



Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny

Adam Gilewicz

Instytut Mechatroniki, Nanotechnologii
i Techniki Próżniowej

autoreferat rozprawy doktorskiej

**Wielowarstwowe twarde powłoki na bazie azotku chromu
z dodatkiem węgla w zastosowaniu
do narzędzi do obróbki drewna**

Promotor

prof. nadzw. PK dr hab. **Jerzy Ratajski**

Recenzenci

M. Dr h.c. prof. zw. dr hab. inż. **Leszek A. Dobrzański**
Politechnika Śląska

prof. zw. dr hab. inż. **Wojciech Kacalak**
Politechnika Koszalińska

Koszalin 2010

Spis treści

1. Streszczenie	3
2. Celowość podjęcia tematu pracy	3
3. Aktualny stan wiedzy	4
3.1. Drewno jako obrabiany materiał	4
3.2. Zjawiska cieplne występujące przy obróbce drewna	5
3.3. Powłoki przeciwzużyciowe	6
3.4. Zużywanie się i niszczenie powłoki	7
3.5. Azotek chromu i węgloazotek chromu	8
3.6. Katodowe odparowanie łukowe	8
3.7. Podsumowanie	8
4. Cel i zakres pracy	9
5. Metodyka badań	9
6. Metodologia pracy – technologia	9
7. Właściwości otrzymanych powłok	11
7.1. Powłoki jednowarstwowe	11
7.2. Powłoki wielowarstwowe	13
8. Badania eksploatacyjne	14
8.1. Badania półprzemysłowe	14
8.2. Badania przemysłowe	17
9. Wnioski	18
10. Bibliografia	19
11. Wykaz publikacji doktoranta	22

1. Streszczenie

Jednym z kierunków poprawy właściwości przeciwzużyciowych narzędzi do obróbki drewna i materiałów drewnopochodnych jest modyfikacja powierzchni narzędzi polegająca na powlekaniu ich roboczych powierzchni cienkimi powłokami węglików, tlenków i azotków głównie tytanu (Ti), chromu (Cr) i glinu (Al). Badania prowadzone są również nad zastosowaniem narzędzi z wkładkami z polikrystalicznego diamentu (DP) oraz powłok diamentopodobnych (DLC). Intensywnie badane są także powłoki wielowarstwowe. Tematyka podjęta w rozprawie doktorskiej wpisuje się właśnie w ten kierunek badań. Obejmuje ona formowanie nanostrukturalnych powłok wielowarstwowych na bazie chromu, nanoszonych techniką PVD na narzędzia wykonane ze stali szybko tnącej (HSS).

Istota koncepcji pracy polegała na wytwarzaniu cienkich, o grubości do 2-3 μm wielowarstwowych powłok przeciwzużyciowych zawierających powłoki Cr_2N , CrN oraz CrCN o różnej zawartości węgla, a następnie wytworzenie na ich powierzchni warstwy diamentopodobnego węgla (typu ta-C) charakteryzującej się niskim współczynnikiem tarcia w stosunku do drewna. Wielowarstwowe powłoki składają się z powtarzającego się dwuwarstwowego modułu Cr/CrN, CrN/ Cr_2N lub CrCN/CrN. Zmierzano do otrzymania najlepszych właściwości przeciwzużyciowych powłoki poprzez optymalizację stężenia węgla w węglazotku chromu, dobór grubości w skali nano jednofazowych warstw oraz optymalizację ilości powtórzeń dwuwarstwowego modułu.

W szczególności zakres pracy obejmował następującą sekwencję badań:

- Eksperymentalne określenie parametrów technologicznych procesu nanoszenia powłok CrN, Cr_2N , CrCN metodą łukową na podłożu ze stali szybko tnącej (HSS).
- Określenie właściwości fizycznych powłok.
- Na podstawie wyników badań wytypowanie powłok, które stanowiąc będą elementy struktury powłok wielowarstwowych.
- Otrzymanie powłok wielowarstwowych o założonej strukturze.
- Wytworzenie na powierzchni wielowarstwowej powłoki warstwy diamentopodobnego węgla (typu ta-C).
- Na podstawie badań, głównie tribologicznych, wytypowanie powłok do testów przemysłowych.

Efektem przeprowadzonych badań jest opracowana technologia nanoszenia powłok przeciwzużyciowych na narzędzia wykonane ze stali szybko tnącej (HSS), które stały się konkurencyjne do narzędzi wykonanych z węgla spiekane ze względu na relację: trwałość narzędzia / cena rynkowa.

2. Celowość podjęcia tematu pracy

Wzrastające wykorzystywanie drewna i materiałów drewnopochodnych w gospodarce powoduje, że istotne stają się każde działania zwiększające wydajność produkcji i obniżające jej koszty. Jedną z kluczowych w tym względzie kwestii jest podwyższenie jakości narzędzi skrawających umożliwiających zwiększenie parametrów obróbki i wydłużenie czasu ich użytkowania.

