

**Piotr SADOWSKI\***

**SYSTEM WIELKOŚCI CHARAKTERYZUJĄCY  
POTENCJALNĄ I ODDZIELONĄ CZĄSTKĘ  
ZUŻYCIA TRIBOLOGICZNEGO**

**SYSTEM OF VALUES CHARACTERIZED POTENTIAL  
AND SEPARATED WEAR PARTICLE**

**Słowa kluczowe:**

praca tarcia, zużywanie ściernie, cząstka zużycia, energia akumulowana, energia rozproszona

**Key words:**

friction work, abrasive wear, wear particle, accumulated energy, dispersion energy

---

\* Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom.

## Streszczenie

Wyróżniono dwa rodzaje cząstek zużycia: oddzieloną i potencjalną. Przedstawiono system wielkości dający kompleksową charakterystykę geometryczną i fizyczną potencjalnej i oddzielonej cząstki zużycia. Charakterystyki te opisano funkcjami wielkości możliwych do uzyskania z badań eksperymentalnych. Wprowadzono wielkość krytycznej zakumulowanej energii właściwej i podano przykłady uzyskanych wartości dla przeprowadzonych badań.

## WPROWADZENIE

Dla różnych mechanizmów zużywania podejmowano próby opisanie warunków powstawania cząstki i jej wymiarów. Kierunki badań modelowych ukazały tylko pewne, szczególne uwarunkowania natury fizycznej i geometrycznej jej powstawania. Uzyskane zależności analityczne nie znalazły dotychczas praktycznego zastosowania, mimo iż powstały na podstawie danych eksperymentalnych. Znajomość fizycznych aspektów elementarnego zjawiska zużycia na tle zgromadzonej wiedzy o zużyciu tribologicznym jest jeszcze bardzo skromna. Stan ten wynika z ogromnej złożoności procesów zachodzących w realnych systemach tribologicznych. Poznaniu tych procesów sprzyjają, obok prac nad modelowaniem, również badania cząstek zużycia zaobserwowanych po procesach tarcia zachodzącego w obiektach rzeczywistych oraz stanu nierówności powierzchni. Kierunki tych badań można scharakteryzować łącznie jako metrologię cząstki zużycia. Spełniają one rolę pomocniczą w odniesieniu do badań nad fizycznym mechanizmem ich generowania. Badania teoretyczne i eksperymentalne zużywania dowodzą, że przed opuszczeniem tej strefy pierwotna cząstka utworzona wskutek adhezji łącząc się z innymi wielokrotnie nanosi się na obie powierzchnie tarcia. W tej sytuacji pojawia się potrzeba opracowania nowego modelu elementarnego zjawiska zużycia, umożliwiającego eliminację wpływu zjawisk wtórnych na jego obserwację.

Rozpatrując elementarne zjawisko zużycia, należy zwrócić uwagę, że przed powstaniem cząstki zużycia, w trakcie kolejnych zetknięć określonego mikroobszaru, następuje dyssypacja i akumulacja energii w pewnej objętości materiału przed jego oddzieleniem. Energia rozproszona przechodzi do otoczenia, a zużycie warunkuje energia zgromadzona w tej

objętości. Powstająca cząstka zużycia jest mniejsza od obszaru materiału, w którym następuje wydatkowanie energii podczas elementarnych zjawisk tarcia, więc zużycie należy postrzegać jako proces wieloetapowy. Miejszem generowania cząstki zużycia jest w ogólnym przypadku obszar przestrzenny większy od objętości tej cząstki, w którym zachodzą trwałe zmiany struktury i własności fizycznych materiału o charakterze niszczącym określane jako elementarne zjawiska zużycia uwarunkowane pochłanianiem energii. Można stwierdzić, że w procesie elementarnego zużycia występują dwa rodzaje cząstek: cząstka zużycia jako fragment materiału oddzielonego od warstwy wierzchniej ciała i potencjalna cząstka zużycia, która jest miejscem geometrycznym przyszłych cząstek zużycia.

W pracy zaprezentowane zostały systemy wielkości charakteryzujących zarówno rzeczywistą cząstkę zużycia (oddzieloną) oraz potencjalną cząstkę zużycia. Założono model styku plastycznego oraz ograniczono się do ściernego mechanizmu zużywania przy ustabilizowanym zjawisku tarcia.

Wprowadzono wielkość krytycznej zakumulowanej energii właściwej i podano przykłady uzyskanych wartości dla przeprowadzonych badań.

