

Lucyna Jaworska, Piotr Klimczyk, Piotr Wyżga

Ball-on-Disk – metoda badań zużywania się materiałów

Tribologia jest nauką o procesach zachodzących w ruchomym styku ciał stałych. Słowo to pochodzi od greckich słów *tribos* 'tarcie' i *logos*, co oznacza między innymi wiedzę. Tribologia zajmuje się tarciem, zużyciem i smarowaniem. Badania prowadzi się dla pary materiałów w różnych układach ich kontaktu. Tribologia pozwala: określić procesy powodujące zużywanie się materiałów, badać funkcjonowanie części maszyn poruszających się względem siebie, na przykład łożysk, czy ograniczyć wydzielenie się ciepła w układach takich jak implant stawu biodrowego. Wiele badań związanych z inżynierią materiałową i inżynierią powierzchni koncentruje się na otrzymywaniu materiałów czy powłok o niskim współczynniku tarcia, bardzo odpornych na ścieranie, w tym w podwyższonych temperaturach. Mechanika opiera się na tribologii w konstrukcji i eksploatacji ruchomych węzłów maszyn, typowym przykładem są łożyska.

Podstawą tribologii jest statyczna lub kinetyczna siła tarcia T .

$$T = \mu \cdot N \quad (1)$$

Gdzie:

T – siły tarcia (statyczna lub kinetyczna) [N]

μ – m współczynnik tarcia,

N – siła nacisku prostopadła do powierzchni styku ciał [N]

Bardzo ważnym kryterium dla badań tribologicznych jest rodzaj ruchu przedmiotów względem siebie. Wyróżnia się tarcie ślizgowe i toczne [1].

Mechanizmy zużywania się współpracujących dwóch elementów mogą mieć różny charakter i wynikać z:

- adhezji materiałów,
- mechanicznego oddziaływania, np. mikroskrawania,
- oddziaływania chemicznego między parą tarcia,
- wpływu oddziaływania chemicznego atmosfery na współpracującą parę materiałów, np. tlenu lub pary wodnej,
- dyfuzji wynikającej z podwyższonej temperatury pary tarcia.

Adhezja, od łacińskiego słowa *adhesio*, co oznacza przyleganie, przyczepność, jest to zjawisko trwałego i silnego łączenia się warstw powierzchniowych dwóch różnych ciał doprowadzonych do zetknięcia. Przyczyną adhezji są siły oddziaływania między atomami lub jonami (np. Van der Waalsa, wiązania jonowe czy metaliczne) stykających się ciał [2].

Skrawanie polega na oddzieleniu za pomocą ostrza skrawającego, w sposób mechaniczny, cząstki materiałów w postaci wióra [3]. Jeżeli skrawanie odbywa się w mikroobszarach, jest na przykład skutkiem działania jednej cząstki o ostrych krawędziach, mamy do czynienia z mikroskrawaniem. Kolejny wymieniony powyżej mechanizm to oddziaływanie chemiczne między materiałami pary tarcia, co skutkuje reakcją chemiczną pomiędzy składnikami obu materiałów lub dyfuzją, w wyniku której powstają nowe związki chemiczne lub roztwory stałe. Dyfuzja chemiczna to proces prowadzący do wyrównania stężenia każdej z dyfundujących substancji w całym układzie. Warunkiem jej zachodzenia jest różnica stężeń i podwyższona temperatura. Dyfuzja chemiczna opisana jest dwoma prawami Ficka. W przypadku pary tarcia dyfuzja jest bardzo ważnym mechanizmem zużywania się pary tarcia, ponieważ w układzie występuje podwyższona temperatura oraz różnica stężeń. Dodatkowo w czasie pracy pary tarcia występują zjawiska mechaniczne, takie jak odkształcenie pod wpływem nacisku, zmęczenie materiału czy kruche pękanie.