Obecnie stosowane w przemyśle drzewnym narzędzia wykonywane są głównie ze stali niskostopowych i szybko tnących, węglików spiekanych oraz z wykorzystaniem wkładek z polikrystalicznego diamentu. Jednakże, mimo dużej twardości i odporności na ścieranie, kruchość polikrystalicznego diamentu i węglików spiekanych z jednej strony, a duża odporność na zużycie udarowe stali powodują, że w przypadkach obróbki konkretnego

rodzaju drewna czy materiału drewnopochodnego zachodzi konieczność znalezienia kompromisu pomiędzy rodzajem narzędzia, jego ceną i ekonomiką produkcji.

Jedną z interesujących możliwości ułatwienia takiego wyboru jest wprowadzenie do praktyki przemysłowej w obróbce drewna narzędzi wykonanych ze stali szybko tnących pokrytych cienkimi, twardymi i odpornymi na zużycie warstwami z azotków i/lub węglików metali przejściowych otrzymanywanymi metodami plazmowo – próżniowymi.

Nie wszystkie materiały narzędziowe stosowane od wielu lat z powodzeniem do obróbki metali, gdzie ich wprowadzenie spowodowało przełom we wzroście możliwości produkcyjnych i jakości wyrobów, sprawdzają się w obróbce drewna. Procesy abrazyjne, adhezyjne i cieplne zachodzące podczas skrawania, stosunkowo dobrze poznane w odniesieniu do obróbki metali, w przypadku obróbki drewna nie są jeszcze dostatecznie zbadane, a ich wpływ na zużycie narzędzi jest niedoceniany.

Trwałość narzędzi do cięcia maszynowego stali z wkładkami pokrytymi TiCN przewyższa kilkakrotnie te, które były pokryte tylko TiN. Wiele innych przykładów wykorzystania warstw azotkowych z dodatkiem węgla [1-4] pozwoliło autorowi na zainteresowanie się problemem, rzadko prezentowanym w publikacjach, wpływu węgla na właściwości powłok układu Cr-C-N.

W powłokach wielowarstwowych nie występuje kolumnowy wzrost kryształów prowadząc do wolniejszego, niż przy powłokach jednowarstwowych, zużycia tribologicznego. Granice międzyfazowe między warstwami powłoki blokują ruch dyslokacji i zmieniają kierunki propagacji mikropęknięć zwiększając trwałość mechaniczną.

3. Aktualny stan wiedzy

Drewno i materiały drewnopochodne, z uwagi na ich szczególne właściwości wynikające ze złożonego składu chemicznego, niejednorodnej budowy i anizotropii struktury, wymagają stosowania innych, w porównaniu z obróbką metali, technik i technologii obróbki mechanicznej. Ponadto małe przewodnictwo cieplne tych materiałów oraz różny stan wilgotności powodują, że procesy zużycia ostrzy skrawających przebiegają w zupełnie inny, często bardziej drastyczny sposób niż w przypadku obróbki metali.

Prace związane z modyfikacją powierzchni narzędzi do obróbki drewna wspomnianymi metodami skupiają się obecnie na wykorzystaniu jedno i wielowarstwowych powłok (CrN, Cr₂N) [5-10], CrAlN [11], TiZrN [7], a także TiAlN [6,11] i DLC [12,13]. Powłoki z tych materiałów umożliwiają wydłużenie czasu eksploatacji narzędzi porównywalnie do czasu pracy narzędzi z wkładkami z węgla spiekane, a są przy tym odporne na zużycie udarowe. Istnieją również przesłanki wskazujące na możliwości otrzymania lepszych właściwości termofizycznych i tribologicznych powłok wytwarzanych z materiałów trójskładnikowych Me(CN) [14-16], w porównaniu ze związkami dwuskładnikowymi MeN lub MeC.

