

ROLA TWARDOŚCI W SYSTEMACH TRIBOLOGICZNYCH

Streszczenie

W artykule przytoczono podstawowe procedury badawcze pomiarów twardości różnych materiałów. Omówiono rolę twardości w ocenie wybranych parametrów węzłów tribologicznych. Ocenie poddano zużycie tribologiczne węzła tarcia, temperaturę czy pracę właściwą zużycia.

WSTĘP

Twardość materiału, głównie z uwagi na sposób jej pomiaru, określa się obecnie jako miarę odporności tegoż materiału na odkształcenie trwale powstające na skutek wcisku tzw. wgłębnika.

W próbie twardości, mierzy się praktycznie opór dyslokacji, które ulegają przemieszczeniu i zależnie od rodzaju wiązań materiału są one stosunkowo słabe np. w metalach gdzie atomy powiązane są wiązaniem metalicznym, czy też stosunkowo silne dzięki wiązaniom kowalencyjnym np. w materiałach ceramicznych (diament C, karbokorund SiC) jak również kowalencyjno-jonowych np. korundu Al_2O_3 . Wiązania metaliczne praktycznie ulegają odkształceniu plastycznemu, natomiast kowalencyjne ulegają zerwaniu i ponownemu odtworzeniu. W przypadku wiązań jonowych, poślizgi dyslokacyjne odbywają się po kierunkach krystalograficznych, co zmniejsza ilość możliwości i jest przyczyną stosunkowo wysokiej twardości materiałów o tej budowie.

Przedstawiona poniżej tablica zawiera pokrótce stosowane metody pomiaru twardości, ich specyfikę ale również świadczy o trudności porównania otrzymanych wyników.

Jeszcze inną metodykę badania twardości opracowano dla kopalin i minerałów. Utworzono dziesięciostopniową skalę twardości **Mohsa** minerałów charakteryzująca odporność na zarysowania przez materiał twardszy materiału bardziej miękkiego. Twardość poszczególnych minerałów nie jest ułożona proporcjonalnie czy liniowo, lecz ma charakter porównawczy. Minerale są ustawione od najbardziej miękkiego do najtwardszego. Każdy minerał może zarysować minerał poprzedzający go na skali (bardziej miękki) i może zostać zarysowany przez następujący po nim (twardszy). Jest to jedynie skala orientacyjna.

Twardość ekwiwalentna

W większości zastosowań przemysłowych materiały powinny być odporne na różne czynniki a połączone ze sobą stanowią pewną kombinację składników prowadzącą do różnych poziomów odporności. W niektórych przypadkach osiągnięcie wysokiej wytrzymałości w połączeniu z odpornością na ścieranie wymaga struktur martenzytycznych. Z kolei uzyskanie wytrzymałości i twardości oraz udarności wymaga trójfazowych struktur: bainitu, ferrytu, skoagulowanego perlitu. Stąd wymagane są technologie stalownicze zapewniające wysokie walory użytkowe i jakościowe. Na rys.1 zaprezentowano przykładową budowę materiału będącego mieszaniną różnych materiałów ściernych o różnej twardości i procentowym udziale struktur.

Przydatna wówczas jest tzw. twardość ekwiwalentna. Ekwiwalentna twardość materiału ściernego T_0 jest równa sumie iloczynów procentowej zawartości poszczególnych składników stałych materiałów i ich twardości:

$$T_0 = (\%)_1 T_1 + (\%)_2 T_2 + (\%)_3 T_3 + \dots \quad (1)$$

gdzie: $(\%)_{1,2,3}$ – procentowy udział poszczególnych składników zawartych w materiale ściernym, $T_{1,2,3}$ twardość poszczególnych materiałów.

