

Wojciech ŻUROWSKI¹

EKSPERYMENTALNE PODSTAWY MAKSYMALIZACJI ODPORNOŚCI NA ZUŻYWANIE TRIBOLOGICZNE

W pracy przedstawiono przegląd badań eksperymentalnych odporności na zużywanie tribologiczne. Zaprezentowano podstawy teoretyczne maksymalizacji odporności na zużywanie tribologiczne układów ciał stałych.

Ponadto przedstawiono wnioski z badań próbek metali w warunkach maksymalnej odporności na zużywanie tribologiczne. Stwierdzają one, że maksymalizacja odporności na zużywanie tribologiczne warunkowana jest zachodzeniem w systemie tribologicznym procesów stacjonarnych, gdy temperatura styku tarcowego jest zbliżona do temperatury charakterystycznej. Występuje wtedy równowaga między ilością rozpraszanej energii mechanicznej i energią odprowadzaną z systemu do otoczenia na sposób ciepła.

EXPERIMENTAL BASES OF THE MAXIMIZATION ON MAXIMAL RESISTANCE TO TRIBOLOGICAL WEAR

In this work review of investigations of experimental of tribological wear resistance was introduced. Theoretical base of maximization of tribological wear resistance of arrangements of solid bodies was presented.

Moreover conclusions from investigations of samples of metals in conditions of maximum resistance onto tribological wear were introduced. They say, that maximization of tribological wear resistance affirm is by stationary processes in tribological system, when the temperature of frictional point of contact is approximate to characteristic temperature. Then there is equilibrium between quantity of distracted mechanical energy and accompanied energy from the system to environment onto the way of warmth.

1. WSTĘP

Badanie eksperymentalne odporności na zużywanie tribologiczne mają długą tradycję – pierwsze prace z tego zakresu powstały w latach trzydziestych ubiegłego wieku. Jedną z pierwszych zależności między względną odpornością metali i ich stopów na zużywanie w przypadku tarcia o papier ścierny opublikował W. Tonn [1] w roku 1935.

¹Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54; e-mail: wzurow@pr.radom.pl

Podobne badania zostały przeprowadzone przez M.M.Chruščova i M.A.Babičeva dla technicznie czystych metali i wyżarzonych stali węglowych [2]. Autorzy ci wprowadzili pewne modyfikacje w stosunku do badań W.Tonn'a pozwalające głównie uniknąć wpływu temperatury i zanieczyszczenia drogi tarcia przez produkty zużycia.

Powyższe badania nie uwzględniały wpływu twardości ścierniwa na odporność na zużywanie. Lukę tę wypełniły badania M.M. Chruščova [3] odporności na zużywanie 17 materiałów metalowych i niemetalowych ścieranych o ścierniwa różniące się między sobą twardością (od szkła do węgla boru).

P. Solski i S. Ziemia [4] przeprowadzili badania odporności stali podoitektoidalnych, normalizowanych, w procesie tarcia technicznie suchego, o żeliwo szare, stwierdzając, że o odporności na zużywanie ciał wielofazowych nie decyduje ich makrotwardość, lecz mikrotwardość głównych składników strukturalnych.

Powyższe prace pozwoliły na ujawnienie prostych korelacji między odpornością na ścieranie, a niektórymi właściwościami mechanicznymi materiału tylko w przypadku metali technicznie czystych i ich stopów poddanych uprzednio wyżarzaniu. W przypadku materiałów metalicznych o złożonej mikrostrukturze ujawniono znaczny wpływ na odporność na ścieranie składu chemicznego i mikrostruktury tych materiałów, który przeważa nad wpływem stopnia zdefektowania struktury i stanu naprężeń.

Wraz z rozwojem metod oceny odporności na zużywanie przy tarcu o cząstki ściernie tworzyw metalicznych podejmowane były próby oceny odporności na zużywanie oparte na podejściu energetycznym do zagadnienia tarcia i zużycia. Pierwsi badacze tej problematyki: N.N. Davidienkov, P.A. Rebinder i W.D. Kuźniecov zakładali występowanie ścisłego związku odporności materiału na zużywanie z jego twardością (z energią powierzchniową). W ten sposób opracowano wskaźnik odporności na zużywanie będący stosunkiem pracy siły tarcia A do masy m lub objętości V startego materiału. Zawierał on informacje o energii wydatkowanej na zużycie materiału. Jednak wartość wskaźnika zmieniała się zależnie od warunków tarcia. Przyczyną tego było występowanie mechanizmów zużycia różniących się między sobą naturą fizyczną. B.I. Kostecki [5] zaproponował zastosowanie omawianego wskaźnika pod nazwą „praca właściwa zużycia” (a właściwie, z uwagi na odniesienie do objętości, gęstości pracy zużycia) w celu scharakteryzowania poszczególnych mechanizmów zużycia.

