УДК 678.675
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/40

Поліщук Б. В.
Український державний хіміко-технологічний університет

Мітіна Н. Б.
Український державний хіміко-технологічний університет

ПИТАННЯ ЩОДО РОЗРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

В статті теоретично розглянуто важливе значення термостійких полімерів у різних галузях промисловості, включаючи авіацію, автомобілебудування, електроніку, металургію та нафтохімічну сферу. Унікальна стійкість до високих температур та хімічного впливу робить термостійкі полімери незамінними для багатьох критично важливих застосувань. А саме, використання термостійких полімерів дозволить суттєво знизити коефіцієнт тертя, підвищити зносостійкість та збільшити термін експлуатації вузлів тертя. У статті опрацьовано основні методи розроблення термостійких полімерів, їх властивості, модифікацію та переваги використання в умовах високих температур та інтенсивного тертя. Розглянуто значні переваги термостійких полімерів перед традиційними матеріалами завдяки їх високій термостійкості, хімічній інертності та легкості. Проаналізовано підвищення ефективності та надійності технологічних процесів при використанні термостійких полімерів в різних галузях промисловості, включаючи металургію. Порівняльні дослідження антифрикційних властивостей поліаміда та полікапраміда показали, що перший при меншому значенні коефіцієнта тертя може працювати при значно великих швидкостях та загрузках. З проведеного огляду авторами підтверджено, що в області вивчення та використання термостійких полімерів в якості антифрикційних матеріалів досягнуті значні успіхи, в першу чергу це відноситься до поліамідів, однак мала сировинна база обмежує широке використання цих полімерів. При великих навантаженнях ароматичні поліаміди мають менше коефіцієнт тертя та знос, чим аліфатичні поліаміди, поліформальдегіди, полікарбонати та армовані фенол формальдегідні та епоксидні смоли. Зазначено, що подальші дослідження в розробці полімерних композицій можуть забезпечити розробку ще більш стійких і функціональних матеріалів для промислових потреб, зменшити витрати на обслуговування обладнання, сприятиме підвищенню ефективності та надійності технологічних процесів.

Ключові слова: *термостійкі полімери, полімерна композиція, вузли тертя, зносостійкість деталей, антифрикційні властивості.*

Постановка проблеми. Метали та їх сплави відіграють роль основних матеріалів для вузлів тертя, але в останні роки вони активно витісняються різноманітними полімерними композиційними матеріалами. Сфери застосування полімерів і конструкційних матеріалів на їх основі: машинобудування (зубчасті колеса, підшипники, елементи конструкцій, корпуси механізмів тощо); транспорт (корпуси транспортних засобів, бампери, підшипники); хімічна промисловість (резервуари, труби); будівництво (облицювання, труби водопроводу); електро- і радіопромисловість (ізоляція, плати, корпуси); медицина (трубки, мембрани, корпуси апаратів); побутова техніка. Особливе місце займають конструкційні полімери, що мають підвищену міцність та жорсткість. Найбільш широко вживані полімери називають великотоннажними (поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид, полістирол, поліамід та ін.) – до 90 % від загальної маси вироблюваних полімерів. Зараз усі прикладні роботи направлені на досягнення придатних умов тертя і зношування матеріалів, на усунення патологічних процесів у зоні контакту, на різке зменшення величини зношування [1, 2]. Також, необхідність дослідження зносостійкості деталей машин, технологічного обладнання витікає і з економічних витрат. Однією з найголовніших причин зношувальних відмов є власне зношування рухомих з'єднань машин, так втрати у наслідок зношення і тертя досягають 8 % національного доходу високорозвинених країн.

Прокатні або робочі кліті – основні технологічні машини станів, призначені для деформації металу поміж робочими валками, які найчастіше обертаються в зустрічних напрямках. В багатьох випадках надійність машин, як вказувалось вище визначається довговічністю пар тертя і для більшості видів технологічного обладнання і машин

першорядне значення має підвищення зносостійкості деталей. Композиційні матеріали на основі термостійких полімерів, наповнених порошками та волокнами карбоновими матеріалами, надають таким твердим тілам унікальні властивості [2].

