

Jan BUJAK*, Zbigniew SŁOMKA*

BADANIA WYSOKOTEMPERATUROWEJ ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE ŚCIERNE WIELOWARSTWOWYCH POWŁOK AlCrTiN OSADZANYCH METODĄ ŁUKOWO-PRÓŻNIOWĄ

INVESTIGATION OF HIGH-TEMPERATURE RESISTANCE TO ABRASIVE WEAR OF AlCrTiN MULTILAYER COATINGS DEPOSITED USING THE CATHODIC VACUUM ARC PVD PROCESS

Słowa kluczowe:

powłoki wielowarstwowe AlCrTiN, topografia i morfologia powierzchni powłok, mechaniczne i tribologiczne właściwości wielowarstwowych powłok AlCrTiN, odporność na zużycie wysokotemperaturowe

Key words:

AlCrTiN multilayer coatings, topography and surface morphology, mechanical and tribological properties, high-temperature wear resistance

Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki badań właściwości wielowarstwowych powłok AlCrTiN osadzonych metodą łukowo-próżniową na podłożach ze stali

* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (48) 364-42-41, fax (48) 364-47-65.

narzędziowej do pracy na gorąco W320. Na podstawie wykonanych prac badawczych określono wpływ budowy strukturalnej wielowarstwowych powłok: Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN i Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN na właściwości mechaniczne i wysokotemperaturową odporność na zużycie ściernie. Wyniki przeprowadzonych testów tribologicznych w warunkach tarcia suchego wykazały podwyższoną odporność na zużycie ściernie w temperaturze 500°C powłoki Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN w porównaniu powłoką Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN. W wyniku wykonanej analizy stwierdzono, iż dobre właściwości przeciwzużyciowe tej powłoki spowodowane są obniżonym poziomem naprężeń oraz podwyższoną opornością na kruche pękanie jej warstw składowych CrN i (Al,Cr)N, użytych do wytworzenia wewnętrznej strefy przejściowej pomiędzy warstwą adhezyjną Cr, a zewnętrzną warstwą funkcjonalną AlCrTiN.

WPROWADZENIE

Szybki rozwój przemysłowych technologii wytwarzania wymusił poszukiwania nowych materiałów powłokowych, przeznaczonych do pracy w warunkach wysokich zmiennych obciążeń mechanicznych oraz podwyższonych temperatur. Spośród tych materiałów coraz szersze wykorzystanie w charakterze powłok przeciwzużyciowych nanoszonych na narzędziach do wysokowydajnej obróbki skrawaniem na sucho [L. 1–3] oraz na narzędziach do obróbki plastycznej (kucia, wyciskania, gięcia) [L. 4–5] znajdują obecnie wieloskładnikowe azotki wytwarzane na bazie Ti, Al, Cr. Przedstawione w pracach [L. 6, 7] rezultaty badań wskazują, że wprowadzenie do składu chemicznego powłoki AlTiN 20% domieszki chromu prawie dwukrotnie ogranicza spadek ich twardości w podwyższonych temperaturach przy zachowaniu dobrej adhezji do podłoża stalowych. Powłoki AlCrTiN w współpracy ze stalą cechują się ponadto niższym współczynnikiem tarcia w porównaniu do powłok AlTiN [L. 2] oraz wyższą odpornością na utlenianie wysokotemperaturowe (temperatura utleniania ~1000°C) [L. 8]. Rejestrowany wzrost stabilności termicznej czteroskładnikowych powłok AlCrTiN w stosunku do trójskładnikowych powłok (Al,Ti)N, spowodowany jest charakterystycznym oddziaływaniem chromu, który stymuluje wzrost cienkiej, zwartej warstewki kompleksu tlenkowego (Cr,Al)₂O₃ na ich powierzchni [L. 9]. Wytworzona w wyniku procesu utleniania buforowa warstwa tlenkowa, dzięki wysokiej stabilności chemicznej nie tylko ogranicza dyfuzję tlenu z atmosfery w głąb powłoki, ale również poprawia odporność powłoki na zużycie ściernie [L. 1]. W przypadku powłok PVD sterowanie ich właściwościami, w tym również odpornością przeciwzużyciową, może odbywać się nie tylko poprzez zmianę składu chemicznego materiału powłokowego [L. 2, 10], ale również poprzez wytworzenie wielowarstwowej struktury powłoki [L. 11, 12]. Odpowiednio zaprojektowana wielowarstwowa struktura powłoki obejmująca dobór: składu chemicznego, mikrostruktury,

liczby, grubości oraz kolejności wytwarzania poszczególnych jej warstw składowych umożliwia wzrost właściwości wytrzymałościowych całego układu podłoże/powłoka. Wytworzona w ten sposób struktura wielofazowa powłoki, w której występują tzw. strefy rozdziału (strefy materiału pomiędzy jej kolejnymi warstwami składowymi) wywołuje wzrost oporności na kruche pękanie powłoki poprzez skuteczne blokowanie propagacji pęknięć, a także wzrost twardości powłoki w efekcie rozdrobnienia jej mikrostruktury oraz zjawiska umocnienia materiału powłokowego [L. 13].

