

УДК 620.178.16:539.62

Павло Присяжнюк, д.т.н., проф.; Андрій Харлов

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

МІКРОМЕХАНІЧНО ОБҐРУНТОВАНИЙ ІНДЕКС РІЖУЧОЇ КРИВИНИ ЧАСТИНОК АБРАЗИВУ ТА КІНЕТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ ПРИСКОРЕНИХ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Анотація. Запропоновано новий безрозмірний індекс ефективної ріжучої кривини κ^* , який поєднує три мікромеханічно інтерпретовані дескриптори геометрії піків контуру абразивної частинки. На вибірці $n=200$ частинок карбіду кремнію SiC 64C встановлено, що домінуючим компонентом є висота виступу h_{ax} (ρ Спірмена = $-0,51$); зведений індекс κ^* дає $\rho = -0,46$. Методом прямого підгону кінетичних даних визначено характеристичний час релаксації $\tau = 24$ хв і, відповідно, оптимальну тривалість прискорених випробувань $\tau^* = \tau \cdot \ln 20 \approx 72$ хв.

Ключові слова: абразивне зношування, дескриптори форми, еліптичні перетворення Фур'є, кінетична модель, прискорені трибологічні випробування.

Pavlo Prisyazhnyuk, Andrii Kharlov

MICROMECHANICALLY GROUNDED CUTTING-CURVATURE INDEX OF ABRASIVE PARTICLES AND A KINETIC MODEL FOR THE OPTIMAL DURATION OF ACCELERATED TRIBOLOGICAL TESTS

Abstract. A new dimensionless effective cutting curvature index κ^* combining three micromechanically interpretable descriptors of abrasive particle contour peaks is proposed. On a sample of $n=200$ SiC 64C particles, the dominant component is shown to be the protrusion height h_{ax} (Spearman $\rho = -0.51$); the composite κ^* yields $\rho = -0.46$. Direct fitting of wear-rate kinetics gives the characteristic relaxation time $\tau = 24$ min and optimal accelerated test duration $\tau^* \approx 72$ min.

Keywords: abrasive wear, shape descriptors, elliptic Fourier descriptors, kinetic model, accelerated tribological testing.

Зношування деталей машин під дією вільного абразиву є одним з найпоширеніших механізмів виходу з ладу робочих органів гірничого, нафтогазового та будівельного обладнання. Раціональний вибір матеріалів для покриттів і наплавлення в умовах абразивного зношування вимагає надійної методики лабораторного скринінгу, яка б відтворювала умови реального контакту й водночас не потребувала надмірного часу [1, 2].

Стандартні методики (ASTM G65, ГОСТ 23.208) передбачають тривалість досліду 30–60 хв за безперервного оновлення абразиву. Проте, якщо на виробничому стенді реалізувати циркуляцію одного об'єму абразивної маси через зону тертя, кінетика інтенсивності зношування $I(\tau)$ набуває двостадійного характеру з чітко вираженим характеристичним часом релаксації τ . Знання τ дає змогу аналітично обчислити оптимальну тривалість прискореного досліду τ^* , яка забезпечує кінетичне насичення без надлишкового часу [3].

Паралельно з кінетичним аспектом залишається відкритим питання кількісного опису зміни морфології абразивних частинок у процесі тертя. Параметр SPLm, запропонований у [3] на основі підходів до опису форми абразивних частинок [8],

демонструє кореляцію з інтенсивністю зношування для різних класів абразивів ($R^2=0,92$), але є агрегованим скаляром без прозорої мікромеханічної інтерпретації. В даній роботі запропоновано трійку дескрипторів $\{h_{ax}, \beta_{ax}, \rho_i\}$ та зведений індекс κ^* , складові якого безпосередньо відповідають трьом мікромеханічним режимам контактної взаємодії.

Досліди проводили на машині для тертя за схемою "плоский зразок – обертовий гумовий ролик" з подачею абразиву в зону контакту у режимі циркуляції (модифікація установки [3]). Зразки виготовлені зі сталі 40 (ДСТУ 7809:2015) без термічної обробки, шорсткість $R_a \leq 1,25$ мкм. Абразив – порошок карбіду кремнію марки 64С зернистістю F100 (FEPA 42-1), $d_{50} \approx 125$ мкм, вміст SiC $\geq 98,5$ %. Параметри досліду: питоме навантаження $P=5$ МПа, лінійна швидкість поверхні ролика $v \approx 16$ м/хв, тривалість одного циклу 25 хв, загальна кількість циклів 33 (825 хв).