Отже, розробка термостійких полімерів для вузлів тертя прокатних станів є важливим кроком у напрямку розвитку екологічно чистих та ефективних технологій у металургії, інноваційним підходом спрямованим на оптимізацію роботи обладнання в умовах високих температур та інтенсивного тертя, підвищення стійкості вузлів тертя та зменшення впливу агресивних середовищ.

Постановка завдання. Дослідити термостійкі полімери, їх властивості, модифікацію та перспективи використання в умовах високих температур та інтенсивного тертя.

Виклад основного матеріалу. З розвитком промисловості у теперішньому часі характерно широке використання нових полімерних матеріалів. З категорії замінників вони перейшли в категорію повноцінних конструкційних матеріалів. Термостійкі полімери мають високу хімічну інертність, що робить їх ідеальними для застосувань у нафтохімічній промисловості, де матеріали контактують із агресивними речовинами. На відміну від металевих сплавів, полімери мають меншу щільність, що дозволяє знижувати вагу виробів без втрати механічної міцності. За останній період часу створена значна кількість нових полімерів, які використовуються у багатьох інженерних галузях. Термостійкі полімери мають переваги використання у промисловостях зазначених у таблиці 1.

Таблиця 1

Аналіз застосування термостійких полімерів у промисловості

Полімер	Температурна стійкість, °С	Застосування
Поліїміди	400 – 500	Авіація, електроніка
Полісульфони	250 – 300	Фільтри, труби
Поліефіреф іри	300 – 350	Хімічна промисловість
Фторопласти	250 – 350	Антипригарні покриття, медицина
Полімерні композити	300 – 450	Металургія, теплоізоляція

Найбільша частка застосування термостійких полімерів в авіаційній та космічній галузі складає 30 %, електронній 25 %, автомобільній 20 % та хімічній 15 % (рис. 1). Основна здатність термостійких полімерів – зберігати механічні та хімічні властивості при високих температурах (до 400 °С і вище), що дозволяє використовувати їх у критично важливих деталях, таких як авіаційні двигуни або ізоляція електронних пристроїв.

Використання полімерів як термостійких матеріалів сприяє підвищенню надійності та довговічності машин і у ряду випадків дозволяє спростити конструкцію та технологію вузлів тертя. Такі важливі фізико – механічні властивості полімерів як висока механічна міцність, стійкість проти задирок при обмеженій подачі мастила, здатність поглинати вібрації та ударні навантаження обумовлюють інтенсивне використання пластмас в якості підшипникових матеріалів. Низький коефіцієнт тертя, висока зносостійкість, здатність

Рис. 1. Використання термостійких полімерів у промисловості України

працювати без мастила, нечутливість до короткочасних перевантажень та ударів, швидка пропрацьованість, здатність працювати в абразивному середовищі – все це вигідно відрізняє полімери від існуючих антифрикційних сплавів.

Методи розроблення термостійких полімерів поліконденсаційний синтез, радикальна полімеризація, модифікація полімерів. Поліконденсація є одним із основних методів отримання термостійких полімерів. У процесі цього методу утворюються високомолекулярні сполуки шляхом конденсаційних реакцій між функціональними групами мономерів, зокрема поліміди, поліефіреф іри та фенолформальдегідні смоли. Радикальна полімеризація дозволяє отримувати полімери з високою термостійкістю, наприклад, поліакрилати та поліметакрилати. Цей метод включає ініціацію, ріст та термінацію полімерних ланцюгів у присутності каталізаторів та ініціаторів. Сучасні дослідження спрямовані на підвищення термостійкості полімерів шляхом хімічної модифікації вихідних полімерних матеріалів. До таких методів належать введення термостійких груп у структуру полімерів або створення композитів із термостійкими наповнювачами. У зв'язку з цим одним з основних напрямів хімії полімерних матеріалів є створення термостійких полімерів, що здатні витримувати тривалий час впливу високих температур без помітного погіршення властивостей їх міцності. Так, для розробки термостійких композицій, працюючих у зонах високих температур застосовують поліамід. Поліаміди – це тверді термопластичні полімери блідо-жовтого кольору з високою температурою плавлення. Застосовують їх у ракетній техніці як високоміцні матеріали. До поліамідів належать групи синтетичних полімерів, в основний ланцюг макромолекул яких, крім атомів вуглецю, входить група (—NH—CO—), яку називають амідною. Поліаміди одержують за реакціями поліконденсації складних органічних сполук. Будова макромолекул різних поліамідів характеризується наявністю в ланцюзі амідних угруповань, що чергуються з метиленовими групами атомів. Залежно від відносного вмісту в макромолекулах полімеру амідних і метиленових угруповань утворюються речовини, що загалом подібні за своїми фізико-механічними і хімічними властивостями, але дещо різняться між собою за величиною показників, які визначають властивості полімеру. Чим більше метиленових груп, тим нижча температура плавлення поліаміду. Крім того, поліаміди з непарним числом CH_2 груп у ланці мають нижчу температуру плавлення, ніж з парним. Це пояснюють зигзагоподібною будовою ланцюга поліамідів, внаслідок чого за непарного числа CH_2 груп лише половина загального числа NH-груп здатна утворювати водневі зв'язки з групами C═O сусідніх ланцюгів, що підвищує температуру плавлення полімеру. Залежно від симетрії ланок і регулярності їхнього розташування поліаміди можуть мати аморфну і кристалічну структури (ступінь кристалічності деяких поліамідів досягає 40–60 %).

