

Piotr SADOWSKI

**BADANIA MODELOWE ODPORNOŚCI
NA ZUŻYWANIE ŚCIERNE WYBRANYCH
GATUNKÓW STALIW**

**MODEL RESEARCH OF THE RESISTANCE TO ABRASIVE
WEAR OF THE CHOSEN KINDS OF CAST STEEL**

Słowa kluczowe:

Odporność na zużywanie, badania modelowe, zmodyfikowany tester, nowe staliwa

Keywords:

Resistance to wear, model research, modified tester, new cast steel

Streszczenie

W pracy zaproponowano metodykę badania odporności na zużywanie ścierne metali za pomocą specjalnie przystosowanego testera T-01M. Opisano badania modelowe tarcia i zużycia grupy trzech nowych staliw opracowanych w Politechnice Radomskiej. Ustalono ich odporność na zużywanie, podając jej interpretację energetyczną.

WPROWADZENIE

W Instytucie Budowy Maszyn Politechniki Radomskiej od wielu lat prowadzone są prace nad strukturą wewnętrzną konstrukcji. Pod tym pojęciem rozumie się najszerzej ujęte cechy tworzywa konstrukcyjnego. W szczególności zostały rozwinięte badania staliw, mające na celu optymalizację ich własności mechanicznych i eksploatacyjnych ze względu na skład i strukturę materiału. Duże znaczenie techniczne ma tu odporność materiału na zużywanie ściernie, zwłaszcza przewidzianego do pracy ośrodka o cechach ścierniwa (piach, skały).

Zagadnienie oceny odporności na zużywanie tribologiczne jest również przedmiotem wieloletnich analiz teoretycznych i eksperymentalnych prowadzonych w Zakładzie Podstaw konstrukcji Maszyn i Tribologii. Została tu opracowana oryginalna termodynamiczna interpretacja tarcia i towarzyszących mu procesów [1]. Wnioski wyprowadzone z tej interpretacji mają ogólne znaczenie i stanowią podstawę energetycznej oceny odporności na zużywanie.

W niniejszym opracowaniu przyjęto za cel zbadanie odporności na zużywanie ściernie grupy specjalnie skonstruowanych staliw [2] z uwzględnieniem energetycznych mierników tej odporności. Zakres prac obejmuje:

- Zaprojektowanie i wykonanie zmodyfikowanej głowicy badawczej testera T0-1M, przystosowanej do badania zużycia ściernego metali i bieżącego rejestrowania oporów i pracy tarcia.
- Skalowanie układów pomiarowo-rejestrujących zmodyfikowanego testera.
- Badania tarcia i zużycia odpowiednio wykonanych próbek trzech stali i wzorca – żelaza armco.
- Ocena odporności na zużywanie ściernie i interpretacja otrzymanych wyników badań.

OKREŚLENIE I MIARY ODPORNOŚCI NA ZUŻYWANIE

Odpornością na zużywanie tribologiczne nazywa się zdolność materiału do przeciwstawiania się zużyciu w określonych warunkach tarcia. Za miarę odporności na zużywanie tribologiczne przyjmuje się odwrotność wartości zużycia Z lub odwrotność intensywności zużycia J [L. 3]. Wartość zużycia wyraża się ubytkiem masy lub wymiaru liniowego próbki, natomiast stosunek tego zużycia do drogi tarcia jest intensywnością zuży-

cia (wagowego, liniowego). W pierwszym przypadku określa się średnią odporność J_{sr} następująco:

$$J_{\text{sr}} = \frac{1}{Z} \quad (1)$$

w drugim przypadku – chwilową wartość odporności na zużywanie tribologiczne J :

$$J = \frac{1}{J} \quad (2)$$

Zależnie od przyjętej miary zużycia lub intensywności zużywania mogą wystąpić różne miana odporności na zużywanie. Badania zużycia są często badaniami porównawczymi. W badaniach takich wyznacza się, w identycznych warunkach tarcia, intensywność zużywania lub odporność na zużywanie badanych materiałów i jakiegoś materiału przyjętego jako wzorec. W wyniku badań wyznacza się względną odporność na zużywanie J_{wz} [L. 4]:

$$J_{\text{wz}} = \frac{J_{\text{sr}}}{J_{\text{srw}}} \quad (3)$$

gdzie J_{srw} jest średnią odpornością na zużywanie materiału wzorca. Problem mian nie występuje w przypadku wprowadzenia względnej odporności na zużywanie. Znaczenie względnej odporności na zużywanie jest szczególnie istotne wówczas, gdy analizuje się ścieranie metali o materiały twarde (np. skały, piasek, tarcza ścierna), których zużycia się nie ocenia.

