

Sławomir ZIMOWSKI*, **Wiesław RAKOWSKI***

ANALIZA DEFORMACJI FALOWYCH CIENKICH POWŁOK W ŚLIZGOWYM STYKU SKONCENTROWANYM

ANALYSIS OF THE WAVE DEFORMATION OF THIN COATINGS IN SLIDING POINT CONTACT

Słowa kluczowe:

powłoka, styk skoncentrowany, tarcie, geometria bruzdy

Key words:

coating, point contact, friction, shape of groove

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę falowego charakteru deformacji toru tarcia w styku skoncentrowanym. Przedmiotem badań była kompozytowa powłoka niklowo-molibdenowa wzmocniona cząstkami tlenku glinu (Ni-Mo/Al₂O₃) o grubości ok. 5,6 μm, którą osadzono metodą elektrochemiczną na stalowym podłożu. Właściwości tribologiczne powłoki wyznaczono z użyciem tribotestera typu kula-tarcza w styku niesmarowanym z kulką Al₂O₃ o średnicy 1 mm. Współczynnik tarcia wynosił ok. 0,2, a po zniszczeniu powłoki gwałtownie

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. 48 21 617-33-20, e-mail: zimowski@imir.agh.edu.pl.

zwiększał się, aż do wartości około 0,8. Powłoka ma dobrą adhezję do podłoża, a jej niszczenie w teście zarysowania polegało na pękaniu o charakterze kohezyjnym przy obciążeniu ok. 21 N. Twardość powłoki równą 6,9 GPa i moduł Younga 183 GPa wyznaczono metodą instrumentalną. W celu wnioskowania o zjawiskach zachodzących w mikroobszarach styku zmierzono geometrię bruzdy profilometrem stykowym oraz przeprowadzono analizę mikrostruktury jej powierzchni, stosując różne techniki. W oparciu o mechanikę kontaktu przedstawiono próbę interpretacji mechanizmu tworzenia charakterystycznego, cyklicznie powtarzającego się wzoru stereometrycznego, powstałego w bruzdzie. Potwierdzono wpływ parametrów kinematycznych testu tribologicznego na zjawisko falowego odkształcania warstw przypowierzchniowych oraz ostateczną formę deformacji, cyklicznie powtarzających się zagłębień w kształcie połowy kropli.

WPROWADZENIE

Proces zużywania tribologicznego, który charakteryzuje się ubytkiem masy lub trwałym odkształceniem powierzchni może w skutkach mieć charakter normalny lub patologiczny (awaryjny). W danych warunkach tarcia przejdzie od zużycia normalnego do zużycia patologicznego następuje zwykle na skutek przekroczenia nośności układu spowodowanego nadmiernym obciążeniem mechanicznym lub termicznym.

Prognozowanie intensywności podstawowych rodzajów zużycia (ściernego, adhezyjnego) opiera się na stwierdzeniu, że objętość materiału usuniętego ze strefy styku jest wprost proporcjonalna do obciążenia i drogi tarcia oraz odwrotnie proporcjonalna do twardości bardziej miękkiego ze skojarzonych materiałów. Jednak wyniki badań uzyskane już we wczesnym okresie rozwoju tribologii (Kragielski) wskazywały wyraźnie, że podczas tarcia przy małych obciążeniach, gdy występuje zużycie określane jako normalne, intensywność zużywania nie zależy od obciążenia. Natomiast powyżej pewnego obciążenia granicznego, gdy występuje zużywanie patologiczne, warstwy wierzchnie jednego lub obydwu skojarzonych materiałów ulegają zwykle rozległej deformacji plastycznej [L. 1]. Metody prognozowania zużycia wynikają z rozważań i modeli teoretycznych zbudowanych przy założeniu jednorodności materiału. W przypadku tarcia elementów pokrytych powłokami przekroczenie obciążenia granicznego w styku tribologicznym jest szczególnie niebezpieczne, gdyż może spowodować pęknięcie powłoki, a to prowadzi do zużycia katastroficznego [L. 2]. Makromechaniczne zjawiska zużywania charakterystyczne dla elementów pokrytych powłokami uzależnione są głównie od: relacji twardości materiału powłoki i podłoża, grubości powłoki, chropowatości powierzchni oraz obecności twardych cząstek w strefie styku [L. 3]. Nawet jeżeli obciążenie w początkowym okresie współpracy nie powoduje przekroczenia naprężenia

