

**ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY DYSSYPACJĄ MECHANICZNĄ
A ZUŻYCIEM ŚCIERNYM STOPÓW ODLEWNICZYCH**F. BINCZYK¹, G. ŚMIESZNY²^{1,2}Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów,
Politechnika Śląska, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

STRESZCZENIE

W pracy wykazano, że zużycie w wyniku tarcia pary tribologicznej jest proporcjonalne do wartości dyssypacji mechanicznej, mierzonej w początkowym okresie współpracy elementów, gdy temperatura w układzie zmienia się jeszcze w sposób liniowy. Miara odporności systemu na zużycie jest ilość energii wymaganej do zmiany masy układu o jednostkę (J/kg). Badania przeprowadzono dla par tribologicznych ze stopów odlewniczych żelaza, aluminium i miedzi.

Key words: friction, abrasive wear, coefficient of friction, dissipation energy.

1. WSTĘP

Niszczenie i zużywanie się na skutek tarcia elementów maszyn i urządzeń powoduje każdego roku wielomilionowe straty. Analizy dowodzą, że około 1/3 światowej energii jest zużywana na pokonanie siły tarcia, np. w silnikach spalinowych wartość ta szacowana jest na około 41% [1]. Niepodważalny jest więc sens dążenia do eliminacji lub ograniczenia tych strat. Cel ten zazwyczaj osiąga się poprzez określone kształtowanie właściwości pary ciernej, lub poprzez zastosowanie trzecich ciał takich jak smary i pasty, które w istotny sposób wpływają na obniżenie współczynnika tarcia, a tym samym zmniejszają wartość zużycia ściernego [2, 3]. Mało poznanym kierunkiem poprawy odporności jest kształtowanie właściwości termofizycznych tworzyw współpracują-

¹ Prof. dr hab. inż., franciszek.binczyk@polsl.pl

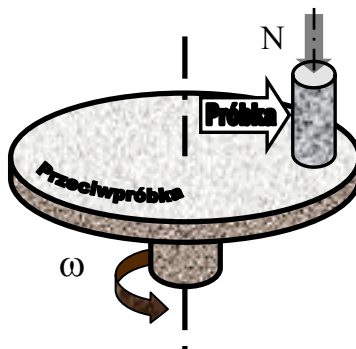
² Mgr inż., doktorant

cych elementów, a w szczególności przewodności i pojemności cieplnej [4-6]. Wielkości te są ściśle powiązane ze zjawiskami dyssypacji (rozproszenia) całkowitej energii towarzyszącej procesowi tarcia, w tym energii cieplnej i energii dyssypacji mechanicznej, związanej bezpośrednio ze zużyciem układu tribologicznego [7, 8].

Celem prowadzonych badań było określenie charakteru tej zależności, co może być podstawą testu, który w stosunkowo krótkim czasie pozwoli ocenić odporność materiałów na ścieranie.

2. METODYKA BADAŃ

Badania prowadzono przy wykorzystaniu testera T-01M, który umożliwia pomiar siły i współczynnika tarcia, pomiar temperatury próbki oraz pomiar zużycia elementów układu tribologicznego [9]. Schemat układu tribologicznego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Układ tribologiczny trzpień - tarcza
Fig. 1. Tribological system pin on disc

Badania przeprowadzono dla następujących układów tribologicznych (próbka – tarcza):

- układ 1: AK 20 - żeliwo EN-GJL-200,
- układ 2: AK 20 - żeliwo EN-GJS-500-7,
- układ 3: AK 12 - żeliwo EN-GJL-200,
- układ 4: AK20 – stal ŁH15,
- układ 5: żeliwo EN-GJL-200 – stal ŁH15
- układ 6: B101 – żeliwo EN-GJS-500-7,
- układ 7: żeliwo EN-GJL-200 - EN-GJS-500-7,
- układ 8: żeliwo EN-GJL-200 - żeliwo EN-GJL-200.

3. BILANS CIEPLNY UKŁADU

Standartowo wyposażony tester T-01M ma możliwość pomiaru temperatury trzpienia, nie jest natomiast przystosowany do pomiaru temperatury w wirującej tarczy.

Specyfika układu trybologicznego typu *pin on disc* powoduje dużą dysproporcję w masie trzpienia i tarczy i co za tym idzie dużą różnicę akumulowanej energii cieplnej na korzyść tarczy. W wyniku badań wstępnych stwierdzono, że aby poprawnie obliczyć energię cieplną gromadzoną w układzie należy termoelement pomiarowy umieścić zarówno w trzpieniu (próbce) jak i w wirującej tarczy (przeciwpróbce). Zasady tej modyfikacji stanowiska badawczego przedstawiono w pracy [10].

