

Антон Клименко¹, Зоя Сазанішвілі²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (Дніпро, Україна)

E-mail: 03udhtu021990@ukr.net, SCOPUS Author ID: 57190270871

²кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (Дніпро, Україна)

E-mail: szanishvili.z.v@nmu.one, ORCID: 0000-0003-4138-9238

ResearcherID: [JUV-1144-2023](https://orcid.org/0000-0003-4138-9238), SCOPUS Author ID: 57222006833

РОЗРОБКА ТЕРМОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ МЕТА-АРАМІДУ

Дослідження триботехнічних характеристик композиційних покриттів на основі мета-араміду актуальне у зв'язку з його важливістю для промисловості, технологій та екологічних стандартів. В експериментах з сухим тертям при високому тиску та швидкості ковзання визначено, що концентрація антифрикційного наповнювача суттєво впливає на тертя та зношення покриттів. Покриття з фталоціаніном міді (20–25 мас.%) демонструють найкращі триботехнічні показники, зменшуючи знос та коефіцієнт тертя у 2 та 2,1 рази відповідно. Аналіз результатів рекомендує оптимальну концентрацію наповнювача для мета-арамідних покриттів на рівні 20 мас.% з огляду на триботехнічні властивості.

Ключові слова: триботехнічні характеристики; покриття; композиційні покриття; мета-арамід; зносостійкість; зношування.

Рис.: 4. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Одним з основних недоліків, які зустрічаються під час роботи важконавантажених машин і механізмів є ненадійна та недовговічна робота їх пар тертя. Для вирішення цієї проблеми потрібно використовувати нові, сучасні матеріали триботехнічного призначення, зокрема полімерні [1].

Застосування полімерів для створення таких матеріалів дозволяє отримати необхідний комплекс властивостей вузлів тертя, зменшити їхню масу, а також знизити їхню собівартість.

Постановка проблеми. Прогресивним методом для вирішення подібних завдань є використання полімерних покриттів. Їх нанесення на металеві деталі дозволяє успішно вирішити завдання створення поверхонь тертя з певним комплексом експлуатаційних параметрів і відкриває широкі можливості управління фізико-механічними властивостями контактуючих поверхонь [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перспективним матеріалом для отримання покриттів триботехнічного призначення є ароматичні поліаміди [3-7], зокрема мета-арамід (Nomex).

Проте слід відмітити, що мета-арамід, як і інші ароматичні поліаміди, мають низьку адгезію до металів, що ускладнює отримання якісних покриттів [8-9]. Невідомий також вплив більшості твердих шаруватих наповнювачів на умови формування та експлуатаційні показники таких покриттів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Авторами роботи [10] розроблена методика отримання антифрикційних покриттів на основі ароматичного поліаміду фенілон, що є кополімером мета-араміду. Але слід відмітити, що даний кополімер не синтезується в Україні та країнах Європи, а його виробництво так і не дійшло до промислових масштабів.

Виходячи з цього, **метою даної роботи** є розробка термостійких покриттів триботехнічного призначення на основі саме мета-араміду, який широко використовується в країнах ЄС та США. Кінцевим результатом у даній роботі є визначення оптимальної концентрації антифрикційного наповнювача для максимізації зносостійкості та мінімізації коефіцієнта тертя у композиційних покриттях на основі мета-араміду. Отримані результати передбачається використовувати для розробки покращених матеріалів для вузлів тертя з різними умовами експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Мета-арамідні покриття та композиційні покриття на його основі отримували шляхом приготування відповідного розчину з наступним його нанесенням на металеву поверхню та сушінням. В якості розчинника використовували диметилацетамід (ДМАА), оскільки плівки з ароматичних поліамідів на його основі мають найкращі фізико-механічні властивості [5,7].

В якості наповнювачів використовували шаруваті тверді мастила, які широко використовуються для створення самозмащувальних матеріалів на основі полімерів: нітрид бору, графіт, фталоціанін міді та дисульфід молібдену. Обрані антифрикційні наповнювачі використовували у дрібнодисперсному вигляді з розміром частинок 1–2 мкм. Вмістом наповнювача варіювали від 5 мас.% до 25 мас.%.

Перед нанесенням розчин перемішували в лопатевій лабораторній мішалці з частотою обертання 60 об/хв протягом двох хвилин. Розроблена методика приготування покриттів дозволяє отримати необхідний розподіл наповнювача в об'ємі полімерної матриці (рис. 1).