METODYKA BADAŃ

Wytypowane do badań wielowarstwowe powłoki: Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN oraz Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN osadzono na próbkach o wymiarach \varnothing 25,4 mm x 6 mm, wytworzonych ze stali W320 ulepszonej cieplnie do twardości 50HRC. Powierzchnie próbek przeznaczone do osadzania powłok szlifowano i polerowano z zastosowaniem ścierniw diamentowych do uzyskania chropowatości $R_a = 0,002 \mu\text{m}$, a następnie myto i odtłuszczano w kąpieli trójchloroetyleny. Procesy osadzania powłok przeprowadzono metodą łukową na wielozródłowym komercyjnym stanowisku próżniowym MZ 383 Metaplas Ionon. W celu wytworzenia wielowarstwowych powłok AlCrTiN o zróżnicowanym składzie chemicznym ich wewnętrznych warstw składowych, wykonano dwa procesy osadzania, przy wykorzystaniu następujących zestawów katod:

- *proces I* – 4x Cr 99,8%, 2x AlTi 67%-33%, 2x AlCr 70%-30%,
- *proces II* – 2x Ti 99%, 2x AlTi 67%-33%, 2x AlCr 70%-30%.

Przed procesem osadzania powłok podłoża podgrzewano wstępnie do temperatury ok. 200°C, a następnie trawiono i nagrzewano dwuetapowo do temperatury 400°C:

- *I etap* – poprzez bombardowanie powierzchni podłoża jonami argonu w warunkach wyładowania jarzeniowego wspomaganego łukiem elektrycznym (*AEGD – Arc Enhanced Glow Discharge*),
- *II etap* – poprzez bombardowanie powierzchni podłoża jonami tytanu z plazmy metalicznej wyładowania łukowego.

Podstawowe parametry procesu wytwarzania powłok wielowarstwowych, wytypowanych do badań, przedstawiono w **Tabeli 1**.

Pomiary grubości warstw składowych wielowarstwowych powłok AlCrTiN przeprowadzono na kulotesterze firmy Bernex AG Olsen. Analizy zmian składu chemicznego na przekroju powłok wykonano techniką „depth profiling”, z zastosowaniem metody optycznej spektrometrii emisyjnej z wyładowaniem jarzeniowym o częstotliwości radiowej RF GDOES, przy użyciu spektrometru emisyjnego GD-Profilier HR firmy Jobin Yvon Horiba. Badania morfologii

Tabela 1. Parametry procesu wytwarzania wielowarstwowych powłok AlCrTiN

Table 1. Deposition process parameters of the AlCrTiN multilayer coatings

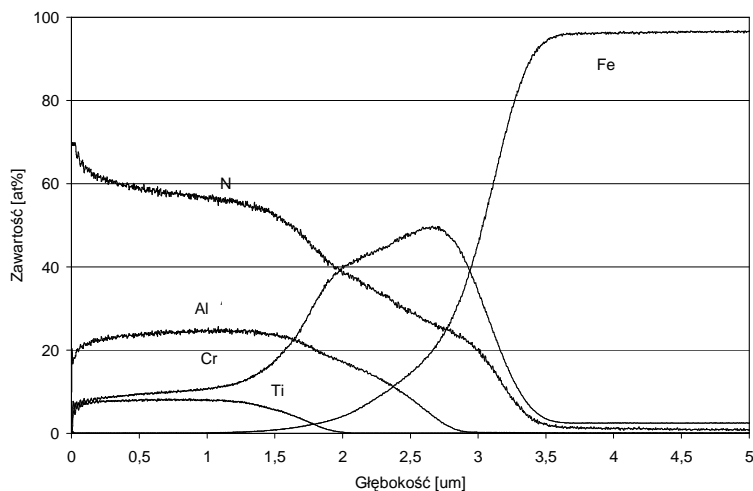
Warstwa składowa powłoki wielowarstwowej	Prąd wyładowania łukowego I [A]	Napięcie polaryzacji podłoża U_{bias} [V]	Ciśnienie w komorze próżniowej P [Pa]	Czas osadzania t [min]
Powłoka Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN				
Cr	40	-50	0,8	5
CrN	50	-100	2,6	15
AlCrN	50	-300		20
		-200		20
		-100		20
AlCrTiN	50	-150		60
Powłoka Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN				
Ti	60	-50	0,8	5
TiN	60	-150	1,2	15
AlTiN	45	-300	2,6	20
		-200		20
		-100		20
AlCrTiN	50	-150		

