

**Jan SADOWSKI\***

**DYSSYPACJA I AKUMULACJA ENERGII  
JAKO CZYNNIKI WARUNKUJĄCE TRWAŁOŚĆ  
PAR TARCIOWYCH**

**DISSIPATION AND ACCUMULATION OF ENERGY  
AS FACTORS CONDITIONING STABILITY  
OF FRICTIONAL COUPLES**

**Słowa kluczowe:**

dysypacja i akumulacja energii, tarcie, zużywanie, trwałość

**Key-words:**

dissipation and accumulation of energy, friction, wear, stability

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono zużycie i trwałość par tarciovych jako skutek dysypacji i akumulacji energii. Pary te potraktowano jak systemy termodynamiczne otwarte i opisano zachodzące w nich procesy na podstawie

---

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

pierwszej zasady termodynamiki. Uwzględniono podstawowe oddziaływania energetyczne i ich związki z dyssypacją i akumulacją energii podczas tarcia. Opisano intensywność zużywania ustabilizowanego oraz trwałość par tarciovych jako funkcję parametrów tarcia, własności fizycznych trących się ciał oraz mechanizmu zużywania. Wykorzystano również zależność J.F. Archarda, warunkującą zużycie objętościowe. Opracowane zależności, opisujące trwałość par tarciovych zostały zinterpretowane fizycznie.

## WPROWADZENIE

Dyssypacja energii w budowie i eksploatacji maszyn skutkuje stratami energii i zużyciem – głównie tribologicznym. Straty energii w zasadniczej części przejawiają się jako generowane ciepło tarcia (zwane też ciepłem dyssypacji) i wzrost entropii. Powstające podczas tarcia ciepło może być odprowadzane do otoczenia. Nie powoduje ono zużycia ubytkowego, lecz zmienia pole temperatur poszczególnych elementów maszyny i ewentualnie zmienia własności ich materiału. Aby zużywanie tribologiczne nastąpiło, rozpraszanie energii musi odbywać się w inny sposób. Autor określił oddziaływanie energetyczne prowadzące do zużycia jako dyssypację mechaniczną. Towarzyszy jej produkcja entropii strukturalnej, związanej z odtwarzaniem struktury warstwy wierzchniej [L. 1]. Z kolei dyssypacja mechaniczna oznacza wykonywanie pracy mechanicznej napęcia powierzchniowego oraz mechanicznej pracy objętościowej, towarzyszącej rozdrabnianiu substancji. W pracy [L. 1] pokazano, że praca napęcia powierzchniowego jest o trzy rzędy wartości mniejsza od pracy objętościowej.

Udział wspomnianych strat, cieplnych i mechanicznych, w bilansie energii warunkuje sprawność maszyn i urządzeń mechanicznych. Dyssypacji energii nie można uniknąć w obiektach rzeczywistych. Można ją do pewnego stopnia ograniczyć, zmniejszając tarcie. Są jednak urządzenia, w których wymagane jest duże tarcie – określa się je mianem sprzęgających (hamulce i sprzęgła cierne). Składowa mechaniczna energii dyssypowanej powoduje trwałe zmiany budowy warstwy wierzchniej współpracujących elementów, co prowadzi do oddzielania się cząstek zużycia. Ubytki te po upływie dostatecznie długiego czasu powodują zmiany geometrii elementów i ich niezdatność. Za podstawę rozważań przyjęto w niniejszym opracowaniu równanie pierwszej zasady termodynamiki dla

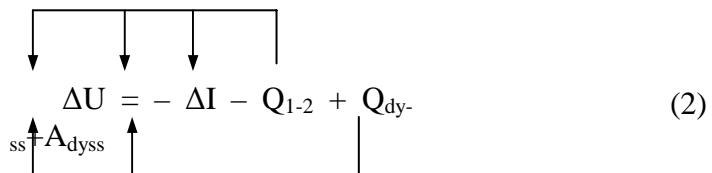
systemów otwartych oraz zależność J.F. Archarda opisującą zużycie objętościowe spowodowane tarciami. Uzyskano wnioski o termodynamicznych uwarunkowaniach trwałości elementów par tarciovych; mogą być one wykorzystane przez podmioty projektowania, wytwarzania i eksploatacji maszyn.

