



Wpływ nanostrukturalnych powłok wielowarstwowych na właściwości użytkowe narzędzi

Effect of nanostructured multilayer coatings on functional properties of tools

KAZIMIERZ CZECHOWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.1.27>

Przedstawiono w skrócie zagadnienie nanoszenia powłok przeciwzużyciowych na ostrza narzędzi skrawających i narzędzi do obróbki plastycznej na zimno. Omówiono wybrane powłoki opracowane i nanoszone łukowo-plazmową metodą PVD w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (IZTW). Zaprezentowano ich struktury z uwzględnieniem wielowarstwowej budowy powłok w skali mikro i nano. Przytoczono wybrane wyniki badań dotyczące tych powłok, w tym nanostrukturalnych i wielowarstwowych. Wyniki te wskazują na możliwość osiągnięcia znacznego wzrostu trwałości narzędzi. Omówiono w skrócie tendencje w rozwoju powłok.

SŁOWA KLUCZOWE: powłoki, metoda łukowo-plazmowa PVD, narzędzia

The state of the art of deposition of wear resistant coatings on cutting tools and cold forming tools is briefly reported. Some the PVD arc coatings developed and deposited at the Institute of Advanced Manufacturing Technology (IAMT) are discussed. The coatings structures are presented and the multilayer architecture in micro and nano-scale is revealed. Some results of the PVD arc coatings developed and deposited at the Institute are presented. These include nanostructured and multilayer coatings, which indicate the possibility of considerable increase in tool lives. The current trends in development of the coatings are briefly discussed.

KEYWORDS: coatings, arc plasma PVD method, tools

Na potrzebę stosowania w procesach wytwarzania coraz lepszych narzędzi ma wpływ wiele czynników, spośród których należy wymienić m.in.:

- wykonywanie części maszyn i innych wyrobów z materiałów o coraz lepszych właściwościach (co niestety wiąże się z ich trudnoobrobialnością),
- dążenie do coraz większej ekonomiczności procesów technologicznych (wiąże się to ze stosowaniem obróbki z dużymi prędkościami i wysoką wydajnością, a ma szczególne znaczenie w produkcji wielkoseryjnej i masowej, np. w branżach aeronautycznej i motoryzacyjnej, w technice medycznej),
- uwzględnianie coraz wyższych wymagań ekologicznych (np. dotyczących ograniczania stosowania cieczy obróbkowych).

Podstawowymi materiałami stosowanymi na ostrza narzędzi skrawających są węgliki spiekane i stałe szybko-

trnące (z przewagą tych pierwszych) – w znacznie mniejszym stopniu wykorzystywane są materiały ceramiczne, w tym supertwardy (PCD, PCBN). Z kolei części robocze narzędzi do obróbki plastycznej na zimno najczęściej są wykonywane ze stali narzędziowych stopowych i szybko-kojących, a znacznie rzadziej – z węglików spiekanych. W przypadku materiałów narzędziowych – zarówno przeznaczonych do obróbki wiórowej, jak i obróbki plastycznej na zimno – obecnie bardzo ważną i coraz większą rolę odgrywają drobnoziarniste gatunki węglików spiekanych, a w przypadku stali – gatunki spiekane.

Bardzo duży wpływ na efektywność ekonomiczną procesu produkcji wywierają dynamicznie rozwijające się techniki nanoszenia na części robocze narzędzi powłok o dużej odporności na zużycie. Powłoki pozwalają również na zmniejszenie współczynnika tarcia i wyeliminowanie miejsc inicjacji pęknięć, co jest głównym uzasadnieniem stosowania powłok w określonych przypadkach na materiałach ceramicznych o dużej i bardzo dużej twardości.

Metody nanoszenia powłok

Powłoki przeznaczone na części robocze narzędzi ogólnie można podzielić na nanoszone metodami CVD (*chemical vapour deposition*) i PVD (*physical vapour deposition*).

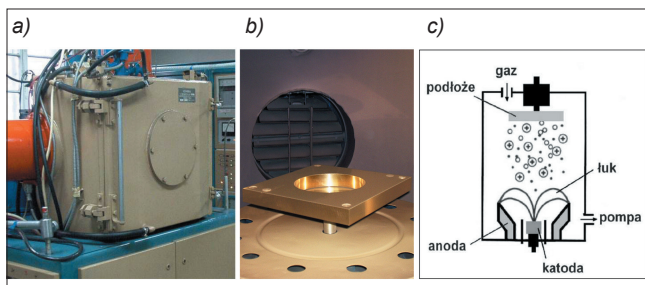
Metoda CVD, która polega na reakcji chemicznej gazowych składników atmosfery, prowadzi do wytworzenia cienkiej, twardej warstwy na powierzchni narzędzia. Proces ten może się odbywać pod ciśnieniem atmosferycznym, w temperaturze 900–1100°C (APCVD – *atmospheric pressure*). Przy stosowaniu reagentów można obniżyć temperaturę procesu do 800–850°C (MTCVD – *medium temperature*) lub ciśnienie do 1–5 kPa (LPCVD – *low pressure*). Poprzez aktywację elektryczną gazowych reagentów za pomocą wyładowania jarzeniowego lub prądów wysokiej częstotliwości można obniżyć temperaturę procesu do 400–600°C (PACVD – *plasma assisted*) [1].

