

Marcin KOT\*, Wiesław RAKOWSKI\*, Krzysztof CZECHOWSKI\*\*

## WŁAŚCIWOŚCI NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH Z WIELOWARSTWOWYMI POWŁOKAMI TYPU CERAMIKA/CERAMIKA

## PROPERTIES OF CUTTING TOOLS WITH CERAMIC/CERAMIC MULTILAYERS

### Słowa kluczowe:

powłoki wielowarstwowe ceramiczne, narzędzia skrawające, twardość, zużycie

### Key-words:

ceramic multilayers, cutting tools, hardness, wear

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań mikromechanicznych i tribologicznych powłok wielowarstwowych typu ceramika–ceramika nałożonych na płytki skrawające WC-Co. Badano multiwarstwy TiAlN/TiN oraz TiAlN/CrN o grubości pojedynczych podwarstw 60 nm. Powłoki

---

\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, 30-065 Kraków, al. Mickiewicza 30, e-mail: kotmarc@imir.agh.edu.pl

\*\* Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie, 30-011 Kraków, ul. Wrocławska 37A.

były wytworzone metodą łukowo-plazmową. Dla porównania dołączono komercyjną płytkę z powłoką TiAlSiN oraz płytkę bez powłoki. Przeprowadzono pomiary właściwości mikromechanicznych oraz tribologicznych w styku kula–tarcza. Przeprowadzono także testy eksploatacyjne ostrzy skrawających podczas toczenia utwardzonej stali NC6. Obydwie z proponowanych multiwarstw TiAlN/TiN i TiAlN/CrN podnoszą odpowiednio 3,1 i 1,4 razy trwałość ostrzy skrawających w stosunku do ostrza WC-Co bez powłoki. Trwałość ich jest także wyższa od trwałości ostrza z powłoką TiAlSiN, dostępnego na rynku.

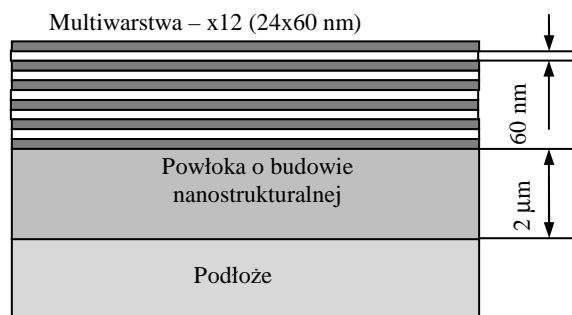
## WPROWADZENIE

W dziedzinie obróbki skrawaniem nieustannie dokonuje się postęp, który dotyczy obrabiarek, materiałów obrabianych oraz stosowanych narzędzi. Coraz wyższe parametry skrawania w procesach szybkościowych – HSM (ang. High Speed Machining) [L. 1], obróbka bez stosowania cieczy chłodzących [L. 2] w znaczny sposób wpływają na ekonomikę procesu. Z drugiej strony powodują coraz wyższe obciążenia mechaniczne i termiczne, jakim muszą sprostać nowe materiały narzędziowe. Postęp w dziedzinie materiałów dokonuje się przede wszystkim poprzez rozwój powłok nakładanych metodami PVD i CVD. Pojedyncze powłoki, takie jak TiN, ZrC, nie mogą spełnić coraz wyższych wymagań i są coraz rzadziej stosowane. Natomiast dużym zainteresowaniem cieszą się powłoki wieloskładnikowe składające się z azotków, węglików, węglikoazotków lub tlenków pierwiastków, takich jak Ti, Cr, V, Zr, Nb, Hf i W. Powłoką często stosowaną, należącą do tej grupy, jest TiAlN [L. 3] oraz dalsze jej modyfikacje, jak TiAlCrN, TiAlSiN i TiAlBN [L. 4, 5]. Materiały te cechują się dużą stabilnością struktury w wysokich temperaturach oraz wyższą odpornością na utlenianie niż monoazotki metali przejściowych. Nowym kierunkiem rozwoju powłok na narzędzia skrawające są wielowarstwowe powłoki typu ceramika/ceramika, np. TiN/NbN, TiN/VN, TiAlN/CrN [L. 6, 7]. Właściwości tych powłok zależą przede wszystkim od materiałów wchodzących w ich skład oraz liczby granic rozdziału pomiędzy podwarstwami.

