

Розроблено методика та пристрій для визначення відносної зносостійкості матеріалів в умовах тертя по незакріпленому абразиву. Запропоновано методика, що дозволяє представити контури абразивних частинок у вигляді функцій та розрахувати параметр гостроти частинок SPL^m. Даний параметр знаходиться у тісній кореляції з інтенсивністю зношування для абразивів різної форми

Ключові слова: абразивна зносостійкість, незакріплені абразив, параметри форми, перетворення Фур'є, ланцюговий код

Разработана методика и устройство для определения относительной износостойкости материалов в условиях трения по незакрепленному абразиву. Предложена методика, позволяющая представить контуры абразивных частиц в виде функций и рассчитать параметр остроты частиц SPL^m, который находится в тесной корреляции с интенсивностью износа для абразивов различной формы

Ключевые слова: абразивная износостойкость, незакрепленный абразив, параметры формы, преобразование Фурье, цепной код

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ТА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ ТЕРТЯ ПО НЕЗАКРІПЛЕНОМУ АБРАЗИВУ

Д. Л. Луцак

Асистент*

E-mail: d.l.lutsak@gmail.com

П. М. Присяжнюк

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: pavlo1752010@yandex.ua

М. Й. Бурда

Доцент*

E-mail: myroslav.burda@gmail.com

В. В. Аулін

Доктор технічних наук, професор

Кафедра експлуатація та ремонт машин

Кіровоградський національний технічний університет

пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, Україна, 25030

E-mail: Aulin52@mail.ru

*Кафедра зварювання конструкцій та відновлення деталей машин Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

1. Вступ

Зношування в умовах тертя по незакріпленому абразиву є поширеним видом спрацювання робочих органів обладнання у таких галузях, як нафтогазова, гірнична, будівельна, переробна, а також при експлуатації землерийної, дорожньої, сільськогосподарської техніки і т.п. Ключовим фактором, що визначає зносостійкість у таких умовах роботи, є раціональний підбір матеріалів для нанесення покриттів на робочі поверхні, які безпосередньо піддаються абразивному впливу при експлуатації. Існуючі підходи, що базуються на емпіричних методах вибору матеріалів лише за рівнем їх твердості є недостатньо ефективними, оскільки у багатьох випадках спостерігається низька кореляція між твердістю та зносостійкістю, зумовлена особливостями мікроструктури поверхневого шару, з одного боку, та специфікою контакт-силового впливу абразивних частинок з різними морфологічними особливостями, з іншого. Тому постає необхідність у розробці нових методик та пристроїв для трибологічних досліджень, які б дозволяли проводити адекватну оцінку порівняльної зносостійкості різного роду матеріалів та покриттів із урахуванням геометричних параметрів абразивних частинок.

Удосконалення існуючих та розробка нових методик триботехнічних випробувань є передумовою раціонального вибору матеріалів для зміцнення деталей залежно від конкретних умов експлуатації, а також розробки нових матеріалів для наплавлення із прогнозованими властивостями.

Враховуючи, що у сучасних умовах асортимент матеріалів для наплавлення безперервно розширюється, а вимоги до їх фізико-механічних характеристик залишаються високими, розробка нових методик та пристроїв для оцінки абразивної зносостійкості є актуальним напрямком сучасної трибології.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На даний час найбільш широко використовують два основні методи визначення зносостійкості матеріалів в умовах тертя по незакріпленому абразиву.

Стандартизований метод згідно ГОСТ 23.208-79 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о жестко закрепленные абразивные частицы» та американський аналог ASTM G65-16 «Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel

Apparatus» передбачають зношування еталонного та досліджуваного зразків абразивними частинками, що подаються у зону тертя та притискаються гумовим роликком, який обертається. Даний метод має наступні недоліки:

- неможливість забезпечення високого значення сили притискання зразка до гумового ролика;
- тривалий час випробувань (10 хв для еталонного зразка та до 60 хв для досліджуваного);
- спеціальні вимоги до поверхні досліджуваних зразків;
- необхідність здійснення припрацювання ролика та його регулярної заміни.

Серед нестандартизованих методів найбільше розповсюдження отримав метод гільзи Лоренца [1], що максимально моделює взаємодію абразивної частинки, розміщеної в середовищі стиснутих абразивних мас, з досліджуваними поверхнями тертя. Суттєвим обмеженням в широкому використанні даного методу є недостатній обмін абразивної маси коло зразка, що призводить до того, що зона зношування збагачується подрібненими та затупленими частинками з пониженою абразивною здатністю: великі зерна розколюються, а нерозколені масивні частинки під дією відцентрових сил зміщуються до периферії випробувальної камери.

Зміна геометричних параметрів абразивних частинок у зоні взаємодії із поверхнею тертя призводить до зміни інтенсивності зношування, а насичення зони взаємодії поверхні зразка з абразивним середовищем подрібненими частинками міняє сам характер взаємодії: замість зношування робочої поверхні зразка відбувається її шаржування абразивом, що докорінно змінює механізм зносу досліджуваної поверхні.

Оцінка абразивної здатності частинок в умовах тертя по незакріпленому абразиву, виходячи із їх форми, найбільш часто проводиться за сукупністю таких параметрів форми, як округлість (R) та співвідношення сторін (AR) [2]. Параметр R визначає ступінь відхилення форми частинки від ідеального круга, розраховують його згідно формули [3]:

$$R = \frac{L^2}{4\pi A_p}, \tag{1}$$

де L – периметр кола площа якого рівна площі проекції частинки, A_p – площа проекції частинки.

