

КРИТЕРІЇ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ БАБІТОВИХ ПОКРИТТІВ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ РОТОРНИХ МАШИН

Тарельник В.Б., д.т.н., професор, Пирогов В.О., аспірант,
Сумський національний аграрний університет

Анотація. В роботі запропоновано фізично обґрунтовану математичну модель процесу зносу бабітових покриттів, яка дозволяє вирішувати як пряму задачу – визначати ваговий знос за відомою роботою тертя, так і зворотню – знаходити необхідну роботу тертя для отримання зносу. Розроблено методику визначення констант рівняння зносу: енергії активації і максимального вагового зносу, які можуть бути критеріями вибору найбільш раціональної технології нанесення бабітового покриття.

Ключові слова: підшипники ковзання, бабітові покриття, знос, математична модель, електроіскрове легування, константи рівняння зносу.

CRITERIA FOR CHOOSING THE TECHNOLOGY OF APPLYING BABITE COATINGS TO SLIDING BEARINGS OF ROTOR MACHINES

Tarelnyk V.B., DrSc, professor, Pirogov V.O., PhD student,
Sumy National Agrarian University

Abstract. In the paper is proposed a physically based mathematical model of the babbitt coatings wear process, which allows solving both the direct problem of determining weight wear based on the known work of friction, and the inverse problem of finding the necessary work of friction to determine wear. A technique for determining of the wear equation constants: activation energy and maximum weight wear, which can be criteria for choosing the most rational technology for applying a babbitt coating, has been developed.

Key words: sliding bearings, babbitt coatings, wear, mathematical model, electro-spark alloying, wear equation constants.

Вступ

Більшість відповідальних деталей і вузлів роторних машин (компресорів, насосів, турбін та інших машин) працюють при високих швидкостях, навантаженнях і температурах, а також в умовах корозійного, абразивного та інших видів впливу робочих серед.

Рішення проблеми, пов'язаної зі збільшенням термінів їх служби, безпосередньо залежить від підвищення зносостійкості і надійності вузлів тертя. При великій різноманітності умов роботи деталей найбільш навантаженим у них є поверхневий шар. Тому реальний ресурс роботи машини напряму залежить від несучої здатності поверхні деталей, яка визначає якість їх поверхневого шару. Таким чином, створення поверхневих шарів з особливими властивостями для

умов тертя ковзання, в даному випадку підшипників ковзання (ПК), є актуальною задачею.

За статистикою до 32% відмов роторних машин, що експлуатуються в різних галузях України, відбуваються через порушення роботи бабітових ПК, найчастіше це пов'язано з руйнуванням та зношуванням антифрикційного шару вкладишів підшипників, що призводить до динамічної нестійкості роботи обладнання. Вихід з ладу підшипників ковзання за нормальних умов експлуатації є наслідком різних видів зношування: кавітація, абразивне зношування, зношування внаслідок пластичної деформації, втомне зношування. У зв'язку з цим проблема підвищення робочих характеристик та ресурсу роботи бабітових підшипників ковзання є важливою і потребує негайного вирішення.

Аналіз публікацій

Стійкість до зносу антифрикційного шару залежить від режиму роботи та конструкції ПК, фізичних властивостей з'єднання шару з основою, жорсткості валу та постелі під підшипниками.

Надійність ПК значною мірою залежить від якості їх виготовлення, а також проведення монтажних і ремонтних робіт, виконання усіх вимог конструкторської й технологічної документації.

Якість поверхневого шару ПК залежить від матеріалу покриття, методу його нанесення, додержання технологічного процесу та ін. Найбільш широко при виготовленні вкладишів підшипників (ВП) використовують антифрикційні сплави на олов'яній і свинцевій основі (бабіти). Бабіти складаються з м'яких металів Sn, Pb, Cd, Sb, Zn і характеризуються наявністю твердих структурних складових у пластичній матриці. Залежно від конструкції ПК бабіт наносять як на криволінійні (рис. 1, *а*, *б*), так і на плоскі поверхні (рис. 1, *в*) [1].