Zużywanie się i trwałość ostrzy skrawających

Pomimo rozwoju bardziej oszczędnych, przyrostowych technik wytwarzania, jakimi są na przykład metody spiekania selektywnego z wykorzystaniem lasera, w dalszym ciągu najważniejszą metodą kształtowania elementów maszyn i urządzeń jest obróbka skrawaniem. Obróbka skrawaniem jest stosowana na różnych etapach wytwarzania, począwszy od cięcia, poprzez szlifowanie, wiercenie i polerowanie. Prawie we wszystkich wyrobach stosowana jest obróbka wykańczająca. Nowoczesne technologie materiałowe koncentrują się na otrzymaniu nowych, coraz bardziej wytrzymałych i odpornych na różne czynniki tworzyw. Materiały te najczęściej można zaliczyć do grupy materiałów trudno obrabialnych, których obróbka wpływa znacząco na trwałość stosowanych narzędzi.

Zużycie ostrza skrawającego polega na zmianie jego geometrii, a tym samym wymiarów oraz właściwości fizycznych i mechanicznych [3]. Zmiany geometrii ostrza skrawającego są spowodowane ubytkiem materiału narzędziowego wskutek tarcia, a zmiany właściwości wynikają z lokalnego odkształcenia plastycznego, wysokiej temperatury – sięgającej np. w czasie operacji toczenia 900°C czy reakcji chemicznej lub dyfuzji pomiędzy materiałem obrabianym a materiałem narzędzia. Generalnie mechanicy wyróżniają następujące mechanizmy zużycia ostrza narzędzia skrawającego: zużycie adhezyjne, zużycie dyfuzyjne, zużycie cieplne oraz zużycie chemiczne. Zmiana geometrii ostrza wpływa na dokładność wymiarów obrabianych elementów oraz pogarsza ich gładkość powierzchni.

Obecnie najszersze zastosowanie mają materiały w osnowie węglików, zwłaszcza węglika spiekanego WC-Co. Inne materiały narzędziowe to stale szybko tnące, spieki ceramiczne w osnowie Al_2O_3 , ceramika mieszana Al_2O_3 z dodatkiem TiC lub Ti(C,N), Si_3N_4 , polikrystaliczne spieki diamentowe (PCD), polikrystaliczne spieki z regularnego azotku boru (PcBN). Ich właściwości skrawne i trwałość zmieniają się

po naniesieniu powłok wykazujących dużą odporność na zużywanie się oraz niskie współczynniki tarcia. Najczęściej stosowane metody nanoszenia powłok to: fizyczne osadzanie z fazy gazowej *PVD* (ang. *Physical Vapour Deposition*) lub chemiczne osadzanie z fazy gazowej *CVD* (ang. *Chemical Vaopur Deposition*). Nanoszone powłoki zmniejszają współczynnik tarcia pomiędzy materiałami narzędziowymi a obrabianymi, często zwiększając trwałość ostrza, co poprawia wydajność procesu obróbki skrawaniem i obniża koszty produkcji.

Inną tendencją rozwijaną w technologii wytwarzania materiałów narzędziowych jest wprowadzanie do ich składu stałych substancji smarujących. Są to związki typu siarczki, fluorki, niektóre tlenki i azotki. Materiały tej grupy charakteryzują się strukturą krystaliczną typu heksagonalnego i bardzo zróżnicowaną odpornością temperaturową. Do tej grupy zalicza się na przykład: MoS_2 , hBN, CaF_2 (znane jako środki poślizgowe). Związki te mają fizyczny (właściwości przeciwdhezyjne), chemiczny (uniemożliwiają reakcje chemiczne będące następstwem tarcia) i mikrostrukturalny (warstwowa struktura i mała wytrzymałość na ścianie) wpływ na tribologiczne oddziaływanie trących powierzchni. Mechanizm wysokiej smarowności tych związków polega na ścinaniu warstw ich heksagonalnej struktury.