Praca tarcia L_t ulega całkowitej dyssypacji (rozproszeniu) w układzie na ciepło dyssypacji Q_{dys} i dyssypację mechaniczną L_m . Ciepło dyssypacji równe jest sumie energii cieplnej zgromadzonej w próbce Q_p i przeciwpróbce Q_t oraz ciepła opuszczającego układ w postaci strat w wyniku konwekcji, przewodnictwa i promieniowania Q_k . Zależność na bilans ciepła w systemie tribologicznym ma postać:

$$\begin{aligned} L_t &= Q_{dys} + L_m \\ Q_{dys} &= Q_p + Q_t + Q_k \end{aligned}$$

Po uwzględnieniu strat ciepła w próbce i przeciwpróbce, związanych z konwekcją, wartość dyssypacji mechanicznej obliczono z zależności:

$$\begin{aligned} L_m &= L_t - Q'_p - Q'_t \\ Q'_p &= c_p \cdot m_p \cdot (\Delta T_1 + \Delta T'_1) \\ Q'_t &= c_t \cdot m_t \cdot (\Delta T_2 + \Delta T'_2) \end{aligned}$$

Ostatecznie więc, wartość dyssypacji mechanicznej L_m obliczono z zależności:

$$L_m = F_t \cdot s - [c_p \cdot m_p \cdot (\Delta T_1 + \Delta T'_1) + c_t \cdot m_t \cdot (\Delta T_2 + \Delta T'_2)]$$

gdzie: F_t siła tarcia, N

s – droga tarcia, m

c_p, c_t – ciepło właściwe materiału próbki i przeciwpróbki, $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$,

m_p, m_t – masa próbki i przeciwpróbki (tarczy), kg,

$\Delta T_1, \Delta T_2$ – przyrost temperatury w próbce i tarczy, $^\circ C$,

$\Delta T'_1, \Delta T'_2$ – poprawka na obniżenie temperatury w wyniku konwekcji, $^\circ C$.

Sposób obliczenia poprawki na straty ciepła w wyniku konwekcji opisano w pracy [10].

4. PRZEPROWADZENIE BADAŃ

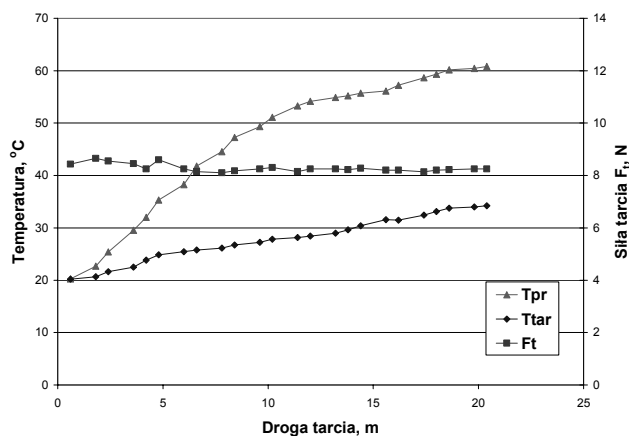
Ze względu na konieczność porównania wartości dyssypacji mechanicznej ze zużyciem w określonym systemie tribologicznym eksperyment prowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie wyznaczono wartość dyssypacji mechanicznej w zakresie liniowego wzrostu temperatury, a w drugim etapie, dla tego samego systemu (bez wyjmowania próbki i przeciwpróbki z testera) przeprowadzono pomiary zużycia.

Do badań zastosowano próbki o wymiarach $\phi 3 \times 18 \text{ mm}$ oraz przeciwpróbki, w kształcie pierścieni o średnicy zewnętrznej 38mm i wewnętrznej 18mm oraz grubości 2,5mm.

Przed właściwym pomiarem, zgodnie z zaleceniami instrukcji testera T01-M, prowadzono docieranie przez około 60s.

5. WYNIKI BADAŃ

Sposób opracowania wyników badań przedstawiono na przykładzie pary tribologicznej: próbka ze stopu AK20 i przeciwpróbka (tarcza) z żeliwa EN-GJL-200. Na rys. 2 przedstawiono przebieg zmiany siły tarcia oraz temperatury próbki ($T_{pr} = \Delta T_1 + \Delta T'_1$) i tarczy ($T_{tar} = \Delta T_2 + \Delta T'_2$), po uwzględnieniu poprawki na konwekcję.



