



Nanostrukturalne powłoki wielowarstwowe na ostrza narzędzi z węglików spiekanych i ze stali szybko tnących

Nanostructured multilayer coatings on cemented carbide and high speed steel cutting tools

KAZIMIERZ CZECHOWSKI
DANIEL TOBOŁA
IWONA WRONSKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.3.26>

Przedstawiono zagadnienie nanoszenia powłok przeciwozrywcowych na ostrza narzędzi skrawających z węglików spiekanych i ze stali szybko tnących, ze szczególnym uwzględnieniem nowych możliwości w tym zakresie. Na podstawie wybranych wyników prowadzonych w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania badań nad opracowaniem powłok wielowarstwowych nanostrukturalnych i nadstrukturalnych, nanoszonych metodą łukową PVD, pokazano, że wytworzone powłoki mogą się przyczynić do wzrostu trwałości narzędzi. **SŁOWA KLUCZOWE:** powłoki, metoda łukowo-plazmowa PVD, narzędzia, trwałość ostrzy, węgliki spiekane, stal szybko tnąca

The state of the art of deposition of wear resistant coatings on cemented carbide and high speed steel cutting tools is presented with special regard to new possibilities in this field. On the ground of some results of research carried out at the Institute of Advanced Manufacturing Technology on the PVD arc multilayer nanostructured and superlattice coatings development was shown that the obtained coatings can contribute to the tool lives increase.

KEYWORDS: coatings, arc plasma PVD method, tools, tool life, carbide, high speed steel

Nanoszenie powłok na części robocze narzędzi stanowi obecnie bardzo ważną i dynamicznie rozwijającą się dziedzinę inżynierii powierzchni. Powłoki stosowane na częściach roboczych narzędzi w praktyce przemysłowej są nanoszone zazwyczaj metodami CVD i PVD. Starsza jest metoda CVD (*chemical vapor deposition*), która polega na reakcji chemicznej gazowych składników atmosfery, prowadzącej do wytworzenia cienkiej twardej warstwy na powierzchni narzędzia. Tradycyjnie proces ten odbywa się w temperaturze 900÷1100°C, co ogranicza jego stosowanie. Właśnie dlatego prowadzono prace mające na celu obniżenie temperatury procesu osadzania powłoki do wartości poniżej 600°C, m.in. przez aktywację elektryczną gazowych reagentów (PACVD/PECVD – *plasma assisted/plasma enhanced CVD*). Metoda PVD (*physical vapor deposition*) polega natomiast na nanoszeniu cienkich warstw przez ich fizyczne osadzanie z fazy gazowej. Proces odbywa się przy znacznie obniżonym ciśnieniu (rzędu 0,1÷1 Pa) i w temperaturze 300÷700°C. Odmiany metody PVD różnią

się w prostszych rozwiązaniach sposobem doprowadzenia ciepła (np. przez nagrzewanie oporowe, indukcyjne i laserowe albo bombardowanie wiązką elektronów) potrzebnego do odparowania osadzanego materiału, a w bardziej złożonych przypadkach – sposobem otrzymywania fazy gazowej zjonizowanej, tzw. plazmy. W metodach PVD plazma może być uzyskana m.in. przez termiczne odparowywanie (metoda nanoszenia jonowego – *ion plating*), odparowanie metalu i jonizowanie jego par przez katodowy łuk w miejscu ich powstawania (metoda łukowa – *arc deposition*), wybijanie z katody cząstek osadzanego materiału wskutek bombardowania jonami o dużej energii (metoda rozpylania jonowego – *sputter deposition*, np. w wyniku wytworzenia odpowiednio ukształtowanego pola magnetycznego w metodzie magnetronowej – *magnetron sputtering*). We współczesnych urządzeniach do nanoszenia powłok wykorzystuje się różne konfiguracje metod PVD [1–5].

W Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (IZTW) stosuje się łukową metodę PVD. Plazma tworzy się w wyniku odparowania metalu i jonizowania jego par przez katodowy łuk w miejscu ich powstawania, dlatego ma duży stopień jonizacji (ok. 90%). Anodę stanowią ściany komory próżniowej. Ukierunkowanie i zwiększenie energii kinetycznej jonów następuje przez polaryzację ujemnym napięciem podłoża, na które nanoszona jest powłoka. Wysokoenergetyczne jony wytwarzane w procesie łukowo-katodowym pozwalają na uzyskanie powłok o większej gęstości, w relatywnie niższej temperaturze nanoszenia w porównaniu z innymi procesami PVD [4, 5].