i topografii powierzchni powłok zrealizowano na mikroskopie optycznym Keyence VHX 1000 oraz przy użyciu profilometru optycznego Taylor Hobson Talysurf CCI. Pomiary twardości i modułu Younga powłok wykonano na nano-twardościomierzu NANO-HARDNESS TESTER CSM z wgłębnikiem Berkovicha. W celu wyeliminowania wpływu oddziaływania właściwości mechanicznych podłoża na wyniki wykonywanych pomiarów, badania przeprowadzono w trybie ograniczonego zagłębienia wgłębnika do głębokości nieprzekraczającej 10% całkowitej grubości powłoki wielowarstwowej. Adhezję powłok do stalowych podłoży badano metodą zarysowania (scratch-test) na testerze REVETEST firmy CSM. Pomiary wykonano przy liniowo narastającym obciążeniu wgłębnika 10 N/mm oraz szybkości jego przesuwu po powierzchni próbki 10 mm/min. Badania tribologiczne wysokotemperaturowej odporności powłok na zużycie ściernie wykonano dla skojarzenia tarcza z powłoką PVD/kulka Al_2O_3 na testerze T-21, przy zastosowaniu następujących parametrów testów: średnica kulki $\varnothing = 10$ mm, obciążenie $P = 10$ N, prędkość poślizgu $v = 0,1$ m/s, droga tarcia $L = 1000$ m, temperatura $T = 500^\circ C$. Pomiary pola przekrojów profili ścieżek wytarcia wykonano na profilometrze stykowym Form Talysurf PGI firmy Taylor Hobson. Zużycie objętościowe obliczano z iloczynu obwodu ścieżki zużycia oraz pola jej przekroju, wyznaczonego jako średnia arytmetyczna z 3 pomiarów. Współczynniki tarcia testowanych powłok wyznaczono jako średnią z wartości chwilowych z obszaru charakterystyki tarciowej, odpowiadającej procesowi tarcia ustalonego.

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

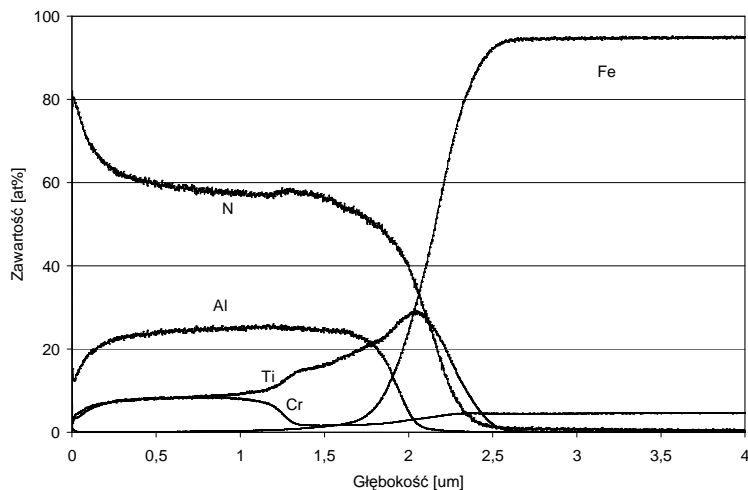
Charakterystyka i właściwości mechaniczne powłok wielowarstwowych

Analizy ilościowych zmian składu chemicznego GDOES na przekroju wytworzonych powłok wielowarstwowych zaprezentowano na **Rysunkach 1 i 2**.



