів для термонавантажених вузлів тертя машин і апаратів хімічного обладнання [Текст] / А.М. Дудка, В.І. Ситар, І.І. Начовний и др. // Вопросы химии и химической технологии. - 2010. - №6. - С. 148-151.
49. Термостойкие ароматические полиамиды [Текст] / Л.Б. Соколов, В.Д. Герасимов, В.М. Савинов и др. - М.: Химия, 1967. - 462 с.
50. Trigo-López, M. Aromatic Polyamides [Text] / M. Trigo-López, J. M. García J. A. Reglero Ruiz and oth. - New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2018. - 51 p.
51. Meisam, S. Synthesis of a novel CNT/polyamide composite containing phosphine oxide groups and its flame retardancy and thermal properties [Text] / S.

Meisam, H. Mohsen, R. Mehdi // New Carbon Materials. - 2015. - Vol. 30. - P. 397-403.

52. Кабат, О.С. Термостойкие композиты на основе фенилона С2 с высоким уровнем технологичности при переработке в изделия [Текст] / О.С. Кабат, В.И. Ситар // Вопросы химии и химической технологии. - 2016. - №6. - С. 148-151.

53. Сытар, В.И. Конструкционные и триботехнические пластики на основе фенилона [Текст] / В.И. Сытар, А.И. Буря, М.В. Бурмистр и др. // Материалы 5-й юбилейной промышленной конференции "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях", 2005. - С. 317-320.

54. Сытар, В.И. Теплостойкие материалы триботехнического назначения на основе ароматического полиамида и дисперсных кремнеземов [Текст] / В.И. Сытар, О.С. Кабат // Вопросы химии и химической технологии. - 2007. - №4. - С. 94-98.

55. Полиимиды – класс термостойких полимеров [Текст] / М.И. Бессонов, М.М. Котон, В.В. Кудрявцев, Л.А. Лайус. - Л.: Наука, 1983. - 328 с.

56. Abadie, M. J. High Performance Polymers – Polyimides Based – From Chemistry to Applications [Text] / M. J. Abadie. - Rijeka: InTech, 2012. - 254 p.
<http://dx.doi.org/10.5772/2834>

57. Torlon® PAI. Design Guide. Version 5.0: Solvay Specialty Polymers, 2015. - 48 p.

58. Сіренко, Г.О. Теплофізичні властивості композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду, наповнених графітами [Текст] / Г.О. Сіренко, В.П. Свідерський, Л.В. Базюк // Полімерний журнал. - 2005. - Т. 27. № 4. - С.272-277.

59. Fengxia, D. The lubricity and reinforcement of carbon fibers in polyimide at high temperatures [Text] / D. Fengxia, H. Guoliang, C. Fengxiang and oth. // Tribology International. - 2016. - Vol 101. - P. 291-300.

60. Injection Molding. Processing guide. Victrex PLC, 2016. - 14 p.

61. Хазбулатова, З.С. Ароматические поликетоны (обзор). [Текст] / З.С. Хазбулатова, Л.А. Асуева, М.А. Насурова // Пластические массы. - 2010. - №. 2. - С. 32–38.

62. Хараев, А.М. Ароматические полиэфиркетоны и полиэфирэфиркетоны как перспективные термостойкие конструкционные материалы [Текст] / А.М. Хараев, Р.Ч. Бажева, Р.А. Хараева и др. // Материал всероссийской научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы». - Нальчик. - 2005. - С. 68-72.

63. Алентьев, А.Ю. Связующее для полимерных композиционных материалов [Текст] / А.Ю. Алентьев, М.Ю. Яблокова. - Москва, 2010. - 69 с.

64. Koikea, H. Wear of hybrid radial bearings (PEEK ring-PTFE retainer and alumina balls) under dry rolling contact [Text] / H. Koikea, K. Kidab, K. Mizobeb and oth. // Tribology International. - 2015. - Vol 90. - P. 77-83.

65. Wang, Z. Comparative investigation on the tribological behavior of reinforced plastic composite under natural seawater lubrication [Text] / Z. Wang, D. Gao // Materials & Design. - 2013. - Vol. 51. - P. 983-988.

66. Radel® PPSU, Veradel® PESU & Acudel® modified PPSU. Version 6.1. Solvay Specialty Polymers, 2019. 68 p.

67. Pilato, L. Phenolic Resins: A Century of Progress [Text] / L. Pilato. - Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. - 545 p.

<https://doi.org/10.1007/978-3-642-04714-5>

68. Голуб, К. С. Нові резольні смоли на основі біс фенолів і композити із їх застосуванням. [Текст] / К. С. Голуб, О. О. Шаповал, Ю. М. Кобельчук // Хімія та сучасні технології: тези доповідей VII Міжнар. науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. – Дніпропетровськ. - 2015. - С.128-129.

69. Pat. 102719056 A China, C08L 61/10, C08K 9/00, C08K 3/04, C08G 8/10. Graphene phenolic-resin compounded conducting material and preparation method thereof [Text] / Zhongzhen Yu, Fangyuan Yuan, Dong Yan, Haobin Zhang, Xiuzhi Tang (China); опубл. 10.10.12, Vol. 24. – 13 с.

70. Ліпко, О.О. Новий термореактивний водорозчинний зв'язувач для пресматеріалів [Текст] / О.О. Ліпко, М.В. Бурмістр, Ю.М. Кобельчук и др. // Вопросы химии и химической технологии. - 2015. - №6. - С. 66-73.

71. Подгорний, Э.В. Полимерные композиты на основе дифенилолпропан-формальдегидного полимера, диоксидов кремния и титана [Текст] / Э.В. Подгорний, О.Е. Дембицкий, О.С. Кабат, и др. // VII-th International conference of chemistry and modern technology "IncHemTec". – Дніпро. - 2015.

72. Кербер, М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология [Текст] / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др. - СПб.: Профессия, 2008. - 560 с.

73. Курта, С.А. Наповнювачі – синтез, властивості та використання [Текст] / С.А. Курта. Івано-Франківськ: Вид-во Прикарпат. нац. ун-ту ім. В. Стефаника, 2012. - 296 с.

74. Кац, Г.С. Наполнители для полимерных композиционных материалов [Текст] / Г.С. Кац, Д.В. Милевски. - М.: Химия, 1981. - 736 с.

75. Панова, Л.Г. Наполнители для полимерных композиционных материалов. [Текст] / Л.Г. Панова. - Саратов: СГТУ, 2010. - 68 с.

76. Основные характеристики волокнистых, нитевидных и тканых наполнителей композиционных материалов [Текст] / Г.Г. Богатеев, К.В. Микрюков, Д.Г. Богатеев, В.Х. Абдуллина. - Казань: КГТУ, 2009. - 131 с.

77. Берлин А.А., Ассовский И.Г. Перспективные материалы и технологии для ракетно-космической техники. М.: ТОРУС ПРЕСС. 2007. 456 с.

78. Markovičová, L. Carbon Fiber Polymer [Text] / L. Markovičová, V. Zatkalíková, P. Hanusová // Composites. - 2019. - Vol 1. - P. 276-280.

<https://doi.org/10.2478/cqpi-2019-0037>

79. Перепелкин, К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты [Текст] / К.Е. Перепелкин. - Санкт-Петербург: НОТ, 2009. - 380 с.

80. Роговина, С.З. Композиционные материалы на основе синтетических полимеров, армированных волокнами природного происхождения [Текст] / С.З. Роговина, Э.В. Прут, А.А. Берлин // Высокомолекулярные соединения. Серия А. - 2019. Том 61. - С. 291-315.

81. Буря, А. Исследование свойств органопластиков на основе фенолформальдегидной смолы [Текст] / А. Буря, Л. Минг-Занг, Е. Липко и др. // Технічні науки та технології. – 2017. - №2. - С. 82-88.

82. Анализ номенклатуры типовых композитных агрегатов ракет космического назначения и применяемых для них конструктивно-силовых схем [Текст] / А.В. Кондратьев, А.Г. Дмитренко, К.Д. Стэнлиэ, А.А. Царицынский // Сборник научных трудов. Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. - 2014. - Vol. 3(79). - С. 19-30.

83. Мелешко, А.И. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты [Текст] / А.И. Мелешко, С.П. Половников. - Москва: Сайнс-пресс, 2007. - 194 с.

84. Фитцер, Э. Углеродные волокна и углекомполиты [Текст] / Э. Фитцер. - М.: Мир, 1988. — 336 с.

85. Determination of carbon fiber adhesion to thermoplastic polymers using the single fiber/matrix tensile test [Text] / W. D. Bascom, L. W. Cordner, J. L. Hinkley, N. J. Johnston // American Society for Composites. Technical Conference. – Dayton, 1986. – P. 1-8.

86. Herrera-Franco, P.J. Comparison of methods for the measurement of fibre/matrix adhesion in composites [Text] / P.J. Herrera-Franco, L.T. Drzal // Composites. – 1992. - Vol. 23. - P. 2-27

[https://doi.org/10.1016/0010-4361\(92\)90282-Y](https://doi.org/10.1016/0010-4361(92)90282-Y)

87. Dorey, G. Carbon fibres and their applications [Text] / G. Dorey // Journal of Physics D: Applied Physics. - 1987. - Vol. 20.

<https://doi.org/10.1088/0022-3727/20/3/002>

88. BabuKiran, B.V. Experimentation with Flexural Properties of the Carbon Fiber Graphite Fiber and Glass Fiber Composites [Text] / B.V. BabuKiran, S. Debjyoti, M.S. Kumar // International Journal of Recent Technology and Engineering. - 2019. - Vol. 8. - P. 2277-3878.

89. Abilash, N. Assesment of self healing property in hybrid fiber polymeric composite [Text] / N. Abilash, M. Sivapragash // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2011. - Vol. 3. - C. 5430-5435.

90. Mahltig, B. Inorganic and Composite Fibers [Text] / B. Mahltig, Y. Kyosev // Production, Properties, and Applications.- Elsevier Ltd, 2019. - 343 p.
<https://doi.org/10.1016/C2016-0-04634-X>

91. Черваков, Д.О. Властивості активованих базальтових волокон для композиційних матеріалів конструкційного призначення [Текст] / Д.О. Черваков, П.І. Баштанік, М.В. Бурмістр // Вопросы химии и химической технологии. - 2009. - № 3. - С. 100-102.

92. Kadykova, Yu. A. A structural polymeric composite material reinforced with basalt fiber [Text] / Yu. A. Kadykova // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2012. - Vol. 85. Issue 9. - P. 1434–1438.
<https://doi.org/10.1134/S1070427212090212>

93. Кукин, Г.Н. Текстильное материаловедение (волокна и нити) [Текст] / Г.Н. Кукин, Л.Н. Соловьев, Л.И. Кобляков. - М.: Легпромбытиздат, 1989. - 352 с.

94. Ganguly, N. K. Studies on Respiratory Disorders [Text] / N. K. Ganguly, S. K. Jindal, S. Biswal and oth. - New York: Humana Press, 2014.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0497-6>

95. Man-made Vitreous Fibres. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. - Vol. 81.
<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol81/index.php>

96. Адаменко, Н.А. Полимерные композиционные материалы [Текст] / Н.А. Адаменко, Г.В. Агафонова, А.В. Фетисов. - Волгоград: ВолгГТУ, 2016. - 96 с.