## SYSTEM WIELKOŚCI CHARAKTERYZUJĄCY POTENCJALNĄ CZĄSTKĘ ZUŻYCIA

W celu poznania i opisanie energetycznych i geometrycznych uwarunkowań tworzenia się cząstki zużycia tribologicznego rozwiązano kilka szczegółowych problemów:

- modelowanie styku nierówności powierzchni ciał [L. 1],
- analiza przemian energetycznych towarzyszących elementarnym zjawiskom tarcia i zużywania [L. 2],
- modelowanie geometryczne cząstki zużycia [L. 3],
- analiza przemian energetycznych związanych z profilem zaobserwowanym powierzchni tarcia [L. 4].

Na podstawie opracowanych modeli udało się uzyskać system wielkości dający kompleksową charakterystykę potencjalnej cząstki zużycia. Otrzymane wielkości określono zależnościami, przy założeniu ustabilizowanego zużywania ściernego powierzchni czołowej walcowej próbki metalowej. Jego elementy składowe zawarto w **Tabeli 1**.

**Tabela 1. Wielkości charakteryzujące potencjalną cząstkę zużycia**

Table 1. Characteristic values for potential wear particle

Nazwa	Zależność	Miano
Średnia chwilowa liczba pól powierzchni rzeczywistej (chwilowa liczba styków nierówności powierzchni na powierzchni nominalnej tarcia)	$n_o = \frac{A_n}{A_t} = \frac{H}{p}$	–
Średni wymiar styku elementarnego (bok kwadratu o powierzchni elementarnego styku nierówności)	$a_i = \frac{1}{\sqrt{A_n}} \cdot \frac{N}{H}$	mm
Średnia powierzchnia styku elementarnego	$a_i^2 = \frac{1}{A_n} \cdot \left(\frac{N}{H}\right)^2$	mm <sup>2</sup>
Średnia objętość jednej potencjalnej cząstki zużycia	$a_i^3 = \frac{1}{\sqrt{A_n^3}} \cdot \left(\frac{N}{H}\right)^3$	mm <sup>3</sup>
Liczba zużycia objętościowego	$\tilde{u} = \frac{a_i^3}{1\text{mm}^3} \cdot \frac{1}{\sqrt{A_n^3}} \cdot \left(\frac{N}{H}\right)^3$	–
Promień podstawy stożka modelującego cząstkę potencjalną	$R_o = a_i \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{A_n} \cdot \frac{N}{H}$	mm
Wysokość potencjalnej cząstki zużycia	$h_x = 3 \cdot a_i = \frac{3}{\sqrt{A_n}} \cdot \frac{N}{H}$	mm
Elementarne przesunięcie cząstki potencjalnej	$R_x = \frac{\pi}{6} \cdot R_o = \sqrt{\frac{\pi}{18}} \cdot \frac{1}{\sqrt{A_n}} \cdot \frac{N}{H}$	mm
Całkowita liczba potencjalnych cząstek zużycia w zużytej objętości	$\cdot n = \frac{V}{a_i^3} = V \left( \frac{H \cdot \sqrt{A_n}}{N} \right)^3$	–
Przyrost powierzchni spowodowany zużyciem	$A_\Sigma = 6n \cdot a_i^2 = \frac{6V}{a_i}$	mm <sup>2</sup>
Liczba wzrostu powierzchni materiału	$\tilde{A}_\Sigma = \frac{A_\Sigma}{1\text{mm}^2} = 6n \cdot a_i^2$	–
Średnia masa potencjalnej cząstki zużycia	$m_i = \frac{m}{n} = \rho \cdot \left( \frac{N}{H \cdot \sqrt{A_n}} \right)$	g
Liczba zużycia masowego	$\tilde{n} = \frac{m_i}{1\text{mg}} = \rho \cdot \sqrt{\left( \frac{N}{H} \right)^3}$	–
Impuls energii dostarczonej (praca tarcia wykonana w obszarze potencjalnej cząstki zużycia)	$A_n = e_R^x \cdot m_i = e_R^x \cdot \rho \cdot \left( \frac{N}{H \cdot \sqrt{A_n}} \right)^3$	J