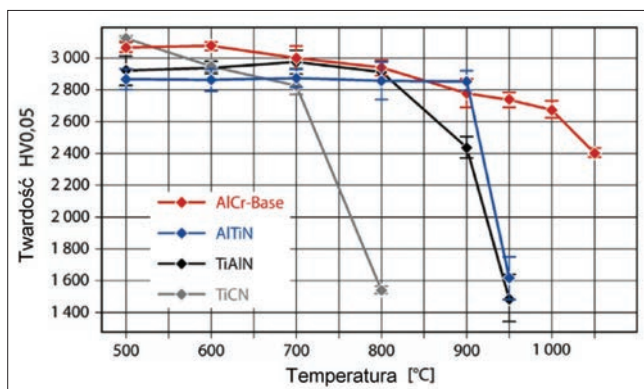
Powłoki nanoszone na ostrza narzędzi mogą się składać z azotków, węglików, węglikoazotków i tlenków i mieć budowę jednowarstwową (monolityczną, kompozytową, gradientową) lub wielowarstwową (w postaci mikrowarstw, nanowarstw, nadstruktur). Wielowarstwowość powłoki zapewnia uzyskanie korzystniejszego rozkładu naprężeń i lepszej odporności na pękanie, gdyż energia pęknięcia jest rozpraszana przez jego odchylenie i rozgałęzienia [1–5].

W powłokach wielowarstwowych możliwe jest tworzenie – w skali mikro – warstw funkcjonalnych. Przykładami takich warstw funkcjonalnych mogą być: metaliczna warstwa adhezyjna (np. Ti, Cr, Mo) o grubości rzędu 0,1÷0,3 μm (nanoszona na podłożu), podstawowa warstwa o wysokiej twardości i możliwie niskim poziomie naprężeń (np. TiN, CrN, ZrN, TiCN) o grubości 1÷2 μm, warstwa blokująca przepływ ciepła (np. TiAlN, TiZrN) o grubości 1÷2 μm,

* Dr inż. Kazimierz Czechowski (kazimierz.czechowski@ios.krakow.pl), dr inż. Daniel Toboła (daniel.tobola@ios.krakow.pl), mgr inż. Iwona Wronska (iwona.wronska@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

warstwa o niskim współczynniku tarcia (np. Cr, TiN, CrN, TiCrN) o grubości $0,5\pm 1 \mu\text{m}$ (jako ostatnia z nanoszonych warstw) [6]. Konfiguracje warstw nanoszonych na warstwę adhezyjną zależą od przeznaczenia powłoki. Z kolei wielowarstwowość powłoki w skali nano zapewnia narzędziom m.in.: optymalny stosunek twardości do naprężeń własnych (decydujący o dużej stabilności geometrii narzędzi i ich równomiernym zużyciu), wyższą odporność termiczną i chemiczną (umożliwiającą obróbkę na sucho z większymi prędkościami skrawania i gwarantującą mniejsze zużycie żłobkowe), lepsze właściwości ślizgowe (wpływające na lepsze formowanie się wióra i wyższą jakość obrobionej powierzchni), większą odporność na zużycie (i tym samym niższe koszty narzędziowe) [7].

Analiza wymagań dotyczących właściwości funkcjonalnych powłok, zwłaszcza tych stosowanych na ostrza narzędzi pracujących w trudnych warunkach (np. w obróbce szybkościowej na sucho), wykazała, że bardzo ważna jest twardość powłoki i jej stabilność termiczna (ze względu na wysoką temperaturę ostrzy podczas skrawania). Zróżnicowanie odporności stabilnej powłok przedstawiono na rys. 1. Jak widać, powłoka TiCN, osiągająca najwyższą twardość bezpośrednio po naniesieniu, szybko ją traci wraz ze wzrostem temperatury (zwłaszcza po osiągnięciu 700°C), podczas gdy twardość pozostałych powłok gwałtownie spada w znacznie wyższej temperaturze. Wyjątkowo wysoką odporność termiczną wykazuje powłoka azotkowa na bazie stopu AlCr [8].



Rys. 1. Wpływ temperatury na twardość różnych rodzajów powłok nanoszonych metodami PVD [8]

Przykłady nowoczesnych powłok nanoszonych metodami PVD

Nowoczesne powłoki przeznaczone na ostrza narzędzi oferuje na świecie wiele firm (m.in. Oerlikon Balzers, Ionbond, Platin, CemeCon, Hauzer Techno Coating, SHM), a w wielu ośrodkach naukowo-badawczych prowadzi się prace nad ulepszeniem powłok, nierzadko do konkretnych zastosowań. Powłoki nanoszone metodami PVD coraz częściej są powłokami wielowarstwowymi, w tym nanostrukturalnymi – obecnie wykonuje się je na skalę przemysłową (ich przykłady podano w tabl. I), lecz nadal są przedmiotem prac badawczych i rozwojowych.