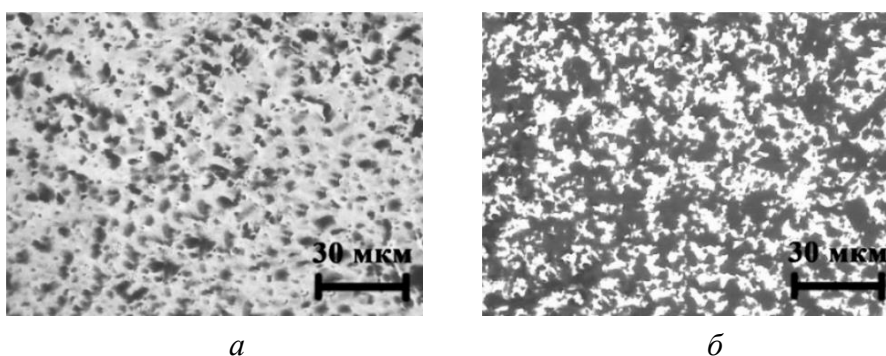


Рис. 1. Мікроструктура композиційних покриттів на основі мета-араміду з різним вмістом графітового наповнювача:
а – 5 мас.%; б – 20 мас.%

Джерело: розроблено авторами.

Мікроструктуру зразків полімерних покриттів вивчали за допомогою оптичного фотомікроскопа відбитого світла ПОЛАМ Р-312 при збільшеннях 450–500.

Триботехнічні властивості покриттів досліджували на машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою диск-колодка (рис. 2), по контртілу зі сталі 45, яке термооброблене до твердості 45–50 HRC, і має діаметр 50 мм. Досліди проводилися при терті у сухому режимі та терті зі змащуванням. Зношення матеріалів визначали на аналітичних вагах ВЛР-200.

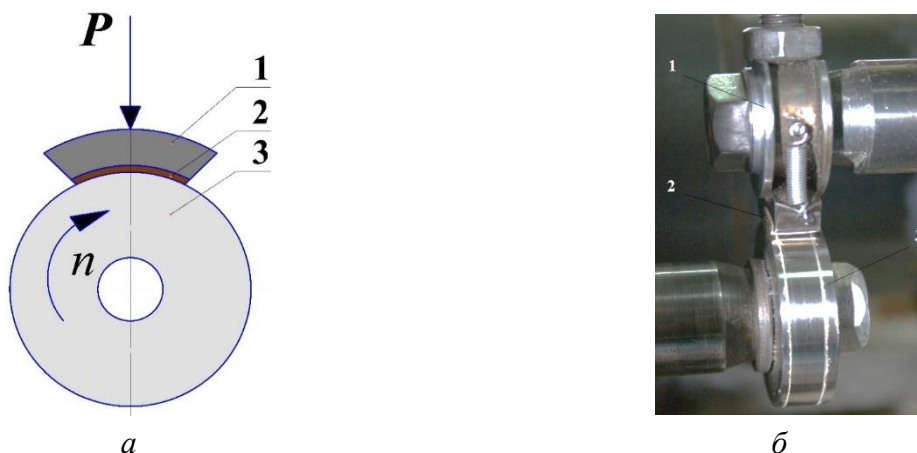


Рис. 2. Схема вузла тертя (а) та випробування зразка на тертя та зношення (б):
Р – навантаження; n – частота обертання контртіла; 1 – металева підложка;
2 – полімерне покриття; 3 – контртіло

Джерело: розроблено авторами.

Дослідження триботехнічних властивостей композиційних покриттів на основі мета-араміду проводили у сухому режимі тертя при навантаженні $P = 1$ МПа і швидкості ковзання $v = 1$ м/с.

Результати досліджень на зносостійкість та коефіцієнт тертя наведені на рис. 3.

