УДК 678.046:621.893

Д.В. Козирко, В.І. Ситар, В.С. Молоков, А.О. Назаренко, Ю.О. Кудрявцев

ВПЛИВ КРЕМНІЙОРГАНІЧНОГО МОДИФІКАТОРА НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФІТОНАПОВНЕНОГО ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТУ НА ОСНОВІ АРОМАТИЧНОГО ПОЛІАМІДУ

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна

Досліджено вплив полідиметилсилоксану на технологічні, механічні та триботехнічні властивості композиційних матеріалів, сформованих на основі графітонаповненого ароматичного поліаміду. Розглянуто можливості керування експлуатаційними характеристиками композитів в умовах підвищених навантажень і температур. Показано, що властивості полімерів визначаються не лише хімічним складом, але й структурною організацією макромолекул і міжмолекулярними взаємодіями. Доведено, що модифікація графітонаповненого ароматичного поліаміду полідиметилсилоксаном сприяє зниженню в'язкості розплаву майже на порядок та розширенню температурного інтервалу переробки прес-матеріалу від +5^{0}C до +15^{0}C. Наповнення композиції графітом значно впливає на покращення антифрикційних властивостей одержаного матеріалу завдяки утворенню твердої мастильної плівки на поверхні контртіла. Це призводить до зниження коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування у десятки разів, особливо в умовах тертя без змащування, однак водночас збільшується крихкість матеріалу. Введення кремнійорганічного модифікатора сприяє підвищенню як показників міцності, так і антифрикційних характеристик графітонаповненого ароматичного поліаміду. Раціональна масова частка полідиметилсилоксану у складі композиційного матеріалу становить не вище 3%. Перевищення даної концентрації призводить до утворення фазової неоднорідності та різкого погіршення експлуатаційних характеристик. Визначена оптимальна полімерна система на основі ароматичного поліаміду з масовою концентрацією графіту 20% та полідиметилсилоксану 2%, яка має високі триботехнічні характеристики та показники міцності при температурах до 250^{0}C, що підтверджує ефективність модифікації та перспективність застосування розроблених композитів у важких умовах експлуатації.

Ключові слова: ароматичний поліамід, полідиметилсилоксан, графіт, полімерні композиції, в'язкість розплаву, теплостійкість, антифрикційні властивості.

DOI: 10.32434/0321-4095-2026-168-5-150-156

Вступ

Сучасна промисловість висуває високі вимоги до конструкційних матеріалів, які повинні поєднувати експлуатаційні властивості з технологічністю переробки. У цьому контексті актуальним є створення полімерів із керованими характеристиками.

Особливу увагу привертають ароматичні поліаміди («Номекс», «Кевлар», «Терлон», «Фенілон»), які характеризуються високою міцністю, тепло-

© Д.В. Козирко, В.І. Ситар, В.С. Молоков, А.О. Назаренко, Ю.О. Кудрявцев, 2026

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

D.V. Kozyrko, V.I. Sytar, V.S. Molokov, A.O. Nazarenko, Yu.O. Kudryavtsev

стійкістю та хімічною стійкістю [1]. Фенілон (полі-м-п-феніленізофталамід) відрізняється можливістю переробки у вироби з розплавленого стану [2]. Водночас цей процес ускладнюється високою в'язкістю розплаву та вузьким інтервалом температур переробки.

Властивості полімерних матеріалів визначаються не лише їхньою хімічною природою, а й особливостями будови макромолекул [3]. Модифікація структури дозволяє регулювати механічні та теплові характеристики, однак високий ступінь жорсткості макромолекул ароматичних поліамідів і сильні міжмолекулярні взаємодії обмежують технологічні можливості переробки [4]. Підвищення гнучкості макромолекул можливе, зокрема, шляхом введення структурних «містків» [5].

