

PACS numbers: 46.32.+x, 46.35.+z, 46.50.+a, 46.55.+d, 61.72.Qq, 81.40.Pq

Розробка системи спрямованого вибору найбільш ефективної технології підвищення якості бабітових покриттів підшипників ковзання. Ч. 2. Математичний модель зносу бабітових покриттів. Критерії вибору технології нанесення бабітових покриттів

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова*, Є. В. Коноплянченко,
Н. В. Тарельник, М. Ю. Думанчук, В. О. Пирогов, Т. П. Волошко,
Д. Б. Глушкова**

*Сумський національний аграрний університет,
вул. Герасима Кондратьєва, 160,
40021 Суми, Україна*

**Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

***Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
вул. Ярослава Мудрого, 25,
61002 Харків, Україна*

В статті розроблено систему спрямованого вибору найбільш раціональної технології нанесення бабітового покриття на вкладиші підшипників ковзання (ПК), яка враховує як економічні, так і екологічні вимоги. На підставі проведених досліджень запропоновано фізично обґрунтований мате-

Corresponding author: Vyacheslav Borysovych Tarel'nyk
E-mail: tarel'nyk@i.ua

*Sumy National Agrarian University,
160 Gerasym Kondratiev Str., UA-40021 Sumy, Ukraine*

**Sumy State University,
2 Rimsky-Korsakov Str., UA-40007 Sumy, Ukraine*

***Kharkiv National Automobile and Highway University,
25 Yaroslav Mudryy Str., UA-61002 Kharkiv, Ukraine*

Citation: V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, N. V. Tarel'nyk, M. Y. Dumanchuk, V. O. Pirogov, T. P. Voloshko, and D. B. Hlushkova, Development the Directed Choice System of the Most Efficient Technology for Improving the Sliding Bearings Babbitt Covers Quality. Pt. 2. Mathematical Model of Babbitt Coatings Wear. Criteria for Choosing the Babbitt Coating Formation Technology, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 12: 1643–1659 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.12.1643](https://doi.org/10.15407/mfint.44.12.1643)

матичний модель процесу зносу бабітових покриттів (рівняння зносу), який дає змогу вирішувати як пряму задачу — визначати ваговий і лінійний знос за відомою роботою тертя, так і обернену — знаходити необхідну роботу тертя для одержання потрібної величини вагового чи то лінійного зносів. Зі знанням часу досягнення певної величини зносу уможливується більш раціональна експлуатація виробів із своєчасним призначенням часу ремонту й унеможливленням катастрофічного зносу поверхні тертя. В процесі виконання досліджень розроблено методика визначення констант рівняння зносу: енергії активації (E_A), а також максимального вагового ($\Delta m_{б.п.н}$) і лінійного ($\Delta h_{б.п.н}$) зносів, які можуть бути використані як критерії вибору найбільш раціональної технології нанесення бабітового покриття.

Ключові слова: підшипник ковзання, бабіт, покриття, знос, структура, перехідний шар, міцність зчеплення, електроіскрове легування, математичний модель.

In the article, a direct choice system of the most rational technology for applying a babbitt coating on the liners of sliding bearings (SB) is developed, which takes into account both economic and environmental requirements. On the basis of the performed research, a physically substantiated mathematical model of the babbitt-coatings' wear process (wear equation) is proposed, which allows solving both the direct problem of determining weight and linear wears based on the known work of friction, as well as the inverse problem of finding the necessary work of friction to obtain the required amount of weight or linear wears. With knowing the time to reach a certain amount of wear, it becomes possible to operate the products more rationally, timely assigning the repair time and friction-surface catastrophic-wear preventing. In the course of research, a methodology is developed for determining the constants of the wear equation: activation energy (E_A) as well as maximum weight ($\Delta m_{б.п.н}$) and linear ($\Delta h_{б.п.н}$) wears, which can be used as selection criteria for the most rational technology of applying a babbitt coating.

Key words: sliding bearing, babbitt, coating, wear, structure, transition layer, adhesion strength, electrospark alloying, mathematical model.

(Отримано 8 серпня 2022 р.)

1. ВСТУП

В першій частині статті [1] обґрунтовано важливість і актуальність проблеми підвищення робочих характеристик і ресурсу роботи бабітових підшипників ковзання (ПК). Аналіза технології створення та умов роботи бабітових ПК показала, що причиною пониження їх довговічності є чинники, що формуються як на стадії виготовлення, так і при експлуатації. Стійкість до зносу антифрикційного шару залежить від режиму роботи та конструкції підшипника, фізичних властивостей з'єднання шару з основою, жорсткості валу та

постелі під підшипниками.

Встановлено, що якість антифрикційного шару підшипника необхідно оцінювати за такими критеріями: міцністю зчеплення покриття з основою, когезійною міцністю антифрикційного шару, пористістю, однорідністю структури. Встановлено, що при виготовленні ПК, формування методом електроіскрового легування (ЕІЛ) проміжного шару з міді, міцно зчепленого з одного боку зі крицевою підкладинкою, а з іншого — з шаром олова (утворення твердих розчинів заміщення) і бабіту, забезпечує більш міцне (на 35%) зчеплення, в порівнянні з традиційною технологією (криця 20 + бабіт), крицевої підкладинки з бабітом, а також інтенсивніше відведення тепла із зони тертя. Визначено, що резервом підвищення якості формування бабітових покриттів, що значною мірою впливає на довговічність ПК, може бути нова технологія, в якій всі операції здійснюються методом ЕІЛ. Означено, що для визначення більш раціональної технології нанесення бабітових покриттів, необхідно розробити фізично обґрунтований математичний модель, що пов'язує знос певної кількості бабіту з витраченою на це роботою тертя.