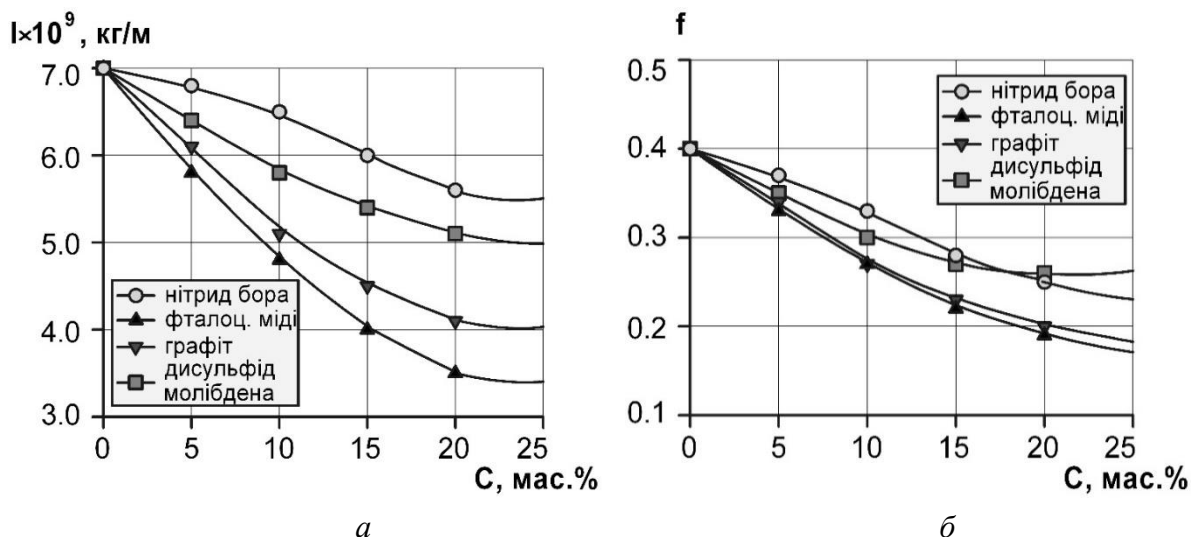


Рис. 3. Залежність інтенсивності масового зношування (а) та коефіцієнта тертя (б) від вмісту наповнювача (С) у складі покриття

Джерело: розроблено авторами.

Встановлено, що кількість антифрикційного наповнювача суттєво впливає на тертя та зношення мета-арамідних покриттів. Зносостійкість розроблених композицій по мірі збільшення вмісту наповнювача різко зростає, однак введення його більше ніж 20 мас.% призводить до стабілізації і поступового зменшення цього показника (рис. 3, а). Криві інтенсивності зношування досягають своїх мінімальних значень при вмісті наповнювача 20–25 мас.%.

Слід відмітити, що обрані наповнювачі мають подібну шарувату структуру та однаковий механізм змащування, чим пояснюється подібний характер кривих зношування та коефіцієнту тертя (рис. 3, б). У процесі тертя на поверхні контртіла антифрикційний наповнювач утворює змащувальну плівку, параметри якої (щільність, рівномірність та швидкість утворення) знаходиться в прямій залежності від кількості наповнювача у композиційному покритті. Саме цим і пояснюється різке збільшення зносостійкості композиційного покриття, що має у своєму складі наповнювач у кількості до 20 мас.%. Подальше збільшення вмісту антифрикційного наповнювача призводить до суттєвого погіршення міцнісних властивостей та збільшення крихкості композиційного покриття, що призводить до деякого зниження зносостійкості при вмісті наповнювача більше ніж 25 мас.%.

Серед розроблених композиційних покриттів найкращі триботехнічні показники мають покриття з фталоціаніном міді у своєму складі, у кількості 20–25 мас.%. Інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя цих покриттів, у порівнянні з вихідним мета-арамідним покриттям, зменшились у 2 та у 2,1 раза відповідно.

Враховуючи те, що перспективною областю застосування мета-арамідних покриттів є вузли тертя, що працюють у рідких середовищах, проведено додаткове дослідження триботехнічних властивостей розроблених покриттів при терті зі змащенням.

Випробування проводили при різному питомому навантаженні. Як мастило використовували індустріальне мастило I-40.

Результати досліджень на зносостійкість та коефіцієнт тертя наведені на рис. 4.

