

Piotr SADOWSKI*

MODEL ELEMENTARNEGO PROCESU ZUŻYWANIA ŚCIERNEGO

MODEL OF THE ELEMENTARY PROCESS OF ABRASIVE WEAR

Słowa kluczowe:

zużywanie ściernie, cząstka zużycia, praca tarcia

Key-words:

abrasive wear, wear particle, friction work

Streszczenie

W pracy przyjęto model geometryczny ścierania metali ziarnem w kształcie stożka. Dla powyższego założenia określono sposób wyznaczania geometrii cząstek zużycia oraz związanych z nimi porcji energii mechanicznej. Uwzględniono pracę tarcia, twardość materiału, obciążenie normalne pary tarciowej, liniową intensywność zużywania, wymiary powierzchni nominalnej styku ciał oraz współczynnik sprawności zużywania. Przytoczono wybrane przykłady obliczeń charakterystyk geome-

* Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn. 26-600 Radom, ul. Krasickiego 54.

trycznych i energetycznych cząstek zużycia dla mechanizmu zużywania ściernego metali.

WPROWADZENIE

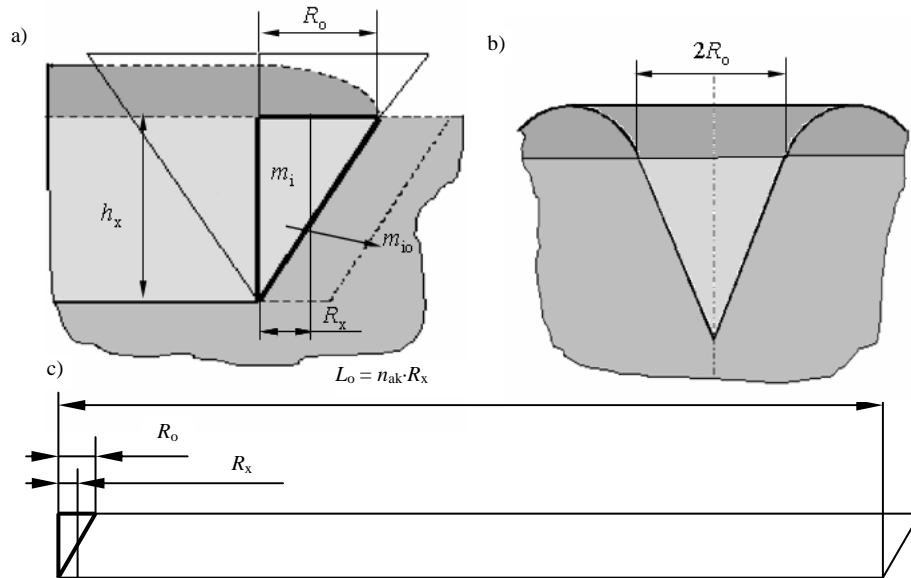
Powstanie cząstki zużycia tribologicznego oznacza spełnienie warunku koniecznego – utworzenia nowej powierzchni. Wymaga to wzrostu energii wewnętrznej tego materiału, zwłaszcza energii powierzchniowej. Zużywanie materiału wskutek tarcia jest możliwe, jeżeli zachodzi akumulacja energii w jego warstwie wierzchniej. Oprócz kwestii energetycznych istotne dla przebiegu zużywania są kwestie geometryczne. Do istotnych czynników geometrycznych z punktu widzenia poznawczego i praktycznego należą m.in.: wymiary liniowe, objętość, powierzchnia cząstki i ich liczba. Związki geometrii cząstki z przekazywaniem energii są źródłem nowych charakterystyk elementarnego zjawiska zużycia.

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie modelu opisującego powstawanie cząstek zużycia w procesie ścierania. Scharakteryzowano wielkości geometryczne tych cząstek, a także energię mechaniczną związaną z tworzeniem się pojedynczego produktu zużycia. Zilustrowano model przedstawiając przykładowe obliczenia wynikające z przyjętego modelu dla uzyskanych wyników z badań własnych.