W opinii Geya z firmy Kennametal [9] rozwój powłok nanoszonych metodą PVD będzie polegał głównie na dalszym doskonaleniu powłok na bazie azotków TiAlN oraz AlCrN, m.in. przez: wprowadzenie do ich składu wanadu i wolframu – w celu poprawy właściwości smarnych powłok (dzięki tworzeniu tlenkowych faz Magnéli), adaptację i łączenie ich z warstwami azotko-tlenków (np. AlCrON), tworzenie powłok na bazie stopów o wysokiej entropii (HEA – *high entropy alloy coatings*), projektowanie powłok o określonej mikrostrukturze i określonym składzie fazowym oraz stosowanie nowoczesnych technik nanoszenia metodą impulsowego napyłania magnetronowego wysokiej mocy (HiPIMS – *high power impulse magnetron sputtering*).

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu nowości w zakresie powłok nanoszonych metodą PVD można stwierdzić, że dynamiczny rozwój narzędzi skrawających dotyczy również powlekania PVD metodą katodowo-łukową [9, 10]. Przykłady powłok wielowarstwowymi nanoszonych metodami PVD, opracowanych i rozwijanych w ostatnim czasie na świecie, przedstawiono w tabl. II [11–16].

Przedmiotem prac rozwojowych na świecie, a także w IZTW, są powłoki wielowarstwowe nanostrukturalne, często nadstrukturalne (*superlattice* – SL), złożone zazwyczaj z warstw azotków, a niekiedy z tlenkoazotków. Te powłoki na ostrzach narzędzi wykonuje się głównie metodą łuku katodowego, czasem z udziałem metody HiPIMS, która jest używana głównie do nanoszenia zewnętrznych warstw powłok (ze względu na uzyskiwaną mniejszą chropowatość powierzchni).

TABLICA I. Przykłady stosowanych w przemyśle powłok wielowarstwowymi na ostrza narzędzi [1]

Typ powłoki (najczęstsza metoda nanoszenia)	AlCrN (PVD)	TiAlN (PVD)	TiAlN + WC/C (PVD)
Budowa powłoki	Wielowarstwowa	Nanowarstwowa	Wielowarstwowa
Twardość HV0,05 (współczynnik tarcia na sucho o stal)	3200 (0,3)	3300 (0,3÷0,35)	3000 (0,15÷0,2)
Maksymalna temperatura pracy, °C	1100	900	800
Zalety	Wysoka odporność na utlenianie i wysoka twardość na gorąco	Wysoka twardość na gorąco i wysoka odporność na utlenianie	Wysoka twardość i duża odporność na działanie podwyższonej temperatury oraz korzystne właściwości smarne i ślizgowe
Przykładowe zastosowanie powłoki na ostrza narzędzi do obróbki wiórowej	Narzędzia ze stali szybko tnących i z węglików spiekanych do wiercenia lub rozwiercania stali (w tym nierdzewnej), żeliwa, stopów aluminium i tytanu, brązu, mosiądzu i miedzi	Narzędzia ze stali szybko tnących i z węglików spiekanych do toczenia, frezowania, wiercenia i gwintowania stali węglowych i stopowych o twardości do 52 HRC, stali nierdzewnych, żeliwa, stopów niklu, tytanu i aluminium, mosiądzu, brązu i miedzi. Narzędzia do obróbki kół zębatach ze stali o twardości do 52 HRC (w tym nierdzewnych), żeliwa, mosiądzu i brązu	Narzędzia z węglików spiekanych do toczenia aluminium i jego stopów, mosiądzu, miedzi i brązu. Narzędzia ze stali szybko tnących do frezowania i gwintowania stopów aluminium, mosiądzu i brązu. Tę powłokę można stosować w obróbce kół zębatach z mosiądzu i brązu

TABLICA II. Przykłady opracowanych i rozwijanych nowych powłok wielowarstwowych nanoszonych metodami PVD

Powłoka	Typ powłoki	Główne zalety	Literatura: rok [poz.]
AlTiN/VZrN	Wielowarstwowa nanostrukturalna	Powłoki o wysokiej twardości, odporności cieplnej, adhezji i odporności na zużycie, nanoszone metodą łukową i hybrydową (łukową z HiPIMS)	2018 [11]
TiVN/TiSiN	Wielowarstwowa w skali nano	Powłoki nanoszone metodą łukową na węgliki spiekane; charakteryzują się wysoką twardością (35÷37 GPa) i odpornością na zużycie w procesie frezowania	2018 [12]
AlCrTiN/CrN	Wielowarstwowa w skali nano, kompozytowa z klasterami Ni	Powłoki nanoszone metodą łukową o strukturze zmniejszającej naprężenia i podwyższającej odporność na pękanie	2018 [13]
CrAlN/VN	Wielowarstwowa nanostrukturalna	Powłoki nanoszone magnetronową metodą PVD, charakteryzujące się twardością 20÷32 GPa, wysoką odpornością na zużycie, niskim współczynnikiem tarcia i właściwościami samosmarnymi	2017 [14]
CrN/Cr i TiN/SiO _x	Wielowarstwowa w skali mikro i nano	Powłoki nanoszone metodą magnetronową, w których warstwy SiO _x mają grubość 35 nm, a warstwy TiN – od 115 do 350 nm; powodują wzrost odporności na pękanie (ciągliwości) z 3,6 do 5 MPa·m ^{1/2}	2016 [15]
AlN/CrN	Wielowarstwowa nadstrukturalna	Powłoki o dużej sztywności (module Younga ponad 400 GPa)	2015 [16]