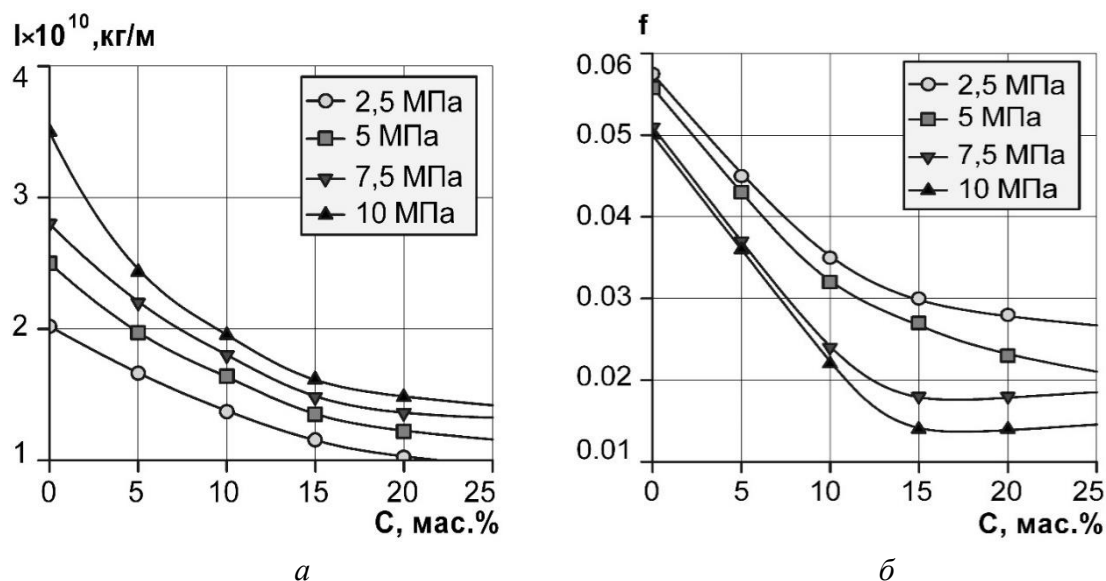


Рис. 4. Залежність інтенсивності масового зношування (а) коефіцієнту тертя (б) від вмісту наповнювача (С) при різному питомому навантаженні

Джерело: розроблено авторами.

З наведених залежностей видно, що зі збільшенням питомого навантаження інтенсивність зношування композиційних покриттів зростає (рис. 4, а). Концентраційні залежності інтенсивності зношування мають схожий характер з відповідними залежностями при терті у сухому режимі. Слід також відмітити, що чим менша кількість антифрикційного наповнювача у складі мета-арамідного покриття, тим різкіше зростають значення інтенсивності зношування при збільшенні питомого тиску у парі тертя.

При терті зі змащенням, інтенсивність зношування розроблених покриттів, при питомому навантаженні 2,5–10 МПа, у порівнянні з вихідним мета-арамідним покриттям, зменшилась у 1,5–2,5 раза, а коефіцієнт тертя – у 2,1–3,6 раза відповідно.

Встановлено, що зі зростанням питомого навантаження коефіцієнт тертя розроблених покриттів зменшується. Аналіз концентраційних залежностей коефіцієнта тертя (рис. 4, б) показав, що при високому питомому навантаженні (7,5–10 МПа) значення коефіцієнту тертя композиційних покриттів стабілізується при кількості наповнювача 15–20 мас.%. При меншому питомому навантаженні коефіцієнт тертя має більші значення і продовжує змінюватись із збільшенням вмісту наповнювача.

Такі результати можна пояснити тим, що на якість і швидкість формування змащувальної плівки, яку на поверхні контртіла утворює антифрикційна добавка, крім концентрації наповнювача суттєво впливає і тиск у парі тертя.

Узагальнюючи дані, робимо висновок, що оптимальна кількість антифрикційного наповнювача у складі мета-арамідного покриття, з огляду на триботехнічні властивості, становить 20 мас.%.

Висновки. Досліджено вплив таких антифрикційних наповнювачів як фталоціанін міді, дисульфід молибдена, графіт та нітрид бора на закономірності формування та експлуатаційні показники мета-арамідних покриттів.

Виявлено залежність триботехнічних властивостей мета-арамідних покриттів від концентрації антифрикційного наповнювача. Встановлено, що зі зростанням питомого навантаження коефіцієнт тертя розроблених покриттів зменшується.

Встановлено, що оптимальна кількість антифрикційного наповнювача у складі мета-арамідного покриття, з огляду на триботехнічні властивості, становить 20 мас. %.

Виявлено, що найкращі експлуатаційні показники, серед розроблених композиційних покриттів, мають покриття з фталоціаніном міді у своєму складі.

Список використаних джерел

1. Полімерні композити: одержання, властивості, застосування / за ред. О. І. Бурі. – Дніпропетровськ : Вид-во «Федорченко А.А.», 2010. – 383 с.
2. Fink, J. K. High performance polymers / J. K. Fink. – New York : William Andrew Inc, 2008
3. Gallini, J. Polyamides, aromatic / J. Gallini // Encyclopedia of polymer science and technology. – Vol. 3. – New York : John Wiley & Sons, 2005. – P. 558-584.
4. Yang, H. H. Aromatic high-strength fibers / H. H. Yang. – New York : Wiley, 1989. – 248 p.
5. High-performance aromatic polyamides / J. M. García, F. C. García, F. Serna, J. L. Peña // Progress in Polymer Science. – 2010. – Vol. 35. – P. 623-686.
6. Joven, R. V. Manufacturing Kevlar panels by thermo-curing process / V. R. Joven. – Bogotá : Los Andes University, 2007. – 233 p.
7. High-performance aromatic polyamides / J. M. García, F. C. García, F. Serna, de la J. L. Peña // Progress in Polymer Science. – 2010. – Vol. 35. – P. 623-686.
8. Pocius, A.V. Adhesion and Adhesives Technology / A.V. Pocius. – Munich : Carl Hanser Verlag, 2012. – 370 p.
9. Adhesion of polymers / F. Awaja, M. Gilbert, G. Kelly, B. Fox, P. Pigram // Progress in Polymer Science. – 2009. – Vol. 34. – P. 948-968.
10. Klymenko, A. Adhesion of poly (m-p-phenylene isophthalamide) coatings to metal substrates / A. Klymenko, V. Sytar, I. Kolesnyk // Progress in Organic Coatings. – 2014. – Vol. 77. – P. 1597-1602.