Ефективним способом покращення характеристик полімерних систем є введення функціональних наповнювачів. Зокрема, використання графіту дозволяє суттєво підвищити зносостійкість і покращити антифрикційні властивості матеріалів завдяки здатності композиту формувати на поверхні тертя захисні плівки [6]. Проте такий підхід супроводжується зниженням показників міцності, що обумовлено слабкою адгезією між компонентами композиції та обмеженням сегментальної рухомості ланцюгів полімерної матриці [7].

У подібних умовах доцільно застосовувати модифікатори, які здатні змінювати міжмолекулярну взаємодію. Перспективними є кремнійорганічні сполуки, зокрема олігодиметилсилоксани (рис. 1), які сприяють зменшенню внутрішніх напружень і підвищенню експлуатаційних характеристик композицій [8]. Встановлення залежності між складом матеріалу, умовами його переробки та експлуатаційними характеристиками залишається актуальним завданням.

Матеріали та методи досліджень

Як об'єкт дослідження вибраний ароматичний поліамід – фенілон С-2 (ТУ-6-05-221-226-72), що має спрощену структурну формулу:

$$[-NH-C_6H_4(1,3)-NH-CO-C_6H_4(1,3)-CO-]_n. \quad (1)$$

Даний аморфний полімер у вигляді дрібнодисперсного порошку з насипною густиною 200–400 кг/м^3 призначається для одержання виробів з високою міцністю методами прямого пресування та прес-лиття.

Антифрикційним наповнювачем до ароматичного поліаміду обрано графіт ГК-1 дисперсністю до 63 мкм у масовій концентрації до 30%.

Для зниження в'язкості розплаву і підвищення пластичності при переробці у вироби здійснювали модифікацію композиції додаванням полідиметилсилоксанової рідини ПМС-100 у масовій концентрації до 5%.

Зразки для досліджень одержували методом компресійного пресування з комбінованим обігрівом. Контроль і регулювання температури проводили одночасно у декількох місцях прес-форми, у безпосередній близькості до поверхні формувальних порожнин, за допомогою електронного потенціометру КСП-4.

Перед пресуванням композицію брикетували при кімнатній температурі та сушили при 180–200^{0}С, щоб знизити вологість, яка є агентом деструкції ароматичного поліаміду у процесі формування виробів. Тиск брикетування підбирали в залежності від висоти брикету для досягнення густини порядку 400–450 кг/м^3.

Визначення ефективної в'язкості розплаву виконували на капілярному віскозиметрі із завантажувальною камерою діаметром 10 мм, оснащеному капіляром довжиною 10 мм та діаметром 2 мм. Зміщення штока, пропорційне витраті матеріалу, що витікає у приймальну камеру, реєструвалося приладом ДСІ-08 з диференційно трансформаторним датчиком переміщення. Крутний момент створювали набором тягарців загальною масою до 25 кг, що забезпечувало тиск

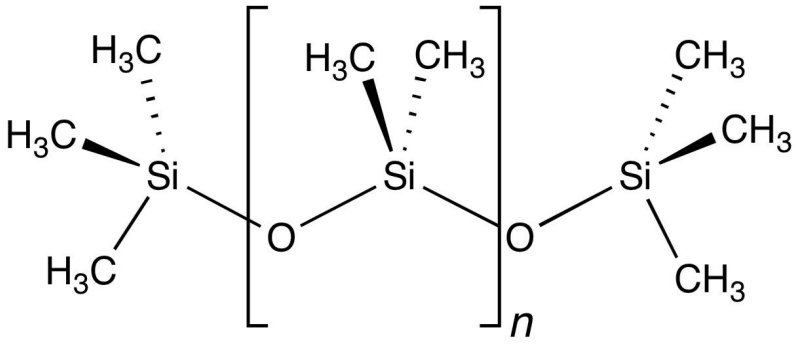


Рис. 1. Структурна формула олігодиметилсилоксану

на розплав до 100 МПа.

Визначення границі міцності при стисканні полягало у визначенні величини сили, при якій відбувається руйнування зразка під час його стискання статичним навантаженням.