Wybrane przykłady nowoczesnych powłok wielowarstwowych opracowanych w IZTW

W IZTW do wykonania powłok wykorzystano urządzenie NNW-6.6 do nanoszenia warstw łukową metodą PVD. W trakcie procesów nanoszenia powłok narzędzia i próbki obracały się w oprzyrządowaniu umieszczonym na stole obrotowym w gniazdach planetarnych, przez co ich obrót był znacznie szybszy od nastawionej prędkości obrotowej stołu. Dzięki zastosowaniu takiego układu kinematycznego i odpowiedniego oprzyrządowania technologicznego w krótkich odstępach czasu następowało cykliczne przesłanianie powlekanych powierzchni względem katod. To pozwoliło na uzyskanie na powlekanych powierzchniach supercienkich warstw (o grubości rzędu kilku nanometrów).

Przykładami nowoczesnych powłok nanostrukturalnych, opracowanych i wytworzonych w IZTW, są powłoki wielowarstwowe na bazie naprzemiennych cienkich i supercienkich warstw azotków TiN i ZrN.

Wielowarstwowa powłoka **TiN/6×(ZrN/TiN)/Ti-Zr-N** (rys. 2) miała następującą budowę (kolejność warstw od podłoża):

- nanowarstwa Ti o grubości do ok. 50 nm, poprawiająca adhezję powłoki do podłoża,
- mikrowarstwa TiN o grubości do 1 μm, stanowiąca warstwę pośrednią między Ti a układem warstw nanoszonych naprzemiennie TiN i ZrN, charakteryzująca się dobrą adhezją do metalicznego podłoża,
- po sześć cienkich naprzemiennych warstw ZrN (każda o grubości ok. 250÷300 nm) oraz TiN (każda o grubości ok. 200÷250 nm), poprawiających odporność powłoki na pękanie,
- wielowarstwa Ti-Zr-N o łącznej grubości ok. 2 μm, składająca się z bardzo wielu supercienkich, naprzemiennych warstw TiN i ZrN (każda o grubości rzędu 6÷7 nm; grubość określono na podstawie kinematyki i warunków realizacji procesu PVD – jest ona na tyle mała, że poszczególne warstwy nie są widoczne na obrazach przełomów uzyskanych za pomocą mikroskopu skaningowego), stanowiąca materiał bardzo twardy i odporny na zużycie.

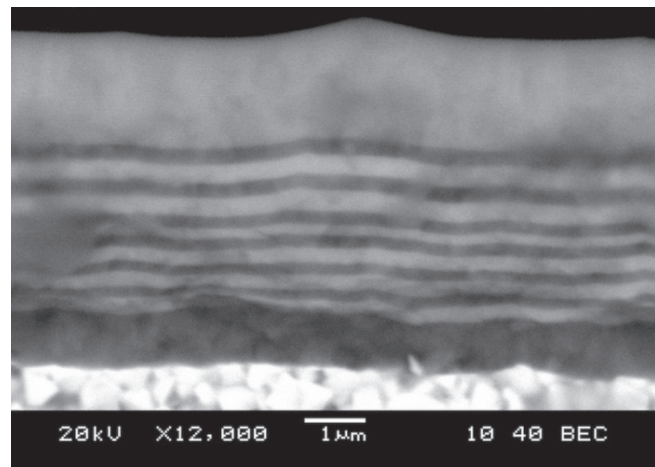
Kolejność warstw (licząc od podłoża) w powłoce **Ti-Zr-N/10×(TiN/ZrN)** była następująca (rys. 3):

- nanowarstwa Ti o grubości do ok. 50 nm, poprawiająca adhezję powłoki do podłoża,
- wielowarstwa Ti-Zr-N o łącznej grubości ok. 2 μm, składająca się z bardzo wielu supercienkich naprzemiennych warstw TiN i ZrN (każda o grubości rzędu 6÷7 nm, określonej na podstawie kinematyki i warunków realizacji procesu PVD, na tyle małej, że niewidocznej na obrazach