Відмітними властивостями поліамідів є їх здатність при продавлюванні в розплавленому стані крізь філь'єри діаметром близько 0,06–0,1 мм утворювати волокна, які мають надзвичайно високу міцність на розрив (до 6,3 ГПа), високу еластичність, великий коефіцієнт подовження, високу стійкість до зношування, стирання. Основні термостійкі полімери, зокрема для антифрикційних застосувань політетрафторетилен (PTFE, тефлон), поліефіреф іркетон (PEEK), поліфеніленсульфід (PPS), поліаміди (PA). Політетрафторетилен є одним з найпоширеніших антифрикційних матеріалів завдяки його надзвичайно низькому коефіцієнту тертя (0,04–0,1), термостійкості (до +260 °C) і високій хімічній стійкості. Використовується в підшипниках, ущільненнях, направляючих та інших вузлах тертя. Поліефіреф іркетон демонструє високу термостійкість (до +250 °C), міцність і стійкість до зношування. Використовується в підшипниках, втулках, поршневих кільцях, деталях насосів та компресорів. Поліфеніленсульфід характеризується стійкістю температур (до +200 °C), гарною хімічною інертністю та високою жорсткістю. Застосовується у вузлах з високими навантаженнями, таких як деталі клапанів і насосів [4]. Поліаміди одержують за реакціями поліконденсації складних органічних сполук. Залежно від відносного вмісту в макромолекулах полімеру амідних і метиленових угруповань утворюються речовини, що загалом подібні за своїми фізико-механічними і хімічними властивостями, але дещо різняться між собою за величиною показників, які визначають властивості полімеру. Поліаміди, зокрема нейлон-6,6, демонструють помірну термостійкість (до +120 °C) і гарну зносостійкість. Використовуються у зубчастих передачах, втулках, підшипниках ковзання [3]. Порівняльні дослідження антифрикційних властивостей поліаміда та полікапраміда показали, що перший при меншому значенні коефіцієнта тертя може працювати при значно великих швидкостях та загрузках. Приміром, при швидкості ковзання 5 м/с. та тиску 100 кг/см^2, коефіцієнт тертя дорівнює 0,017, а для

полікапраміду граничні значення тиску та швидкості відповідно дорівнюють 50 кг/см^2 та 3 м/с [2, 5]. Найлон та політетрафторетилен також значно поступаються у зносостійкості поліамідам. Вченими вивченню конструкційні властивості поліамідів та використанню їх у промисловості приділяється багато уваги [7, 8].

Поліаміди, що наповнені політетерафторетиленом та графітом з успіхом використовуються для виготовлення підшипників ковзання та ущільнення, які можуть експлуатуватися без мастила при температурі до 370 °С. При роботі у вакуумі та у середовищі інертних газів, наповнені поліаміди зберігають добрі антифрикційні характеристики до температури 598 °С. Термостійкі полімери, такі як поліефіреферкетон, поліфеніленсульфід та модифіковані поліаміди, продемонстрували ефективність у підшипниках і ущільненнях прокатних станів, що дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування та підвищити довговічність обладнання [6].