Oprócz omówionych powyżej, stosowane są również energetyczne miary odporności na zużywanie tribologiczne. Uwzględniają one zarówno wartość zużycia, jak i wartość pracy tarcia, która zużycie to spowodowała. Wielkością fizyczną, którą proponuje się w niniejszym referacie stosować przy ocenie odporności na zużywanie, jest praca właściwa zużycia e_{R}^x . Określa się ją stosunkiem pracy tarcia $A_{\text{t1-2}}$ i masy zużytego materiału Δm systemu tribologicznego, za który przyjmuje się układ dwóch trących się ciał stałych [L. 1]:

$$e_{\text{R}}^x = \frac{A_{\text{t1-2}}}{\Delta m} \quad (4)$$

Pracę właściwą zużycia wyraża się w dżulach na gram, pracę tarcia – w dżulach, a ubytek masy systemu w gramach.

Praca właściwa zużycia przypomina niektóre wielkości fizyczne takie, jak np. ciepło parowania [J/g], lub ciepło sublimacji [J/g], które są miarami energii (siły) wiązań molekularnych w cieczech i ciałach stałych. W każdym przypadku mamy tu do czynienia z wielkościami właściwymi (podobne cechy mają również gęstości energii, gdzie zdyssypowana energia podczas tarcia jest odnoszona do objętości zużytego materiału).

Ogólna postać zależności określającej pracę właściwą zużycia na podstawie równania pierwszej zasady termodynamiki fenomenologicznej dla systemów otwartych jest następująca [1]:

$$e_R^x = \frac{i}{1 - \frac{\Delta U}{A_{11-2}} - \frac{Q_{1-2}}{A_{11-2}}} \quad (5)$$

gdzie: Q_{1-2} – energia oddana do otoczenia na sposób ciepła [J]; ΔU – zmiana energii wewnętrznej systemu [J]; i – średnia entalpia właściwa produktów zużycia (między początkiem i końcem procesu) charakteryzująca mechanizm zużywania tribologicznego [J/g]; indeks 1-2 symbolizuje zmianę stanu systemu między początkiem i końcem procesu tarcia.

Analiza tego wzoru ujawnia złożoność pojęcia „odporność na zużycie”. Przede wszystkim nie można go przedstawiać jako cechy materiału. Jest to funkcja mechanizmu zużywania ilościowo scharakteryzowanego przez entalpię właściwą produktów zużycia „ i ”, pracy tarcia A_{11-2} , zmiany energii wewnętrznej systemu ΔU i ciepła Q_{1-2} . Ze wzoru (5) wynika także wniosek, że zachowanie identyczności procesów towarzyszących tarcu jest możliwe przy zachowaniu tych samych zmian ΔU , Q_{1-2} oraz mechanizmu zużywania „ i ” w każdym eksperymencie, co jest praktycznie bardzo trudne. Wyrażenie określające pracę właściwą zużycia (5) upraszcza się, jeżeli w systemie tribologicznym zachodzą procesy stacjonarne i przyjmuje postać następującą [L. 1]:

$$e_R^x = \frac{i}{1 - \frac{\dot{Q}}{\dot{A}}} = \frac{1}{-a + b \cdot \Theta} \quad (6)$$

gdzie: \dot{Q} – strumień cieplny płynący od systemu do otoczenia [W]; \dot{A} – moc tarcia [W]; a [g/J] i b [g/J · K] – stałe systemu tribologicznego; Θ – temperatura styku ciernego [K].

