

Development and applications of protective DLC-based coatings in tooling industry

Rozwój i zastosowania powłok ochronnych z warstwą DLC w przemyśle narzędziowym

WIT GRZESIK
JOANNA MAŁECKA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2026.4.6>

The article presents the state-of-the-art of the classification and fabrication methods of multilayer DLC-based coatings, as well as methods for tailoring specific physico-chemical, mechanical and tribological properties, e.g. through modification of their chemical composition and doping. The main techniques for deposition of DLC layers are discussed, with particular emphasis on the effect of process parameters on the composition, structure (sp^2/sp^3 bonding ratio), and internal stresses within the coatings. The paper presents extensive research results on the mechanical, tribological, and functional properties of DLC coatings under various operating conditions. Current and potential applications in various sectors of tooling industries, such as machining, metal forming, and pressure die-casting, are discussed. A substantial portion of the article is devoted to the use of multilayer, e.g. TiAlN/DLC coated cutting tools in the machining of different work materials. The article highlights the main technological limitations and the resulting directions for further development.

KEYWORDS: DLC-based coatings, deposition methods, tribological properties, tooling applications

Artykuł przedstawia aktualny stan wiedzy dotyczący klasyfikacji i metod wytwarzania powłok z warstwą DLC oraz sposobów uzyskania specyficznych właściwości fizykochemicznych, mechanicznych i tribologicznych, m.in. przez modyfikację składu chemicznego i domieszkowanie. Omówiono główne techniki osadzania warstw DLC ze szczególnym uwzględnieniem wpływu parametrów procesów na skład, strukturę (stosunek wiązań sp^2/sp^3) oraz naprężenia wewnętrzne powłok. W pracy przedstawiono obszerny wyniki badań dotyczące właściwości mechanicznych, tribologicznych i funkcjonalnych powłok z warstwą DLC w różnych warunkach eksploatacji. Omówiono aktualne i potencjalne zastosowania w różnych działach przemysłu n narzędziowego, takich jak skrawanie, obróbka plastyczna i odlewanie ciśnieniowe. Obszerną część artykułu poświęcono zastosowaniu powłok wielowarstwowych, np. typu TiAlN/DLC, w skrawaniu różnych materiałów. W artykule wyszczególniono główne ograniczenia technologiczne oraz wynikające z nich kierunki dalszych badań rozwojowych.

SŁOWA KLUCZOWE: powłoki DLC, metody nakładania, właściwości tribologiczne, zastosowania narzędziowe

1. Wprowadzenie

1.1. Charakterystyka powłok na bazie warstwy diamentopodobnej (DLC)

Powłoki typu DLC (Diamond-Like Carbon) należą do grupy amorficznych powłok węglowych o właściwościach zbliżonych do diamentu. Ich struktura obejmuje mieszaninę wiązań sp^2 i sp^3 węgla, co pozwala na uzyskanie szerokiego zakresu właściwości fizycznych i mechanicznych. Powłoki te wyróżnia wysoka twardość, bardzo niski współczynnik tarcia (0,12–0,15) oraz wysoka odporność na zużycie ściernie i adhezyjne [1, 2], dzięki temu znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle wytwórczym, zwłaszcza w zwiększeniu skrawności narzędzi skrawających, trwałości komponentów silników spalinowych, przekładni oraz układów tribologicznych pracujących w trudnych warunkach obciążenia i temperatury [1–3]. W wielu przypadkach powłoki te stosuje się w układach wielowarstwowych, m.in. w narzędziach skrawających, w których warstwa DLC stanowi nanowarstwę wierzchnią o niskim współczynniku tarcia.

Rozwój powłok DLC przebiegał od prostych powłok amorficznych do zaawansowanych powłok wielowarstwowych i nanokompozytowych [3], prowadząc do powstania licznych odmian, różniących się składem chemicznym, strukturą oraz właściwościami funkcjonalnymi [4].

Podstawowym składnikiem powłok DLC jest węgiel występujący w dwóch głównych formach hybrydyzacji: sp^2 i sp^3 (rys. 1). Ich proporcja decyduje o właściwościach mechanicznych i tribologicznych powłoki. Wiązania sp^3 są charakterystyczne dla struktury diamentu i odpowiadają za wysoką twardość powłoki, natomiast wiązania sp^2 odpowiadają za właściwości grafitopodobne, takie jak większa przewodność elektryczna oraz zdolność do redukcji tarcia [4–6]. Pomiarzy twardości metodą Vickersa pokazują, że mikrotwardość powłok DLC domieszkowanych TiAl jest zależna od stosunku intensywności (wysokości pików w pasmach częstotliwości D i G w widmie Ramana), tj. I_D/I_G i sp^3/sp^2 , przy czym im wyższy stosunek sp^3/sp^2 lub niższy stosunek I_D/I_G , tym wyższa twardość [8].

* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik, em. prof. Politechniki Opolskiej – wit.grzesik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3898-5119>

Dr hab. inż. Joanna Małecka – j.malecka@po.edu.pl, – Wydział Inżynierii Mechanicznej, Katedra Technologii Maszyn i Materiałoznawstwa, Politechnika Opolska, Opole, Polska

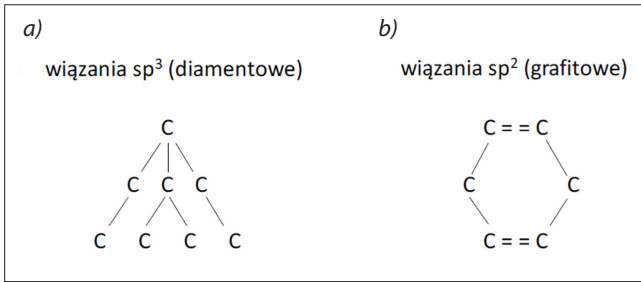


Fig. 1. Scheme of atomic structure of DLC coatings including sp^2 (a) and sp^3 (b) bonds [according to Refs 4-6]
Rys. 1. Schemat struktury atomowej powłok DLC (udział wiązań sp^2 (a) i sp^3 (b)) [na podstawie 4-6]

Optymalna struktura DLC jest zwykle kompromisem pomiędzy tymi właściwościami (patrz rys. 1).

Ilościowy stosunek obu tych faz względem siebie oraz stężenie atomów wodoru stanowi podstawowe kryterium ich klasyfikacji [3]:

- ta-C (tetraedryczny amorficzny węgiel) – charakteryzuje się bardzo wysokim udziałem wiązań sp^3 przy jednoczesnym braku wodoru w strukturze; powłoki tego typu mają zwykle gładką i stabilną strukturę oraz najwyższą twardość spośród wszystkich odmian powłok DLC;
- ta-C:H – odmiana powłoki zawierająca około 70% wiązań sp^3 oraz wodór w ilości około 25–35%, co wpływa na modyfikację właściwości mechanicznych i tribologicznych materiału;
- a-C (amorficzny węgiel) – powłoki o stosunkowo niewielkim udziale wiązań sp^3 , zwykle nieprzekraczającym około 30%, przy jednoczesnym braku wodoru w strukturze;
- a-C:H (uwodorniony amorficzny węgiel) – odmiana powłok DLC zawierająca wodór w ilości około 20–40%, który wpływa na strukturę oraz właściwości tribologiczne powłoki.

Na rys. 2 przedstawiono typy węgla amorficznego w zależności od koncentracji wodoru (H) oraz udziału wiązań kowalencyjnych wyrażonego stosunkiem procentowym wiązań $C(sp^3)$ i $C(sp^2)$.

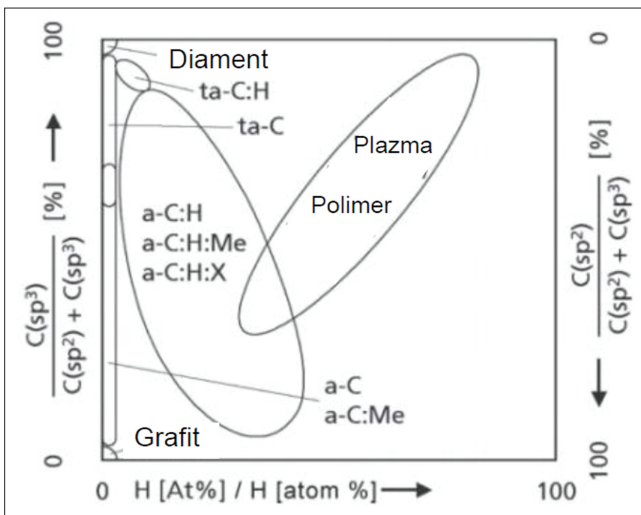


Fig. 2. Types of amorphous carbon in terms of hydrogen content and combination sp^3 and sp^2 bonds [1,7]
Rys. 2. Typy węgla amorficznego w zależności od zawartości wodoru oraz kombinacji wiązań sp^3 i sp^2 [1,7]

1.2. Techniki nanoszenia powłok DLC

Powłoki DLC mogą być wytwarzane przy użyciu różnych technologii osadzania z fazy gazowej [6, 11, 12]. Najczęściej stosowane są metody należące do grupy PVD (Physical Vapour Deposition):

- magnetronowe rozpylanie katodowe (Magnetron Cathodic Sputtering – MCS),
 - osadzanie z wiązki jonów (Ion Beam Deposition – IBD),
 - katodowe odparowanie łukowe (Cathodic Arc Evaporation – CAE),
 - impulsywne rozpylanie magnetronowe o wysokiej mocy (High-Power Impulse Magnetron Sputtering – HiPIMS)
- oraz CVD (Chemical Vapour Deposition):
- plazmowo wspomaganie osadzanie chemiczne (Plasma Enhanced CVP-PECVD).

W nowoczesnych systemach powłokowych coraz częściej stosuje się układy wielowarstwowe, w których powłoka DLC stanowi warstwę wierzchnią na podłożu pokrytym wcześniej powłokami azotkowymi, takimi jak TiAlN lub CrN [9]. Rozwiązanie to (jak przykładowo na rys. 3) pozwala połączyć wysoką twardość warstw azotkowych z niskim współczynnikiem tarcia powłok węglowych.