3. 1. Drewno jako obrabiany materiał

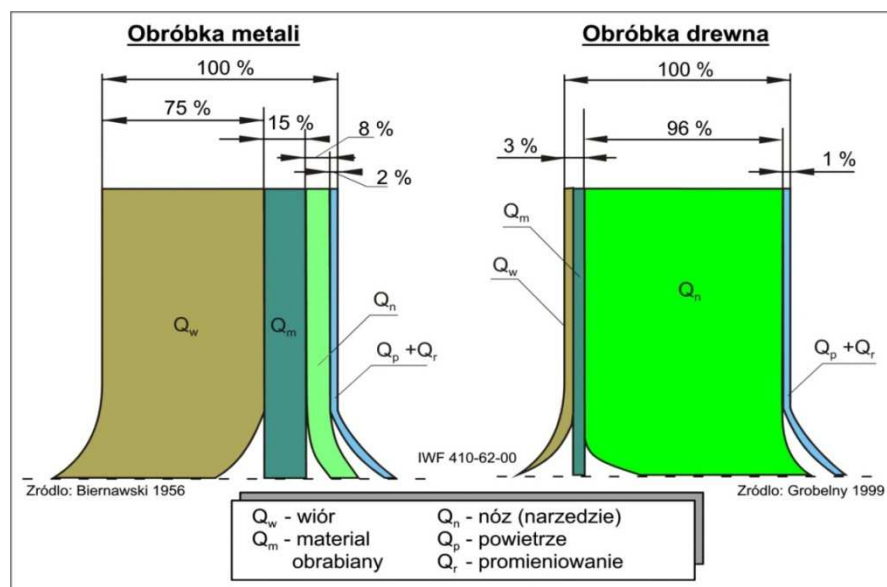
Warunki pracy narzędzi skrawających drewno i mechanizmy ich zużycia są uwarunkowane cechami struktury drewna. Jest ono materiałem porowatym o budowie włóknistej i silnej anizotropowości właściwości fizycznych i mechanicznych w zależności od kierunku anatomicznego [17-19]. Wskutek anizotropii trójwymiarowej drewna warunki skrawania różnią się znacznie w zależności od położenia drewna względem narzędzia podczas skrawania. Z tribologicznego punktu widzenia pomiędzy powierzchnią ostrza a ścianami komórek występuje czyste tarcie. Współczynnik tarcia zmienia się w zależności od wilgotności (zwiększenie wilgotności - zmniejszenie współczynnika tarcia [20]) i gęstości drewna (ze wzrostem gęstości - obniżenie współczynnika tarcia [21]).

Zjawiska występujące w węźle tribologicznym drewno-narzędzie oraz stale rosnące wymagania dotyczące wydajności procesów obróbki powodują, że dużego znaczenia nabiera problem trwałości narzędzi skrawających. Stąd ciągłe poszukiwania nowych materiałów narzędziowych lub modyfikacja powierzchni roboczych twardymi powłokami bardziej odpowiednimi do obróbki drewna i tworzyw drzewnych.

3.2. Zjawiska ciepłe występujące przy obróbce drewna

Zużywanie się narzędzi zależy od wielu czynników: rodzaj materiału z jakiego wykonano ostrze, właściwości materiału obrabianego, parametrów obróbki, stanu przygotowania narzędzia do pracy, stanu obrabiarki [21-27]. Mimo tego nie udało się dostatecznie wyjaśnić szybkiego zużycia narzędzia podczas obróbki drewna i tworzyw drzewnych.

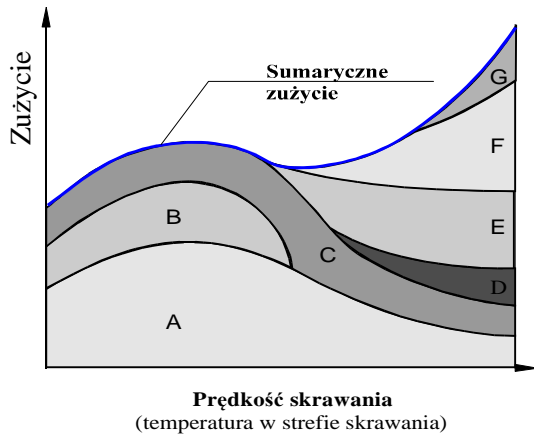
Właściwości cieplne drewna i materiałów metalowych znacząco się różnią. W temperaturze pokojowej 96% ciepła tarcia wydzielonego na styku powierzchni stali szybkootanęcej i drewna przenika do metalu, a zaledwie 3% jest odprowadzane przez drewno. Rozchodzenie się ciepła ze strefy obróbki przy skrawaniu drewna i tworzyw drzewnych przebiega zatem odmiennie niż przy obróbce metali (rys. 1).



Rys. 1. Porównanie rozkładu strumieni ciepła na ostrzu w trakcie skrawania metalu i drewna [22].

Znacznie więcej ciepła jest odprowadzane przez ostrze, a stosunkowo niewiele przez powstający wiór i obrabiany element. Ponadto, ze względu na higroskopijność drewna nie stosuje się cieczy roboczych, które są powszechnie używane przy obróbce metali.

Oprócz ciepła także różna prędkość skrawania, wielkość posuwu i grubość warstwy skrawanej decydują o zróżnicowanym zużyciu narzędzi – rys. 2.



Rys. 2. Występowanie i udział w zużyciu łącznym poszczególnych postaci zużycia ostrza w funkcji temperatury skrawania wg Königa [28].

- A - zużycie adhezyjne,
- B - zużycie mechaniczne,
- C - ścieranie mechaniczne,
- D - zużycie cieplne,
- E - zużycie przez utlenianie,
- F - zużycie dyfuzyjne,
- G - wysokotemperaturowa deformacja plastyczna.

Zmniejszenie zużycia narzędzi możliwe jest poprzez poprawę ich właściwości użytkowych poprzez:

- modyfikację kształtu narzędzia,
- modyfikację właściwości materiału narzędzia np. poprzez obróbkę cieplno-chemiczną,
- modyfikację powierzchni roboczych narzędzia poprzez nałożenie cienkiej twardej powłoki o odpowiednich właściwościach przeciwzużyciowych.