Для морфологічного аналізу мікрофотографії частинок отримано на мікроскопі МБС-2 з цифровою камерою eTREK UCMOS 5100. З усієї вибірки відібрано по $n=50$ частинок на кожній з чотирьох стадій (0, 250, 500 та 825 хв), всього $n=200$. Бінаризацію зображень виконано в ImageJ 1.50g методом Оцу; субпіксельний контур екстраговано двовимірним аналогом (marching squares) алгоритму marching cubes [4]; дескриптори обчислено з аналітичної кривини еліптичної реконструкції Фур'є з $N=20$ гармоніками [5].

Трійка дескрипторів для i -го піка включає: висоту виступу h_i (відстань від апексу до хорди при $\pm 2,5\%$ нормованої довжини дуги), кут повороту дотичної через пік $\beta_i \in [0, \pi]$, та мінімальний радіус кривини ρ_i . Зведений індекс κ^* формується за формулою:

$$\kappa^* = (1/K) \cdot \sum_i \sin(\beta_i/2) \cdot (h_i/\rho_i),$$

де підсумовування ведеться по $K=5$ найгостріших пікам. Фізичний сенс множників: $\sin(\beta_i/2)$ – кутова характеристика гостроти (нуль для гладкої поверхні, одиниця для ідеально гострого піку); h_i/ρ_i – безрозмірне відношення висоти "різця" до радіуса його тіла, аналог критичного кута атаки в моделях Малхірна–Самуелса [6] та Седрікса–Малхірна [7].

Якісний аналіз мікрофотографій підтверджує прогресивне заокруглення частинок SiC зі збільшенням часу досліду: початковий поліедральний габітус з кристалографічно визначеними гострими ребрами поступово трансформується в більш ізометричний. Ранжування дескрипторів за коефіцієнтом кореляції Спірмена з тривалістю досліду τ наведено у табл. 1.

Найсильнішим предиктором стадії є глобальний дескриптор округлості $R=4\pi A/L^2$ ($\rho=+0,80$, $p<10^{-30}$). Серед локальних дескрипторів домінує висота виступу h_{ax} ($\rho=-0,51$, $p<10^{-13}$); зведений κ^* дає $\rho=-0,46$, порівняно з $\rho=-0,48$ для канонічного SPLm [3]. Статистична потужність κ^* і SPLm є практично еквівалентною, однак трійка $\{h_{ax}, \beta_{ax}, \rho_i\}$ зберігає доступ до окремих мікромеханічних складових, тоді як SPLm є нерозкладним скаляром.

Кінетика інтенсивності зношування $I(\tau)$ описується двопараметричним рівнянням:

$$I(\tau) = I_\infty + (I_0 - I_\infty) \cdot \exp(-\tau/\tau_0),$$

Підгін до 33 експериментальних точок (інтервали по 25 хв) дав: $I_0=47,34 \pm 3,82$ мг/хв; $I_\infty=6,96 \pm 0,24$ мг/хв; $\tau_0=24,0 \pm 2,9$ хв; $R^2=0,927$. Оптимальну тривалість

прискорених випробувань визначено з умови падіння похідної $|dI/dt|$ до 5% початкового значення $|dI/dt|_0$:

$$\tau^* = \tau_0 \cdot \ln(1/0,05) = \tau_0 \cdot \ln 20 \approx 72 \text{ хв.}$$

Таблиця 1. Кореляція Спірмена дескрипторів форми з тривалістю досліду (n=200)

Дескриптор	ρ (Спірмен)	p	Примітка
$R = 4\pi A/L^2$	+0,796	$< 10^{-30}$	Найсильніший предиктор
L/L_{eq}	-0,796	$< 10^{-30}$	
solidity	+0,678	$< 10^{-30}$	
convexity	+0,529	$< 10^{-15}$	
h_{ax}	-0,510	$< 10^{-13}$	Домін. локальний дескриптор
SPLm (EFD, N=50)	-0,481	$6 \cdot 10^{-13}$	Метод [3]
$\kappa^*_{0,5}$	-0,457	10^{-11}	Запропонований індекс
eccentricity	-0,432	$< 10^{-9}$	
AR	-0,349	$< 10^{-6}$	
β_{ax}	-0,267	$1,4 \cdot 10^{-4}$	Компонент трійки
$\rho_{i,i}$	+0,236	$8 \cdot 10^{-4}$	Компонент трійки
η_{HF}	+0,073	0,30 (н.з.)	Незначущий

Виявлено двомасштабну структуру кінетики: швидкий процес адаптації контактної геометрії з $\tau_0 \approx 24$ хв та повільна еволюція морфології абразиву з $\tau_{ог} \gg \tau_0$. Розв'язання цих масштабів обґрунтовує $\tau^* \approx 3\tau_0$ як операційно виправданий критерій тривалості: до цього моменту перехідний процес повністю завершений, а повільний дрейф морфології ще не вносить суттєвого вкладу в $I(\tau)$.