## ZUŻYWANIE W SYSTEMIE TRIBOLOGICZNYM JAKO PRZEJAW DYSSYPACJI ENERGII

Najczęściej jako system tribologiczny określa się parę tarciovą, natomiast pozostała część rzeczywistości przypisywana jest do otoczenia. Podejście systemowe umożliwia, jak dotychczas, ustalenie związków ilościowych między oddziaływaniami energetycznymi systemu i otoczenia z uwzględnieniem wymiany masy jedynie w przypadku potraktowania pary tarcioviej lub jej części jako systemu termodynamicznego otwartego [L. 2]. Uzyskany tutaj opis analityczny zużycia jest tak samo ważny jak równanie pierwszej zasady termodynamiki i zawiera wszystkie informacje o przemianach energii warunkujących je. Praca tarcia  $A_{t1-2}$  wykonana nad systemem przez otoczenie skutkuje: zmianą energii wewnętrznej  $\Delta U$  systemu, przepływem energii na sposób ciepła do otoczenia  $- Q_{1-2}$  i zmianą entalpii  $-\Delta I$ , czyli przeniesieniem pewnej energii do otoczenia wraz z produktami zużycia. Zmianę entalpii stanowi iloczyn zużycia masowego  $\Delta m$  i średniej entalpii właściwej produktów zużycia „i”, która charakteryzuje ilościowo dowolny mechanizm zużycia. Mianami oddziaływań energetycznych  $A_{t1-2}$ ,  $\Delta U$ ,  $Q_{1-2}$  i  $\Delta I$  jest dżul, ubytku masy  $\Delta m$  – kilogram, entalpii właściwej „i” – dżul na kilogram. Równanie pierwszej zasady termodynamiki przyjmuje, zatem postać

$$\Delta U = -\Delta I - Q_{1-2} + A_{t1-2}. \quad (1)$$

Praca tarcia jest sumą dwóch oddziaływań dyssypatywnych – ciepła tarcia  $Q_{dyss}$  i pracy dyssypacji mechanicznej  $A_{dyss}$ . Zatem zależność (1) zmodyfikować, pokazując związki między tymi oddziaływaniami dyssypatywnymi i opisanymi powyżej wzorem (2).



$$\Delta U = -\Delta I - Q_{1-2} + Q_{dyss} \quad (2)$$

Wynika z niego, że ciepło dyssypacji może wpływać na zmiany: energii wewnętrznej, entalpii (akumulacja energii cieplnej w materiale) i ciepła (dalsza dyssypacja energii w otoczeniu), natomiast praca dyssypacji mechanicznej wpływa tylko na zmiany energii wewnętrznej i entalpii (akumulacja energii mechanicznej w otoczeniu defektów struktury materiału).

Podstawowe równanie zużycia, wynikające z zasady (1), po wprowadzeniu entalpii „i”, ma postać [L. 2]:

$$\Delta m = \frac{\Delta I}{i} = \frac{A_{t1-2} - \Delta U - Q_{1-2}}{i} \quad (3)$$

W ogólnym przypadku zmiana energii wewnętrznej systemu i jego chłodzenie sprzyjają ograniczeniu zużycia tribologicznego. W przypadku procesów stacjonarnych zmiana energii wewnętrznej  $\Delta U = 0$ , a zamiast przyrostów wielkości termodynamicznych występują ich strumienie. Uwzględniając na podstawie zależności (2), że strumień entalpii ma składową cieplną  $\dot{I}_c$  i mechaniczną  $\dot{I}_m$ , można wyrazić (2) dla procesów stacjonarnych w postaci

$$\dot{I} = \dot{I}_c + \dot{I}_m = -\dot{Q} + \dot{Q}_{dyss} + \dot{A}_{dyss} \quad (4)$$

Zestawiając ze sobą oddziaływania cieplne i mechaniczne otrzymuje się dwa związki:

$$\dot{I}_m = \dot{m} \cdot a_{dyss} = \dot{A}_{dyss} = \eta \cdot \dot{A} \quad (5)$$

$$\dot{I}_c = \dot{m} \cdot u_c = -\dot{Q} + \dot{Q}_{dyss} \quad (6)$$

gdzie:  $a_{dyss}$  – praca właściwa dyssypacji mechanicznej [J/kg],  $u_c$  – energia wewnętrzna właściwa materiału produktów zużycia związana z ich nagraniem wskutek tarcia [J/kg], natomiast stosunek mocy  $\eta = \dot{A}_{dyss} / \dot{A}$  jest sprawnością zużywania; strumienie wielkości oznaczono kropką u góry. Z (5) i (6) wynika zużycie masowe systemu [L. 2]

$$\dot{m} = \frac{\dot{I}_m}{a_{dyss}} = \frac{\dot{Q}_{dyss} - \dot{Q}}{u_c} = \frac{\eta \cdot \dot{A}}{a_{dyss}} \quad (7)$$