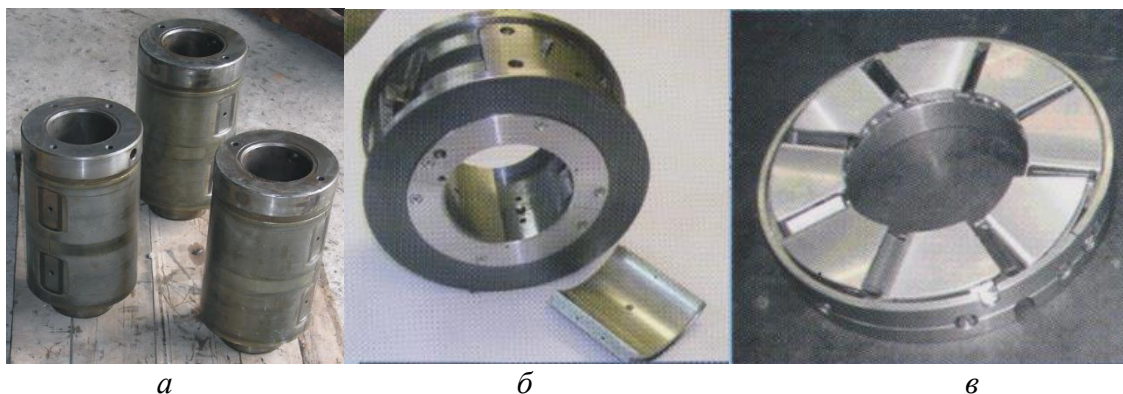


Рисунок 1 – Конструктивні елементи ПК із бабітовим покриттям:
а – зовнішня поверхня опорних пальців зубчастих коліс; *б* – внутрішня поверхня вкладишів опорних ПК; *в* – плоска поверхня упорного ПК

Основні вимоги до антифрикційних сплавів визначаються умовами роботи ПК. Ці сплави повинні мати достатню жорсткість, але не дуже високу,

щоб не викликати сильного зносу валу; порівняно легко деформуватися під впливом місцевих напруг; утримувати мастильний матеріал на поверхні; мати малий коефіцієнт тертя між валом та підшипником. Крім того, значною мірою на працездатність ПК впливає якість зчеплення антифрикційного бабітового шару з підкладкою.

Істотним недоліком бабітів є те, що з підвищенням температури знижуються всі показники механічної міцності, особливо опір втоми.

Зазначені явища мають місце у разі порушення нормальної роботи ПК через: перевищення несучої здатності (допустимого навантаження на підшипник) збідненого мастила; недостатнього охолодження олії; неякісної олії; попадання в мастило абразивних включень; підвищеної механічної вібрації валу.

Однією із суттєвих причин виходу ПС з ладу є неякісна заливка бабіту (рис. 2, а) (погане приставання бабіту до поверхні вкладиша, пористість та ін.) і, як наслідок, неможливість формування масляного клину [2].



Рисунок 2 – Неякісна заливка бабітового шару ПК (а) і перевірка якості адгезії антифрикційного шару методом кольорової дефектоскопії (б).

Якість прилягання бабіту до корпусу вкладиша, як правило, перевіряють методом кольорової дефектоскопії (рис. 2, б). Існують і інші методи: перевірка ультразвуком, візуальний огляд, шляхом обстукування легким молотком, зануренням на 1,5-2,0 години у ванну з гасом, з наступним протиранням насухо і видавлюванням гасу або бульбашок повітря пальцями, та ін.

Зі сказаного вище, що причиною зниження довговічності ПК є фактори, що формуються як на стадії виготовлення, так і при експлуатації.

Більшість способів формування поверхонь бабітових ПК слід розглядати як альтернативні. Один і той самий матеріал покриття може бути нанесений декількома способами. При цьому можуть відрізнятися як властивості покриття, так і витрати на його нанесення.

Зазвичай бабіти заливають на підігріті вкладиші (250 °С) за температури 450-480 °С. Найчастіше застосовують відцентрове заливання. Заливають також у кокіль під тиском, товщина заливки в підшипниках 1-3 мм² [3].

Як правило, перед заливкою бабітів поверхня сталевих вкладишів піддається лудженню. Перехідний шар, що зумовлює міцний металевий зв'язок, при цьому відсутній, що негативно впливає на якість заливки бабіту, теплопровідність та пружність підшипника загалом.