Параметр AR представляє собою відношення максимального діаметру Фере (F_{max}) до мінімального (F_{min}) або визначається як співвідношення між радіусами мінімального вписаного та максимального описаного кола [4]. У деяких випадках для характеристики абразивної здатності частинок із розвинутою поверхнею використовується параметр випуклості частинки (C), який представляє собою відношення площі фігури, отриманої шляхом стягування ідеальної мембрани навколо частинки (рис.1, а), до площі проекції частинки [5]:

$$C = \frac{(A_p + A_r)}{A_p}. \tag{2}$$

Зростання параметру C призводить до лінійного зростання інтенсивності зношування.

Результати аналізу впливу форми частинок на інтенсивність абразивного зношування, наведені у роботі [6], показують, що при використанні різних абразивів знос зразка тим більший, чим більший параметр SPL, який представляє собою рівень гостроти кутів при вершинах абразивної частинки, які виходять за межі середнього радіусу \bar{r} (рис. 1, б). Розрахунок його значення проводиться за формулою:

$$SPL = \sum_{i=1}^N \cos\left(\frac{\theta_i}{2}\right), \tag{3}$$

де N – кількість вершин, θ_i – величина кутів при вершинах.

За даними роботи [7], при дослідженні абразивної зносостійкості сталей при терті в середовищі Al_2O_3 на інтенсивність абразивного зношування суттєво впливають розміри частинок. При цьому встановлено, що їх збільшення в діапазоні від 50 до 180 мкм призводить до росту зношування за параболічною залежністю виду:

$$k = 9.2\sqrt{d}, \tag{4}$$

де k – коефіцієнт зносу, d – середній розмір частинок.

Схожа тенденція була виявлена при дослідженні зношування сплавів системи WC-Co у середовищі частинок SiC [8], розміри яких відрізнялись практично на порядок (17,5 та 180 мкм), а також при вивченні абразивного зношування білого чавуну, армованого включеннями карбідних фаз типу Me_3C у середовищі частинок Al_2O_3 з розмірами від 16 до 192 мкм [9].

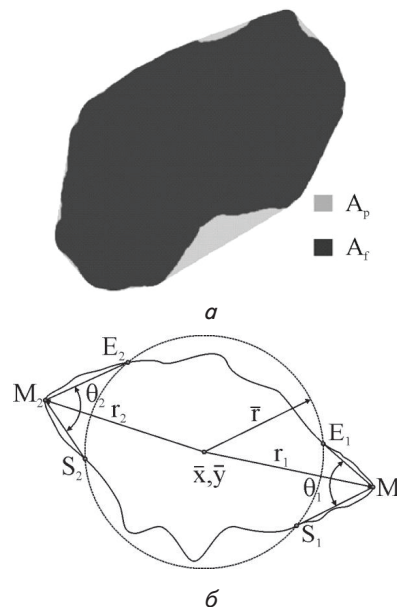


Рис. 1. Схеми для розрахунку параметрів форми: а – випуклості (C) [2]; б – параметра гостроти (SPL) [3]

Таким чином, абразивна здатність частинок за умов трибологічних випробувань визначається комплексним аналізом таких критеріїв, як R, AR, C, SPL, та F_{max} , серед яких найбільш важливим є критерій SPL, оскільки його значення найбільш тісно корелюють із інтенсивністю зношування. Для об'єктивної оцінки параметрів форми абразивних частинок необхідною умовою є максимально точне відтворення їх контуру.

Серед способів, які дозволяють це здійснити, найбільш ефективним є реконструкція форми шляхом використання рядів Фур'є, зокрема за даними [10] форма частинок може бути відтворена шляхом опису форми у полярних координатах (r_i, θ_i) рівнянням:

$$r_i(\theta_i) = r_0 + \sum_{n=1}^N [A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)], \quad (5)$$

де

$$A_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [r_i \cos(i \cdot \theta_i)],$$

$$B_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [r_i \sin(i \cdot \theta_i)],$$

$$r_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [r_i], \quad N - \text{кількість гармонік.}$$

Така методика опису контуру дає можливість виділити ряд ознак форми (дескрипторів), які дозволяють класифікувати частинки: округлість, співвідношення сторін, кількість вершин та їх кривизна. Значення дескриптора D_n для кожної n -ої гармоніки визначається за формулою:

$$D_n = \frac{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}{r_0}. \quad (6)$$

Більш точна методика опису частинок – у вигляді замкнутого контуру, отриманого шляхом Фур'є-перетворення контуру частинки, представленого у вигляді ланцюгового коду Фрімена (полігону, який з'єднає граничні точки контуру) рис. 2 [11].

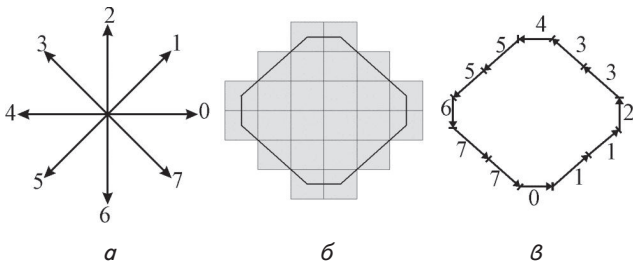


Рис. 2. Схема апроксимації контуру дискретного зображення за допомогою ланцюгового коду Фрімена: а – вектори напрямків; б – зображення об'єкту в пікселях; в – контур ланцюгового коду

Апроксимація ланцюгового коду Фрімена за процедурою перетворення Фур'є розроблена у роботі [12]. Аналітична залежність, що описує контур зображення, представляється у вигляді параметричних рівнянь:

$$\begin{aligned} x_p &= x_c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right), \\ y_p &= y_c + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) + d_n \sin\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right), \end{aligned} \quad (7)$$

де x_c та y_c – координати центра мас частинки p – номер гармоніки, t_p – відстань від початкової точки до заданої

точки p , T – периметр контуру частинки. Коефіцієнти Фур'є (a_n, b_n, c_n, d_n) розраховуються формулами:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} \left(\cos\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - \cos\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right), \\ b_n &= \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} \left(\sin\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - \sin\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right), \\ c_n &= \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta y_p}{\Delta t_p} \left(\cos\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - \cos\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right), \\ d_n &= \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta y_p}{\Delta t_p} \left(\sin\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - \sin\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right), \end{aligned} \quad (8)$$

де $\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta t_p$ – зміщення i -тої точки відносно $(i+1)$ -ої по осі x, y та контуру, відповідно; K – загальна кількість точок, які утворюють контур.