W roku 1965 G. Fleischer [6] wprowadził na podstawie bilansu energii w procesie tarcia pojęcie pozornej gęstości energii tarcia - e_R^* zdefiniowanej tak samo jak wymieniony już wskaźnik odporności materiału na zużywanie. G. Fleischer odróżnił odporność na zużywanie tribologiczne interpretowane energetycznie zarówno dla pary trącej jak i dla jej poszczególnych elementów. Według niego odporność na zużywanie tribologiczne nie jest wielkością systemową.

K. Dubicki [7] wprowadził względny wskaźnik odporności na zużywanie. Posłużył on do porównywania właściwości tribologicznych projektowanego tworzywa ciernego (żywica AKF + wiórki metalowe + drut metalowy) z właściwościami żywicy AKF.

Opisanie odporności na zużywanie tribologiczne za pomocą ilorazu pracy tarcia i ilości zużytego materiału uwzględnia energetyczną naturę procesu tarcia, jednakże pomija efekty cieplne towarzyszące temu procesowi. Kolejne badania eksperymentalne odporności na zużywanie ujawniły jej zależność od temperatury strefy tarcia. I tak, badania G. Fleischer'a nad zużyciem okładek hamulcowych [8], ujawniły systematyczne zmniejszanie się pozornej gęstości energii tarcia ze wzrostem temperatury, przy czym

wystąpiło maksimum odporności na zużywanie badanego tworzywa w temperaturze $\sim 240^{\circ}\text{C}$, co sugeruje występowanie zakresu temperatury, której odpowiada podwyższona odporność na zużywanie badanego materiału. Podobne prawidłowości polegające na zmniejszaniu się odporności na zużywanie ze wzrostem temperatury zostały stwierdzone również przez K. Dubickiego [7] (w przypadku kompozytów epoksydowo-metalowych) oraz J. Ciecielągą i J. Sadowskiego [9] w odniesieniu do stali gat. 45.

2. ODPORNOŚĆ NA ZUŻYWANIE CECHĄ SYSTEMU TRIBOLOGICZNEGO

Polska norma PN-82/H-04332 zawiera pojęcia: odporności na zużycie materiału próbki, materiału przeciwpróbki i odporności na zużycie skojarzenia materiałowego. Wartość zużycia wyraża się ubytkiem ciężaru lub wymiaru liniowego próbki. Stosunek tego zużycia do drogi tarcia jest intensywnością zużycia (wagowego, liniowego). Jej odwrotność określa się jako odporność na zużycie (zużywanie). Najogólniej, za miarę tej odporności przyjmuje się odwrotność wartości zużycia lub odwrotność intensywności zużywania [10].

Takie postawienie sprawy ma istotną wadę. Można sobie bowiem wyobrazić sytuację, kiedy próbki dwóch różnych materiałów wykazały jednakową intensywność zużywania w danym procesie tarcia. Na podstawie obowiązujących kryteriów oceny mają one taką samą odporność na zużywanie, nawet gdyby w pierwszym przypadku została wykonana, np. dwa razy większa praca tarcia niż w przypadku drugim. W tym miejscu ujawnia się niedoskonałość proponowanych i stosowanych powszechnie miar odporności na zużywanie.

Usunięcie wymienionych niedoskonałości jest możliwe po zastosowaniu energetycznych miar odporności na zużywanie tribologiczne. Uwzględniają one nakład pracy mechanicznej wywołujący określony ubytek masy systemu. Wymagania te spełnia wielkość fizyczna określona mianem pracy właściwej zużycia e_R^x [J/g] wyrażona ilorazem pracy tarcia A_{t1-2} [J] i masy produktów zużycia Δm [g] [11].