2. АНАЛІЗА ОСНОВНИХ ДОСЯГНЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіза літературних джерел, присвячених підвищенню довговічності антифрикційних покриттів, у тому числі і бабітових, як опорних [2], так і упорних [3], показала, що цією проблемою займається велика кількість дослідників. В [4] розглянуто реалізацію математичного моделювання коливань ротора на нелінійних опорах підшипників для багатоступінчастого відцентрового компресора за допомогою комп'ютерної програми «Критичні частоти ротора». В [5] розглядається можливість підвищення надійності ПК за рахунок нанесення спеціального регулярного мікрорельєфу. Міцність зчеплення крицевої підкладинки з антифрикційним бабітовим шаром підвищують за рахунок нанесення методом ЕІЛ проміжного шару з міді, як в ПК [6], так і у плавальних ущільненнях [7]. При цьому технологія ЕІЛ екологічно і техногенно безпечна [8].

Для підвищення несучої здатності ПК велика увага приділяється і поверхні тертя, з якою контактує бабітове покриття. Наприклад, в [9] запропоновано нову більш ефективну технологію виготовлення захисних втулок із криці 38ХМЮА або 40ХН2МА, поверхневий шар яких піддається комплексній технології зміцнення: йонне азотування, полірування, цементация з використанням ЕІЛ, неабразивне ультразвукове фінішне оброблення. Згідно [10] для рухомих з'єднань у машинобудуванні використовуються різні типи підшипникових вузлів, досить широко для цього застосовуються пари ковзання (ПК, напрямні, втулки). Це дає змогу збільшити цупкість агрегатів для пониження їх розмірів, поліпшити відведення

тепла та забезпечити пониження шуму та вібрації.

У [11] дається огляд теоретичних і експериментальних досягнень мехатроніки з рідинною плівкою, що наноситься на підшипники. Розглянуто стислі та нестисливі рідини. Основна мета використання керованої рідинної плівки підшипників — це покращення загальної продуктивності машини шляхом контролю поперечної вібрації жорстких і гнучких обертових валів; зміни динамічних характеристик підшипника, таких як цупкість і демпфувальні властивості; пониження пускового моменту і розсіювання енергії в підшипниках; компенсації термічного впливу. Показано, що такі керовані підшипники з рідинною плівкою можуть діяти як «розумні» компоненти машин і застосовуватися до обертових і поршневих машин з метою уникнення несподіваних їх зупинок, проведення динамічних випробувань ротора.

Незважаючи на велику кількість праць, присвячених підвищенню якості ПК, а також метод нанесення бабітових покриттів, важко без проведення порівняльних випробувань, віддати перевагу тому, чи іншому технологічному рішенню.

Таким чином, метою роботи є встановлення кореляційної залежності між роботою тертя, затраченою при зношуванні бабітових покриттів, нанесених за різними технологіями та зносом, і на їх підставі розробити фізично обґрунтований математичний модель, що дасть змогу визначати як пряму задачу — знос по відомій роботі тертя, так і зворотню — роботу тертя, необхідну для досягнення певної кількості зносу.

3. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У якості дослідницьких об'єктів служили зразки із криці 20 у вигляді колодок з бабітовими покриттями, нанесеними різними методами: надзвукове напорошення, традиційне відцентрове заливання, відцентрове заливання з перехідним шаром з міді, традиційне наливне заливання, наливне заливання з перехідним шаром з міді, методом ЕІЛ. Зносостійкість бабітових покриттів, площею 1 см^2 визначалася на машині тертя СМЦ-2 за схемою «диск-колодка» (рис. 1).

Перед випробуваннями колодку розточували на токарному верстаті у спеціальному пристосуванні до збігу поверхні тертя (бабіту) з допуском на діаметер, що відповідає посадці ковзання. Контактувальний з колодкою диск розмірами $\varnothing 50 \times \varnothing 15 \times 10$ мм виготовляли із криці 40Х. Далі зразки встановлювали на машину тертя та припрацьовували протягом 1 год. з питомим навантаженням 2,0 МПа. Приробіток вважався закінченим, якщо частка приробленої поверхні становила не менше 95% від номінальної. Після приробітку зразки піддавалися вимірюванням.

Для визначення інтегрального зносу всієї поверхні бабітового

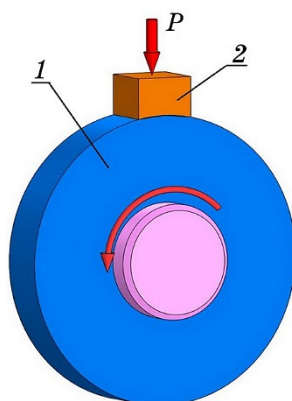


Рис. 1. Схема проведення порівняльних іспитів на знос поверхонь пари тертя бабітова колодка–шийка ПК: 1 — диск, 2 — колодка.

Fig. 1. Scheme of the wear comparative tests of the friction pair surfaces 'babbitt pad-neck SB': 1—disc, 2—pad.

покриття колодки перед випробуванням зважували на аналітичних вагах ВЛА-200 з точністю до 0,0001 г, встановлювали на машину, навантажували, і проводився експеримент при постійній швидкості ковзання та питомому навантаженні. Після кожних 2 годин знімали свідчення ваги.