Отже, аналіз ефективності методики трибологічних досліджень зносостійкості матеріалів при терті по незакріпленому абразиву передбачає обов'язкове врахування зміни морфологічних параметрів R, AR, C та SPL за різних умов випробовувань. Для цього необхідною умовою є представлення контурів абразивних частинок у вигляді аналітичних залежностей з високою точністю.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою даної роботи було розроблення методики та пристрою для триботехнічних випробовувань матеріалів в умовах тертя по незакріпленому абразиву.

Для досягнення вказаної мети вирішувалися наступні задачі:

- розробка установки для триботехнічних досліджень на основі гільзи Лоренса;
- розробка методики оцінки ефективності трибологічних досліджень при терті по незакріпленому абразиву на основі оцінки абразивної здатності частинок;
- встановлення кореляційних залежностей між параметрами форми абразивних частинок, що визначають абразивну зносостійкість досліджуваного матеріалу.

4. Матеріали та методика досліджень абразивного зношування

Враховуючи недоліки існуючих методів випробувань, було розроблено методику та пристрій для визначення відносної зносостійкості матеріалів та покриттів [13], що дозволяє проводити випробування матеріалів на зношування незакріпленим абразивом при значних питомих тисках абразиву і високому ступені обміну абразивної маси в зоні взаємодії робочої поверхні зразка із абразивом.

На рис. 3 наведено загальний вигляд та схему розробленого пристрою для дослідження матеріалів на абразивне зношування, який складається із камери 1,

кришки 2, абразивного середовища 3, утримувача 4, досліджуваного зразка 5, втулок 6 та 7, гайки 8, шайб 9 та 10, засобу для відбору абразиву 11.

Пристрій працює наступним чином. Утримувач 4, здійснюючи обертовий рух з частотою $n_{зр}$, забезпечує обертання зразка 5 із досліджуваного матеріалу і тим самим реалізується трибовзаємодія абразивного середовища 3 з робочою поверхнею зразка 5, в результаті чого проходить зношування останньої. Зразок 5 встановлюється на утримувачі 4 під кутом $\alpha_{зр}$ до осі утримувача. Здійснюється це за рахунок двох циліндричних втулок 6 і 7, один із торців яких виконується зкошеним до осі на кут, рівний куту нахилу зразка $\alpha_{зр}$, і гайки 8. Втулки 6 і 7 розміщуються на утримувачі 4 зкошеними поверхнями до торцевих поверхонь зразка 5. Фіксується зразок 5 на утримувачі 4 шляхом затягування гайки 8. Виконання бічної поверхні зразка 5 сферичною із радіусом $R_{зр}$ (15 мм), забезпечує постійну швидкість взаємодії зношуваної поверхні із абразивом 3.

За рахунок прикладання до кришки 2 сили P , абразивне середовище 3 стискається у камері 1, завдяки чому створюється тиск абразивного середовища 3 на робочу поверхню досліджуваного зразка 5.

Розміщення зразка 5 під кутом $\alpha_{зр}$ до осі утримувача 4, при його обертанні спричиняє інтенсивне перемішування абразивного середовища 3 і тим самим викликає оновлення абразивного матеріалу в робочій зоні, чим забезпечується підтримання стабільних умов випробовування.

Величина кута нахилу зразка 5 до осі утримувача 4 вибирається у межах від 10° до 30° , що пояснюється наступним. При куті меншим за 10° перемішування абразиву, а отже і його оновлення, буде малим, що, у кінцевому підсумку, призведе до погіршення умов випробувань, втрати точності і достовірності результатів досліджень. При куті нахилу зразка більшому за 30° у більшій мірі буде зношуватись не бічна поверхня зразка 5, а його торцева поверхня. Оскільки умови взаємодії торцевої поверхні зразка є непостійними (змінна швидкість взаємодії і різний тиск абразивного середовища 3), то і отримані дані випробувань мають низьку достовірність.

Розміщення двох шайб 9 і 10 в контакт з торцевими поверхнями зразка 5 забезпечує зношування під час випробовування тільки бічної поверхні, де умови випробувань постійні і контрольовані. В результаті підвищується достовірність і точність випробувань.

Величина зносу визначається зважуванням зразка на аналітичній вазі до і після проведення випробування.

Переваги даної методики полягають у простоті її реалізації, а також високій точності та інформативності отримуваних результатів випробувань.

Для розробленої конструкції пристрою, з врахуванням умов роботи деталей нафтогазової галузі, вибрано основні параметри випробувань: час випробувань $t=900$ сек; частота обертання $n_{зр}=1,7$ сек⁻¹; питома навантаження $P=5$ МПа; абразив – карбід кремнію чорний 54С F20 ТУУ 24.1-00222226-059:2006.

Для порівняльного аналізу абразиву відбирали проби у кількості 50 частинок у вихідному стані та після випробувань за методикою гілзи Лоренца і вищеписаною розробленою методикою [13].