uplastyczniającego lub pęknięcia powłoki, to wskutek ścierania powłoki ulega zmniejszeniu jej grubość, a tym samym zmniejsza się nośność układu, co szczególnie jest widoczne, kiedy podłoże nie jest umocnione [L. 4, 5]. Zmiana charakteru deformacji w styku skoncentrowanym elementów pokrytych powłokami następuje po przekroczeniu wytrzymałości powłoki na pęknięcie [L. 6].

Formowanie bruzdy, której często towarzyszą wypiętrzenia na jej brzegach, jest opisywane zarówno podczas tarcia systemów z miękką powłoką na twardym podłożu, jak również w układzie odwrotnym [L. 7]. Jednak brak jest publikacji na temat analizy geometrii bruzdy w kierunku wzdłuż toru tarcia, a jak przedstawiono w tej pracy, w określonych warunkach współpracy kształt bruzdy (jej głębokość i szerokość) może zmieniać się również w tym kierunku.

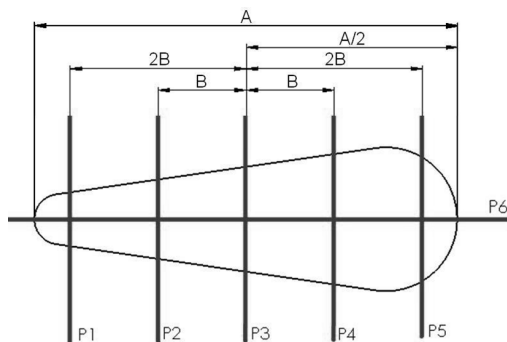
METODYKA BADAŃ

Kompozytowa powłokę niklowo-molibdenową wzmocnianą cząstkami tlenku glinu (Ni-Mo+Al₂O₃) o grubości ok. 5,6 μm, osadzono metodą elektrochemiczną na płaskiej powierzchni podkładów wykonanych ze stali S235JR. Twardość i moduł sprężystości powłoki wyznaczono metodą instrumentalnej indentacji, stosując wgłębnik Vickersa obciążony siłą 50 mN. Wykonano również testy statycznej indentacji kulką Al₂O₃ o średnicy 1 mm przy obciążeniu 1 N. Testy indentacyjne wgłębnikiem Vickersa oraz kulką powtórzono pięciokrotnie, a w pracy przedstawiono wyniki średnie. Adhezję powłoki do podłoża określono w teście zarysowania, wykorzystując wgłębnik Rockwella o wierzchołku zaokrąglonym promieniem 0,2 mm. Właściwości tribologiczne powłoki wyznaczono z użyciem tribotestera typu trzpień-tarcza w styku niesmarowanym z kulką Al₂O₃ o średnicy 1 mm. Testy powtórzono trzykrotnie przy stałym obciążeniu 1 N dla trzech prędkości 0,02; 0,05 i 0,1 m/s w zakresie do 5000 cykli. Przy każdej zmianie prędkości stosowano nowe miejsce pomiarowe na próbce oraz nową powierzchnię kulki. Profil bruzdy powstałej po tarcu zmierzono metodą stykową, dokonując pomiaru czterech charakterystycznych zagłębień dla każdej prędkości, wzdłuż linii przedstawionych na **Rys. 1**. Przeprowadzono analizę mikrostruktury powierzchni toru tarcia przy użyciu mikroskopu świetlnego (LM) i skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM).