Największą wartość mają badania prowadzone w układach zbliżonych lub naśladowujących współpracę w warunkach rzeczywistych. Stąd dla odpowiedzialnych części i urządzeń konstruuje się maszyny badawcze, na przykład do badania współpracy określonych części silników lotniczych czy implantów stawów człowieka. Jednak na etapie charakterystyki właściwości materiałów stosuje się maszyny badawcze, które pozwalają na przeprowadzenie badań z wymaganiami ściśle określonymi przez normy i tym samym możliwe jest porównanie właściwości materiałów między sobą. Na przykład, wytwarzając materiał o ściśle określonym składzie chemicznym różnymi metodami, otrzymuje się materiał o niekiedy nieznacznie różnym składzie fazowym czy porowatości. Badania tribologiczne wykazują różnice wartości, na przykład współczynnika tarcia czy zużywania się takiego materiału (przy współpracy z innym ściśle określonym materiałem), co może mieć duże znaczenie dla zastosowań. Zasadnicze znaczenie dla zjawiska tarcia ma stan powierzchni współpracujących elementów. Większość norm opisujących badania tarcia ściśle określa chropowatość współpracujących części, najczęściej za pomocą dwóch parametrów R_a i R_z .

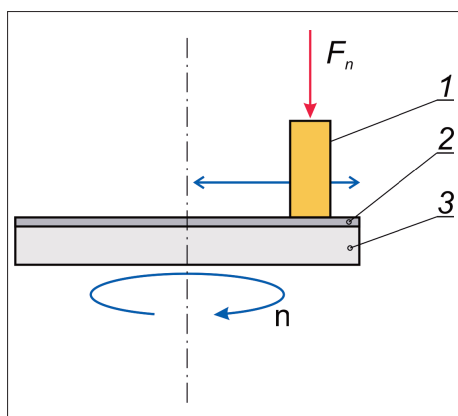
R_a to średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej, gdzie linia średnia jest teoretyczną linią, przy której suma kwadratów odległości wzniesień i zagłębień jest najmniejsza. Pomiaru dokonuje się na odcinku elementarnym L_e , określonym przez Polską Normę PN-ISO 1302;1996. Wysokość chropowatości według dziesięciu punktów profilu – R_z to średnia arytmetyczna wysokość pięciu najwyższych wzniesień ponad linię średnią, pomniejszona o średnią pięciu najniższych wgłębień poniżej linii średniej.

Wprawdzie wielkość powierzchni nie wpływa na siłę tarcia, jednak bardzo ważnym czynnikiem jest skala pary trącej w maszynie badawczej. Bardzo popularne są badania w maszynach zunifikowanych z zastosowaniem wałków – rolek (metoda Roll-on-Roll).

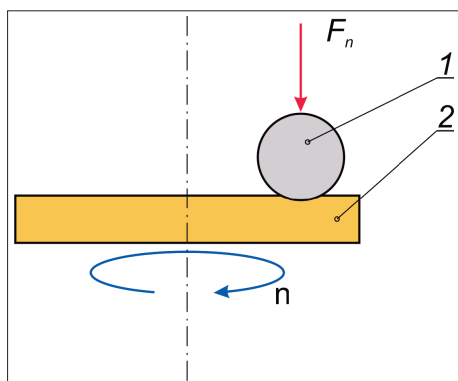
Inną powszechnie stosowaną od lat metodą badań jest metoda Pin-on-Disk, (rys. 1) [4]. Badania wykazały jednakże zwiększone zużywanie na krawędzi „pinu” poruszającego się po obwodzie dysku, wynikające ze skrawania ostrej krawędzi „pinu”.

Metoda ta coraz częściej jest zastępowana przez metodę Ball-on-Disk, w której ostre krawędzie „pinu” zostały zaokrąglone [4].