97. Джурка, Г.Ф. Полімерні композиційні матеріали [Текст] / Г.Ф. Джурка. - Полтава, 2008. - 58 с.

98. Kudina, E. F. Synthesis and properties of dispersed hybrid materials based on a silicate matrix [Text] / E. F. Kudina // Glass Physics and Chemistry. - 2012. - Vol. 38. - P. 172–179.

99. Властивості композиту на основі поліпропілену, наповненого апретованим карбонатом кальцію [Текст] / П. І. Баштаник, М. Я. Кузьменко, С. М. Кузьменко, В.П. Кіндрич // Вопросы химии и химической технологии. - 2016. - Vol. 4(108). - С. 38-42.

100. Кабат, О.С. Конструкционные фенопласты с высоким уровнем термической стабильности [Текст] / О.С. Кабат, О.В. Черваков, Ю. М. Кобельчук и др. // Технологические системы. - 2017. - Т. 2 (79). - С. 33-39.

101. Rothon, R. Fillers for Polymer Applications [Text] / R. Rothon. - Switzerland: Springer, 2017. - 489 p.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9>

102. Dong, Y. Fillers and Reinforcements for Advanced Nanocomposites [Text] / Y. Dong, R. Umer, A. Kin Tak Lau. - Woodhead Publishing, 2015. –586 p.

102. Рогайлин, М.И. Справочник по углеграфитовым материалам [Текст] / М.И. Рогайлин, Е.Ф. Чалых. - Ленинград: Химия, 1974. - 208 с.

103. Jones, W. Organic Molecular Solids. Properties and Applications [Text] / W. Jones. - Boca Raton: CRC Press, 1997. - 464 p

104. Surface Engineering of Graphene [Text] / S. Sahoo, S. Kumar, T. Ganesh, C. Nayak. - Switzerland: Springer, 2019. - 271 p.

<https://doi.org/10.1007/978-3-030-30207-8>

105. Rzeczkowski, P. Graphite modified epoxy-based adhesive for joining of aluminium and PP/graphite composites [Text] / P. Rzeczkowski, P. Pötschke, M. Fischer and oth. // The Journal of Adhesion. – 2019. - P. 229-252.

<https://doi.org/10.1080/00218464.2019.1688152>

106. Jin, H. Comparative tribological behavior of friction composites containing natural graphite and expanded graphite [Text] / H. Jin, K. Zhou, Z. Ji and oth. // Friction. - 2019. - P. 1-9.

<https://doi.org/10.1007/s40544-019-0293-3>

107. 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.

108. Ray, S. C. Magnetism and Spintronics in Carbon and Carbon Nanostructured Materials [Text] / Ray, S. C. // Micro and Nano Technologies. - 2020. - P. 23-45.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817680-1.00002-0>

109. Uyor, U. O. Effects of carbonized particles on microstructure and mechanical properties of epoxy resin [Text] / U. O. Uyor, A. D. Omah, V. S. Aigbodion and oth. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2019. - Vol. 103. - P. 4283–4292.

110. Maiti, M. Effect of carbon black on properties of rubber nanocomposites [Text] / M. Maiti, S. Sadhu, A. K. Bhowmick // Journal of Applied Polymer Science. - 2005. - Vol. 96. - P. 443–451.

111. Razeghi, M. The Mystery of Carbon. An introduction to carbon materials [Text] / M. Razeghi. - IOP Publishing Ltd, 2019.

<https://doi.org/10.1088/2053-2563/ab35d1>

112. Алексеев, Н.И. Физические механизмы формирования фуллеренов и углеродных нанотрубок [Текст]: автореф. дис. на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 01.04.07 / Н.И. Алексеев; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. — Новгород Великий, 2009. — 54 с.

113. Цао, Г. Наноструктуры и наноматериалы. Синтез, свойства и применение [Текст] / Г. Цао, Ван Ин. - Москва: Научный мир, 2012. - 520 с.

114. Penkova, A. Structure and Transport Properties of Fullerene–Polyamide Membranes [Text] / A. Penkova, A. Toikka, T. Kostereva // Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures. - 2008. - Vol. 16. - P. 666-669.

<https://doi.org/10.1080/15363830802314251>

115. Ozawa, M. Synthesis and properties of polyamides with [60] fullerene in the main chain [Text] / M. Ozawa, J. Li, K. Nakahara // Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry. - 1998. - Vol. 36. - P. 3139-3146.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0518\(199812\)36:17<3139::AID-POLA16>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0518(199812)36:17<3139::AID-POLA16>3.0.CO;2-W)

116. Domínguez, M. S. Nanocolloids. A Meeting Point for Scientists and Technologists [Text] / M. S. Domínguez, C. R. Abreu. - Nanocolloids Elsevier Inc., 2016. - 536 p.

117. Козлов, Г.В. Механизм усиления полимерных нанокомпозитов, наполненных углеродными нанотрубками [Текст] / Г.В. Козлов, А.И. Буря, Ю.С. Липатов // Доп. НАН України. - 2008. - № 1. - С. 132-136.

118. Мулюков, Р.Р. Углеродные наноматериалы [Текст] / Р.Р. Мулюков, Ю.А. Баимова. - Уфа: РИЦ БашГУ, 2015. - 160 с.

119. Lee, D. W. Advanced silica/polymer composites: Materials and applications [Text] / D. W. Lee, B. R. Yoo // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. - 2016. - Vol. 38. - P. 1-12.

<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.04.016>

120. 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. - 2011. - №4. - С. 37-42.

121. Айлер, Р. Химия кремнезема [Текст] / Р. Айлер. - М.: Мир, 1982. - 1127 с.

122. Свойства аморфного нанопорошка диоксида кремния, полученного импульсным электронным испарением [Текст] / В.Г. Ильвес,

М.Г. Зуев, С.Ю. Соковнин, А.М. Мурзакаев // Физика твердого тела. - 2015. - Том 57. - С. 152-158.

123. Shang, L. Microstructure and Thermal Insulation Property of Silica Composite Aerogel. [Text] / L. Shang, Y. Lyu, W. Han // Materials. – 2019. - Vol. 12(6). - P. 1-11. <https://doi.org/10.3390/ma12060993>

124. Pielichowski, K. Polymer Composites with Functionalized Nanoparticles. Synthesis, Properties, and Applications [Text] / K. Pielichowski, T. M. Majka. - Elsevier Inc., 2019. - 504 p.

<https://doi.org/10.1016/C2017-0-00517-7>

125. Conradi, M. Nanosilica-reinforced polymer composites [Text] / M. Conradi // Materials and technology. - 2013. - Vol. 47. - P. 285–293.

126. Ситар, В.І. Дослідження впливу дрібнодисперсного силікагелю на властивості ароматичного поліаміду фенілону [Текст] / В.І. Ситар, О.С. Кабат // Вопросы химии и химической технологии. – 2005. – №1. – С.199-203.

127. Сікора, Я. В. Технологічні і конструкторські аспекти екструзії та лиття під тиском термопластичних полімерних композитів і нанокомпозитів [Text] / Я. В. Сікора, О. В. Суберляк. – Львів: Вид-во Л. Політехніки, 2013. - 200 с.

128. Ким, В. С. Оборудование и инструменты для изготовления изделий из полимерных композитов [Текст] / В. С. Ким, М. А. Шерышев. - Москва: Издательство Юрайт, 2019. - 257 с.

129. Суберляк, О.В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів [Текст] / О.В. Суберляк, П.І. Баштанник. – Львів: Растр-7, 2007. – 376 с.

130. Сытар, Теплостойкие материалы триботехнического назначения на основе ароматического полиамида и дисперсных кремнеземов [Текст] / В.И. Сытар, О.С. Кабат // Вопросы химии и химической технологии. – 2007. – №4. – С. 94-98.

131. Кантаев, А. С. Разработка технологии получения ультрадисперсных порошков политетрафторэтилена и композитов на их

основе [Текст] : диссертация на соискание научной степени к.т.н / Кантаев А. С. - 2013. – 165 с.

132. Кабат, О.С. Конструкционные фенопласты с высоким уровнем термической стабильности [Текст] / О.С. Кабат, О.В. Черваков, Ю. М. Кобельчук [и др.] // Технологические системы. – 2017. – Т. 2 (79) – С. 33-39.

133. Baird, D. G. Polymer processing: principles and design – Second edition [Текст] / D. G. Baird, I. C. Dimitris - John Wiley & Sons, 2014. -387 p.

134. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов [Текст] / В. Е. Галыгин, Г.С. Баронин, В.П. Таров, Д.О. Завражин. - Тамбов: Из-во ФГБОУ ВПО “ТГТУ”, 2012. - 180 с.

135. Osswald, T. Understanding Polymer Processing: Processes and Governing Equations. 2nd Edition [Text] / T. Osswald. - Carl Hanser Verlag, 2017. - 378 p.

136. Thomas, S. Advances in Polymer Processing: From Macro - to Nano-Scales [Text] / S. Thomas, W. Yang. - Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2009. - 752 p.

137. Lee, S.-T. Foam Extrusion Principles and Practice, Second Edition [Text] / S.-T. Lee, C. B. Park - CRC Press, 2014. – 624 с.

138. Лукасик, В.А. Полимерные композиции. Оборудование и технологии изготовления Учебное пособие [Текст] / В.А. Лукасик, В.Н. Давыдова, И.П. Петрюк. – Волгоград: ВолгГТУ, 2003. - 48 с.

139. Буря, О.І. Влияние содержания органического волокна на трибологические свойства композитов на основе фенилона [Текст] / О.І. Буря, О.О. Набережна, В.В. Перемітько // Вісник чернігівського державного технологічного університету. – 2015. - № 2 (78). - С. 33-37.

140. Трибологические характеристики органопластиков на основе фенилона [Текст] / А. И. Буря, О. А. Набережная, В. И. Теренин, А. М. В. Томина // Проблемы тертя та зношування. – 2015. - 3 (68). - С. 51-55.

141. Чердынцева, С.В. Влияние вида органического модификатора монтмориллонита на фізико-химические свойства нанокompозитов на основе

полиамида-6, полученных смешением в расплаве [Текст] / С.В. Чердынцева, С.И. Белоусов, С.В. Крашенников и др. // Пластические массы. – 2013. — №5 – Р. 39-43.

142. Sukhyy, K.M. Obtaining technology for nanocomposites based on polyamide-6 and organomodified montmorillonite [Text] / K.M. Sukhyy, E.A.Belyanovskaya, M.P. Sukhyy and oth. // Journal of Chemistry and Technologies. – 2018. - №1. – Р. 9-19. <https://doi.org/10.15421/081802>

143. Modification technology of montmorillonite by polyionenes [Text] / K.M. Sukhyy, E.A. Belyanovskaya, M.P. Sukhyy, V.I. Tomilo // Journal of Chemistry and Technologies. – 2018. - № 26(1). – Р. 1-8.

<https://doi.org/10.15421/081801>

144. Mohebbi, A. Dynamic behavior of nucleation in supercritical N₂ foaming of polystyrene-aluminum oxide nanocomposite [Текст] / A. Mohebbi, A. Mehrabani-Zeinabad, M. Navid-Fammili // Высокомолекулярные соединения. – 2011. – Серия А. - Том. 53, №11. - С. 1942-1951.