Metoda PVD polega na nanoszeniu cienkich warstw poprzez fizyczne ich osadzanie z fazy gazowej, przy czym proces ten zwykle odbywa się przy znacznie obniżonym ciśnieniu – rzędu 0,1–1 Pa – w temperaturze 300–700°C. Istniejące odmiany metody PVD w prostszych przypadkach różnią się sposobem doprowadzenia ciepła potrzebnego do odparowania osadzanego materiału (nagrzewanie oporowe, indukcyjne bądź laserowe albo

* Dr inż. Kazimierz Czechowski (kazimierz.czechowski@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

bombardowanie wiązką elektronów), a w przypadkach bardziej złożonych – sposobem otrzymywania fazy gazowej zjonizowanej, tj. plazmy (PAPVD – *plasma assisted*), w odróżnieniu od procesów nanoszenia warstw z fazy gazowej niezjonizowanej, czyli naparowywania próżniowego. Jednym ze sposobów otrzymywania plazmy jest termiczne odparowywanie (metody nanoszenia jonowego – *ion plating*). Plazma może być otrzymywana także poprzez odparowanie metalu i jonizowanie jego par przez katodowy łuk w miejscu ich powstawania (łukowo-plazmowa metoda PVD – *arc deposition*). Inny sposób otrzymywania plazmy polega na wybijaniu z katody cząstek osadzanego materiału wskutek bombardowania jonami o dużej energii (metody rozpylania jonowego – *sputter deposition*), np. w wyniku wytworzenia odpowiednio ukształtowanego pola magnetycznego (metoda magnetronowa – *magnetron sputtering*). Istnieją też różne kombinacje podstawowych metod nanoszenia powłok PVD [1].

W metodzie łukowo-plazmowej PVD odparowywanie materiału katody następuje wskutek wykorzystania silno-prądowego wyładowania łukowego: ciąglego (jak w posiadanych przez IZTW zmodernizowanym urządzeniu NNW-6.6 – rys. 1) albo impulsowego. Otrzymywana jest plazma o dużym stopniu jonizacji (ok. 90%). Anodę stanowią ściany komory próżniowej. Ukierunkowanie i zwiększenie energii kinetycznej jonów następuje poprzez polaryzację ujemnym napięciem podłoża, na które nanoszona jest powłoka [1–3]. Wysoki stopień zjonizowania plazmy w procesach łukowych odróżnia je istotnie od metod rozpylania magnetronowego i metod nanoszenia jonowego (*ion plating*), w których substancje tworzące powłokę stanowią m.in. cząsteczki. Wysokoenergetyczne jony wytwarzane w procesie łukowo-katodowym prowadzą do powstawania powłok o większej gęstości przy relatywnie niższej temperaturze nanoszenia w porównaniu z innymi procesami PVD [4].



Rys. 1. Widok komory (a) posiadanej przez IZTW urządzenia do nanoszenia powłok metodą łukowo-plazmową PVD, element z naniesioną powłoką we wnętrzu komory (b) oraz zasada działania urządzenia (c)

Rodzaje powłok

Ze względu na budowę powłok nanoszonych na części robocze narzędzi można je podzielić na jednowarstwowe (monolityczne, kompozytowe, gradientowe) i wielowarstwowe (w skali mikro, w skali nano, nadstruktury). Powłoki te mogą mieć postać azotków, węglików, węglikoazotków, tlenków i wieloskładnikową. Powłoki wielowarstwowe mogą się składać z kilku, kilkunastu, kilkudziesięciu, a nawet z kilku tysięcy warstw (w tym ostatnim przypadku o grubości kilku nm). Wielowarstwowość powłoki daje korzystniejszy rozkład naprężeń i lepszą odporność na pękanie, gdyż energia pęknięcia jest rozpraszana przez jego odchylenie i rozgałęzienia [1]. Powłoki o budowie wielowarstwowej w skali mikro, nanoszone metodą PVD, składają się z kilku warstw funkcjonalnych. Mogą to być (w kolejności od podłoża) np.: metaliczna warstwa adhe-

zyjna (np. Ti, Cr, Mo, Zr), podstawowa warstwa o wysokiej twardości i możliwie niskim poziomie naprężeń (np. TiN, CrN, ZrN, TiCN), warstwa blokująca przepływ ciepła (np. TiAlN, TiZrN) oraz (na powierzchni) warstwa o niskim współczynniku tarcia (np. Cr, CrN, TiN) [5]. Powłoki nanoszone metodą PVD coraz częściej są wykonywane jako wielowarstwowe w skali nano, co zapewnia narzędziom m.in. [1]: optymalny stosunek twardości do naprężeń własnych (dużą stabilność geometrii narzędzi i ich równomierne zużywanie się), wyższą odporność termiczną i chemiczną (możliwość obróbki na sucho z większymi prędkościami skrawania, mniejsze zużycie żłobkowe), lepsze właściwości ślizgowe (lepsze formowanie się wióra, wyższą jakość obrobionej powierzchni) czy większą odporność na zużycie (zmniejszenie kosztów narzędziowych).