Визначення границі міцності при статичному згинанні полягало у визначенні величини руйнівної сили при згинанні стандартного зразка, що вільно лежить на двох опорах, та розрахунку максимального напруження, що виникає у середньому перерізі зразка під дією цієї сили. Для випробувань використовували зразки, що мають розміри 50±1×6±0,2×4±0,2 мм. При випробуванні зразок широкою стороною вільно лежить на опорах, відстань між якими складала 40±0,3 мм.

Ударну в'язкість визначали методом, що полягає у руйнуванні зразка, встановленого горизонтально на двох опорах, ударом поперек. Для випробувань використовували зразки у формі брусків прямокутного перерізу з розмірами 50±1×6±0,2×4±0,2 мм. Випробування проводили за допомогою копра маятникового КМ-0,5.

Метод визначення твердості полягав у вимірюванні сили вдавлювання кульки діаметром 5 мм у випробовуваний матеріал. Для проведення досліджень використовували стандартний прилад моделі 2013 ТШСП.

Визначення теплостійкості за Віка полягало у визначенні температури, за якої циліндричний наконечник, шо знаходиться під постійним навантаженням, вдавлювався у зразок на глибину 1 мм. Випробування проводили на приладі ПТП-І.

Дослідження триботехнічних характеристик полімерних матеріалів проводили на машині тертя СМЦ-2 за схемою диск-колодка. Як диск, що виконує функцію контртіла, застосовували ролик діаметром 50 мм, виготовлений зі сталі 45. Колодку виготовляли із досліджуваної полімерної композиції. Величину моменту тертя фіксували за допомогою електронного потенціометра.

Для наочного представлення, аналізу та встановлення характеру впливу досліджуваних факторів на властивості модифікованого композиту було використано методику тривимірного графічного моделювання у програмному середовищі OriginLab. Побудову тривимірних поверхонь відклику здійснювали на основі матриць дискретних експериментальних даних. Оскільки характер взаємозв'язку між параметрами системи має виражену нелінійність, було застосовано метод сплайн-інтерполяції. Цей алгоритм графічного згладжування дозволив апроксимувати експериментальні точки у суцільні плавно-криволінійні поверхні без задання жорсткої аналітичної форми рівняння регресії. Це забезпечило мінімізацію впливу випадкових відхилень вимірювань та дозволило чітко візуалізувати топографію поверхонь. У результаті кожна поверхня відображає інтегральну залежність досліджуваного показника від одночасної зміни двох незалежних факторів, що дало змогу встановити зони екстремумів та визначити області оптимального складу і технологічних параметрів матеріалу.

Результати та їх обговорення

Ароматичний поліамід відрізняється досить складною технологією переробки у вироби, так як в'язкість розплаву його має значення порядку $6{,}8\cdot10^{-6}$ Па·с, а інтервал температур переробки становить всього $+5^0$C [9]. Введення кремнійорганічного модифікатора призводить до зниження ефективної в'язкості розплаву майже на порядок (рис. 2).

У температурній області нижче 315^0C відбувається значне збільшення в'язкості розплаву, якість отримуваних виробів погіршується, а при температурі вище 345^0C починається термічна деструкція полімерного матеріалу. Тому найбільш доцільним є пресування у температурному діапазоні 315–345^0C. Температурний інтервал переробки розширюється від $+5^0$C до $+15^0$C.

Вибір тиску пресування обумовлений забезпеченням необхідного контакту між розплавленими частинками прес-матеріалу, при якому виходить монолітний виріб з необхідним комплексом властивостей. Для отримання виробів простої форми встановлено питомий тиск на матеріал близько 50 МПа.