Celem pracy było porównanie właściwości użytkowych nowych nanostrukturalnych powłok wielowarstwowych TiAlN/TiN oraz TiAlN/CrN naniesionych na płytce z węgla spiekanego z płytkami bez powłoki oraz dostępną na rynku płytką z powłoką TiAlSiN.

## BADANE POWŁOKI

Powłoki wielowarstwowe nakładano na komercyjne płytki wielostrzowe WC-Co typu SPUN 120308. Producent podaje, że jest to węglík o średniej wielkości ziarna ok. 2  $\mu\text{m}$  stosowany do obróbki stali, stali nierdzewnych i żeliwa wiórem odpryskowym o dużym przekroju i zmiennej grubości. Jest on odporny na zmęczeniowe obciążenia dynamiczne i przeznaczony do stosowania przy dużych i średnich prędkościach skrawania oraz dużych przekrojach warstwy skrawanej. Na płytki te naniesiono powłoki o wielowarstwowej budowie (**Rys. 1**). Wewnętrzna warstwa o grubości 2  $\mu\text{m}$  jest zbudowana z monolitycznego, nanostrukturalnego materiału. Na nią nałożono multiwarstwę, w której grubość każdej z podwarstw wynosi 60 nm. Nanoszenie prowadzono metodą łukowo-plazmową, wykorzystując urządzenie NNW 6.6.1 w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie. Proces nanoszenia rozpoczynano od naniesienia cienkiej warstwy stopu TiAl. Następnie doprowadzano azot pod ciśnieniem ok. 1 Pa i nanoszono powłoki z dwu katod jednocześnie – Ti i Ti-Al dla powłoki TiAlN oraz Cr i Ti-Al dla powłoki TiAlCrN. Łącznie czas trwania nanoszenia pierwszej powłoki o grubości 2  $\mu\text{m}$  wynosił ok. 25 min. Dalszy proces nanoszenia przebiegał przy jednej pracującej katodzie. Czas nanoszenia pojedynczej podwarstwy wynosił ok. 2 min. Po upływie tego czasu zmieniano katodę na drugą, tworząc w ten sposób część powłoki będącą multiwarstwą zbudowaną z 24 podwarstw TiAlN/TiN oraz TiAlN/CrN (**Rys. 1**). W celu porównania z proponowanymi powłokami dołączono do badań dostępną na rynku płytkę skrawającą z powłoką TiN/TiAlSiN/TiN. Wszystkie badane próbki zestawiono w **Tabeli 1**.



**Rys. 1. Budowa powłok wielowarstwowych**

Fig. 1. Structure of multilayered coatings

**Tabela 1. Badane próbki**

Table 1. Tested samples

Próbka-oznaczenie	Budowa
Podłoże WC-Co	Płytką bez powłoki WC(69,5%)+Co(9,5%)+ TiC+TaC+NbC (21%)
Powłoka TiAlN/TiN	Nanostrukturalny TiAlN –ok.2 $\mu\text{m}$ +12x(60 nmTiAlN+60 nmTiN) – ok. 1,5 $\mu\text{m}$
Powłoka TiAlN/CrN	Nanostrukturalny TiAlCrN –ok.2 $\mu\text{m}$ +12x(60 nmTiAlN+60nm CrN) – ok. 1,5 $\mu\text{m}$
Powłoka TiAlSiN	TiN/TiAlSiN/TiN – 4 $\mu\text{m}$

Grubości powłok zmierzono metodą kalotestu oraz stosując mikroskopię skaningową na przełomach poprzecznych. Dla powłoki TiAlN/TiN średnia grubość całkowita na powierzchni natarcia wynosi 3,13  $\mu\text{m}$ , a 3,33  $\mu\text{m}$  dla TiAlN/CrN. Natomiast na powierzchniach przyłożenia grubość wynosiła odpowiednio 3,52  $\mu\text{m}$  i 3,28  $\mu\text{m}$ .