WYNIKI BADAŃ

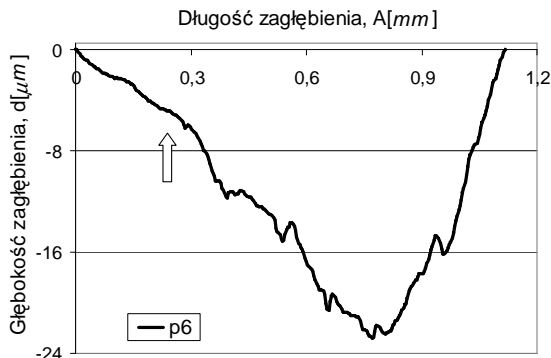
Proces tarcia przebiegał stabilnie, a współczynnik tarcia wynosił ok. 0,2, natomiast po zniszczeniu powłoki gwałtownie zwiększał się aż do wartości około 0,8, czemu towarzyszyły większe zmiany siły stycznej. Analiza toru tarcia wykazała, że utworzona bruzda składa się z charakterystycznego, cyklicznie powtarzającego się wzoru stereometrycznego o zmieniającej się głębokości i szerokości (**Rys. 2 i 3**). Wzór ten złożony jest z szeregu zagłębień o kształcie przy-

pominającym połowę kropki, której przykładowy obraz z kierunku prostopadłego do powierzchni próbki jest przedstawiony na **Rys. 4 i 5**, a w sposób schematyczny na **Rys. 1**.



Rys. 1. Schemat pomiaru profilu bruzdy: P1–P6 – kierunek pomiaru, A – długość zagłębienia, B – wymiar zależny od długości zagłębienia

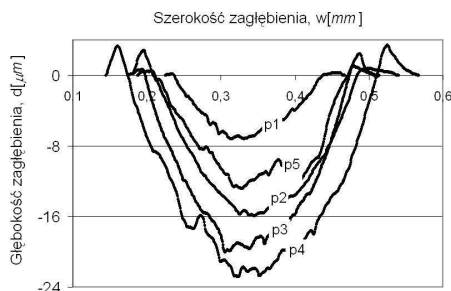
Fig. 1. Scheme of the groove profile measurement: P1–P6 – direction of measurement, A – length of pit, B – dimension dependent on pit length



Rys. 2. Profil zagłębienia w kierunku wzdłuż toru tarcia ($v = 0,05$ m/s)

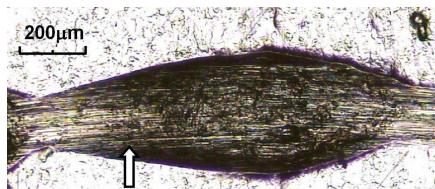
Fig. 2. Profile of a pit in lengthwise direction of the friction track ($v = 0.05$ m/s)

Mechanizm powstawania bruzdy o tak charakterystycznym kształcie (**Rys. 4**) jest złożony i składa się z kilku etapów zależnych od parametrów testu i czasu współpracy. Formowanie bruzdy jest zapoczątkowane w samej powłoce, co obserwowano w testach zakończonych przed przetarciem powłoki, a wymiary pojedynczego zagłębienia są znacznie mniejsze. Proces tarcia kontynuowano jednak nawet kiedy powłoka uległa zniszczeniu, tak aby w każdym teście zapewnić jednakowy okres współpracy, co umożliwiło porównanie geometrii bruzdy oraz łatwiejszą analizę toru tarcia.