Властивості композиційних пластиків на основі ароматичного поліаміду значною мірою визначаються співвідношенням компонентів у по-

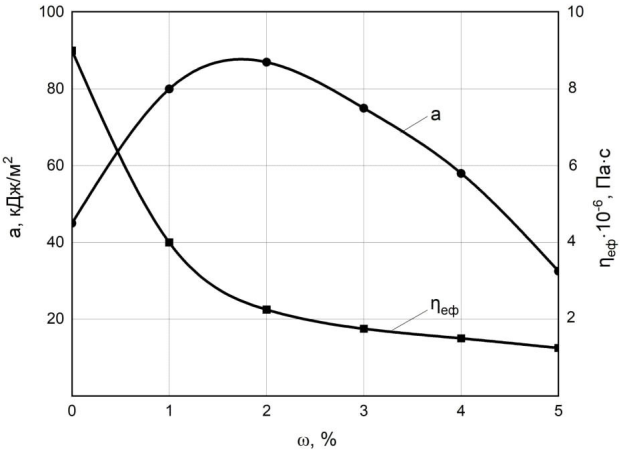


Рис. 2. Залежність ударної в'язкості (а) та ефективної в'язкості розплаву ($\eta_{еф}$) від масової концентрації диметилсилоксану (ω) у графітонаповненому композиті на основі ароматичного поліаміду

лімерній системі. Наповнення графітом забезпечує зниження коефіцієнта тертя і підвищує зносостійкість. Графіт створює тверду мастильну плівку під час тертя, знижує коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування в 40–50 разів, особливо у режимі тертя без змащування. Оптимальні результати досягаються при концентрації графіту 20%. При більшому вмісті спостерігається агрегація частинок і погіршення механічних характеристик композиту.

Введення до складу композиції графіту значною мірою зумовлює поліпшення антифрикційних властивостей, але при цьому, внаслідок обмеження рухливості надмолекулярних структур, збільшується жорсткість і крихкість матеріалів [10]. Зниження внутрішнього напруженого стану полімерної системи досягається тим, що присутність кремнійорганічного модифікатора збільшує рухливість структурних елементів полімеру на межі розділу з твердим наповнювачем, сприяючи полегшенню релаксації напружень, що виникають через відмінності у коефіцієнтах лінійного термічного розширення поліаміду і графіту. Зрештою це призводить до збільшення міцності полімерних систем (рис. 3, 4).

Потрапляючи в зону тертя, несумісний з ароматичним поліамідом кремнійорганічний модифікатор додатково полегшує і сам процес тертя, що призводить до збільшення зносостійкості і зниження коефіцієнта тертя. Тому підвищення показників міцності модифікованих полімерних систем додатково сприяє поліпшенню їх антифрикційних характеристик.

Масова частка модифікатора в графітонаповнених системах на основі ароматичного поліаміду вище 3% не є раціональною, так як при цьому властивості матеріалу починають різко погіршуватися (рис. 5, 6). Це пов'язано з проявом ефекту несумісності компонентів, що призводить до розшарування фаз і появи в системі мікроскопічних дефектів у вигляді крапель несумісної з основою кремнійорганічної рідини.

Кремнійорганічний модифікатор поряд з покращенням міцності досліджуваних полімерних складів не порушує загального механізму тертя та зношування графітонаповненого ароматичного поліаміду, пов'язаного з утворенням на поверхні контртіла плівки, що виконує функцію твердого мастила. Слід зазначити, що досліджувані матеріали мають більш високі антифрикційні властивості в режимі тертя без змащування. Їх використання дозволить збільшити ресурс обладнання, спростити експлуатацію та отримати економію мастильних матеріалів.

При дослідженні властивостей композиційного матеріалу при підвищених температурах встановлено, що полімерна система на основі ароматичного поліаміду із масовою концентрацією графіту 20% та диметилсилоксану 2% зберігає досить стабільні показники інтенсивності зношування, коефіцієнта тертя та твердості в інтервалі температур до 250^{0}C, що дозволяє її віднести до розряду термостійких (рис. 7). При цьому спостерігається кореляція між змінами механічних та

