

УДК 621.894

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ ГАЛЬМІВНИХ КОЛОДОК

Ф. Ф. ЮСУБОВ<sup>1</sup>, І. В. ГУРЕЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Баку;

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка"

Вивчено трибологічні властивості композиційних матеріалів гальмівних колодок, які експлуатують у важких умовах. Досліджено матеріал, який складається з фенол-формальдегіду, бариту, оксиду алюмінію, синтетичного воластоніту, свинцю, олова, міді, графіту, оксиду кремнію і невеликої кількості оксиду магнію та дисульфиду молібдену. Показано, що найкращими фрикційними властивостями за коефіцієнтом тертя і термічною стабільністю володіє матеріал з вмістом 25 mass% фенолформальдегіду.

**Ключові слова:** гальмівні колодки, порошкова металургія, композити, температура, коефіцієнт тертя, зношування, деградація.

The tribological properties of composite materials of brake pads, which operate in complicated conditions, are studied. Materials consisting of phenol-formaldehyde, barite, alumina, synthetic wollastonite, lead, tin, copper, graphite, silicon oxide and a small amount of magnesium oxide and molybdenum disulfide are investigated. In this research, only the amount of phenol-formaldehyde has been changed. It is shown that the material, containing 25 mass% of phenol-formaldehyde has the best frictional properties in terms of friction coefficient and thermal stability.

**Keywords:** brake pads, powder metallurgy, composites, temperature, coefficient of friction, wear, degradation.

**Вступ.** Однією з основних вимог до розроблення фрикційних композитів є стабільність таких властивостей, як коефіцієнт тертя і зношування у широкому діапазоні робочих параметрів. Стабільність тертя забезпечується зниженням і збільшенням коефіцієнтів тертя у певних температурних межах [1]. Таке часто зустрічаємо у фрикційних матеріалах, де у складі є органічні компоненти. Тимчасове зниження ефективності гальмування зазвичай відбувається за температур вище 200...300°C. Цей ефект, який виникає на початковій фазі тертя, обумовлений зміною властивостей матеріалів під дією тепла, яке генерується під час гальмування [2]. Внаслідок розкладання органічних компонентів підвищується інтенсивність зношування контактних поверхонь, що призводить до різкого зниження коефіцієнта тертя [3]. Формування нового фрикційного шару сприяє поступовій стабілізації параметрів тертя.

Під час виготовлення фрикційних матеріалів використовують різні хімічні елементи та сполуки. Кожен з цих елементів виконує певну функцію, а інколи певний компонент може бути багатофункціональним та виконувати декілька завдань [4]. Фрикційні матеріали здебільшого складаються зі зв'язок, наповнювачів та модифікаторів. Вибір зв'язок з високою термостійкістю забезпечує стабільність коефіцієнта тертя [5]. Істотні відмінності можуть виникати у параметрах тертя фрикційних матеріалів залежно від їх типу та кількості [6].

Контактна особа: І. В. ГУРЕЙ, e-mail: ihor.hurey@gmail.com

Мета роботи – дослідити вплив фенолформальдегідів, які використовують здебільшого як зв'язки, на коефіцієнти тертя залежно від температури, яка виникає під час процесу.

**Методики досліджень.** У склад фрикційного композитного матеріалу входять: фенолформальдегід, модифікований поліконденсацією у лужному середовищі N-метиланіліном (рис. 1) [7]; барит, який є інертним наповнювачем і його використовували для балансування складу матеріалу. Ці два компоненти становили у сумі 50 mass% для кожного досліджуваного фрикційного матеріалу. Змінюючи їх кількість, отримували різні за складом фрикційні матеріали (табл. 1). Решта компонентів були незмінними і у сумі також складали 50 mass%: синтетичний воластоніт – 5%, діоксид алюмінію – 7%, свинець – 10%, олово – 10%, діоксид кремнію – 7%, мідь з графітом (80% Cu та 20% C) – 8% і по 1% бронзової стружки, дисульфиду молібдену і оксиду магнію. Гліцерин використовували як пластифікатор.

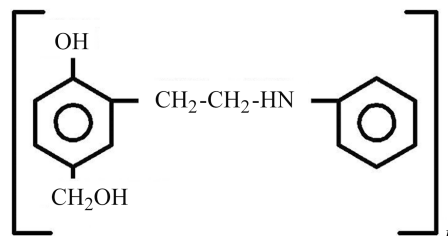


Рис. 1. Молекулярна структура фенолформальдегіду, модифікованого N-метиланіліном.

Fig. 1. Molecular structure of phenol-formaldehyde modified with N-methylaniline.