Tworzenie się faz i ich rozdział w powłokach wielofazowych i wielowarstwowych podczas samego procesu nanoszenia powłok prowadzi do uzyskania niezwykłych właściwości powłok, takich jak np. wysoka twardość, znacznie wyższa od twardości warstw lub faz tworzących powłokę – dotyczy to zwłaszcza powłok typu nano [6–8]. Substancje wchodzące w skład powłok wielowarstwowych charakteryzują się budową krystaliczną lub mają postać amorficzną; powłokę stanowi też mieszanina składników amorficznych z krystalicznymi. Nanoszeniu twardych powłok metodą PVD towarzyszy powstawanie w nich faz, między którymi zachodzą różne relacje, a mianowicie:

- całkowita wzajemna rozpuszczalność (np. TiN-TiC, TiC-WC),
- całkowity brak mieszalności (np. TiC/Ag, WC/Ag),
- współistnienie faz o ziarnie krystalicznym z międzyziarnową fazą amorficzną (np. nanokrystaliczne ziarna (nc) TiN z międzyziarnową fazą amorficzną a-SiN_x),
- współistnienie faz krystalicznych i amorficznych oraz występowanie kilku różnych faz amorficznych (np. cienkie warstwy WC-SiC, wykazujące duże zróżnicowanie stopnia amorficzności i krystalizacji zależnie od zawartości SiC) [9].

Przez dobranie odpowiedniej budowy i określonego składu fazowego powłok wielofazowych można kształtować ich właściwości, np. podwyższyć twardość i zmniejszyć współczynnik tarcia [5].

W tabl. I zamieszczono podstawowe rodzaje nowoczesnych powłok na narzędzia skrawające. Większość przedstawionych powłok nanoszona jest w postaci cienkich warstw metodą PVD. Stosowane są także metody CVD i hybrydowe. Powłoki diamentowe nanoszone są z reguły metodą CVD, choć realizowane są prace badawcze nad otrzymywaniem tych powłok metodą PVD. Firmy nanoszące powłoki przypisują im unikalne i zastrzeżone nazwy handlowe.

Oprócz uniwersalnych powłok TiN na narzędzia do obróbki plastycznej stosowane są m.in. powłoki: TiCN, Al-TiN, TiAlN, CrN i CrC. Ponadto można wymienić powłoki o bardzo niskim współczynniku tarcia (rzędu 0,10–0,15), takie jak powłoki węglowe diamentopodobne (DLC) i twarde powłoki zawierające siarczki – np. dwusiarczek molibdenu, który pełni funkcję smaru w stanie stałym. Na podstawie m.in. materiałów informacyjnych [1] można sądzić, że na narzędzia do obróbki plastycznej wszystkich rodzajów stali odpowiednie są powłoki TiCN i TiN; ten sam rodzaj powłok zalecany jest do obróbki miedzi i stopów magnezu. Do obróbki plastycznej miedzi zalecane są natomiast powłoki CrN, do stopów tytanu – powłoki ZrN, a do stopów aluminium – powłoki ZrN i DLC. Powłoka AlCrN może być stosowana na narzędzia do wykrawania i tłoczenia różnych stali i mosiądźów [10].

TABLICA I. Podstawowe rodzaje nowoczesnych powłok na narzędzia skrawające [1]