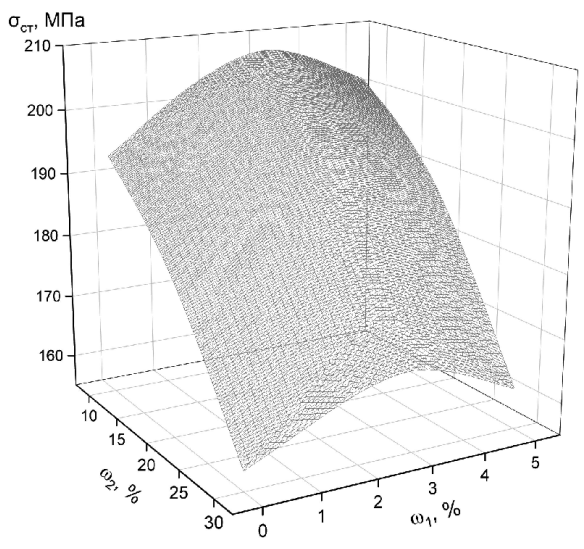


Рис. 3. Залежність міцності при стисканні ($\sigma_{ст}$) від масової концентрації диметилсилоксану (ω_1) та графіту (ω_2) у графітонаповненому композиті на основі ароматичного поліаміду

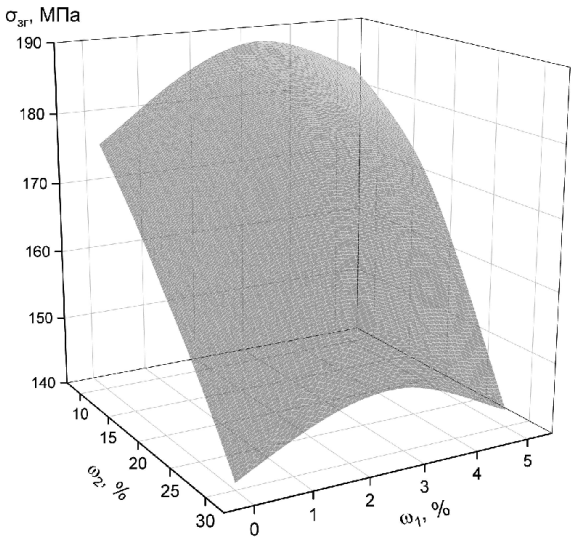


Рис. 4. Залежність міцності при згинанні ($\sigma_{зг}$) від масової концентрації диметилсилоксану (ω_1) та графіту (ω_2) у графітонаповненому композиті на основі ароматичного поліаміду

антифрикційних властивостей.

В інтервалі температур до 150^{0}С спостерігається деяке підвищення твердості матеріалу, зменшення інтенсивності зношування та коефіцієнту тертя. Це пов'язано з десорбцією вологи з об'єму полімерного зразка, що призводить до підвищення його жорсткості та зниження деформаційної здатності. Наявність вологи здійснює позитивний вплив на тертя та зношування вуглецевих матеріалів. У процесі експлуатації ароматичний поліамід схильний до поглинання вологи, що сприяє зменшенню коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування. При підвищенні температури її кількість зменшується, що негативно впливає на антифрикційні показники. У подальшому зі зростанням температури рухомість ланцюгів макромолекул та здатність до деформування полімерного матеріалу збільшується. Істотного значення дані зміни набувають в області температури склування. Тому у даній області температур спостерігається різке збільшення інтенсивності зношування та коефіцієнта тертя при зниженні значень твердості полімерного матеріалу. Це підкреслює важливість контролю температурного режиму при експлуатації розроблених композитів.

Таким чином, завдяки аналізу отриманих експериментальних даних встановлено, що модифікація графітонаповненого фенілону полідиметилсилоксаном сприяє підвищенню технологічності переробки прес-матеріалу, а також покращенню показників міцності і антифрикційних властивостей розроблених полімерних систем.

Висновки

1. Модифікація графітонаповненого фенілону полідиметилсилоксаном зменшує в'язкість розплаву прес-матеріалу майже на порядок та розширює температурний інтервал переробки від +5^{0}С до +15^{0}С, що підвищує технологічність формування виробів.

