

Sławomir ZIMOWSKI* , Wiesław RAKOWSKI*

EKSPERYMENTALNA I TEORETYCZNA ANALIZA ZUŻYCIA CIENKICH POWŁOK CERAMICZNYCH W STYKU TRIBOLOGICZNYM

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL WEAR ANALYSIS OF THIN CERAMIC COATINGS IN TRIBOLOGICAL CONTACT

Słowa kluczowe:

powłoka ceramiczna, styk tribologiczny, model zużycia

Key words:

ceramic coatings, tribological contact, wear model

Streszczenie

W artykule przedstawiono model służący do prognozowania zużycia cienkich powłok ceramicznych pracujących w styku skoncentrowanym. Opracowany model oparty jest o prawo zużycia Archarda, które uzależnia przyrost objętości materiału usuwanego ze strefy styku w wyniku zużycia od: współczynnika zużycia, nacisków w strefie styku oraz drogi tarcia

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

i przyrostu pola styku. Zarówno w modelu, jak i w testach parę tribologiczną stanowiły kula i płaska powierzchnia. Kula o średnicy 1 mm wykonana z Al_2O_3 współpracowała z powłoką TiN, dwoma powłokami kompozytowymi typu nc-TiN/a-C oraz powłoką nc-WC/a-C. Na podstawie obserwacji mikroskopowych i analizy profilu bruzdy stwierdzono głównie ścierny charakter zużycia, dominujący w zakresie małych obciążeń, kiedy układ powłoka/podłoże nie ulega znaczącej deformacji. Porównanie wyników badań symulacyjnych z eksperymentalnymi wskazuje, że przyjęty model umożliwia szacowanie zużycia powłok ceramicznych w oparciu o parametry materiałowe oraz warunki tarcia.

WPROWADZENIE

Badania tribologiczne nawet w zakresie wyznaczania podstawowych charakterystyk tribologicznych materiałów są czasochłonne. Testy mają charakter niszczący, a ponowne wykorzystanie badanego elementu jest często niemożliwe ze względu na zmianę właściwości fizykochemicznych na jego powierzchni lub całkowite zniszczenie próbki, tak jak ma to miejsce w przypadku tarcia cienkich powłok. Symulacja zużycia pary ciernej może stanowić cenne narzędzie w projektowaniu, a zwłaszcza w doborze materiałów na elementy węzłów tarcia. Może znacznie skrócić czas oraz zmniejszyć ilość koniecznych do wykonania prób w badaniach tribologicznych nowych materiałów. W literaturze najczęściej spotykane są modele matematyczne zużycia, opracowane na podstawie teorii Hertza i związków na gruncie mechaniki kontaktu oraz modele wykorzystujące metody numeryczne, zwłaszcza metodę elementów skończonych [L. 1–3].

OPIS PRZYJĘTEGO MODELU ZUŻYCIA

Prezentowany w niniejszej pracy model zużycia został opracowany na podstawie analizy literatury, głównie pozycji [L. 1–4] oraz własnych prac laboratoryjnych. Oparty jest on o prawo zużycia Archarda [L. 5], które można przedstawić w postaci:

$$dV = K \cdot p \cdot dA_a \cdot ds \quad (1)$$

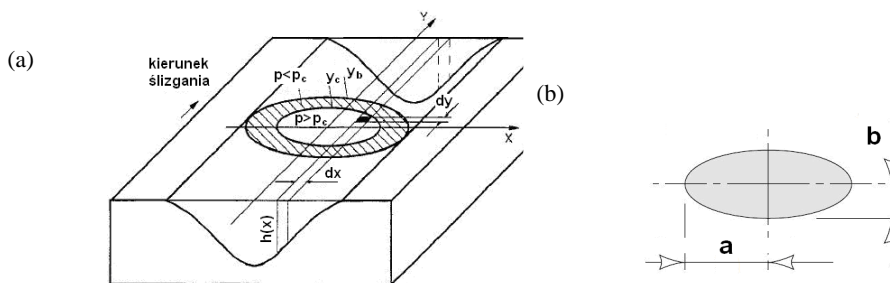
Przyrost objętości materiału usuwanego ze strefy styku w wyniku ścierania jest zależny od współczynnika intensywności zużycia badanego materiału (K), nacisków w strefie styku (p), przyrostu pola styku (dA_a)

i drogi tarcia (ds). We wcześniejszych pracach badawczych [L. 6, 7] wykazano, że wielkość zużycia bruzdy jest nierównomierna i zależna od naprężeń kontaktowych w styku tribologicznym. W związku z tym można wyróżnić dwa poziomy współczynnika intensywności zużywania: niższy K_1 poniżej nacisku krytycznego p_c , oraz wyższy K_2 po przekroczeniu nacisku krytycznego p_c .