Typ powłoki (najczęściej stosowana metoda nanoszenia)	Budowa powłoki	Twardość HV _{0,05} (współczynnik tarcia na sucho o stal)	Maksymalna temperatura pracy, °C	Zalety	Przykładowe zastosowanie powłoki na ostrza narzędzi do obróbki wiórowej
TiN (PVD)	Mono-warstwowa	2300 (0,4)	600	Uniwersalna	Narzędzia ze stali szybko tnących do obróbki stali węglowych i stopowych oraz z węglików spiekanych do obróbki tych stali oraz miedzi – zwłaszcza na narzędzia do gwintowania
AlCrN (PVD)	Mono-warstwowa	3200 (0,35)	1100	Wysoka odporność na utlenianie i dobra twardość na gorąco	Narzędzia ze stali szybko tnących i węglików spiekanych do frezowania stali i żeliwa oraz stopów niklu i tytanu (w tym do obróbki kół zębatych); powłoka ta może być też stosowana na ostrzach narzędzi z PCBN do obróbki stali o wysokiej wytrzymałości i twardości (> 52 HRC)
AlCrN (PVD)	Wielowarstwowa	3200 (0,3)	1100	Wysoka odporność na utlenianie i wysoka twardość na gorąco	Narzędzia ze stali szybko tnących i węglików spiekanych do wiercenia lub rozwiercania stali (w tym nierdzewnej), żeliwa, stopów aluminium i tytanu, brązu, mosiądzu i miedzi
TiCN (PVD)	Gradientowa	3000 (0,4)	400	Wysoka twardość i dobra wytrzymałość mechaniczna	Narzędzia ze stali szybko tnących i węglików spiekanych do gwintowania stali (< 52 HRC; w tym nierdzewnych), stopów niklu, mosiądzu i brązu; powłoka do stosowania do frezowania z chłodzeniem, np. stalowych kół zębatych
TiAlN (PVD)	Nano-warstwowa	3300 (0,3–0,35)	900	Wysoka twardość na gorąco i wysoka odporność na utlenianie	Narzędzia ze stali szybko tnących i 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 zębatych ze stali o twardości do 52 HRC (w tym nierdzewnych), żeliwa, mosiądzu i brązu
AlTiN (PVD)	Mono-warstwowa	3300 (0,4)	900	Bardzo wysoka twardość na gorąco i bardzo wysoka odporność na utlenianie	Narzędzia z węglików spiekanych do toczenia i frezowania stali o wysokiej wytrzymałości i twardości > 52 HRC oraz nierdzewnych, a także tytanu i stopów niklu; do wiercenia głównie stopów niklu oraz do gwintowania przede wszystkim stali o twardości > 52 HRC; narzędzia ze stali szybko tnących i węglików stosowane w obróbce kół zębatych do stali węglowej i stopowej o twardości do 52 HRC
TiAlN + WC/C (PVD)	Wielowarstwowa	3000 (0,15–0,2)	800	Wysoka twardość i duża odporność na działanie podwyższonej temperatury oraz korzystne właściwości smarne i ślizgowe	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; powłokę tę można stosować w obróbce kół zębatych z mosiądzu i brązu
WC/C (PVD)	Płytkowa	1000–1500 (0,1–0,2)	300	Przy relatywnie niskiej twardości – bardzo niski współczynnik tarcia (dobre właściwości ślizgowe)	Narzędzia ze stali szybko tnących i węglików spiekanych do obróbki aluminium i jego stopów o zawartości krzemu poniżej 6%
Diamant (CVD)	Mono-warstwowa	8000–10 000	600	Przy superwysokiej twardości – duża stabilność chemiczna	Narzędzia z węglików spiekanych do toczenia, frezowania, wiercenia i gwintowania grafitu; narzędzia do mikroobróbki (np. frezowaniem)
Diamant (CVD)	Nano-kryształiczna	8000–10 000	600	Przy superwysokiej twardości – duża stabilność chemiczna	Narzędzia z węglików spiekanych do obróbki materiałów kompozytowych umocnionych włóknem węglowym lub szklanym oraz aluminium i jego stopów zawierających krzem

W powłokach przeznaczonych zarówno do obróbki wiórowej, jak i plastycznej na zimno możliwe są różne układy warstw, których sekwencję ustala się zależnie od roli, jaką mają odegrać w obróbce.

Przykłady powłok wielowarstwowych opracowanych i wykonywanych w IZTW

W IZTW opracowuje się powłoki wielowarstwowe w skali mikro i nano, przeznaczone głównie na ostrza narzędzi skrawających (m.in. frezów ślimakowych specjalnych ze stali szybko tnących i węglików spiekanych, frezów trzpieniowych walcowo-czołowych i kulistych z węglików spiekanych oraz płytek skrawających wieloostrowych do toczenia i frezowania z węglików spiekanych i materiałów

ceramicznych), a także na części robocze narzędzi do obróbki plastycznej na zimno (np. stempli i matryc ze stali narzędziowych i szybko tnących).

Opracowane w IZTW przeciwużytkowe powłoki wielowarstwowe, nanoszone łukowo-plazmową metodą PVD, składają się z mikro- i nanowarstw (wymienionych poniżej, licząc od podłoża, na które każdorazowo nanoszono warstwę Ti – w celu uzyskania lepszej adhezji – o grubości rzędu kilkudziesięciu nm):

- **Ti-Zr-N/10x(TiN/ZrN)** – rys. 2 – powłoka, w której mikrowarstwa Ti-Zr-N o grubości ok. 1,5–2,5 μm stanowi warstwę, która m.in. blokuje przyptyw ciepła do podłoża, a po 10 rozmieszczonych naprzemiennie bardzo cienkich warstwach TiN i ZrN (każda o grubości 100–150 nm) m.in. przeciwdziała propagacji pęknięć. Mikrowarstwa