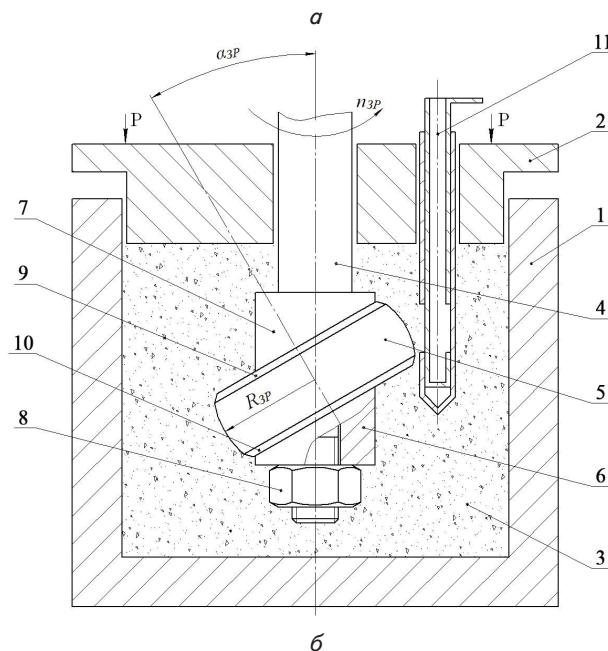


Рис. 3. Пристрій для дослідження матеріалів на абразивне зношування: а – загальний вигляд; б – схема (позначення в тексті)

Отримання знімків абразивних частинок проводилось із використанням мікроскопу МСБ-2, оснащеного цифровою камерою-окуляром eTREK UCMOS 5100. З метою отримання бінарних зображень проєкцій абразивних частинок знімки опрацьовували з використанням комп'ютерних програм Image Pro Plus 6.1 та ImageJ 1.50g. По бінарних зображеннях для кожної частинки розраховували параметри R , AR , C , F_{max} . Розрахунок параметра SPL проводився за удосконаленою методикою наступним чином:

1. З використанням програми SHAPE (модуль ChainCoder) [14] для зображення частинки (рис. 4, а) визначався ланцюговий код Фрімена (рис 4, б), за яким проводилась реконструкція контуру (рис. 4, в).

2. Із застосуванням модуля CNC2NEF програми SHAPE знаходили центр мас частинки, її найбільший

радіус, який розташовували на осі абсцис (рис. 4, з), а також коефіцієнти Фур'є (a_n, b_n, c_n, d_n) для 50 гармонік.

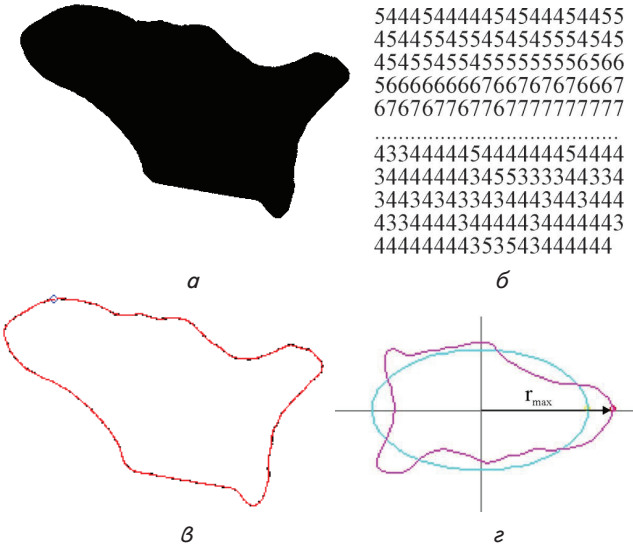


Рис. 4. Етапи реконструкції контуру частинки: а – вихідне зображення; б – ланцюговий код; в – реконструкція за ланцюговим кодом; г – реконструкція за коефіцієнтами Фур'є

3. Коефіцієнти Фур'є підставляли у параметричні рівняння (7), при цьому приймалось $\frac{2n\pi t}{T} = \theta$, де θ – кут радіус-вектора, який змінювався від 0 до 2π з кроком 0,01 радіан, x_c та y_c приймалися рівними 0. Таким чином, параметричні рівняння (7) для опису контуру набули вигляду:

$$x(\theta_i) = \sum_{n=1}^{50} a_n \cos(n\theta_i) + b_n \sin(n\theta_i),$$

$$y(\theta_i) = \sum_{n=1}^{50} c_n \cos(n\theta_i) + d_n \sin(n\theta_i), \quad (9)$$

що дало можливість представити контур частинки у полярних координатах із радіус-вектором $R(\theta_i) = \sqrt{x(\theta_i)^2 + y(\theta_i)^2}$ (рис. 5). В областях, які виходили за межі середнього радіусу r_m , визначали гострі вершини (sp1, sp2, sp3).

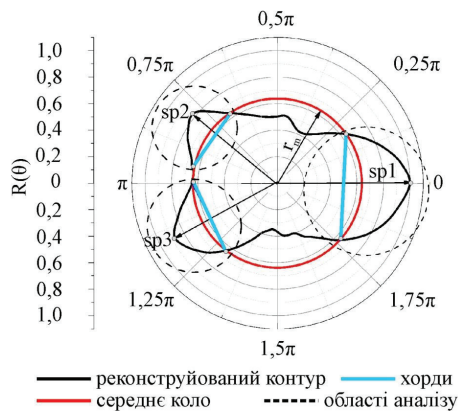


Рис. 5. Схема визначення гострих вершин контуру частинки

4. Для кожної виявленої гострої вершини знаходили довжини хорд (CL), отриманих у результаті перетину кола радіусом r_m та контуру частинки, після цього будували профілі вершин абразивної частинки у координатах: (CL; $\Delta R = R(\theta_i) - r_m$) та апроксимували їх кусково-лінійною функцією (рис. 6) виду:

$$y = a_1 + k_1 x \quad \text{при } (x < x_i),$$

$$y = a_1 + k_1 x_i + k_2 (x - x_i) \quad \text{при } (x \geq x_i). \quad (10)$$

5. За значеннями кутів коефіцієнтів прямих k_n та k_{n+1} визначали кути θ_i та параметр гостроти згідно формули (3).