Jednym z najważniejszych problemów technologicznych związanych z powłokami DLC jest zapewnienie odpowiedniej adhezji powłoki do materiału podłoża. Wynika to przede wszystkim z wysokich naprężeń własnych powstających w trakcie osadzania powłoki [4, 5], które są związane z dużym udziałem wiązań sp^3 w strukturze DLC oraz z energią jonów docierających do podłoża podczas depozycji warstw. Skuteczna adhezja powłok DLC wymaga kompleksowego podejścia, obejmującego przygotowanie podłoża, zastosowanie warstw pośrednich lub gradientowych oraz optymalizację parametrów procesu osadzania. Tylko wtedy możliwe jest uzyskanie trwałych powłok o wysokiej odporności na zużycie, szeroko stosowanych w nowoczesnych technologiach wytwórczych [4, 6, 9, 10].

Najpowszechniej stosowaną metodą poprawy przyczepności są warstwy pośrednie, które, pełniąc funkcję bufora mechanicznego pomiędzy podłożem, a powłoką DLC, zmniejszają różnice właściwości mechanicznych oraz ograniczają koncentrację naprężeń. Typowe materiały na warstwy pośrednie to Cr, Ti, Si oraz azotki metali przejściowych (TiN, CrN). Warstwa pośrednia ogranicza różnice w modułach sprężystości i naprężeniach własnych między powłoką a podłożem [4, 5], dzięki temu ogranicza ryzyko pęknięcia, łuszczenia i delaminacji powłoki podczas eksploatacji narzędzi.

Nowoczesne powłoki DLC coraz częściej przyjmują strukturę gradientową, w której skład chemiczny i właściwości mechaniczne zmieniają się stopniowo od podłoża do warstwy wierzchniej [9]. Tego typu rozwiązania minimalizują koncentrację naprężeń, poprawiają przyczepność warstw oraz odporność na obciążenia ścinające i udarowe.

Równie istotne są parametry procesu osadzania powłok DLC: temperatura podłoża, napięcie polaryzacji,

energia jonów, ciśnienie gazu roboczego czy moc źródła plazmy [4, 5, 9]. Odpowiednia kontrola tych parametrów pozwala na ograniczenie naprężeń własnych, kontrolę gęstości i mikrostruktury powłoki, co bezpośrednio przekłada się na poprawę przyczepności do podłoża.

1.3. Rozwój powłok DLC

Jednym z ważnych kierunków rozwoju powłok DLC jest ich modyfikacja poprzez wprowadzenie domieszek pierwiastków metalicznych lub niemetalicznych [4, 9]. Powłoki domieszkowane często przyjmują strukturę nanokompozytową, w której nanokrystaliczne fazy metaliczne lub węglkowe są rozproszone w amorficznej matrycy węglowej.

Do najczęściej stosowanych domieszek należą:

- metale: Ti, W, Cr,
- pierwiastki półprzewodnikowe: Si,
- pierwiastki niemetaliczne: N, F.

Domieszkowanie metalami, takimi jak tytan (Ti), chrom (Cr) czy srebro (Ag), ma na celu poprawę adhezji powłoki do podłoża, zwiększenie odporności na zużycie oraz uzyskanie efektów funkcjonalnych, np. przewodności elektrycznej. Przykładowo, powłoki domieszkowane Ti-DLC wykazują znaczną poprawę odporności tribologicznej w warunkach smarowania ciekłymi lub suchymi środowiskami, a także lepszą stabilność termiczną [5, 9]. Na rys. 3 przedstawiono struktury powłoki monolitycznej Ti-DLC i wielowarstwowej zawierającej naprzemiennie nanowarstwy DLC i Ti-DLC.

Grubości międzywarstwy gradientowej Cr-C i powłok na bazie DLC były podobne dla wszystkich nałożań, ze średnimi wartościami odpowiednio ok. 0,33 i ok. 1,55 μm . Wszystkie testowane powłoki wykazały dobrą przyczepność, ale porównawczo wyższą miała powłoka monolityczna, co tłumaczy się obecnością naprężeń wewnętrznych. Z kolei powłoki wielowarstwowe wykazały lepsze właściwości mechaniczne (do 33% wzrostu twardości i do 25% zwiększenia modułu sprężystości) w porównaniu z równoważnymi powłokami jednowarstwowymi.

Dodatkowe wprowadzenie do powłok DLC srebra (Ag) pozwala na zwiększenie przewodności elektrycznej [10]. Domieszkowanie niemetalami, takimi jak

krzem (Si), azot (N) lub fluor (F), umożliwia redukcję naprężeń własnych, zwiększenie stabilności chemicznej powłok oraz obniżenie współczynnika tarcia. Na przykład powłoki Si-DLC wykazują większą odporność na utlenianie i korozję, co jest istotne w środowiskach agresywnych chemicznie [6]. Dodatkowo wprowadzenie azotu może poprawiać właściwości mechaniczne powłok, poprzez wzmocnienie sieci wiązań węgiel-węgiel i węgiel-azot [4–8].