Виготовляли дослідні зразки так: подрібнювали компоненти, здійснювали їх сухе змішування, пресування (холодне під тиском 10 МПа і гаряче під тиском 25,5 МПа) та затвердіння (витримка за температури 160°C упродовж 5 h). Зразки циліндричної форми, Ø 4,7 mm і заввишки 1,8 mm.

**Таблиця 1. Вміст компонентів у досліджуваних фрикційних матеріалах**

Марка матеріалу	Компоненти, mass%		
	Фенолформальдегід	Барит (баланс)	Інші матеріали
P19	17	33	50
P22	20	30	50
P25	25	25	50
P28	28	22	50

Випробовували на вертикальній машині тертя MMW-1 за схемою “палець–диск” (рис. 2а) за швидкості обертання зразків-пальців 2000 cycle/min і питомого навантаженні 17,3 МПа. Нерухомий контрзразок виготовляли із загартованої сталі 45 твердістю 44...46 HRC у вигляді диска з такими розмірами: зовнішній діаметр 31,7 mm, внутрішній 16 mm, товщина 10 mm.

Для вимірювання температури диска на доріжці тертя за зразком-пальцем використовували безконтактний інфрачервоний термометр з лазерним наведенням ZOTEK GM550 (точність ± 1,5°C). Безконтактний термометр (пірометр) кріпили на відстані 50...55 mm від доріжки тертя відразу за зразком-пальцем (рис. 2b). Випробовували упродовж 2400 s. Через кожні 200...300 s вимірювали температуру на доріжці тертя, а також реєстрували відповідні коефіцієнти тертя, які були записані за допомогою трибометра машини тертя.

**Обговорення результатів.** Експериментальні дослідження показали, що за випробувань усіх досліджуваних фрикційних матеріалів на початкових етапах тертя (тривалість до 500 s) кофіцієнт тертя поступово збільшується та досягає максимальних значень за тертя ~ 800 s. У цьому проміжку часу температура у зо-

ні контакту диска зі зразком-пальцем різко збільшується і досягає  $\sim 330^{\circ}\text{C}$  для усіх досліджуваних пар тертя. Зростання коефіцієнта тертя на цьому етапі досліджень можна пояснити збільшенням реальної площі контакту між диском і зразком (рис. 3).

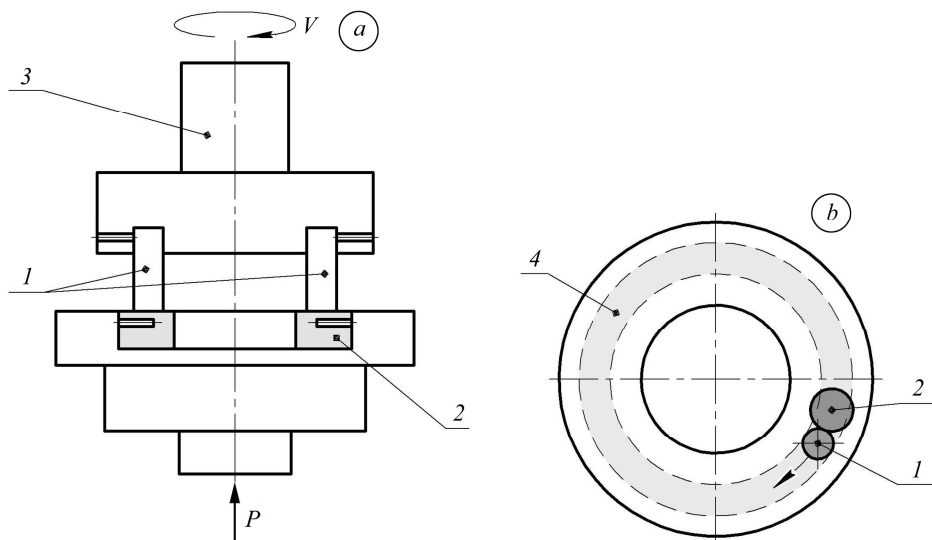


Рис. 2. Схематичне зображення установки MMW-1 (a) та вимірювання температури (b): 1 – зразки; 2 – диск; 3 – механізм обертання; 4 – доріжка тертя; 5 – точка фокусування.

Fig. 2. Setup of testing machine MMW-1 (a) and temperature measurement (b): 1 – samples; 2 – disk; 3 – rotation mechanism; 4 – sliding track; 5 – focusing point.