W innych publikacjach [1] autorzy wiążą twardość z modułem sprężystości objętościowej K , która jest mierzalną wielkością i dobrze zdefiniowaną. Autor [1] pokusił się nawet o graficzną zależność twardości wybranych kilkunastu materiałów w funkcji ich modułu sprężystości objętościowej K , co pokazano na rys. 2. Aproksymując zależności przedstawione na rysunku funkcją liniową otrzymał zależność postaci:

Tab.1. Porównanie podstawowych metod pomiaru twardości

Metoda i jej cechy	Metoda Vickersa	Metoda Rockwella	Metoda Brinella
Rodzaj wgłębnika	czworoboczny ostrosłup diamentowy o kącie wierzchołkowym $\alpha=136^\circ$	- stożek diamentowy o kącie wierzchołkowym $\alpha=120$, lub - kulka stalowa $1/16''$ lub $1/8''$	-kalibrowana, hartowana kulka stalowa o średnicy 10, 5, 2,5 mm
Zakres pomiarowy	1) Nanotwardość dla obciążeń do 10 G 2) Mikrotwardość - dla obciążeń do 200 G. 3) Twardość pod małymi obciążeniami dla obciążeń od 200 do 1000G. 4) Makrotwardość dla obciążeń od 1 do 120 kG.	- skala B (kulka, nacisk 100kG) stosowana dla stali węglowych, brązów i mosiądzów o twardości HRB=30-100 - skala C (stożek, nacisk 150kG) pomiar twardości stali twardych, hartowanych, stopów twardych	Zakres pomiarowy głównie stali to twardość HB do 500 . Przy wartościach wyższych używać należy kulek z węglików spiekanych.
Zależności definicyjne	Twardość Vickersa oblicza się jako stosunek obciążenia wgłębnika P do powierzchni bocznej wgniecionego ostrosłupa A_b : $HV = P/A_b$ [kG/mm] a $A_b = a^2 \cdot (2 \sin \alpha / 2)$ [mm ²], stąd twardość wynosi: $HV = 1,8544 P/a^2$ [kG/mm ²] gdzie a jest przekątną odcisku [mm]	Twardość Rockwella jest różnicą stałej głębokości odpowiadającej obciążeniu wstępnemu oraz trwałego przyrostu głębokości h odcisku spowodowanego przez obciążenie główne. Twardość HR: $HR = K - (h/0,002)$ gdzie K- stała wartość równa: - 100 dla stożka - 130 dla kulki	Twardość Brinella HB to iloraz nacisku P i powierzchni kulistego wgłębienia A_{cz} co przy średnicy użytej kulki D i średnicy odcisku d daje zależność na twardość: $HB = P / A_{cz} = 2P / (\pi D [D - (D^2 - d^2)^{0,5}])$ Przy czym: $0,25D \leq d \leq 0,7D$
Czas działania wgłębnika	- dla stali i żeliwa 10 - 15 sekund, - dla innych metali 30 - 35 sekund.	Obciążenie wstępne wynosi 10 kG, niezależnie od typu wgłębnika	-dla metali o HB100-15 sek. dla metali o HB 32-100-30 sek. dla metali o HB<32 -60 s

$$HV = a K = 10,236 K \quad (2)$$

Moduł sprężystości objętościowej K można również obliczyć, z błędem nie przekraczającym 2%, zgodnie z teorią Marvina Cohena z Uniwersytetu w Berkeley (1987 r.), z której wynika iż:

$$K = 1761 r_0^{-3,5} \quad (3)$$

gdzie: K - moduł sprężystości objętościowej idealnego kryształu, w GPa, r_0 - odległość równowagowa między atomami lub jonami, czyli długość wiązania chemicznego w sieci krystalicznej, Å

Ze strony mechanicznej jak wiemy moduł sprężystości objętościowej K związany jest z modułem Younga E zależnością:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (4)$$

1. ROLA TWARDOŚCI W POMIARACH ZUŻYCIA TRIBOLOGICZNEGO

Jednym z najbardziej znanych i stosowanych do tej pory zależności określającej wielkość zużycia (utruty masy lub objętości materiału) od podstawowych parametrów procesu jest formuła Arczarda, przedstawiona w 1953 [2] roku dla zużycia adhezyjnego, która okazała się też pomocna dla zużycia ściernego:

$$W = k L d/H \quad (5)$$

gdzie: W - wielkość zużytego materiału, k - stała zależna od warunków zużycia, L - obciążenie, d - droga tarcia, H - twardość.

Niektórzy badacze proponowali pomnożyć twardość przez 3, inni stosowali zależności gdzie wielkość twardości podnoszono do potęgi 3/2.