Przekształcając równanie (1) dochodzimy do zależności przedstawiającej przyrost głębokości bruzdy:

$$dh(x) = \frac{dV}{dA_a} = K(p) \cdot p(x, y) \cdot ds \quad (2)$$

gdzie: $K(p) = K_1$ dla $p < p_c$ oraz $K(p) = K_2$ dla $p > p_c$.



Rys. 1. Schemat bruzdy powstałej w płaskim elemencie podczas tarcia z kulą (a) [L. 3] oraz rzut pola styku o kształcie elipsy (b) a, b – półosie elipsy

Fig. 1. Scheme of groove formed in the flat element after friction with a ball (a) [L. 3] and plane view of elliptical contact area (b) a, b – semi-axis of an ellipse

Podczas jednokrotnego przejścia kuli po powierzchni styk istnieje tylko raz pomiędzy każdym punktem na powierzchni bruzdy żłobionej w elemencie w pozycji x i odpowiadającemu mu punktowi na powierzchni kuli również w pozycji x (**Rys. 1**). Naciski wywierane na te punkty w strefie styku opisane są przez naprężenia kontaktowe $p(x = const; y)$, gdzie y jest współrzędną zorientowaną wzdłuż osi Y , która przebiega zgodnie z kierunkiem chwilowego ruchu kulki (**Rys. 1**).

Znając rozkład nacisków $p(x, y)$ w strefie styku przyrost głębokości bruzdy w i -tym cyklu można obliczyć z zależności:

$$\Delta h_i(x) = 2 \cdot \int_{y=0}^{y=y_c} K_2 \cdot p(x, y) \cdot dy + 2 \cdot \int_{y=y_c}^{y=y_b} K_1 \cdot p(x, y) \cdot dy \quad (3)$$

gdzie: $y_c = 0$ gdy nacisk w styku $p(x, y)$ nie przekracza p_c w całej strefie kontaktu.

Zatem po n cyklach przekrój poprzeczny bruzdy, $h_n(x)$, powstaje przez zsumowanie wszystkich przyrostów $\Delta h_i(x)$ w każdym cyklu:

$$h_n(x) = \sum_{i=1}^n \Delta h_i(x) \quad (4)$$

Natomiast zużycie materiału wyznaczamy z zależności:

$$v_n = 2 \cdot \pi \cdot D \cdot \int_{x=0}^{w/2} h_n(x) \cdot dx \quad (5)$$

gdzie: $w/2$ – połowa szerokości bruzdy [m], D – średnica toru tarcia pary kula/wirująca tarcza [m].

Stykowy nacisk krytyczny p_c jest zależny od właściwości mikromechanicznych współpracujących elementów, a głównie ich twardości $p_c = f(H)$. Znajomość tego nacisku jest szczególnie ważna w przypadku tarcia cienkich powłok, nakładanych na podłożu o innych właściwościach. Wskutek zużycia powłoki następuje ciągła zmiana nośności układu powłoka/podłoże, którą w styku skoncentrowanym opisuje twardość. Grubość powłoki ma duży wpływ na lokalizację koncentracji naprężeń w układzie powłoka/podłoże [L. 8].

Tak więc bardzo istotnym okazało się rozszerzenie modelu o formułę uzależniającą nacisk krytyczny od zmiany twardości (H_c), co poprawiło dokładność modelu. Wprowadzono dodatkowo zależność opisującą zmianę twardości w funkcji grubości powłoki, a jej źródłem był model opracowany przez Korsunsky'ego [L. 9]:

$$H_c = H_p + \frac{H_w - H_p}{1 + k \cdot (h_{max}/t)^c} \quad (6)$$

gdzie: H_c , H_w i H_p – odpowiednio twardość układu powłoka/podłoże, powłoki i podłoża; k – współczynnik zależny od charakteru odkształcenia powłoki; h_{max} – głębokość penetracji, t – grubość powłoki.

Opracowany model wykorzystuje teorię naprężeń stykowych Hertza, która stosowana jest w zakresie odkształceń sprężystych. Przyjęto również założenia, że zużywa się tylko tarcza (płaski element), zużycie kuli jest pomijalnie małe, a pole styku ma kształt eliptyczny.