Rys. 1. Analiza ilościowa zmian składu chemicznego w powłoce Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN (analiza „depth profiling”)

Fig. 1. GDOES quantitative depth-profile of sample with Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN coating

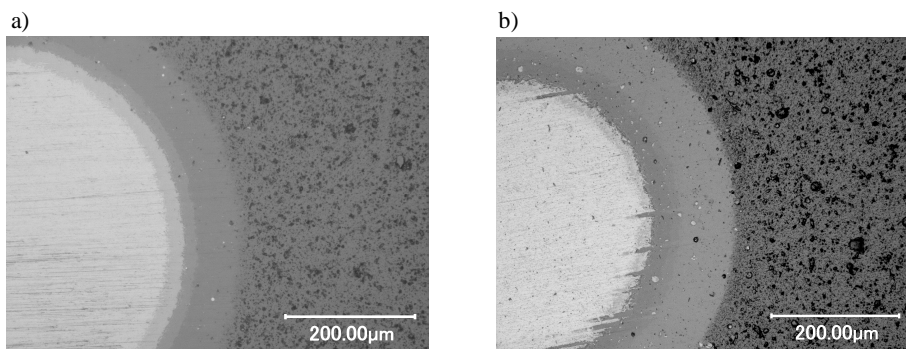


Rys. 2. Analiza ilościowa GDOES zmian składu chemicznego w powłoce Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN (analiza „depth profiling”)

Fig. 2. GDOES quantitative depth-profile of sample with Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN coating

Wyniki badań składu chemicznego wytworzonych powłok wykonane metodą GDOES potwierdziły ich wielowarstwową budowę, złożoną z czterech warstw składowych. Wyznaczone metodą kulotestu grubości poszczególnych warstw składowych badanych powłok przedstawiono poniżej:

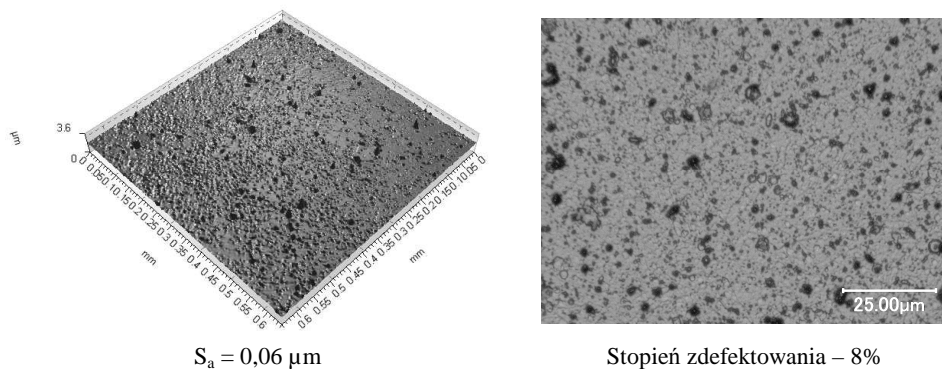
- dla powłoki Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN; warstwa Cr ~ 0,1 μm , warstwa CrN – 0,5 μm , warstwa AlCrN – 0,4 μm , warstwa AlCrTiN – 1,6 μm (**Rys. 3a**),
- dla powłoki Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN; warstwa Ti ~ 0,1 μm , warstwa TiN – 0,3 μm , warstwa TiAlN – 0,8 μm , warstwa AlCrTiN – 1,5 μm (**Rys 3b**).



Rys. 3. Mikrografie przekrojów powłok uzyskane na zglądach sferycznych próbek z powłokami: a) Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN, b) Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN

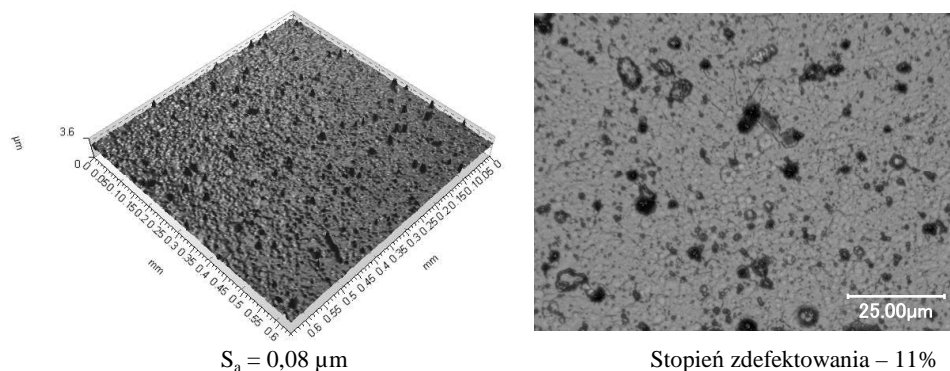
Fig. 3. Microphotographs of spherical coating's cross-section for: a) Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN b) Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN

Przeprowadzone badania morfologii powierzchni powłok: Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN oraz Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN ujawniły występowanie w ich strukturze powierzchniowej typowych dla powłok osadzanych z zastosowaniem niskociśnieniowego wyładowania łukowego licznych defektów strukturalnych w postaci: mikrokropki, kraterów, porów oraz stożkowych wzniesień (**Rys. 4 i 5**).