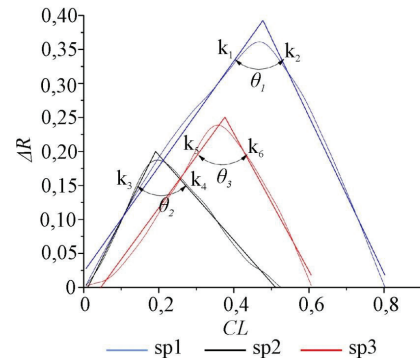


Рис. 6. Апроксимація гострих вершин контуру частинки кусково-лінійною функцією

За вказаною процедурою було визначено параметр гостроти SPL для 150 частинок. Для оцінки впливу параметра SPL на абразивну здатність його значення розраховували для частинок, абразивна здатність яких відома за літературними джерелами [6, 15]. Комплексна оцінка абразивної здатності проводилась за параметром, який представляє собою добуток усіх факторів, які підвищують абразивну здатність частинок [8]. Для даного випадку його значення визначалось як: $K_{abr} = SPL \cdot R \cdot AR \cdot C$. Оцінка впливу розмірів проводилась за рівнянням (4).

5. Результати мікроскопічних досліджень абразивних частинок

Результати розрахунку параметру SPL^m для 5 близьких за розмірами частинок абразивів різної форми (рис. 7) показують, що розрахунок із використанням запропонованої методики дозволяє отримати більш точні результати ніж метод, запропонований у роботі [6]. При цьому значення SPL^m є більш близькими до значень параметру SPQ [15] та знаходяться у межах похибки (табл. 1). Це зумовлено тим, що при апроксимації гострих вершин, які виходять за межі кола радіусом r_m (рис. 5), їх контури апроксимувались прямими із використанням алгоритму Левенберга-Маркварта. У результаті чого отримані прямі не проходять через точки перетину контуру частинки із середнім колом, що дозволяє уникнути отримання завищених результатів параметра SPL та наблизити розраховані значення до параметра SPQ.



Рис. 7. Абразивні частинки із відомою абразивною здатністю [6, 15]: а – кремній; б – граніт; в – SiC; г – кварц; д – Al₂O₃

Таблиця 1

Параметри форми абразиву із відомою абразивною здатністю

Абразив	I _h , mm/min	SPQ [15]	SPL [6]	SPL ^m	AR	R	C	K _{abr}
Кремній	2.05	0,19±0.08	0.63	0.22	1.22	1.18	1.020	0.266
Гранат	2.23	0,25±0.11	0.86	0.18	1.05	1.21	1.028	0.225
SiC	2.94	0,42±0.14	0.71	0.37	1.66	1.47	1.037	0.566
Кварц	3.43	0,53±0.14	0.86	0.56	1.62	1.67	1.074	1.010
Al ₂ O ₃	3.89	0,6±0.14	0.71	0.58	1.65	1.84	1.107	1.183

За результатами порівняльного кореляційного аналізу (рис. 8, а) видно, що параметр SPL^m, знаходиться у тісній кореляції з інтенсивністю зношування (скоректований коефіцієнт детермінації R²=0,92) та по точності значно перевищує SPL, вимірний за методикою [6]. Це робить його практично ідентичним до параметра SPQ (R²=0,98) та придатним для оцінки інтенсивності зношування залежно від форми абразивних частинок, як для традиційних абразивів на основі кисневої та безкисневої кераміки так і для надтвердих матеріалів різної дисперсності із яскраво вираженою полієдричною структурою та наявністю значної кількості гострих ріжучих вершин відповідно до кристалічної будови [16]. При використанні комплексного параметра K_{abr} відповідність між розрахованими (PV) та вимірними (OV) величинами зношування зростає (R²=0,95) та описується регресійним рівнянням:

$$I_h = 1.755 + 1.772K_{abr} \tag{11}$$

Таким чином, рівняння (11) дає можливість встановлювати відносну абразивну здатність частинки за вимірними параметрами форми її контуру.

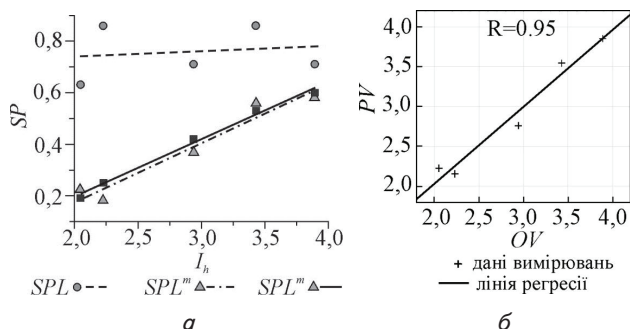


Рис. 8. Результати кореляційного аналізу: а – кореляція між параметрами гостроти та інтенсивністю зношування; б – результати регресійного аналізу між інтенсивністю зношування та комплексним параметром K_{abr}

Результати мікроскопічних досліджень абразивних частинок показують, що частинки SiC у вихідному

стані (F1) мають виразну огранену форму (рис. 9, а), яка зумовлена умовами їх отримання, а саме карботермічним відновленням із подальшим розмеленням, у процесі якого внаслідок динамічної дії розмельних тіл проходить інтенсивне крихке руйнування частинок вздовж кристалографічних площин, зумовлене високою жорсткістю ковалентних зв'язків у кристалічній ґратці SiC. Після трибовипробувань спостерігається закономірне зменшення розмірів частинок та зміна їх форми внаслідок стирання по металевій поверхні, при цьому при випробуваннях за методикою гільзи Лоренца (F2) ці зміни проявляються більш виразно порівняно із удосконаленою методикою (F3) (рис. 9, а, б). За статистичними даними (рис. 10, б–д) найвищими значеннями усіх вимірних показників характеризуються частинки SiC у вихідному стані, а найнижчими – після випробувань за методикою гільзи Лоренца. Форма частинок після випробувань за оптимізованою методикою за усіма параметрами набуває проміжних значень.