Далі (час тертя в межах 800...1100 s) коефіцієнт тертя різко зменшується, а температура злегка збільшується і досягає  $\sim 350^{\circ}\text{C}$ . У цей період відбувається термічна деградація фенолформальдегідної смоли, яка є складовою кожного з досліджуваних фрикційних матеріалів. Під час цього процесу виділяється велика кількість летючих елементів при розм'якшенні зв'язок, що викликає зміну структури матеріалу. Це, своєю чергою, обумовлено появою трибострумів, які сприяють зниженню коефіцієнта тертя [8]. Досягнувши максимального значення, коефіцієнт тертя починає швидко зменшуватися, що вказує на деградацію фенолформальдегіду. Температура на цьому етапі – від 330 до  $350^{\circ}\text{C}$ . Зниження коефіцієнтів тертя за досягнення температури  $350^{\circ}\text{C}$  вказує на те, що частковий розпад фенолформальдегіду завершився.

Під час подальшого тертя упродовж 1400...1700 s у всіх досліджуваних зразках спостерігали незначне збільшення коефіцієнта тертя та відновлення фрикційних властивостей. Температура збільшувалась значно повільніше, ніж за попередній період, і становила від 350 до  $380^{\circ}\text{C}$ . Далі, починаючи з 1700 s і до кінця випробувань, коефіцієнти тертя поступово зменшувалися, а температура повільно зростала від 380 до  $400^{\circ}\text{C}$ . Хімічна реакція між гідроксильною та метиленовою групами фенолформальдегіду призводить до карбонізації за температури 400...  $600^{\circ}\text{C}$ . У результаті цього зв'язок між парами тертя починає слабшати і впливати на тертя, змінюючи області контакту на поверхні.

Експериментальні дослідження показали, що з підвищенням вмісту фенолформальдегіду у досліджуваних фрикційних матеріалах до 25 mass% (P19, P22, P25) призводить до збільшення коефіцієнта тертя. Подальше зростання його вмісту до 28 mass% (матеріал P28) спричиняє різке зниження коефіцієнта тертя і погіршення умов процесу (табл. 2).

Для ефективного визначення фрикційних параметрів досліджуваних композитних матеріалів, встановлювали відсоток зменшення і подальшого збільшення коефіцієнта тертя під час досліджень.

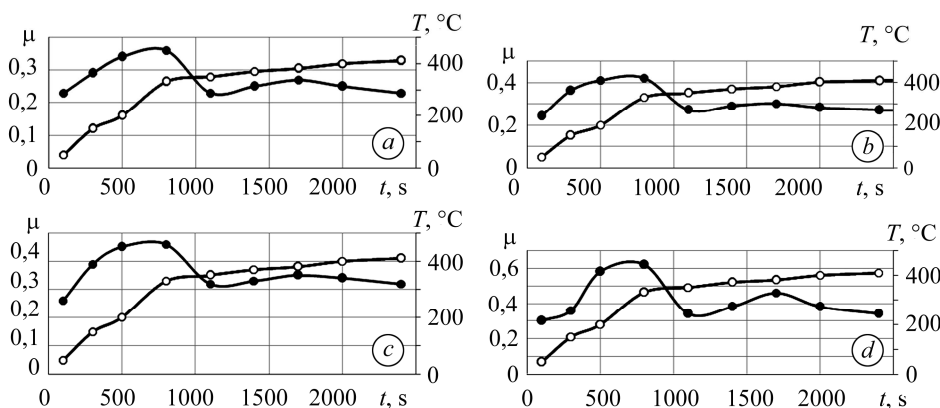


Рис. 3. Залежність коефіцієнта тертя та температури від часу для композитів P19 (a); P22 (b); P25 (c); P28 (d): ● – коефіцієнт тертя; ○ – температура.

Fig. 3. Dependence of friction coefficient and temperature on time for P19 (a); P22 (b); P25 (c); P28 (d) composites: ● – friction coefficient; ○ – temperature.

**Таблиця 2. Зміна коефіцієнтів тертя**

Коефіцієнт тертя ( $\mu$ )	Марка матеріалу			
	P19	P22	P25	P28
$\mu_{\min}$	0,22	0,25	0,29	0,17
$\mu_{\text{aver.}}$	0,31	0,39	0,42	0,23
$\mu_{\max}$	0,36	0,42	0,46	0,31

Відсоток різкого зменшення коефіцієнта тертя ( $F$ ) розраховували за формулою

$$F = \frac{\mu_{\max} - \mu_1}{\mu_1} \cdot 100\%,$$

де  $\mu_1$  – найменше значення коефіцієнта тертя, яке спостерігаємо за різкого послаблення фрикційних властивостей;  $\mu_{\max}$  – максимальне значення коефіцієнта тертя.