Rys. 2. Przebiegi temperatury po uwzględnieniu poprawki na konwekcję oraz siły tarcia dla systemu 1 (trzcień - AK20, tarcza – żeliwo EN-GJL-200)

Fig. 2 The courses of the temperature after taking the amendment into consideration to the convection and friction force ,for system 1 (pin - AK20, disc - EN-GJL-200 cast iron)

Jak wynika z rys. 2, do około 20m drogi tarcia charakter zmiany temperatury w próbce i tarczy jest w zasadzie liniowy, co spełnia założenia bilansu przepływu ciepła i pozwala na obliczenie wartości energii dyssypacji mechanicznej.

Wyniki pomiarów masy przed i po badaniach:

- $m_{p1} = 0,3674 \cdot 10^{-3} \text{kg}$, $m_{p2} = 0,3592 \cdot 10^{-3} \text{kg}$,
- $m_{t1} = 17,718 \cdot 10^{-3} \text{kg}$, $m_{t2} = 17,613 \cdot 10^{-3} \text{kg}$,

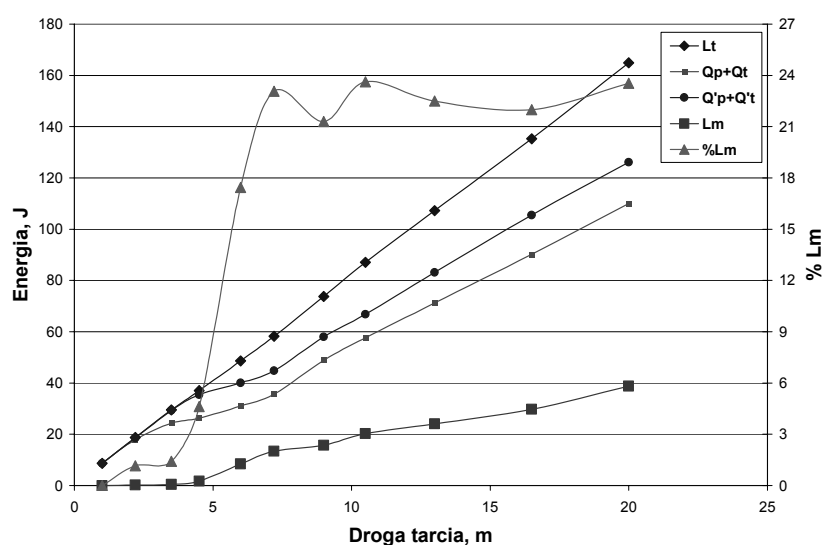
Zmiana temperatury po 20m drogi tarcia:

- dla próbki, $(\Delta T_1 + \Delta T'_1) = 40,2^\circ\text{C}$,
- dla tarczy, $(\Delta T_2 + \Delta T'_2) = 13,8^\circ\text{C}$.

Wyniki obliczeń dla drogi tarcia, równej 20m, przedstawiono w tabeli 1. Natomiast na rys. 3 przedstawiono wyniki tych obliczeń w funkcji drogi tarcia.

Tabela 1. Wyniki obliczeń energii po 20m drogi tarcia
 Table 1. The results of calculations of the energy after 20m friction distance

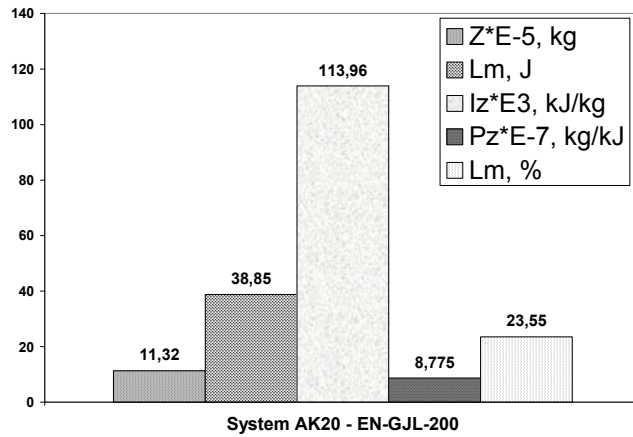
F_{sr} N	L_t J	Próbka		Tarcza		Q_p+Q_t J	$Q'_p+Q'_t$ J	L_m J	L_m %
		Q_p J	Q'_p J	Q_t J	Q'_t J				
8,25	165,00	12,30	13,15	97,7	112,95	110,00	126,15	38,85	23,55