Zależność (5) była przekształcona przez Rabinowicza [3] dla warunków procesu zużycia typu three-body do postaci:

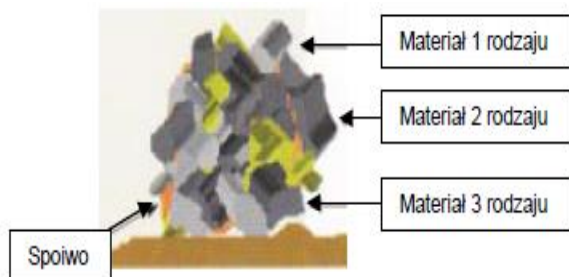
$$W_V = \frac{2tg \alpha s F_N}{\pi H} \quad (6)$$

gdzie: W - wielkość zużytego materiału, s - droga tarcia, F_N - obciążenie normalne, H - twardość poddawanej zużyciu powierzchni, α - kąt natarcia cząstki ściernej.

Z kolei Zum Gahr w swojej pracy [4], przedstawił zależność na zużywanie tribologiczne w postaci:

$$W = f_{ab} A_V s \quad \text{przy czym} \quad f_{ab} = \frac{A_V - (A_1 - A_2)}{A_V} \quad (7)$$

gdzie: A_V - powierzchnia poprzecznego przekroju ścieżki tarcia, A_1 i A_2 - razem przedstawiają powierzchnie poprzecznego przekroju



Rys. 1 Budowa materiału ściernego oddziaływającego na materiał trudnościeralny

materiału, zmieszczonego na ścieżce tarcia. Dla czystego skrawania $f_{ab}=1$, a dla czystego wytłaczania $f_{ab}=0$.

Innymi słowy materiał z większą skłonnością do deformacji będzie się szybciej odkształcał plastycznie niż skrawał. Nie operuje się w tym przypadku w ogóle twardością.

W późniejszej swojej pracy [5] Zum Gahr przewyżczył te sprzeczności, podając formułę intensywności zużycia w postaci:

$$W_{1/s} = \varphi f_{ab} \frac{p}{H_{def}}, \quad (8)$$

gdzie: φ —współczynnik geometryczny, zależny od formy zużywających się części, p - nacisk powierzchniowy, H_{def} - twardość wysoko zdeformowanego metalu, tj produktów zużycia. gdzie: W - wielkość zużytego materiału, s - droga tarcia, F_N - obciążenie normalne, H - twardość poddawanej zużyciu powierzchni, α - kąt natarcia cząstki ściernej.

Formuła ta daje już dużą zgodność z danymi eksperymentalnym przedstawionymi na rysunku 3 i ma dostatecznie wysoki współczynnik korelacji liniowej zależności pomiędzy odpornością na zużywanie a wyrażeniem H_{def}/f_{ab} (tutaj H_{def} jest twardością Vickersa HV_{10}).

Mniemanie iż twardość warunkuje zużywanie W powierzchni, znalazło odzwierciedlenie we współczesnej postaci formuły Arczarda [1]:

$$W = K_s \frac{P}{p_m} \quad (9)$$

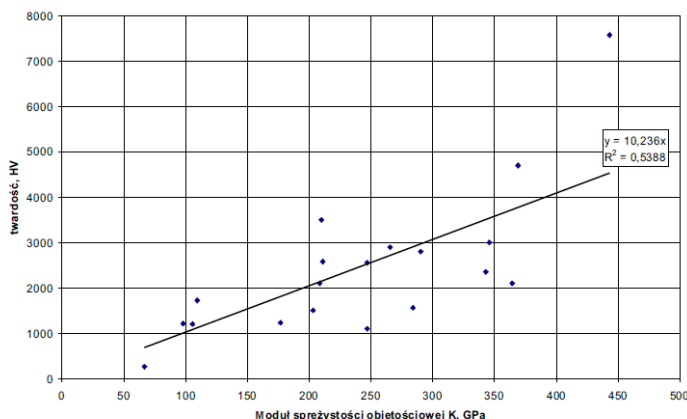
gdzie: K - stała włączająca warunki tarcia i formą produktów zużycia, s - droga tarcia, P - obciążenie, p_m - nacisk jednostkowy wywołujący plastyczne odkształcenie, ekwiwalent twardości.