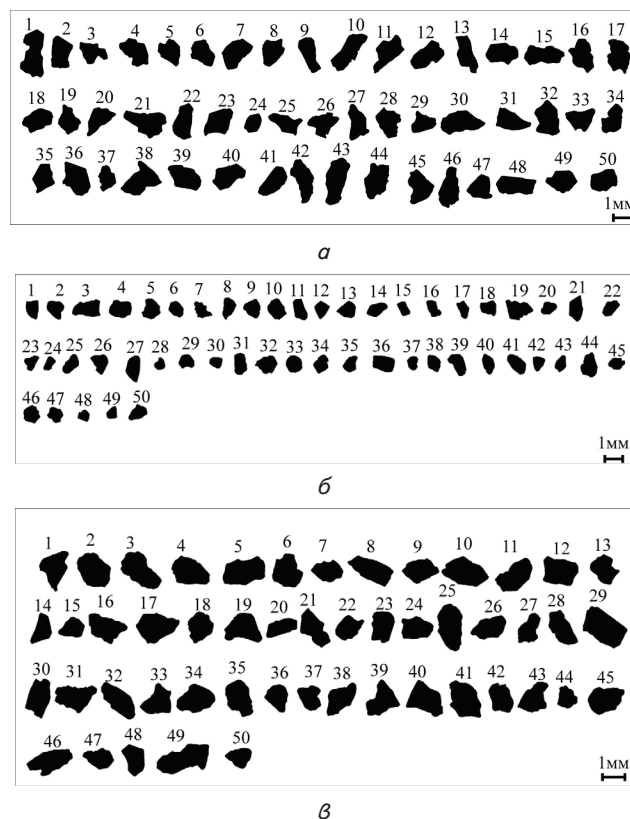


Рис. 9. Морфологія абразивних частинок SiC: а – до випробувань (F1); б – після випробувань за методикою гільзи Лоренца (F2); в – після випробувань за удосконаленою методикою (F3) (тривалість випробувань 900 сек)

Кількісний порівняльний аналіз розподілів частот розмірів (рис. 10, а) та параметрів форми (р) (рис. 10, б–д) показує, що розподіл частот (N) їх форми з високою точністю (R²>0.8) описується логнормальним законом розподілу виду:

$$N(p) = \frac{A}{\sqrt{2\pi w p}} e^{-\frac{\left[\ln \frac{p}{p_m}\right]^2}{2w^2}}, \tag{12}$$

де A та w – коефіцієнти, p_m – середнє (медіанне) значення параметру.

Причому розраховані значення моди та медіани розподілів усіх показників для фракцій F1 та F3 є більш близькими ніж для фракцій F1 та F2 (табл. 2). Це свідчить про те, що використання удосконаленої методики сприяє меншій зміні розмірів та параметрів форми частинок порівняно із вихідним станом і, відповідно, забезпеченню більш високої абразивної здатності частинок.

після підстановки середньостатистичних даних його значення становить:

$$\frac{I_{h3}}{I_{h2}} = \frac{1.755+1.772 \cdot 0.4633 \cdot 1.3358 \cdot 1.5974 \cdot 1.0735 \cdot \sqrt{1.7}}{1.755+1.772 \cdot 0.3993 \cdot 1.2316 \cdot 1.4543 \cdot 1.0511 \cdot \sqrt{1.1}} = 1.41.$$

Таблиця 2

Різниця між значеннями медіан (ΔMed) та мод (ΔMod) розподілів частот параметрів форми між вихідним абразивом та після випробовувань

Фракція	F_{max}		R		AR		C		SPL ^m	
	ΔMed	ΔMod	ΔMed	ΔMod	ΔMed	ΔMod	ΔMed	ΔMod	ΔMed	ΔMod
F2	0.165	0.182	0.129	0.111	0.061	0.046	0.019	0.019	0.046	0.061
F3	0.772	0.783	0.202	0.187	0.163	0.183	0.037	0.037	0.085	0.124

6. Обговорення результатів досліджень

Аналіз частинок за екстремальними значеннями параметрів форми показує, що у межах кожної досліджуваної фракції наявні частинки, які характеризуються максимальним або мінімальним значенням одразу за декількома параметрами (рис. 10, е). Зокрема для фракції F1 частинка № 24 за параметрами R і C, для фракції F2 частинки № 33 та № 7 за параметрами R, C і SPL^m, для фракції F3 частинки № 46 та № 2 за параметрами R, AR, C та R і SPL^m, відповідно.

Із цього можна зробити висновок про наявність кореляційного зв'язку між параметрами форми. Для його встановлення проводився регресійний аналіз, у якому роль залежного фактору виконував параметр SPL^m, а роль незалежних змінних виконували параметри R та C. Отримані регресійні залежності з достатньо високою точністю описують очікувані значення параметра SPL^m як в межах кожної фракції (рис. 11, а–в) так і для всіх досліджуваних частинок (рис. 11, г).

