

Sławomir ZIMOWSKI*, Wiesław RAKOWSKI*

**ANALIZA PORÓWNAWCZA ZJAWISK
TOWARZYSZĄCYCH TARCIU CIENKICH
POWŁOK CERAMICZNYCH W RUCHU
OBROTOWYM, POSTĘPOWYM I POSTĘPOWO-
-ZWROTNYM**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF FRICTION EFFECTS OF
THIN CERAMIC COATINGS IN ROTARY, TRANSLATION,
AND RECIPROCATING MOTION**

Słowa kluczowe:

powłoka ceramiczna, tarcie, zużycie, ruch postępowo-zwrotny

Key words:

ceramic coatings, friction, wear, reciprocating motion

Streszczenie

W pracy porównano właściwości tribologiczne w ruchu postępowym, postępowo-zwrotnym i obrotowym w styku skoncentrowanym kula/płaszczyzna. Skojarzenie tarciove stanowiła powłoka azotku wolframu o grubości 0,5 μm nałożona na stal i kulka Al_2O_3 . W testach tribologicz-

* Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

nych wyznaczono współczynnik tarcia oraz głębokość bruzdy powstałej po tarciu. Analizę procesów zużycia wykonano z użyciem mikroskopu świetlnego (LM) oraz skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Wykonane badania przyczepności powłoki w teście zarysowania wskazują na jej dobrą adhezję do podłoża. Pęknięcia kohezyjne obserwowano przy obciążeniu 8 N, a uszkodzenia adhezyjne przy obciążeniu 16 N. Mikrotwardość układu powłoka/podłoże wynosi ok. 8 GPa i w znacznym stopniu zależy od deformacji miękkiego podłoża. Największą odporność na zużycie układu powłoka/podłoże stwierdzono podczas tarcia w ruchu postępowo-zwrotnym, a najmniejszą w ruchu obrotowym. Średni współczynnik tarcia w początkowym okresie współpracy w ruchu obrotowym i postępowym przyjmuje mniejszą wartość ok. 0,12 w porównaniu z ruchem postępowo-zwrotnym, gdzie wynosi ok. 0,16.

WPROWADZENIE

Współpraca elementów w styku skoncentrowanym ma w swojej domenie charakter oddziaływania zmęczeniowego. Zmęczenie powierzchniowe jest dodatkowo wzmocnione podczas współpracy w ruchu postępowo-zwrotnym w wyniku cyklicznych obciążeń o zmiennym kierunku oddziaływania i jest głównie inicjowane na wierzchołkach mikronierówności [L. 1–3]. Szczególnie jest to widoczne w styku tribologicznym elementów odkształconych plastycznie lub sprężysto-plastycznie. Wpływ takiego typu oddziaływania podczas tarcia twardych, gładkich powłok ceramicznych jest głównie zależne od sztywności układu powłoka/podłoże, a także różnicy w ich twardości. Częściowe wytarcie powłoki i zmniejszenie jej grubości przyspiesza proces zużycia. Na zniszczonej powierzchniowo powłoce powstają lokalne wykruszenia, a tworzące się twarde luźne cząstki mogą być usunięte z toru tarcia lub zalegać w strefie styku i potęgować zużycie ściernie [L. 3, 4].

Ograniczenie zużycia ściernego uzyskuje się m.in. poprzez stosowanie powłok przeciwzużyciowych [L. 5]. Dobrze zaprojektowanie systemu powłoka/podłoże gwarantuje optymalne właściwości tribologiczne i prowadzi do uzyskania korzyści niemożliwych do osiągnięcia przez samą powłokę lub podłoże [L. 6]. Badania tarcia i zużycia powłok w większości przypadków sprowadzają się do wykonania testów na uniwersalnych tribotesterach wg znormalizowanych metod, które nie zawsze wprost odnoszą się do materiałów pokrywanych powłokami. Analiza wyników

tych badań jest przede wszystkim ukierunkowana na określenie właściwości danej powłoki oraz porównanie jej z innymi powłokami, a brak jest badań kompleksowych.

W tej pracy przeprowadzono porównawczą analizę zjawisk towarzyszących tarcii powłok w ruchu obrotowym, postępowym i postępowo-zwrotnym oraz określono, który rodzaj ruchu jest najbardziej destrukcyjny dla testowanego systemu powłoka/podłoże.

METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań była powłoka niestechiometrycznego azotku wolframu (W-N) o grubości 0,5 μm osadzona na stali ferrytycznej. Powłokę wytworzono metodą ablacji laserem impulsowym (PLD) targetu wolframowego o czystości 99,9% w atmosferze azotu i argonu.

Twardość układu powłoka/podłoże zmierzono z użyciem Mikro-Combi-Testera instrumentalną metodą indentacyjną, stosując wgłębnik Vickersa i obciążenie 5 i 10 mN. Przyczepność powłoki do podłoża oznaczono metodą zarysowania, stosując diamentowy wgłębnik Rockwella C o promieniu zaokrąglenia 200 μm , obciążenie narastające liniowo od 0,03 do 30 N, prędkość przesuwu 3 mm/min, długość zarysowania 3 mm. Wykonano pięć testów w identycznych warunkach w różnych obszarach próbki.

Badania tribologiczne wykonano w ruchu obrotowym (OBR), postępowym (P) i postępowo-zwrotnym (P-Z) przy użyciu przeciwpróbki w postaci kulki Al_2O_3 o średnicy 1 mm. Testy prowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego i wykonano po pięć powtórzeń dla następujących parametrów: obciążenie 1, 2 i 3 [N], prędkość 16 mm/min dla ruchu prostoliniowego i 90 mm/min dla ruchu obrotowego, długość toru tarcia w ruchu postępowym 10 mm, promień tarcia w ruchu obrotowym 1,5 mm, liczba cykli 300. Niewielkie prędkości ruchu stosowane w badaniach umożliwiają pominięcie wpływu temperatury na wartość współczynnika tarcia, zwłaszcza że badane jest tarcie materiałów ceramicznych, a zmiany temperatury powierzchni tarcia są minimalne. W każdym z testów stosowano nową kulkę, a powierzchnie współpracujące myto w acetonie i pozostawiono do wyschnięcia. Temperatura otoczenia podczas badań wynosiła $21 \pm 2^\circ\text{C}$, a wilgotność powietrza ok. 40%.

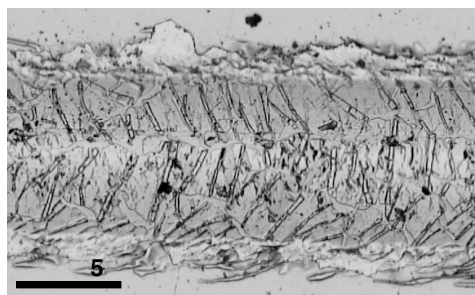
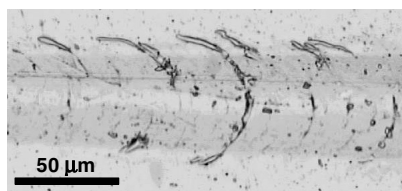
Badania morfologii oraz składu chemicznego materiałów w mikrowarstwach (analiza z punktu i z linii) przeprowadzono metodą SEM

z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego wyposażonego w analizator energii promieniowania X, JEOL JSM-7500F.

WYNIKI BADAŃ

Twardość układu powłoka/podłoże zmierzona przy obciążeniu 10 mN wynosi $7,9 \pm 0,5$ GPa i w znacznym stopniu jest determinowana przez deformację miękkiego podłoża, którego twardość wynosi 5 GPa. Natomiast przy 5 mN twardość jest znacznie większa i wynosi ok. 22 GPa. Osadzenie na tym podłożu powłoki (W-N) zwiększyło nośność układu ponad 4-krotnie, ale w odniesieniu do wyników otrzymanych przy bardzo małym obciążeniu.

Badana powłoka wykazuje dobrą przyczepność do tego stosunkowo miękkiego podłoża, zwłaszcza że jej grubość jest niewielka. W teście zarysowania obserwowano pierwsze pęknięcia kohezyjne przy obciążeniu krytycznym $L_{C1} = 7,8$ N. Pęknięcia te były zakrzywione w kierunku ruchu wglębniaka i propagowały poza obszar rysy (**Rys. 1a**), a wzrost obciążenia powodował ich multiplikację. Przy $L_{C2} = 15,9$ N wystąpiło odspajanie powłoki od podłoża na brzegach bruzdy spowodowane głównie wypiętrzaniem materiału (**Rys. 1b**).