Необхідно відзначити, що зі зменшенням товщини антифрикційного бабітового шару збільшуються його механічні властивості. Найменша товщина заливки допускається 0,25–0,4 мм.

В останні роки для виготовлення та ремонту ПК отримали застосування декілька нових методів: газотермічне напилення, гальванічне нарощування, штамповка в температурному інтервалі кристалізації [4-6].

Для нанесення антифрикційних покриттів досить перспективним є метод електроіскрового легування (ЕІЛ), який все ширше використовується в промисловості. В [7] був запропонований спосіб нанесення антифрикційного бабітового покриття на сталеві вкладиші ПК, який включає нанесення на поверхню вкладишів електроерозійного покриття з м'якого матеріалу (міді, олов'яної бронзи, або олова) методом ЕІЛ. На отримане покриття наносять електроерозійне покриття з олов'яно-сурм'яного бабіту, після чого виконують ЕІЛ графітовим електродом. В результаті на поверхні вкладишів ПК отримують антифрикційне бабітове покриття, що забезпечує підвищення якості вкладишів, їх несучу та навантажувальну здатність, а також надійність та довговічність.

Розробка та впровадження ефективних технологій формування покриттів зумовлена, з одного боку, необхідністю економії дорогих легуючих елементів матеріалу, що наносять, а з іншого – вже наявними умовами експлуатації деталей.

Формування методом ЕІЛ проміжного шару з міді, міцно зчепленого, з одного боку, зі сталеву підкладкою, а з іншого - з шаром олова (утворення твердих розчинів заміщення) та бабіту, забезпечує більш міцне зчеплення сталеву підкладки з бабітом, а також більш інтенсивне відведення тепла із зони тертя [1].

Результати досліджень та їх обговорення

Враховуючи, що методів формування на вкладишах ПК бабітових покриттів існує велика кількість і важко без проведення додаткових порівняльних досліджень визначити який з них більш раціональний, з'являється гостра необхідність у створенні математичної моделі, яка б пов'язувала експлуатаційні параметри в яких працює ПК (швидкість ковзання, питомий тиск, навантаження на колодку, умови змащення і ін.) і параметри, які визначають зношування поверхні бабітового покриття (ваговий знос – $\Delta m_{\text{бп}}$, лінійний знос – $\Delta h_{\text{бп}}$). Порівняння параметрів зносу дозволить вибрати більш раціональний спосіб формування бабітового покриття, тобто здійснити спрямований їх вибір.

Система тертя є істотно термодинамічною, а закономірності перетворення енергії із зовнішньої механічної в енергію внутрішніх процесів визначаються

структурним станом матеріалів, видом кристалічних решіток і фізико-хімічною дією мастильних середовищ.

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 зовнішньої обробки. При практичному виборі технології обробки матеріалів керуються не лише фізико-енергетичними критеріями, що дають основу для визначення ефективності, а й інженерно-економічними.

Таким чином, з вищесказаного слід, що основними при оцінці того чи іншого методу досягнення необхідної якості поверхневого шару виробу повинні бути енергетичні та економічні критерії. Нижче розглянемо енергетичні критерії, що надають визначальний вплив на зносостійкість сформованих різними технологіями поверхневих шарів.

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

Так як великі механічні навантаження, що виникають при зовнішньому терті, призводять 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.

Якщо припустити, що під впливом зовнішнього напруження, що додається до покриття, енергія зв'язку знижується на величину енергії деформації, то оскільки розрив зв'язку окремих частинок з поверхнею покриття є дискретною стадією процесу активації в період зносу, то різниця розглядається як енергія активації процесу зносу.

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

Нами, в умовах нормального тертя та зношування, проводились порівняльні випробування на знос бабітових покриттів, сформованих різними технологіями приведеними в табл. 1. Тобто: 1-надзвукове напилення; 2-відцентрове заливання; 3-відцентрове заливання з перехідним шаром з міді; 4-наливне заливання; 5-наливне заливання з перехідним шаром з міді; 6-метод ЕІЛ.

Зносостійкість покриттів визначалася на машині тертя СМЦ-2 за схемою диск - колодка. Перед кожним іспитом на диск зі сталі 40Х капали одну каплю 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. Після приробітку колодки для визначення інтегрального зносу всієї поверхні перед випробуванням зважували

на аналітичних вагах ВЛА-200 з точністю до 0,0001г, встановлювали на машину і проводився експеримент. Після кожних 2-х годин знімали свідчення ваги.

