

Jan SADOWSKI*, Leszek SARNOWICZ*

BADANIA KALORYMETRYCZNE SKŁADOWEJ CIEPLNEJ I MECHANICZNEJ OPORÓW TARCIA

CALORIMETRIC RESEARCH OF THE THERMAL AND MECHANIC COMPONENTS OF FRICTION RESISTANCE

Słowa kluczowe:

Część cieplna i mechaniczna oporów tarcia, pierwsza zasada termodynamiki, badania kalorymetryczne, temperatura.

Keywords:

Thermal and mechanic parts of friction resistance, thermodynamic first principle, calorimetric research, temperature

Streszczenie

W pracy wykazano, że podział oporów tarcia na część cieplną i mechaniczną wynika bezpośrednio z równania pierwszej zasady termodynamiki dla systemów otwartych. Zaproponowano metodę oceny tych części na podstawie badań kalorymetrycznych procesu tarcia i zużycia ustabilizowanego stali gat. 45. Przytoczono wyniki tych badań i uzupełniono je interpretacją fizyczną.

* Politechnika Radomska, ul. Malczewskiego 29, 26–600 Radom

WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych zagadnień, którymi zajmuje się tribologia jest interpretacja natury oporów tarcia. Poznaniu tej natury poświęcono wiele prac teoretycznych i eksperymentalnych. Ich rezultatem są modele interpretacyjne tarcia (zwane tradycyjnie teoriami), przedstawiające naturę tarcia jako: mechaniczną, molekularną, molekularno-mechaniczną lub energetyczną. Autorzy niniejszej pracy zajmowali się termodynamiczną interpretacją oporów tarcia, którą można zaliczyć do ostatniego z wymienionych – ujęcia energetycznego. Ujęcie to, w odróżnieniu od poprzednich, traktuje tarcie systemowo, to znaczy analizuje się zarazem: dyssypację energii, zużywanie tribologiczne i inne oddziaływania energetyczne zachodzące w układzie trących się ciał stałych. Układ taki, zwany systemem tribologicznym, utożsamia się z termodynamicznym systemem otwartym [L. 1]. Podstawą opisu analitycznego przemian energetycznych w tym systemie jest pierwsza zasada termodynamiki fenomenologicznej. Można z niej wyprowadzić wnioski o naturze oporów tarcia i ustalić ich strukturę energetyczną. W niniejszej pracy wykazano, że natura siły tarcia i współczynnika tarcia może być rozumiana jako ciepłno-mechaniczna. Zaproponowano również sposób oceny części składowych oporów tarcia w oparciu o badania kalorymetryczne bilansu energetycznego procesu tarcia. Ponadto podano przykład tych badań dotyczących tarcia i zużywania ustabilizowanego próbek stalowych. Uwidoczniono wpływ temperatury na strukturę oporów tarcia. Pokazano także, iż sterowanie strukturą oporów tarcia poprzez zewnętrzny wpływ na procesy cieplne zachodzące w systemie tribologicznym warunkuje przebieg zużywania tribologicznego.

CIEPLNO-MECHANICZNA NATURA OPORÓW TARCIA

Określenie tarcia jako procesu doprowadzania energii mechanicznej do pary trącej (traktowanej w dalszym ciągu jako system termodynamiczny otwarty [L. 1]), wskutek czego jest ona całkowicie rozpraszana może być źródłem nowej interpretacji oporów tarcia i ich miary – współczynnika tarcia w oparciu o równanie pierwszej zasady termodynamiki. Tym samym uzyskany opis oporów tarcia będzie posiadał rangę prawa ogólnego, a dokładniej zasady, której prawidłowość nie została zakwestionowana. Równanie pierwszej zasady termodynamiki dla systemów otwartych ma następującą postać:

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

gdzie: ΔU – zmiana energii wewnętrznej systemu, ΔI – zmiana entalpii systemu ($\Delta I = i \cdot \Delta m$, gdzie i – entalpia właściwa produktów zużycia [J/g], Δm zużycie tribologiczne systemu [g]), Q_{1-2} – ciepło, A_{t1-2} – praca tarcia. Wyszczególnione wielkości wyrażone są w dżulach.