145. Віленський, В.О. Теплофізичні властивості та особливості термодеструкції нанокомпозитів із поліепоксиду, оксиду металу та поліаніліну, отверднених у сталих фізичних полях [Текст] / В.О. Віленський, Ю.В. Бардадим, Т.В. Дмитрієва и др. // Полімерний журнал. – 2013. – Том 35, №3 – Р. 250-258.

146. Особливості міжфазної взаємодії в епоксидних композитах, наповнених силіцій карбідом [Текст] / О.Ю. Полоз, В.І. Штомпель, К.С. Бурмістров, Ю.Р. Ебіч // Вопросы химии и химической технологии. – 2020. – №1. – С. 39-46

<http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2020-128-1-39-46>

147. Гомза, Ю.П. Вплив карбонанотрубок на структурні особливості полііміду [Текст] / Ю.П. Гомза, Т.А. Шанталій, В.Д. Несін и др. // Полімерний журнал. – 2011. – Том 33, №3 – С. 244-247.

148. Польшиков, С.В. Композиционные материалы на основе фуллеренов C₆₀/C₇₀ и полипропилена, полученные полимеризацией in situ

[Текст] / С.В. Польщиков, П.М. Недорезова, Т.В. Монахова и др. // Высокомолекулярные соединения. – 2013. – Том 55, №5 – С. 582-590.

149. Влияние наполнителя на формирование *in situ* смесей линейных полимеров [Текст] / Л.Ф. Коянчук, Т.Д. Игнатова, О.И. Антоненко, Ю.В. Маслак // Высокомолекулярные соединения. – 2010. – Том 52, №5 – С. 868-879.

150. Куцевол, Н.В. Формування наночастинок срібла в неіоногенних полімерних матрицях різної молекулярної структури [Текст] / Н.В. Куцевол, Н.П. Мельник, Т.Г. Єжова и др. // Полімерний журнал. – 2013. – Т. 35, №3 – С. 265-271.

151. Research progress on polymer–inorganic thermoelectric nanocomposite materials [Text] / Y. Du, S. Z. Shen, K. Cai, P. S. Casey // Progress in Polymer Science. – Vol. 37(6). – 2012. - P. 820-841

<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.11.003>

152. Козак, Н.В. Дінаміка нітроксильного зонда та структурні особливості поліімідовмісних нанокомпозитів [Текст] / Н.В. Козак, Т.А. Шанталій, К.С. Драган // Полімерний журнал. – 2011. - Том. 33, №1. - С. 32-37.

153. Шанталій, Т.А. Особливості формування структури гібридних систем на основі полііміду та тетраетоксисилану [Текст] / Т.А. Шанталій, Ю.П. Гомза, С.Д. Несін та інш. // Полімерний журнал. – 2012. - Том. 34, №1. - С. 86-90.

154. Богданова, Л.М. Механические свойства эпокидных композитов на основе наночастиц серебра, синтезированных *in situ* [Текст] / Л.М. Богданова, Л.И. Кузуб, Э.И. Джавадян и др. // Высокомолекулярные соединения. – 2014. - Том. 56, №3. - С. 289-295.

155. Богданова, Л.М. Механические свойства эпокидных композитов на основе наночастиц серебра, синтезированных *in situ* // Л.М. Богданова, Л.И. Кузуб, Э.И. Джавадян и др. [Текст] / Высокомолекулярные соединения. – 2014. - Том. 56, №3. - С. 289-295.

156. Волынский, А.Л. Новый поход к созданию нанокмползитов с полимерной матрицей [Текст] / А.Л. Волынский, Н.Ф. Бакеев / Высокомолекулярные соединения. – 2011. - Том. 53, №7. - С. 1203-1216.

157. Трофимчук, Е.С. Влияние диоксидов титана и кремния на термостабильность изотактического полипропилена, деформированного по механизму крейзинга [Текст] / Е.С. Трофимчук, В.В. Полянская, М.А. Москвина и др. // Высокомолекулярные соединения. – 2015. - Том. 57, №1. - С. 15-26.

158. Яришева, А.Ю. Особенности делокализованного крейзинга полиэтилена высокой плотности в растворах полиэтиленоксида // А.Ю. Яришева, Д.В. Багров, Е.Г. Рухля и др. // Высокомолекулярные соединения. – 2012. - Том. 54, №10. - С. 1507-1515.

159. Vivero-Escoto, J. Silica nanoparticles preparation, properties and uses [Text] / J. Vivero-Escoto. - New York: Nova Science Publishers, 2012 - 288 p.

160. Басов, Н.И. Техника переработки пластмасс. [Текст] / Н.И. Басов, В. Броя – М.: Химия, 1985. – 528 с.

161. Филатов, В.И. Технологическая подготовка процессов формования изделий из пластмасс [Текст] / В.И. Филатов, В.Д. Корсаков. – Ленинград: Политехника, 1991. – 352 с.

162. Палей, М.М. Технология производства приспособлений, пресс-форм и штампов [Текст] / М.М. Палей – М.: Машиностроение, 1979. – 292 с.

163. Пантелеев, А.П. Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс [Текст] / А.П. Пантелеев, Ю.М. Шевцов, И.А. Горячев – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.

164. Богданов, В.В. Методы исследования технологических свойств пластмасс [Текст] / В.В. Богданов – Л.: Из-во Ленинградского ун-та, 1978. – 176 с.

165. Тимонин, А.С. Машины и аппараты химических производств [Текст] / А.С. Тимонин. – Калуга.: Издательство Н.Ф. Бочкаревой, 2008. – 872 с.

166. Богданов, В.В. Методы исследования технологических свойств пластмасс [Текст] / В.В. Богданов. – Л.: Из-во Ленинградского ун-та, 1978. – 176 с.
167. Сатин, С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии [Текст] / С.Н. Сатин. – Л., Химия, 1975. – 48 с.
168. Beaumont, P. W. R. Comprehensive Composite Materials II [Text] / P. W. R. Beaumont, C. H. Zweben. - Elsevier Ltd., 2018 – 4288 p.
169. Matyjaszewski, K. Polymer Science: A Comprehensive Reference [Text] / K. Matyjaszewski, M. Möller. - Elsevier B.V., 2012 – 7760 p.
170. Buggy, M. Polymeric Materials. Chapter from: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering [Text] / M. Buggy. - Elsevier Inc, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04104-7>
171. A recyclable epoxy for composite wind turbine blades [Text] / M.-S. Wu, B.C. Jin, X. Li, S. Nutt // Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science. - 2019. Vol. 5(3). – P. 114-127
<https://doi.org/10.1080/20550340.2019.1639967>
172. Gogoi, R. Development of thermally conductive and high-specific strength polypropylene composites for thermal management applications in automotive [Text] / R. Gogoi, G. Manik // Polymer composites. - 2021.
<https://doi.org/10.1002/pc.25947>
173. Кабат, О.С. Полимерные композиты на основе феноло-формальдегидной смолы для узлов трения и герметизации каландров [Текст] / О.С. Кабат, Д.В. Склад // Тези доповідей VI науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Хімія та сучасні технології”. – Дніпропетровськ. - 2013.
174. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [Текст] / Ф. Стренк – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
175. Levy, D., The Sol-Gel Handbook: Synthesis, Characterization, and Applications [Text] / D. Levy, M. Zayat. – Wiley, 2015. – 1616 p.

176. Klein, L. Handbook of Sol-Gel Science and Technology: Processing, Characterization and Applications [Text] / L. Klein, M. Aparicio, A. Jitianu. - Springer International Publishing, 2018. – 3789 p.

177. Шилова, О.А. Нанокпозиционные оксидные и гибридные органо-неорганические материалы, получаемые золь-гель методом. Синтез. Свойства. Применение [Текст] / О.А. Шилова, В.В. Шилов // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології. - 2003. - Том 1. – Р. 9-83

178. Бондалетова, Л.И. Полимерные композиционные материалы [Текст] / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов - Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 118 с.

179. Тагер, А.А. Физико-химия полимеров. Издание 4-е, переработанное и дополненное [Текст] / А.А. Тагер. - М.: Научный мир, 2007. - 576 с.

180. Polymer composite materials with a high level of thermal stability based on phenolic resins and disperse silica fillers [Text] / O. S. Kabat, Yu. M. Kobelchuk, D. O. Chervakov, O. V. Chervakov // Science, Technologies, Innovations. – 2018. – N 2(6). – P. 48–53.

181. Yuan, W. Efficient grafting of polypropylene onto silica nanoparticles and the properties of PP/PP-g-SiO₂ nanocomposites [Text] / W. Yuan, F. Wang, Z. Chen [et al.] // Polym. J. – 2018. – Vol. 151. – P. 242–249.

<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.07.060>

182. Tokar, A. The Quantum-Chemical Modelling of Structure and Spectral Characteristics for Molecular Complexes in Pentaplast-Terlon System [Text] / A. Tokar, E. Synchuk, O. Chigvintseva // Chem. Chem. Technol. – 2017. – Vol. 11, N 4. – P. 405–409.

183. Токарь, А. В. Эффекты водородного связывания в структурном анализе фенилона С-2: квантовохимическая интерпретация [Текст] / А. В. Токарь, О. П. Чигвинцева // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Хімія. – 2017. – Т. 25, вип. 1. – С. 9–14.

184. Цирельсон, В. Г. Квантовая химия. Молекулы, молекулярные системы и твердые тела [Текст] / В. Г. Цирельсон. – М.: Лаборатория знаний, 2017. – 522 с.
185. Weinhold, F. Discovering Chemistry With Natural Bond Orbitals [Text] / F. Weinhold, C. R. Landis. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. – P. 132–133.
186. Weinhold, F. Natural bond orbital analysis: A critical overview of relationships to alternative bonding perspectives [Text] / F. Weinhold // J. Comput. Chem. – 2012. – Vol. 33, N 30. – P. 2363–2379.
187. Sordo, J. A. On the use of the Boys-Bernardi function counterpoise procedure to correct barrier heights for basis set superposition error [Text] / J. A. Sordo // J. Mol. Struct. – 2001. – Vol. 537, N 1–3. – P. 245–251.
188. Kolandaivel, P. Study of proper and improper hydrogen bonding using Bader's atoms in molecules (AIM) theory and NBO analysis [Text] / P. Kolandaivel, V. Nirmala // J. Mol. Struct. – 2004. – Vol. 694, N 1–3. – P. 33–38.
189. Merrick, J. P. An Evaluation of Harmonic Vibrational Frequency Scale Factors [Text] / J. P. Merrick, D. Moran, L. Radom // J. Phys. Chem. A. – 2007. – Vol. 111, N 45. – P. 11683–11700.
190. Mechanocomposites on the basis of polyamide [Text] / I. A. Vorsina, T. F. Grigoreva, S. V. Vosmerikov, N. Z. Lyakhov // Nauka i Studia. – 2015. – Vol. 5, N 136. – P. 20–25.
191. Лирова Б. И. Анализ полимерных композиционных материалов [Text] / Б. И. Лирова, Е. В. Русинова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. – 187 с.
192. Kasai, N. X-Ray diffraction by macromolecules [Text] / N. Kasai, M. Kakudo. – Tokyo: Kodansha Ltd., 2005. – 504 с.
193. Земнухова, Л.А. Аморфный диоксид кремния из аморфных ферросплавов [Текст] / Л.А. Земнухова, Г.А. Федорищева, Е.Д. Шкорина // Журнал прикладной химии. – 2011. – Т. 84, № 4. – С. 529 – 535.