Rys. 4. Topografia i morfologia powierzchni powłoki Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN

Fig. 4. Topography and surface morphology of Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN coating



Rys. 5. Topografia i morfologia powierzchni powłoki Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN
 Fig. 5. Topography and surface morphology of Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN coating

Wykonana porównawcza analiza mikroskopowych obrazów powierzchni badanych powłok ujawniła zróżnicowanie stopnia ich zdefektowania. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że udział defektów w powłoce Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN jest o ok. 30% mniejszy niż powłoce Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN. Przyczyną obserwowanego w powłoce Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN większego zdefektowania jest zwiększony udział w jej strukturze frakcji mikrokropli o rozmiarach powyżej 5,0 μm . Na podstawie przeprowadzonej analizy procesów osadzania powłok stwierdzono, że zróżnicowanie stopnia zdefektowania powierzchni badanych powłok spowodowane jest wykorzystaniem do realizacji procesów ich wytwarzania dwóch zestawów katod (Ti, AlTi lub Cr, AlCr), różniących się nie tylko składem chemicznym, ale również właściwościami termicznymi (przewodnictwem cieplnym i temperaturą topnienia). Wiadomym jest, iż właściwości termiczne materiałów katod istotnie oddziałują na przebieg procesu odparowania łukowego materiałów, determinując zarówno ilość, jak i rozmiary mikrokropli emitowanych do strumienia plazmy wytwarzanej tą metodą [L. 14]. Większy udział mikrokropli o zwiększonych rozmiarach, widoczny w strukturze powłoki Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN (Rys. 5), jest efektem niższej przewodności cieplnej (17,0 W/m · K) oraz wyższej temperatury topnienia (1650°C) tytanu, obecnego w składzie katod użytych do osadzania wewnętrznych warstw składowych powłoki. Zastosowanie do realizacji procesu osadzania powłoki Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN katod stopowych z zawartością chromu, charakteryzującego się w porównaniu z tytanem zdecydowanie lepszymi właściwościami termicznymi (przewodność cieplna 69,1 W/m · K, temperatura topnienia 1860°C) [L. 14], wyraźnie ogranicza liczbę i wymiary mikrokropli, co objawia się mniejszym stopniem zdefektowania oraz niższą chropowatością powierzchni tej powłoki (Rys. 4).

Wyniki pomiarów twardości, modułu Younga i adhezji badanych powłok zestawiono w **Tabeli 2**.

Tabela 2. Właściwości mechaniczne wielowarstwowych powłok: Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN oraz Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN

Table 2. Mechanical properties of Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN and Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN multi-layer coatings

Typ powłoki	Twardość H [GPa]	Moduł Younga E [GPa]	Adhezja L_{C3} [N]
Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN	30±1	367±19	44±2
Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN	35±2	375±18	34±2

Zrealizowane badania twardości, modułu sprężystości oraz adhezji wykazały, że wytworzone powłoki wielowarstwowe, wskutek zróżnicowania składu chemicznego ich wewnętrznych warstw składowych, charakteryzują się zróżnicowanymi właściwościami sprężysto-plastycznymi i adhezyjnymi. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, iż powłoka Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN o niższej twardości cechuje się w stosunku do powłoki Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN wyraźnie lepszymi właściwościami adhezyjnymi. Zarejestrowana dla tej powłoki podwyższona wartość siły krytycznej $L_{C3} = 44$ N, pod działaniem której generowany jest proces całkowitej destrukcji powłoki, spowodowana jest prawdopodobnie obniżonym poziomem naprężeń własnych oraz podwyższoną odpornością na propagację pęknięć jej wewnętrznych warstw składowych: CrN oraz AlCrN [**L. 16, 17**]. W przypadku powłoki Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN, w której do wytworzenia struktury wielowarstwowej wykorzystano warstwy TiN i AlTiN, charakteryzujące się w porównaniu z warstwami CrN oraz AlCrN prawie dwukrotnie wyższym poziomem naprężeń własnych oraz zdecydowanie niższymi wartościami wskaźnika odporności na propagację pęknięć (o ok. 50%) [**L. 18, 19**], całkowite uszkodzenie powłoki następuje pod wpływem o ok. 30% niższych obciążeń działających na wgłębnik scratch-testera (**Tab. 2**).