Praca A_{t1-2} siły tarcia $T(\tau)$, przy względnej prędkości poślizgu ciał $v(\tau)$, po upływie czasu tarcia t określa się następująco:

$$A_{t1-2} = \int_0^t T(\tau) \cdot v(\tau) \cdot d\tau \quad (2)$$

gdzie: τ – czas [s]; $0 \leq \tau \leq t$.

Równa się ona sumie ciepła dyssypacji Q_{dyss} powodującego nagrzewanie i pracy dyssypacji mechanicznej A_{dyss} – powodującej mechaniczne rozdrabnianie materiału [L. 1].

$$A_{t1-2} = A_{dyss} + Q_{dyss} \quad (3)$$

Ponieważ praca dyssypacji mechanicznej A_{dyss} jest tylko częścią η ($\eta < 1$) pracy tarcia A_{t1-2} , to można ją określić następująco:

$$A_{dyss} = \int_0^t \eta(\tau) \cdot T(\tau) \cdot v(\tau) \cdot d\tau \quad (4)$$

Natomiast ciepło dyssypacji określa zależność

$$Q_{dyss} = \int_0^t [1 - \eta(\tau)] \cdot T(\tau) \cdot v(\tau) \cdot d\tau \quad (5)$$

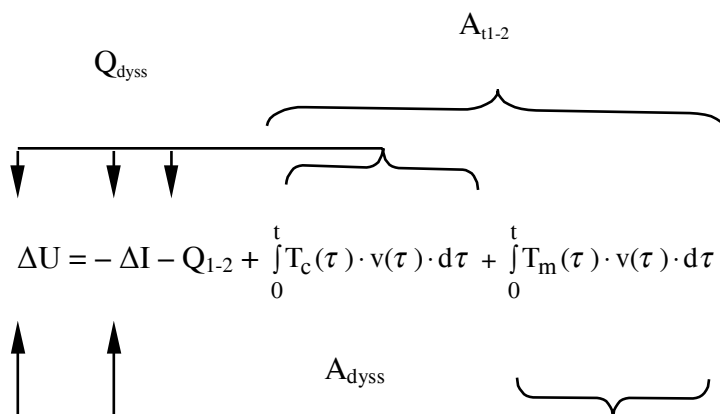
Na podstawie twierdzenia o pochodnej całki jako funkcji jej górnej granicy uzyskuje się, uwzględniając (2–5), zawiązki [L. 1]:

$$T(t) \cdot v(t) = \underbrace{[1 - \eta(t)] \cdot T(t) \cdot v(t)}_{T_c(t)} + \underbrace{\eta \cdot T(t) \cdot v(t)}_{T_m(t)}, \quad (6)$$

czyli

$$T(t) = T_c(t) + T_m(t). \quad (7)$$

Może ono służyć do zilustrowania oddziaływań energetycznych w dowolnym systemie tribologicznym, który stanowią dwa trące się ciała stałe. Struktura tych oddziaływań na makroskopowym poziomie organizacji materii przedstawia się następująco [L. 1, 2] – **Rysunek 1**:



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie struktury oddziaływań energetycznych w systemie tribologicznym [L. 1, 2]

Fig. 1. Scheme of energetic interaction in the tribological system [L. 1, 2]

Z powyższego schematu wynika, że odpowiedzią systemu na wykonanie pracy dyssypacji mechanicznej A_{dyss} , a więc pracy siły tarcia T_m , jest powstanie produktów zużycia i usunięcie ich poza granice systemu ($-\Delta m$) wraz z pewnym zasobem energii (część przyrostu entalpii $-\Delta I = -i \cdot \Delta m$), ponadto następuje nagromadzenie energii wewnętrznej potencjalnej w warstwie wierzchniej związanej w nowo utworzonymi defektami budowy materii (część przyrostu energii wewnętrznej ΔU). Z kolei ciepło dyssypacji Q_{dyss} , równe pracy siły tarcia T_c , przyczynia się do przekazania energii do otoczenia na sposób ciepła ($-Q_{1-2}$), do zwiększenia energii wewnętrznej systemu (część przyrostu energii wewnętrznej ΔU) na skutek nagrzewania jego elementów oraz do zwiększenia energii odprowadzanej do otoczenia z usuwanymi produktami zużycia (część przyrostu entalpii $-\Delta I$) na skutek ich nagrzewania.