Po wyznaczeniu masy produktów zużycia z równania pierwszej zasady termodynamiki dla systemów otwartych dochodzi się do ogólnej formuły na pracę właściwą zużycia [11]:

$$e_R^x = \frac{i}{1 - \frac{\Delta U}{A_{t1-2}} - \frac{Q_{1-2}}{A_{t1-2}}} \quad (1)$$

gdzie: i - entalpia właściwa produktów zużycia [J/g],

ΔU - zmiana energii wewnętrznej systemu [J],

Q_{1-2} - energia przekazana do otoczenia w formie ciepła [J].

W określeniu (1) zostały uwzględnione wszystkie podstawowe oddziaływania energetyczne zachodzące w systemie tribologicznym. Wynika stąd, że e_R^x może przyjmować różne wartości w przypadku zużywania tej samej pary trącej. Zależy to od zmiany energii wewnętrznej ΔU (między innymi od masy systemu, użytych materiałów, akumulacji energii wskutek nagrzewania, rozwoju defektów struktury materiału), od wymiany ciepła z otoczeniem – Q_{1-2} (między innymi od: kształtu i wymiarów pary trącej,

od stanu powierzchni jej elementów, od konwekcji i przewodzenia ciepła, od temperatury otoczenia itd.), od mechanizmu zużywania, który wyraża tu entalpia właściwa produktów zużycia „i” oraz od wykonanej pracy sił tarcia A_{t1-2} .

Podobnie jak dla systemu tribologicznego, można zdefiniować odporność na zużywanie obu trących się elementów. W pracy [11] podano, że:

$$e_R^x = e_{R1}^x = e_{R2}^x, \quad (2)$$

gdzie indeksy 1 i 2 oznaczają odpowiedni element systemu.

Jest to ogólna reguła, która głosi, że odporność na zużywanie tribologiczne jest taka sama w przypadku systemu tribologicznego, jak też jego poszczególnych elementów. Ważna konkluzja wynikająca z tej reguły ukazuje tak określoną odporność na zużywanie jako cechę systemu tribologicznego.

Jeżeli w systemie termodynamicznym zachodzą procesy stacjonarne, to praca właściwa zużycia wyrazi się stosunkiem mocy tarcia $\dot{A}$ [W] i strumienia masy produktów zużycia $\dot{m}$ [g/s] [11].

$$e_R^x = \frac{\dot{A}}{\dot{m}} = \frac{i}{1 - \frac{\dot{Q}}{\dot{A}}}. \quad (3)$$

Ważny wniosek ogólny wynikający ze wzoru (1), potwierdzony doświadczalnie, można sformułować następująco: odporność na zużywanie tribologiczne ustabilizowane rośnie ze wzrostem strumienia energii odprowadzanej z systemu do otoczenia na sposób ciepła. Zatem chłodzenie sprzyja zmniejszaniu zużycia tribologicznego. Wzór (1) ilustruje sytuację, kiedy przy odpowiednim sterowaniu procesami cieplnymi (np. przez zastosowanie wymiennika ciepła) wartość strumienia ciepła $\dot{Q}$ stanie się równa mocy tarcia $\dot{A}$. Wówczas $e_R^* \rightarrow \infty$. Odpowiada to warunkowi tarcia bezzużyciowego.

Podstawowe wielkości potrzebne do zdefiniowania pracy właściwej zużycia, to jednostkowa moc tarcia $q = \mu \cdot p \cdot v$ [$W \cdot m^{-2}$] (μ - współczynnik tarcia, p - nacisk jednostkowy [MPa], v - prędkość poślizgu [m/s]) i gęstość strumienia masy produktów zużycia J [$g \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$], których stosunek wyraża wielkość e_R^x [12]:

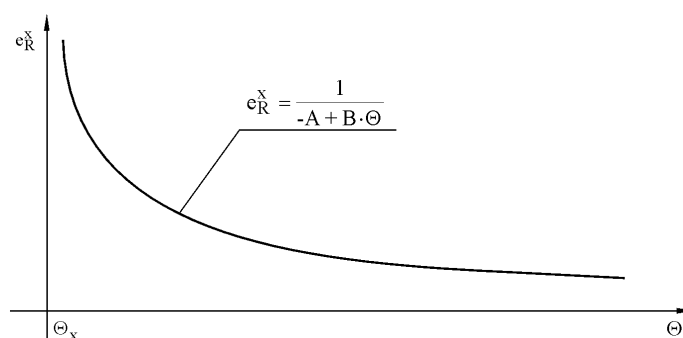
$$e_R^x = \frac{\mu \cdot p \cdot v}{J} = \frac{1}{\Theta \cdot a + b} \quad (4)$$

gdzie: a [$g \cdot J^{-1} \cdot K^{-1}$] i b [g/J] - stałe systemu tribologicznego,

Θ - temperatura bezwzględna powierzchni styku trących się ciał [K].