Według zależności (7) składowa mechaniczna strumienia entalpii  $\dot{I}_m$ , bezpośrednio przyczyniająca się do rozdrabniania substancji podczas dominacji określonego mechanizmu zużywania scharakteryzowanego wielkością  $a_{dyss}$  nie zawiera informacji o wpływie procesów cieplnych na zużycie. Natomiast drugi człon zależności (7), związany z wynoszeniem przez produkty zużycia energii do otoczenia na sposób ciepła jednoznacznie wskazuje, że chłodzenie ( $-\dot{Q}$ ), przyczynia się do zmniejszania ubytku masy systemu.

Objętość zużytego materiału w jednostce czasu (strumień objętości)  $\dot{V}$  wynika z zależności J.F. Archarda, która wyrażona może być następująco po uwzględnieniu dotychczasowych rozważań:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = k \cdot v \cdot \frac{N}{H} = k \cdot \frac{\dot{A}}{\mu \cdot H} = \frac{\eta \cdot \dot{A}}{\rho \cdot a_{dyss}} \quad (8)$$

gdzie:  $k$  – współczynnik zużywania,  $v$  – prędkość tarcia [m/s],  $\rho$  – gęstość materiału [ $\text{kg/m}^3$ ],  $\mu$  – współczynnik tarcia,  $H$  – twardość materiału [MPa],  $N$  – nacisk na powierzchni tarcia [N],  $\dot{A}$  - moc tarcia [W].

Współczynnik  $k$ , charakteryzujący prawdopodobieństwo utworzenia cząstki zużycia tribologicznego, opisuje zatem następujący wzór:

$$k = \frac{\eta \cdot \mu \cdot H}{\rho \cdot a_{dyss}} \quad (9)$$

Obok własności materiału ( $\rho$ ,  $H$ ), współczynnika tarcia  $\mu$  i pracy właściwej dyssypacji mechanicznej  $a_{dyss}$ , o współczynniku zużywania decyduje również struktura bilansu energetycznego wyrażona parametrem  $\eta$ .

W celu wyznaczenia współczynnika zużywania  $k$  jako funkcji parametru  $\eta$  można zanalizować plastyczny styk trących się ciał. Jak wiadomo, stosunek powierzchni nominalnej i rzeczywistej jest stosunkiem nacisków jednostkowych odpowiednio – twardości  $H$  i nacisku  $p = N/A_n$

$$\frac{A_n}{A_r} = \frac{H}{p} = n_0 \quad (10)$$

Powierzchnia nominalna jest więc  $n_0$  razy większa od powierzchni rzeczywistej. Z kolei powierzchnię rzeczywistą  $A_r$  można w ujęciu modelowym przedstawić, jako zbiór  $n_0$  powierzchni elementarnych  $A_{ri}$  równomiernie rozłożonych na powierzchni nominalnej. W każdym elementarnym polu  $A_{ri}$  panuje naprężenie styczne  $\mu \cdot H = n_0 \cdot \mu \cdot p$ . Naprężenie to równa się gęstości energii tarcia warunkującej zużywanie. Można ją przeliczyć na gęstość energii mechanicznej związanej wyłącznie z tworzeniem się produktów zużycia, czyli pozbawianej składowej cieplnej wprowadzając parametr  $\eta$ , w sposób następujący:

$$\mu \cdot H = n_0 \cdot \mu \cdot p = n_k \cdot (\eta \cdot \mu \cdot p) = \frac{1}{k} \cdot (\eta \cdot \mu \cdot p) \quad (11)$$

Parametr ten opisują zależności

$$\eta = \frac{n_0}{n_k} = k \cdot \frac{H}{p} \quad (12)$$

Współczynnik zużywania  $k$  jako prawdopodobieństwo oddzielenia cząstki zużycia został wyrażony odwrotnością liczby impulsów energii potrzebnej do oddzielenia cząstki zużycia  $n_k$ . Jest on także funkcją parametru  $\eta$  oraz stosunku  $p/H$

$$k = \frac{\eta \cdot p}{H}, \quad (13)$$

która stanowi uzupełnienie interpretacji wyrażonej wzorem (9).

Ustalone powyżej zależności: (3), (7), (8), (9) i (13) charakteryzują zużycie i zużywanie oraz podatność materiału na oddzielanie cząstek zużycia jako wynik dyssypacji i akumulacji energii w systemie trących się ciał z uwzględnieniem niektórych własności fizycznych materiałów, struktury bilansu energii i cech mechanizmu zużywania.