Збільшення коефіцієнта тертя ( $R$ ) після його різкого зменшення розраховували за формулою

$$R = \frac{\mu_{\min}}{\mu_2} \cdot 100\%,$$

де  $\mu_2$  – найбільше значення коефіцієнта тертя, яке спостерігаємо за відновлення фрикційних властивостей;  $\mu_{\min}$  – мінімальне значення коефіцієнта тертя.

Однією з основних умов забезпечення надійності та стабільності роботи фрикційних матеріалів є показники різкого зниження коефіцієнта тертя і подальшого швидкого його збільшення. Різке зменшення коефіцієнтів тертя характеризує зниження якості гальмування внаслідок зменшення кінетичного тертя з підвищенням температури. Зі збільшенням температури коефіцієнт тертя знижується і так виникає феномен послаблення фрикційних властивостей [9]. Загалом різке погіршення показників тертя відбувається, коли температура досягає 200°C або 350°C. У табл. 3 наведені результати відповідних обчислень різкого зниження і відновлення коефіцієнтів тертя.

**Таблиця 3. Зниження і відновлення коефіцієнтів тертя**

Етапи		Матеріал			
		P19	P22	P25	P28
Зниження коефіцієнтів	μ	0,23	0,27	0,32	0,17
	%	36,1	35,7	30,4	45,2
Зростання коефіцієнтів	μ	0,27	0,30	0,35	0,23
	%	81,5	83,3	82,9	73,9

З досліджень слідує, що найліпшими фрикційними характеристиками за різкого зменшення коефіцієнта тертя володіє композит P25. Зі збільшенням вмісту фенолформальдегіду (але до 25 mass%) у досліджуваних матеріалах різке зменшення коефіцієнта тертя сповільнювалось. Подальше збільшення вмісту фенолформальдегіду призводить до погіршення фрикційних ха-

рактеристик і прискорення зниження коефіцієнта тертя, а також сповільнення подальшого збільшення коефіцієнта тертя.

Зображення, отримані за допомогою оптичного мікроскопа, демонструють, що поверхнева структура фрикційного матеріалу P25 однорідніша, ніж матеріалу P28. Це пов'язано зі зміною структури поверхні через порушення зв'язків між компонентами фрикційного матеріалу внаслідок дії тепла, яке виникає у зоні контакту пари тертя. Через високий вміст фенолформальдегіду в матеріалі P28 ця різниця найвиразніша (рис. 4).

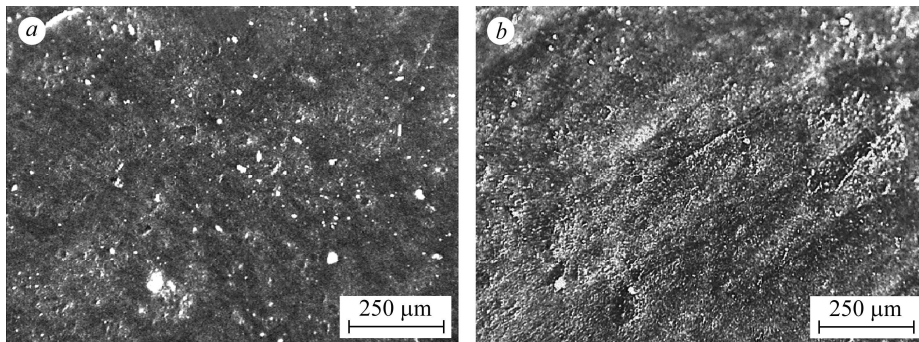


Рис. 4. Поверхні зношування після випробувань зразків, виготовлених з композитів P25 (a) і P28 (b).

Fig. 4. Surface wear after testing of specimens made of P25 (a) and P28 (b) composites.

Під час тертя зразків з високим вмістом фенолформальдегіду (28 mass%) різке зменшення коефіцієнта тертя, а також формування нового фрикційного шару після деградації мало впливають на відновлення фрикційних характеристик цього матеріалу. Вивільнення вільного фенолу під час розпаду фенолформальдегіду різко знижує фрикційні властивості пари тертя через певні проміжки часу. Середнє значення коефіцієнта тертя на етапі відновлення є вищим, ніж на початковій стадії тертя, що пов'язано з відсутністю вільного фенолу, який сприяє ковзанню по поверхні. Крім того, теплові процеси, які відбуваються у зоні тертя, можуть збільшити адгезію металевих частинок між поверхнями сталевого диска і зразка. Під час подальшого тертя розпад фенолформальдегіду триває, коефіцієнт тертя поступово зменшується з підвищенням температури від 370 до 500°C.