## BADANIA STRUKTURALNE

W celu zbadania struktury oraz składu chemicznego wykonano przełomy poprzeczne płytek z powłokami. Badania wykonano, używając mikroskopu skaningowego JOEL JSM. Na **Rys. 2** przedstawiono mikrostrukturę powłoki TiAlN/CrN (**Rys. 2a**) i TiAlN/TiN (**Rys. 2b**). Złożona budowa powłok z multiwarstwami na powierzchni jest wyraźnie widoczna.

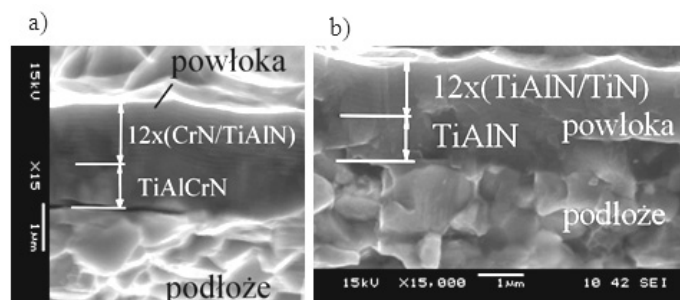
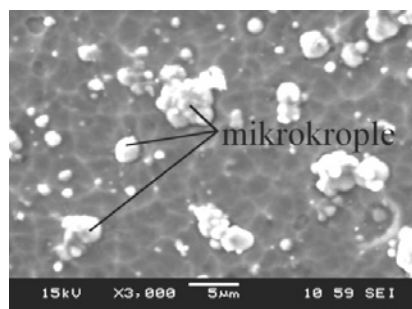
**Rys. 2. Widok SEI przełomu powłoki: a) TiAlN/CrN, b) TiAlN/TiN**

Fig. 2. SEI image of coating cross-section: a) TiAlN/CrN, b) TiAlN/TiN

Obserwowano także mikrokropłe (**Rys. 3**) na powierzchni, powodujące znaczny wzrost chropowatości. Powstawanie mikrokropel jest wadą metody łukowo-plazmowej, utrudniającą nanoszenie powłok o jednorodnej strukturze, zwłaszcza o wielowarstwowej budowie. Aby sprawdzić

skład chemiczny powłok, przeprowadzono analizę EDS. Wyniki potwierdziły występowanie pierwiastków: Ti, Al, N w powłoce TiAlN/TiN oraz Ti, Al, Cr, N w powłoce TiAlN/CrN. Analizując skład podłoża w bliskim obszarze granicy rozdziału, obserwowano pierwiastki wchodzące w skład powłok, co wskazywało na ich dyfuzję do podłoża. Także i w powłoce znaleziono pierwiastki z podłoża, tj. C, W oraz Co. Świadczy to o występowaniu strefy przejściowej mogącej w bardzo pozytywny sposób wpływać na właściwości mechaniczne systemu powłoka–podłoże.



**Rys. 3. Widok SEI powierzchni powłoki TiAlN/CrN**

Fig. 3. SEI image of surface of TiAlN/CrN coating

## BADANIA MIKROMECHANICZNE I TRIBOLOGICZNE

Badania właściwości mikromechanicznych przeprowadzono, używając aparatu Micro-Combi-Tester (CSM-Instruments) zgodnie z PN-EN ISO 14577. Mikrotwardość  $H_{IT}$  mierzono, wykorzystując diament Vickersa przy obciążeniach 50 i 100 mN. Wartości obciążenia wgłębnika odpowiadały głębokościom penetracji na 300 i 500 nm. Twardość przy niższym obciążeniu odpowiada twardości multiwarstwy na powierzchni. Natomiast na twardość mierzoną przy nacisku 100 mN duży wpływ ma także twardość nanostrukturalnej podwarstwy. Moduł sprężystości  $E_{IT}$  obliczano z indentacyjnej krzywej odciażania metodą Oliwier 'a - Pharr 'a. Wartości twardości i modułu sprężystości zestawiono w **Tabeli 2**. Najwyższą twardością charakteryzuje się powłoka TiAlN/TiN. Duża różnica twardości zmierzona dla obciążenia 50 mN świadczy o znacznie większej twardości samej multiwarstwy TiAlN/TiN w stosunku do TiAlN/CrN. Utwardzenie pierwszej z multiwarstw prawdopodobnie powodowane jest niewielkimi różnicami w parametrach sieci krystalicznej. Różnice te powodują powstawanie lokalnego pola naprężeń, które utrudnia ruch dyslo-