## **TRWAŁOŚĆ ELEMENTU PARY TARCIOWEJ JAKO SKUTEK DYSSYPACJI I AKUMULACJI ENERGII**

W celu zilustrowania uwarunkowań trwałości elementu pary tarciowej przebiegiem dyssypacji i akumulacji energii w jego objętości jest dogodnie posłużyć się liniową intensywnością zużywania stacjonarnego  $I_h$ , która jest stosunkiem zużycia liniowego  $h$  i drogi tarcia  $L$ . Kryterium dopuszczalnego zużycia może być zużycie  $h_k$ , któremu odpowiada droga

tarcia  $L_k = v \cdot t_k$  pokonana z prędkością  $v$  w czasie  $t_k$ . Z liniową intensywnością zużycia  $I_h$  związana jest właściwa liniowa intensywność zużycia  $i_h$ . Między tymi wielkościami zachodzą następujące relacje:

$$I_h = \frac{h}{L} = \frac{h_k}{L_k} = i_h \cdot \frac{p}{H} \quad (14)$$

Jak pokazano w pracy [L. 3] właściwa liniowa intensywność zużycia  $i_h$  równa jest współczynnikowi zużycia  $k$ . Równość ta pozwala uwzględnić wyniki przeprowadzonych w poprzednim rozdziale rozważań i ustalić trwałość elementu, jako drogę tarcia lub czas tarcia do powstania dopuszczalnego ubytku liniowego  $h_k$  w sposób następujący:

$$L_k = \frac{h_k \cdot H}{p \cdot i_h} = \frac{h_k \cdot H}{p \cdot k} = \frac{h_k}{\eta} \cdot \left(\frac{H}{p}\right)^2 = \frac{h_k \cdot \rho \cdot a_{dyss}}{\eta \cdot \mu \cdot p} \quad (15)$$

$$t_k = \frac{h_k \cdot H}{v \cdot p \cdot i_h} = \frac{h_k \cdot H}{v \cdot p \cdot k} = \frac{h_k}{v \cdot \eta} \cdot \left(\frac{H}{p}\right)^2 = \frac{h_k \cdot \rho \cdot a_{dyss}}{v \cdot \eta \cdot \mu \cdot p} \quad (16)$$

Na podstawie wzorów (15) i (16) można stwierdzić, że przy założonym dopuszczalnym zużyciu liniowym  $h_k$  i danej, stałej prędkości tarcia  $v$  trwałość elementu pary tarciowej wzrasta z kwadratem twardości jego materiału i maleje z kwadratem nacisku jednostkowego panującego na powierzchni nominalnej; jest ona też odwrotnie proporcjonalnie do wartości parametru  $\eta$ , czyli do stosunku pracy dyssypacji mechanicznej i pracy tarcia. Ponadto przy danej gęstości materiału trwałość ta wzrasta ze wzrostem pracy właściwej dyssypacji mechanicznej i maleje ze wzrostem współczynnika tarcia.

## PODSUMOWANIE

Trwałość danego elementu pary tarciowej wyrażona czasem jego eksploatacji lub drogą tarcia jest warunkowana przede wszystkim przez dopuszczalne zużycie i przez szereg czynników natury fizycznej zależnych od budowy i własności materiału elementu oraz przez warunki eksploatacji. W ogólnym przypadku wpływ tych czynników ustala się empirycznie, ponieważ nie udaje się to na drodze rozważań teoretycznych, co wynika

ze złożonej natury procesów tribologicznych. Wprowadzenie jako podstawy rozważań równania pierwszej zasady termodynamiki dla systemów otwartych umożliwiło wyznaczenie zużycia masowego, a pośrednio i objętościowego będącego skutkiem dyssypacji i akumulacji energii dla dowolnego mechanizmu zużycia ustabilizowanego, dowolnych wartości parametrów tarcia i dla dowolnych materiałów pary tarciowej. Analiza liniowej intensywności zużywania doprowadziła do ujawnienia fizycznych uwarunkowań trwałości badanego elementu pary tarciowej.

## LITERATURA

1. Sadowski J.: Zagadnienia dyssypacji energii w procesie zużywania tribologicznego. Monografia nr 113, Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 2008, s. 144.
2. Sadowski J.: Osobliwości procesów termodynamicznych towarzyszących tarcu metali. Monografia nr 52, Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 2001, s. 230.
3. Sadowski J.: Zagadnienie interpretacji niezawodności elementarnego zjawiska tarcia. Materiały XXXV Zimowej Szkoły Niezawodności, ITeE, Radom 2007, s. 389–401.