3.3. Powłoki przeciwzużyciowe

Z punktu widzenia tribologicznych procesów zachodzących na powierzchniach ostrza w trakcie skrawania metalu, drewna lub materiałów drewnopochodnych wyróżnia się dwa powody w celu właściwego zabezpieczenia powierzchni roboczych twardymi powłokami: zwiększenie odporności na zużycie materiału powierzchniowego i zmianę warunków tarcia w strefie styku (obniżenie temperatury skrawania, skrawanie bez konieczności stosowania płynów obróbkowych i zwiększenie prędkości skrawania). O wyborze odpowiednich powłok spełniających powyższe wymagania dodatkowo należy wziąć pod uwagę rodzaj obróbki oraz rodzaj materiału skrawanego (rodzaj drewna lub materiałów drewnopochodnych).

Powłoki na narzędzia do obróbki drewna i materiałów drewnopochodnych można zaliczyć do czterech grup:

- oparte na TiAlN,
- oparte na CrN,
- oparte na DLC,
- inne.

TiAlN jest powszechnie stosowaną powłoką dla procesów charakteryzujących się dużą szybkością skrawania. Powłoki takie były wprowadzane na narzędzia z wkładkami z węglików oraz na narzędzia ze stali szybko tnącej (HSS) stosowane do obróbki materiałów drewnopochodnych.

Nowe podejście do budowy powłok przeciwzużyciowych zostało zaprezentowane przez Stuebera [30]. Polega na projektowaniu powłok nanokompozytowych złożonych z trójskładnikowych lub czteroskładnikowych metastabilnych twardych faz takich jak (Ti,Al)(C,N) czy (Ti,Cr)(C,N) i amorficznego węgla (a-C). Charakterystyczną cechą tych powłok jest stabilność architektury; nie zmienia się podczas wygrzewania w próżni przez 4 h w temperaturze 1000°C. Nie obserwuje się również rekryształizacji. Wynik ten wskazuje na

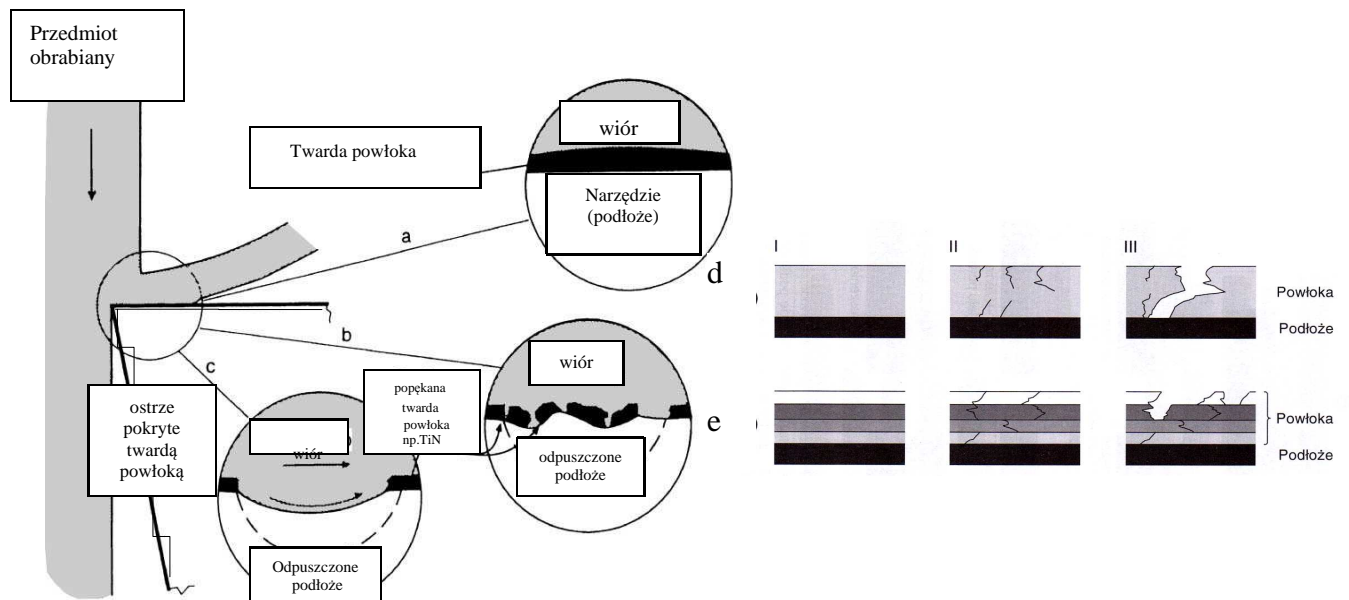
istnienie w warstwach bardzo stabilnych granic ziaren. Dlatego takie powłoki są obiecujące dla rozwoju zaawansowanych technologicznie powłok przeciwzużyciowych stosowanych w przypadku niezwykle obciążonych narzędzi.