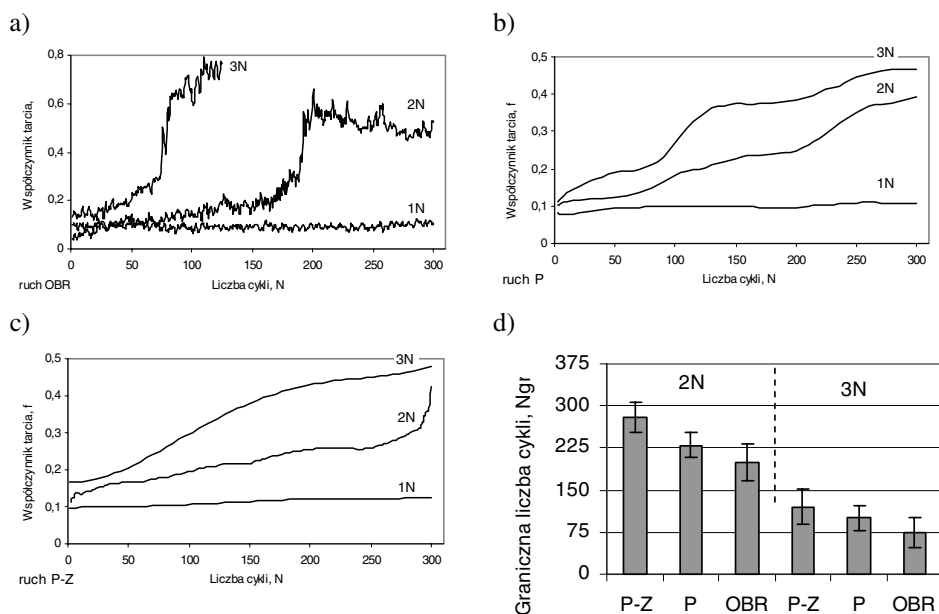
Rys. 1. Pęknięcia kohezyjne powłoki W-N przy obciążeniu $L_{C1} = 7,8$ N (a) oraz jej odspajanie od podłoża przy $L_{C2} = 15,9$ N (b), obserwowane w teście zarysowania

Fig. 1. Cohesive cracks of W-N coating at $L_{C1} = 7,8$ N load (a) and adhesive failure at $L_{C2} = 15,9$ N load (b) observed in scratch test

Powyżej obciążenia L_{C2} powłoka ulega ciągłemu niszczeniu, co prowadzi do powstania siatki spękań. Jednak nawet przy obciążeniu 30 N nie została ona całkowicie usunięta z toru zarysowania. Wgnieciona

w podłożu popękana powłoka oddziela od niego wgłębnik, o czym świadczy niewielki współczynnik tarcia ok. 0,18 oraz obraz powierzchni rysy.

W badaniach tribologicznych siła normalna, którą obciążono kulkę była dużo mniejsza w porównaniu z obciążeniem krytycznym. Dodatkowo promień kulki był 2,5 razy większy od promienia zaokrąglenia wgłębnika Rockwella, zatem nacisk jednostkowy w obszarze styku był znacząco mniejszy. Na **Rys. 1a** przedstawiono rzeczywiste wartości współczynnika tarcia w ruchu obrotowym. Natomiast na **Rys. 1b** zamieszczono wartości średnie wyznaczone w poszczególnych cyklach testów w ruchu postępowym, a w ruchu postępowo-zwrotnym jako średnią z obu kierunków (**Rys. 1c**). Wartość średnią współczynnika tarcia obliczono z wyników uzyskanych w środkowej części toru tarcia poza strefą zmienności prędkości związanej z wyhamowaniem kulki i jej zwrotem.