Крім того, в процесі роботи вимірювали момент тертя, контролювали швидкість ковзання та навантаження у зоні тертя. В результаті проведення експериментальних досліджень було отримано величини вагового зносу зразків, які представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Ваговий знос зразків бабітових покриттів, нанесених різними способами

№ п/п	Метод нанесення	Величина вагового зносу, Δm , кг 10^{-3} при тривалості випробування, год			
		2	4	6	8
1	Надзвукове напилення.	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	Метод ЕЛІ.	0,018	0,023	0,024	0,025

За отриманими даними будуємо графіки залежності зносу від часу роботи тертя для кожного методу (рис. 3).

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

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

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 напилення складає $\sim 0,046$, а для усіх інших $\sim 0,040$.

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

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

для інших

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

Залежність вагового зносу бабітових покриттів, сформованих різними технологіями, від тривалості випробування від оберненої роботи тертя ($A_{\text{тр}}^{-1}$) представлено на рис. 4.

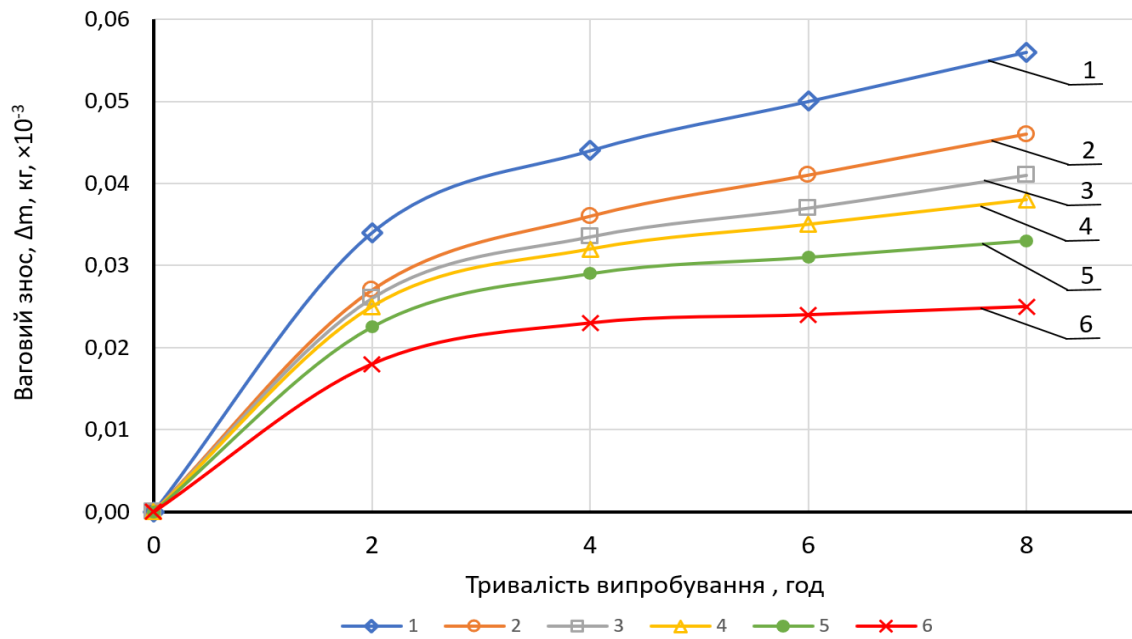


Рисунок 3 – Графік залежності вагового зносу від тривалості випробування, де 1- 6 згідно табл. 1.