Faga [31] i inni badali wpływ stosowania powłok naniesionych na stal szybko tnącą HSS18, zwykle używaną do produkcji noży do strugania wzdłużnego i poprzecznego oraz na stal stopową 90CMV8 stosowaną na narzędzia do rozdrabniania wiórów. Powłoki wielowarstwowe na bazie CrN wykazują lepsze właściwości przeciwzużyciowe niż jednowarstwowe, ale jest to zależne od rodzaju podłoża. Najwyższą wydajność wykazują powłoki CrN naniesione metodą katodowego odparowania łukowego na nieazotowane podłożach. Także powłoki CrN naniesione na noże po procesie niskotemperaturowego azotowania podłoża wykazują znaczący wzrost trwałości oraz wykazują powolne stałe zużywanie się.

Prace związane z powłokami opartymi na CrN wytwarzanymi metodami PVD do poprawy odporności na zużycie narzędzi do obróbki drewna są przedstawiane w pracach [23,24,26,32-41]. Stosowano różne materiały podłożowe i metody nakładania. Uzyskano informacje o wpływie napięcia podłoża na naprężenia wewnętrzne w powłokach, twardość, adhezję, morfologię powierzchni. Stwierdzono, że przy zbyt grubej warstwie krawędzie narzędzi skrawających zaokrąglają się, co jest przyczyną wzrostu ich zużycia.

3.4. Zużywanie się i niszczenie powłoki

Narzędzia ze stali szybko tnącej z twardą powłoką ulegają miejscowemu odkształceniu plastycznemu w wyniku odpuszczania spowodowanego wysoką temperaturą w strefie kontaktu wióra i narzędzia. W wyniku tego następuje pękanie warstwy i miejscowa delaminacja. Na rys. 3 przedstawia mechanizm zużywania się twardej powłoki w procesie skrawania na sucho z dużymi prędkościami oraz mechanizm niszczenia powłoki jedno i wielowarstwowej.



Rys. 3. Proces zużywania się twardej powłoki na ostrzu noża w czasie skrawania na sucho z dużą prędkością [14], a) stan początkowy, b) odpuszczanie podłoża i pękanie powłoki, c) delaminacja. Mechanizm niszczenia powłok [42]: d) jednowarstwowych, e) wielowarstwowych.

W powłoce jednowarstwowej inicjacja mikropęknięć pod wpływem nacisków występujących np. w strefie skrawania następuje zarówno od jej powierzchni (zawsze), jak i od strony

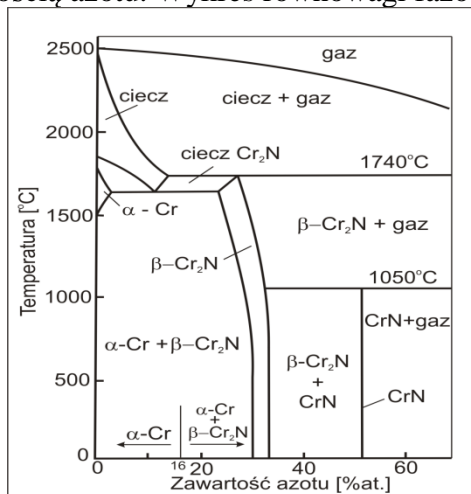
podłoża (rzadziej). Propagacja i łączenie się mikropeknięć niszczy powłokę na całej grubości (w przekroju poprzecznym). W powłoce wielowarstwowej inicjacja mikropeknięć rys. 3 [42,43] następuje głównie na powierzchni powłoki. Granice międzyfazowe między warstwami powłoki blokują ruch dyslokacji [44], zmieniają kierunki propagacji mikropeknięć i zwiększają trwałość mechaniczną.

Cienkie powłoki nakładane na narzędzia w istotny sposób polepszają ich parametry eksploatacyjne. Powinny one spełniać wiele wymagań w każdej ze stref układu twarde powłoka-podłoże tj.; na powierzchni, w warstwie, w strefie przejściowej pomiędzy powłoką i podłożem i samym materiałem narzędzia. Twarda powłoka, będąca w kontakcie z materiałem obrabianym, powinna się charakteryzować małą reaktywnością z obrabianym materiałem oraz możliwie niskim współczynnikiem tarcia [14,42,45]. W swojej objętości powinna cechować się dużą twardością, a jednocześnie dobrą ciągliwością, aby zapewnić rozładowywanie naprężeń własnych bez obawy jej uszkodzenia i pęknięcia. Dobra przyczepność to podstawowa cecha projektowanej powłoki. Dyfuzyjna strefa przejściowa pomiędzy materiałem podłoża i nałożoną warstwą powinna zapewnić dobrą adhezję [46-48].