METODYKA BADAŃ

W celu weryfikacji przyjętego modelu zużycia wykonano testy tribologiczne w styku kula–tarcza, w warunkach tarcia technicznie suchego, stosując obciążenie 0,5; 1 i 2N, prędkość 0,3 m/s oraz liczbę cykli 2000. Przeciwną powierzchnią była kula z Al_2O_3 o średnicy 1 mm. Badaniom poddano powłokę z azotku tytanu (TiN) osadzoną na stali ferrytycznej ($H = 5,8$ GPa, $E = 210$ GPa) oraz dwie powłoki kompozytowe o osnowie amorficznego węgla (a-C) nc-TiN/a-C i nc-WC/a-C. Podłożem dla powłok kompozytowych był utwardzony tlenem stop tytanu Ti6Al4V ($H = 11$ GPa, $E = 192$ GPa). Wykonano po trzy testy tarcia dla każdego materiału zmieniając każdorazowo obciążenie styku i miejsce pomiarowe. Mechanizm zużycia badanych powłok określono na podstawie obserwacji mikroskopowej i analizy profilu bruzdy powstałej po tarcia, którego geometrię zmierzono z użyciem profilometru stykowego.

WYNIKI BADAŃ

Podstawowe właściwości mechaniczne materiałów pary tarcia, które wyznaczono we wcześniejszych badaniach laboratoryjnych oraz na podstawie danych literaturowych, zestawiono w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Właściwości materiałów pary tribologicznej

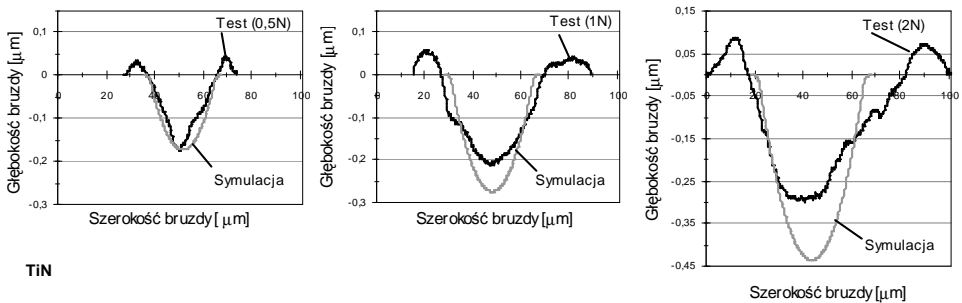
Table 1. Materials properties of the tribological pairs

Materiał	Grubość [μm]	Twardość, H [GPa]	Moduł, E [GPa]	Liczba Poissona, ν	Wskaźnik zużycia, $W_v \cdot 10^{-6}$ [mm^3/Nm]
TiN	1	26	340	0,22	3,2
nc-TiN/a-C	0,3	15	160	0,22	0,55
nc-WC/a-C	0,3	16	213	0,22	1,5
Al_2O_3 (kula)	---	18	380	0,27	---

Symulacje zużycia wykonano z użyciem programu MATLAB stosując parametry przedstawione w **Tab. 1** i poprzednim rozdziale. Wyniki badań i obliczeń modelowych przedstawiono w formie graficznej na **Rys. 2–3**. Obserwacja toru tarcia oraz geometrii profilu bruzdy wskazuje

na złożony charakter zużycia powłoki. Dominującym jest zużycie ściernie w strefie bruzdy, a wypiętrzenie materiału na brzegach bruzdy obserwowano tylko dla TiN na nieumocnionym podłożu (**Rys. 2**). Udział tego plastycznego odkształcenia w odniesieniu do wielkości wytarcia jest poniżej 14%.

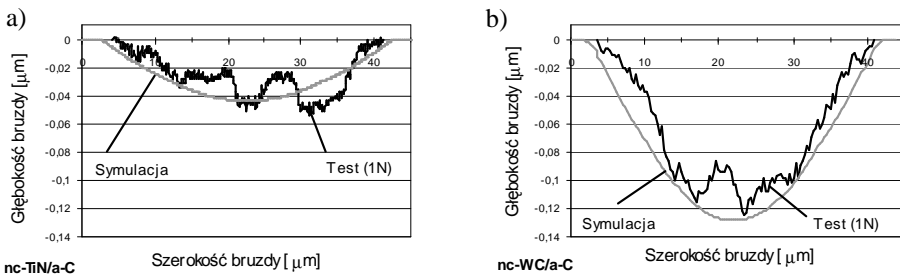
Analizując wyniki badań otrzymane na drodze eksperymentalnej i obliczeń modelowych (**Rys. 2**), można stwierdzić, że symulacje zużycia przeprowadzone w oparciu o opracowany model są w dużej mierze zgodne z wynikami eksperymentu.