Rys. 3. Profil zagłębienia w kierunku poprzecznym do toru tarcia ($v = 0,05$ m/s)

Fig. 3. Profile of a pit in crosswise direction of the friction track ($v = 0.05$ m/s)



Rys. 4. Obraz pojedynczego zagłębienia w torze tarcia ($v = 0,05$ m/s), LM, pow. 50x

Fig. 4. Image of single pit in the friction track ($v = 0.05$ m/s), LM, magnification of 50x

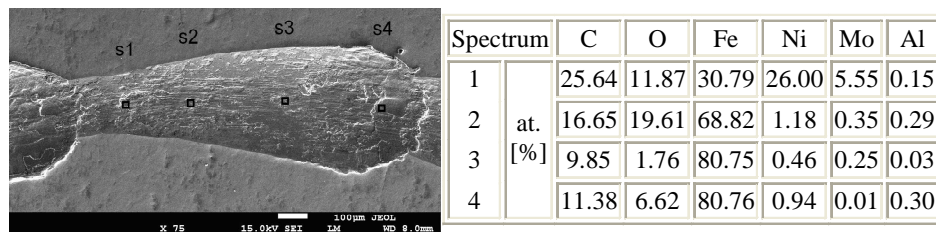
Stosunkowo szybkie zużycie próbki jest głównie wynikiem niedużej twardości (H) powłoki, która wynosi 6,9 GPa, a jej moduł sprężystości $E = 183$ GPa. Powłoka charakteryzuje się jednak dobrą przyczepnością do podłoża. W teście zarysowania obserwowano pęknięcia powłoki o charakterze kohezijnym, a ich zapoczątkowanie miało miejsce przy obciążeniu około 21 N. Nie zaobserwowano pęknięć typu adhezyjnego ani odspojenia powłoki od podłoża w zakresie obciążenia do 30 N.

Podczas tarcia powłoka ulega głównie zużyciu ściernemu, a zmniejszenie jej grubości powoduje obniżenie nośności układu powłoka–podłoże. Takie zachowanie prowadzi do łatwiejszej deformacji w stosowanym styku skoncentrowanym kula–płaszczyzna. Podczas współpracy twardej ceramicznej kulki z miększym materiałem powłoki przed czołem kulki tworzy się spiętrzenie materiału. Gdy opór stawiany przez to spiętrzenie jest większy od siły stycznej, następuje przeslizgnięcie się kulki po tym spiętrzeniu. Powoduje to mikrouderzenie kulki o powierzchnię próbki, co przyczynia się do lokalnego umocnienia materiału próbki w początkowym obszarze pojedynczego zagłębienia (do miejsca wskazanego strzałką na **Rys. 4**) i mniejszego jej zużycia w tym miejscu. Analiza SEM-EDS wykazała obecność w tym obszarze składników powłoki (**Rys. 5**), pomimo że maksymalna głębokość bruzdy znacznie przekracza jej

grubość. Poza tym obszarem kulka łatwiej ściera powłokę i ją deformuje, co skutkuje zwiększeniem głębokości pojedynczego zagłębienia. Proces ten powtarza się cyklicznie z każdym obrotem, a oddziaływania sumują się, prowadząc do zmęczeniowego charakteru zużycia.

Średni nacisk w styku (p_m) równy 0,8 GPa (kiedy kulka obciążona jest 1 N) został obliczony z wykorzystaniem maksymalnego zagłębienia $h_m = 550$ nm oraz głębokości kontaktu $h_c = 400$ nm, które zmierzono w próbie statycznego wciskania kulki. Analiza deformacji powłoki poprzez indentację kulką Al_2O_3 o średnicy 1 mm wskazuje, że zastosowane w testach tarciovych obciążenie 1 N nie powoduje uplastycznienia powłoki w chwili początkowej. Z pewnym przybliżeniem można przyjąć, że naprężenie uplastyczniające (Y) jest uzależnione od twardości (H) i dla większych obciążeń iloraz $H/Y \cong 3$ [L. 8–10].

Kształt i wielkość zagłębień są zależne od prędkości ślizgania, a więc szybkości rozpraszania energii deformacji. Stwierdzono niemal proporcjonalne wydłużenie zagłębienia dla coraz większych prędkości. Natomiast głębokość i szerokość zagłębienia wraz ze wzrostem prędkości zwiększa się aż do osiągnięcia prędkości 0,05 m/s, po przekroczeniu której nieznacznie maleje.