2. Przykłady zastosowań powłok diamentopodobnych w różnych sektorach przemysłu narzędziowego

2.1. Obróbka skrawaniem

Zastosowanie amorficznych powłok diamentopodobnych na płytkach ostrzowych do toczenia, frezach i wiertłach przyczyniło się do zwiększenia skrawalności wielu gatunków trudnoskrawalnych materiałów nieżelaznych, takich jak stop aluminium do kształtowania plastycznego (*wrought aluminium*), odlewany ciśnieniowo stop aluminium Al-Si (silumin), kompozyty wzmocniane włóknami węglowymi, grafit jako materiał na elektrody do obróbki EDM oraz spiekana ceramika cyrkonowa (ZrO_2) i krzemowa (Si_3N_4) [11, 12]. Narzędzia z powłoką nanoszoną techniką CVD stosuje się głównie w skrawaniu kompozytów wzmocnianych włóknami węglowymi (*carbon fiber reinforced plastic* – CFRP), kompozytów na osnowie metalowej (*metal matrix composite* – MMC), materiałów płytek obwodów drukowanych (*printed circuit board* – PCB).

W pracy [14] dokonano porównania odporności na zużycie ściernie powierzchni natarcia i przyłożenia ostrza z naniesionymi powłokami azotkowymi podwójnymi, potrójnymi i poczwórnymi CrN, TiAlN, TiAlSiN oraz z dodatkową warstwą wierzchnią DLC. Próby zużycia prowadzono w warunkach skrawania ortogonalnego stopu aluminium gatunku Al6061 (EN AW-6061) i stali gatunku AISI 4340 (DIN 36CrNiMo4). Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawia rys. 4.

Z rys. 4 wynika, że najmniejsze zużycie na obydwóch powierzchniach ostrza uzyskano, stosując powłoki podwójne TiAlN/DLC (dla stopu aluminium także z powłoką CrN/DLC). Fakt zmniejszenia zuży-

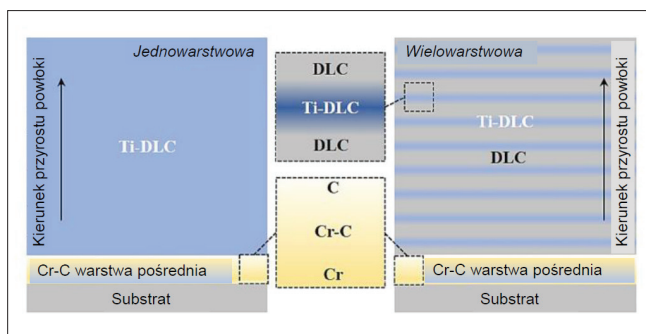


Fig. 3. Schematic structures of deposited doped monolayered mTi-DLC (left) and multilayered MTi-DLC/DLC (right) coatings [13]
Rys. 3. Schemat struktury nałożonej monolitycznej domieszkowanej powłoki mTi-DLC (po lewej stronie) i wielowarstwowej powłoki MTi-DLC/DLC (po prawej stronie) [13]

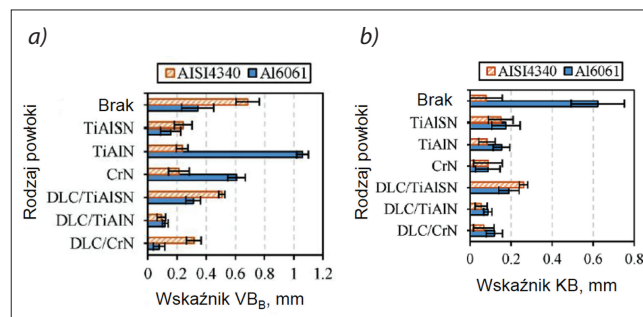


Fig. 4. Comparison of wear indexes for flank (a) and rake (b) faces of the cutting tools coated with single and double layers with additional DLC outer layer [12, 14]

Rys. 4. Porównanie wskaźników zużycia powierzchni przyłożenia (a) i natarcia (b) w skrawaniu ortogonalnym ostrzami bez powłoki, z powłokami pojedynczymi i podwójnymi z dodatkową warstwą DLC 12 [14]

cia ostrza przełożył się na wyraźnie mniejszą chropowatość powierzchni ($Ra \approx 1,24 \mu\text{m}$ i $1,45 \mu\text{m}$ odpowiednio dla aluminium i stali). Powłoki nakładano z wykorzystaniem techniki HiPIMS. Obróbka poprzez skrawanie ortogonalne w warunkach tarcia suchego ze stałymi parametrami skrawania (prędkość 240 obr./min, głębokość skrawania 2 mm, posuw 0,15 mm/obr.) została przeprowadzona na materiałach miękkich, ciągliwych (aluminium) i twardych, kruchych (stal ulepszona cieplnie). Powlekanie narzędzia spowodowały około 20–30-procentową redukcję temperatury kontaktu, chropowatości przedmiotu obrabianego i spęczenia/grubości wióra. Powłoki wierzchnie DLC poprawiły trwałość narzędzi do obróbki zarówno materiałów ciągliwych, jak i kruchych, co wykazała analiza Ramana. Spośród powłok DLC powłoka DLC/TiAlN wykazała najwyższą odporność na zużycie i dłuższą żywotność narzędzia, co potwierdziła analiza SEM-EDS.