Ti-Zr-N, wchodząca w skład powłoki, ma nanostrukturalną budowę, wynikającą z technologii jej wykonania. Ze względu na nanoszenie warstw z wykorzystaniem dwóch naprzeciwległych katod Ti i Zr oraz obrotowego stołu planetarnego i odpowiedniego oprzyrządowania, zapewniającego cykliczne przesłanianie, mikrowarstwa Ti-Zr-N jest zbudowana z bardzo wielu bardzo cienkich nanowarstw TiN i ZrN, których grubość zależy od warunków realizacji procesu PVD i jest na tyle mała (nawet rzędu kilku nm), że warstwy te nie są widoczne na obrazach przełomów uzyskanych za pomocą mikroskopu skaningowego;

- **11x(TiN/ZrN)** – w tej powłoce zastosowano po 11 rozmieszczonych naprzemiennie bardzo cienkich warstw TiN i ZrN (każda o grubości ok. 150 nm). Również w tym przypadku (ze względu na opisaną technologię wykonania powłoki) warstwy te mają budowę nanostrukturalną;

- **TiN/(TiAl)N/10x(TiN/(TiAl)N)** – rys. 3 – w tym przypadku po podstawowej mikrowarstwie TiN o grubości ok. 0,8 μm zastosowano mikrowarstwę (TiAl)N blokującą przepływ ciepła do podłoża, a następnie po 10 rozmieszczonych naprzemiennie bardzo cienkich warstw TiN i (TiAl)N – każda o grubości ok. 150 nm – które m.in. przeciwdziałają propagacji pęknięć. Z uwagi na technologię wykonania powłoki warstwy te – podobnie jak wcześniej – mają budowę nanostrukturalną;

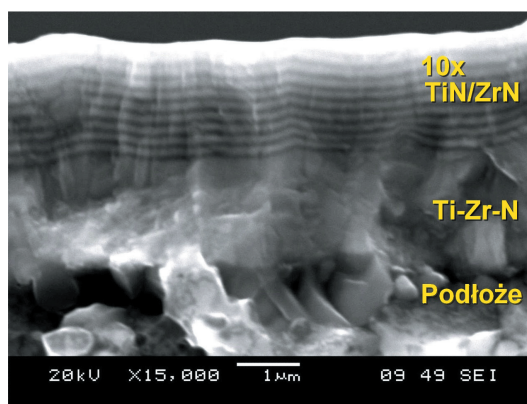
- **TiAlCrN/12x(CrN/(TiAl)N)** – rys. 4 – tu po podstawowej mikrowarstwie TiAlCrN o grubości ok. 1,5 μm (poprzedzonej warstwą adhezyjną Cr o grubości ok. 30 nm) zastosowano po 12 rozmieszczonych naprzemiennie, bardzo cienkich warstw CrN i (TiAl)N (każda o grubości ok. 60 nm); warstwy te mają budowę nanostrukturalną;

- **(TiAl)N/12x((TiAl)N/TiN)** – jako podstawową mikrowarstwę, m.in. blokującą przepływ ciepła do podłoża, zastosowano (TiAl)N, a następnie po 12 rozmieszczonych naprzemiennie bardzo cienkich warstw (TiAl)N i TiN – każda o grubości ok. 60 nm, które m.in. przeciwdziałają propagacji pęknięć.

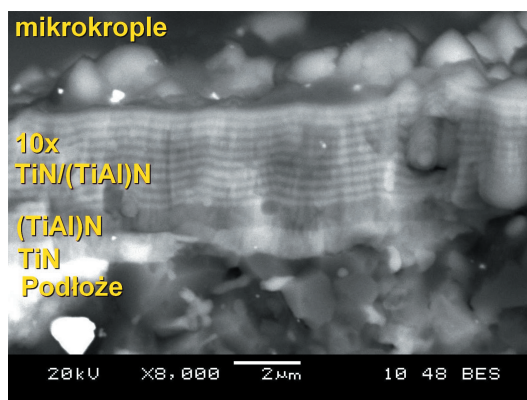
W celu ujawnienia struktur powłok wykonano przełomy oraz zgłady metalograficzne poprzeczne i skośne niskokątowe ($5-6^\circ$), które następnie obserwowano za pomocą mikroskopu skaningowego typu JSM-6460LV (japońskiej firmy Jeol). Grubości powłok wielowarstwowych i wchodzących w ich skład mikro- i nanowarstw określano na przełomach z zastosowaniem wspomnianego mikroskopu skaningowego. Do oceny całkowitej grubości powłok wykorzystano również metodę polegającą na wyszlifowaniu sferycznego wgłębienia, a następnie badaniu mikroskopowym powstałego krateru (według PN-EN 1071-2:2004). Twardość powłok i podłoża określano na zgładach metalograficznych skośnych za pomocą cyfrowego miernika mikro-twardości typu FM-7 (firmy Future-Tech Corp.) metodą Vickersa przy obciążeniu 0,2452 N. Pomiar chropowatości powierzchni przeprowadzono z użyciem profilografometru Hommel Tester T1000.

Twardość przedstawionych powłok wynosiła 3000–3500 HV_{0,025}, co przekładało się na podwyższenie trwałości ostrzy narzędzi z tymi powłokami.