194. Pat. 3096144-A USA. Method of making inorganic fibers [Text] / E. Wainer, M. Edward (USA); date of publcaton 02.07.1963.
195. Михеев, В.И. Рентгенометрический определитель минералов [Текст] / В.И. Михеев. - М.: Гос. научно-техн. изд-во литературы по геологии и охране недр, 1957. - 870 с.
196. Миркин, Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов [Текст] / Л.И. Миркин. - М.: Физматлит, 1961. — 863 с.
197. Baird, D. G. Polymer Processing: Principles and Design, 2nd Edition [Text] / D. G. Baird, D. I. Collias. - Wiley, 2014. – 416 p.
198. Кулезнев, В.Н. Основы технологии переработки пластмасс [Текст] / В.Н. Кулезнев, В.К. Гусев. – М.: Химия, 2004. – 600с.
199. Шварц, О. Переработка пластмасс [Текст] / О. Шварц, Ф. –В. Эбелинг, Б. Фурт. – СПб.: Профессия, 2005. – 320 с.
200. Басов, Н.И. Техника переработки пластмасс [Текст] / Н.И. Басов, В. Броя. - М.: Химия, 1985. – 528с.
201. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов [Текст] / В. Е. Галыгин, Г.С. Баронин, В.П. Таров, Д.О. Завражин. - Тамбов: Из-во ФГБОУ ВПО “ТГТУ”, 2012. - 180 с.
202. 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 // Полімерний журнал. – 2017. – № 4. – С. 248-252.
203. 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.
<http://dx.doi.org/10.29010/081.8>
204. Гальперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / Н.И. Гальперин – М.: Химия, 1981. – 812 с.

205. Рябинин, Д.Д. Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей [Текст] / Д.Д. Рябинин, Ю.Е. Лукач. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.

206. Ситар, В.І. Побудова елементів САПР при моделюванні та проектуванні обладнання хімічної промисловості за допомогою пакета Mathcad [Текст] / В.І. Ситар, М.В. Бурмістр, І.М. Кузяєв. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2004. – 317 с.

207. Кабат, О.С. Полимерные композиционные материалы на основе фторопласта и метод их получения [Текст] / 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.

<http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-3-116-122>

208. Kabat, O., A method for obtaining a polymer composite based on aromatic polyamide and silicon dioxide [Текст] / O. Kabat, V. Sytar, K. Heti, V. Artemchuk // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2021. - Vol. 56(2). - С. 283-288.

209. Буря, А. И. Создание и исследование свойств органопластиков на основе полиамидов, армированных полиимидными волокнами [Текст] / А. И. Буря, Э. В. Ткаченко, Ю. Ф. Шутилин // Вестник ВГУИТ. – 2014. - №4. - с. 167-171.

210. Панов, Ю. Т. Современные методы переработки полимерных материалов. Переработка реактопластов [Текст] / Ю. Т. Панов, Л. А. Чижова, Е. В. Ермолаева. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. – 144 с.

211. Остапчук, Ю.Г. Современное состояние и тенденции развития таблетировочного оборудования [Текст] / Ю.Г. Остапчук, С.Ф. Водченко. - М.: ЦИНТИХИМнефтехиммаш, 1975. – 88 с.

212. Сытар, В.И. Разработка методики получения полимерного композиционного материал фенилона, наполненного нанодисперсным наполнителем [Текст] / В.И. Сытар, М.О. Савченко, О.С. Кабат, Б.И.

Мельников // Вопросы химии и химической технологии. – 2007. – №3. – С.108-113.

213. Sánchez-Jiménez, P.E. Combined kinetic analysis of thermal degradation of polymeric materials under any thermal pathway [Text] / P.E. Sánchez-Jiménez, L.A. Pérez-Maqueda, A. Perejón, J.M. Criado // Polymer Degradation and Stability. – 2009. – Vol. 94 (11). – P. 2079-2085.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.07.006>

214. Nasef, M. M. Thermal stability of radiation grafted PTFE-g-polystyrene sulfonic acid membranes [Text] / M. M. Nasef // Polymer Degradation and Stability. – 2000. – Vol. 68 (2). – P. 231-238.

215. Суворова, Ю. О. Плівкоутворення бутанолізованих дифенілолпропанформальдегідних олігомерів, модифікованих жирами рослинного та тваринного походження [Текст] / Ю. О. Суворова, О. В. Черваков, М.В. Адріанова [и др.] // Вопросы химии и химической технологии. – 2016. - Т. 4 (108). - С. 67-72.

216. Golub, K. C. New resol resins based on bisphenol A and their composites with application [Text] / K. C. Golub, Y.M. Chapoval, Y.M. Kobelchuk // VII-th International conference of chemistry and modern technology "IncHemTec" - 2015. – Vol. 4. – P. 128-129.

217. Бахман, А. Фенопласты [Текст] / А.Бахман, К. Мюллер. - М.: Химия, 1978 – 288 с.

218. Сытар, В.И. Изучение взаимосвязи свойств и строения сополимеров на основе ароматических полиамидов [Текст] / В.И. Сытар // Вопросы химии и химической технологии. – 2004. - Т. 3. - С. 130-132.

219. Производство изделий из полимерных материалов [Текст] / В.К. Крыжановский, М.Л. Кербер, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко. – СПб.: Профессия, 2004 - 464 с.

220. Ситар, В.І. Побудова елементів САПР при моделюванні та проектуванні обладнання хімічної промисловості за допомогою пакета

Mathcad [Текст] / В.І. Ситар, М.В. Бурмістр, І.М. Кузяєв. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2004. – 317 с.

221. Кобаяши, А. Обработка пластмасс резанием [Текст] / А. Кобаяши. - М.: Машиностроение. – 1974. - 192 с.

222. Корягин, С.И. Способы обработки материалов [Текст] / С.И. Корягин, И.В. Пименов, В.К. Худяков. - Калининград.: Из-во КУ. – 2000. – 448 с.

223. Р 50-28-87 Рекомендации формы заточки режущей части резцов для обработки пластмасс и условия их эксплуатации. Дата введения 01.01.85 с. 14

224. Штучний, Б.П. Обработка пластмас резаньем. Справочное пособие [Текст] / Б.П. Штучний. – Машиностроение, 1974. - 145 с.

225. Wang, H. Materials and processing of polymer-based electrochromic devices [Text] / H. Wang, M. Barrett, B. Duane // Materials Science and Engineering: B. – 2018. - Vol. 228. - 167-174.

<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.11.016>.

224. Каллистер, У. Д. Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамика, полимеры) [Текст] / У. Д. Каллистер, Д.Д. Ретвич. - Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2011. - 896 с.

227. Burya, A. I. Influence of metal-containing carbon fibers on the properties of carbon-filled plastics based on aromatic polyamide [Text] / A. I. Burya, A. M. Safonova, I. V. Rula // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2012. – Vol. 85. – P. 943–949.

<https://doi.org/10.1007/s10891-012-0734-6>

228. Kabat, O.S. 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) – P. 48-53.

229. Kabat, O.S. 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.
<https://doi.org/10.15421/08192702>

230. Михайлин, Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю.А. Михайлин – М: Научные основы и технологии, 2009. - 660 с.

231. Schrader, A. M. Surface chemical heterogeneity modulates silica surface hydration [Text] / A. M. Schrader, J. I. Monroe, R. Sheil and oth. // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2018. - 115 (12). – P. 2890–2895.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1722263115>

232. Браун, Д. Практическое руководство по синтезу и исследованию свойств полимеров [Текст] / Д. Браун, Г. Шердон, В. Керн М: Химия, 1976. - 256 с.

233. Тростянская, Е.Б. Термоустойчивость пластиков конструкционного назначения [Текст] / Е.Б. Тростянская. - М.: Химия, 1980 – 240 с.

234. Коршак, В.В. Химическое строение и температурные характеристики полимеров [Текст] / В.В. Коршак. - М.: Наука, 1970 - 390 с.

235. Ebnesajjad, S. Expanded PTFE Applications Handbook: Technology, Manufacturing and Applications [Text] / S. Ebnesajjad. – William Andrew, 2016. – 30 с.

236. Мадорский, С. Термическое разложение органических полимеров [Текст] / С. Мадорский. - М: Мир, 1967 - 328 с.

237. Чукин, Г.Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезёма [Текст] / Г.Д. Чукин. - М.: Типография Паладин, ООО «Принта», 2008. – 172 с.

238. Корнілович, Б.Ю. Фізична хімія кремнезему і нанодисперсних силікатів [Текст] / Б.Ю. Корнілович. - К.: Освіта України, 2013. - 178 с.

239. Годовский, Ю.К. Теплофизические методы исследования полимеров [Текст] / Ю.К. Годовский. - М.: Химия, 1976. - 216 с.
240. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) [Текст] / А.В. Чичинадзе. - М: Машиностроение, 2001. - 664 с.
241. Stammer, M. Effect of load reduction mechanisms on loads and blade bearing movements of wind turbines [Text] / M. Stammer, P. Thomas, A. Reuter and oth. // Wind energy. – 2020. - Vol. 23. - P. 274-290
<https://doi.org/10.1002/we.2428>
242. Pyatibratov, G. Ya. On the Use of Electromechanical Systems for Limiting Dynamic Loads in Spring Mechanisms [Text] / G. Ya. Pyatibratov // Russian Electrical Engineering. – 2018. - Vol. 89. - P 36–41.
243. Bošnjak, S. External Load Variability of Multibucket Machines for Mechanization [Text] / S. Bošnjak, N. Đ. Zrnić, V. M. Gašić // Advanced Materials Research. – 2011. - Vol. 422. - P. 678-683
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.422.678>
244. Гуль, В.Е. Структура и механические свойства полимеров 4-е изд., перераб. и доп. [Текст] / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. - М.: Издательство «Лабиринт», 1994. - 367 с.
245. Тетрых, В.А. Химические реакции с участием поверхности кремнезема [Текст] / В.А. Тетрых, Л.А. Беякова. – Киев: Наукова думка, 1991. - 264 с.
246. Гаркунов, Д.Н. Триботехника(износ и безизносность) [Текст] / Д.Н. Гаркунов. - М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
247. Mao, K. The wear resistance improvement of fibre reinforced polymer composite gears [Text] / K. Mao, D. Greenwood, R. Ramkumar and oth. // Wear. – 2019. – Vol. 426-427. – P.1033-1039.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.043>
248. Pixiang, L. Advanced polymeric coatings for tilting pad bearings with application in the oil and gas industry [Text] / L. Pixiang , J. L. Meyer, B. Vaezian, A. A. Polycarpou // Wear. – 2016. – Vol. 354-355. – P.10-20.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.02.013>

249. Кабат, О. С. Полімерні композиційні матеріали для вузлів тертя космічної та авіаційної техніки [Текст] / О. С. Кабат, В.І. Ситар, Д.В. Єрмаченко та інш. // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: збірник наукових праць Дніпровського національного університету ім. О. Гончара. – 2017. – Том. XXIII. – Р.40-48.

