

## 5. Podsumowanie i wnioski

Intensywny rozwój inżynierii materiałowej jest wynikiem między innymi wznoszącego zapotrzebowania na produkty o coraz wyższych własnościach użytkowych, których powierzchnia modyfikowana jest z wykorzystaniem nowoczesnych technologii inżynierii powierzchni, w celu zapewnienia im dłuższej żywotności lub niezawodności. W procesach skrawania oczekuje się wzrostu wydajności i jakości obróbki, co wymusza nieustanne poszukiwanie materiałów narzędziowych, charakteryzujących się pożądanymi własnościami użytkowymi. Najważniejszym wyzwaniem współczesnej technologii obróbki skrawaniem jest stałe podwyższanie trwałości wysokowydajnych narzędzi skrawających, wytwarzanych metodą metalurgii proszków, umożliwiającą obróbkę z optymalnymi prędkościami skrawania ze względu na typ obróbki (obrabiarka-narzędzie-przedmiot obrabiany), na sucho bez udziału cieczy chłodząco-smarujących. Istnieje duże zapotrzebowanie na ciągłe polepszanie własności eksploatacyjnych narzędzi skrawających. Badania dotyczące poprawy własności eksploatacyjnych narzędzi związane są między innymi z opracowywaniem nowych gatunków materiałów narzędziowych, doбором ich składu chemicznego, stosowaniem technik formowania wtryskowego proszku (gęstwy polimerowo-proszkowej), rozwojem technik nanoszenia cienkich przeciwzuzyciowych powłok, zwiększeniem uniwersalności i specjalizacji narzędzi, a także z automatyzacją i robotyzacją technologii ich wytwarzania. Faktem jest, że postęp w zakresie intensyfikacji obróbki skrawaniem, mierzony przez względny czas obróbki różnymi materiałami narzędziowymi, został zmniejszony o dwa rzędy wielkości w ciągu ostatnich stu lat: relatywny czas obróbki skrawaniem narzędziami wykonanymi ze stali węglowych w 1900 roku wynosił 100 minut, natomiast pod koniec XX wieku czas obróbki skrawaniem z wykorzystaniem węglików spiekanych pokrywanych powłokami złożonymi, np. wielowarstwowymi, gradientowymi, wynosił 0,5 minuty. Poprawa aspektów ekonomicznych zastosowania materiałów narzędziowych, wykorzystywanych w procesach skrawania, niezmiennie związana jest ze zwiększeniem efektywności obróbki i zmniejszeniem czasu jej trwania [4-6, 37, 47, 60].

Wyniki badań własnych, publikowanych w pracy, potwierdzają, że zastosowanie formowania wtryskowego proszku z użyciem lepischer polimerowych umożliwia wytwarzanie

narzędzi o pożądanej strukturze oraz wysokich własnościach wytrzymałościowych i stanowi podstawę do otrzymywania materiałów narzędziowych ceramiczno-metalowych. Wykonane badania wykazują, że zastosowanie lepiszcza w postaci parafiny i polietylenu umożliwia formowanie wtryskowe mieszaniny proszków węglików. Użycie środka powierzchniowo czynnego, jakim jest kwas stearynowy, umożliwia zwiększenie udziału proszku węglików w stosunku do udziału proszku w gęstwie bez kwasu stearynowego. Kwas stearynowy obniża lepkość badanych mieszanin polimerowo-proszkowych, zatem jego stosowanie jest uzasadnione. Udział lepiszcza w materiałach formowanych wtryskowo powinien być minimalny, umożliwiając jedynie formowanie gęstwy, ponieważ zbyt wysoki udział lepiszcza stwarza trudności podczas degradacji i powoduje większy skurcz oraz możliwość wystąpienia dystorsji podczas spiekania. Własności użytkowe materiałów narzędziowych wytwarzanych metodą formowania wtryskowego proszku zależą głównie od warunków formowania, które powinny być dobrane tak, by struktura próbek formowanych była jednorodna i nie wykazywała nieciągłości. Dobór warunków degradacji lepiszcza i spiekania umożliwia otrzymanie gotowych materiałów narzędziowych ceramiczno-metalowych, charakteryzujących się analogicznymi, a nawet wyższymi własnościami, niż ich odpowiedniki wytwarzane przez klasyczne prasowanie i spiekanie [11, 90, 93-99, 103, 105-107, 114-116, 130, 132-134, 140, 146].

Stosowanie przeciwzużyciowych powłok nanoszonych na materiały narzędziowe metodami fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) zalicza się do bardzo istotnych dokonań ostatnich lat w zakresie polepszania walorów eksploatacyjnych narzędzi. Rozwój i zastosowanie powłok wytwarzanych metodami fizycznego osadzania z fazy gazowej na narzędzia skrawające doprowadziło do znacznego przedłużenia żywotności narzędzi i realizacji wysokowydajnej obróbki materiałów trudnoobrabialnych.