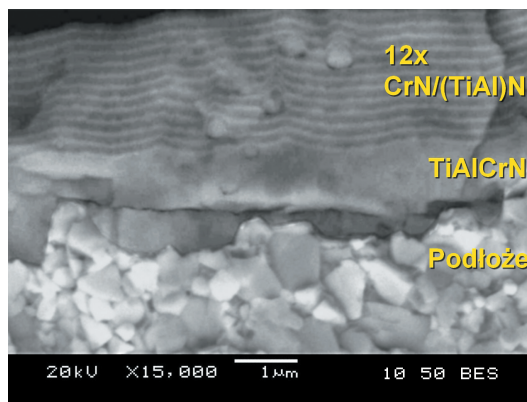
Badania prowadzone w IZTW potwierdziły możliwość uzyskania w toczeniu utwardzonej stali narzędziowej z gatunku 145Cr6 (o twardości ok. 50 HRC) 1,7–1,8-krotnego wzrostu trwałości ostrzy narzędzi z ceramiki mieszanej tlenkowo-węglkowej po naniesieniu na nie powłok złożonych wielowarstwowych w skali mikro i nano: Ti-Zr-N/10x(TiN/ZrN) lub TiN/(TiAl)N/10x(TiN/(TiAl)N). Dla porównania powłoka TiN pozwalała na 1,3-krotny wzrost trwałości ostrzy. Z kolei w toczeniu tej samej stali ostrzami z węglaków spiekanych z powłokami TiAlCrN/12x(CrN/(TiAl)N)



Rys. 2. Przykład struktury wielowarstwowej powłoki PVD typu Ti-Zr-N/10x(TiN/ZrN), opracowanej w IZTW, naniesionej na ostrze skrawające – obraz z mikroskopu elektronowego



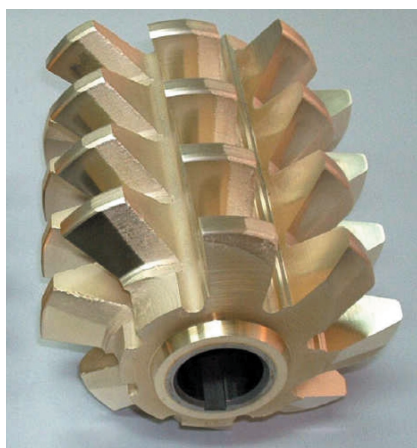
Rys. 3. Przykład struktury wielowarstwowej powłoki PVD typu TiN/(TiAl)N/10x(TiN/(TiAl)N), opracowanej w IZTW, naniesionej na ostrze skrawające – obraz z mikroskopu elektronowego



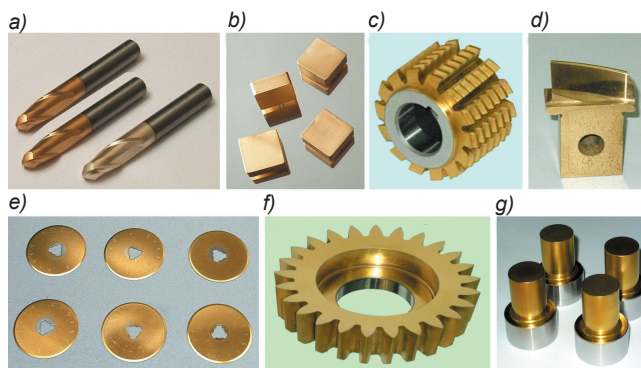
Rys. 4. Przykład struktury wielowarstwowej powłoki PVD typu TiAlCrN/12x(CrN/(TiAl)N), opracowanej w IZTW, naniesionej na ostrze skrawające – obraz z mikroskopu elektronowego

lub (TiAl)N/12x((TiAl)N/TiN) osiągnięto odpowiednio 1,4-krotny i 3,1-krotny wzrost trwałości ostrzy.

Zastosowanie powłok 11x(TiN/ZrN) na ostrzach frezów ślimakowych o module $m = 10 \text{ mm}$ (rys. 5) zamiast powłok TiN umożliwiło uzyskanie mniejszych – średnio o ok. 15% – wartości starcia VB_{max} niż dla ostrzy z powłoką TiN. W tym przypadku trudniej było wykazać różnice trwałości ostrzy frezów ślimakowych, wynikające z zastosowania powłok wielowarstwowych, gdyż różnice te nie były tak duże, aby można było zwiększyć liczbę kół zębatych wykonywanych w jednym ustawieniu frezu. Dlatego zamiast trwałości ostrzy porównano wartości starcia VB_{max} na ich powierzchni przyłożenia, uzyskane po jednakowym



Rys. 5. Frez ślimakowy ze stali szybkoobrotowej o module $m = 10$ mm z powłoką wielowarstwową 11x(TiN/ZrN), naniesioną w IZTW łukowo-plazmową metodą PVD



Rys. 6. Przykładowe rodzaje narzędzi z naniesionymi w IZTW powłokami wielowarstwowymi: a) frezy kuliste, b) płytki skrawające, c) frez ślimakowy, d) nóż do głowicy Gleasona, e) noże krążkowe, f) dłutak Fellowsa, g) stemple

czasie skrawania. Z uwagi na zróżnicowanie liczby zębów kół i parametrów obróbki wynik porównania określono w wartościach względnych.