3.5. Azotek chromu i węglazotek chromu

Ze względu na doskonałe właściwości: dobrą odporność na zużycie, wysoką odporność korozyjną, wyjątkową odporność na ścieranie, azotek chromu znalazł szerokie zastosowanie jako powłoka przeciwwzyciowa na narzędzia do skrawania, frezowania i gwintowania elementów wykonanych z tytanu i jego stopów, mosiądzu, miedzi i innych metali kolorowych, modyfikacji powierzchni form odlewniczych, stempli a także części maszyn. Azotek chromu charakteryzuje się dużą odpornością chemiczną i wykazuje wyjątkowo małe powinowactwo w stosunku do obrabianych metali nieżelaznych. Powłoki te można otrzymywać technikami PVD, zarówno magnetronowymi jak i łukowymi [49,50].

W układzie równowagi chromu i azotu istnieją dwie fazy: Cr_2N (faza β) o sieci heksagonalnej i CrN (faza γ) o sieci regularnej ściennie centrowanej. Obie fazy różnią się zawartością azotu. Wykres równowagi fazowej Cr-N przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wykres fazowy Cr-N [51].

W procesach PVD azotki chromu powstają w wyniku reakcji plazmowo-chemicznych zachodzących w środowisku zjonizowanych par chromu i atmosfery reaktywnej tworzonej przez wzbudzone i zjonizowane molekuly gazu. W zależności od energii cząstek plazmy i składu atmosfery, można tworzyć różne kompozycje powłok, jednowarstwowe CrN lub Cr_2N oraz wielowarstwowe $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{N}$, $\text{CrN}/\text{Cr}_2\text{N}$ [51-54].

Powłoki CrCN łączące cechy azotku i węgla chromu, mają nieznacznie wyższą twardość i niższy współczynnik tarcia od CrN oraz wyższą wytrzymałość zmęczeniową i odporność na korozję. Ponadto wprowadzenie małych ilości węgla do układu Cr-N powoduje zmniejszenie naprężeń wewnętrznych skutkujących wzrostem adhezji warstw.

3.6. Katodowe odparowanie łukowe

Istnieje wiele prac [6-9,14,46,55,56] które pokazują, że spośród metod nakładania twardych powłok na narzędzia dominującą metodą jest metoda łukowa z zimną katodą. Otrzymana plazma charakteryzuje się wysokim stopniem jonizacji 30-100% [10], przy średniej energii kinetycznej cząstek 5÷80 [eV] (energia cząstek zależy od ciśnienia i napięcia między katodą i anodą) i w konsekwencji proces katodowego odparowania łukowego charakteryzuje się wysoką wydajnością nakładania powłok [57]. Do zalet tej metody można zaliczyć także dobrą jakość warstw w szerokim zakresie parametrów wytwarzania oraz jednorodność powłok [1,11,13,14,44].

3.7. Podsumowanie

Koncepcja pracy zakładała wytworzenie powłoki wielowarstwowej o całkowitej grubości ok. 3 μm , złożonej z wielokrotnie powtarzającego się dwuwarstwowego elementu zbudowanego z warstwy azotków chromu i warstwy węgloazotków chromu. Przyjęto, że właściwy skład fazowy warstwy azotku chromu (CrN, Cr₂N) zapewni stabilność termiczną i obojętność chemiczną powłoki, wielowarstwowość zwiększy jej odporność na pękanie, zaś właściwa ilość węgla w warstwie węgloazotku chromu zmniejszy współczynnik tarcia drewna o powłokę. Ponadto postanowiono sprawdzić, na zasadzie badań wstępnych, właściwości takiej powłoki po nałożeniu na nią cienkiej (poniżej 1 μm grubości) warstwy diamentowej (typu ta-C – tetraedryczny amorficzny węgiel).

4. Cel i zakres pracy

Celem naukowym pracy jest zdobycie wiedzy dotyczącej wpływu węgla na zmianę właściwości przeciwzużyciowych powłok wielowarstwowych wytworzonych z azotku chromu.

Tezy rozprawy

W szczególności celem realizacji pracy jest udowodnienie następującej **tezy**:

stosując powłoki azotku chromu uzyska się podwyższenie trwałości narzędzi wykonanych ze stali szybkoobrotowej oraz jakości powierzchni obrabianej, jeżeli:

- 1) **wytworzy się powłokę o powtarzającym się kilkakrotnie dwuwarstwowym module Λ ,**
- 2) **jako składniki modułu powłoki zastosuje się warstwy CrN i CrCN o różnych grubościach i zmiennej zawartości węgla w węgloazotku chromu,**
- 3) **na powierzchni powłoki wytworzy się dodatkową warstwę diamentopodobnego węgla (typu ta-C).**

Efektem praktycznym będzie opracowana technologia próżniowo-plazmowa nakładania powłok zwiększająca odporność modyfikowanych narzędzi na zużycie ścierne, korozję w wysokiej temperaturze i w obecności substancji organicznych oraz udary mechaniczne. Celem jest osiągnięcie trwałości i jakości modyfikowanych powłoką narzędzi wykonanych ze stali szybkoobrotowej porównywalnej do narzędzi wykonanych z węglików spiekanych.