kacji i ich przechodzenie przez granice międzywarstwowe. Efektu takiego nie obserwuje się, gdy różnice w parametrach sieci są zbyt duże, jak to ma miejsce dla multiwarstwy TiAlN/CrN. Twardość obydwu płytek z multiwarstwami jest wyższa od twardości komercyjnej płytki z powłoką TiAlSiN. Przy obciążeniu 100 mN wpływ na wynik pomiaru ma także twardość nanostrukturalnych warstw TiAlN i TiAlCrN. Przeprowadzona analiza objętości odkształconych plastycznie wykazała zbliżone twardości ok. 17 GPa dla obydwu tych powłok. Różnice twardości zmierzone przy nacisku 100 mN wynikają z większej twardości multiwarstwy TiAlN/TiN w porównaniu z iAlN/CrN.

**Tabela 2. Twardość i wskaźnik zużycia płytek**

Table 2. Hardness and wear index of tested tools

Płytki WC-Co		Twardość $H_{IT50/30/5/30}$ [GPa]	Twardość $H_{IT100/30/5/30}$ [GPa]	Moduł sprężystości $E_{IT50/30/5/30}$ [GPa]	Moduł sprężystości $E_{IT100/30/5/30}$ [GPa]	Wskaźnik zużycia objętościowego $W_v$ [ $\times 10^{-9}$ mm <sup>3</sup> /Nm]
Podłoże WC-Co	Bez powłoki	16,3±1,7	15,8±0,8	414±16	415±14	20,4±1,7
	Powłoka TiAlSiN	26,9±2,8	20,8±0,5	502±28	443±17	9,7±3
	Powłoka TiAlN/TiN	36,3±2,4	19,9±0,4	549±29	427±23	11,9±2,6
	Powłoka TiAlN/CrN	32,3±1,5	18,3±0,6	515±16	345±14	18,8±1,5

Moduły sprężystości multiwarstw także są wyższe od płytki bez powłoki, ale wzrost tego parametru nie jest tak duży, jak dla twardości, co jest pozytywnym efektem wynikającym ze specyficznej budowy multiwarstw. Powłoki takie nie podnoszą w znaczny sposób sztywności systemu powłoka–podłoże, dzięki czemu nie prowadzą do dużej koncentracji naprężeń w płaszczyźnie połączenia powodujących pękanie i delaminację powłok.

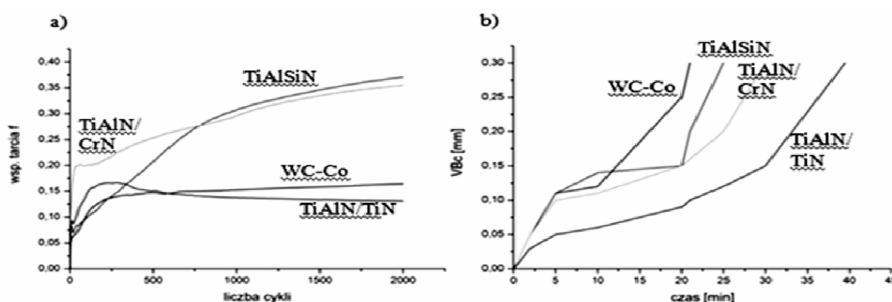
W celu zmierzenia przyczepności warstwy do podłoża wykonano testy zarysowania, stosując diament Rockwella C o promieniu zaokrąglenia

200  $\mu\text{m}$ . Dla żadnej z powłok nie zaobserwowano pęknięć powłoki, a tym bardziej delaminacji nawet po osiągnięciu maksymalnego obciążenia 30 N. Badania odporności warstw na zużycie przeprowadzono, wykorzystując tribometr typu kula-tarcza. Stosowano kule z  $\text{Si}_3\text{N}_4$  o średnicy 1 mm, nacisku  $F_N = 10$  N, promieniu tarcia 5 mm, prędkości liniowej 0,03 m/s i liczby cykli 2000. Wskaźnik zużycia  $W_v = V/(F_N \cdot s)$  wyznaczono na podstawie pomiaru profilu poprzecznego ścieżki zużycia, a wartości tego parametru zestawiono w **Tabeli 2**.