Wartości a i b można ustalić na podstawie doświadczenia badając prace właściwe zużycia dla dwóch zadanych temperatur Θ .

Zależność (4) jest zatem podstawą badań zjawiska maksymalizacji odporności na zużywanie systemów tribologicznych. W swojej wczesnej formie została opublikowana w pracy [13] i przedstawiona na rysunku 1. Zasadnicza różnica polega w odmiennym opisie stałych systemowych A i B i nie uwzględnieniu pracy właściwej dyssypacji mechanicznej.



Rys. 1. Zależności pracy właściwej zużycia e_R^x od temperatury styku tarcowego Θ [13]

Ponieważ między pracą właściwą zużycia e_R^x i pracą właściwą dyssypacji mechanicznej a_{dyss} zachodzi relacja $e_R^x = a_{dyss}/\eta$ oraz $\eta > 0$, to zależność (4) ma interpretację fizyczną dla temperatur $\Theta \geq \Theta_x$. W przypadku maksymalnej, skończonej odporności na zużywanie należy wprowadzić minimalną wartość η_x , otrzymując warunek:

$$(e_R^x)_{\max} = \frac{a_{dyss}}{\eta_x} \quad (5)$$

Dotychczas nie ustalano wartości η_x dla przypadku tarcia i zużywania ciał stałych.

Można to uczynić, korzystając z opisu sprawności obiegu Afanasiejwej-Ehrenfest, określonej stosunkiem ciepła i pracy, z której to ciepło powstało. Rozważania na ten temat zostały opublikowane w pracy [12]. Dla przypomnienia należy stwierdzić, że sprawność ta zależy od ciśnień źródeł pracy p_o i p . Ponieważ ze zużywaniem wiąże się bezpośrednio nie powstające ciepło tarcia, lecz różnica pracy tarcia i tego ciepła, to dla dalszych rozważań o tarcu należy wprowadzić różnicę $1 - \eta_{A-E} = \eta$. Otrzymuje się w ten sposób zależność:

$$\eta = \frac{p_o}{p}, \quad (6)$$

gdzie: $\eta = q_m/q$.

Na podstawie analizy zużywania, któremu towarzyszy przyrost objętości występują dwie wartości ciśnienia – na powierzchni rzeczywistej - jest to twardość H i na powierzchni nominalnej jest to nacisk jednostkowy p . Na tej podstawie można wzór (6) zapisać w postaci:

$$\eta = \frac{p}{H}. \quad (7)$$

Tym samym największa praca właściwa zużycia według zmodyfikowanej relacji (5) będzie wyrażona następująco:

$$(e_R^x)_{\max} = \frac{H}{p} \cdot a_{\text{dyss}}. \quad (8)$$

W dalszym ciągu rozważań można uzyskać zależność:

$$(e_R^x)_{\max} = \frac{H \cdot (H - p)^2}{p^2 \cdot \rho}. \quad (9)$$

Uzyskane powyżej wyniki rozważań pozwalają wstępnie oszacować maksymalną pracę właściwą zużycia, jako funkcję jednostkowego nacisku nominalnego, twardości materiału i jego gęstości.

Oczekiwany, teoretycznie nieskończenie duży, przyrost pracy właściwej zużycia [14] faktycznie nie nastąpi ponieważ w polu badanej powierzchni istnieje pewien rozkład temperatury wokół wartości Θ_x . Należy zatem spodziewać się tutaj wzrostu odporności na zużywanie, która może osiągnąć duże, jednak skończone wartości. Pozostaje więc pytanie: jakie największe wartości może osiągać praca właściwa zużycia?