Materiały narzędziowe oparte na węglikach wolframu, tytanu, tantalu, niobu oraz kobaltowej fazy wiążącej pokryte powłokami opartymi na azotkach metali przejściowych, takich jak TiN, CrN i TiAlN, z powodu ich wysokiej twardości, odporności na ścieranie i stabilności chemicznej są powszechnie stosowane jako narzędzia do obróbki ubytkowej. Jednak wykorzystanie tych powłok jest ograniczone ze względu na niewystarczającą odporność na utlenianie w temperaturze powyżej 500°C, która występuje zwykle podczas

obróbki szybkościowej [170, 173, 189, 194, 208, 215, 241]. W celu polepszenia funkcjonalności i wydajności narzędzi przeznaczonych na płytki skrawające poszukuje się pożądanego składu chemicznego i fazowego powłok oraz ich kompozycji, koncentrując się na pożądanym strukturze, zapewniającej wysokie własności użytkowe. W ostatnich latach badania powłok dotyczyły między innymi wprowadzania różnych pierwiastków (Al, Cr, Si, V, W, B, Zr), modyfikacji metod nanoszenia i konstytuowania warstw w nanoskali (nanowastwowych, supersieci, nanokompozytowych, nanokrystalicznych) [159, 161, 188-190, 192, 197, 198, 207, 224, 255]. Wśród wielu systemów powłokowych azotków metali przejściowych, szczególnie wieloskładnikowe powłoki na bazie tytanu, aluminium, chromu i krzemu znajdują się w obszarze badań podejmowanych przez wiele ośrodków naukowo-badawczych, zajmujących się inżynierią powierzchni. Powłoki TiAlSiN, AlTiSiN, CrAlSiN, AlCrTiN, AlCrSiN ze względu na korzystne własności: odporność na utlenianie i stabilność termiczną w podwyższonej temperaturze wydają się spełniać potrzeby ochrony powierzchni narzędzia pracującego z dużymi prędkościami skrawania w trudnych warunkach eksploatacji [169, 190, 197, 202, 242]. Powłoki te mogą być wytwarzane przez zastosowanie różnych metod fizycznego osadzania z fazy gazowej, takich jak np. katodowe odparowywanie łukowe, rozpylanie magnetronowe lub techniki hybrydowe. Szczególnie techniki katodowego odparowania łukowego i jego różne modyfikacje, charakteryzujące się wysokim stopniem jonizacji i wysoką energią jonów oraz dużą szybkością nanoszenia są szeroko stosowane do wytwarzania przeciwzuzyciowych powłok [167, 194, 222, 228, 230, 250, 255]. Oczekiwana jest ciągła konieczność rozwoju, zarówno badań własności eksploatacyjnych narzędzi skrawających z naniesionymi powłokami, jak i ich korelacja ze strukturą i jej modyfikacją w wyniku zmiany warunków nanoszenia powłok.

Oryginalnym osiągnięciem pracy było opracowanie i wytworzenie materiałów narzędziowych ceramiczno-metalowych o wymaganych własnościach warstwy wierzchniej i rdzenia dzięki wykorzystaniu hybrydowej technologii, łączącej formowanie wtryskowe proszku oraz nanoszenie nanokrystalicznych, nanokompozytowych powłok azotkowych typu CrAlSiN i AlTiSiN w zmodyfikowanym procesie katodowego odparowania łukowego CAE LARC.

Zastosowanie formowania wtryskowego proszku z użyciem lepiszczy polimerowych, jako technologii wysoko opłacalnej, o wysokiej wydajności, przy relatywnie niskich kosztach

wytwarzania, stanowi podstawę do otrzymywania materiałów narzędziowych o dowolnej zmienności faz węglkowych i materiału osnowy, charakteryzujących się dokładnym odwzorowaniem kształtu. Możliwości konstytuowania powłok, wynikające ze wzajemnego oddziaływania między wytwarzaniem, własnościami i wydajnością wytworzonego układu, pozwalają, przez właściwy ich dobór, tworzyć nanostrukturalne, nanokompozytowe powłoki, charakteryzujące się pożądaną strukturą i oczekiwanymi wysokimi własnościami użytkowymi.