W badaniach kalorymetrycznych bierze się pod uwagę procesy stacjonarne, stąd część cieplna T_c oporów tarcia kinetycznego T nie zależy od czasu i może być opisana wzorem [L. 1, 2]

$$T_c = (1 - \eta) \cdot T, \quad (8)$$

a część mechaniczną T_m określa się następująco:

$$T_m = \eta \cdot T. \quad (9)$$

Siły: T , T_c i T_m wywołane są działaniami siły docisku N ciał 1 i 2 do siebie. Zatem możliwa jest także termodynamiczna interpretacja współczynnika tarcia kinetycznego μ . Po podzieleniu obu stron równania (7) przez wielkość N uzyskuje się zależność [L. 1, 2]

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{T_c}{N} + \frac{T_m}{N} = \mu_c + \mu_m \quad (9)$$

Współczynnik tarcia kinetycznego jest więc sumą cieplnego współczynnika tarcia μ_c i mechanicznego współczynnika tarcia μ_m . Pierwszy z nich wiąże się z nagrzewaniem ciernym systemu tribologicznego i powstających produktów zużycia oraz otoczenia; drugi – z powiększaniem energii wewnętrznej potencjalnej systemu (w otoczeniu nowych defektów struktury materii) i ze zużywaniem tribologicznym.

BADANIA KALORYMETRYCZNE STRUKTURY OPORÓW TARCIA

Przedmiotem badań w niniejszej pracy jest równanie bilansu energii charakteryzujące proces tarcia technicznie suchego i ustabilizowanego zużycia utleniającego metali. W procesie tym, zarówno moc mechaniczna tarcia \dot{A} [W], strumień ciepła dyssypacji \dot{Q}_{dyss} [W] oraz strumień powstających produktów zużycia są traktowane jako niezależne od czasu t . Z produktami zużycia związana jest moc dyssypacji mechanicznej \dot{A}_{dyss} [W], którą w dalszym ciągu będzie się wyznaczać jako różnicę

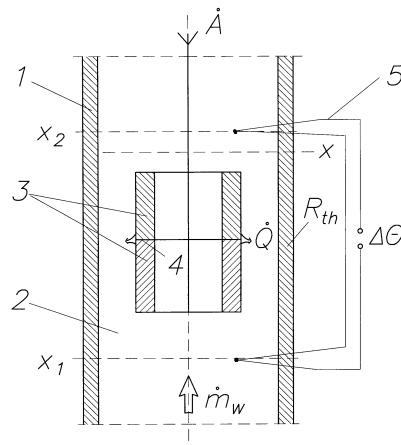
$$\dot{A}_{dyss} = \dot{A} - \dot{Q}_{dyss} \quad (10)$$

Dla przyjętego czasu tarcia w warunkach stacjonarnych praca tarcia $A = \dot{A} \cdot t$ [J], ciepło tarcia $Q_{dyss} = \dot{Q}_{dyss} \cdot t$ [J] oraz praca dyssypacji mecha-

nicznej $A_{\text{dys}} = \dot{A}_{\text{dys}} \cdot t$ [J]. Do wyznaczenia pracy tarcia A przyjęto dane uzyskane na stanowisku badawczym (tribokalorymetrze), mianowicie siłę tarcia T , prędkość tarcia v i czas t . Wartość tej pracy określa zależność

$$A = T \cdot v \cdot t. \quad (11)$$

W celu wyznaczenia ciepła dyssypacji Q_{dys} zastosowano kalorymetr przepływowy, którego schemat przedstawia rys. 2. Składa się ono z obudowy 1 o pewnym oporze cieplnym R_{th} wewnątrz której przepływa medium 2 z natężeniem \dot{m}_w [g/s]. Para trąca 3 jest usytuowana wewnątrz obudowy 1 a sam styk tarcowy 4 – źródło ciepła dyssypacji – jest chroniony przed dostępem medium 2 . W przekrojach x_1 i x_2 znajduje się spoina pomiarowa termopary różnicowej 5 , służącej do pomiaru różnicy temperatury $\Delta q = \Theta(x_1) - \Theta(x_2)$ spowodowanej przez strumień ciepła tarcia. Różnica strumieni entalpii $\dot{I}(x_1) - \dot{I}(x_2)$ zaobserwowana w przekrojach x_1 i x_2 rury 1 , równa jest strumieniowi cieplnemu \dot{Q} [L. 3].