Фрикційні характеристики зразків, виготовлених з композиційних матеріалів P19 і P22, показали задовільні результати, отже збільшення вмісту фенолформальдегіду до певних меж позитивно впливає на них. Підвищення коефіцієнта тертя для фрикційних матеріалів зазвичай вважають прийнятним в інтервалі 75...100% [10]. Найкращі результати за фрикційними характеристиками, отримані для композиційного матеріалу P25, який відповідає усім зазначеним вимогам.

На відміну від інших досліджуваних матеріалів у Р28 максимальне значення коефіцієнта тертя на етапі відновлення фрикційних властивостей дорівнювало 0,23. Тобто їх повне відновлення становило лише 73,9%. Цей матеріал показав найгірші з усіх досліджуваних матеріалів фрикційні характеристики і не відповідає прийнятим вимогам, а отже, збільшення вмісту фенолформальдегіду > 25 mass% є недоцільним.

### ВИСНОВКИ

Експериментальні дослідження показали, що у всіх досліджуваних зразках коефіцієнти тертя суттєво збільшувалися під час процесу у проміжку від 100 до 500 s. Термічну деградацію спостерігали за температур 330...350°C. За період 500...800 s коефіцієнти тертя набували максимальних значень. Після закінчення деградації в усіх зразках за часу тертя 1400...1700 s спостерігали збільшення коефіцієнтів тертя. Зі зростанням вмісту фенолформальдегіду (до 25 mass%) у досліджуваних композитних матеріалах фрикційні характеристики поліпшуються. Найкращими володіє композитний матеріал Р25 з вмістом фенолформальдегіду 25 mass%. Подальше збільшення вмісту фенолформальдегіду (> 25 mass%) призводить до суттєвого їх погіршення. Так, під час дослідження композиційного матеріалу Р28 (28 mass%) отримано найгірші значення фрикційних характеристик з усіх досліджуваних матеріалів. Тому підвищувати вміст фенолформальдегіду > 25 mass% недоцільно.

1. Singh T., Patnaik A., and Gangil B. Thermal stability analysis of nano-particulate-filled phenolic-based friction composite materials // J. of Industrial Textiles. – 2016. – **45**, № 6. – P. 1335–1349.
2. Yun R., Martynková S. G., and Lu Y. Performance and evaluation of no asbestos organic brake friction composites with SiC particles as an abrasive // J. of Composite Materials. – 2011. – **45**, №15. – P. 1585–1593.
3. Development of a composite friction material with excellent fade resistance by employing oversized ceramic particles / W. Sun, W. Zhou, J. Liu, X. Fu, G. Chen, and S. Yao // Tribology Letters. – 2017. – **66**. – P. 1–11.
4. Nilov A. S., Kulik V. I., and Garshin A. P. Analysis of friction materials and technologies developed to make brake shoes for heavily loaded brake systems with disks made of a ceramic composite // Refractories and Industrial Ceramics. – 2015. – **56**, № 4. – P. 402–412.
5. Papadopoulou E. and Chrissafis K. Thermal study of phenol – formaldehyde resin modified with cashew nut shell liquid // Thermochimica Acta. – 2011. – **512**. – P. 105–109.
6. Satapathy B. K. and Bijwe J. Fade and recovery behavior of non-asbestos organic (NAO) composite friction materials based on combinations of rock fibers and organic fibers // J. of Reinforced Plastics and Composites. – 2005. – **24**, № 6. – P. 563–577.
7. Наубова Т. М., Аббасова К. Г., Юсубов Ф. Ф. Модификация фенолоформальдегидных олигомеров N-метиланилином // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – **85**, № 2. – С. 53–56.
8. Закономірності зношування металополімерних пер тертя за впливу трибострумів / С. І. Криштопа, І. Б. Прунько, Б. В. Долішній, М. В. Панчук, І. М. Богатчук, В. М. Мельник // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – **55**, № 2. – С. 53–60.  
(Regularities of wear of metal-polymer friction couples under the influence of tribocurrents / S. I. Kryshchopa, I. B. Prun'ko, B. V. Dolishnii, M. V. Panchuk, I. M. Bogatchuk, V. M. Melnyk // Materials Science. – 2019. – **55**, № 2. – P. 193–200.)
9. Sugoju B., Behcet D., and Ahmet A. Effect of the size on the friction characteristics of brake friction materials: a case study with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Industrial Lubrication and Tribology. – 2018. **70**, № 6. – P. 1–5.
10. Influence of binder on thermomechanical and tribological performance in brake pad / B. S. Rajan, M. A. S. Balaji, K. Sathickbasha, and P. Hariharasakthisudan // Tribology in Industry. – 2018. – **40**, № 4. – P. 654–669.

Одержано 07.04.2020