У результаті регресійного аналізу отримано рівняння, яке встановлює взаємозв'язок між параметром гостроти SPL^m та параметрами R і C:

$$SPL^m \approx 16.8 + 4.64R - 1.42R^2 - 35.93C + 16.11C^2. \quad (13)$$

Порівняльна оцінка ефективності удосконаленої та стандартної методик для фракцій F3 та F2 проводилась за співвідношенням інтенсивності зношування I_{h3}/I_{h2} , яке визначали шляхом розрахунку коефіцієнтів K_{abr3} та K_{abr2} за середньостатистичними параметрами форми відповідних фракцій та підстановки їх у рівняння (11). Враховуючи, що вплив розмірів абразивних частинок на коефіцієнт інтенсивності зношування описується рівнянням (4), загальне співвідношення для оцінки відносної інтенсивності зношування набуває вигляду:

$$\frac{I_{h3}}{I_{h2}} = \frac{1.755+1.772 \cdot \overline{SPL3} \cdot \overline{R3} \cdot \overline{AR3} \cdot \overline{C3} \cdot 9.2 \sqrt{\overline{F_{max}3}}}{1.755+1.772 \cdot \overline{SPL2} \cdot \overline{R2} \cdot \overline{AR2} \cdot \overline{C2} \cdot 9.2 \sqrt{\overline{F_{max}2}}}, \quad (14)$$

Таким чином, запропонована удосконалена методика дозволяє підвищити ефективність триботехнічних випробовувань за рахунок збільшення абразивної здатності частинок SiC у ~1,4 рази. При експериментальних дослідженнях (рис. 12) це проявляється, як збільшення кута нахилу прямої, яка визначає втрату маси за одиницю часу, що зумовлено високим ступенем обміну абразивної маси в зоні взаємодії робочої поверхні зразка із абразивом.

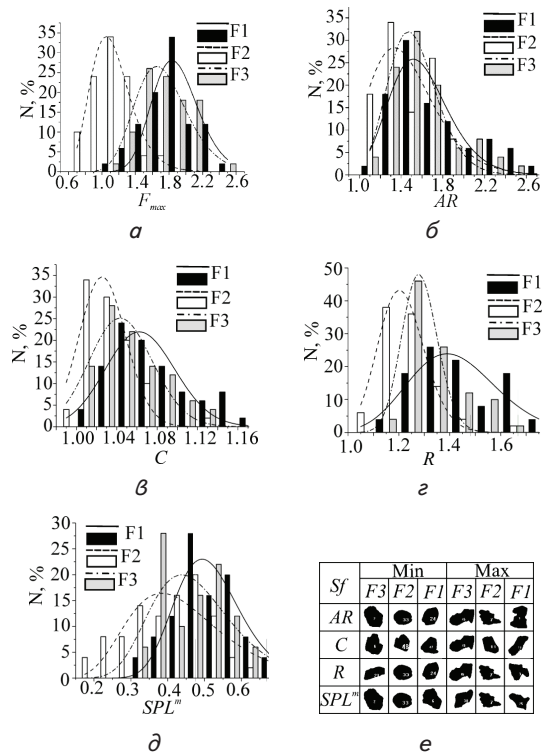


Рис. 10. Порівняльний статистичний аналіз розподілу частот параметрів форми абразивних частинок: а – діаметру Фере (F_{max}); б – співвідношенням сторін (AR); в – опуклості (C); г – округлості (R); д – гостроти (SPL^m); е – екстремальних параметрів

Проведені дослідження показали, що використання удосконаленої методики та пристрою для випробовувань матеріалів на зносостійкість в умовах тертя по незакріпленому абразиву дозволяє підвищити ефективність триботехнічних досліджень за допомогою забезпечення високої абразивної здатності частинок. Це відбувається за рахунок високого ступеню обміну абразивної маси в зоні взаємодії робочої поверхні зразка із абразивом. Отримані аналітичні залежності дозволяють з високою точністю прогнозувати величину зносу матеріалу на основі аналізу форми абразивних частинок.

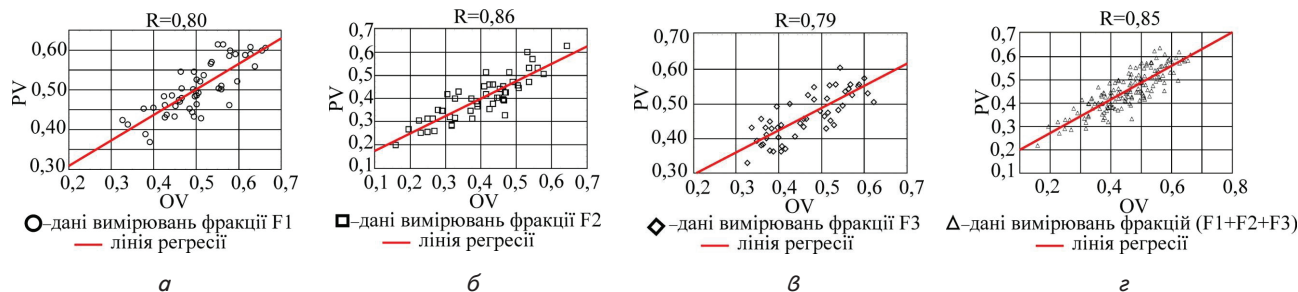


Рис. 11. Результаты регрессионного анализа корреляции между параметром SPL^m та параметрами R і C:
 а – F1; б – F2; в – F3; з – F1+F2+F3

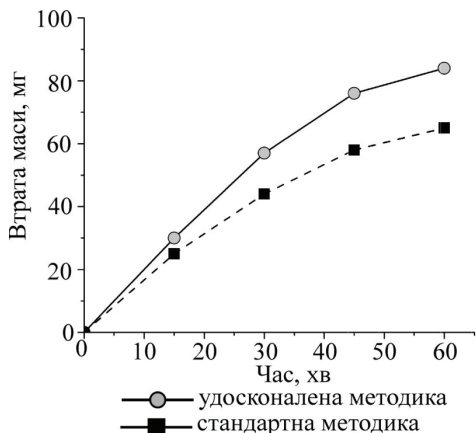


Рис. 12. Результаты исследования износостойкости за методикой гильзы Лоренца та оптимізованою методикою (матеріал сталь 40X без термообробки)

Перспективними напрямком для подальших досліджень є розширення спектру матеріалів для дослідження із використанням абразивів різної морфології для встановлення взаємозв'язку між факторами, які впливають на процес абразивного зношування.