Rys. 2. Schemat kalorymetru przepływowego

Fig. 2. Scheme of the flow-calorimeter

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{dys}} = \dot{I}(x_1) - \dot{I}(x_2) = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot [\Theta(x_1) - \Theta(x_2)] = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot \Delta\Theta \quad (12)$$

gdzie c_w ciepło właściwe medium [$J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$]. Jeśli warunki przepływu oraz własności medium w przekrojach x_1 i x_2 są takie same, to określając iloczyn $\dot{m}_w \cdot c_w$ jako stałą kalorymetru K wyrazimy strumień \dot{Q} jako funkcję różnicy temperatury $\Delta\Theta$, mianowicie

$$\dot{Q} = K \cdot \Delta\Theta \quad (13)$$

Można praktycznie zrównać temperaturę otoczenia z temperaturą medium na wejściu pomiarowym $\Theta(x_1)$. Ciepło tarcia powoduje przy odpowiednim wydatku cieczy kalorymetrycznej \dot{m}_w nieznaczny przyrost temperatury $\Delta\Theta$ rzędu 1[K], który sprawia, że kalorymetr będzie pracował w warunkach isoperibolicznych. Zaznaczy się więc rola oporu termicznego R_{th} . Przyjęcie jako medium wody destylowanej umożliwia zachowanie stałych jej własności fizycznych (gęstości, ciepła właściwego) w zakresie wartości parametrów charakteryzujących przepływ w kalorymetrze (zmiana ciśnienia na wlocie i wylocie, zmiana temperatury $\Delta\Theta$, stała prędkość przepływu, brak reakcji chemicznych i fizykochemicznych). Można więc uznać stałą kalorymetru za równą iloczynowi wydatku \dot{m}_w (te same przekroje na wlocie i wylocie cieczy kalorymetrycznej) i ciepła właściwego c_w . Aby jednak uwzględnić dodatkowe oddziaływania energetyczne (wymiana ciepła z otoczeniem, tarcie wewnętrzne cieczy) należy przeprowadzić kalibrację kalorymetru metodą elektryczną, stosując jako źródło ciepła o znanej mocy \dot{Q}_{el} np. grzałkę elektryczną. W ten sposób dla określonych wszystkich parametrów pracy kalorymetru wyznacza się jego stałą, mianowicie [L. 3].

$$K = \frac{\dot{Q}_{el}}{\Delta\Theta_{el}} \quad (14)$$

gdzie: $\Delta\Theta_{el}$ – różnica temperatury stwierdzona w przekrojach x_1 i x_2 na wskutek działania źródła ciepła o mocy \dot{Q}_{el} oraz występowania strat energii na rzecz otoczenia i tarcia wewnętrznego cieczy kalorymetrycznej oraz tarcia o próbki pracujące na biegu jałowym. Szczegółowy opis wykonania tribokalorymetru zamieszczono w pracy [L. 3].

Tabela 1. Składowe bilansu energetycznego ustalone podczas badań kalorymetrycznych procesu tarcia technicznie suchego stali normalizowanej gat. 45 [L. 3]

Tabela 1. Components of energetic balance determined as the result of calorimetric research of normalized steel 45 conducted in the condition of technically dry friction [L. 3]

Składowe bilansu	Średnia temperatura Θ [K]		
	287,26	297,64	308,14
Praca tarcia A [J]	5521,4	6324,64	8749,1
Ciepło tarcia Q_{dys} [J]	4308,9	4669,4	4898,1
Praca dyssypacji mechanicznej A_{dys} [J]	1212,5	1654,8	3850,3
Parametr η [%]	21,3	26,0	43,5

Tabela 2. Wyniki badań struktury oporów tarcia

Table 2. Research results of the structure of resistance to friction and tribological wear