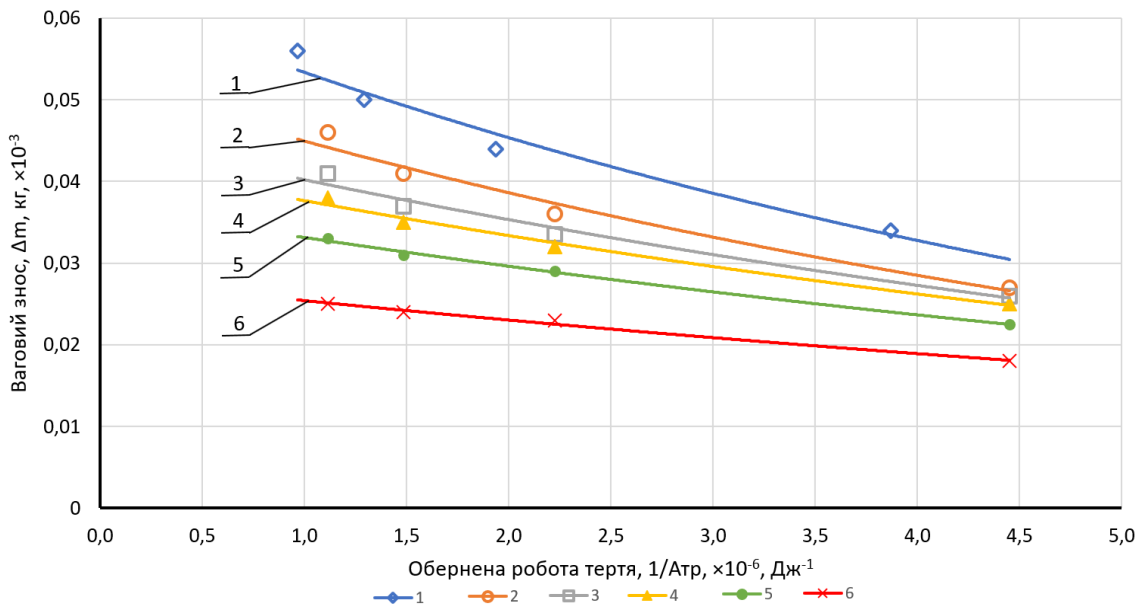


Рисунок 4 – Залежність вагового зносу бабітових покриттів, сформованих різними технологіями від оберненої роботи тертя $A_{тр}^{-1}$, де 1-6 згідно табл. 1.

Аналіз рис. 3 показує, що між роботою тертя $A_{тр}$ і ваговим зносом бабітового покриття $\Delta m_{бп}$ існує зростаюча експоненційна залежність, а між $A_{тр}^{-1}$ і $\Delta m_{бп}$ (рис. 4) убутна експоненційна залежність. Зі збільшенням величини роботи, витраченої на тертя ($A_{тр}$), знос збільшується тим більше, чим більше енергія активації E_A .

З експериментальної залежності $\Delta m_{б.п.}$ від $(-A_{тр})^{-1}$ (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta m_{б.п.}$ пропорційно $(-A_{тр})^{-1}$ і величині E_A (рис. 5).

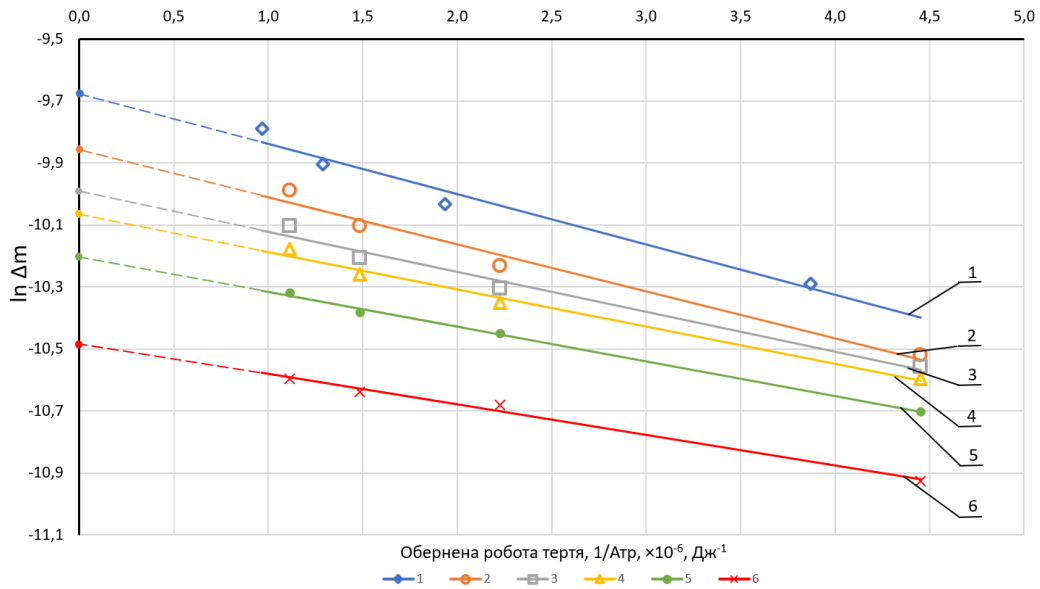


Рисунок 5 – Графіки залежності логарифму вагового зносу від оберненої роботи тертя, де 1- 6 згідно таблиці 1