Badania własne oraz analiza literaturowa dokonana w niniejszej pracy wskazują, że dzięki powszechnemu wykorzystaniu technik modyfikacji powierzchni materiałów narzędziowych ceramiczno-metalowych przez nanoszenie powłok, możliwe jest kształtowanie struktury oraz własności fizykochemicznych, mechanicznych i trybologicznych powierzchni roboczych narzędzi, co pozwala na osiągnięcie wzrostu własności eksploatacyjnych, i dowodzi w pełni zasadności przyjętej w pracy tezy. Przedstawiona koncepcja łącząca inżynierię powierzchni i technologię metalurgii proszków – formowanie wtryskowe proszku jest uzasadniona, czego wynikiem są opracowane oraz wytworzone materiały narzędziowe ceramiczno-metalowe z przeciwzużyciowymi powłokami, charakteryzujące się znacznie lepszymi własnościami użytkowymi w porównaniu do narzędzi niepokrywanych oraz z naniesionymi powłokami azotkowymi zawierającymi tytan, aluminium, co potwierdzono w badaniach eksploatacyjnych.

Bardzo istotnym dla weryfikacji przyjętej tezy, zakładającej że własności eksploatacyjne narzędzi skrawających są wynikiem zastosowania hybrydowej technologii wytwarzania materiałów narzędziowych ceramiczno-metalowych, łączącej formowanie wtryskowe proszku z modyfikacją warstwy wierzchniej przez nanoszenie nanokrystalicznych, nanokompozytowych przeciwzużyciowych powłok zmodyfikowaną metodą katodowego odparowania łukowego LARC, było porównanie okresu trwałości narzędzi z naniesionymi powłokami CrAlSiN i AlTiSiN z narzędziami niepokrywanych oraz materiałem narzędziowym pokrytym powłoką TiAlN podczas ciągłego skrawania na sucho, bez udziału cieczy chłodząco-smarujących i jednocześnie wyjaśnienie wpływu struktury powłoki na własności użytkowe narzędzi. Wyniki badań własnych wskazują na zasadność stosowania techniki formowania wtryskowego proszku i spiekania w celu wytworzenia spiekanych materiałów narzędziowych ceramiczno-metalowych, wytwarzanych na bazie węglków trudno topliwych i osnowy kobaltowej lub kobaltowo-niklowej. Dobierając kompozycję lepiszcza, jego udział w mieszaninie oraz sterując

warunkami usuwania lepiszcza i spiekania, możliwe jest wytwarzanie materiałów narzędziowych o porównywalnych własnościach mechanicznych do materiałów wytwarzanych klasyczną metalurgią proszków, zapewniając wytwarzanie w skali masowej narzędzi, cechujących się dużą złożonością, dokładnością i spełniających zapotrzebowanie rynku na produkty wytwarzane "na gotowo".

Na podstawie wykonanych badań i analiz stwierdzono, że zastosowanie materiałów narzędziowych ceramiczno-metalowych formowanych wtryskowo i spiekanych z naniesionymi nanokrystalicznymi i nanokompozytowymi powłokami azotkowymi na bazie chromu, aluminium, tytanu i krzemu, zapewnia maksymalnie 5-krotny wzrost trwałości eksploatacyjnej w porównaniu do narzędzi niepokrywanych i prawie 3,5-krotny w przypadku narzędzi pokrywanych powłoką TiAlN. Polepszenie własności eksploatacyjnych materiałów narzędziowych ceramiczno-metalowych uzyskane w wyniku nanoszenia powłok CrAlSiN i AlTiSiN wytwarzanych metodą CAE LARC należy wiązać ze wzbogaceniem ich składu chemicznego w wyniku dodatku chromu i aluminium, tworzących nanostrukturalne powłoki i wpływających na poprawę własności mechanicznych i trybologicznych, w tym mikrotwardości, odporności na korozję i przede wszystkim na odporność na utlenianie oraz wzrost stabilności termicznej w podwyższonej temperaturze. Dodatek krzemu w zakresie stężeń 3-6% powoduje zarówno wzrost mikrotwardości, jak i stabilności termicznej oraz odporności na utlenianie, w wyniku tworzenia wzdłuż granic ziarn amorficznego lub krystalicznego SiN<sub>x</sub> o wysokim stężeniu krzemu [19, 157, 167, 182, 190, 208, 209, 214, 241], a także znacząco wpływa na wielkość ziarna, powodując między innymi zmniejszenie rozmiaru kolumn w trakcie wzrostu powłoki, co potwierdzono badaniami w wysokorozdzielczym mikroskopie elektronowym. Niewątpliwy wpływ na wysokie własności eksploatacyjne wywiera struktura powłoki i szczególna kompozycja warstw tworzących powłokę. Różnorodność nanoszenia twardych azotków umożliwia tworzenie dowolnej kompozycji poszczególnych warstw, w szczególności stosowanie zarówno warstw o charakterze gradientowym (warstwa w2) i warstw wykazujących nanokrystaliczną i nanokompozytową strukturę (w3-w10). W wielu pracach [19, 153, 159, 161, 167, 207-213, 245] dowodzi się, że wielkość nanokrystalicznych ziarn powinna zawierać się w zakresie 3-10 nm, rozdzielonych 1-2 nm obszarami amorficznej fazy (dla powłok CrAlSiN)

lub obszarów krystalicznych o wysokim stężeniu krzemu (dla powłok AlTiSiN). Badane powłoki CrAlSiN oraz AlTiSiN wykazują nanokrystaliczną i nanokompozytową strukturę o wielkości ziarn 3-6 nm, zapewniając tym samym wysokie własności użytkowe.