5. Metodyka badań

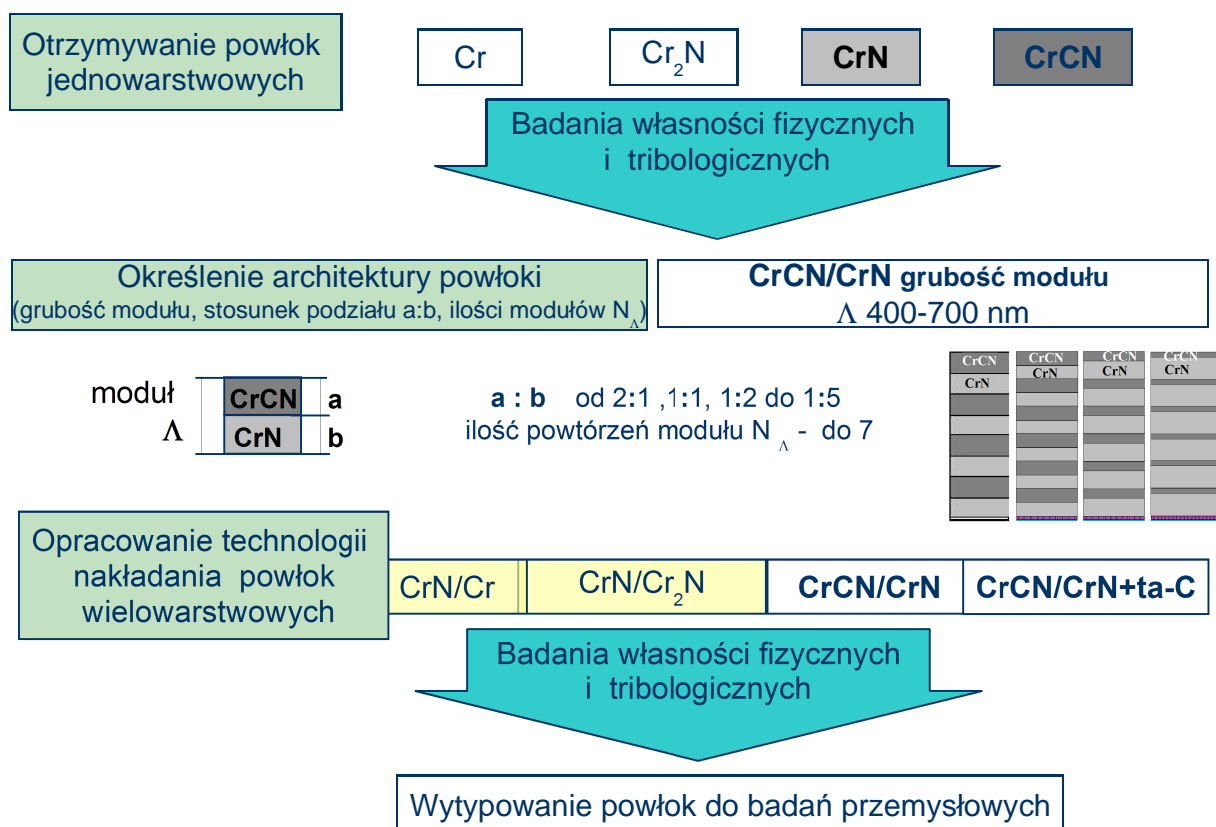
Otrzymane w procesach technologicznych powłoki charakteryzowano następującymi metodami:

- 1) dyfrakcja rentgenowska - struktura i skład fazowy, wielkość krystalitów, pomiar naprężeń w powłoce,
- 2) dyfrakcja niskokątowa – skład fazowy,
- 3) mikroanalizator EDX, WDS - skład chemiczny powłok,
- 4) metoda rysy i Rockwella - adhezja,
- 5) metoda Vickersa , nanointender - twardość, mikrotwardość,
- 6) pin-on-disc - współczynnik tarcia, oraz jego zależność temperaturowa, zużycie powłok,
- 7) mikroskopia skaningowa, optyczna - morfologia powierzchni i przełomów,
- 8) profilografometr - chropowatość powierzchni, wielkość stępienia i zużycie narzędzi
- 9) Calotest - grubość powłok,
- 10) badania eksploatacyjne narzędzi na skalę półprzemysłową i przemysłową.

Celem tych badań było określenie struktury i właściwości mechanicznych zaprojektowanych i otrzymanych powłok oraz ocena możliwości zastosowania wybranych powłok na narzędzia do obróbki drewna.