OPIS CHARAKTERYSTYK GEOMETRYCZNYCH I ENERGETYCZNYCH CZĄSTEK ZUŻYCIA

Podczas ścierania twarde składniki otoczenia zagłębiają się w materiale próbki, powodując jej bruzdowanie i mikroskrawanie. Modelem geometrycznym pojedynczego ziarna ściernego może być stożek. Na **Rysunku 1 a i b** przedstawiono w sposób schematyczny taki stożek wciśnięty na głębokość h_x , przy której promień jego podstawy wynosi R_o . Podczas tarcia następuje przesuwanie się stożka w prawo, czemu towarzyszy powstawanie bruzdy o głębokości h_x . Z obszaru przedniej części stożka narysowanej grubymi liniami został wyciśnięty materiał o masie m_i próbki do rejonu występów pokazanych również w rzucie na **Rysunku 1 b** oraz częściowo do otoczenia w postaci wiórka o masie m_{i0} . Po pokonaniu drogi równej R_x kolejna porcja materiału m_i zostaje usunięta z jej pierwotnego miejsca. Na **Rysunku 1 c** zilustrowano schematycznie proces ścierania na drodze $L_0 = n_{ak} \cdot R_x$, po pokonaniu której masa m_i zostaje oddzielona od próbki w postaci wiórków.

W przedstawionym powyżej modelu procesu ścierania należy uwzględnić wyniki dotychczasowych rozważań o potencjalnych częściach zużycia [L. 1]. Potencjalna część zużycia była umiejscowiona jako masa m_i tej jego części stożka, z której została następnie usunięta. Jej postać geometryczna jest określona na podstawie następujących warunków:



Rys. 1. Model ścierania materiału za pomocą stożka (objaśnienia w tekście)
 Fig. 1. Model of material abrasion through cone (explanation in text)

- podstawa części jest połową koła o promieniu R_o i powierzchni F_o równej a_i^2 [L. 1] określonej zależnością:

$$a_i^2 = \frac{a^2}{n_o} = \frac{A_n}{n_o^2} = A_n \cdot \left(\frac{p}{H}\right)^2 = \frac{1}{A_n} \cdot \left(\frac{N}{H}\right)^2 \quad (1)$$

- potencjalna część zużycia ma kształt połowy stożka – **Rysunek 2** – o objętości a_i^3 [L. 1] określoną według zależności:

$$V_i = a_i^3 = \sqrt{A_n^3} \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^3 = \frac{1}{\sqrt{A_n^3}} \cdot \left(\frac{N}{H}\right)^3 \quad (2)$$

Na podstawie relacji $F_o = a_i^2 = 0,5\pi \cdot R_o^2$ uzyskano promień okręgu podstawy:

$$R_o = a_i \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{A_n} \cdot \frac{N}{H} \quad (3)$$

Objętość potencjalnej cząstki zużycia wynosi:

$$V_i = a_i^3 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot R_o^2 \cdot h_x\right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot a_o^2 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot h_x\right) \quad (4)$$

Wynika z niej zależność określająca wysokość h_x :

$$h_x = 3 \cdot a_i = \frac{3}{\sqrt{A_n}} \cdot \frac{N}{H} \quad (5)$$

Wartość przesunięcia R_x potencjalnej cząstki zużycia, któremu towarzyszy wymiana materiału jej objętości wynika z porównania objętości graniastosłupa o podstawie trójkąta o boku $2R_o$ i wysokości h_x mającego wysokość R_x z objętością cząstki potencjalnej $R_o \cdot h_x \cdot R_x = R_o^2 \cdot h_x \cdot \pi/6$. Zatem:

$$R_x = \frac{\pi}{6} \cdot R_o = \sqrt{\frac{\pi}{18}} a_i = \sqrt{\frac{\pi}{18}} \cdot \frac{1}{\sqrt{A_n}} \cdot \frac{N}{H} \quad (6)$$

Masa cząstki zużycia m_{io} będąca iloczynem masy m_i [**L. 1**] potencjalnej cząstki i współczynnika zużycia k [**L. 2**], przyjmie następującą postać:

$$m_{io} = \frac{\pi}{2} \cdot I_h \cdot \rho \cdot \left(\frac{N \cdot R}{H}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{A_n}}\right)^3 = V_{io} \cdot \rho = a_{io}^3 \cdot \rho \quad (7)$$