250. Kabat, O. Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black [Text] / O. Kabat, V. Sytar, K. Sukhyy // Chemistry & chemical technology. – 2018. – Vol.12. – № 3. – P. 326-330.

<https://doi.org/10.23939/chcht12.03.326>

251. Аулін, В.В. Вплив режимів експлуатації на зношування деталей, виготовлених з полімерно-композитного матеріалу [Текст] / В.В. Аулін, О.Д. Деркач, Д.О. Макаренко, А.В. Гриньків // Проблеми трибології. – 2018. - Том 90. - № 4. с. 65-69

252. Сытар, В.И. Оптимизация состава композиции по комплексу триботехнических характеристик [Текст] / В.И .Сытар, И.М. Кузьяев, А.И. Буря и др. // Трение и износ. – 2004. - 25 (2). – С. 219.

253. Буря, А.И. Влияние содержания волокна оксалон на триботехнические характеристики органопластиков на основе фенилона С–1 [Текст] / А.И. Буря, А-М.В. Томина, В.А. Чернов // Problems of Tribology. - 2016. - Т. 82 (4). – С. 16-16

254. 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.

255. Liu, Y. Preparation and tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric self-lubricating composites [Text] / Y. Liu, N. Xu, Y. Wang and oth. // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 361. – P.196-205.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.121>

256. Wang, A.H. A novel assembly of MoS₂-PTFE solid lubricants into wear-resistant micro-hole array template and corresponding tribological performance

[Text] / A.H.Wang J.Xia Z.X.Yang D.H.Xiong // Optics & Laser Technology. – 2019. – Vol. 116. – P.171-179.

<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.033>

257. Titov V. V. Testing of structural materials and lubricants for aircraft friction units [Text] / V. V. Titov // Journal of Friction and Wear.- 2007. - Т. 28 (2). – С. 162-172.

<https://doi.org/10.3103/S1068366607020067>

258. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин) [Текст] / Д.Н. Гаркунов – М.: Из-во МСХА, 2002. – 632 с.

259. Крагельский, И.В. Узлы трения машин Справочник [Текст] / И.В. Крагельский, Н.М. Михин — М.: Машиностроение, 1984. - 280 с.

260. Воронков, Б. Д. Подшипники сухого трения. - 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Б. Д. Воронков. - Л.; Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. - 224 с.

261. Кохановский, В.А. Трение и изнашивание фторопластсодержащих композитов (обзор) [Текст] / В.А. Кохановский, Ю.А. Петров // Вестник ДГТУ. - 2009. - №1(40). - С. 30-35.

262. Man, J. Study the Influence of Surface Morphology and Lubrication Pressure on Tribological Behavior of 316L–PTFE Friction Interface in High-Water-Based Fluid [Text] / J. Man, J. Zhao, L. Song, H. Yang // Coatings. – 2020. – Vol. 10(4). – P. 405 <https://doi.org/10.3390/coatings10040405>

263. Дунаев, П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин [Текст] / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. - Москва: Академия, 2003. - 496 с.

264. Мамедов, В.Т. Ремонт и восстановление нефтепромыслового оборудования [Текст] / В.Т. Мамедов, О.Г. Мирзоев. - Баку: АДНА, 2017. - 427 с.

265. Григорьев, А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей [Текст] / А.Я. Григорьев. - Минск: Беларуская навука, 2016. - 247 с.

266. Mirsalimov, V. M. Inverse wear contact problem of the friction unit [Text] / V. M. Mirsalimov, P. E. Akhundova // Journal of Mechanical Engineering Science.- 2018. - Vol. 232 (22). – P. 4216-4226.

<https://doi.org/10.1177/0954406217749267>

267. Крагельский, И.В. Трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский – М.: Машгиз, 1962. – 383 с.

268. Комбалов, В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ [Текст] / В.С. Комбалов. - М.: Наука, 1974. - 112 с.

269. Makhkamov, K. Kh. Formation of regular roughness on working surfaces of friction units [Text] / K. Kh. Makhkamov // Journal of Friction and Wear. – 2016. – Vol. 37(5). P. 500-506

<https://doi.org/10.3103/S1068366616050123>

270. Аулин, В. В. Трибологические переходы при приработке поверхностей трения сопряжений деталей [Текст] / В. В. Аулин, Т. Н. Замота, С. В. Лысенко та ін. // Проблеми трибології. – 2017. – Vol. 86(4). P. 87-96.

271. Kobets, A.S. Investigation friction and wear of constructional plastics based on aromatic polyamide [Text] / A.S. Kobets, O. D. Derkach, O. S. Kabat and oth. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2020. - Vol. 15 (10) – P. 1189-1195.

272. Васильев, С. В. Армированные композиты на основе ПТФЭ [Текст] / С. В. Васильев // Евроазиатское научное объединение. – 2017. - № 1 (23). – с. 28-31.

273. Горяинова, А.В. Фторопласты в машиностроении [Текст] / А.В. Горяинова, Г.К. Божков, М.С. Тихонова. - Москва: Машиностроение, 1971. - 233 с.

274. Баурова, Н.И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин [Текст] / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. - Москва: МАДИ, 2016 – 264 с.

275. 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.

276. Ситар, В.І. Дослідження впливу дрібнодисперсного силікагелю на властивості ароматичного поліаміду фенілону [Текст] / В.І. Ситар, О.С. Кабат // Вопросы химии и химической технологии. – 2005. - №1. – Р. 199-203.

277. Бартенъев, Г.М. Трение и износ полимеров [Текст] / Г.М. Бартенъев, В.В. Лаврентъев. - Л.: Химия, 1972. – 240 с.

278. Трение и износ материалов на основе полимеров [Текст] / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин – Минск.: Наука и техника, 1976. – 432 с.

279. Польцер, Г. Основы трения и изнашивания: Пер. с нем. [Текст] / Г. Польцер, Ф. Майсснер. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.

280. Смуругов, В.А. Фрикционный перенос полимеров и его связь с молекулярными процессами в зоне контакта [Текст] / В.А. Смуругов, В.В. Бирани, А.Б. Купчинов, В.Г. Савкин // Трение и износ. – 1990. – Т.11, №3. – С. 521-525.

281. Мархель, И. Деталі машин [Текст] / И.К. Мархель. - К: Алерта, 2016. – 368 с.

282. Виноградов, В.Н. Абразивное изнашивание [Текст] / В.Н. Виноградов. - М.: Машиностроение, 1990. - 224 с.

283. Ксантос, М. Функциональные наполнители для пластмасс [Текст] / М. Ксантос. - Санкт-Петербург: НОТ, 2010. - 462 с.

284. Колесников, И. В. Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения [Текст]: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук.: 05.02.04 / Колесников И. В. - Ростов-на-Дону, 2016. - 394 с.

285. Справочник по триботехнике: В 3 т. [Текст] / ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.

286. Аулін, В.В. Вплив режимів експлуатації на зношування деталей, виготовлених з полімерно-композитного матеріалу [Текст] / В.В. Аулін, О.Д. Деркач, Д.О. Макаренко, А.В. Гриньків // Проблеми трибології. – 2018. - Т. 90(4). - С. 65-69

287. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник [Текст] / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.

288. Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях [Текст] / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

289. Копей, І.Б. Результати досліджень зношення полімерно-композиційних матеріалів насосних штанг і насосно-компресорних труб [Текст] / І.Б. Копей, С.І. Гладкий // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2008. - № 4(29). - С. 58-62.

290. Сіренко, Г.О. Вплив сталих та динамічних навантажень на процеси зношування, тертя та зміну шорсткості поверхонь полімерних композитів [Текст] / Г.О. Сіренко, В.П. Свідерський, Л.М. Солтис та ін. // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. - Т. 12, № 4. - С. 1050-1065.

291. Дмитриченко, М. Ф. Вплив мастильного середовища і його температурних показників на антифрикційні властивості олив у контакті [Текст] / М. Ф. Дмитриченко, О. М. Білякович, А. М. Савчук та ін. // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2017. - Т. 51. - С. 41-44.

292. Derkach, O.D. Investigation of the influence of fullerene-containing oils on tribotechnical characteristics of metal conjunction [Text] / O. D. Derkach, O. S. Kabat, R. M. Bezus and oth. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. - VOL. 13 (14) – P. 4331-4336.

293. Bakhareva, V. E. Nonmetal antifriction materials for sliding friction units [Text] / V. E. Bakhareva, G. I. Nikolaev, A. V. Anisimov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2012. – Vol. 3, P. 524-533.

<https://doi.org/10.1134/S2075113312060020>

294. Сумарокова, В. В. Разработка и исследование полужидких смазок для тяжело нагруженных узлов трения [Текст]: диссертация кандидата технических наук.: 05.17.07 / Сумарокова, В. В. - Москва, 2006. - 108 с.

295. Хебда, М. Справочник по триботехнике. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения [Текст] / М. Хебда, А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение. – 1990.

296. Кабат, О. С. Термостійкі матеріали триботехнічного призначення на основі фенілону та високодисперсних кремнеземів [Текст]: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.17.06 / Кабат Олег Станіславович. - Дніпропетровськ – 2007 – 24 с.

297. Тимонин, А.С. Машины и аппараты химических производств [Текст] / А.С. Тимонин. - Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2008. - 872 с.

298. Леонтьева, А.И. Оборудование химических производств [Электронный ресурс] : учебное пособие : в 2 ч. / А.И. Леонтьева. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2012. - 232 с.

299. Мікульонок, І. О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв [Текст] / І. О. Мікульонок. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 419 с.

300. Болтон, У. Конструкционные материалы металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты [Текст] / У. Болтон. - М.: Издательский дом “Додэка-XXI”, 2004 – 320 с.

301. Солнцев, Ю.П. Специальные материалы в машиностроении [Текст] / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, В.Ю. Пирайнен. - СПб.: Химиздат, 2004. - 640 с.

302. Арзамасов, Б. Н. Конструкционные материалы: Справочник [Текст] / Б. Н. Арзамасов. - М.: Машиностроение, 1990. - 688 с.

303. <https://www.sabic.com/en/products/specialties/noryl-resins/noryl-gtx-resin> (дата звертання: 20.11.2020).