2. Найбільш сприятливий вплив на комплекс властивостей фенілону надає введення до його складу полідиметилсилоксану у кількості 2%, за якого досягається найбільш ефективне поєднання механічних, деформаційних і антифрикційних властивостей. Перевищення масової концентрації кремнійорганічного модифікатора в матеріалі вище 3% призводить до фазової неоднорідності та різкого погіршення експлуатаційних характеристик.

3. Введення графітового наповнювача до ароматичного поліаміду суттєво покращує триботехнічні характеристики розробленого композиту. Під час тертя графіт утворює тверду мастильну плівку на поверхні контртіла, знижує коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування в 40–50 разів, особливо у режимі тертя без змащування. Оптимальні результати досягаються при концентрації графіту 20%. При більшому вмісті спостерігається агрегація частинок і погіршення механічних характеристик композиційного матеріалу.

4. Визначена оптимальна полімерна система

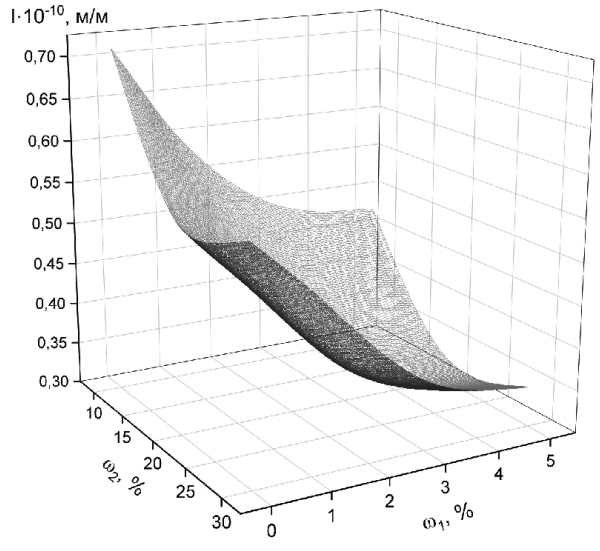


Рис. 5. Залежність інтенсивності зношування (I) від масової концентрації диметилсилоксану (ω_1) та графіту (ω_2) графітонаповненому композиті на основі ароматичного поліаміду

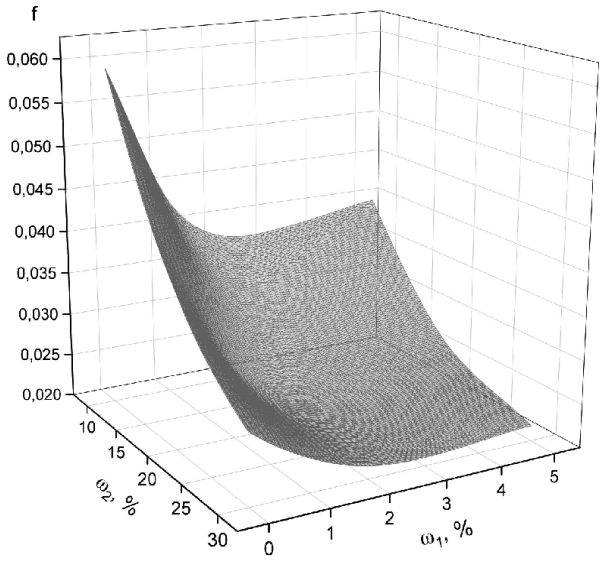


Рис. 6. Залежність коефіцієнту тертя (f) від масової концентрації диметилсилоксану (ω_1) та графіту (ω_2) у графітонаповненому композиті на основі ароматичного поліаміду

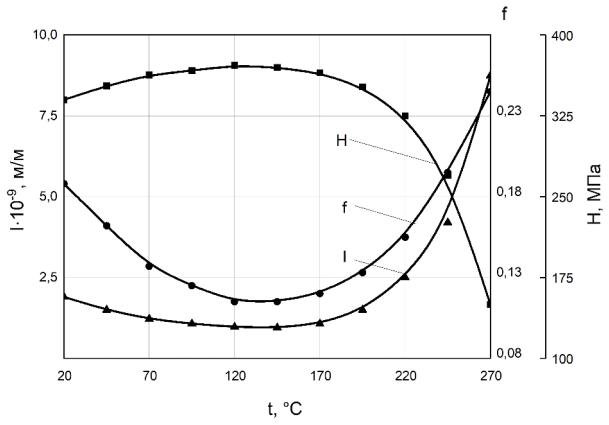


Рис. 7. Залежність коефіцієнта тертя (f), інтенсивності зношування (I) та твердості (H) від температури (t) для полімерної системи складу: ароматичний поліамід+20% графіту+2% ПМС