Перед кожним іспитом на диск капали одну краплю турбінного мастила Т-22. Швидкість ковзання становила 0,78 м/с, питомий тиск — 5,0 МПа, навантаження на колодку — 1000 Н, тривалість випробувань — 8 год., що відповідало шляху тертя 22,5 км. Крім того, в процесі іспитів вимірювали момент тертя, контролювали швидкість ковзання та навантаження у зоні тертя.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Спрямований вибір технології нанесення бабітових покриттів. Враховуючи, що метод формування на вкладишах ПК бабітових покриттів існує велика кількість (див. рис. 3 в [1]) і важко без проведення додаткових порівняльних досліджень визначити, який з них більш раціональний, з'являється гостра необхідність у створенні математичного моделю, який би пов'язував експлуатаційні параметри, в яких працює ПК (швидкість ковзання, питомий тиск, навантаження на колодку, умови змащення та ін.) і параметри, які визначають зношування поверхні бабітового покриття (ваговий знос — $\Delta m_{б.п.}$, лінійний знос — $\Delta h_{б.п.}$). Порівняння параметрів зносу дасть змогу вибрати більш раціональний спосіб формування бабітового покриття, тобто здійснити спрямований їх вибір.

В якості критеріїв показників зношування поверхонь деталей традиційно використовують граничне навантаження, час або число циклів навантаження до утворення дефектів, межу плинності та межу плазучості, тимчасовий опір, критичні деформації, твердість поверхні та ін. Але ці критерії більш прийнятні до неприпустимих видів зношування, таких як схоплювання, контактна втома, фреттинг-процес, корозійно-механічні та абразивні процеси.

Нами ж розглядається процес нормального тертя та зношування, до якого слід віднести механохімічний знос і його основний прояв — окисний знос. Зношування бабітового покриття у нормальному процесі зношування визначає ресурс роботи підшипника — його довговічність.

Система тертя є істотно термодинамічною, а закономірності перетворення енергії із зовнішньої механічної в енергію внутрішніх процесів визначаються структурним станом матеріалів, видом кристалічних ґратниць і фізико-хімічною дією мастильних середовищ.

В [12–15] детально розглядається залежність нормального зносу від різних чинників: наявності чи відсутності мастила в парі тертя, коефіцієнту тертя, сили тертя та інших. В [16] при проведенні порівняльних випробувань антифрикційних матеріалів, нанесених методом ЕІЛ [17, 18], підкреслюється, що між ваговим і лінійним зносом і часом випробування існує експоненціальна залежність. Спочатку в період припрацювання відбувається більш інтенсивний знос, який поступово зменшується і настає період сталого зношування.

Багато властивостей тіл пов'язані зі зміною їхньої вільної енергії при зовнішньому впливі, яка своєю чергою визначає зміну властивостей та розмірів тіла. Величина запасеної енергії та енергоємність є суттєвими технологічними характеристиками, за якими можна судити про досягнуту зміну властивостей або розмірів тіла при заданому вигляді зовнішнього оброблення.

Таким чином, з вищесказаного слідує, що основними при оцінці тієї чи іншої методи досягнення необхідної якості поверхневого шару виробу повинні бути енергетичні критерії. Згідно [19] енергетичні критерії надають визначальний вплив на зносостійкість поверхневих шарів, сформованих різними технологіями.

Перевага енергетичного підходу перед іншими полягає у можливості оцінити інтегральний вплив всіх численних чинників на процеси тертя та зношування й опису їх за допомогою енергетичних критеріїв.

Оскільки великі механічні навантаження, що виникають при зовнішньому терті, приводять до різкої зміни фізико-механічних властивостей поверхневих шарів та їх корінної трансформації (механічна енергія стимулює хімічні реакції), то за критерій зношування можна прийняти енергію активації процесу зносу E_A .

Якщо припустити, що під впливом зовнішнього напруження, що

додається до покриття, енергія зв'язку понижується на величину енергії деформації, то, оскільки розрив зв'язку окремих частинок з поверхнею покриття є дискретною стадією процесу активації в період зносу, різниця розглядається як енергія активації процесу зносу.

Для одержання достовірної інформації про правильність обраного способу зміцнення поверхневого шару виробу нам необхідний математичний модель зносу сформованих покриттів, що зв'язує величину зношування поверхні з роботою витраченої на тертя та енергією активації процесу зношування.

В результаті проведення експериментальних досліджень було одержано величини вагового зносу зразків, які представлено в табл. 1.

За одержаними даними будуємо графіки залежності зносу від часу роботи тертя для кожної методи (рис. 2).

Роботу тертя за одну годину для кожної пари тертя можна визначити за формулою

$$A_{\text{тр}} = f_{\text{тр}} P V t,$$

де $f_{\text{тр}}$ — коефіцієнт тертя; P — навантаження на колодку; V — швидкість ковзання; t — час випробування (3600 с).

Слід відзначити, що коефіцієнт тертя для покриття 1, сформованого методом надзвукового напорошення складає $\cong 0,046$, а для усіх інших — $\cong 0,040$.

Таким чином, робота тертя за 1 годину становитиме для покриття 1

$$A_{\text{тр}} = 0,046 \cdot 1000 \cdot 0,78 \cdot 3600 = 129168 \text{ Дж};$$

ТАБЛИЦЯ 1. Ваговий знос зразків бабітових покриттів, нанесених різними способами.

TABLE 1. Weight wears of babbitt coatings' samples, applied by different methods.