Urządzenia nazywane tribotesterami pozwalają na ocenę właściwości tribologicznych materiałów współpracujących ze sobą z dużymi prędkościami w wysokiej temperaturze oraz opcjonalnie różnych środowiskach w układzie Ball-on-Disk/ Pin-on-Disk. Istnieje możliwość wyznaczenia współczynnika tarcia dla temperatur do 1000°C. W metodzie Ball-on-Disk nieruchoma kulka dociskana jest, z określoną siłą, do obracającej się tarczy, będącej „przeciwpróbką”. W wyniku tego na tarczy wyciera się ślad. Jego pomiar w czterech punktach za pomocą profilometru pozwala wyznaczyć współczynnik zużycia objętościowego „przeciwpróbki” (10^{-3}mm^3). Dokonuje się także pomiaru starcia współpracującej kulki. Wielkość obracającej się tarczy, średnica kulki, nacisk wywierany na kulkę oraz prędkość obracania się tarczy określone są przez normę [4].



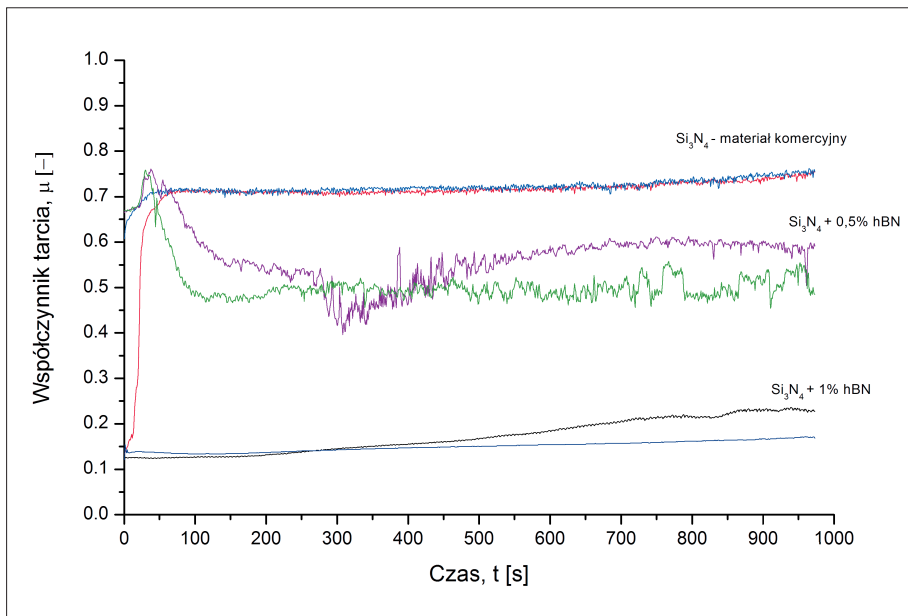
Rys. 1. Układ badań dla metody Pin-on-Disk; 1 – „pin” – jeden z badanych materiałów pary tarcia uformowany w bolec; 2 – drugi materiał ukształtowany w formę dysku; 3 – obracająca się tarcza, stanowiąca podporę dysku



Rys. 2. Układ badań dla metody Ball-on-Disk; 1 – kulka – jeden z badanych materiałów pary tarcia; 2 – drugi materiał ukształtowany w formę dysku