Rys. 3. Wyniki obliczeń pracy tarcia, dyssypacji cieplnej i mechanicznej w funkcji drogi tarcia dla systemu 1 (AK20 – EN-GJL-200)

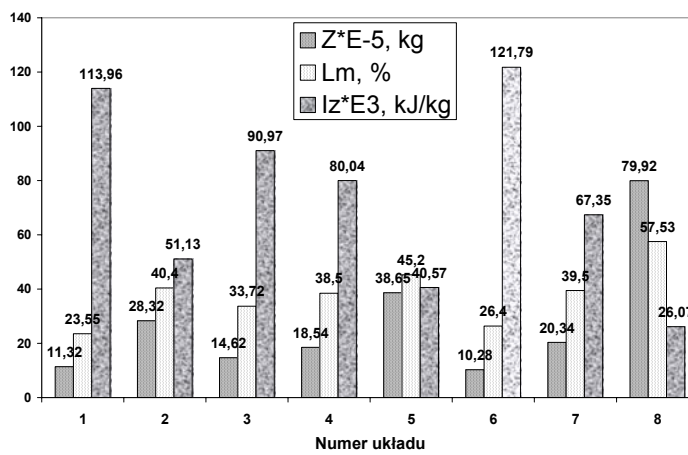
Fig. 3. Results of calculations of the friction work, thermal and mechanical dissipation in the function of the friction distance for system AK20 - EN-GJL-200 cast iron

Z rysunku wynika, że procentowy udział energii dyssypacji mechanicznej L_m w całkowitej energii tarcia wynosi około 23% i ustala się po około 5m drogi tarcia. Podobne wyniki uzyskano dla pozostałych badanych układów. Na podstawie zmiany masy próbki i przeciwpróbki po ścieraniu na drodze 2000m obliczono zużycie bezwzględne. Pracę tarcia obliczono jako iloczyn siły i drogi. Wzajemne odniesienie tych wielkości pozwoliło na obliczenie wskaźnika odporności I_z i podatności P_z na zużycie w poszczególnych badanych systemach tribologicznych. Przykłady tych obliczeń dla układu tribologicznego AK20 – EN-GJL-200 oraz układu EN-GJL-200 – EN-GJL-200, w zestawieniu z obliczoną wcześniej wartością energii dyssypacji mechanicznej L_m przedstawiono na rys. 4. Natomiast na rys. 5 przedstawiono zestawienie tych obliczeń dla wszystkich badanych układów.



Rys. 4. Porównanie dyssypacji mechanicznej, zużycia oraz odporności i podatności na zużycie dla systemu AK20 – EN-GJL-200

Fig. 4. Comparison of the mechanical dissipation, abrasive wear and wear resistance for system AK20 - EN-GJL-200



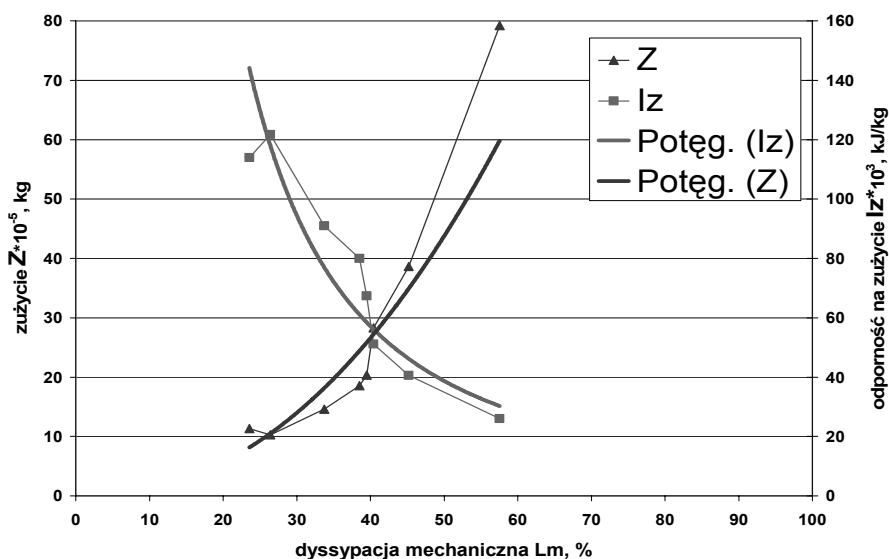
Rys.5. Porównanie dyssypacji mechanicznej, zużycia i odpornością na zużycie badanych układów tribologicznych