Po naniesieniu powłoki metodą łukowo-plazmową PVD następował wzrost chropowatości powierzchni ostrza, spowodowany obecnością mikrokropli (zaznaczonych na rys. 3); ich liczebność i wymiary w dużym stopniu zależały od rodzajów materiałów katod i warunków procesu. Parametr chropowatości R_a na powierzchni ostrza wzrastał nawet 1,5–2-krotnie, co jednakże powodowało tylko niewielki wzrost R_a na powierzchni toczonej tym ostrzem (od kilku do niecałych 40%). Mikrokrople, w których składzie w tym przypadku przeważały Ti, Zr, Cr, TiAl, miały znacznie niższą twardość niż powłoki z azotków tych metali lub ich stopów – w związku z tym ulegały szybkiemu spłaszczeniu lub starciu z powierzchni powlekanego ostrza.

Przedstawione przykłady złożonych powłok wielowarstwowych opracowanych w IZTW i bazujących na cienkich warstwach TiN, ZrN, (TiAl)N oraz CrN były i są nadal wykorzystywane – w opisanych w artykule oraz innych sekwencjach – na powłoki narzędzi do obróbki wiórowej i plastycznej na zimno (rys. 6).

Prowadzone w IZTW prace nad powłokami koncentrują się obecnie na złożonych powłokach nanostrukturalnych

nanoszonych metodą PVD, których wielowarstwowość i odpowiednio dobrane sekwencje warstw pozwolą na uzyskanie bardzo korzystnych właściwości, w tym znacząco większej odporności na zużycie narzędzi do obróbki wiórowej i plastycznej na zimno, zwłaszcza w trudnych warunkach obróbki, a także wysokiej jakości powierzchni obrobionej.

Wybrane przykłady nowych powłok opracowanych na świecie

Spośród powłok opracowanych w ostatnich latach na świecie warto wymienić m.in. powłoki PVD (ich przykłady podano w tabl. II), które charakteryzują się bardzo wysoką twardością i dobrą adhezją.

Choć ważną właściwością nanostrukturalnych powłok nanoszonych metodą PVD jest wysoka twardość, to z punktu widzenia minimalizacji zużycia ważne jest także uzyskanie powłoki o odpowiednim poziomie sprężystości i tolerancji na odkształcenie. W związku z tym potrzebne jest optymalizowanie zarówno twardości, która zwykle powinna być odpowiednio duża, jak i modułu sprężystości Younga, który z kolei powinien najczęściej mieć stosunkowo niską wartość.

TABLICA II. Przykłady nowych powłok PVD opracowanych i rozwijanych na świecie

Powłoka	Typ powłoki	Główne zalety	Literatura: rok [poz.]
TiAlN/cBN (TiAlN/B ₄ C/B-C-N/cBN)	Wielowarstwowa	Supertwarda (71–75 GPa), odporna na wysoką temperaturę (do 1000°C)	2011 [11]
CrTiAlN/cBN (CrTiAlN/B ₄ C/B-C-N/cBN)			
CrTiAlSiN/cBN (CrTiAlSiN/B ₄ C/B-C-N/cBN)			
TiAlN/VN	Wielowarstwowa nadstrukturalna	Wysoka twardość (42 GPa), parametr chropowatości $R_a = 0,06 \mu\text{m}$	2011 [12]
Al-Cr-O-N	Wieloskładnikowa	Bardzo wysoka twardość (55 GPa), dobra adhezja	2012 [13]
Zr-O-N	Jednowarstwowa	Wysoka twardość (44 GPa), dobra adhezja	
AlTiCrN (CrN/AlN/TiN)	Wielowarstwowa	Wysoka twardość (48 GPa), względnie niski moduł Younga (323 GPa)	2013 [14]
Ti-AlN/CrN-Ti _{1-x} Cr _x Al _y N; Zr-AlN/CrN-ZrCrAlN	Kompozytowa wielowarstwowa w skali nano	Wysoka twardość (32 GPa), dobra adhezja, duża trwałość ostrza w toczeniu/frezowaniu	2014 [15]
(Ti,Al,Zr)N/(Ti,Al,Zr,Cr)N	Dwuwarstwowa	Wysoka twardość (41 GPa), bardzo dobra adhezja	2014 [16]
(Ti,Al)N/ γ -Al ₂ O ₃	Dwuwarstwowa	Bardzo wysoka odporność na zużycie ściernie i adhezyjne w obróbce frezowaniem stali austenitycznych	2014 [17]
TiN/CrN	Nadstrukturalna wielowarstwowa w skali nano	Duża odporność na kruche pękanie ($K_{1C} \approx 2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	2016 [18]
CrN/TiN	Nadstrukturalna wielowarstwowa w skali nano	Duża twardość (36 GPa), wysoki iloraz twardości i modułu Younga, niski współczynnik tarcia, wysoka odporność na zużycie ściernie i korozję	2016 [19]

Podsumowanie

Różnorodność dostępnych na rynku materiałów narzędziowych, w tym powłok, oraz ciągły rozwój w tej dziedzinie znacznie ułatwiają właściwy dobór materiału narzędziowego i powłoki do danego procesu technologicznego oraz bardziej precyzyjne powiązanie konkretnych gatunków materiałów narzędziowych z grupami i podgrupami materiałów obrabianych.