Badania własne

Badania przeprowadzono dla spieków Si_3N_4 (M11, o średniej wielkości cząstki $0,6 \mu\text{m}$, prod. H.C. Starck) z $0,5\%$ mas. i 1% mas. hBN (99% czystości, prod. Fluka Chemie AG). Przygotowano mieszaniny proszków, mieszając w młynku planetarnym Pulverisette 6 w pojemniku z Si_3N_4 , stosując mielniki z tego samego materiału przez 16 godzin, w alkoholu izopropylowym. Mieszanki po wysuszeniu wstępnie formowano pod ciśnieniem 50 MPa , próbki o kształcie dysku o średnicy $\varnothing 15 \text{ mm}$ i umieszczono w kapsule do spiekania wysokociśnieniowego. Materiał spiekano w urządzeniu wysokociśnieniowym typu Bridgmana przy ciśnieniu $4 \pm 0,2 \text{ GPa}$, temperaturze $1800 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$, w czasie 1 minuty. Próbki były szlifowane i polerowane przy użyciu środków szlifiersko-polerskich firmy Struers (przy wykorzystaniu zawieszin diamentowych o malejącej frakcji ziarnowej oraz sukien polerskich). Uzyskano gładkość powierzchni odpowiadającą założeniu normy, R_a poniżej $0,8 \mu\text{m}$ [4]. Pomiar współczynnika tarcia przeprowadzono na triboteście UMT-2MT (prod. USA). Zastosowano kulkę ze stali 440C o średnicy 4 mm , pod obciążeniem 10 N . Prędkość obrotu tarczy wynosiła $0,100 \text{ m/s}$, promień tarcia 3 mm . Pomiaru dokonano na drodze 100 m . Dla porównania przeprowadzono także badania komercyjnego spieku Si_3N_4 (z dodatkiem 5% mas. Al_2O_3 i 5% mas. Y_2O_3) bez dodatku stałej substancji smarującej. Materiał ten stosowany jest na ostrza narzędzi skrawających. Przeprowadzono pomiary dla dwóch próbek każdego rodzaju materiału. Wyniki badań zostały przedstawione na rys. 3.



Rys. 3. Współczynniki tarcia w zależności od czasu trwania próby na triboteście dla trzech rodzajów materiałów: Si_3N_4 spieku komercyjnego; spieku Si_3N_4 z dodatkiem $0,5$ mas. hBN oraz spieku Si_3N_4 z dodatkiem 1% mas. hBN

Podsumowanie

Heksagonalny azotek boru należy do grupy tzw. stałych substancji smarujących. Jest materiałem o strukturze krystalicznej typu heksagonalnego. W czasie wywierania na ten materiał siły ścinającej następuje oddzielenie się pojedynczych warstw związku i nanoszenie na materiał współpracujący. Pomiar współczynnika tarcia dla trzech spieków Si_3N_4 , z których jeden – materiał komercyjny – nie zawiera hBN, drugi charakteryzuje się zawartością 0,5% mas. hBN, a trzeci zawiera 1% mas. hBN, wykazał znaczny wpływ obecności hBN na współczynnik tarcia tych materiałów w kontakcie ze stalą (materiał kulki). Średni współczynnik tarcia dla materiału bez hBN wynosił 0,72 dla 0,5% mas. zawartości hBN 0,56, a dla 1% mas. zawartości hBN 0,16. Wykazano znaczny wpływ substancji smarującej w postaci hBN na wartość współczynnika tarcia spieków Si_3N_4 dla pary ze stalą.

Literatura

- [1] Lawrowski Z., *Tribologia, tarcie, zużywanie i smarowanie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008
- [2] Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995
- [3] Wysiecki M., *Nowoczesne materiały narzędziowe*, WNT, Warszawa 1997
- [4] ASTM International Designation: G00-05, *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*

Method for material-wear testing with a Ball-on-Disk apparatus

Abstract

The article presents an overview of various phenomena in the wear of materials, particularly of cutting edges. The procedure for determining the wear during sliding using a Pin-on-Disk and Ball-on-Disk apparatus was presented. The coefficient of friction measurements in contact with a steel ball was determined for three Si_3N_4 base compacts: a commercial one without solid lubricants, with 0.5 wt% and 1 wt% hBN solid lubricant participation.

Keywords: Wear testing, Ball-on-Disk, coefficient of friction, hBN solid lubricants, Si_3N_4 compacts

Lucyna Jaworska
Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie
Instytut Techniki
ul. Podchorążych 2
30-084 Kraków

Lucyna Jaworska, Piotr Klimczyk, Piotr Wyżga
Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania
ul. Wrocławska 37a
30-011 Kraków