cd. tab. 1

Impuls energii rozproszonej (energia rozproszona w otoczeniu po wykonaniu pracy $A_{it}$ )	$A_{iroz} = e_R^x \cdot \rho \cdot \left( \frac{N}{H \cdot \sqrt{A_n}} \right)^3 \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot R \cdot I_h}{\left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot R_a + \pi \cdot R \cdot I_h} \right)$	J
Impuls energii zakumulowanej (energia zakumulowana w materiale po wykonaniu pracy $A_{it}$ )	$A_{iak} = e_R^x \cdot \rho \cdot \left( \frac{N}{H \cdot \sqrt{A_n}} \right)^3 \cdot \frac{\pi \cdot R \cdot I_h}{\left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot R_a + \pi \cdot R \cdot I_h}$	J
Współczynnik akumulacji energii	$n_x = \frac{2N}{\left[ \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot R_a + 0,5\pi \cdot h_o \right] \cdot R \cdot H}$	-
Współczynnik zużycia (prawdopodobieństwo utworzenia cząstki zużycia tribologicznego)	$k = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot I_h \cdot H}{2N} = \frac{\pi \cdot R \cdot h_o \cdot H}{4N} =$	-
Współczynnik sprawności zużywania	$\eta = \frac{\pi \cdot R \cdot I_h}{\left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot R_a + \pi \cdot R \cdot I_h}$	-
<p>Objaśnienia: <math>A_n</math> – powierzchnia nominalna styku [<math>\text{mm}^2</math>], <math>A_r</math> – powierzchnia rzeczywista styku, <math>H</math> – twardość bardziej miękkiego materiału pary tarciowej [MPa], <math>p</math> – nacisk jednostkowy na powierzchni nominalnej [MPa], <math>N</math> – obciążenie pary tarciowej [N], <math>V</math> – objętość zużytego materiału [<math>\text{mm}^3</math>], <math>m</math> – masa zużytego materiału [g], <math>\rho</math> – gęstość zużytego materiału, <math>e_R^x</math> – praca właściwa zużycia, <math>R</math> – promień próbki [mm], <math>I_h</math> – liniowa intensywność zużywania [-], <math>R_a</math> – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości [<math>\mu\text{m}</math>].</p>		

## SYSTEM WIELKOŚCI CHARAKTERYZUJĄCY ODDZIELONĄ CZĄSTKĘ ZUŻYCIA

Dla oddzielonej cząstki zużycia uzyskano system wielkości ją charakteryzujący. Zawiera on wielkości przedstawione w **Tabeli 2**.

**Tabela 2. Wielkości charakteryzujące oddzieloną cząstkę zużycia**  
 Table 2. Characteristic values for separated wear particle

Nazwa	Zależność	Miano
Objętość oddzielonej cząstki zużycia	$V_{io} = \frac{m_{io}}{\rho}$	mm <sup>3</sup>
Masa oddzielonej cząstki zużycia	$m_{io} = \frac{\pi}{2} \cdot I_h \cdot \rho \cdot \left(\frac{N \cdot R}{H}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{A_n}}\right)^3$	g
Wymiar charakterystyczny oddzielonej cząstki zużycia	$a_{io} = \frac{1}{\sqrt{A_n}} \sqrt[3]{\frac{\pi}{2} \cdot I_h \cdot \left(\frac{N \cdot R}{H}\right)^2}$	mm
Impuls energii dostarczonej	$A_{io} = e_R^x \cdot m_{io} = \frac{\pi}{2} \cdot I_h \cdot \rho \cdot e_R^x \cdot \left(\frac{N \cdot R}{H}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{A_n}}\right)^3$	J
Impuls energii zakumulowanej	$A_{ioak} = \frac{\pi}{2} \cdot I_h \cdot \rho \cdot e_R^x \cdot \left(\frac{N \cdot R}{H}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{A_n}}\right)^3$	J
Liczba zużycia objętościowego	$\tilde{u}_o = \frac{1}{k} \tilde{u}$	–
Liczba zużycia masowego	$\tilde{n}_o = \frac{1}{k} \tilde{n}$	–

### KRYTYCZNA ZAKUMULOWANA ENERGIA WŁAŚCIWA

Zasadnicze znaczenie przy charakteryzowaniu struktury bilansu procesu tarcia i zużywania ma współczynnik  $\eta$ . Można go interpretować jako sprawność procesu zużywania.

$$\eta = \frac{A_{ak}}{A_t} \quad (1)$$

gdzie:  $A_{ak}$  – energia zakumulowana w materiale po wykonaniu pracy tarcia  $A_t$  [J],  $A_t$  – praca tarcia [J].

Drugą wielkością istotną przy charakteryzowaniu energetycznym procesu zużywania jest praca właściwa zużycia  $e_R^x$  [J/g] wyrażona stosunkiem pracy tarcia i masy produktów zużycia.