Przykładem efektywnego połączenia niskiego tarcia i lepszego smarowania, charakterystycznych dla powłoki DLC z doskonałą odpornością na utlenianie i stosowaniem wyższych prędkości obróbki, co jest cechą charakterystyczną powłok TiAlN, jest zastosowanie dwuwarstwowej powłoki TiAlN/DLC do frezowania i wykańczania kutego stopu miedziowo-berylowego o komercyjnym oznaczeniu AMPCOLOY® 83 [15]. Badania SEM potwierdziły, że powłoka nałożona metodą PECVD składa się z dwóch warstw przedzielonych gradientowym przejściem. Powłoka miała twardość 5,6 GPa i moduł Younga 93,2 GPa. Ustalono, że po frezowaniu kutego stopu AMPCOLOY® 83 narzędzia powlekanie dodatkową warstwą DLC wykazały większą wydajność w porównaniu z narzędziami niepowlekanymi i o około połowę mniejsze zużycie ostrzy. Głównymi mechanizmami zużycia były ścieranie i utrata przyczepności/delaminacja materiału powłoki.

W skrawaniu ceramiki cyrkonowej dobre efekty pod względem wydajności zapewnia wiertło ceramiczne z azotku krzemu (Si_3N_4) pokryte dwuwarstwową powłoką z mikro-/nanokrystalicznego diamentu (MCD/NCD) [16]. Z kolei w operacjach frezowania najlepiej sprawdzają się wielowarstwowe powłoki diamentowe z powłoką wierzchnią o nanostrukturze NCD (MNMN-CD). Powłoka wielowarstwowa z mono- i nanowarstwami (MNMN-CD) charakteryzuje się doskonałą wydajnością obróbki, a jej żywotność jest 3–7,5 razy większa w porównaniu z powłokami diamentowymi jednowarstwowymi.

Wielowarstwowe powłoki typu DLC/TiAlN/TiN z domieszką TiAl (patrz rys. 3b), które łączą w sobie doskonałe właściwości smarne diamentopodobnego węgla (DLC) z twardymi, termicznie stabilnymi warstwami TiAlN/TiN, tworzą doskonałe narzędzia skrawające o wyjątkowo niskim tarczu (nawet około 0,15), dużej odporności na zużycie i wysokiej odporności na utlenianie, szczególnie w obróbce twardych materiałów z dużymi prędkościami skrawania. Skutecznie wypełniają one lukę między twardymi powłokami azotkowymi (takimi jak popularna powłoka z azotku tytanu i aluminium – TiAlN) i stałymi środkami smar-

nymi o niskim tarczu, wydłużając trwałość narzędzi bez konieczności stosowania chłodziw płynnych [17].

2.2. Mikroobróbka

Powłoki DLC są w tym przypadku efektywnym sposobem ograniczenia licznych problemów natury technologicznej, takich jak tworzenie narostu pogarszające jakość powierzchni, ograniczona wytrzymałość i trwałość narzędzia [12]. W szczególności mikroobróbka twardych materiałów skutkuje niską trwałością narzędzia. Dużym problemem dla katastroficznego zużycia narzędzia jest narost (BUE). Trwałość narzędzia można zwiększyć, optymalizując warunki skrawania [12]. Wykazano, m.in. w [18], że powlekanie mikro-narzędzi skrawających znacznie pomaga zwiększyć ich trwałość [13]. W badaniach literaturowych można zauważyć, że preferowane są powłoki AlCrN, TiAlN + AlCrN, AlCrN, TiAlN i diamentowe ze względu na ich wysoką odporność na zużycie. W pracy [18] przedstawiono wyniki badań wpływu materiałów powłokowych (AlTiN, TiAlN + AlCrN, AlCrN, TiAlN + WC/C i DLC) w mikrofrezowaniu superstopu Inconel 718. Narzędzia pokryte DLC i TiAlN + WC/C wykazały lepszą wydajność ze względu na ograniczenie tworzenia się narostu na krawędzi skrawającej (BUE). Z badań wydajności powłok z diamentu mikrokystalicznego, diamentu nanokrystalicznego, DLC i TiAlN podczas mikrowiercenia grafitu wynika, że powłoka z diamentu mikrokystalicznego wykazała lepszą trwałość niż pozostałe trzy powłoki [18]. Podobne spostrzeżenia odnotowano podczas mikrofrezowania czołowego stopu aluminium gatunku Al 6061-T6 narzędziami powlekanymi warstwą DLC. Zaobserwowano, że narzędzie powlekanie DLC charakteryzuje się dobrą wydajnością i zapewnia dłuższą żywotność.

W pracy [19] przedstawiono technologie wytwarzania mikrofrezów do obróbki miedzi beztlenujowej, które są szeroko stosowane w detektorach fizyki wysokich energii i elementach optycznych ze względu na niskie promieniowanie tła i wysoką przewodność cieplną.