6. Висновки

1. Розроблена методика та пристрій для визначення відносної зносостійкості матеріалів та покриттів дозволяє проводити випробування матеріалів на зношування незакріпленим абразивом при значних питомих тисках абразиву і високому ступені обміну абразивної маси в зоні взаємодії робочої поверхні зразка із абразивом. Переваги даної методики полягають у простоті її реалізації, а також високій точності та інформативності отримуваних результатів випробувань.

2. Форма абразивних частинок SiC, які використовуються при триботехнічних випробуваннях, з високою точністю апроксимується рядами Фур'є з використанням еліптичних дескрипторів для 50 гармонік, отриманих на основі ланцюгового коду Фрімена. Це дозволяє представити контури частинок у вигляді функцій та розрахувати параметр гостроти частинок SPL^m , який знаходиться у тісній кореляції з інтенсивністю зношування для абразивів різної форми.

3. За результатами регрессионного аналізу виведено рівняння, яке дозволяє прогнозувати інтенсивність зношування сталі в умовах тертя по незакріпленому абразиву при відомих параметрах округлості (R), випуклості (C), гостроти (SPL^m) та розмірах (F_{max}) абразивних частинок.

Література

- Wellinger, K. Rebung und Verschleißversuche an unge harten und deharteten stahlblech für forderranen [Text] / K. Wellinger, H. Vetz // Zeitschrift des VDI. – 1953. – Vol. 26. – P. 12–17.
- Rathod, A. Shape factor analysis of abrasive particles used in slurry abrasion testing [Text] / A. Rathod, S. Sapate, R. Khatirkar // International Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2012. – Vol. 2, Issue 4. – P. 35–39.
- Woldman, M. Investigating the influence of sand particle properties on abrasive wear behaviour [Text] / M. Woldman, E. Van Der Heide, D. J. Schipper, T. Tinga, M. A. Masen // Wear. – 2012. – Vol. 294-295. – P. 419–426. doi: 10.1016/j.wear.2012.07.017
- Pintaude, G. Remarks on the application of two-dimensional shape factors under severe wear conditions [Text] / G. Pintaude, M. Coseglio // Friction. – 2016. – Vol. 4, Issue 1. – P. 65–71. doi: 10.1007/s40544-016-0105-y
- Pellegrin, D. V. Diamond particle shape: Its measurement and influence in abrasive wear [Text] / D. V. De Pellegrin, N. D. Corbin, G. Baldoni, A. A. Torrance // Tribology International. – 2009. – Vol. 42, Issue 1. – P. 160–168. doi: 10.1016/j.triboint.2008.04.007
- Abrasive particle characterization following different measurements of shape factor [Text] // Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering, 2009. – P. 158.
- Sevim, I. Effect of abrasive particle size on wear resistance in steels [Text] / I. Sevim, I. B. Eryurek // Materials & design. – 2006. – Vol. 27, Issue 3. – P. 173–181. doi: 10.1016/j.matdes.2004.10.010
- Thakare, M. R. Effect of abrasive particle size and the influence of microstructure on the wear mechanisms in wear-resistant materials [Text] / M. R. Thakare, J. A. Wharton, R. J. Wood, C. Menger // Wear. – 2012. – Vol. 276-277. – P. 16–28. doi: 10.1016/j.wear.2011.11.008
- Coronado, J. J. Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 1 [Text] / J. J. Coronado, A. Sinatora // Wear. – 2011. – Vol. 271, Issue 9-10. – P. 1794–1803. doi: 10.1016/j.wear.2011.01.078

10. Mollon, G. Fourier–Voronoi-based generation of realistic samples for discrete modelling of granular materials [Text] / G. Mollon, J. Zhao // Granular Matter. – 2012. – Vol. 14, Issue 5. – P. 621–638. doi: 10.1007/s10035-012-0356-x
11. Li, K. Multiple fault diagnosis of down-hole conditions of sucker-rod pumping wells based on Freeman chain code and DCA [Text] / K. Li, X. W. Gao, W. B. Yang, Y. L. Dai // Petroleum Science. – 2013. – Vol. 10, Issue 3. – P. 347–360. doi: 10.1007/s12182-013-0283-4
12. Iwata, H. SHAPE: a computer program package for quantitative evaluation of biological shapes based on elliptic Fourier descriptors [Text] / H. Iwata, Y. Ukai // Journal of Heredity. – 2002. – Vol. 93, Issue 5. – P. 384–385. doi: 10.1093/jhered/93.5.384
13. Пат. на кор. мод. № 48926 Україна: МПК7 G 01 N 3/56. Пристрій для дослідження матеріалів на абразивне зношування [Текст] / Бурда М. Й., Бурда Ю. М., Луцак Д. Л. – заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № 200910725; заявл. 23.10.2009; опубл. 12.04.2010, Бюл. № 7/2010. – 3 с.
14. A Computer Program Package for Quantitative Evaluation of Biological Shapes [Electronic resource]. – The University of Tokyo, 2010. – Available at: <http://lbm.ab.a.u-tokyo.ac.jp/~iwata/shape>
15. Hamblin, M. G. Description of abrasive particle shape and its relation to two-body abrasive wear. Tribology transactions [Text] / M. G. Hamblin, G. W. Stachowiak // Tribology transactions. – 1996. – Vol. 39, Issue 4. – P. 803–810. doi: 10.1080/10402009608983598
16. Lavrinenko, V. I. On grinding applications of variously dispersed powders of compacts based on synthetic and natural diamond with carbon binder [Text] / V. I. Lavrinenko, V. G. Poltoratskii, M. N. Safonova, G. A. Petasyuk, A. A. Devitskii // Journal of Superhard Materials. – 2016. – Vol. 38, Issue 2. – P. 140–144. doi: 10.3103/s1063457616020088