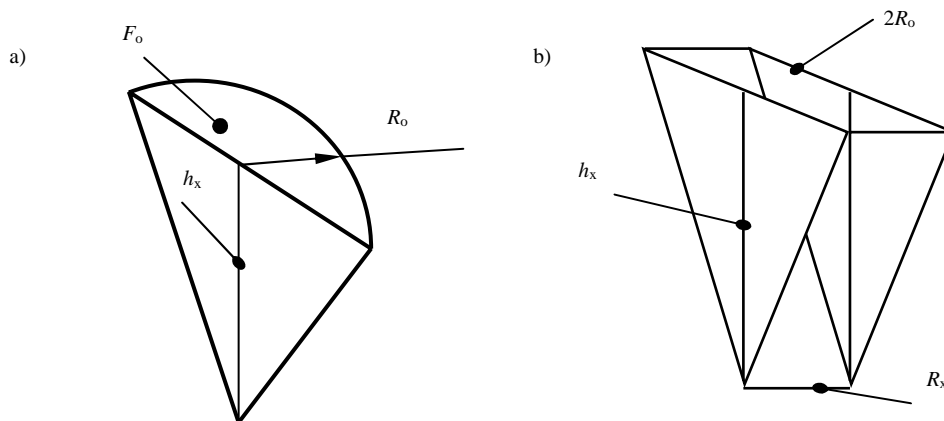
gdzie wprowadzono umownie kształt sześcianu oddzielonej cząstki o boku a_{io} . Z powyższego zapisu wynika wielkość a_{io} :

$$a_{io} = \frac{1}{\sqrt{A_n}} \sqrt[3]{\frac{\pi}{2} \cdot I_h \cdot \left(\frac{N \cdot R}{H}\right)^2} \quad (8)$$

Z potencjalną cząstką zużycia o masie m_i i z cząstką oddzieloną wskutek elementarnego zjawiska zużycia o masie m_{io} związane są porcje energii mechanicznej odpowiednio A_{it} i A_{io} , będące funkcjami pracy właściwej zużycia e_R^x :

$$A_{it} = e_R^x \cdot m_i = e_R^x \cdot \rho \cdot \left(\frac{N}{H \cdot \sqrt{A_n}}\right)^3 \quad (9)$$

$$A_{io} = e_R^x \cdot m_{io} = \frac{\pi}{2} \cdot I_h \cdot \rho \cdot e_R^x \cdot \left(\frac{N \cdot R}{H}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{A_n}}\right)^3 \quad (10)$$



Rys. 2. Potencjalna cząstka zużycia dla przypadku ścierania za pomocą stożka: a) postać geometryczna i wymiary potencjalnej cząstki; b) graniastosłup o objętości potencjalnej cząstki

Fig. 2. Potential wear particle in case abrasion through cone: a) geometric shape and measurements potential particle; b) prism with volume potential particle

Opisane powyżej impulsy energii są sumami:

$$A_{it} = A_{iroz} + A_{iak} = A_{it} \cdot (1 - \eta) + A_{it} \cdot \eta \quad (11)$$

$$A_{io} = A_{ioroz} + A_{ioak} = A_{iot} \cdot (1 - \eta) + A_{iot} \cdot \eta \quad (12)$$

których składniki opisane są, znając zależność opisującą η [2], następującymi zależnościami:

$$A_{iroz} = e_R^x \cdot \rho \cdot \left(\frac{N}{H \cdot \sqrt{A_n}} \right)^3 \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot R \cdot I_h}{\left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot R_a + \pi \cdot R \cdot I_h} \right) \quad (13)$$

$$A_{iak} = e_R^x \cdot \rho \cdot \left(\frac{N}{H \cdot \sqrt{A_n}} \right)^3 \cdot \frac{\pi \cdot R \cdot I_h}{\left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot R_a + \pi \cdot R \cdot I_h} \quad (14)$$

$$A_{ioroz} = 0 \quad (15)$$

$$A_{ioak} = \frac{\pi}{2} \cdot I_h \cdot \rho \cdot e_R^x \cdot \left(\frac{N \cdot R}{H} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{A_n}} \right)^3 \quad (16)$$

W zależnościach (15) i (16) $\eta = 1$, co oznacza, że impuls energii przejęty przez masę m_{io} jest w całości zmagazynowany w niej i skutkuje powstaniem luźnego produktu zużycia. Tym samym nie występuje rozpraszanie energii, czyli $A_{ioroz} = 0$.