Wymagana wysoka przyczepność powłok do podłoża i koherencja w całej jej objętości (między poszczególnymi warstwami) jest istotnym czynnikiem wpływającym na przydatność do zastosowań w obróbce ubytkowej. Szczególne znaczenie dla pożądanego wzrostu trwałości eksploatacyjnej narzędzi ma ukształtowanie struktury i własności w strefie połączenia: przyrdzeniowa warstwa-podłoże oraz w strefach między poszczególnymi warstwami. Prawidłowy dobór składu chemicznego i fazowego powłok oraz techniki nanoszenia i kompozycji poszczególnych warstw zapewnia wysoką ich przyczepność do podłoża i niewątpliwie może poprawić jej efektywne oddziaływanie na wzrost odporności na zużycie.

Na podstawie otrzymanych wyników badań oraz wykonanych analiz sformułowano następujące wnioski końcowe:

1. Udowodniono postawioną tezę pracy, wykazując, że o znaczącym wzroście trwałości eksploatacyjnej ostrza narzędzia skrawającego decyduje synergiczne oddziaływanie naprzemianległych nanokompozytowych warstw zewnętrznych powłoki, zapewniających m.in. wysoką twardość i odporność na ścieranie oraz odporność na rozprzestrzenianie się mikropełnięć powierzchniowych zapobiegających wyszczerbianiu się narzędzia, ułożonych na warstwie gradientowej o zmieniającym się liniowo stężeniu aluminium i chromu lub aluminium i tytanu, rekompensującej naprężenia między warstwami w strefie przylegania oraz przyrdzeniowej warstwy zapewniającej redukcję naprężeń, a tym samym bardzo dobre przyleganie powłoki do podłoża, z podłożem wytwarzanym z materiałów narzędziowych ceramiczno-metalowych metodą formowania wtryskowego proszku, umożliwiającą zapewnienie pożądanego, złożonego kształtu narzędzia.
2. Zastosowanie formowania wtryskowego proszku z użyciem lepiszczy polimerowych, jako technologii wysoko opłacalnej, o dużej wydajności, przy relatywnie niskich kosztach wytwarzania, stanowi podstawę do otrzymywania szerokiej gamy materiałów narzę-

dziowych ceramiczno-metalowych, o różnorodnej kompozycji faz węglkowych i materiału osnowy.

3. Nanoszenie na materiały narzędziowe ceramiczno-metalowe nanokrystalicznych, nanokompozytowych powłok typu CrAlSiN i AlTiSiN, o szczególnym układzie warstw i prawidłowo ukształtowanej strukturze i własnościach, a przede wszystkim w strefach przejściowych między poszczególnymi warstwami powłoki, a także między podłożem a warstwą najbliższą podłożu, umożliwia zapewnienie wielu pożądanych własności użytkowych narzędziom skrawającym, zapewniając im wzrost trwałości w trakcie eksploatacji.
4. Oczekiwane zmniejszenie poszczególnych rodzajów zużycia, w tym m.in. ściernego, cieplnego i adhezyjnego narzędzi skrawających, charakteryzujące się wydłużeniem okresu ich trwałości, przy jednoczesnej możliwości stosowania wyższych parametrów obróbki, w wyniku nanoszenia przeciwzużyciowych nanokrystalicznych, nanokompozytowych powłok na ich powierzchniach roboczych, należy wiązać z wysoką mikrotwardością warstwy wierzchniej, zarówno w temperaturze "pokojowej", jak i w temperaturze podwyższonej, wysoką odpornością na ścieranie i zmniejszeniem tarcia między narzędziem i materiałem obrabianym, z małym powinowactwem chemicznym materiału ostrza do materiału obrabianego oraz z zabezpieczeniem ostrza narzędzia przed utlenianiem i nadmiernym przegrzaniem, a także z korzystnym rozkładem wewnętrznych naprężeń ściskających, wpływających pozytywnie na zwiększenie przyczepności powłok do podłoża, co w konsekwencji prowadzi do poprawy warunków kontaktu trybologicznego w obszarze styku narzędzie–przedmiot obrabiany.