№ п/п	Метода нанесення	Величина вагового зносу $\Delta m_{\text{б.п.}}$ ($\cdot 10^{-3}$ кг) за тривалості випробування, год.			
		2	4	6	8
1	Надзвукове напорошення	0,034	0,044	0,050	0,056
2	Відцентрове заливання	0,027	0,036	0,041	0,046
3	Відцентрове заливання з перехідним шаром з міді	0,026	0,034	0,037	0,041
4	Наливне заливання	0,025	0,032	0,035	0,038
5	Наливне заливання з перехідним шаром з міді	0,023	0,029	0,031	0,033
6	Метода ЕІЛ	0,018	0,023	0,024	0,025

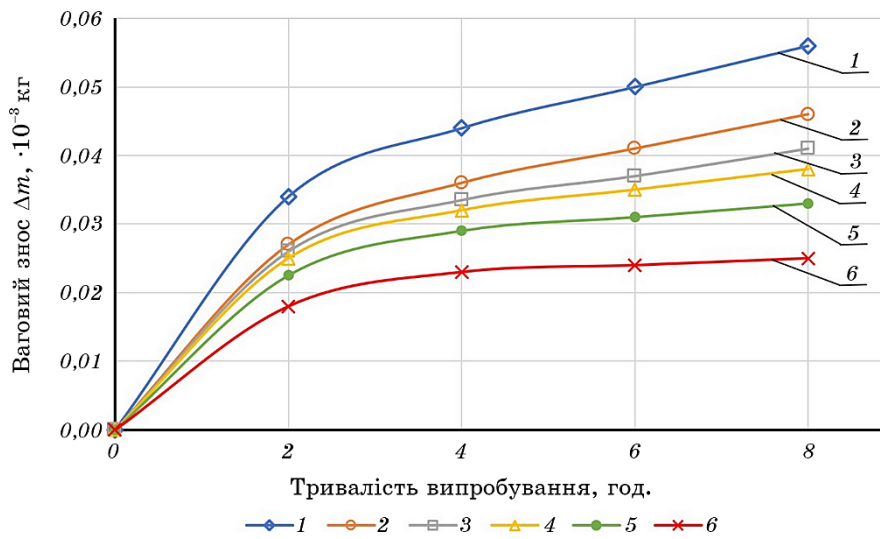


Рис. 2. Графік залежності вагового зносу від тривалості випробування, де 1–6 згідно табл. 1.

Fig. 2. The graph of the weight wear on the test time dependence, where 1–6 according to the Table 1.

для інших покриттів

$$A_{\text{тр}} = 0,040 \cdot 1000 \cdot 0,78 \cdot 3600 = 112320 \text{ Дж.}$$

Залежність вагового зносу бабітових покриттів, сформованих різними технологіями, від тривалості випробування від оберненої роботи тертя ($A_{\text{тр}}^{-1}$) представлено на рис. 3.

Аналіза рис. 2 показує, що між роботою тертя $A_{\text{тр}}$ і ваговим зносом бабітового покриття $\Delta m_{\text{б.п.}}$ існує зростаюча експоненційна залежність, а між $A_{\text{тр}}^{-1}$ і $\Delta m_{\text{б.п.}}$ спадна експоненційна залежність. Зі збільшенням величини роботи, витраченої на тертя ($A_{\text{тр}}$), знос збільшується тим більше, чим більше енергія активації E_A .

З експериментальної залежності $\Delta m_{\text{б.п.}}$ від $(-A_{\text{тр}})^{-1}$ (спадна експонента) можна зробити висновок, що $\ln \Delta m_{\text{б.п.}}$ пропорційний $(-A_{\text{тр}})^{-1}$ і величині E_A (рис. 4). Тобто

$$\ln \Delta m_{\text{б.п.}} \propto (-A_{\text{тр}})^{-1}, E_A. \quad (1)$$

Переходячи від наближеної рівності до точної

$$\Delta m_{\text{б.п.}} = C e^{\frac{-E_A}{A_{\text{тр}}}}, \quad (2)$$

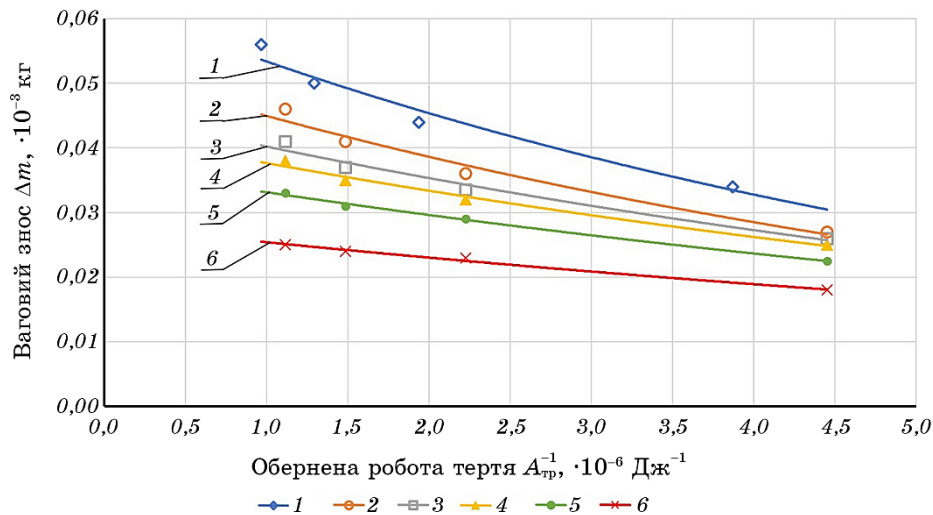


Рис. 3. Залежність вагового зносу бабітових покриттів, сформованих різними технологіями від оберненої роботи тертя $A_{тр}^{-1}$, де 1–6 згідно табл. 1.