на основі ароматичного поліаміду з додаванням графіту у концентрації 20% та олігосилоксану у концентрації 2%, яка поєднує високу міцність, термостійкість, низький коефіцієнт тертя та підвищену зносостійкість при температурах до 250^{0}C, що робить її перспективною для вузлів тертя у складних умовах експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Gallini J.* Polyamides, aromatic // Encyclopedia of Polymer Science and Technology. – New York: John Wiley & Sons, 2005. – Vol. 3. – P.558-584.

2. *Kabat O., Boiko Yu.* Polymer-composites based on aromatic polyamide and aramid fiber for heavy-duty friction and sealing units // Chem. Chem. Technol. – 2025. – Vol.19. – No. 2. – P.335-341.

3. *Kabat O., Girin O., Heti K.* Polymer composites based on aromatic polyamide and fillers of spherical and layered structure for friction units of high-performance equipment // Proc. Inst. Mech. Eng. L: J. Mater. Des. Appl. – 2023. – Vol.237. – No. 11. – P.2269-2276.

4. *Квантово-хімічні* та експериментальні дослідження особливостей міжмолекулярних взаємодій у комплексних системах «ароматичний поліамід–арамідне волокно–силікагель» / Токар А.В., Бойко Ю.В., Кабат О.С., Артемов А.О. // J. Chem. Technol. – 2025. – Vol.33. – No. 3. – P.890-900.

5. *Kabat O., Sytar V., Sukhyy K.* Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black // Chem. Chem. Technol. – 2018. – Vol.12. – No. 3. – P.326-330.

6. *Progress* in polydimethylsiloxane-modified waterborne polyurethanes / Ji X., Wang H., Ma X., Hou C., Ma G. // RSC Adv. – 2017. – Vol.7. – P.34086-34095.

7. *High-performance* aromatic polyamides / Garcia J.M., Garcia F.C., Serna F., de la Pena J.L. // Prog. Polym. Sci. – 2010. – Vol.35. – No. 5. – P.623-686.

8. *Vaia R.A., Dudis D., Henes J.* Chain conformation and flexibility of thorny rod polymers // Polymer. – 1998. – Vol.39. – No. 24. – P.6021-6036.

9. *Developing* heat-resistant antifriction phenilone-based coatings with enhanced adhesion characteristics / Sytar V.I., Klimenko A.V., Burmistr M.V., Dudka A.N. // J. Frict. Wear. – 2014. – Vol.35. – No. 3. – P.210-214.

10. *Development* of polymer composite materials for friction elements of conveyor equipment / Sytar V., Kozyrko D., Kabat O., Nazarenko A. // Technology Audit and Production Reserves. – 2025. – Vol.4. – No. 3. – P.26-31.

Надійшла до редакції 29.04.2026
Надійшла після виправлення 28.08.2026
Прийнята до публікації 09.10.2026
Опублікована 28.10.2026

EFFECT OF AN ORGANOSILICON MODIFIER ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A GRAPHITE-FILLED POLYMER COMPOSITE BASED ON AROMATIC POLYAMIDE