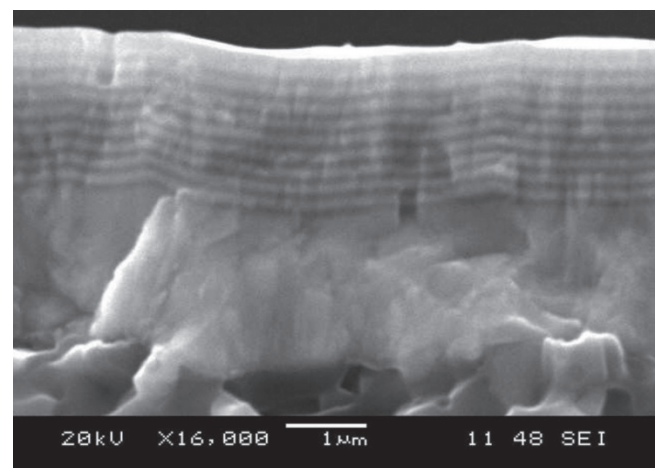
przełomów uzyskanych za pomocą mikroskopu skaningowego), stanowiąca materiał bardzo twardy i odporny na zużycie,

- po 10 cienkich naprzemiennych warstw TiN i ZrN (każda o grubości 80÷120 nm), poprawiających odporność powłoki na pękanie.

Naniesione powłoki badano, obserwując pod skaningowym mikroskopem elektronowym typu JSM 6460LV firmy Jeol przełomy poprzeczne oraz zgłady metalograficzne poprzeczne i skośne niskokątowe (5÷6°). Za pomocą tego



Rys. 2. Obraz przełomu powłoki TiN/6×(ZrN/TiN)/Ti-Zr-N uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego przy powiększeniu 12 000×, BEC



Rys. 3. Obraz przełomu powłoki Ti-Zr-N/10×(TiN/ZrN) uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego przy powiększeniu 12 000×, BEC

mikroskopu na przelomach określano grubości powłok wielowarstwowych oraz wchodzących w ich skład mikro- i nanowarstw. Twardość powłok i podłoża określano na zglądach metalograficznych skośnych metodą Vickersa (przy obciążeniu 0,2452 N) za pomocą cyfrowego miernika mikrotwardości typu FM-7 firmy Future-Tech Corp. Analizę składu fazowego, przedstawioną na rys. 4 dla powłoki $\text{TiN}/6 \times (\text{ZrN}/\text{TiN})/\text{Ti-Zr-N}$, wykonano z zastosowaniem dyfraktometru rentgenowskiego PANalytical Empyrean (lampa $\text{Cu K}\alpha_1 = 1,5417 \text{ \AA}$, $U = 40 \text{ kV}$, $I = 30 \text{ mA}$) oraz programu PANalytical High Score Plus, zintegrowanego z bazą danych krystalograficznych ICDD PDF4+ 2018. Pomiary chropowatości powierzchni z powłokami $\text{TiN}/6 \times (\text{ZrN}/\text{TiN})/\text{Ti-Zr-N}$ i $\text{Ti-Zr-N}/10 \times (\text{TiN}/\text{ZrN})$ oraz powierzchni obrobionych frezami z powłoką $\text{TiN}/6 \times (\text{ZrN}/\text{TiN})/\text{Ti-Zr-N}$ oraz powłoką handlową wykonywano profilometrem Hommel Tester T1000. Skrawność ostrzy frezów z powłoką $\text{TiN}/6 \times (\text{ZrN}/\text{TiN})/\text{Ti-Zr-N}$ i z powłoką handlową określano w obróbce stosowanej na matryce stali Toolox 44, prowadzonej na centrum frezarskim CNC typu DMC 75 V Linear firmy DMG MORI.

Powłokę $\text{TiN}/6 \times (\text{ZrN}/\text{TiN})/\text{Ti-Zr-N}$ naniesiono m.in. na podłoże z węgla spiekane – na frezy trzpieniowe czterostrzowe o średnicy $\varnothing 8 \text{ mm}$. Całkowita grubość powłoki, określona na podstawie obserwacji na przelomie (za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego) struktury warstwy wierzchniej z powłoką, wynosiła ok. 6 \mu m . Grubość powłoki $\text{Ti-Zr-N}/10 \times (\text{ZrN}/\text{TiN})$ wynosiła natomiast ok. 4 \mu m .

Badania dyfraktometryczne wykazały obecność dwóch faz azotkowych TiN i ZrN w powłoce $\text{TiN}/6 \times (\text{ZrN}/\text{TiN})/\text{Ti-Zr-N}$. Na dyfraktogramie (rys. 4) można ponadto zaobserwować piki intensywności pochodzące od podłoża (węgla WC).