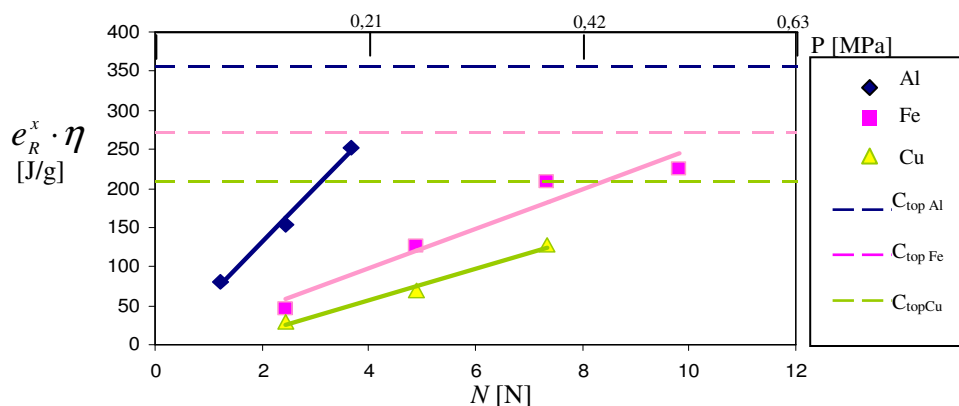
$$e_R^x = \frac{A_t}{m} \quad (2)$$

Wielkość tę można interpretować jako energetyczny miernik odporności na zużywanie tribologiczne. Jednak przy uwzględnieniu  $\eta$  można

uzyskać nie tylko pracę wykonaną na zużycie określonej masy materiału, ale także ilość energii, jaka została zakumulowana w jednostce masy zużytego materiału. W ten sposób otrzymano wielkość nazwaną krytyczną zakumulowaną energią właściwą ( $e_R^x \cdot \eta$ ) [J/g].

Tak określona wielkość może zostać zestawiona z wielkościami fizycznymi charakteryzującymi materiał, takie jak ciepło topnienia, ciepło parowania.

Na **Rys. 1** przedstawiono zależność krytycznej zakumulowanej energii właściwej od obciążenia  $N$  [N]. Zaprezentowane wartości są średnimi z sześciu pomiarów tej wielkości dla procesu zużycia ściernego uzyskane dla trzech badanych metali dla prędkości tarcia wynoszącej 0,4 m/s. Badania przeprowadzono w układzie tarcza–trzcienie (tarcza ścierna–przeciwpróbka, trzcienie–próbka) na testerze T-01M. Dodatkowo podano na wykresie wartości ciepła topnienia badanych metali. Są one wyższe od zakumulowanej energii właściwej dla odpowiadających im materiałów.



**Rys. 1.** Zależność krytycznej zakumulowanej energii właściwej od obciążenia pary tarciowej dla próbek z glinu, żelaza Armco i miedzi, linią kreskową zaznaczono wartości ciepła topnienia dla badanych metali [L. 5]

**Fig. 1.** Relation critical accumulated specific energy to the load pair of friction for samples of aluminium, Armco iron and copper, dashed lines mentioned values of heat of fusion for the metals studied [L. 5]

## ZAKOŃCZENIE

Złożoność procesów tarcia i zużywania powoduje, że występują duże trudności w ujednoczonym, kompleksowym opisie cząstek zużycia tribologicznego. W pracy zaprezentowano spójny system wielkości charakteryzujący cząstki zużycia (potencjalne i oddzielone). W celu jego uzyskania w rozważaniach przyjęto szereg założeń (m.in. zużywanie ściernie metali, proces stacjonarny), które ograniczają zakres jego stosowania. Uzyskany system wielkości tworzy całość, dzięki której można otrzymać zespół wielkości będących charakterystykami geometrycznymi i energetycznymi cząstek zużycia.

Przedstawiona wielkość krytycznej zakumulowanej energii właściwej uzupełnia dotychczas stosowane wielkości charakteryzujące energetykę procesu zużywania. W przeprowadzonych badaniach jej wartość zawierała się w przedziale  $28 \div 252$  J/g, rosła wraz z obciążeniem i nie przekraczała wartości ciepła topnienia badanych metali.

## LITERATURA

1. Sadowski P.: Metodyka modelowej oceny liczby i średniej wielkości cząstek zużycia tribologicznego. Problemy Eksploatacji nr 1, 2005.
2. Sadowski P.: Energetyczne uwarunkowania elementarnego zjawiska zużycia. Tribologia nr 3, 2005.
3. Sadowski P.: Model elementarnego procesu zużywania ściernie. Tribologia nr 4, 2009.
4. Sadowski P.: Energia akumulowana i rozpraszana w procesie zużywania ściernie. Tribologia nr 4, 2008.
5. Sadowski P.: Zagadnienie energetyczne utworzenia cząstki zużycia tribologicznego. Praca doktorska. Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, Radom 2008.

**Recenzent:**  
**Wiesław ZWIERZYCKI**

## Summary

**Two types of wear particles are distinguished: separated and potential. The research presents a system of values that gives comprehensive geometrical and physical characteristics of potential and separated wear particles. These characteristics describe functions of values obtainable from experimental studies. Introduced value critical accumulated specific energy and gives examples of achieve values for the tests.**