Fig. 3. Dependence of weight wear of babbitt coatings formed by various technologies on the inverse work of friction $A_{тр}^{-1}$, where 1–6 according to Table 1.

де $C = \Delta m_{б.п.мак}$ — максимально допустимий знос в період встановленого зношування. Тоді

$$\Delta m_{б.п.} = \Delta m_{б.п.мак} e^{\frac{-E_A}{A_{тр}}} \quad (3)$$

Залежність (3) назвемо рівнянням зносу.

Приймаючи в (3)

$$E_A = A_{тр}, \quad (4)$$

маємо

$$\frac{\Delta m_{б.п.}}{\Delta m_{б.п.мак}} = e^{-1}. \quad (5)$$

Звідси E_A — це фізична величина, рівна такій роботі тертя, коли

$\Delta m_{б.п.} = \frac{\Delta m_{б.п.мак}}{e}$, тобто $\Delta m_{б.п.}$ в e раз менше $\Delta m_{б.п.мак}$. Назвемо її кон-

стантою зносу бабітових покриттів. Розмірність $[E_A] = \text{Дж}$.

Щоб перейти від вагового зносу до лінійного, тобто зносу, що визначає ступінь зміни розміру виробу по глибині, необхідно рівняння зносу (3) записати у вигляді

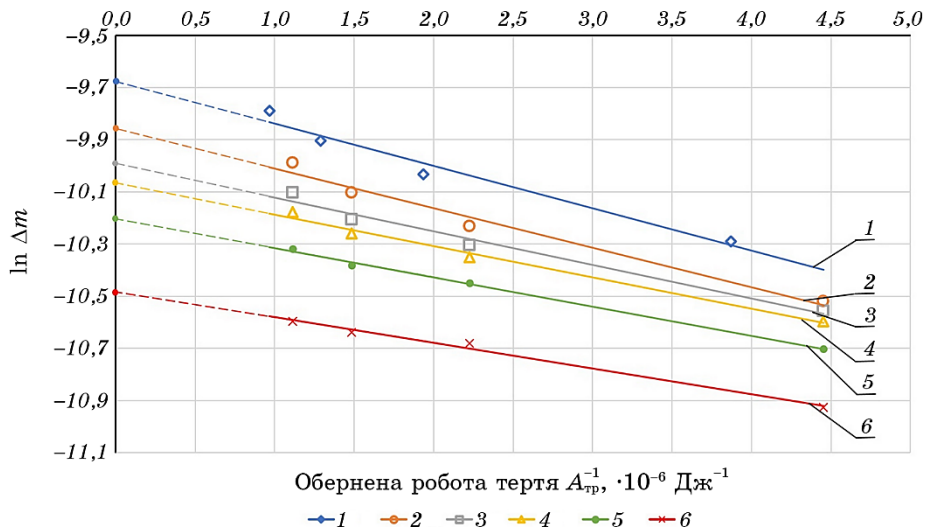


Рис. 4. Графіки залежності логарифму вагового зносу від оберненої роботи тертя, де 1–6 згідно табл. 1.

Fig. 4. Graphs of the dependence of the logarithm of weight wear on the inverse work of friction, where 1–6 according to Table 1.

$$\Delta h_{6.п.} S r_{6.п.} = \Delta h_{6.п.маx} S r_{6.п.маx} e^{\frac{-E_A}{A_{тр}}}, \tag{6}$$

де S — площа поверхні, що зношується, r , $r_{6.п.маx}$ відповідно щільність поверхневого шару під час зношування, що встановилося, і в період наступу максимального зносу, тобто зносу на найбільшу глибину періоду зношування $\Delta h_{6.п.маx}$.

Після необхідних перетворень маємо

$$\Delta h_{6.п.} = \Delta h_{6.п.маx} \frac{r_{6.п.маx}}{r_{6.п.}} e^{\frac{-E_A}{A_{тр}}}. \tag{7}$$

Таким чином, при визначенні лінійного зносу необхідно робити поправку на зміну щільності шару, що зношується.

Підставляючи в (7) співвідношення (4), маємо

$$\Delta h_{6.п.} = \Delta h_{6.п.маx} \frac{r_{6.п.маx}}{r_{6.п.}} e^{-1}. \tag{8}$$

Звідси

$$\frac{\Delta h_{6.п.} r_{6.п.}}{\Delta h_{6.п.маx} r_{6.п.маx}} = e^{-1}, \tag{9}$$

що збігається з (5).

Отже, E_A — це фізична величина, що дорівнює такій роботі тертя, за якої $\Delta h_{б.п.} r_{б.п.}$ в e раз менше за $\Delta h_{б.п.маж} r_{б.п.маж}$. Зазначимо, що для $r_{б.п.маж} = r_{б.п.}$ маємо: $\Delta h_{б.п.} / \Delta h_{б.п.маж} = e^{-1}$.