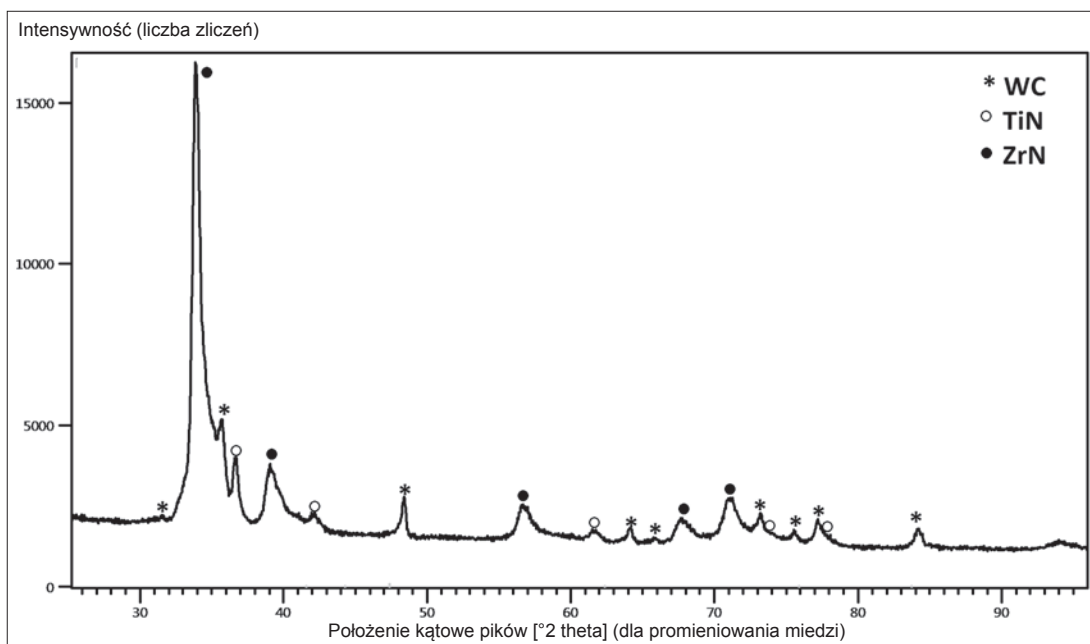
W strukturze powłoki występowały naprzemiennie cienkie i supercienkie warstwy azotków TiN i ZrN. Azotki tworzące wielowarstwę, złożoną z bardzo wielu bardzo cienkich naprzemiennych warstw TiN i ZrN (o grubości rzędu kilku nanometrów), krystalizują w układzie regularnym sześciennym (typu B1) i odznaczają się zbliżonymi parametrami sieci – odpowiednio $0,432 \text{ nm}$ ($4,32 \text{ \AA}$) i $0,456 \text{ nm}$ ($4,56 \text{ \AA}$). Tego typu struktury o zbliżonych parametrach sieci, występujące naprzemiennie w bardzo cienkich warstwach (rzędu nanometrów), mogą tworzyć nadstruktury,

powodujące wyraźny wzrost twardości w stosunku do twardości azotków warstw składowych.

Badania prowadzone w IZTW nad nanoszeniem tego rodzaju struktur wielowarstwowych Ti-Zr-N na podłoża z węgla spiekane i ze stali szybko tnącej potwierdziły bardzo wysoką twardość tych powłok, wynoszącą $3500 \div 3800 \text{ HV}_{0,025}$ (pomiar na zglądach skośnych). Bardzo wysoka twardość powłok zawierających naprzemiennie ułożone supercienkie warstwy azotków ZrN i TiN oraz obserwacje ich struktury pod dużym powiększeniem na zglądach skośnych wskazują, że otrzymane powłoki są nadstrukturalne. Jednoznaczne określenie, czy w danej wielowarstwie powłoki występuje nadstruktura, wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań za pomocą transmisyjnego mikroskopu elektronowego.

Średnia wartość parametru R_a chropowatości powierzchni powłoki wielowarstwowej $\text{TiN}/6 \times (\text{ZrN}/\text{TiN})/\text{Ti-Zr-N}$ wyniosła (na podstawie czterech pomiarów) $0,27 \text{ \mu m}$ (odchylenie standardowe $0,08 \text{ \mu m}$), a powłoki wielowarstwowej $\text{Ti-Zr-N}/10 \times (\text{TiN}/\text{ZrN})$ (dla stu pomiarów) – $0,37 \text{ \mu m}$ (odchylenie standardowe $0,05 \text{ \mu m}$). Większa wartość parametru R_a dla jednej z powłok może wynikać z większej chropowatości wyjściowej podłoża oraz większej ilości mikrokropki występujących w metodzie łukowej przy nanoszeniu – jako zewnętrznej warstwy – azotku ZrN.