Wzór (6) informuje, że o wytrzymałości powierzchniowej przy ustabilizowanym tarcu decyduje struktura systemu tribologicznego (stałe a i b) oraz jego stan termodynamiczny – temperatura Θ . Nie grają tu roli parametry mechaniczne tarcia – nacisk i prędkość ślizgania. Wynika stąd, że temperatura jest niezależnym parametrem tarcia i powinna być w trakcie badań zadawana i stabilizowana. Należy tu zaznaczyć, że również entalpia właściwa produktów zużycia „i” ma podobne znaczenie fizyczne jak praca właściwa zużycia – jest mianowicie gęstością energii. Może być więc także przyjęta za miarę odporności na zużywanie. Aspekt praktyczny badań tribologicznych nakazuje jednak zrezygnowanie ze stosowania tej miary. Istnieje bowiem duża trudność towarzysząca wyznaczaniu wartości tej wielkości. Konieczne są tutaj badania kalorymetryczne procesu tarcia, ograniczone do przypadku tarcia i zużywania ustabilizowanego. W tej sytuacji praca właściwa zużycia jako wielkość łatwo dająca się wyznaczyć eksperymentalnie i mającą jasną interpretację fizyczną jest godną polecenia miarą odporności na zużywanie.

W niniejszej pracy zanalizowana będzie odporność na zużywanie tribologiczne wybranych materiałów na podstawie definicji określonych wzorami: (1), (3) i (4).

BADANIA ODPORNOŚCI NA ZUŻYWANIE TRIBOLOGICZNE

W celu zbadania wpływu składu chemicznego i twardości materiału na jego odporność na zużywanie ściernie należy zapewnić takie parametry i warunki tarcia, przy których zarówno pierwotna struktura i własności mechaniczne nie będą zmieniać się. Tym samym muszą być wykluczone, jako dominujące, mechanizmy zużywania utleniającego i adhezyjnego (I i II rodzaju). Można to osiągnąć przyjmując skojarzenie typu tarcza – trzpień, gdzie tarczą jest ściernica – trzpieniem natomiast cylindryczna próbka badanego materiału. Tarcza ścierna umożliwia odtwarzanie się stanu jej powierzchni w miarę wykruszania ziaren ścierniwa podczas badań. Ponadto materiał ścierny dobrze modeluje własności gleby (piasek, kamienie), w której pracują narzędzia metalowe.

Tester T0-1M z głowicą badawczą typu trzpień-tarcza umożliwia łatwe ustalenie: nacisku, prędkości poślizgu i drogi (czasu) tarcia. Jednocześnie mierzone są i rejestrowane: zmiany siły tarcia w czasie oraz bieżąca temperatura otoczenia (ok. 20°C). Wilgotność powietrza w pomieszczeniu laboratoryjnym wynosiła 50%. Ubytki masy trzpienia (pomiar różnicowy)

ustalano na wadze elektronicznej o dokładności $\pm 0,01$ mg. W celu zrealizowania ściernego mechanizmu zużywania badanego materiału przyjęto następujące wartości parametrów tarcia: obciążenie normalne – 9,81 N, prędkość poślizgu 0,2 m/s, droga tarcia – 180m. Wartości te zapewniały mieralne zużycie próbki w stosunkowo krótkim czasie.

W celu przystosowania głowicy testera T0-1M do prowadzenia badań zużycia ściernego zamontowano na jego stoliku obrotowym tarczę ścierną o wymiarach $\phi 79/\phi 20-10$ oznaczoną symbolem: 95A54N6B (elektrokorund zwykły –95A, ziarno 54 – od 355 do 300 μm , twardość - N, struktura 6, spoiwo żywiczne sztuczne – B). Próbka ściernego materiału miała postać cylindra o średnicy 5 mm i wysokości 40 mm. Badano trzy staliwa stopowe, których skład i twardość podano w **tabeli 1** oraz rafinowane żelazo armco o twardości 115 HB jako wzorzec. Rafinacja polegała na przetopieniu żelaza armco w piecu próżniowym.