2. TWARDOŚĆ W MODELOWANIU WĘZŁÓW CIERNYCH

Budowane w oparciu o zasady termodynamiki modele węzłów tarcia, zawierają również w wielu przypadkach parametr twardości materiałów pary cierniej. W pracy [7] przedstawiono opis tarciowego źródła ciepła, w którym ustalono formułę określającą możliwy przyrost temperatury strefy tarcia zależny od min. twardości:

$$\Theta_{max} - \Theta_p = (\mu \cdot H) / \rho \cdot c_p \quad (10)$$

gdzie: Θ_{max} – maksymalna temperatura osiągnięta w węźle, Θ_p - temperatura początkowa, μ - współczynnik tarcia, H - twardość materiału, ρ - gęstość materiału próbki, c_p - ciepło właściwe materiału



Rys. 2. Zależność twardości HV wybranych materiałów twardych od modułu sprężystości objętościowej K [GP], [1.]

W innych modelach węzła tarcia ustabilizowanego [8] określa się z użyciem twardości H , np. grubość strefy tarcia δ :

$$\delta = a \cdot p / H \quad (11)$$

gdzie: a - długość przesunięcia próbki równa długości ciała zgodnie z wektorem prędkości, p - nacisk jednostkowy na powierzchni współpracy A_n ,

W oparciu o tak określoną grubość strefy tarcia [7] można ocenić masę m_o uczestniczącą w rozpraszaniu energii w węźle tarciowym a mianowicie:

$$m_o = a \cdot p \cdot A_n \cdot \rho / H \quad (12)$$

Przy konstrukcji węzła ciernego, w którym znacząco różnią się twardością próbka i przeciwpróbka [9], określa się zużycie objętościowe V_R czy liniowe h_R najczęściej badanego materiału próbki z użyciem twardości H_1 :

$$V_{R1} = (F_n \cdot s_R) / H_1, \quad h_{R1} = V_{R1} / A_{R1} = p_a \cdot s_{R1} / H_1, \quad (13)$$

Autor operuje w pracy [9] pojęciem tzw realnego kontaktu n_o , który jest również funkcją twardości i nacisku:

$$n_o = A_a / A_r = H / p_a \quad (14)$$

gdzie: A_a, A_r – powierzchnia nominalna i rzeczywista kontaktu, p_a - nacisk powierzchniowy.

Przedstawia również w [10], pojęcie tzw twardości zastępczej H_s na potrzeby badań tribologicznych:

$$H_s = \frac{\Delta m_{V1} \cdot H_1 \cdot H_2}{\Delta m_{V1} H_2 + \Delta m_{V2} H_1} \quad (15)$$

gdzie: m_{V1}, m_{V2} – zużycie masowe próbki i przeciwpróbki, m_V – zużycie sumaryczne pary trącej.

W najnowszym opracowaniu [11] autor zaproponował formułę, z uwzględnieniem realnych warunków kontaktowania się nierówności powierzchni systemu tribologicznego, która w bilansie energetycznym opisuje rzeczywiste naciski jednostkowe p_r w postaci:

$$p_r = \sqrt[3]{\left(\frac{\rho}{\mu}\right)^2 \cdot e_r^* \cdot p \cdot c_p (\theta - \theta_x)} \quad (16)$$

gdzie: ρ - gęstość materiału próbki, μ - współczynnik tarcia, e_r^* - praca właściwa zużycia, p – nominalne naciski w kontakcie ciernym, c_p - ciepło właściwe, $\theta - \theta_x$ – przyrost temperatury węzła.

Podana formuła spełnia równanie bilansów masy i energii dla badanego przypadku systemu tribologicznego a nie zawiera parametru twardości. Tak opisany nacisk rzeczywisty p_r eliminuje konieczność wprowadzania do opisu węzła z konieczności, np. twardości bardziej miękkiego elementu pary trącej lub granicy plastycznego płynięcia materiału.

PODSUMOWANIE

O trudnościach w interpretacji i porównaniu wyników badań tribologicznych pisano już wielokrotnie [12]. Modeli węzła tarciowego również w literaturze jest wiele. W wielu z nich występuje jak przedstawiono na kilku przykładach, parametr twardości. Intuicyjnie powinien on warunkować wielkość zużycia węzła czy opory ruchu.