Skrawność ostrzy z powłoką $\text{TiN}/6 \times (\text{ZrN}/\text{TiN})/\text{Ti-Zr-N}$, naniesioną na frezy trzpieniowe czterostrzowe o średnicy $\varnothing 8 \text{ mm}$ z węgla spiekane (w tym przypadku frezy firmy WNT typu 52 181 080), testowano w badaniach skrawania powierzchni płaskiej o wymiarach $53 \times 250 \text{ mm}$. Aby zbliżyć się do rzeczywistych warunków obróbki, na powierzchni płaskiej wykonywano prostokątną kieszeń o grubości ścianki 3 mm i promieniu zaokrąglenia naroży $R = 16 \text{ mm}$. Obrabianym materiałem była stal Toolox 44 o twardości $44 \div 45 \text{ HRC}$. W badaniach stosowano frezowanie współbieżne z cieczą obróbkową w postaci ośmioprocentowej emulsji olejowej (olej Hysol R), prędkość skrawania $v_c = 100 \text{ m/min}$, posuw na ostrze $f_z = 0,015 \text{ mm/ostre}$, głębokość skrawania $a_p = 0,5 \text{ mm}$, zagłębienie po linii śrubowej z posuwem wgłębny o wartości $25\% f_z$ oraz współczynnik nakładania torów $0,5$ (szerokość frezowania $a_e = 2 \text{ mm}$). Jako kryterium stępienia frezu przyjęto przekroczenie wartości starcia $VB_{\max} = 0,30 \text{ mm}$.



Rys. 4. Zapis dyfraktometryczny składu fazowego powłoki $\text{TiN}/6 \times (\text{ZrN}/\text{TiN})/\text{Ti-Zr-N}$ na podłożu węglowym

TABLICA III. Wartości starcia VB_{max} po różnym czasie frezowania stali Toolox 44 za pomocą frezów trzpieniowych (badanego i porównywanego)

Frez z powłoką	Parametr	Wartość starcia VB_{max} [mm] po czasie frezowania t [min]		
		$t = 44$	$t = 66$	$t = 88$
Ti1000 (handlowy)	średnia	0,21	0,28	0,32
	odchylenie standardowe	0,02	0,01	0,02
TiN/6×(ZrN/TiN)/Ti-Zr-N (IZTW)	średnia	0,17	0,23	0,29
	odchylenie standardowe	0,02	0,02	0,02

TABLICA IV. Wartości parametru chropowatości Ra powierzchni obrabianej po różnym czasie frezowania stali Toolox 44 za pomocą frezów trzpieniowych (badanego i porównywanego)

Frez z powłoką	Parametr	Parametr chropowatości Ra obrabianej powierzchni [μ m] po czasie frezowania t [min]			
		$t = 22$	$t = 44$	$t = 66$	$t = 88$
Ti1000 (handlowy)	średnia	0,37	0,32	0,17	0,17
	odchylenie standardowe	0,08	0,18	0,05	0,04
TiN/6×(ZrN/TiN)/Ti-Zr-N (IZTW)	średnia	0,25	0,18	0,10	0,19
	odchylenie standardowe	0,19	0,08	0,04	0,03

Obróbkę prowadzono na centrum frezarskim CNC typu DMC 75 V Linear firmy DMG MORI. Frez z naniesioną w IZTW powłoką porównywano z frezem trzpieniowym firmy WNT typu 52 183 080, o podobnej geometrii i z powłoką handlową typu Ti1000 o twardości 3500 HV_{0,05}. W tabl. III przedstawiono wartości średnie starcia VB_{max} na powierzchni przyłożenia ostrzy frezów po różnym czasie skrawania (liczność $i = 4$), wynikającym z wielokrotności czasu frezowania kieszeni. Mierzono również parametr Ra chropowatości powierzchni obrabianej tymi frezami – wyniki zamieszczono w tabl. IV.

Na podstawie badań skrawności ostrzy frezów z powłokami stwierdzono, że po czasie skrawania $t = 88$ min średnia wartość starcia dla ostrzy z powłoką handlową wyniosła $VB_{max} = 0,32$ mm, a więc przekroczyła przyjęte kryterium stępienia $VB_{max} = 0,3$ mm, natomiast dla ostrzy z powłoką TiN/6×(ZrN/TiN)/Ti-Zr-N – $VB_{max} = 0,29$ mm. Te różnice nie są duże, aczkolwiek przemawiają na korzyść frezów z powłoką wytworzoną w IZTW. Po sprawdzeniu hipotezy o równości wartości średnich za pomocą testu istotności t-Studenta otrzymano wartość testu 2,121, czyli mniejszą od wartości krytycznej 2,447 przy poziomie istotności 0,05 oraz większą od wartości krytycznej 1,943 przy poziomie istotności 0,10.

W zakresie czasu frezowania do 66 min mniejszą chropowatość powierzchni, określoną za pomocą parametru Ra , uzyskiwano po obróbce frezami z powłokami TiN/6×(ZrN/TiN)/Ti-Zr-N w porównaniu z obróbką frezami handlowymi. Po czasie frezowania przekraczającym 88 min wartości parametru Ra były już zbliżone.