304. <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/NORYL+GTX%E2%84%A2+Resin+GTX914+--+Europe/SABIC/658/353ea5ce> (дата звертання: 15.11.2020).
305. <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/NORYL+GTX%E2%84%A2+Resin+GTX4610+--+ericas/SABIC/658/b40b14a6/SI?pos=57> (дата звертання: 16.11.2020).
306. <http://www.totalplastics.com/products/438> (дата звертання: 10.11.2020).
307. https://www.onlineplastics.com/high-performance-plastics/torlon-pai-c-1_192_201.html (дата звертання: 17.11.2020)
308. Войнов, К.Н. Трибология и надёжность: Труды XIV Международной конференции [Текст] / К.Н. Войнов. - Санкт-Петербург. – 327 с.
309. Браун, Э. Д. Современная трибология. Итоги и перспективы [Текст] / Э. Д. Браун. - Москва: Изд-во ЛКИ, 2008. - 476 с.
310. Доценко, А.И. Основы триботехники. Учебник. [Текст] / А.И. Доценко, И.А. Буяновский. - М.: Инфра-М, 2014.
311. Sytar, V.I. Effect of graphite content on wear of thermostable graphite-reinforced plastics [Text] / V.I. Sytar, A.I. Burya, M.V. Burmistr and oth. // “World Tribology Congress”. – Washington – 2005. – P.1-2.
312. Kabat, O. Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black [Text] / O. Kabat, V. Sytar, K. Sukhyy // Chemistry & Chemical Technology. - 2018. – VOL. 12 (3). – P. 326-330.
<https://doi.org/10.23939/chcht12.03.326>
313. Tomina, A.-M. Constructional materials based on graphite-filled phenylone. Глава в книге The potential of modern science [Text] / A.-M. Tomina, V. Sytar, A. Burya, E. Belyanovskaya: Из-во Sciemcee Publishing. - Vol. 3. – P. 238-253.

314. Song, H. Low friction and wear properties of carbon nanomaterials in high vacuum environment [Text] / H. Song, J. Chen, N. Jiang and oth. // Tribology International. – 2020. – Vol. 143.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106058>

315. Набережная, О.А. Влияние состава гибридного наполнителя на трибологические свойства композитов на основе фенилона [Text] / О. А. Набережная, А.И. Буря, А.И. Свириденко // Трение и износ. – 2020. - Том 41, № 2. - С. 145-151.

316. <https://www.ftoroplastmsk.ru/reference/composition.jdx> (дата звертання: 29.11.2020)

317. Дудка, А.М. 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

318. Дудка, А.М. 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 та ін. // Вопросы химии и химической технологии. – 2008. – №6. – С.167-170.

319. Кабат, О.С. Полімерні композиційні матеріали для вузлів тертя космічної та авіаційної техніки [Текст] / О.С. Кабат, В.І. Ситар, Д.В. Єрмаченко та ін. // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: збірник наукових праць Дніпровського національного університету ім. О. Гончара. – Дніпро, 2017. – Том XXIII. – С. 40 – 48.

320. Саранчук, В.И. Углерод: неизвестное об известном [Текст] / В.И. Саранчук, М.А. Ильяшов, В.В. Ошовский, Е.В. Саранчук. - Донецк: УК Центр, 2006. - 400 с.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача

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.
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.
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.
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.
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.
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.

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.

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.

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).

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.

11. **Кабат, О. С.** Термостойкие полимерные композиты специального назначения для тяжелонагруженных узлов трения [Текст] / **О. С. Кабат**, В.І. Сытар, А.А. Митрохин // Технологические системы. - 2017. - Т. 2 (79). - С. 25-33.

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.

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.

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>

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). - P. 48-53.

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

DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht12.03.326> (Scopus)

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)

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>

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)

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)

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.

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).

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>.

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). - P. 194-201 DOI: <https://doi.org/10.15421/082021> (Scopus).

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. Hrynkiv, 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>

26. Обґрунтування полімерних матеріалів для використання у конструкціях плугів [Текст] / О.Д. Деркач, **О.С. Кабат**, Д.О. Макаренко, Б.Г. Харченко // Центральноукраїнський 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)

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.

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.

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.

30. **Кабат, О.С.** Полімерний композит для узлов машин и механизмов, работающих при повышении 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.

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”: тези доп. – Ялта, 2009. - С. 53-54.

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.

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.

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”: тези доп. – Ялта, 2010. - С. 130-131.

35. **Кабат, О. С.** Влияния твердости стального контртела на триботехнические свойства пары трения фенилон С2 - сталь 45 [Текст] / **О. С. Кабат, В. И. Ситар** // Матеріали 6 Українсько-польської конференції “Полімери спеціального призначення”: тези доп. – Дніпропетровськ, 2010. - С. 69.

36. **Кабат, О. С.** Композиты на основе ароматического полиамида с увеличенным интервалом температур переработки [Текст] / **О. С. Кабат, В. И. Ситар** // Матеріали 6 Українсько-польської конференції “Полімери спеціального призначення”: тези доп. – Дніпропетровськ, 2010. - С. 70.

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.

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** // Матеріали Всеукраїнської научної конференції с міжнароднім участим “Інженерные средства и методы оптимизации химических производств”: тези доп. – Днепропетровск, 2011. - С. 73-75.

39. Исследование триботехнических свойств полисульфона [Текст] / Буря А.И., Деркач А.Д., **Кабат О.С.**, ЧэньЮгуан, Линь Иньфан // Матеріали тридцять першої міжнародної конференції “Композиционные материалы в промышленности”: тези доп. – Ялта, 2011. - С. 45-48.

40. **Кабат, О.С.** Триботехнические композиты на основе фенилона и кремнеземистых материалов [Текст] / **О.С. Кабат, В.И. Сытар** // Тезисы докладов международной научно-технической конференции “Полимерные композиты и трибология”: тези доп. – Гомель, 2011. - С. 108-109.

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.

42. **Кабат, О.С.** Полимерные композиты на основе феноло-формальдегидной 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.

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.

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.

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.

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

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.

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” (TRM-2016): тези допов. Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні технології одержання та переробки полімерних матеріалів” – Львів, 2016. - С. 28.

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

50. Фенольные пластики конструкционного назначения с высоким уровнем термической стойкости [Текст] / **О.С. Кабат**, О.В. Черваков, Ю.М. Кобельчук, М. В. Адріанова, Ю.А. Суворова // I Всеукраїнська наукова конференція “Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів”: тези доп. – Дніпро, 2017. - С. 4-6.

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.

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.

53. **Кабат, О.С.** Матеріали трибо технічного призначення для важко навантажених 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

ДОДАТОК Б

Приклад програми для визначення математичних залежностей коефіцієнта
неоднорідності полімерних композицій від часу перемішування
та вмісту наповнювача

XY :=	0	10	VZ :=	6.8
	30	10		3.9
	60	10		2.9
	90	10		2.3
	120	10		2.15
	150	10		2.1
	210	10		2.1
	0	20		6.9
	30	20		4.1
	60	20		3.0
	90	20		2.5
	120	20		2.4
	150	20		2.3
	210	20		2.3
	0	30		7.2
	30	30		4.2
	60	30		3.8
	90	30		3.3
	120	30		3.0
	150	30		2.9
	210	30		2.9
	0	50		7.8
	30	50		4.5
	60	50		4.0
	90	50		3.2
	120	50		3.55
	150	50		3.4
	210	50		3.4
	0	70		8.4
	30	70		4.6
	60	70		4.1
	90	70		3.3
	120	70		3.7
	150	70		3.5
	210	70		3.5

$k := 2$

$rs := \text{regress}(XY, VZ, k)$

$$rs = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \\ 2.564 \times 10^{-5} \\ -3.172 \times 10^{-4} \\ 0.045 \\ 5.631 \\ -0.06 \\ 1.988 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

$F(P, V) := \text{interp}\left[rs, XY, VZ, \begin{pmatrix} P \\ V \end{pmatrix}\right]$

$F(10, 90) = 6.574$

$Nterms(nvar, deg) := \frac{(nvar + deg)!}{deg! \cdot nvar!}$

$Nvars := \text{cols}(XY)$

$deg := k$

$Ndata := \text{rows}(XY)$

```

Step(v,Nvar,deg) :=
  for i ∈ 0..deg    if Nvar = 1
    vi,0 ← vi,0 + i
  for i ∈ 0..Nvar - 1  if deg = 1
    vi,i ← vi,i + 1
  otherwise
    inc ← Nterms(Nvar,deg - 1)
    for i ∈ 0..inc - 1
      vi,Nvar-1 ← vi,Nvar-1 + 1
    v ← stack(Step(submatrix(v,0,inc - 1,0,cols(v) - 1),Nvar,deg - 1),Step(submatrix(v,
  v

```

```

COrder(Nvar,deg) :=
  vNterms(Nvar,deg)-1,Nvar-1 ← 0
  Step(v,Nvar,deg)

```

I := COrder(Nvars,deg)

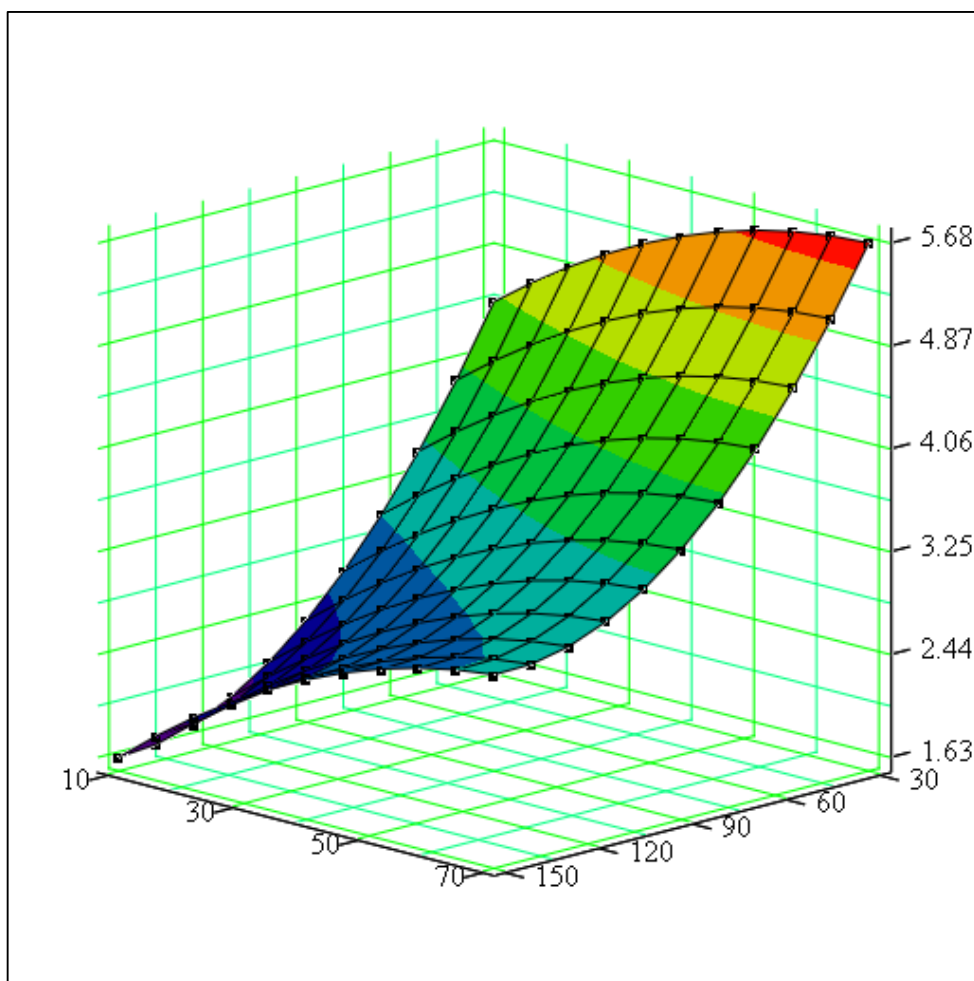
coeffs := submatrix(rs,3,rows(rs) - 1,0,0)