Liczba zużycia objętościowego \tilde{u} dla potencjalnej cząstki zużycia [L. 1] po podzieleniu przez współczynnik zużycia k daje liczbę zużycia objętościowego \tilde{u}_o dla swobodnej cząstki zużycia, czyli

$$\tilde{u}_o = \frac{1}{k} \tilde{u} \quad (17)$$

Podobnie definiuje się liczbę zużycia masowego \tilde{n}_o

$$\tilde{n}_o = \frac{1}{k} \tilde{n} \quad (18)$$

Przedstawiony powyżej model stanowi podstawę do analizy geometrycznych i energetycznych uwarunkowań procesu powstawania cząstki zużycia tribologicznego.

PRZYKŁADY OBLICZEŃ CHARAKTERYSTYK GEOMETRYCZNYCH I ENERGETYCZNYCH CZĄSTEK ZUŻYCIA

W **Tabeli 1** przedstawiono geometryczne i energetyczne charakterystyki cząstek zużycia będące rezultatem obliczeń wynikających z przyjętego modelu dla uzyskanych wyników z badań własnych. Zamieszczono wartości średnie wielkości uzyskanych dla trzech badanych metali dla prędkości poślizgu wynoszącej 0,4 m/s.

Wielkością, którą można odnieść do wyników innych badaczy jest rozmiar oddzielonej cząstki zużycia. Jej wartości w badaniach I.I. Garbara [**L. 3**] zawierają się w przedziale 450÷670 nm. Zakres zmierzonych przez S. Trepie [**L. 4**] wartości średnic cząstek zużycia to 0,609÷0,619 μm . Wartości a_{i0} uzyskane z obliczeń na podstawie przyjętego w niniejszej pracy modelu są porównywalne. Ze względu na to, że badania były przeprowadzane w innych warunkach i dotyczyły różnych materiałów, zestawienie takie może jedynie potwierdzić ich zgodność, nie daje jednak pełnego porównania. W literaturze przedmiotu nieliczne są prace prezentujące badania umożliwiające określenie rozmiaru cząstek zużycia w momencie ich powstawania. Częściej spotykane są wyniki zawierające informacje o rozmiarach cząstek po opuszczeniu przez nie strefy tarcia. Ze względu na ich zniekształcenie nie można ich porównywać z wielkością a_{i0} występującą w modelu.

Tabela 1. Charakterystyki geometryczne i energetyczne potencjalnych cząstek zużycia i oddzielonych cząstek zużycia

Table 1. Geometric and energy characteristics of potential and separate wear particles