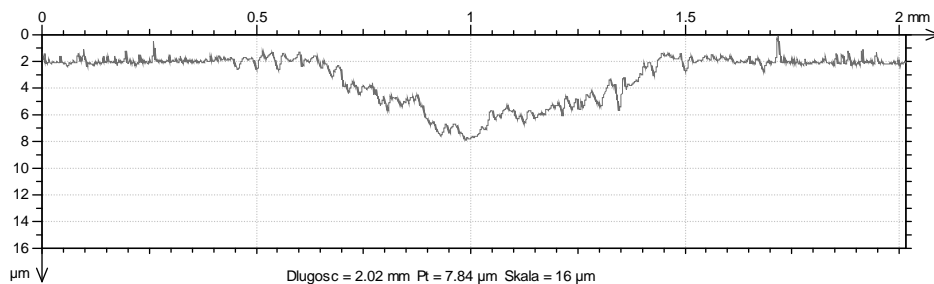
WYNIKI BADANIA ODPORNOŚCI POWŁOK NA ZUŻYCIE ŚCIERNE W PODWYŻSZONEJ TEMPERATURZE

Ocenę wysokotemperaturowych właściwości tribologicznych wielowarstwowych powłok: Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN i Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN przeprowadzono na podstawie testów tribologicznych przeprowadzonych metodą kulotarcza w temperaturze 500°C. Rezultaty testów tribologicznych, obejmujące pomiary wartości współczynnika tarcia oraz zużycia objętościowego, zestawiono w **Tabeli 3**.

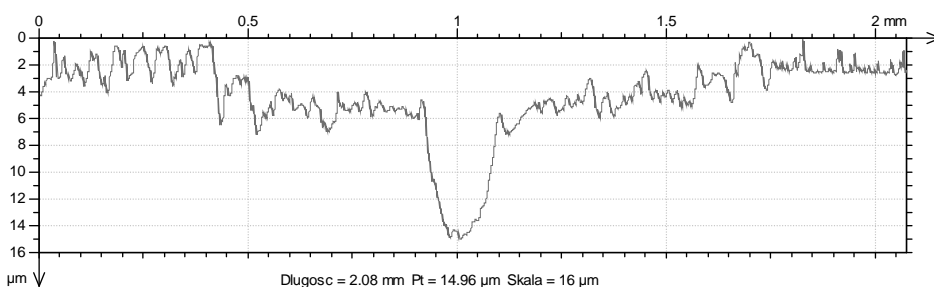
Tabela 3. Właściwości tribologiczne powłok: Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN, Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN
 Table 3. Tribological properties of Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN and Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN multilayer coatings

Typ powłoki	Współczynnik tarcia	Zużycie objętościowe [mm ³]
Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN	0,80	0,071±0,006
Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN	0,75	0,148±0,017

Na podstawie zrealizowanych testów stwierdzono, że wartości współczynnika tarcia dla obydwu badanych powłok wielowarstwowych w skojarzeniu z kulką z Al₂O₃ kształtują się na porównywalnym poziomie 0,75–0,80. Istotne różnicowanie zaobserwowano natomiast przy porównaniu intensywności procesu ich zużywania się (**Rys. 6 i 7**).



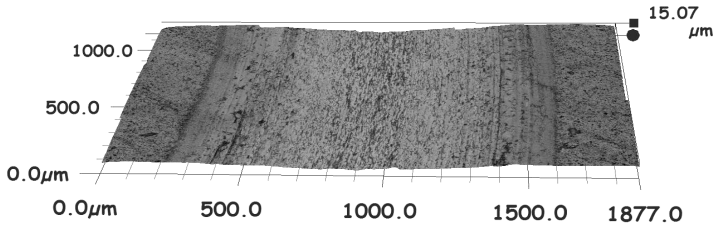
Rys. 6. Profil poprzeczny ścieżki wytarcia próbki z powłoką Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN
 Fig. 6. Wear scar profile of the sample with Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN coating



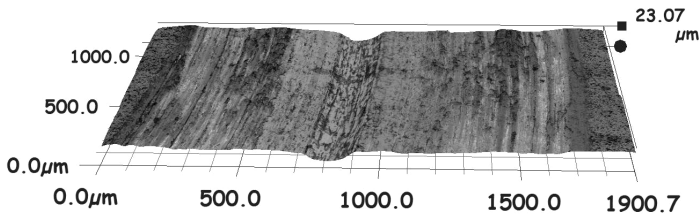
Rys. 7. Profil poprzeczny ścieżki wytarcia próbki z powłoką Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN
 Fig. 7. Wear scar profile of the sample with Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN coating