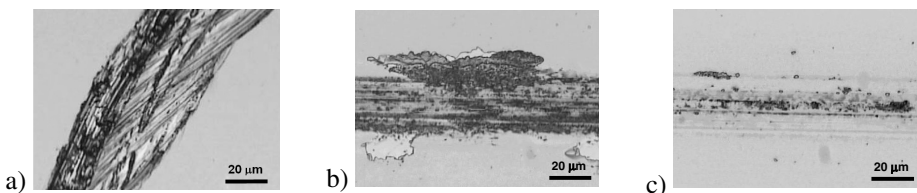


Rys. 2. Współczynnik tarcia powłoki W-N przy współpracy z kulką Al_2O_3 pod obciążeniem 1, 2 i 3 N w ruchu obrotowym (a), postępowym (b) i postępowo-zwrotnym (c) oraz graniczna liczba cykli do zniszczenia powłoki (d)

Fig. 2. Friction coefficient of W-N coating sliding against alumina ball at 1, 2 and 3 N load in rotary (a), translational (b) and reciprocating (c) motion and number of cycles N_{gr} up to failure of the coating (d)

Wytrzymałość powłoki zależy głównie od wielkości obciążenia, a także rodzaju ruchu (**Rys. 2d**). Obciążenie 3 N jest silnie destrukcyjne i powoduje niemalże całkowite usunięcie powłoki z toru tarcia. Wraz ze zwiększeniem obciążenia zwiększa się współczynnik tarcia (**Rys. 2**). W ruchu postępowo-zwrotnym dla obciążenia 3 N początkowo współczynnik tarcia jest niewielki, ale po ok. 80–90 cyklach kiedy rozpoczyna się przyspieszony proces niszczenia powłoki jego wartość znacznie wzrasta i jest większa niż podczas tarcia w ruchu postępowym (**Rys. 2c**). Jest to wynikiem cyklicznego deformowania nieumocnionego materiału próbki przez oddziaływanie siły stycznej o zmieniającym się zwrocie. Tarcie kulką obciążoną 1 N nie spowodowało przerwania powłoki w zakresie do 300 cykli w żadnym z trzech ruchów, a głębokość bruzdy nie przekraczała 0,03 μm .

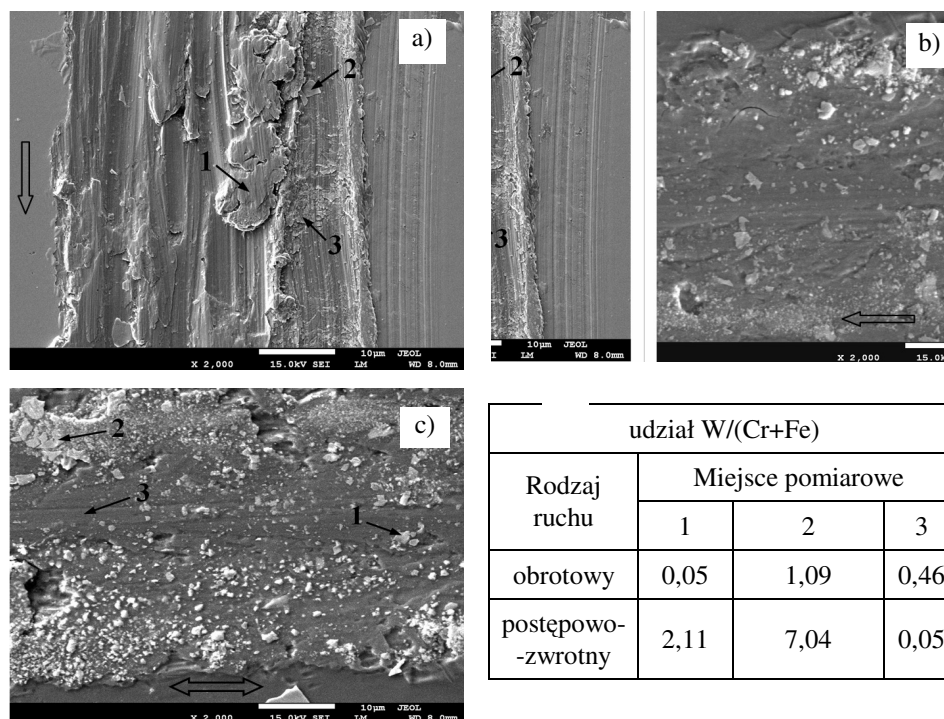
W początkowym okresie współpracy współczynnik tarcia równy 0,12 jest najmniejszy dla ruchu obrotowego i postępowego, a największy dla ruchu postępowo-zwrotnego (0,16). Następnie wzrasta w sposób jednostajny w kolejnych cyklach, a dodatkowo w ruchu obrotowym w momencie zniszczenia powłoki gwałtownie rośnie (**Rys. 2a**). Brak nagłego wzrostu współczynnika tarcia w ruchu prostoliniowym może świadczyć o obecności w strefie styku fragmentów powłoki, zwłaszcza w ruchu postępowo-zwrotnym. Nie wszystkie produkty zużycia są usuwane poza strefę styku, część z nich wchodzi pod powierzchnię kulki i początkowo jest kruszona, przetaczana, a później wgniatana w tor tarcia (**Rys. 4b, c**). W wyniku tego następuje lokalne umocnienie materiału i powstanie „pseudokompozytowej” struktury złożonej z odsłoniętego podłoża i rozproszonych twardych produktów zużycia powłoki oraz materiału kulki. Prowadzi to do mniejszego zagłębienia kulki i zmniejszenia oporów ruchu, zwłaszcza składowej mechanicznej. W ruchu postępowym uszkodzona powłoka dość szybko zostaje wypchnięta z toru tarcia, odsłaniając miękkie podłoże.