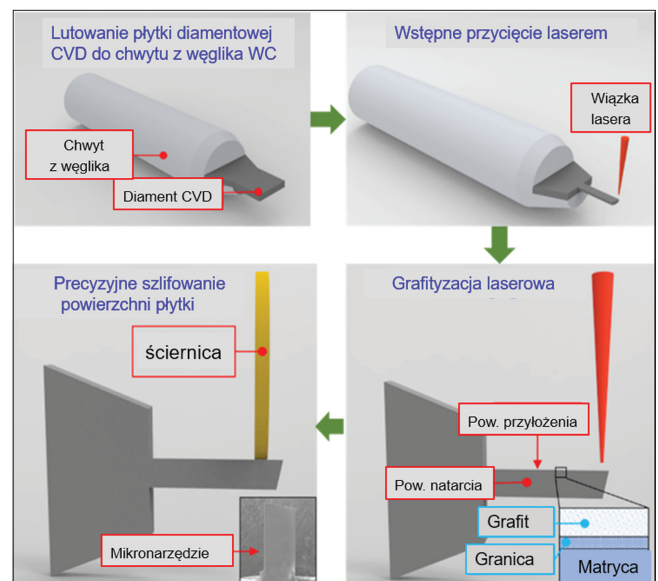


Fig. 5. Fabrication process of CVD CD coated micro-milling tools [19]
Rys. 5. Proces wytwarzania mikrofrezów z pokryciem CVD CD [19]

W tym celu zaproponowano złożony proces grafityzacji diamentu indukowanej laserowo z kolejnym, precyzyjnym szlifowaniem w celu wytworzenia diamentowego narzędzia CVD do mikrofrezowania, jak na rys. 5. Jako źródło ciepła do wywołania przemiany fazowej diament-grafit został użyty nanosekundowy laser impulsowy. Warstwę grafitu i warstwę poddaną wpływowi ciepła usunięto przez precyzyjne szlifowanie za pomocą ściernicy ceramicznej. Warstwa grafitu była bardzo łatwa do usunięcia, co skutkowało wysoką wydajnością produkcji. Wytworzono diamentowe narzędzia do mikrofrezowania CVD z ostrą krawędzią skrawającą i dobrą jakością powierzchni narzędzia. Zbadano siły wypadkowe skrawania, jakość obrabianej powierzchni, powstawanie zadziorów i zużycie narzędzia. Wyniki eksperymentalne w niniejszej pracy dostarczyły praktycznych danych dotyczących mikrofrezowania z wykorzystaniem diamentowych narzędzi CVD.

Wyniki wskazały [19], że narzędzie z powłoką diamentową CVD charakteryzuje się mniejszymi siłami wypadkowymi, mniejszym powstawaniem zadziorów i minimalną chropowatością powierzchni (średnia arytmetyczna chropowatości powierzchni $Ra = 53$ nm). Uszkodzenia narzędzia z powłoką diamentową CVD były spowodowane łuszczeniem i zużyciem powierzchni przyłożenia/natarcia, uszkodzenie narzędzia z węgla spiekane natomiast wiązało się z rozległym łuszczeniem, odpryskiwaniem powłoki i zużyciem powierzchni przyłożenia. Badania eksperymentalne wykazały lepszą wydajność narzędzia z powłoką diamentową CVD w porównaniu z dostępnymi w sprzedaży narzędziami z węgla spiekane z powłoką.

2.3. Narzędzia do obróbki plastycznej i odlewania ciśnieniowego

Narzędzia z powłokami diamentopodobnymi mają znaczący wpływ na procesy wytwarzania narzędzi do obróbki plastycznej, czyli form i matryc do tłoczenia, wytlaczania i kucia. Ze względu na powszechne stosowanie obróbki HSM [12] dokładność obróbki i trwałość szybkoobrotowych narzędzi frezarskich mają ogromny wpływ na chropowatość powierzchni i dokładność wymiarową tych wyrobów. W pracy [20] przedstawiono rozwój frezów z powłokami DLC do obróbki form grafitowych do gięcia na gorąco, wykorzystywanych w produkcji trójwymiarowych, giętych szkieł, takich jak ekrany ochronne i tylne pokrywy produktów elektronicznych 3C [20]. W tym celu powłoki z diamentu mikrokrystalicznego (MCD), diamentu submikrokrystalicznego (SMCD), diamentu nanokrystalicznego (NCD) oraz diamentu kompozytowego mikro-/nanokrystalicznego (MCD/NCD) naniesiono na komercyjne frezy walcowo-czołowe z promieniem naroża za pomocą urządzenia do chemicznego osadzania z fazy gazowej z gorących włókien (Hot Fiber CVD – HFCVD).