Obciążenie N [N]	R_o	h_x	R_x	m_i	m_{io}	A_{it}	A_{io} A_{ioak}	A_{iroz}	A_{iak}	\tilde{u}_o	\tilde{n}_o	a_{io}	
	[μm]	[μm]	[μm]	[g]	[g]	[J]	[J]	[J]	[J]	[-]	[-]	[μm]	
glin	1,23	0,619	2,326	0,324	1,26 E-12	2,29 E-14	1,99 E-09	3,65 E-11	1,89 E-09	1,01 E-10	2,56 E-08	6,92 E-11	0,204
	2,45	1,237	4,651	0,648	1,01 E-11	1,65 E-13	2,24 E-08	3,69 E-10	2,09 E-08	1,55 E-09	2,29 E-07	6,17 E-10	0,394
	3,68	1,856	6,977	0,971	3,40 E-11	4,72 E-13	9,64 E-08	1,34 E-09	8,78 E-08	8,58 E-09	9,10 E-07	2,46 E-09	0,559
żelazo	2,45	0,452	1,700	0,237	1,43 E-12	9,82 E-15	4,72 E-09	3,18 E-11	4,65 E-09	6,60 E-11	2,69 E-08	2,11 E-10	0,108
	4,90	0,904	3,400	0,473	1,14 E-11	9,14 E-14	4,48 E-08	3,58 E-10	4,34 E-08	1,43 E-09	1,83 E-07	1,44 E-09	0,226
	7,35	1,357	5,099	0,710	3,86 E-11	3,52 E-13	1,03 E-07	9,43 E-10	9,52 E-08	8,05 E-09	5,40 E-07	4,25 E-09	0,355
	9,81	1,809	6,799	0,947	9,15 E-11	9,51 E-13	2,57 E-07	2,65 E-09	2,37 E-07	2,06 E-08	1,13 E-06	8,89 E-09	0,494
miedź	2,45	0,615	2,313	0,322	4,09 E-12	5,71 E-14	4,84 E-09	6,72 E-11	4,72 E-09	1,16 E-10	3,31 E-08	2,95 E-10	0,185
	4,90	1,231	4,626	0,644	3,27 E-11	3,55 E-13	5,18 E-08	5,63 E-10	4,96 E-08	2,28 E-09	3,38 E-07	3,02 E-09	0,341
	7,35	1,846	6,939	0,966	1,10 E-10	1,24 E-12	2,23 E-07	2,50 E-09	2,09 E-07	1,41 E-08	1,10 E-06	9,85 E-09	0,518

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone rozważania umożliwiają opis cech geometrycznych cząstek zużycia, a także odpowiadających tym cząstkom porcji energii akumulowanej i rozpraszanej. Opisywany model dotyczy zużywania ściernego

go, przy którym nie ma istotnego wpływu zjawisk cieplnych i chemicznych.

Charakterystyki energetyczne i geometryczne cząstek zużycia uzyskane z modelu nie zostały potwierdzone eksperymentalnie. Wielkości geometryczne (np. wymiary cząstek zużycia) są trudno mierzalne. Doświadczalne potwierdzenie charakterystyk energetycznych utworzenia cząstki zużycia mogłoby zostać zrealizowane z wykorzystaniem badań kalorymetrycznych. Wymiary cząstek swobodnych określone teoretycznie z przyjętego modelu są porównywalne z wymiarami cząstek podawanymi przez innych badaczy [L. 3, 4].

Wyniki badań eksperymentalnych przedstawione w niniejszej rozprawie prowadzą do następujących spostrzeżeń:

- wymiary oraz masa potencjalnej i oddzielonej cząstki zużycia zwiększają się ze wzrostem obciążenia N i maleje ze wzrostem twardości materiału H ;
- impuls energii dostarczonej do cząstki potencjalnej A_{it} zawiera się w przedziale $8,62 \cdot 10^{-4} \div 1,87 \cdot 10^{-2}$ J i zwiększa się ze wzrostem obciążenia N ;
- impuls energii dostarczonej do cząstki swobodnej A_{iot} zawiera się w przedziale $1,58 \cdot 10^{-5} \div 2,10 \cdot 10^{-4}$ J i zwiększa się ze wzrostem obciążenia N .

LITERATURA

1. Sadowski P.: Metodyka modelowej oceny liczby i średniej wielkości cząstek zużycia tribologicznego. Problemy Eksploatacji 2005 nr 1.
2. Sadowski P.: Energia akumulowana i rozpraszana w procesie zużywania ściernego. Tribologia 2008 nr 4
3. Garbar I.I.: Critical structures of metal destruction under the process of wear. Journal of Tribology 2000 (122) 361–365.
4. Trepte St.: Tribologische Kennwerte für Reibwerkstoffe. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 2002 nr 2 (142–154).

Recenzent:
Stanisław ŚCIESZKA

Summary

The work assumed a geometric model of metal abrasion with a cone-shaped grain. This assumption was used to define a method to calcu-

late wear particle geometry and connect them with portions of mechanical energy. Friction work, the hardness of material, the standard load of the friction pair, the linear intensity of wear, the size of the nominal surface of object contact, and the coefficient of the efficiency of wear were all taken into account. Selected examples of calculations of geometric and energy characteristics wear particles for abrasive wear mechanism of metals are given.