Na **Rysunku 4a** przedstawiono przebieg wartości współczynnika tarcia dla wszystkich płytek w całym zakresie testu 2000 cykli. Jednoznacznie widać, że najniższym współczynnikiem tarcia 0,12-0,14 przy współpracy z kulą  $\text{Si}_3\text{N}_4$  charakteryzuje się powłoka TiAlN/TiN. Dla powłok TiAlN/CrN i TiAlSiN wartość współczynnika tarcia stale rosła, aż do wartości 0,35 na końcu testu. Zmierzone profile wytarcia wykazały, że największą odpornością na zużycie charakteryzują się powłoki TiAlSiN oraz TiAlN/TiN (**Tabela 2**). Powłoka z chromem ulegała dwukrotnie większemu zużyciu, porównywalnemu z płytką bez powłoki. Testy indentacyjne, zarysowania oraz tribologiczne przeprowadzono w Laboratorium Tribologii i Inżynierii Powierzchni AGH.

#### **BADANIA ZUŻYCIA OSTRZY SKRAWAJĄCYCH W TRAKCIE TOCZENIA WZDŁUŻNEGO**

Badania trwałości ostrzy skrawających przeprowadzono przez toczenie wzdłużne stali narzędziowej NC6, w stanie ulepszonym cieplnie do twardości 50 HRC $\pm$ 2, na tokarce TZC 32N. Toczone wałki o średnicy  $\varnothing 85$  mm i długości 550 mm. Stosowano parametry skrawania: prędkość skrawania  $V_c = 120$  m/min, szerokość warstwy skrawanej  $a_p = 0,5$  mm, posuw  $f = 0,07$  mm/obr. Kryterium zużycia narzędzia była szerokość pasma zużycia ściernego na powierzchni przyłożenia o wartości  $VB_c = 0,3$  mm. Płytki badano co 2 minuty do momentu wystąpienia starcia równego kryterium zużycia lub do momentu wykruszenia się krawędzi skrawającej. Na **Rysunku 4b** przedstawiono zmiany szerokości wytarcia dla poszczególnych ostrzy w czasie. Wykres ten jest przykładowym wykresem dla jednej serii. Wartości średnie z serii pięciu pomiarów zamieszczono w **Tabeli 3**. Policzone także, jaki jest wzrost trwałości płytki po naniesieniu powłoki w stosunku do płytki bez powłoki.



Rys. 4. a) Przebieg współczynnika tarcia, b) szerokość wytarcia

Fig. 4. a) Evolution of coefficient of friction, b) scar width

Dla ostrzy z powłoką TiAlSiN obserwowano zwiększone zużycie po 15 minutach toczenia. Po upływie tego czasu powstawały w trakcie pracy wykruszenia na krawędzi ostrza, co prowadziło do jego szybkiego niszczenia. Ostrze z powłoką TiAlN/CrN lepiej znosiło trudne warunki skrawania i po przekroczeniu granicznej szerokości wytarcia średnio po 24 min obserwowano bardzo niewielkie wykruszenia na krawędzi ostrza. Badania eksploatacyjne wykazały, że najbardziej odporna na zużycie podczas toczenia jest płytką z powłoką TiAlN/TiN, która poprawiła trwałość ostrzy skrawających ponad 3-krotnie w stosunku do płytki bez powłoki. Dla płytki z tą multiwarstwą występowało tylko zużycie ściernie, a stabilna krawędź skrawająca zapewniała do samego końca pracy ostrza wysoką jakość powierzchni obrabianej.