Wyniki wskazują, że frezy z powłoką MCD/NCD charakteryzują się doskonałą wydajnością skrawania w porównaniu z innymi narzędziami, dzięki kom-

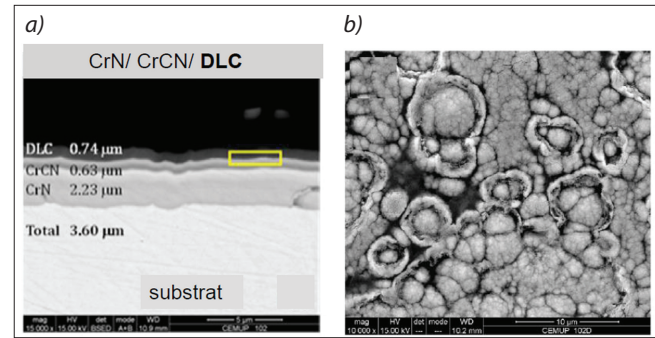


Fig. 6. SME image of cross-section of multilayer CrN/CrCN/DLC coating (a) and view of the die-casting mould surface after 135,000 injection cycles (b) [22]

Rys. 6. Obraz SEM struktury powłoki wielowarstwowej CrN/CrCN/DLC (a) i widok powierzchni gniazda formy wtryskowej po 135 000 cyklów wtrysku (b) [22]

pleksowym właściwościom, takim jak lepsza gładkość powierzchni i wyższa przyczepność do podłoża WC-Co. Co więcej, dokładność wymiarowa obróbki i chropowatość powierzchni podczas szybkiego frezowania form grafitowych do gięcia na gorąco z użyciem frezów z powłoką MCD/NCD mogą spełniać rygorystyczne wymagania stawiane produktom elektronicznym 3C, nawet bez konieczności lub z mniejszym zapotrzebowaniem na późniejsze docieranie i polerowanie. Ten kierunek jest zgodny z koncepcją wytwarzania oszczędnego (sustainable manufacturing) [12, 21].

W pracy [22] przedstawiono laboratoryjne i eksperymentalne badania zużycia wielowarstwowej powłoki o strukturze CrN/CrCN/DLC osadzonej metodą PVD z niezrównoważonym rozpylaniem magnetronowym (Unbalanced magnetron sputtering – UBMS) na powierzchni form wtryskowych. Powłoka (rys. 6a) składa się z trzech różnych warstw: CrN na dole, CrCN jako warstwy pośredniej i DLC (węgla diamentopodobnego) na górze. Należy zaznaczyć, że nakładanie warstw metodą UBMS zwiększa ich przyczepność do podłoża, co koresponduje dobrze z celem osadzania twardych, odpornych na ścieranie powłok (np. TiN, CrN, TiAlN) na skomplikowanych powierzchniach w przemyśle narzędziowym.

Powłoki nakładano na gniazda form wtryskowych ze stali P20, stosowanych we wtryskarkach do produkcji części samochodowych z polipropylenu wzmocnionego 30% (wag.) włóknami szklanymi. Ten materiał kompozytowy wykazuje silne działanie ściernie podczas formowania wtryskowego, co stwarza istotne wyzwania w zakresie odporności na zużycie powierzchni formy. Testy wykazały, że po 135 000 cykli wtrysku powłoka wielowarstwowa znacząco poprawiła parametry procesu w porównaniu z wynikami uzyskanymi wcześniej dla próbek niepowlekanych (rys. 6b). Na rys. 6b widać jeszcze pozostałe fragmenty wierzchniej warstwy DLC pomimo długotrwałego użytkowania w ekstremalnych warunkach tribologicznych. Dobre wyniki uzyskane przez tę powłokę wielowarstwową CrN/CrCN/DLC można częściowo przypisać właściwościom wierzchniej warstwy DLC ze względu na jej niski współczynnik tarcia [22].

W przypadku form kuziennych do kucia na zimno (*cold forging*) zwiększenie ich trwałości przez nakładanie powłoki pozwala ograniczyć o 10% koszty wytwarzania [23].

Jako ciekawostkę można podać przykład zastosowania dodatkowej warstwy zewnętrznej typu DLC jako pokrycia powierzchni tnących noży do cięcia drewna. W tym przypadku najlepsze właściwości wykazały powłoki dwuwarstwowe TiN/DLC (ok. 2,5 μm TiN plus 190 nm DLC) [24].

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego tematyki wywarzania i zastosowania powłok diamentopodobnych w doskonaleniu narzędzi technologicznych można autorytatywnie stwierdzić, że:

- stosowanie narzędzi pokrywanych warstwami diamentopodobnymi (DLC) jest efektywnym środkiem wzrostu ich trwałości, co przekłada się pozytywnie na wzrost wydajności i jakości obróbki,
- pokrywanie krytycznych z punktu widzenia zużycia powierzchni form do obróbki plastycznej i odlewania ciśnieniowego warstwami DLC zapewnia wzrost ich trwałości i jakości wytwarzanych części z materiałów o dużej ścierności,
- narzędzia z powłokami typu DLC przyczyniają się do rozwoju obróbki wielu gatunków trudnoskrawalnych materiałów nieżelaznych, takich jak stop aluminium do kształtowania plastycznego, odlewany ciśnieniowo stop aluminium Al-Si (silumin), kompozyty wzmacniane włóknami węglowymi, grafit jako materiał na elektrody do obróbki EDM oraz spiekana ceramika cyrkonowa (ZrO_2) i krzemowa (Si_3N_4),
- podstawowy kierunek rozwoju powłok wielowarstwowych i wielokrotnych obejmuje przede wszystkim technologie domieszkowania i bardziej wydajne techniki nanoszenia warstw.