Rys. 2. Profil bruzdy powłoki TiN otrzymany w testach tribologicznych oraz przez obliczenia modelowe dla kolejnych obciążeń 0,5; 1 i 2N

Fig. 2. Groove profile of TiN coating obtained in tribological tests and by model calculations at load of 0.5, 1 and 2N

W modelu symulacyjnym nie uwzględniono jednak przypadku, gdy na brzegach bruzdy występują wypiętrzenia materiału. Dlatego wykonano obliczenia modelowe dla powłok nałożonych na utwardzonym podłożu, dla których nie stwierdzono wypiętrzenia materiału po tarcu (**Rys. 3**).



Rys. 3. Profil bruzdy powłoki nc-TiN/a-C (a) oraz nc-WC/a-C (b) otrzymany w testach tribologicznych oraz przez obliczenia modelowe przy obciążeniu 1N

Fig. 3. Groove profile of nc-TiN/a-C (a) and nc-WC/a-C (b) coatings obtained in tribological tests and by model calculations at load of 1N

PODSUMOWANIE

Przeważająca część istniejących modeli zużycia jest sprowadzona do rozważań w elementarnym styku np. skoncentrowanym i opiera się głównie o teorię Hertza. Rozważany w pracy analityczny model zużycia dotyczy współpracy elementów w układzie kula/płaszczyzna w zakresie odkształceń sprężystych. Możliwa jest również jego implementacja do wybranych przypadków styku, gdy odkształcenie plastyczne jest małe, tak jak w przedstawionej pracy, gdy jego udział w wielkości wytarcia nie przekracza 15%. W testach tarciovych obserwowano głównie zużycie ściernie powłok i w niewielkim stopniu deformacyjne. Udział odkształcenia plastycznego w stosunku do wielkości wytarcia wynosi ok. 14%. Wyniki uzyskane na drodze symulacji są wystarczająco zgodne z wynikami badań eksperymentalnych (ich rozbieżność jest w zakresie 10 do 20%), co potwierdza poprawność przeprowadzonej analizy modelowej. Uzyskane wyniki wskazują jednak na konieczność poprawy funkcjonowania modelu. Przedstawiony model może być wykorzystany do wspomagania doboru powłok ceramicznych pary trącej w styku skoncentrowanym oraz wyznaczenia granicznych parametrów pracy.

LITERATURA

1. Holmberg K., Ronkainen H., Laukkanen A., Wallin K.: Friction and wear of coated surfaces – scales, modelling and simulation of tribomechanisms. *Surface and Coatings Technology* 202 (2007), p. 1034–1049.
2. Meozzi M.: Special use of the ball on disc standard test. *Tribology International* 39 (2006), p. 496–505.
3. Jiaren J., Arnell R.D.: On the running-in behaviour of diamond-like carbon coatings under the ball-on-disk contact geometry, *Wear* 217 (1998), p. 190.
4. Johnson K. L.: *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
5. Archard J.F.: Contact and rubbing of flat surfaces, *Journal of Applied Physics* 24 (1953), p. 981–988.
6. Welsh N.C.: The dry wear of steels, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A* 257 (1965), p. 31–50.
7. Zimowski S., Rakowski W., Major Ł.: Obciążenie graniczne powłok wielowarstwowych TiN/CrN w styku tribologicznym kula-tarcza. *Tribologia* v40, nr 4, 2009, s. 226.

8. Piao Z., Xu B., Wang H., Pu Ch.: Effects of thickness and elastic modulus on stress condition of fatigue-resistant coating under rolling contact. *J. Cent. South Univ. Technol.* 17 (2010), p. 899–905.
9. Korsunsky A.M., McGurk M.R., Bull S.J., Page T.F.: On the hardness of coated systems. *Surface and Coatings Technology* vol.99 (1998) p.171–183.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

The article presents the model used to predict wear of thin ceramic coatings working in tribological contact. The model is based on the Archard wear law and contact mechanics. The cooperation of elements in the ball/plane system in the elastic deformation range was established. Wear simulations were compared with the results obtained from tribological tests in a ball-on-disc machine. The tribological pair consisted of TiN coating or nc-WC/aC and nc-TiN/aC composite coatings as the discs and alumina ball with diameter of 1mm as the counterpart. Microscopic observations and groove profiles analysis shows abrasion as the dominant mechanism of wear. This model allows the estimation of the durability of ceramic coatings based on the mechanical properties of material and friction parameters.