Величину роботи тертя, необхідну для здійснення зносу певної кількості речовини ($\Delta m_{б.п.х}$) або для одержання необхідного лінійного зносу ($\Delta h_{б.п.х}$), можна визначити з рівнянь (3) та (7); відповідно,

$$A_{тр} = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta m_{б.п.маж}}{\Delta m_{б.п.х}}}; \quad (10)$$

$$\Delta A'_{тр} = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta h_{б.п.маж} r_{б.п.маж}}{\Delta h_{б.п.х} r_{б.п.х}}}. \quad (11)$$

Визначення констант рівняння зносу. Найбільшу величину вагового зносу, $\Delta m_{б.п.маж}$ — константу рівняння зносу, можна визначити по величині відрізка, що відтинається на вісі ординат точкою перетину продовженої прямої графіка залежності логарифму вагового зносу від оберненої роботи тертя (рис. 4).

Як видно з рисунку, продовження кривої I до перетину з віссю ординат (при $1/A_{тр} = 0$) перетинає її в точці $-9,68$. Таким чином,

$$\ln \Delta m_{б.п.маж} = -9,68, \Delta m_{б.п.маж} = e^{-9,68} = 0,063 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Аналогічно визначаємо максимальний ваговий знос для інших зразків. Одержані результати заносимо в табл. 2.

Друга константа рівняння зносу бабітових поверхонь — енергія активації E_A визначається, як $E_A = \text{tg} \alpha$, де α — кут нахилу прямих залежностей $\ln \Delta m_{б.п.}$ від $(A_{тр})^{-1}$.

Результати розрахунку енергії активації (константи лінійного

ТАБЛИЦЯ 2. Константи рівняння зносу.

TABLE 2. Constants of the wear equation.

Метода зміцнення	$\Delta m_{б.п.маж}, \cdot 10^{-3}, \text{ кг}$	$\Delta h_{б.п.маж}, \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$E_A, \text{ Дж}$
1	0,063	0,085	162400
2	0,052	0,071	151700
3	0,046	0,062	129300
4	0,042	0,058	120500
5	0,037	0,050	112200
6	0,028	0,038	98200

ТАБЛИЦЯ 3. Лінійний знос зразків.

TABLE 3. Linear wear of samples.

№ п/п	Метода нанесення	Величина лінійного зносу $\Delta h_{\text{б.п.}}$ ($\cdot 10^{-3}$ м) за тривалості випробування, год.			
		2	4	6	8
1	Надзвукове напорошення	0,046	0,060	0,068	0,076
2	Відцентрове заливання	0,037	0,049	0,056	0,062
3	Відцентрове заливання з перехідним шаром з міді	0,035	0,045	0,050	0,056
4	Наливне заливання	0,034	0,043	0,047	0,051
5	Наливне заливання з перехідним шаром з міді	0,030	0,039	0,042	0,045
6	Метода ЕІЛ	0,024	0,031	0,033	0,034

зносу) процесу зносу E_A занесені в табл. 2.

Для визначення лінійного зносу бабітового покриття $\Delta h_{\text{б.п.}}$ скористаймося формулою зв'язку між масою (кг) та об'ємом (м^3):

$$\Delta m_{\text{б.п.}} = \rho \Delta V_{\text{б.п.}} = \rho F \Delta h_{\text{б.п.}},$$

де ρ — щільність матеріалу зразка, для бабіту 7380 кг/м^3 ; F — площа поверхні контакту зразка та диску, мм^2 ;

$$F = a^2 = 0,01^2 = 0,0001 \text{ м}^2.$$

Звідси

$$\Delta h_{\text{б.п.}} = \frac{\Delta m_{\text{б.п.}}}{\rho F}.$$

Виконавши перерахунок вагового зносу в лінійний (табл. 3), будемо графік залежності величини лінійного зносу від тривалості випробування, який представлено на рис. 5.

У відповідності з методикою визначення констант рівняння зносу, будемо графік залежності лінійного зносу від оберненої роботи тертя (рис. 6) та виконуємо логарифмування осі лінійного зносу. Одержана залежність представлена на рис. 7.

Як і у випадку вагового зносу енергія активації визначається тангенсом кута нахилу графіку залежності $\ln \Delta h = f(A_{\text{тр}}^{-1})$ для кожної розглянутої методи. Як показують розрахунки значення енергії активації повністю співпадають з визначеними раніше для вагового зносу і наведено в табл. 2.

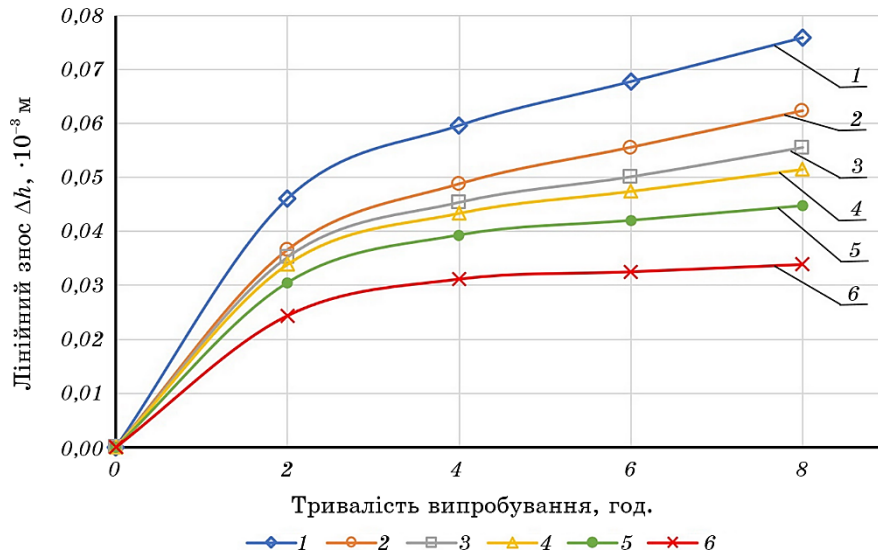


Рис. 5. Залежність лінійного зносу від тривалості випробувань, де 1–6 згідно табл. 3.