Ale już ze sposobem interpretacji twardości materiału jako parametru w opisie modelu jest problem. W zasadzie jest to wielkość bezwymiarowa. W modelach tribologicznych występuje jako wiel-

kość fizyczna w MPa. Mierzona jest, jak pokazano na rysunku 1, metodą pomiaru statycznego. W zastosowaniu do opisu węzła ciernego powinna mieć wartość mierzoną też dynamicznie, wynikającą z dynamicznej pracy skojarzenia ciernego.

Twardość dynamiczna wyznaczana za pomocą odpowiednich twardościomierzy dynamicznych (młotek Poldi'ego, metoda Shore'a) oparta jest o metody dynamiczno-plastyczne lub dynamiczno-sprężyste przy prędkości odkształcenia około 10^3 s^{-1} . Metody nie są znormalizowane i trudno porównać wyniki.

Badania szybkich procesów tribologicznych, w tym dynamicznej twardości wydaje się być możliwa dzięki współczesnej technice laserowej, przy wykorzystaniu nanosekundowych impulsów laserowych [13]. Indukowana impulsem laserowym fala uderzeniowa z prędkością 10^6 s^{-1} wywołuje lokalne odkształcenie plastyczne, które po standaryzacji mogłyby stanowić o dynamiczne twardości badanego materiału. Wyniki w pracy [13] są obiecujące.

Podsumowując, można wnioskować iż twardość z konieczności spełnia rolę uniwersalnego indykatora odporności na zużywanie. Może też pełnić rolę współczynnika zużywania wyznaczanego w warunkach laboratoryjnych dla określonych grup materiałów. Na przykład stopów na osnowie żelaza, często składających się z faz o nagle różniące się twardości.

Nadal pozostaje jednak problematyczną metodyka pomiaru twardości dynamicznej jako parametru tribologicznego.

Natomiast można uniknąć problemów jaką wartość twardości użyć do obliczeń zużycia czy oporów w węźle, stosując termodynamiczne podejście do pracy systemu tribologicznego i zastosować wg [11] rzeczywisty nacisk jednostkowy p_r nierówności powierzchni.

BIBLIOGRAFIA

1. Kaźmierczak T., *Tarcie i zużycie zespołu tłok-pierścienie-cylinder.. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.*
2. Archard J.F., Contact and rubbing of flat surfaces. *J. Appl. Phys.* – 1953, 981-988
3. Rabinowicz E., *Friction and wear of materials 2nd-John Wiley&Sons, Inc.- 1995, 191-238*
4. Zum Gahr K.H., *Mikrostruktura and wear of materials. Elsevier Science Publishers.1987*
5. Zum Gahr K.H., *Wear by hard particles. Tribol. Int.-1998(31) N 10, 587-596*
6. Szejnmach E.L., *Abraziwny iznos. Abzor amerykańskiej peczati. Trenie i iznos 2005 nr 1-2*
7. Maciąg M., *Sposób wyznaczania maksymalnego przyrostu temperatury w procesie tarcia metali. Tribologia 3-2009 (97-103)*
8. Sadowski J., *Die Verschleißzal Tribologie und Schmirungstechnik 4-2007*
9. Sadowski J., *Die Reibungsenergiegedichte. Tribologie und Schmirungstechnik 3-2009 (44-50)*
10. Sadowski J., *Zur Energiebilanzierung bei der Festkorperreibung. Tribologie und Schmirungstechnik, 6-2009 (27-31)*
11. Sadowski J., *Reale Flächenpressung bei der Festkorperreibung. Tribologie und Schmirungstechnik 4-2017 (5-13)*
12. Szczerek M., *Problemy systematyzacji badań tribologicznych. ITiEM, Radom 2005*
13. Radziejowska J., *Zastosowanie odkształcenia plastycznego wywołanego nanosekundowym impulsem laserowym do oceny twardości dynamicznej. Mechanik 4/2015*

THE ROLE OF HARDNESS IN TRIBOLOGICAL SYSTEMS

Abstract

The article quotes basic procedures of investigative hardness measurements of different materials. It discuss also the role of hardness in estimate of chosen tribolo-

gical knots' parameters. It was submitted for evaluation the tribological expenditure of friction knot and temperature or work of proper expenditure.

Autorzy:

dr **Leszek Sarnowicz** . Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny , 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29. Tel: + 48 48 361-71-66, l.sarnowicz@uthrad.pl