Незважаючи на високі фізико – механічні та конструкційні властивості ароматичних поліамідів, виробництво їх невелике, у зв'язку з технологічними труднощами при синтезі з обмеженою сировинною базою. Ароматичні поліаміди є продуктом поліконденсації ароматичних діамінів та ароматичних дикарбонових кислот (або їх похідних). Високі фізико – механічні властивості та термостійкість ароматичних поліамідів у поєднанні з практично неорганічною сировинною базою відкривають великі можливості широкого використання цих матеріалів [7]. У зв'язку з цим вивчення властивостей ароматичних поліамідів присвячено багато робіт як в Україні так і за кордоном. Ароматичні поліаміди можуть бути перероблені в усі види технічних полімерних матеріалів: плівку, волокно та пластмасу. Ці полімери значно перевищують за міцними властивостями аліфатичних поліамідів, широко використовуються в якості антифрикційних матеріалів. Ароматичні поліаміди – це в основному безбарвні високоплавкі кристалічні речовини, як правило, погано розчинні в органічних розчинниках, володіють різко вираженою температурою плавлення. Температура розкладання ароматичних поліамідів біля 400 °С. При великих навантаженнях ароматичні поліаміди мають менше коефіцієнт тертя та знос, чим аліфатичні поліаміди, поліформальдегіди, полікарбонати та армовані фенол формальдегідні та епоксидні смоли [5, 8, 9]. Для підвищення експлуатаційних властивостей поліамідів в них вводять антифрикційні добавки: графіт, тальк, сульфат барію, дисульфід молібдену [1, 3, 5, 8].

Для виготовлення різних матеріалів (наповнених пластмас, лаків, плівок і т. д.) застосовують ароматичні поліаміди: фенілон П, фенілон С. Композицій на основі ароматичних поліамідів можуть працювати в умовах сухого тертя, при змащуванні мінеральними і синтетичними маслами і випускаються у вигляді наступних марок: графелон-10; -20; -35; -4ДНТ. Характерними представниками щільністю ароматичних поліамідів є полімери на основі фталевих кислот та фенілендиамінів, які зберігають високі фізико – механічні властивості у широкому інтервалі температур від «мінус» – 100 до «плюс» + 300 °С [4, 8].

Найбільше розповсюдження цієї групи полімерів одержав фенілон (полі-м-феніленізофталамід) та сополімери на його основі. Останні мають підвищену ударну міцність та володіють кращими технологічними властивостями. Антифрикційні властивості та знос фенілону в залежності від ступеню кристалічності та упорядкованості докладно вивчені у [10, 11]. У цих роботах показана перспективність використання фенілону у важконавантажених вузлах тертя, зокрема, конструкціях автомобільного обладнання.

З проведеного огляду видно, що в області вивчення та використання термостійких полімерів в якості антифрикційних матеріалів досягнуті значні успіхи, в першу чергу це відноситься до поліамідів, однак мала сировинна база обмежує широке використання цих полімерів. Використання фенілону для опор ковзання показало його велику перспективність [12], однак відомостей про вивчення інших ізомерних ароматичних поліамідів на його основі немає.

Основні вимоги до антифрикційних матеріалів: висока термостійкість через екстремальні температури, що можуть досягати понад 200°С; стійкість до великих механічних навантажень, ударних і динамічних навантажень; хімічна стійкість до змащувальних матеріалів і агресивних середовищ; мінімальний коефіцієнт тертя для зменшення енергоспоживання; висока зносостійкість для збільшення ресурсу вузлів тертя. Отже, створення композитних матеріалів при поєднанні різних полімерів та наповнювачів дозволить регулювати властивості відповідно до умов експлуатації.

Висновки. Термостійкі полімери мають значні переваги перед традиційними матеріалами завдяки їх високій термостійкості, хімічній інертності та легкості. Подальші дослідження створення сучасних полімерних матеріалів зможуть забезпечити розробку ще більш стійких і функціональних композиційних полімерних матеріалів для промислових потреб в Україні.