Temperatura	Średnia siła tarcia	Średni współczynnik tarcia	Parametr	Część mechaniczna siły tarcia	Część cieplna siły tarcia	Mechaniczny współczynnik tarcia	Ciepły współczynnik tarcia	Średnie zużycie pary trącej
Θ [K]	T [N]	μ	η	T_m [N]	T_c [N]	μ_m	μ_c	Z [mg]
287,26	9,82	0,29	0,213	2,09	7,76	0,06	0,23	0,585
297,64	11,24	0,33	0,26	2,92	8,32	0,09	0,24	0,792
308,14	15,54	0,46	0,435	6,76	8,78	0,2	0,26	1,57

Przed przystąpieniem do badań bilansu energii ustalono eksperymentalnie stałą $K = 3,48 \text{ W} \times \text{K}^{-1}$. Elementy pary trącej miały postać cylindrów o wysokości 30 mm oraz średnicach: zewnętrznej równej 25 i wewnętrznej – równej 20 mm wykonanych z normalizowanej stali gat. 45. Tarcie ślizgowe, technicznie suche występowało między ich czołami z prędkością 0,344 m/s, pod obciążeniem normalnym równym 34 N w czasie 1638 s. Przed badaniami próbki zostały dotarte. Następnie stabilizowano temperaturę pomieszczenia ze stanowiskiem badawczym na założonym poziomie temperatury cieczy kalorymetrycznej. W badaniach ustalono trzy poziomy tej temperatury: 287,26; 297,64 i 308,14 K. Wyniki badań składowych bilansu energetycznego procesu tarcia dla przypadku pary trącej ze stali gat.45, będące średnimi z sześciu pomiarów, zestawiono w **Tabeli 1**. W **Tabeli 2** zilustrowano strukturę oporów tarcia i wartości zużycia tribologicznego zmierzonego za pomocą wagi analitycznej.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej pracy wykazano, że podział oporów tarcia na część cieplną i mechaniczną (zużyciową) wynika bezpośrednio z równania pierwszej zasady termodynamiki fenomenologicznej dla systemów otwartych. Przeprowadzona analiza energetyczna procesu i natury oporów tarcia ukazuje ważny kierunek badań tribologicznych, gdzie szczególna rola przypada kalorymetrowi przepływowemu. Uzyskane informacje o strukturze bilansu energii, charakteryzującego tarcie i zużywanie ustabilizowane metali są pomocne przy ustalaniu struktury siły tarcia i współczynnika tarcia. Z przytoczonych analiz i badań wynikają następujące wnioski:

- o strukturze oporów tarcia ustabilizowanego metali (stali normalizowanej gat. 45) decyduje temperatura styku cieznego, a pośrednio proces chłodzenia pary trącej;
- ze wzrostem temperatury styku cieznego (od 287,26 do 308,14K) rośnie siła tarcia i współczynnik tarcia;
- ze wzrostem temperatury styku cieznego rośnie wartość parametru η , czyli składowa mechaniczna oporów tarcia;
- znacznemu przyrostowi współczynnika tarcia (od 0,29 do 0,46) i siły tarcia (od 9,82 do 15,54 N) ze wzrostem temperatury styku cieznego (od 287,26 do 308,14 K) towarzyszy niewielki przyrost części cieplnej współczynnika tarcia (od 0,23 do 0,26) i części cieplnej siły tarcia (od 7,76 do 8,78 N);
- dużej zmienności mechanicznej części współczynnika tarcia (od 0,06 do 0,2) i mechanicznej składowej siły tarcia (od 2,09 do 6,76N) w przyjętym zakresie temperatury odpowiada znaczny przyrost wartości zużycia (od 0,585 do 11,57 mg).

LITERATURA

1. Sadowski, J.: Osobliwości procesów termodynamicznych towarzyszących tarcia metali. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej 2001, Radom.
2. Sadowski, J.: Thermodynamische Theorie von Reibung und Verschleiß. Tribologie und Schmierungstechnik nr 6, 2002, s. 41–47.
3. Sarnowicz L.: Analiza procesu tarcia metali na podstawie badań kalorymetrycznych. Rozprawa doktorska. Wydział Mechaniczny, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach. 1999.

Recenzent:
Marian SZCZEREK

Summary

Authors proved that friction resistance split into thermal and mechanical components directly results from the equation of the first thermodynamic principle for an open systems. The methods of this components assessment on the basis of calorimetric investigation of the friction and stable wear processes of steel 45 is proposed. The research results and a physical interpretation are presented.