D.V. Kozyrko *, V.I. Sytar, V.S. Molokov, A.O. Nazarenko, Yu.O. Kudryavtsev

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

* **e-mail: d.v.kozyrko@ust.edu.ua**

The influence of polydimethylsiloxane on the technological, mechanical and tribotechnical properties of composite materials based on graphite-filled aromatic polyamide has been investigated. The possibilities of controlling the operational characteristics of composites under conditions of elevated loads and temperatures were considered. It is shown that the properties of polymer composites are determined not only by the chemical composition, but also by the structural organization of macromolecules and intermolecular interactions. Modification of a graphite-filled composite based on aromatic polyamide with polydimethylsiloxane contributes to a significant decrease in melt viscosity by almost an order of magnitude and an expansion of the temperature interval for processing the molded material from $+5^0$C to $+15^0$C. It has been established that graphite filling significantly improves the antifriction properties of the composite material due to the formation of a solid lubricating film on the counterbody surface. This leads to a decrease in the coefficient of friction and wear rate by tens of times, especially under dry friction conditions; however, the brittleness of the material increases. The introduction of an organosilicone modifier enhances both the strength characteristics and antifriction properties of the graphite-filled aromatic polyamide. The limit mass concentration of polydimethylsiloxane in the polymer composition is 3%. Exceeding this concentration results in phase inhomogeneity and a sharp deterioration in performance characteristics. An optimal polymer system based on aromatic polyamide containing 20% graphite and 2% polydimethylsiloxane has been determined. This system exhibits high tribological and strength properties at temperatures up to 250^0C, confirming the effectiveness of modification and the prospects of using the developed composites under severe operating conditions.

Keywords: aromatic polyamide; polydimethylsiloxane; graphite; polymer composites; melt viscosity; heat resistance; antifriction properties.

REFERENCES

1. Gallini J. Polyamides, aromatic. In: *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Vol. 3. New York: John Wiley & Sons; 2005. p. 558-584.

2. Kabat O, Boiko Yu. Polymer-composites based on aromatic polyamide and aramid fiber for heavy-duty friction and sealing units. *Chem Chem Technol*. 2025; 19(2): 335-341. doi: 10.23939/chcht19.02.335.

3. Kabat O, Girin O, Heti K. Polymer composites based on aromatic polyamide and fillers of spherical and layered structure for friction units of high-performance equipment. *Proc Inst Mech Eng L J Mater Des Appl*. 2023; 237(11): 2269-2276. doi: 10.1177/14644207231176796.

4. Tokar AV, Boiko YuV, Kabat OS, Artemov AO. Kvantovo-khimichni ta eksperymentalni doslidzhennia osoblyvostei mizhmolekuliarnykh vzaiemodii u kompleksnykh systemakh «aromatychnyi poliamid–aramidne volokno–sylikahel» [Quantum-chemical and experimental studies of the features of intermolecular interactions in complex systems «aromatic polyamide-aramid fiber-silica gel»]. *J Chem Technol*. 2025; 33(3): 890-900. *(in Ukrainian)*. doi: 10.15421/jchemtech.v33i3.337894.

5. Kabat O, Sytar V, Sukhyy K. Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black. *Chem Chem Technol*. 2018; 12(3): 326-330. doi: 10.23939/chcht12.03.326.

6. Ji X, Wang H, Ma X, Hou C, Ma G. Progress in polydimethylsiloxane-modified waterborne polyurethanes. *RSC Adv*. 2017; 7: 34086-34095. doi: 10.1039/c7ra05738e.

7. Garcia JM, Garcia FC, Serna F, de la Pena JL. High-performance aromatic polyamides. *Prog Polym Sci*. 2010; 35(5): 623-686. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2009.09.002.

8. Vaia RA, Dudis D, Henes J. Chain conformation and flexibility of thorny rod polymers. *Polymer*. 1998; 39(24): 6021-6036. doi: 10.1016/S0032-3861(98)00113-X.

9. Sytar VI, Klimenko AV, Burmistr MV, Dudka AN. Developing heat-resistant antifriction phenilone-based coatings with enhanced adhesion characteristics. *J Frict Wear*. 2014; 35: 210-214. doi: 10.3103/S1068366614030155.

10. Sytar V, Kozyrko D, Kabat O, Nazarenko A. Development of polymer composite materials for friction elements of conveyor equipment. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025; 4(3): 26-31. doi: 10.15587/2706-5448.2025.334018.