LITERATURA

1. Materiały informacyjne firm: Oerlikon-Balzers, Ionbond, Plaitit, Ceme-Con, Hauzer, SHM, Gühring, VUHZ; 2010–2016.
2. Czechowski K., Pofelska-Filip I., Królicka B., Szlosek P., Smuk B., Wszolek J., Kurlito A., Kasina J. "Effect of nitride nano-scale multilayer coatings on functional properties of composite ceramic cutting inserts". *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*. 53 (2005) 4: s. 425–431.
3. Wysiecki M. „Nowoczesne materiały narzędziowe stosowane w obróbce skrawaniem”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1997.
4. Sanders D.M., Anders A. "Review of cathodic arc deposition technology at the start of the new millennium". *Surface and Coatings Technology*. 133–134 (2000) 1: s. 78–90.
5. Panckow A.N. et al. "Application of a novel vacuum-arc ion-plating technology for the design of advanced wear resistant coatings". *Surface and Coatings Technology*. 138 (2001) 1: s. 71–73.
6. Hovsepian P.Eh., Lewis D.B., Münz W.-D. "Recent progress in large scale manufacturing of multilayer/superlattice hard coatings". *Surface and Coatings Technology*. 133–134 (2000): s. 166–175.
7. Veprek S. et al. "Composition, nanostructure and origin of the ultrahardness in nc-TiN/a-Si₃N₄/a-and nc-TiSi₂ nanocomposites with Hv = 80 to ≥ 105 GPa". *Surface and Coatings Technology*. 133–134 (2000): s. 152–159.
8. Holubar P., Jilek M., Sima M. "Present and possible future applications of superhard nanocomposite coatings". *Surface and Coatings Technology*. 133–134 (2000): s. 145–151.
9. Krzanowski J.E. "Phase formation and phase separation in multi-phase thin film hard coatings". *Surface and Coatings Technology*. 188–189 (2004): s. 376–383.
10. Pesch P., Sattel S., Woestmann S., Ulrich S. "New multifunctional PVD-coating in the material system Cr-BCN-Si for steel sheet forming". *Surface and Coatings Technology*. 200 (2005): s. 1065–1070.
11. Stein Ch., Keunecke M., Bewilogua K. et al. "Cubic boron nitride based coating systems with different interlayers for cutting inserts". *Surface and Coatings Technology*. 205 (2011): s. S103–S106.
12. Luo Q. "Temperature dependent friction and wear of magnetron sputtered coating TiAlN/VN". *Wear*. 271 (2011): s. 2058–2066.
13. Barthelma F., Frank H., Mahr P., Reich S. "Oxygen-improved hard coatings for high performance cutting processes". *Procedia CIRP*. 1 (2012): s. 208–213.
14. Jakubeczyova D., Kocik M., Hvizdos P. "A study of PVD mono- and multicomponent thin coatings for to OLS applications". *Metal*. 15–17.05.2013, Brno, Czech Republik, EU.
15. Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S., Mgaloblishvili O., Morgan M.N., Batako A.D. "Nano-scale multilayered-composite coatings for the cutting tools". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 72 (2014): s. 303–317.
16. Zhao S., Zhang J., Zhang Z., Wang S., Zhang Z.-g. "Microstructure and mechanical properties of (Ti,Al,Zr)N/(Ti,Al,Zr,Cr)N films on cemented carbide substrates". *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 21, 1 (2014): s. 77–81.
17. Bobzin K., Baggivan N., Ewering M., Brugnara R.H., Basturk S. "Comparison of (Ti,Al)N and (Ti,Al)N/γ-Al₂O₃ coatings regarding tribological behavior and machining performance". *Surface and Coating Technology*. 257 (2014): s. 58–62.
18. Hahn R., Bartosik M., Soler R., Kirchlechner C., Dehm G., Mayrhofer P.H. "Superlattice effect for enhanced fracture toughness of hard coatings". *Scripta Materialia*. 124 (2016): s. 67–70.
19. Ou Y.X., Lin J., Tong S., Sproul W.D., Lei M.K. "Structure, adhesion and corrosion behavior of CrN/TiN superlattice coatings deposited by the combined deep oscillation magnetron sputtering and pulsed DC magnetron sputtering". *Surface and Coating Technology*. 293 (2016): s. 21–27. ■