Badania mikroskopowe ścieżek wytarcia wskazują, iż dominującą formą zużywania się obydwu badanych powłok jest zużycie ściernie, przebiegające przy obecności w węzle tarcia luźnych, twardych cząstek, będących wkruszo- nymi z powłok fragmentami jej warstw składowych. Świadczą o tym charakte-

rystyczne rysy oraz bruzdy o zróżnicowanej szerokości i głębokości, ułożone równoległe do kierunku ruchu kulki i usytuowane nie tylko w obszarach brzegowych, ale również w strefie środkowej śladów zużycia. Porównawcza analiza mikroskopowych obrazów śladów zużycia wykazała, że szerokość oraz głębokość zarysowań jest zdecydowanie większa na próbce pokrytej powłoką Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN (Rys. 8 i 9).



Rys. 8. Obraz 3D śladu zużycia zarejestrowany na próbce z powłoką Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN
 Fig. 8. 3D image of worn surface for the sample with Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN coating



Rys. 9. Obraz 3D śladu zużycia zarejestrowany na próbce z powłoką Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN
 Fig. 9. 3D image of worn surface for the sample with Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN coating

Wyznaczone średnie wartości zużycia objętościowego dla badanych próbek ujawniły wyraźnie wyższą oporność przeciwzużyciową dla próbek pokrytych powłoką Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN w porównaniu z próbkami, na których osadzono powłokę Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN. Zarejestrowana dla próbek pokrytych powłoką Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN ponad dwukrotnie niższa wartość zużycia objętościowego (**Tab. 4**), wywołana jest intensyfikacją procesu bruzdowania, w wyniku przedostawania się do węzła tarcia większej ilości wykruszonych z powłoki luźnych jej fragmentów. Zdaniem autorów główną przyczyną, która wzmacnia procesy delaminacji powłoki, jest obniżona odporność na kruche pękanie oraz wyższy poziom naprężeń własnych w warstwach składowych TiN i AlTiN, użytych do wytworzenia w strukturze wielowarstwowej Ti-TiN-AlTiN-AlCrTiN strefy przejściowej, usytuowanej pomiędzy warstwami: adhezyjną Ti i zewnętrzną funkcjonalną AlCrTiN.

PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych określono wpływ budowy strukturalnej wielowarstwowych powłok AlCrTiN, osadzanych metodą łukowo-próżniową, na ich właściwości mechaniczne i tribologiczne. Wyniki zrealizowanych badań wykazały, że obydwie powłoki wielowarstwowe, wytworzone na bazie aluminium, chromu, tytanu i azotu: Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN i Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN charakteryzują się wysoką twardością ($H = 30\text{--}35$ GPa) oraz dobrą, chociaż zróżnicowaną adhezją do ulepszonych cieplnie stalowych podłoży wykonanych ze stali W320 ($L_{C3} = 34\text{--}40$ N). Na podstawie wyników testów tribologicznych, wykonanych w podwyższonej temperaturze (500°C) stwierdzono, iż badane powłoki wielowarstwowe cechuje także zróżnicowana odporność na zużycie ścierne. Analiza uzyskanych wyników badań wskazała, że przyczyną odnotowanych różnic odporności przeciwzużyciowej powłok są potwierdzone literaturowo, zróżnicowane właściwości wytrzymałościowe ich warstw składowych [L. 16–19], tworzących wewnętrzne strefy przejściowe struktur wielowarstwowych (usytuowane pomiędzy metaliczną warstwą adhezyjną Ti lub Cr a zewnętrzną warstwą funkcjonalną AlCrTiN). Odnotowana w przypadku próbek pokrytych powłoką Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN, ponad dwukrotnie wyższa wysokotemperaturowa odporność na zużycie ścierne w porównaniu z próbkami, na których wytworzono powłokę Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN, spowodowana jest obniżonym poziomem naprężeń własnych oraz podwyższoną odpornością na propagację pęknięć jej wewnętrznych warstw składowych (CrN/AlCrN), co w efekcie końcowym doprowadza do wzrostu wytrzymałości całej powłoki wielowarstwowej.

Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego, pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.