Список літератури:

1. Hawk J.A. and others. Abrasive wear faibres. *ASM Handbook. Materials Park, CH, ASM International*. 2002. № 11. С 906–921.
2. Sytar V., Burya A., Belyanovskaya E., Tomina A.-Constructional materials based on graphite-filled phenylone. *The Potential of Modern Science*. London, 2019. Vol. 3. P. 238–253.
3. Brian J. Briscoe, Sujeet K. Sinha Tribological applications of polymers and their composites: Past, present and future prospects. *Tribology and Interface Engineering Series*. 2008. Vol. 55. P. 1–14
4. Мікульонок І.О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с.
5. Ahmed Abdelbary Polymer tribology. Wear of Polymers and Composites. 2014, P. 1–36
6. Ruili Wang, Feizhi Zhang, Kang Yang, Na Xiao, Jun Tang, Yahui Xiong, Guoqing Zhang, Mengcheng Duan Hao Chen Important contributions of carbon materials in tribology: From lubrication abilities to wear mechanisms. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 979, 5 April 2024, 173454
7. Кобець А.С., Деркач О.Д., Чигвінцева О.П., Кабат О.С., Рула І.В., Дудін В.Ю., Макаренко Д.О., Бойко Ю.В. Застосування полімерних композитів в АПК. Монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 356 с.
8. Біліченко В.В. Матеріали для сервісу і ремонту автомобілів. [Електронний ресурс] Навчальний посібник, ВДТУ. 2005. URL:https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fmbt/bilichenko_servis_ta_remont_avto/
9. Косенко В.А., Кадомський С.В., Богдан О.О., Малишев В.В. Поступаленко В.А. Матеріалознавство на автомобільному транспорті. Київ, 2019. 254 с
10. Chigvintseva O.P., Kabat O.S., Rula I.V., Boyko Yu.V. Tribological properties of aromatic polyamide phenylon C-1. *Materials of XIV International Research and Practice Conference "Conduct of Modern Science-2018"*, Science and Education Ltd, Sheffield, UK (november 30-december 7, 2018). P. 8–10.
11. Деталі з полімерних композитів для рухомих зчленувань машин та механізмів: каталог технічних рішень у с/г виробництві. Вінниця, 1990. С. 39.
12. Koniuszewska A.G., Kaczmar J.W. Application of polymer based composite materials in transportation progress. *Plastics and Recycling Technology*. 2016. Vol. 32, № 1. P. 1–24.

Polishchuk B.V., Mitina N.B. ISSUES REGARDING THE DEVELOPMENT OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

The article theoretically considers the importance of heat-resistant polymers in various industries, including aviation, automotive, electronics, metallurgy and petrochemicals. Unique resistance to high temperatures and chemical influences makes heat-resistant polymers indispensable for many critically important applications. Namely, the use of heat-resistant polymers will significantly reduce the friction coefficient, increase wear resistance and increase the service life of friction units. The article discusses the main methods for developing heat-resistant polymers, their properties, modification and advantages of use in conditions of high temperatures and intense friction. Considers the significant advantages of heat-resistant polymers over traditional materials due to their high heat resistance, chemical inertness and lightness. Analyzes the increase in the efficiency and reliability of technological processes when using heat-resistant polymers in various industries, including metallurgy. Comparative studies of the antifriction properties of polyamide and polycapramid showed that the former, with a lower friction coefficient, can operate at significantly higher speeds and loads. The review confirmed that significant progress has been made in the study and use of heat-resistant polymers as antifriction materials, primarily in polyamides, but the small raw material base limits the widespread use of these polymers. At high loads, aromatic polyamides have a lower coefficient of friction and wear than aliphatic polyamides, polyformaldehydes, polycarbonates and reinforced phenol formaldehyde and epoxy resins. It is noted that further research in the development of polymer compositions can ensure the development of even more stable and functional materials for industrial needs, reduce equipment maintenance costs, and contribute to increasing the efficiency and reliability of technological processes.

Key words: *heat-resistant polymers, polymer composition, friction units, wear resistance of parts, antifriction properties.*