Fig. 5. Comparison of the mechanical dissipation, abrasive wear and wear resistance for tribological systems investigation

6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Praca sił tarcia rozprasza się całkowicie, co przejawia się w postaci ciepła dyssypacji i energii dyssypacji mechanicznej. Ciepło dyssypacji powoduje nagrzewanie systemu, czyli wzrost jego energii wewnętrznej, której część może wydostać się przez granice systemu na sposób ciepła lub jako składowa entalpii - wraz z produktami zużycia.

Podczas ustabilizowanego procesu zużywania ciepło dyssypacji jest wyprowadzane z układu przez strumienie ciepłne, zarówno przez badaną próbkę jak i przeciwcało, zgodnie z II zasadą termodynamiki (przewodzenie, konwekcja, promieniowanie). Można zatem stwierdzić, że im więcej ciepła zostanie odprowadzona z układu, tym mniej energii będzie wykorzystana na procesy niszczenia i zużycia współpracujących elementów. Tak więc energia dyssypacji mechanicznej będzie pozostawać w określonej korelacji z bezwzględnym zużyciem układu tribologicznego lub innymi wskaźnikami, np. odpornością na zużycie, wyrażającą ilość energii wymaganej do zmiany masy współpracującego układu o jednostkę (kJ/kg). Związek pomiędzy tymi wielkościami dla badanych układów przedstawiono na rys. 6. Można zaobserwować, że taka zależność istnieje i po ekstrapolacji wykazuje trend o charakterze potęgowym.



Rys. 6. Zależność pomiędzy wartością dyssypacji mechanicznej, zużyciem bezwzględnym oraz odpornością na zużycie badanych układów tribologicznych

Fig. 6. The dependence between of the mechanical dissipation, abrasive wear and wear resistance for tribological systems investigation

7. PODSUMOWANIE

Przedstawianie odporności materiału na zużycie ściernie w funkcji pracy tarcia nie jest koncepcją w pełni słuszną, nie uwzględnia bowiem wielkości dyssypacji mechanicznej. Miarą odporności systemu na ścieranie jest ilość energii wymaganej do zmiany masy układu o jednostkę (J/kg). Zależność taka może być podstawą testu, który w stosunkowo krótkim czasie pozwoli ocenić odporność materiałów na ścieranie

LITERATURA

- [1] Nakada M.: *Trends in engine technology and tribology*. Tribology International Vol. 27, nr 1, 1994, 3-7.
- [2] Janecki J., Hebda M.: *Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn*, WNT, Warszawa 1972.
- [3] Hebda M., Wachal A.: *Trybologia*, Warszawa 1980
- [4] Żurowski W.: *Energetyczny aspekt wzrostu odporności metali na zużywanie w procesie tarcia technicznie suchego*, Rozprawa Doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1996
- [5] Kragielski I.V., Dobycin M.N., Kombalov V. S.: *Osnovy rascetov na trienie i iznos*. Masinostrojenie, Moskva 1977.
- [6] Sadowski J.: *Termodynamika zużywania tribologicznego*, Wyd. WSI w Radomiu, Radom 1987
- [7] Sadowski J., Ciecieląg J.: *Badania teoretyczno-eksperymentalne pracy właściwej zużycia stali*, Trybologia 1989, nr 3
- [8] Ciecieląg J.: *Energetyczne uwarunkowania odporności metali na zużywanie trybologiczne*, Pol. Świętokrzyska, - Kielce 1994.
- [9] Tester typu tarcza-trzpień T-01M – instrukcja obsługi, Instytut Technologii i Eksploatacji, Radom 1999
- [10] Binczyk F., Śmieszny G., Nowak P.: *Określenie energii dyssypacji mechanicznej w wybranych układach trybologicznych*. „Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej”, XI Seminarium Naukowe, Katowice 2003, s.265-268.

RELATION BETWEEN THE MECHANICAL DISSIPATION AND ABRASIVE WEAR OF THE CASTING ALLOYS

SUMMARY

They demonstrated at work, that abrasive using tribological system is having good proportions to value mechanical dissipation, measured up in the initial period of the cooperation of elements. The quantity of energy of mass required to the change of the system is a measure of the resistance of the system to wiping off for the individual (J/kg).

Recenzował: Prof. Adam Gierek