LITERATURA

1. Bai L., Zhu X., Xiao J., He J., Study on thermal stability of CrTiAlN coating for dry drilling, Surf. Coat. Technol., 201 (2007), pp. 5257–5260.
2. Fox-Rabinovich G.S., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.J. Dosbaeva G.K., Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining condition, Surf. Coat. Technol., 200 (2005), pp. 1804–1813.
3. Yamamoto K., Kujime S., Takahara K., Structural and mechanical property of Si incorporated (Ti,Cr,Al)N coatings deposited by arc ion plating process, Surf. Coat. Technol., 200 (2000), pp. 134–140.
4. www.platit.com, Platit Compendium, (2012), pp. 1–108.
5. Smolik J., Walkowicz J., Tacikowski J., Influence of the structure of the composite: 'nitrided layer/PVD coating' on the durability of tools for hot working, Surf. Coat. Technol., 125 (2005), pp. 1383–1390.

6. Fox-Rabinovich G.S., Kowalew A.I., Aguire M.H., Beadke B.D., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Endrino J.L., Wainstein D.L., Rashkovsky A.Y., Design and performance of TiAlN and TiAlCrN coatings for machining of hard materials, *Surf. Coat. Technol.* 204 (2009), pp. 489–496.
7. Zhou Z.F., Tam P.L., Shum P.W., Li K.Y., High temperature oxidation of CrTiAlN hard coatings prepared by unbalanced magnetron sputtering, *Thin Solid Films* 517 (2009), pp. 5243–5247.
8. Yamamoto K., Sato T., Takahara K., Hanaguri K., Properties of (Ti,Cr, Al) N coatings with high Al content deposited by new plasma enhanced arc-cathode, *Surf. Coat. Technol.* 174–175 (2003), pp. 620–626.
9. Cooke K.E., Yang S., Selcuk C., Kennedy A., Teer D.G., Beale D., Development of duplex nitrided sputter ion plated CrTiAlN-based coatings for H13 aluminium extrusion dies, *Surf. Coat. Technol.* 188–189 (2004), pp. 697–702.
10. Hsu Ch.-H., Chen K.-L., Lin Z.-H., Su Ch.-Y., Lin Ch.-K., Bias effects on the tribological behavior of cathodic arc evaporated CrTiAlN coatings on ASI 304 stainless steel, *Thin Solid Films* 518 (2010), pp. 38243–3829.
11. Santana A.E., Karimi A., Derflinger V.H., Schütze A., Microstructure and mechanical behavior of TiAlCrN multilayer thin films, *Surf. Coat. Technol.*, 177–178 (2004), pp. 334–340.
12. Fox-Rabinovich G.S., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.J., Shuster L.S., Ning L., Self-adaptive wear behavior of nano-multilayered TiAlCrN/WN coatings under severe machining condition, *Surf. Coat. Technol.*, 201 (2006), pp. 1852–1860.
13. Holleck H., Schier V., Multilayer PVD coatings for wear protection. *Surf. Coat. Technol.* 76–77 (1995), pp. 330–331.
14. Anders S., Anders A., Yu K.M., Yau X.Y., Brown I.G., On the microparticle flux from vacuum arc cathode spots, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 21 (1993), pp. 440–446.
15. www.matweb.com.
16. Le Bourhis E., Goudeau P., Staia M.H., Carrasquero E., Puchi-Cabrera E.S., Mechanical properties of hard AlCrN-based coated substrates *Surf. Coat. Technol.*, 203 (2009), pp. 2961–2968.
18. Fox-Rabinovich G.S., Beake B.D., Endrino J.L., Veldhuis S.C., Parkinson R., Shuster L.S., Migranov M.S., Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings, *Surf. Coat. Technol.*, 200 (2006), pp. 5738–5742.
19. Chang Y.-Y., Yang S.-J., Wang D.-Y., Structural and mechanical properties of AlTiN/CrN coatings synthesized by a cathodic-arc deposition process, *Surf. Coat. Technol.*, 201 (2006), pp. 4209–4214.

Summary

The properties of the AlCrTiN multilayer coatings deposited in the cathodic vacuum arc PVD process on the W 320 hot working tool steel are presented in the paper. An influence of the structure of the multilayer Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN and Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN coatings on their mechanical properties and high-temperature resistance to abrasive wear has been determined. The results of the tribological tests carried out in dry friction show that the Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN coating exhibits an improved resistance to abrasive wear at the temperature of 500°C, which is better than the Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN coating. It has been proved that it can be attributed to the lower residual stresses and higher toughness of the CrN and AlCrN layers in the Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN coating than the respective ones (TiN and AlTiN) in the Ti/TiN/AlTiN/AlCrTiN coating. The CrN and AlCrN layers constitute an internal transition zone between the Cr adhesion layer and the outer AlCrTiN functional layer in the Cr/CrN/AlCrN/AlCrTiN multilayer coatings.