Fig. 5. Dependence of linear wear on the duration of tests, where 1–6 according to Table 3.

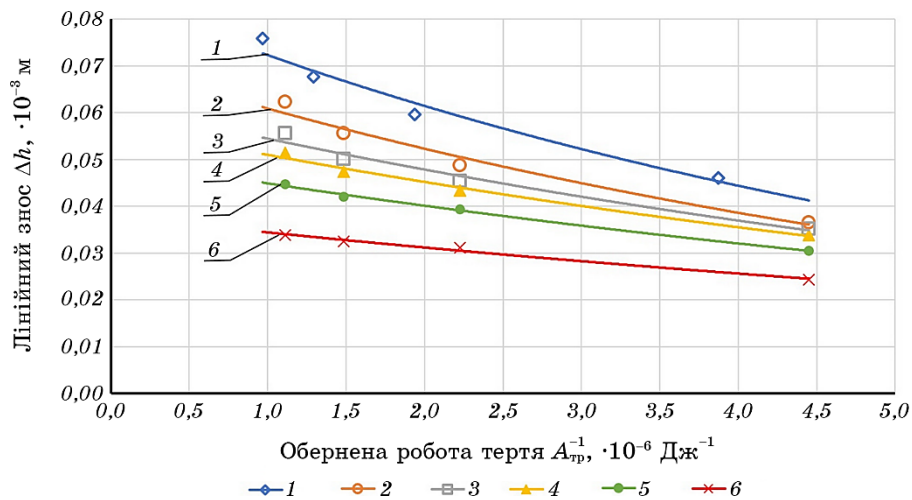


Рис. 6. Залежність лінійного зносу від оберненої роботи тертя, де 1–6 згідно табл. 3.

Fig. 6. Dependence of linear wear on the inverse work of friction, where 1–6 according to Table 3.

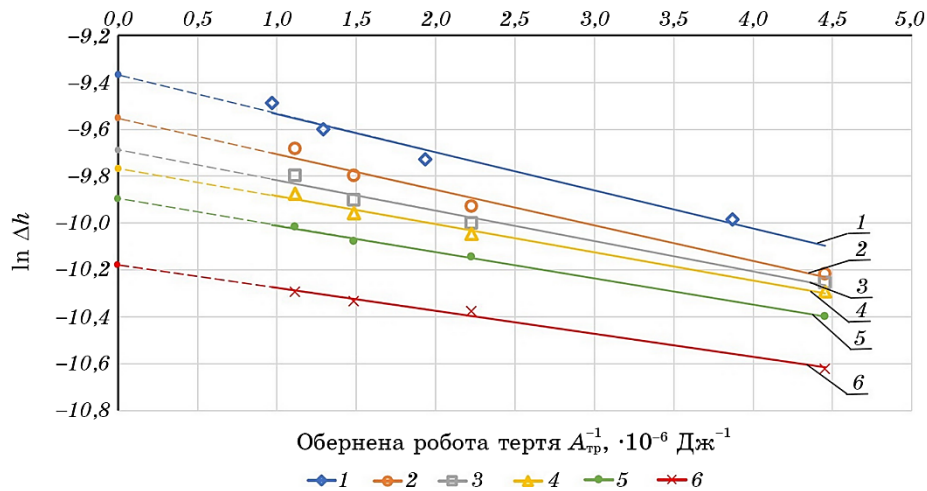


Рис. 7. Залежність логарифму лінійного зносу від оберненої роботи тертя, де 1–6 згідно табл. 3.

Fig. 7. Dependence of the logarithm of linear wear on the inverse work of friction, where 1–6 according to Table 3.

У загальному вигляді алгоритм розрахунку енергетичних критеріїв полягає у наступному.

1. Експериментально вимірюється ваговий $\Delta m_{б.п.}$ та лінійний $\Delta h_{б.п.}$ знос бабітового покриття при різних величинах, зворотних роботи тертя $(A_{тр})^{-1}$.

2. Будуються графіки залежності $\ln \Delta m_{б.п.}$ та $\ln \Delta h_{б.п.}$ від $(A_{тр})^{-1}$.

3. Визначається енергія активації (константа зносу E_A), як $E_A = |\operatorname{tg} \alpha|$, де α — кут нахилу прямих залежностей $\ln \Delta m_{б.п.}$ та $\ln \Delta h_{б.п.}$ від $(A_{тр})^{-1}$.

4. По відрізок, що відсікається на осі ординат прямою, екстрапольованою до значення абсциси $A_{тр}^{-1} = 0$), знаходиться ваговий та лінійний знос насичення, відповідно $\Delta m_{б.п. \max}$ та $\Delta h_{б.п. \max}$.

5. За формулами (10) та (11) можна знайти величину роботи тертя, необхідну для здійснення зносу певної кількості речовини ($\Delta m_{б.п. x}$) або для одержання необхідного лінійного зносу ($\Delta h_{б.п. x}$).

5. ВИСНОВКИ

1. Розроблено систему спрямованого вибору найбільш раціональної технології нанесення бабітового покриття на вкладиші ПК, яка враховує як економічні, так і екологічні вимоги.