Rys. 3. Obrazy śladu zużycia z mikroskopu świetlnego po 200 cyklach przy obciążeniu 2 N w ruchu obrotowym (a), postępowym (b) i postępowo-zwrotnym (c)

Fig. 3. Light microscope images of wear scar after 200 cycles at 2 N load in rotary (a), translational (b) and reciprocating (c) motion

Tor tarcia w ruchu obrotowym charakteryzuje się nierównomierną szerokością na obwodzie oraz śladami zużycia w kształcie linii odchylnych od kierunku ruchu (**Rys. 3a, 4a**). Przy większym obciążeniu przeciwpróbka żłobi głębszą bruzdę i dodatkowo zahacza o jej boki. W wyniku tego zachowania znacznie pogarsza się współpraca w styku, doprowadzając do szybszego uszkodzenia powłoki. Z obserwacji mikroskopowych wynika, że dla ruchu obrotowego przeważają uszkodzenia powłoki o charakterze ściernym. Zużycie w przypadku ruchu postępowego oraz postępowo-zwrotnego ma charakter ścierno-adhezyjny. Większe zniszczenia adhezyjne zauważono dla ruchu postępowego (**Rys. 3b**), gdzie uwidaczniają się one na bokach bruzdy poza torem tarcia. Zużycie powłoki było dodatkowo potęgowane zmęczeniem powierzchniowym, co prowadziło do odpajania stosunkowo dużych jej fragmentów, które ulegały skruszeniu i były obecne w styku tarciovym.



Rys. 4. Obrazy SEM śladu zużycia po 300 cyklach przy obciążeniu 2 N w ruchu obrotowym (a), postępowym (b) i postępowo-zwrotnym (c) oraz wyniki analizy składu chemicznego w wybranych punktach (d)

Fig. 4. SEM images of wear groove after 300 cycles at 2 N load in rotary (a), translational (b) and reciprocating (c) motion and results of chemical composition analysis in points (d)

Obserwacje SEM potwierdzają istnienie bardzo nierównej powierzchni po tarceniu w ruchu obrotowym z licznymi bruzdami i zagłębieniami, w których lokują się pozostałości powłoki w postaci drobnych cząstek lub pojedynczych większych płytek (**Rys. 4a**). Jest to jednak za mała ilość, aby przeciwdziałać zużyciu lub obniżyć współczynnik tarcia. W torze tarcia po współpracy w ruchu postępowo-zwrotnym jest obecnych znacznie więcej wgniecionych fragmentów powłoki niż w torze tarcia w ruchu postępowym (**Rys. 4b, c**). Analiza rentgenowska nie wykazała obecności glinu, co świadczy o braku produktów zużycia przeciwpróbki Al_2O_3 , natomiast potwierdziła zróżnicowaną obecność wolframu, który jest podstawowym składnikiem powłoki (**Rys. 4d**).