Podsumowanie

Zastosowane w budowie powłok wielowarstwowe, złożone z bardzo wielu supercienkich, naprzemiennie ułożonych warstw TiN i ZrN (o grubości rzędu kilku nanometrów każda), są bardzo twarde i odporne na zużycie. Grubość supercienkich warstw, określona na podstawie kinematyki i warunków realizacji procesu PVD, jest na tyle mała, że te warstwy nie były widoczne na obrazach przełamów uzyskanych za pomocą mikroskopu skaningowego. Wysoka twardość powłok (rzędu 3500–3800 HV_{0,025}) i obserwacje struktury powłok pod dużym powiększeniem na zgięciach skośnych wskazują, że są to powłoki nadstrukturalne. Badania procesu skrawania potwierdziły, że wielowarstwowe powłoki nanostrukturalne nadają się do zastosowań produkcyjnych.

LITERATURA

1. Materiały informacyjne firm: Oerlikon-Balzars, Ionbond, Platit, Ceme-Con, Hauzer, SHM, Gühring, VUHZ; 2014–2019.
2. Burakowski T., Wierzchoń T. „Inżynieria powierzchni metali – podstawa, urządzenia, technologie”. Warszawa: WNT, 1995.
3. Anders A. “A review comparing cathodic arcs and high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS)”. *Surface & Coatings Technology*. 257 (2014): s. 308–325.
4. Czechowski K., Wronska I., Toboła D. „Powłoki na ostrza narzędzi z węglików spiekanych i stali szybko tnących. Obróbka Skrawaniem 8. Synergia Nauki z Przemysłem”. Red.: M. Pajor. VIII Szkoła Obróbki Skrawaniem Międzyzdroje–Szczecin 2014, s. 109–118.
5. Czechowski K. „Wpływ nanostrukturalnych powłok wielowarstwowych na właściwości użytkowe narzędzi” (“Effect of nanostructured multilayer coatings on functional properties of tools”). *Mechanik*. 1 (2017): s. 28–33, DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.1.27> (PL, ENG).
6. Panckow A.N., Steffenhagen J., Wegener B., Dübner L., Lierath F. “Application of a novel vacuum-arc ion-plating technology for the design of advanced wear resistant coatings”. *Surface & Coatings Technology*. 138, 1 (2001): s. 71–76.
7. BALZERS. „Przyszłość to NANO”. Materiały informacyjne. 2005.
8. Bobzin K. “High-performance coatings for cutting tools”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 18 (2017): s. 1–9.
9. Williams B., Lausecker U., Gey Ch. “19th Plansee Seminar: Production trends in refractory metals and hard materials”. *Powder Metallurgy Review*. Autumn/Fall (2017): s. 79–86.
10. Cselle T., Lümekmann A., Jilek M. sen., Jilek M. jun. “My tool, my coating”. *Werkstatt+Betrieb*. 11 (2016): s. 1–5.
11. Vetter J., Kubota K., Isaka M., Mueller J., Krienke T., Rudigier H. “Characterization of advanced coating architectures deposited by an arc-HiPIMS hybrid process”. *Surface & Coatings Technology*. 350 (2018): s. 154–160.
12. Chang Y.-Y., Chang H., Jhao L.-J., Chuang Ch.-Ch. “Tribological and mechanical properties of multilayered TiVN/TiSiN coatings synthesized by cathodic arc evaporation”. *Surface & Coatings Technology*. 350 (2018): s. 1071–1079.
13. Best J.P., Polyakov M., Shinde D., Colliander M.H., Wehrs J., Michler J., Morstein M. “Ni nanocluster composites for enhanced impact resistance of multilayered arc-PVD ceramic coatings”. *Surface & Coatings Technology*. 354 (2018): s. 360–368.
14. Wang Y., Lee J.-W., Duh J.-G. “Mechanical strengthening in self-lubricating CrAlN/VN multilayer coatings for improved high-temperature tribological characteristics”. *Surface & Coatings Technology*. 303 (2016): s. 12–17.
15. Daniel R., Meindlhumer M., Zalesak J., Sartory B., Zeilinger A., Mitterer Ch., Keckes J. “Fracture toughness enhancement of brittle nanostructured materials by spatial heterogeneity: A micromechanical proof for CrN/Cr and TiN/ SiOx multilayers”. *Materials and Design*. 104 (2016): s. 227–234.
16. Friák M., Týčko D., Holec D., Choi P.P., Eisenlohr P., Raabe D., Neugebauer J. “Synergy of atom-probe structural data and quantum-mechanical calculations in a theory-guided design of extreme-stiffness superlattices containing metastable phases”. *New J. Phys.* 17 (2015): s. 093004.