2. Запропоновано фізично обґрунтований математичний модель процесу зносу бабітових покриттів (рівняння зносу), який дає змогу

вирішувати як пряму задачу — визначати ваговий та лінійний знос за відомою роботою тертя, так і зворотню — знаходити необхідну роботу тертя для одержання того чи іншого зносу. Знаючи час досягнення певної величини зносу, з'являється можливість більш раціональної експлуатації виробів, своєчасно призначаючи час ремонту і не допускаючи до катастрофічного зносу поверхні тертя.

3. В процесі виконання досліджень розроблено методику визначення констант рівняння зносу: енергії активації (E_A), а також максимального вагового ($\Delta m_{б.п.н}$) та лінійного зносу ($\Delta h_{б.п.н}$), які можуть бути використані, як критерії вибору найбільш раціональної технології нанесення бабітового покриття.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко, Н. В. Тарельник, М. Ю. Думанчук, М. О. Мікуліна, В. О. Пирогов, С. О. Горовий, Н. К. Медведчук, *Металлофиз. новейшие технол.*, **44**, No. 11: 1475 (2022).
2. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
3. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
4. I. Pavlenko, V. Simonovskiy, V. Ivanov, J. Zajac, and J. Pitel (Eds. V. Ivanov et al.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Cham: Springer: 2019), p. 325.
5. E. A. Petrovsky, K. A. Bashmur, Yu. N. Shadchina, V. V. Bukhtoyarov, and V. S. Tynchenko, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1399**: 055032 (2019).
6. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and B. Antoshevskii, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **53**: 285 (2017).
7. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and V. I. Yurko, *Chem. Petrol. Eng.*, **51**: 328 (2015).
8. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskii, Yu. I. Semirnenko, N. V. Tarelnyk, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, **57**: 173 (2021).
9. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and V. I. Yurko, *Chem. Petrol. Eng.*, **51**: 402 (2015).
10. A. S. Kalinichenko, U. L. Basiniuk, and E. I. Mardasevich, *Sci. Tech.*, **18**, Iss. 3: 195 (2019).
11. I. F. Santos, *Mech. Ind.*, **12**: 275 (2011).
12. Д. Н. Гаркунов, Э. Л. Мельников, В. С. Гаврилюк, *Триботехника: Учебное пособие* (Москва: КНОРУС: 2015).
13. А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др., *Трение, износ и смазка: (Трибология и триботехника)* (Ред. А. В. Чичинадзе) (Москва: Машиностроение: 2003).
14. Н. С. Пенкин, *Основы трибологии и триботехники. Учебное пособие* (Москва: Машиностроение: 2012).
15. Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец, *Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии* (Москва: ФИЗМАТЛИТ:

- 2007).
16. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 385 (2017).
 17. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 114 (2017).
 18. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 266 (2017).
 19. Ю. И. Бабей, М. Е. Гуревич, Е. Л. Докторович, *Физико-химическая механика материалов*, № 2: 76 (1979).

REFERENCES

1. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ie. V. Konoplianchenko, N. V. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, M. Y. Dumanchuk, M. O. Mikulina, V. O. Pirogov, and N. K. Medvedchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 11: 1475 (2022) (in Ukrainian).
2. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
3. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
4. I. Pavlenko, V. Simonovskiy, V. Ivanov, J. Zajac, and J. Pitel (Eds. V. Ivanov et al.), *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Cham: Springer: 2019), p. 325.
5. E. A. Petrovsky, K. A. Bashmur, Yu. N. Shadchina, V. V. Bukhtoyarov, and V. S. Tynchenko, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1399**: 055032 (2019).
6. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and B. Antoshevskii, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **53**: 285 (2017).
7. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and V. I. Yurko, *Chem. Petrol. Eng.*, **51**: 328 (2015).
8. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskii, Yu. I. Semirnenko, N. V. Tarelnyk, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, **57**: 173 (2021).
9. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and V. I. Yurko, *Chem. Petrol. Eng.*, **51**: 402 (2015).
10. A. S. Kalinichenko, U. L. Basiniuk, and E. I. Mardasevich, *Sci. Tech.*, **18**, Iss. 3: 195 (2019).
11. I. F. Santos, *Mech. Ind.*, **12**: 275 (2011).
12. D. N. Garkunov, Je. L. Mel'nikov, and V. S. Gavriljuk, *Tribotekhnika: Uchebnoe Posobie* [Tribotechnology: Textbook] (Moscow: KNORUS: 2015) (in Russian).
13. A. V. Chichinadze, Ye. M. Berliner, Ye. D. Braun et al., *Trenie, Iznos i Smazka: (Tribologiya i Tribotekhnika)* [Friction, Wear and Lubrication: (Tribology and Tribotechnics)] (Ed. A. V. Chichinadze) (Moscow: Mashinostroenie: 2003) (in Russian).
14. N. S. Penkin, *Osnovy Tribologii i Tribotekhniki. Uchebnoe Posobie* [Fundamentals of Tribology and Tribotechnics. Textbook] (Moscow: Mashinostroenie: 2012) (in Russian).
15. N. K. Myshkin and M. I. Petrokovets, *Trenie, Smazka, Iznos. Fizicheskie Osno-*

vy i Tekhnicheskie Prilozheniya Tribologii [Friction, Lubrication, Wear. Physical Foundations and Technical Applications of Tribology] (Moscow: FIZMATLIT: 2007) (in Russian).

16. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 385 (2017).
17. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 114 (2017).
18. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 266 (2017).
19. Yu. I. Babey, M. E. Gurevich, and E. L. Doktorovich, *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov*, No. 2: 76 (1979) (in Russian).