PODSUMOWANIE

Największą odporność na zużycie układu powłoka/podłoże stwierdzono podczas tarcia w ruchu postępowo-zwrotnym, a najmniejszą w ruchu obrotowym. Może to wskazywać między innymi na niezdolność tej powłoki do samoorganizacji powierzchni tarcia. Nie obserwowano bowiem powstania warstewki przeciwzużyciowej, jako typowego efektu w procesie samoorganizacji. W ruchu prostoliniowym proces niszczenia powłoki jest mniej dynamiczny, a współczynnik tarcia narasta powoli, przeciwnie do ruchu obrotowego, gdzie obserwowano gwałtowny wzrost oporów ruchu w momencie przerywania powłoki. Współpraca w ruchu prostoliniowym jest bardziej stabilna niż w ruchu obrotowym, zwłaszcza kiedy promień tarcia jest mały. Usuwanie produktów zużycia z toru tarcia w jednokierunkowym ruchu skutkuje zmniejszeniem trwałości powłoki, natomiast wgniatanie fragmentów powłoki i startych cząstek w ruchu postępowo-zwrotnym zwiększa jej odporność na zużycie. Powłoka azotku wolframu ma dobrą przyczepność do podłoża ($L_{C1} = 7,8 \text{ N}$, $L_{C2} = 15,9 \text{ N}$) i nie ulega całkowitemu usunięciu z toru zarysowania, pomimo dużej deformacji nawet przy obciążeniu 30 N, lecz jest w nim zagniatana.

Wielkość zużycia i opory ruchu są zależne również od parametrów geometrycznych styku, a zwłaszcza rozmiaru promienia tarcia. W badaniach tribologicznych twardych powłok zwłaszcza na miękkim podłożu, kiedy można spodziewać się odkształcenia plastycznego w styku tarciovym, np. w wyniku obniżania nośności układu na skutek zmniejszania grubości powłoki przez jej ścieranie, istotnym jest prowadzenie testów w ruchu obrotowym na maksymalnie dużym promieniu tarcia. W ten spo-

sób można ograniczyć „udział” ruchu wiertnego w poszczególnych punktach strefy styku tarcowego.

Podziękowania

Autorzy składają serdeczne podziękowania Panu dr. Łukaszowi Majorowi z Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie za wypożyczenie próbek do badań oraz Pani dr Małgorzacie Zimowskiej z Instytutu Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN w Krakowie za wykonanie obrazów SEM.

LITERATURA

1. Atar E., Kayali E.S., Cimenoglu H.: Reciprocating wear behaviour of (Zr, Hf)N coatings. *Wear* 257 (2004), 633–639.
2. Audronis M., Rosli Z.M., Leyland A., Kelly P.J., Matthews A.: Tribological behaviour of pulsed magnetron sputtered CrB₂ coatings examined by reciprocating sliding wear testing against aluminium alloy and steel. *Surface and Coatings Technology* 202 (2008), 1470–1478.
3. Lu X.D., Wang H.M., Zhou Z.R.: Reciprocating sliding wear behavior of laser-clad small amplitude Mo₂Ni₃Si/NiSi metal silicide composite coatings. *Applied Surface Science* 240 (2005), 432–440.
4. Zimowski S., Rakowski W., Kot M., Major Ł.: Mechanizm zużycia powłok wielowarstwowych typu metal/ceramika (Cr/CrN). *Tribologia* vol. 220 (4/2008), 223–233.
5. Hogmark S., Jacobson S., Larsson M.: Design and evaluation of tribological coating, *Wear* 246 (2000), s. 20–33.
6. Hainsworth S. V., Soh W.C.: The effect of the substrate on the mechanical properties of TiN coatings, *Surface and Coatings Technology*, 163–164 (2003), 515–520.

Recenzent:
Krzysztof DRUET

Summary

In the present study, the tribological properties in rotary, translational, and reciprocating motion in ball-on-flat sliding contact is discussed. The coating of tungsten nitride with the thickness of 0,5 μm deposited onto ferritic steel was sliding against an alumina ball. The coefficient of friction and depth of wear groove were obtained.

Analysis of the wear processes was investigated by the use of a light microscope (LM) and a scanning electron microscope (SEM). The coating exhibited good adhesion to the substrate. The first cohesive cracks were observed at critical load $L_{C1} = 8$ N and adhesive failure at $L_{C2} = 16$ N. Microhardness of the coating/substrate system of 8GPa depended on the deformation of soft substrate. The highest wear resistance of the coating/substrate system was determined in reciprocating motion and the smallest in rotary motion. In the beginning stage of sliding, the friction coefficient of 0.12 was smaller in rotary and translational motion than in reciprocating motion and amounted 0.16.