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{coeffs} = \begin{pmatrix} 2.564 \times 10^{-5} \\ -3.172 \times 10^{-4} \\ 0.045 \\ 5.631 \\ -0.06 \\ 1.988 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

$$f(P,V) := \sum_{i=0}^{\text{last}(\text{coeffs})} \left(\text{coeffs}_i \cdot P^{I_{i,0}} \cdot V^{I_{i,1}} \right)$$

$$f(1.5,1.25) = 5.599$$



F

ДОДАТОК В

Приклад програми для визначення математичних залежностей коефіцієнта
тертя ПКМ від навантаження та швидкості ковзання при фрикційній
взаємодії із сталлю

VZ :=	0.294	XY :=	0.5	0.5
	0.3		0.5	0.75
	0.32		0.5	1.0
	0.33		0.5	1.25
	0.28		0.75	0.5
	0.285		0.75	0.75
	0.294		0.75	1.0
	0.3		0.75	1.25
	0.27		1.0	0.5
	0.278		1.0	0.75
	0.283		1.0	1.0
	0.289		1.0	1.25
	0.267		1.25	0.5
	0.274		1.25	0.75
	0.277		1.25	1.0
	0.28		1.25	1.25
	0.265		1.5	0.5
	0.272		1.5	0.75
	0.275		1.5	1.0
	0.279		1.5	1.25
	0.269		1.75	0.5
	0.277		1.75	0.75
	0.284		1.75	1.0
	0.294		1.75	1.25

$k := 2$

$rs := \text{regress}(XY, VZ, k)$

$$rs = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \\ -0.015 \\ -1.333 \times 10^{-3} \\ 0.047 \\ 0.327 \\ -0.126 \\ 0.051 \end{pmatrix}$$

$F(P, V) := \text{interp}\left[rs, XY, VZ, \begin{pmatrix} P \\ V \end{pmatrix}\right]$

$F(0.5, 0.5) = 0.296$

$Nterms(nvar, deg) := \frac{(nvar + deg)!}{deg! \cdot nvar!}$

$Nvars := \text{cols}(XY)$

$deg := k$

$Ndata := \text{rows}(XY)$

```

Step(v,Nvar,deg) :=
  for i ∈ 0..deg    if Nvar = 1
    vi,0 ← vi,0 + i
  for i ∈ 0..Nvar - 1  if deg = 1
    vi,i ← vi,i + 1
  otherwise
    inc ← Nterms(Nvar,deg - 1)
    for i ∈ 0..inc - 1
      vi,Nvar-1 ← vi,Nvar-1 + 1
    v ← stack(Step(submatrix(v,0,inc - 1,0,cols(v) - 1),Nvar,d
  v

```

```

COrder(Nvar,deg) :=
  vNterms(Nvar,deg)-1,Nvar-1 ← 0
  Step(v,Nvar,deg)

```

I := COrder(Nvars,deg)

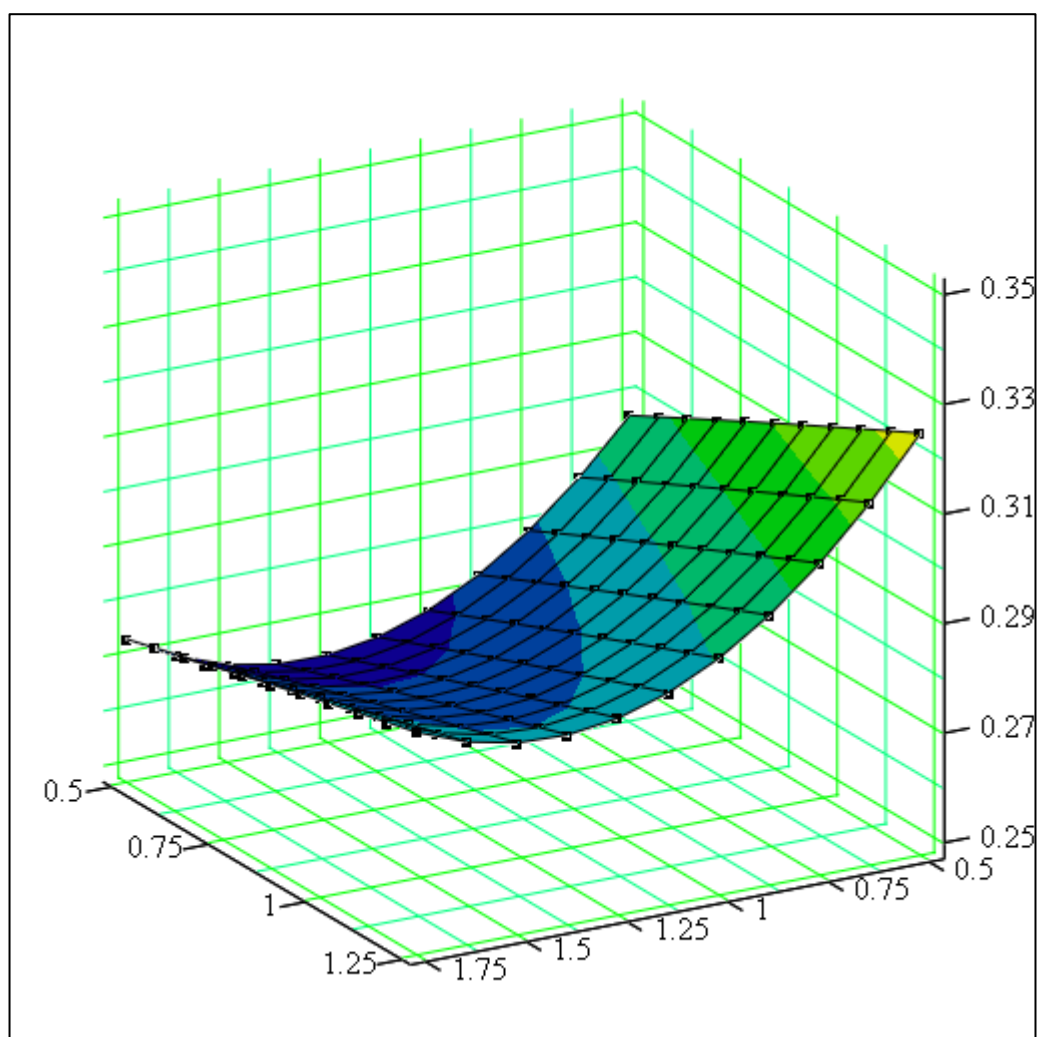
coeffs := submatrix(rs,3,rows(rs) - 1,0,0)

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{coeffs} = \begin{pmatrix} -0.015 \\ -1.333 \times 10^{-3} \\ 0.047 \\ 0.327 \\ -0.126 \\ 0.051 \end{pmatrix}$$

$$f(P,V) := \sum_{i=0}^{\text{last}(\text{coeffs})} \left(\text{coeffs}_i \cdot P^{I_{i,0}} \cdot V^{I_{i,1}} \right)$$

$$f(1.5,1.25) = 0.282$$



F

ДОДАТОК Г



Затверджую

директор ТОВ "Т КОРП ГРУП"

Косіук І.В.

А К Т

про впровадження матеріалів і технологій, наукових положень і висновків
докторської дисертації Кабат Олега Станіславовича

Підприємство ТОВ "Т КОРП ГРУП" засновано в лютому 2015 р. Основний вид діяльності підприємства – виробництво емульсій та суспензій технічного призначення. На підприємстві присутнє технологічне обладнання, необхідне для повного технологічного циклу цього виробництва (апарати з механічними перемішувальними пристроями, ємності, насоси, компресори та інш.).

В період з 2017 по 2019 р. доцентом кафедри машинобудування та інженерної механіки ДВНЗ "Український державний хіміко-технологічний університет" Кабат О. С. сумісно з представниками підприємства ТОВ "Т КОРП ГРУП" були проведені промислові дослідження деталей вузлів тертя та герметизації консольного валу якірних мішалок лінії по виробництву емульсій технічного призначення, які виготовлені із розроблених Кабат О. С. полімерних композиційних матеріалів на основі ароматичного поліаміду і фторопласту, які наповнені графітом та діоксидом кремнію.

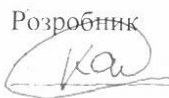
Відповідно до результатів досліджень встановили, що деталі з розробленого матеріалу працювали у вузлах тертя та герметизації консольного валу якірних мішалок впродовж 22 місяців, створюючи при цьому необхідний рівень герметизації апарата та працюючи без відмов. Відповідно до технічного паспорту на механічну мішалку стандартні деталі (що постачаються разом із мішалкою) повинні замінюватися 1 раз кожні 6 місяців. Тобто використання деталей з розроблених Кабат О.С. матеріалів

дозволяє збільшити загальну довговічність роботи вузлів тертя та герметизації консольного валу якірної мішалки у 3,7 разів. Завдяки цьому вдалося зменшити кількість планово-попереджувальних ремонтів, час простою обладнання та витрати на придбання ремонтних ЗИПів у постачальника обладнання.

Очікуваний економічний ефект від впровадження матеріалів і технологій, наукових положень і висновків докторської дисертації Кабат Олега Станіславовича склав 21 тис. гривень за рік на одну одиницю обладнання.

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових вимог.

Представник ДВНЗ "Український
державний хіміко-технологічний
університет"

Розробник
 О.С. Кабат

Представники ТОВ "Т КОРП ГРУП"

Провідний інженер

 А.В. Бельский

Головний бухгалтер

 Л.В. Кравець



ДОДАТОК Д

Затверджую

Зам. директора ДД, "Кодацьке-Агро"

А К Т

про впровадження матеріалів і технологій, наукових положень і висновків
докторської дисертації Кабат Олега Станіславовича

Даним актом підтверджується те, що агрофірма ТОВ «Кодацьке-Агро» з березня 2016 по березень 2019 р. спільно з доцентом кафедри машинобудування та інженерної механіки ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» проводили випробування деталей із розробленого Кабат О.С. полімерного композиційного матеріалу у вузлах тертя посівного комплексу ТОВ «Кодацьке-Агро». Даний агрегат має 25 посівних лап, які являють собою важільну систему для копіювання нерівностей ґрунту. На кожному посівну лапу припадає 40 рухомих з'єднань. Тобто на весь посівний комплекс припадає до 400 вузлів тертя. В цих вузлах використовуються деталі з полімерного композиційного матеріалу УПА 6-30 (ТУ 6-12-31-654-89). Середній строк служби даних вузлів залежить від наробітку посівного комплексу і становить 10000 га. В умовах агрофірми ТОВ «Кодацьке-Агро» посівний комплекс отримує такий наробіток в продовж 2 років. Тобто кожні 2 роки відбувається його плановий ремонт, що передбачає обслуговування вузлів тертя, при якому відбувається заміна всіх полімерних деталей на нові. Кошторис даного ремонту складає від 90 до 100 тис. гривень. Тому підвищення надійності та довговічності вузлів тертя

посівного комплексу є актуальною задачею, вирішення якої дозволить заощадити кошти на планові ремонти. Кабат О.С. запропонував використовувати запропонований Кабат О.С. матеріал для виготовлення вузлів тертя в лапах посівного комплексу розроблених їм матеріалів на основі ароматичного поліаміду. Відповідно до лабораторних досліджень ці матеріали по фізико-механічних, теплофізичних та триботехнічних властивостях значно переважають матеріал УПА 6-30, але коштують на 20% більше.