**Recenzent:**  
**Stanisław F. ŚCIESZKA**

## Summary

**Wear and stability of frictional couples are presented as a function of dissipation and accumulation of energy. Such couples are treated as open thermodynamic systems and processes occurring in them are described on the basis of the first law of thermodynamics. Basic energy interactions and their relations to dissipation and accumulation of energy during friction are taken into account. The intensity of stabilised wear and the stability of frictional couples as a function of friction parameters, the physical properties of rubbing bodies, and mechanism of wear are described. J.F. Archard's dependence conditioning volumetric wear is also given. The dependencies describing the stability of frictional couples are interpreted in physical terms.**



**Elżbieta SIWIEC\***, **Monika MAKOWSKA\***, **Jarosław MOLEND\***

**MIKROSTRUKTURA I SKŁAD CHEMICZNY  
WARSTW GRANICZNYCH, POWSTAJĄCYCH  
Z UDZIAŁEM BIOKOMPONENTÓW  
OTRZYMANÝCH Z ODPADÓW  
PORAFINACYJNYCH OLEJU RZEPAKOWEGO**

**MICROSTRUCTURE AND CHEMICAL COMPOSITION  
OF BOUNDARY LAYERS FORMED WITH BIOCOMPONENTS  
OBTAINED FROM REFINING RAPESEED OIL**

**Słowa kluczowe:**

biododatki, mikrostruktura, warstwa graniczna, współczynnik tarcia, chropowatość

**Key-words:**

bioadditives, microstructure, boundary layers, coefficient of friction, roughness

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań struktury i składu chemicznego powierzchni śladów tarcia, wpływających na charakterystyki przeciwzu-

---

\* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Pułaskiego 6/10, 260-600 Radom, tel. (048) 364-42-41.

życiowe biododatków otrzymanych w wyniku oczyszczania odpadów po rafinacji oleju rzepakowego. Stwierdzono, że rodzaj zastosowanego środka smarowego w istotny sposób wpływa na mechanizm kształtowania warstwy wierzchniej, efektem czego jest zmiana mikrostruktury powierzchni tarcia. W śladach tarcia stwierdzono większą, niż to wynika ze składu stali, zawartość węgla oraz w niektórych przypadkach – tlenu, co może świadczyć o powstawaniu podczas tarcia związków organicznych lub tlenków i węglików.

## WPROWADZENIE

W budowie i eksploatacji maszyn szczególną rolę odgrywa prawidłowe smarowanie węzłów tarcia, ponieważ jest to jeden z najskuteczniejszych sposobów zmniejszania oporów ruchu oraz zabezpieczenia współpracujących tarciowo powierzchni przed zużyciem [L. 1–2]. Od współczesnych środków smarowych wymaga się, aby oprócz spełniania swoich podstawowych funkcji, były one także nieszkodliwe dla środowiska naturalnego. Środki smarowe mogą być uznane za przyjazne środowisku, jeśli do ich komponowania zastosowane zostaną nietoksyczne i łatwo ulegające biodegradacji składniki [L. 3–5]. W większości współczesnych kompozycji smarowych zawarte są dodatki uszlachetniające, które powodują poprawę określonych właściwości środka smarowego. Niektóre z nich, zwłaszcza klasyczne dodatki smarnościowe i inhibitory utleniania, wykazują szkodliwe oddziaływanie na środowisko naturalne. Dąży się więc do ograniczenia zawartości tego typu dodatków w olejach, a przez to do zmniejszenia uciążliwości ekologicznej środków smarowych. Wyeliminowanie bądź redukcja zawartości dodatków skutkuje jednak pogorszeniem właściwości użytkowych samego oleju, dlatego dąży się do zastąpienia ich nową generacją dodatków przyjaznych dla środowiska. Taką cechą posiadają dodatki zawierające w swoich strukturach wyłącznie węgiel, wodór, tlen (niekiedy azot) – tzw. dodatki typu CHO/CHON – wśród których można wymienić syntetyczne i naturalne estry, kwasy tłuszczowe, amidy, alkohole, poliole, a także alkeny [L. 6–7]. Wiele z tych substancji znajduje się w odpadach porafinacyjnych oleju roślinnego [L. 8–11]. Wyseparowanie i zastosowanie tych składników pozwoli nie tylko na ograniczanie ilości powstających odpadów, ale także opracowanie nietoksycznych środków smarowych, przeznaczonych do stosowania w urządzeniach, stwarzających duże prawdopodobieństwo skaże-