Rys. 5. Obraz SEM pojedynczego zagłębienia wraz z analizą EDS w wybranych punktach
Fig. 5. SEM image of single pit and EDS analysis in selected points

PODSUMOWANIE

Analiza kształtu toru tarcia wykazała, że powstała bruzda jest utworzona z charakterystycznego, cyklicznie powtarzającego się wzoru stereometrycznego o zmieniającej się głębokości i szerokości. Bruzda złożona jest z szeregu zagłębień o kształcie przypominającym połowę kropli, których kształt i wielkość uzależniona jest od czasu współpracy oraz prędkości poślizgu. Zastosowane w testach tarciovych obciążenie 1 N nie powoduje uplastycznienia powłoki w chwili początkowej, tak więc formowanie bruzdy o takim kształcie jest wynikiem głównie lokalnego umocnienia materiału i oddziaływania o charakterze zmęczeniowym. Współczynnik tarcia wynosił ok. 0,2, a po zniszczeniu powłoki gwałtownie zwiększał się aż do wartości około 0,8.

LITERATURA

1. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Komalov V.S.: Friction and wear. Pergamon Press, Oxford 1982.
2. Zimowski S., Rakowski W., Major Ł.: Obciążenie graniczne powłok wielowarstwowych TiN/CrN w styku tribologicznym kula–tarcza. *Tribologia* 40, nr 4, 2009, s. 275–284.
3. 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.
4. Zimowski S., Rakowski W.: Eksperymentalna i teoretyczna analiza zużycia cienkich powłok ceramicznych w styku tribologicznym. *Tribologia* 42, nr 4, 2011, s. 263–270.
5. Zimowski S., Rakowski W., Grzonka J.: Titanium nitride with silicon additions for tribological applications. *Surface and Interface Analysis* 2010, 42, 1364.
6. Lackner J.M., Major L., Kot M.: Microscale interpretation of tribological phenomena in Ti-TiN soft-hard multilayer coatings on soft austenite steel substrates, *Bulletin of Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, Vol. 59/3 (2011) 343–355.
7. Hiraoka N., Yamane E.: A Study on the Mechanism of Generating Wear Track Grooves. *Tribology Letters* (2011) 41:479–484.
8. Johnson K. L.: *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
9. Martinez E. et al.: Nanoindentation stress–strain curves as a method for thin-film complete mechanical characterization. *Appl. Phys. A* 77 (2003), 419–426.
10. Menčík J.: Determination of mechanical properties by instrumented indentation. *Meccanica* (2007) 42:19–29.

Podziękowanie

Autorzy składają serdeczne podziękowania Pani Prof. Ewie Beltowskiej z IMIM PAN w Krakowie za udostępnienie próbek do badań oraz Pani Dr Małgorzacie Zimowskiej z IKiFP im. Jerzego Habera PAN w Krakowie za wykonanie analizy SEM.

Summary

This paper presents an analysis of the wave deformation nature of the friction track in a sliding point contact. The object of this study was a composite nickel-molybdenum coating reinforced by the particles of aluminium oxide (Ni-Mo/Al₂O₃) with a thickness of about 5.6 μm, which was deposited by an electrochemical method on a steel substrate. Tribological properties of the coatings were determined in a nonlubricated contact with an alumina ball of 1 mm diameter. The coating has good adhesion to the substrate, and its destruction in the scratch test consisted

of a cohesive cracking at a load of about 21 N. The hardness of the coating equalled 6.9 GPa, and a Young's modulus of 183 GPa was determined by instrumental method. In order to explain the phenomena occurring in the microareas of the contact, the groove geometry was measured using a profilometer, and the microstructure analysis of its surface was performed using different techniques. Based on the contact mechanics, an attempt to interpret the formation mechanism of the characteristic, cyclically repeating, stereometric shape formed in a groove was performed. The impact of kinematic parameters of tribological tests on the phenomenon of wave deformation of subsurface layers as well as the final form of the deformation (the cyclically recurring pits with the shape of half a drop) was confirmed.