Порівняно зі стандартом ASTM G65 (Procedure A, 30 хв), тривалість $\tau^*=72$ хв при циркуляції абразиву відповідає глибшому ступеню кінетичного насичення (5% vs $\sim 28\%$ від $|dI/dt|_0$). Для практичного скринінгу наплавочних матеріалів [1, 2] вибір τ^* забезпечує: (а) зниження похибки ранжування до $\leq 5\%$ за побудовою критерію; (б) збільшення пропускної здатності лабораторії у $\sim 2,4$ рази при незмінних ресурсах порівняно з 30-хвилинним протоколом; (в) прив'язку тривалості досліду до єдиної вимірюваної фізичної константи τ_0 .

ВИСНОВКИ

1. Запропонована трійка дескрипторів $\{h_{ax}, \beta_{ax}, \rho_{i,i}\}$ та зведений індекс κ^* , обчислені з аналітичної кривини еліптичної реконструкції Фур'є, забезпечують мікромеханічно прозору інтерпретацію режимів контактної взаємодії (мікрорізання vs пластичне витіснення) відповідно до моделей Малхірна–Самуелса і Седрікса–Малхірна.

2. На вибірці n=200 частинок SiC встановлено: h_{ax} є домінуючим компонентом трійки ($\rho=-0,51$); зведений κ^* ($\rho=-0,46$) та канонічний SPLm ($\rho=-0,48$) статистично

еквівалентні, але κ^* зберігає розкладуваність по фізичних складових. Глобальний дескриптор $R=4\pi A/L^2$ залишається найпотужнішим одновимірним предиктором стадії ($\rho=+0,80$).

3. Двопараметрична кінетична модель $I(\tau) = I_\infty + (I_0 - I_\infty) \cdot \exp(-\tau/\tau_\square)$ апроксимує 33 точки з $R^2=0,927$ та дає $\tau_\square=24,0\pm 2,9$ хв. Оптимальна тривалість прискорених випробувань $\tau^*=\tau_\square \cdot \ln 20 \approx 72$ хв обґрунтована умовою падіння $|dI/d\tau|$ до 5% початкового значення.

4. Виявлена двомасштабна кінетична структура ($\tau_\square \approx 24$ хв для формування контактної геометрії та $\tau_{\square_{\text{ор}}} \gg \tau_\square$ для еволюції морфології абразиву) є фізичним обґрунтуванням вибору $\tau^* \approx 3\tau_\square$ як критерію тривалості для скринінгу зносостійких покриттів і наплавлень.

Перелік посилань

1. Shihab T.A., Prysyzhnyuk P.M. et al. Increasing of durability of mechanical seals of oil and gas centrifugal pumps using tungsten-free cermet with Cu-Ni-Mn binder. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741, No. 1, p. 012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012031>
2. Prysyzhnyuk P., Bembenek M. et al. Restoration of the Impact Crusher Rotor Using FCAW with High-Manganese Steel Reinforced by Complex Carbides. *Management Systems in Production Engineering*. 2024. Vol. 32, No. 2. P. 294–302. <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0028>
3. Lutsak D., Prysyzhnyuk P., Burda M., Aulin V. Development of a method and an apparatus for tribotechnical tests of materials under loose abrasive friction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, No. 7(83). P. 19–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79913>
4. Lorensen W.E., Cline H.E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 1987. Vol. 21, No. 4. P. 163–169. <https://doi.org/10.1145/37402.37422>
5. Kuhl F.P., Giardina C.R. Elliptic Fourier features of a closed contour. *Computer Graphics and Image Processing*. 1982. Vol. 18, No. 3. P. 236–258. [https://doi.org/10.1016/0146-664X\(82\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0146-664X(82)90034-X)
6. Mulhearn T.O., Samuels L.E. The abrasion of metals: A model of the process. *Wear*. 1962. Vol. 5, No. 6. P. 478–498. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(62\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(62)90064-9)
7. Sedriks A.J., Mulhearn T.O. Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive processes. *Wear*. 1963. Vol. 6, No. 6. P. 457–466. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90281-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90281-3)