References

1. Buri, O.I. (Ed.). (2010). *Polimerni kompozyty: oderzhannia, vlastyvoli, zastosuvannia [Polymer composites: preparation, properties, application]*. Fedorchenko A.A.
2. Fink, J. K. (2008). *High performance polymers*. William Andrew Inc.
3. Gallini J. (2005). Polyamides, aromatic. *Encyclopedia of polymer science and technology*. (Vol. 3). John Wiley & Sons.
4. Yang, H. H. (1989). *Aromatic high-strength fibers*. Wiley.
5. García, J., García, F., Serna, F., & Pena, J. (2010). High-performance aromatic polyamides. *Progress in Polymer Science*, 35, 623–686.
6. Joven, R.V. (2007). *Manufacturing Kevlar panels by thermo-curing process*. Los Andes University.
7. García, J., García, F., Serna, F., & Pena, J. (2010). High-performance aromatic polyamides. *Progress in Polymer Science*, 35, 623–686.
8. Pocius, A.V. (2012). *Adhesion and Adhesives Technology*. Carl Hanser Verlag.
9. Awaja, F., Gilbert, M., Kelly G., Fox B., Pigram P. (2009). Adhesion of polymers. *Progress in Polymer Science*, 34, 948–968.
10. Klymenko, A., Sytar, V., Kolesnyk I. (2014) Adhesion of poly (m-p-phenylene isophthalamide) coatings to metal substrates. *Progress in Organic Coatings*, 77, 1597–1602.

Отримано 02.12.2023

Anton Klymenko¹, Zoia Sazanishvili²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Engineering and Generative Design Department
Dnipro University of Technology (Dnipro, Ukraine)

E-mail: 03udhtu021990@ukr.net. SCOPUS Author ID: [57190270871](#)

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Engineering and Generative Design Department
Dnipro University of Technology (Dnipro, Ukraine)

E-mail: sazanishvili.z.v@nmu.one. ORCID: [0000-0003-4138-9238](#)

ResearcherID: [JUV-1144-2023](#). SCOPUS Author ID: [57222006833](#)

**DEVELOPMENT OF HEAT-RESISTANT TRIBOLOGICAL COATINGS
BASED ON META-ARAMID**

Research on the tribotechnical properties of composite coatings is relevant due to its potential impact on industry, technology, and environmental standards. In the conducted study, tribotechnical properties of composite coatings based on meta-aramid were investigated under dry friction conditions with a load of 1 MPa and a sliding speed of 1 m/s. The results showed that the amount of anti-friction filler significantly influences the friction and wear of coatings. Wear resistance increases up to 20 wt.%, after which the introduction of more filler stabilizes and leads to a decrease in this parameter. The most optimal amount of filler to achieve minimal wear is 20–25 wt.%.

It was found that the anti-friction filler forms a lubricating film on the counterface surface, and its parameters depend on the filler concentration. At a high content (up to 20 wt.%), a sharp increase in wear resistance is observed. However, with an increase in the filler concentration above 25 wt.%, a deterioration in strength properties and an increase in the coating's brittleness are observed.

Coatings with copper phthalocyanine demonstrated the most effective tribotechnical indicators when the filler concentration was 20–25 wt.%. The wear intensity and friction coefficient of these coatings decreased by 2 and 2.1 times, respectively, compared to the original meta-aramid coating.

Additional research on the tribotechnical properties of coatings in liquid environments with I-40 lubricant showed that with an increase in the specific load, the wear intensity increases, but this decreases with the addition of the anti-friction filler. At a specific load of 2.5–10 MPa, the wear resistance of the coatings decreased by 1.5–2.5 times, and the friction coefficient decreased by 2.1–3.6 times compared to the meta-aramid coating.

The analysis of the results allows determining the optimal amount of filler for meta-aramid coatings as 20 wt.%, considering tribotechnical properties.

Keywords: Tribotechnical characteristics; Coatings; Composite coatings; Meta-aramid; Wear resistance; Wear.

Fig.: 4. Ref.: 10.