Tab. 1. Skład chemiczny i twardość materiału próbek [2]

Tab. 1. Chemical composition and hardness of samples material [2]

| Nr próbki | C % | Mn % | Cr % | Mo % | Cu % | Ni % | Si % | V % | HRC |
|-----------|------|------|-------|------|------|------|------|-----|-----|
| 1 | 0,49 | 0,43 | 12,15 | 0,57 | 0,5 | 0,96 | 0,49 | 0,1 | 44 |
| 2 | 0,45 | 0,44 | 9,14 | 0,6 | 0,58 | 7,0 | 0,42 | - | 52 |
| 3 | 0,5 | - | 3,07 | 0,39 | 1,49 | 0,54 | - | 0,3 | 53 |

Na **Rysunku 1** pokazano widok ogólny zmodyfikowanego testera T-01M. W stosunku do oryginału – oprócz przebudowanej głowicy badawczej – zmieniono położenie czujnika siły tarcia. Czujnik został przesunięty w kierunku osi obrotu dźwigni służącej do pomiaru siły tarcia. W ten sposób zwiększono trzykrotnie przełożenie w układzie pomiaru siły tarcia i ustalono punkt pracy czujnika w zakresie, gdzie jego charakterystyka jest liniowa. Następnie dokonano skalowania zmodyfikowanego układu pomiarowego siły tarcia [**L. 5**].

Badania tarcia, zużywania oraz odporności na zużywanie ściernie przeprowadzono na zmodyfikowanym testerze T-01M, przyjmując dla każdego materiału próbki te same parametry doświadczenia. Liczba doświadczeń z poszczególnymi próbkami zawierała się od 8 do 10. Wyniki badań zamieszczono w **Tabeli 2**, gdzie uwzględniono tylko 6 ostatnich wyników uzyskanych w poszczególnych seriach (chodziło o wyeliminowanie z analiz procesu docierania próbki i ściernicy). Podczas badań rejestrowano prze-



Rys. 1. Widok zmodyfikowanego testera T-01M, przystosowanego do badania zużycia ściernego metali [5]

Fig. 1. The modified tester T-01 M, adopted to abrasive wear of metal research [5]

Tab. 2. Wyniki badań odporności na zużycie tribologiczne

Tab. 2. Research of the resistance to tribological wear results

| L.p. | Odporność J_{sr1} [1/mg] | Praca właściwa e_{R1}^x [kJ/g] | Odporność J_{sr2} [1/mg] | Praca właściwa e_{R2}^x [kJ/g] | Odporność J_{sr3} [1/mg] | Praca właściwa e_{R3}^x [kJ/g] | Odporność J_{srw} [1/mg] | Praca właściwa e_{Rw}^x [kJ/g] |
|------------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|--|----------------------------------|--|----------------------------------|--|
| | Próbka 1 | | Próbka 2 | | Próbka 3 | | Próbka żelazo-armco | |
| 1 | 0,203666 | 126,538 | 0,154799 | 97,1390 | 0,283286 | 212,478 | 0,004893 | 5,607 |
| 2 | 0,177936 | 108,193 | 0,175439 | 107,307 | 0,228833 | 175,494 | 0,005459 | 6,576 |
| 3 | 0,196464 | 116,877 | 0,162602 | 104,450 | 0,270270 | 213,060 | 0,004989 | 6,710 |
| 4 | 0,173010 | 103,875 | 0,177936 | 107,425 | 0,280112 | 218,927 | 0,004598 | 6,717 |
| 5 | 0,200803 | 107,480 | 0,184502 | 117,526 | 0,294118 | 238,414 | 0,004622 | 6,880 |
| 6 | 0,205339 | 98,9010 | 0,193424 | 125,576 | 0,268817 | 205,790 | 0,004348 | 6,417 |
| Miary statystyczne | | | | | | | | |
| Średnia | 0,19287 | 110,3107 | 0,174783 | 109,9038 | 0,270906 | 210,6938 | 0,004818 | 6,4845 |
| Odchylenie standardowe | 0,013895 | 9,904934 | 0,014143 | 10,09245 | 0,022591 | 20,53315 | 0,000388 | 0,457004 |
| Poziom ufności (95,0%) | 0,014582 | 10,39457 | 0,014842 | 10,59136 | 0,023707 | 21,54818 | 0,000407 | 0,479595 |

bieg siły tarcia w czasie. Był on podstawą oceny pracy tarcia. Wyznaczona praca tarcia i wartości zużycia tribologicznego próbek posłużyły do opracowania wielkości statystycznych, charakteryzujących odporność na zużycie za pomocą programu Excel.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W **Tabeli 2** zestawiono wyniki uzyskane w poszczególnych seriach badań odporności na zużywanie ściernie oraz miary statystyczne. Ustalono odporności na zużywanie J_{sr} poszczególnych materiałów oraz ich prace właściwe zużycia e_R^x . Na tej podstawie można ocenić względną odporność na zużywanie poszczególnych materiałów użytych na próbki. Przyjmując jako materiał bazowy ten, który wykazał najmniejszą odporność, czyli żelazo armco, można wyznaczyć następujące odporności względne na zużywanie:

Przez analogię do odporności względnej J_{wz} można wprowadzić odpowiednie stosunki prac właściwych zużycia i ustalić wartości względnej odporności na zużywanie e_{wz}^x . Dla przypadku przeprowadzonych badań są to następujące wartości:

Odniesienie otrzymanych rezultatów do wybranych, podstawowych własności fizycznych materiału bazowego użytych próbek – żelaza jest możliwe dzięki energetycznej interpretacji odporności na zużywanie za pomocą pracy właściwej e_R^x . Zauważamy mianowicie, że ciepło parowania żelaza $r_{Fe} = 6,364$ kJ/g. Jest to wartość zbliżona do pracy właściwej zużycia żelaza armco e_{Rw}^x , która wyniosła 6,4845 kJ/g. Można zatem rozważyć przyjęcie tej wartości jako wzorcowej w badaniach względnej odporności stali na zużywanie tribologiczne zinterpretowanej energetycznie. Można również wyrażać pracę właściwą zużycia ściernego stali jako funkcję ciepła parowania żelaza. W przypadku uzyskanych wyników badań w niniejszej pracy są to następujące zależności: $e_{R1}^x = 17,334 r_{Fe}$; $e_{R2}^x = 17,269 r_{Fe}$; $e_{R3}^x = 33,107 r_{Fe}$; $e_{Rw}^x = 1,019 r_{Fe}$.

Uzyskane rezultaty badań przedstawione w niniejszym opracowaniu pozwalają stwierdzić, co następuje:

- Tester T-01M można, po odpowiedniej modyfikacji, przystosować do badań zużywania ściernego materiałów, tym samym – poszerzyć zakres jego wykorzystania.
- Względna odporność na zużywanie tribologiczne wyrażona jako stosunek odwrotności wartości zużycia różni się istotnie od względnej odporności na zużywanie wyrażonej stosunkiem prac właściwych zużycia.
- Skład chemiczny staliwa jest czynnikiem warunkującym odporność na zużywanie tribologiczne, przy czym jego twardość nie świadczy jednoznacznie o tej odporności.
- Wyrażenie odporności na zużywanie stali i żelaza armco za pomocą pracy właściwej zużycia daje podstawy do powiązania jej z ciepłem parowania żelaza.
- Praca właściwa zużycia, jako energetyczna miara odporności na zużywanie, uwzględniająca obok zużycia również nakład energii powodujący je, powinna być przedmiotem dalszych analiz i interpretacji. Ocena tej odporności powinna być odnoszona względem podstawowych struktur układu żelazo – węgiel: ferrytu, perlitu i cementytu.

LITERATURA

1. Sadowski, J.: Osobliwości procesów termodynamicznych towarzyszących tarcia metali. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej 2001, Radom.
2. Wojtkun F.: Staliwo odporne na ścieranie, zwłaszcza w podwyższonych temperaturach. Świadectwo Autorskie Nr 27889 UP RP z dn. 25 listopada 1992.
3. Lawrowski Z.: Tribologia. Warszawa, PWN 1993.
4. Solski P., Ziemia S.: Zagadnienia zużycia elementów maszyn spowodowanego tarcia. Warszawa, PWN 1969.
5. Sadowski P.: Badania odporności na zużywanie ściernie wybranych gatunków staliw. Sprawozdanie z badań własnych; IBM, Politechnika Radomska 2002 r.

Recenzent:
Marian SZCZEREK

Summary

The paper presents the method of a resistance to wear investigation with the use of specially adopted tester T-01 M. The model research of friction and wear of three new cast steel, which were elaborated in Radom Technical University, are described. Theirs resistances to wear were evaluated. The energetic interpretation of resistance is presented.