3. WNIOSKI

Poszukiwanie zwiększonej odporności na zużywanie tribologiczne oparto na teorii i praktyce eksperymentu, ponieważ model matematyczny obiektu badań, jak wynikało z pomocniczych badań pracy właściwej zużycia (przy temperaturze od 262÷293 K) przestał obowiązywać. Stwierdzono bowiem występowanie pewnej, maksymalnej wartości pracy właściwej zużycia. W eksperymencie uwzględniono wpływ na pracę właściwą zużycia i prędkości ślizgania, obciążenia pary trącej i temperatury styku frykcyjnego. Ponadto zostały ustalone wartości parametrów tarcia, którym odpowiada największa ze stwierdzonych praktycznie odporność na zużywanie w przypadku badanych skojarzeń materiałów.

Na podstawie przeprowadzonych badań optymalizacyjnych można sformułować następujące wnioski:

1. Maksymalizacja odporności na zużywanie tribologiczne warunkowana jest zachodzeniem w systemie tribologicznym procesów stacjonarnych, gdy temperatura styku tarcowego jest zbliżona do temperatury charakterystycznej.

2. Sytuacji tej odpowiada równowaga między ilością rozpraszanej energii mechanicznej i energią odprowadzaną z systemu do otoczenia na sposób ciepła.
3. W przypadku badanych układów metali temperatura charakterystyczna zawiera się w przedziale $269 \div 306$ K.
4. Maksymalna odporność na zużywanie warunkowana jest dominacją zużywania utleniającego w styku tarciovym badanych układów metali.
5. Możliwe jest sterowanie odpornością na zużywanie tribologiczne przez wpływanie na procesy cieplne zachodzące w systemie tribologicznym.

Zweryfikowany stosowany dotychczas przez autora bilans energii charakteryzujący tarcie i zużywanie ustabilizowane, wprowadza skończony udział energii w procesie zużywania przy maksymalnej odporności na nie. Uwzględniając również opis pracy właściwej dyssypacji mechanicznej a_{dyss} według modelu wzrostu objętości podczas zużywania, można uzyskać maksymalną, ale ograniczoną pracę właściwą zużycia jako funkcję jednostkowego nacisku nominalnego, twardości materiału i jego gęstości.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Tonn W.: *Verschleiss von eisenlegierungen auf schmiergelpapier und ihre härte*. Archiv Eisenhüttenwesen, 1935, Nr 10.
- [2] Chruščov M.M., Babičev A.B.: *Isledovanije iznašivanija mietallov*, AN SSSR, Moskva, 1960.
- [3] Chruščov M.M.: *Zakonomiarnosti obrazivnogo iznašivanija*. W: *Iznosostojkost* - Red. Blagonrav A.A., Matviejevskii R.M., Nauka, Moskva, 1975.
- [4] Solski P., Ziemia W.: *Zagadnienia zużycia elementów maszyn spowodowanego tarcie*. PWN, Warszawa, 1969.
- [5] Kostecki B.I.: *Nadieżnost i dolgoviečnost mašin*, Technika, Kiev, 1975.
- [6] Fleischer G.: *Energetische methode der bestimmung des verschleißes*. *Schmierungstechnik*, 1973, Nr 4.
- [7] Dubicki K.: *Badania nad wpływem właściwości cieplnych tworzyw ciernych na ich charakterystyki tarciovo-zużyciowe*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 1980.
- [8] Fleischer G., Gröger H., Thum H.: *Verschleiss und zuverlässigkeit*, Veb Verlag Technik, Berlin, 1980.
- [9] Sadowski J., Ciciela J.: *Badania teoretyczno-eksperymentalne pracy właściwej zużycia stali*, *Trybologia*, 1989, Nr 3.
- [10] Lawrowski Z.: *Tribologia*, PWN, Warszawa 1993.
- [11] Sadowski J.: *Termodynamiczne aspekty procesów tribologicznych*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 1997.
- [12] Żurowski W.: *The new-look form of the balance of energy for stabilised friction and wear*, *Logistyka* 6/2009.
- [13] Sadowski J.: *Untersuchungen zur maximalen verschleißvestigkeit fester körper*, *Tribologie und Schmierungstechnik* Nr 3 1990.
- [14] Żurowski W., Sadowski J.: *Badania maksymalnej odporności układów ciał metalicznych na zużywanie tribologiczne. Cz. I*, *Inżynieria Powierzchni* Nr 4/2000; *Cz. II*, *Inżynieria Powierzchni* Nr 1/2001.