LITERATURA

- [1] Madej M., Ozimina D., Pająk M., Właściwości powłok węglowych uzyskiwanych w procesach fizycznego osadzania z fazy gazowej, *Mechanik* 4 (2015) 151-156. Joanna Małecka ORCID ID : 0000-0003-0974-9328
- [2] Luo J., Liu M., Ma L., Origin of friction and the new frictionless technology-Superlubricity, *Nano Energy* 86/2 (2021) 10692
- [3] Robertson J., Diamond-like amorphous carbon, *Materials Science and Engineering R* 37/4-6 (2002) 127-281
- [4] Donnet C., Erdemir A., *Tribology of Diamond-Like Carbon Films*, Springer (2008)
- [5] Feng X., Xia Y., Tribological properties of Ti-doped DLC coatings under ionic liquids lubricated conditions, *Applied Surface Science* 258 (2012) 2433-2438
- [6] Musil J., Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness, *Surface and Coatings Technology* 207 (2012) 50-65
- [7] Sánchez-López J.C., Fernández A., Doping and alloying effects on DLC coatings (Chapter), *Tribology of Diamond-Like Carbon Films, Fundamentals and Applications*, Springer (2008), <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-49891-1>
- [8] Chi-Lung Chang, Jui-Yun Jao, Tang-Chun Chang, Wei-Yu Ho, Structural characterization of TiAl-doped DLC Coatings by Raman spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy, *Ming Dao Journal* 1(1) 115-124 (2005), Ming Dao University
- [9] Shtansky D.V., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Bashkova I.A., Sheveiko A.N., Levashov E.A., Multicomponent nanostructured films for tribological applications, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 28/1 (2010) 32-39
- [10] Chen J., Yanqiu X., Yichao H., Bu H., Tribological performance of Ag coating under boundary lubrication, *Tribology International* 110 (2017) 161-172
- [11] Grzesik W., *Advanced protective coatings for manufacturing and engineering*, Hanser Gardner Publications (2003), Cincinnati
- [12] Grzesik W., *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*, PWN (2018), Warszawa
- [13] Haneef M., Evaristo M., Morina A., Yang L., Trindade B., New nanoscale multilayer magnetron sputtered Ti-DLC/DLC coatings with improved mechanical properties, *Surface & Coatings Technology* 480 (2024) 130595, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130595>
- [14] Ibrahim M.S., Sulaiman M.H., Samin R., Yaakob Y., Kamiz S.L., Ridzuan M.J.M., Pauzi A.A., Sukindar N.A., Bienk K., Tool wear of DLC coating as top layer to CrN, TiAlN, TiAlN coatings in machining of steel and aluminium alloys, *Wear*, 558-559 (2024), 205574, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205574>
- [15] Sebbe N., Freitas F., Silva F., Casais R., Martinho R., Magalhães L., Alexandre R., Sales-Contini R., Characterization and wear behaviour of TiAlN/DLC coating deposited on cutting tools for milling AMPCOLOY® 83, November 2025, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI: 10.1007/s00170-025-16955-0
- [16] Wang Ch., Wang X., Sun F., Tribological behavior and cutting performance of monolayer, bilayer and multilayer diamond coated milling tools in machining of zirconia ceramics, *Surface and Coatings Technology*, Volume 353, 15 November 2018 49-57, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.074>
- [17] Chang Ch.L., Jao J.Y., Ho W.Y., Wang D.Y., Characteristics of TiAl-Doped DLC/TiAlN/TiN Multilayered Coatings Synthesized by Cathodic Arc Evaporation, *Solid State Phenomena*, Vol. 118 247-256, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.118.247>
- [18] Uzun I., Aslantas K., Bedir F., The performance of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micro-milling of Inconel 718, *Precision Engineering*, Volume 41, July 2015 135-144, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.01.002>Get rights and content
- [19] Zhao G., Li Z., Hu M., Li L., He N., Jamil M., Fabrication and performance of CVD diamond cutting tool in micro milling of oxygen-free copper, *Diamond and Related Materials*, Vol. 100, December 2019, 107589, <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107589>
- [20] Wang H., Yang J., Sun F., Cutting performances of MCD, SMCD, NCD and MCD/NCD coated tools in high-speed milling of hot bending graphite molds, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 276, February 2020, 116401, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116401>
- [21] Grzesik W., *Wizje i strategię wytwarzania. Cz. I*, *Mechanik*, 2010, nr 3 145-148
- [22] Silva F.J.G., Martinho R.P., Baptista A.P.M., Characterization of laboratory and industrial CrN/CrCN/diamond-like carbon coatings, *Thin Solid Films*, Vol. 550, 1 January 2014 278-284, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.11.042>
- [23] Dubar M., Dubois M., Dubar L., Wear analysis of tools in cold forging: PVD versus CVD coatings, *Wear* 259 (2005) 1109-1116
- [24] Chayeuski V., Zhylinski V., Kazachenko V., Tarasevich A., Taleb A., Structural and Mechanical Properties of DLC/TiN Coatings on Carbide for Wood-Cutting Applications, *MDPI, Coatings* 2023, 13, 1192, <https://doi.org/10.3390/coatings13071192>