Тобто

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

Переходячи від наближеної рівності до точної

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

де $C = \Delta m_{\text{б.п.макс}}$ – максимально допустимий знос в період встановленого зношування, тоді

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

Залежність (3) назвемо рівнянням зносу.

Приймаючи в (3)

$$E_A = A_{\text{тр}} \quad (4)$$

маємо:

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

Звідси E_A - це фізична величина, рівна такій роботі тертя, коли $\Delta m_{\text{б.п.}} = \frac{\Delta m_{\text{б.п.макс}}}{e}$, тобто $\Delta m_{\text{б.п.}}$ в e раз менше $\Delta m_{\text{б.п.макс}}$. Назвемо її константою зносу бабітових покриттів. Розмірність $[E_A] = \text{Дж}$.

Величину роботи тертя, необхідну для здійснення зносу певної кількості речовини ($\Delta m_{\text{б.п.х}}$) можна визначити з рівнянь (3).

Тоді відповідно:

$$A_{\text{тр.}} = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta m_{\text{б.п.х.max}}}{\Delta m_{\text{б.п.х}}}}; \quad (6)$$

Визначення констант рівняння зносу

Найбільшу величину вагового зносу, $\Delta m_{\text{б.п.х.max}}$ – 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. 5).

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

$$\ln \Delta m_{\text{б.п.х.max}} = -9,68,$$

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

Аналогічно визначаємо максимальний ваговий знос для інших зразків. Отримані 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 $\ln \Delta m_{\text{б.п.}}$ від $(A_{\text{тр}})^{-1}$.

Результати розрахунку енергії активації (константи лінійного зносу) процесу зносу E_A занесені в табл. 2.

Таблиця 2 – Константи рівняння зносу

Метод зміцнення	$\Delta m_{\text{б.п.х.max}}, \times 10^{-3}, \text{ кг}$	$E_A, \text{ Дж}$
1	0,063	162400
2	0,052	151700
3	0,046	129300
4	0,042	120500
5	0,037	112200
6	0,028	98200

Висновки

1. Запропоновано фізично обґрунтовану математичну модель процесу зносу бабітових покриттів (рівняння зносу), яка дозволяє вирішувати як пряму задачу – визначати ваговий та лінійний знос за відомою роботою тертя, так і зворотню – знаходити необхідну роботу тертя для отримання 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 поверхню тертя.

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

Література

1. Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Антошевський Б. Підвищення якості підшипників ковзання: Монографія.- Суми: Видавництво „МакДен” 2006.- 233 с.

2. Тарельник В.Б. Исследование прочности сцепляемости баббитового слоя подшипников скольжения с подложкой / В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковський, Белоус А.В. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.- Выпуск 94.-2010.- С. 102-108.

3. Гаркунов Д. Н.. Триботехника / Д. Н. Гаркунов.- М.: Машиностроение, 1989.- 327 с.

4. Пометун С.К. Опыт ООО «ТСЗП» по увеличению ресурса оборудования методами газотермического напыления / С.К. Пометун // Химическая техника.-2009.-№ 4.- С. 8-9.

5. Лебедева А.П. Восстановление деталей машин / А.П. Лебедева, Т.Н. Погорелова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.

6. Н.П. Барыкин, Р.Ф. Фазлыяхметов. Изготовление подшипников скольжения с применением штамповки антифрикционного слоя в условиях кристаллизации и последующей пластической деформации // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2006. №9. С. 27-29.

7. Способ обработки вкладышей подшипников скольжения : пат. 2598737 РФ на изобретение, МПК В23Н 9/00 (2006.01) / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Дзюба А.В ; заявл. 21.11.2016 ; опубл. 27.09.2016, Бюл. № 27. 22 с.