Tabela 3. Trwałość i charakter zużycia badanych narzędzi

Table 3. Tools life and character of wear

Płytką WC-Co	Trwałości ostrza t [min]	Charakter niszczenia	Wskaźnik wzrostu trwałości ostrza
Bez powłoki	17,1±7,8	Starcie ostrza, wykruszenia	x
Powłoka TiAlSiN	14,7±7,5	Starcie ostrza, wykruszenia	0,86
Powłoka TiAlN/TiN	53,1±11,8	Starcie ostrza,	3,1
Powłoka TiAlN/CrN	23,8±8,9	Starcie ostrza, niewielkie wykruszenia	1,4

## PODSUMOWANIE

Powłoki wielowarstwowe są nową grupą powłok na narzędzia skrawające pracujące przy obróbce HSM, przy dużych obciążeniach cieplno-mechanicznych, braku lub bardzo niewielkich ilościach cieczy chłodzących. Wy-



tworzone metodą łukowo-plazmową powłoki TiAlN/TiN i TiAlN/CrN charakteryzowały się wysoką twardością – odpowiednio 36 i 32 GPa. Wyniki testu zarysowania wskazują na bardzo dobrą wytrzymałość i przyczepność do podłoża obydwu powłok wielowarstwowych. Badania trwałości ostrzy skrawających przez toczenie wzdłużne wykazały, że proponowane multiwarstwy w znaczący sposób podnoszą trwałość ostrzy w stosunku do ostrza WC-Co bez powłoki. Wzrost trwałości był ponad 3- i 1,4-krotny odpowiednio dla powłoki TiAlN/TiN i TiAlN/CrN. Trwałość ich jest także wyższa od trwałości ostrza z powłoką TiAlSiN, dostępnego na rynku, które jest proponowane do obróbki utwardzonych stali.

*Autorzy wyrażają podziękowania Panom mgr. inż. Januszowi Wszółkowi, mgr. inż. Pawłowi Pelczarowi – pracownikom Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie za przeprowadzenie testów eksploatacyjnych.*

## LITERATURA

1. Andrae P.: High-Efficiency Machining. Manufacturing Eng., vol. 4 (2000) 82–96.
2. Weinert K. i in.: Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. CIRP Annals, vol. 53 (2004) 511–537.
3. Ohnuma H. i inni: Effect of aluminum concentration on friction and wear properties of titanium aluminum nitride films. Surface and Coatings Technology, vol. 177 (2004) 623–626.
4. Samir K. Khrais, Y.J. Lin: Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel. Wear vol. 262 (2007) 64–69.
5. Derflinger V.H. i inni: Mechanical and structural properties of various alloyed TiAlN – based hard coatings. Surface and Coatings Technology, vol. 200 (2006) 4693–4700.
6. Chang Y-Y.: Structural and mechanical properties of nanolayered TiAlN/CrN coatings synthesized by a cathodic arc deposition process. Surface and Coatings Technology, vol. 200 (2005) 1702–1708.
7. Ducros C., Sanchette F.: Multilayered and nanolayered hard nitride thin films deposited by cathodic arc evaporation. Part 2: Mechanical properties and cutting performances. Surface and Coatings Technology, vol. 201 (2006) 1045–1052.

**Recenzent:**  
**Tadeusz BURAKOWSKI**

### Summary

Cutting tools for High Speed Machining (HSM) work under high stress and in high temperature. Additional machining processes are lead without cutting fluids that cause significant wear on the tool rake face. These high mechanical and thermal loads demand cutting tools with new kinds of coatings like ceramic/ceramic multilayers. Tested ceramic multilayers, TiAlN/TiN and TiAlN/CrN, have been deposited using cathodic arc plasma evaporation on WC-Co inserts. Commerce tools with a TiAlSiN coating and WC-Co without coating were tested for comparison with proposed new materials. TiAlN/TiN and TiAlN/CrN coatings have a hardness of 36 and 32 GPa, respectively. Low mismatch of lattice parameters especially for TiN and TiAlN can cause strengthening of the TiAlN/TiN multilayer, giving high hardness and wear resistance. Scratch tests confirm the very good multilayer coatings-substrates adhesion. Cutting test were done by the turning of quenched NC6 tool steel. Both multilayers TiAlN/TiN and TiAlN/CrN give rise of tool life over 3 and 1.4 times, respectively, in comparison with uncoated inserts. The durability of tools with multilayers is higher than commercial tool with TiAlSiN. Presented results show the high potential of multilayers as a new kind of coating for HSM of hardened steels.