Заміна деталей з УПА 6-30 на запропонований Кабат О.С. матеріал дозволила підвищити довговічність роботи вузлів тертя посівного комплексу. Так при їх розбиранні в період поточного ремонту (після 2 років роботи) на деталях з УПА 6-30 спостерігаються сколи та подряпини, які є наслідком початку їх аварійного зношування, що може призвести до руйнування та заклинювання вузлів тертя. Тому їх було замінено на нові. А деталі із запропонованого матеріалу не мають таких пошкоджень і залишають працювати у вузлах тертя. Наступне розбирання посівного комплексу відбулося через 1 рік, і встановлено, що деталі із запропонованого Кабат О.С. матеріалу не мають суттєвих пошкоджень на поверхні, однак їх розмір вже не відповідає необхідним параметрам, тобто вони потребують заміни.

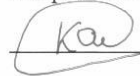
Відповідно до проведених промислових досліджень встановили, що деталі на основі ароматичного поліаміду зберігають свою працездатність на 1 рік більше ніж стандартні із матеріалу УПА 6-30, що дозволяє робити капітальний ремонт з їх заміною не кожні 2 роки, а один раз на 3 роки. Це дозволить заощадити витрати на 2 ремонта посівного комплексу за період його експлуатації впродовж 12 років.

Економічний ефект від впровадження деталей з матеріалів на основі ароматичного поліаміду, розроблених Кабат О.С. у вузли тертя лап посівного комплексу складає 150 тис. грн. (за період експлуатації агрегату 12 років).

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових вимог.

Представник ДВНЗ "Український
державний хіміко-технологічний
університет"

Розробник



О.С. Кабат

Представники агрофірми ТОВ
«Кодацьке-Агро»



О.О. Кодачук "Агро"



ДОДАТОК Ж

Затверджую

Голова правління, генеральний

директор НПП Союз-Композит

Шаповал Олександр Миколайович

А К Т

випробувань деталей із полімерних композиційних матеріалів на основі
ароматичних поліамідів та фторполімерів в якості підшипників
ковзання сільськогосподарської техніки

Розроблені Кабат Олегом Станіславовичем полімерні композиційні матеріали були використані в якості матеріалів для створення підшипників ковзання рухомих з'єднань висівних секцій широкозахватних посівних машин і стоек культиваторних лап культиваторів із стрілчастими лапами під час планової модернізації цих сільськогосподарських знарядь.

Для широкозахватних посівних машин відбувалася повна реконструкція і модернізація вузлів маятникових і паралелограмних важелів з використанням деталей із розроблених Кабат Олегом Станіславовичем матеріалів.

Вузли тертя висівних секцій посівної машини відповідно до паспорта на її обслуговування повинні підлягати змащуванню кожні 500 га наробітку. Внаслідок того, що ця машина має біля 400 штук рухомих з'єднань, то процедура їх змащування займає до 4 годин робочого часу під час яких машина зупиняється. Що є негативним фактором при посівних роботах, так як розтягнення їх у часі може суттєво вплинути на рівномірність сходження рослин і їх подальший розвиток відповідно до технологічних карт на вирощування. Деталі із розроблених Кабат Олегом Станіславовичем полімерних композиційних матеріалів не потребують змащування при фрикційній взаємодії із сталлю. І тому за рахунок цього вдалося значно

спростити технологію обслуговування широкозахватних посівних машин завдяки відмові від змашування її рухомих з'єднань. При цьому довговічність роботи рухомих з'єднань широкозахватної посівної машини збільшилася з 2000 до 6000 га наробітку.

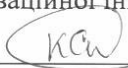
Для стійок культиваторних лап культиваторів із стрілочастими лапами була проведена заміна підшипника ковзання механізму демпфування стрілочасті лапи на аналогічний по конструкції виготовлений із розробленого Кабат Олегом Станіславовичем полімерного композиційного матеріалу.

Це дозволило підвищити надійність та продуктивність роботи культиватора при високому рівні навантажень, який обумовлений глибокою культивацією та використанням знаряддя на “важких” ґрунтах. Збільшення цих параметрів відбулося завдяки усуненню явища наклепу на поверхні металевих втулок рухомих з'єднань культиватора. Що, у свою чергу, дозволило зменшити люфти у парах тертя знаряддя, які призводять до їх радіального биття та передчасного аварійного зношування. Використання підшипників ковзання із розроблених Кабат Олегом Станіславовичем полімерних композиційних матеріалів дозволило збільшити довговічність роботи механізму демпфування стрілочасті лапи культиватора у 4-5 разів у порівнянні з немодернізованою моделлю.

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових вимог.

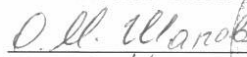
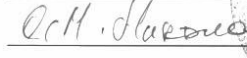
Представник ДВНЗ “Український
державний хіміко-технологічний
університет”

Розробник, доцент кафедри
інноваційної інженерії

 О.С. Кабат

Представники

“НПП Союз-Композит”


ДОДАТОК К

ВИРОБНИЦТВО СТАНДАРТНИХ ТА ЕКСКЛЮЗИВНИХ ВИРОБІВ ІЗ ФТОРОПЛАСТУ

Затверджую

Директор ТОВ «Хімпостач Дніпро»

Половко Андрій Анатолійович

А К Т

випробувань напрямних втулок з полімерних композиційних матеріалів на основі ароматичного поліаміду в рухомій траверсі гідравлічного пресу (ПА-63) для переробки полімерів

ТОВ «Хімпостач Дніпро» засновано 10 квітня 2017 р. і вже більше 3 років займається виробництвом деталей із фторполімерів та полімерних композиційних матеріалів на їх основі. На підприємстві присутнє технологічне обладнання, необхідне для повного технологічного циклу цього виробництва (механічні та пневматичні мішалки, гідравлічні преса, муфельні печі та інш.).

В період з 2018 по 2019 р. доцентом кафедри машинобудування та інженерної механіки ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний університет” Кабат О. С. сумісно з представниками підприємства ТОВ «Хімпостач Дніпро» були проведені промислові випробування роботи напрямних втулок в рухомій траверсі гідравлічного пресу “ПА-63” для переробки полімерів.

У вихідному вигляді вони виготовляються із бронзи марки БрАЖ 9-4 і потребують постійного змащування консистентними змащувальними матеріалами. При недостатньому змащуванні сильно підвищується вірогідність заклинювання вузла тертя напрямна втулка-колона, що призводить до виходу пресу з ладу за рахунок зупинки його рухомої траверси. Кабат О.С. було запропоновано виготовляти ці втулки з полімерного композиційного матеріалу на основі ароматичного поліаміду. Деталі вузлів тертя з цього матеріалу можуть працювати при навантаженнях до 1,5 МПа та швидкостях ковзання 1,5 м/с і забезпечують надійну та довговічну роботу вузлів тертя, що працюють із та без змащування. Слід відмітити, що заклинювання вузлів з цими матеріалами менш вірогі-

ВИРОБНИЦТВО СТАНДАРТНИХ ТА ЕКСКЛЮЗИВНИХ ВИРОБІВ ІЗ ФТОРОПЛАСТУ

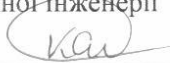
дне ніж при використанні бронзи внаслідок того, що вони мають кращий рівень трибологічних властивостей при терті по сталі.

При заміні втулок з бронзових на запропонований полімерний композиційний матеріал встановили, що вони зберігають високий рівень працездатності впродовж періоду дослідження з 2018 по 2019 р. Причому не потребують постійного змащування (проводили тільки при встановленні цих втулок), на відміну від бронзових, які необхідно змащувати при кожному малому ремонті при проведенні планово-попереджувального обслуговування преса. Що дозволило зекономити на змащувально-мастильних матеріалах не зменшуючи при цьому високий рівень надійності та довговічність вузлів тертя в рухомій траверсі гідравлічного пресу.

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових вимог.

Представник ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний університет”

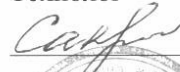
Розробник, доцент кафедри інноваційної інженерії



О.С. Кабат

Представники ТОВ «Хімпостач Дніпро»

Технолог



Сакно Р.Е.

Директор



Половко А.А.

ДОДАТОК Л

УКРАЇНА
 ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«Інтер Авіа Інвест»
 49017 м. Дніпро, вул. Мечнікова, 19, оф. 702.

Затверджую

Генеральний директор
 ТОВ «Інтер Авіа Інвест»
 Жигалкевич А.Ю.



А К Т

випробувань накладок з полімерних композиційних матеріалів на основі
 фторопласту 4 на напрямні ковзання рухомого стола шліфувального верстату
 ОШ 143

ТОВ «Інтер Івіа Інвест» засновано у 2006 р. і вже більше 14 років
 займається виробництвом деталей із фторполімерів та полімерних
 композиційних матеріалів на їх основі. На підприємстві присутнє технологічне
 обладнання, необхідне для повного технологічного циклу цього виробництва.

В період з 2017 по 2020 р. доцентом кафедри машинобудування та
 інженерної механіки ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний
 університет” Кабат О. С. сумісно з представниками підприємства ТОВ «Інтер
 Авіа Інвест» були проведені промислові випробування роботи накладок з
 полімерних композиційних матеріалів на основі фторопласту 4 на напрямні
 ковзання рухомого стола шліфувального верстату ОШ 143.

У вихідному вигляді напрямні втулки виготовляються із антифрикційної
 бронзи і потребують постійного змащування мастилом. Що забруднює поверхні
 тертя і призводить до налипання на них твердих абразивних частинок з
 шліфувального круга з подальшим інтенсивним абразивним зношуванням вузла
 тертя. Кабат О.С. було запропоновано використання накладок на напрямні
 ковзання з полімерних композиційних матеріалів на основі фторопласту 4,

силікагелю та графіту, які можуть працювати у вузлах тертя без змащування, забезпечуючи при цьому високий рівень його надійності та довговічності. Використання даних накладок практично унеможливило абразивне зношування напрямних ковзання за рахунок того, що дрібні абразивні частинки практично не налипають на напрямні ковзання рухомого стола шліфувального верстату і досить легко з них видаляються.

Використання накладок з розробленого полімерного композиційного матеріалу замість бронзових в період з 2018 по 2020 р. дозволило значно зменшити зношування напрямних ковзання рухомого стола шліфувального верстату. За рахунок чого відпала необхідність в проведенні їх відновлюваного ремонту, який за графіком ППР (планово попереджувальних ремонтів) проводиться 1 раз на рік. Тобто вдалося зекономити кошти які витрачаються на проведення двох ППР (за період з 2018-2020) і зменшити простоювання обладнання на період цих ремонтів.

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових вимог.

Представник ДВНЗ “Український
державний хіміко-технологічний
університет”

Розробник, доцент кафедри
інноваційної інженерії

 О.С. Кабат

Представники

ТОВ «Інтер Івіа Інвест»

Головний технолог

Начальник цеху



Попов А.В.

Лакша В.В.