6. Metodologia pracy – technologia

Koncepcję pracy przedstawiono na rys. 5. Obejmowała ona wytworzenie powłok jednowarstwowych, określenie ich właściwości i wytypowanie powłok do powłoki wielowarstwowej. Zaprojektowano budowę takiej powłoki uwzględniając grubość i ilość modułów, stosunek podziału warstw w module. Opracowano technologię nakładania takich powłok, wytworzono je i określono właściwości fizyczne i tribologiczne. Ostatnim etapem było wytypowanie powłok, uwzględniając ich właściwości, do badań przemysłowych.



Rys. 5. Schemat ideowy otrzymywania powłok jedno- i wielowarstwowych.

Powłoki otrzymywano metodą katodowego odparowania łukowego. Parametry procesów zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie parametrów procesów.

Rodzaj powłoki	Temperatura podłoża [°C]	Ciśnienie azotu [Pa]	Natężenie przepływu acetyleny [sccm]	Czas osadzania [min]
Powłoki jednowarstwowe w układzie Cr – N				
Cr ₂ N	300 - 400	0,2	-	110
CrN + Cr ₂ N	400	0,8 – 1,6	-	
CrN	300 - 400	1,8 – 2,0	-	
Powłoki jednowarstwowe w układzie Cr – C – N				
CrCN	400	1,8	5 - 150	110
CrC	400	1,8	320	

Powłoki wielowarstwowe Cr₂N/CrN						
Temperatura podłoża [°C]	Ciśnienie azotu [Pa]		Budowa (architektura)	Czas osadzania [min]		
	Cr ₂ N	CrN	Ilość modułów N _A	CrN τ ₁	Cr ₂ N τ ₂	całkowity N _A ·Στ _i
400	0,2	1,8	7	8	6	98
300	0,2	1,8	7	8	6	98

Powłoki wielowarstwowe Cr/CrN						
Temperatura podłoża [°C]	Ciśnienie argonu [Pa]	Ciśnienie azotu [Pa]	Budowa (architektura)	Czas osadzania [min]		
	Cr	CrN	Ilość modułów N _A	Cr τ ₁	Cr ₂ N τ ₂	całkowity N _A ·Στ _i
400	0,5	1,8	7	5	8	91
300	0,5	1,8	7	5	8	91

Powłoki wielowarstwowe CrCN/CrN							
Temperatura podłoża [°C]	Ciśnienie azotu [Pa]	Natężenie przepływu C ₂ H ₂ [sccm]	Budowa (architektura)		Czas osadzania [min]		
			Ilość modułów N _A	Podział a:b	CrN τ ₁	CrCN τ ₂	całkowity N _A ·Στ _i
300 - 400	1,8	10	4	2:1	10	12	88
300 - 400	1,8	5	4	1:1	10	12	88
300	1,8	10	6	1:5	11	2	78
300	1,8	10	6	1:2	9	6	90
300	1,8	10	6	1:1	9	9	108
300 - 400	1,8	5 - 20	7	1:5	11	2	91
300 - 400	1,8	10	7	1:2	9	6	105
300	1,8	10	7	1:1	9	9	126

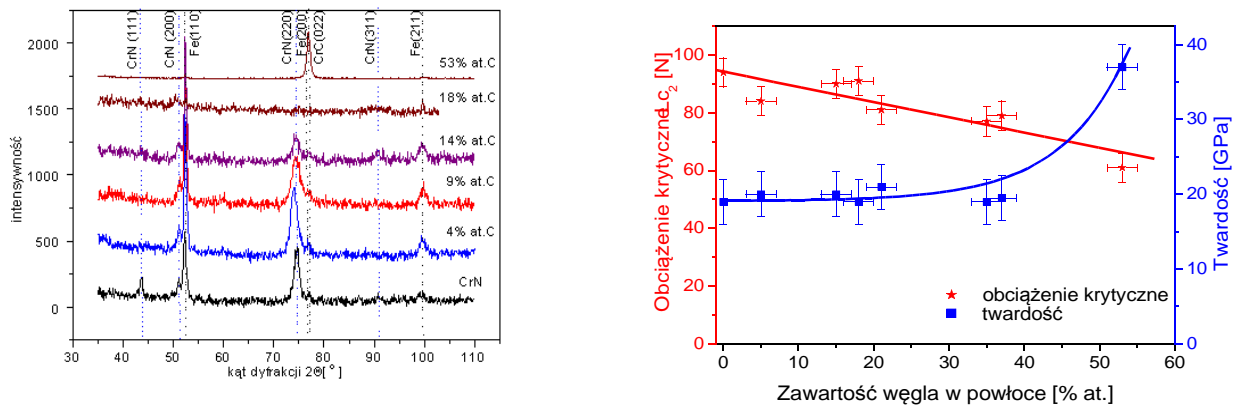
7. Właściwości otrzymanych powłok

7.1. Powłoki jednowarstwowe

Analiza dyfraktogramów rentgenowskich (rys. 5a) badanych powłok CrCN nie wykazała istnienia związków chromu z węglem jedynie faz Cr₂N i CrN. Efekt ten można wyjaśnić zajmowaniem przez węgiel pozycji międzywęzłowych w sieci CrN.

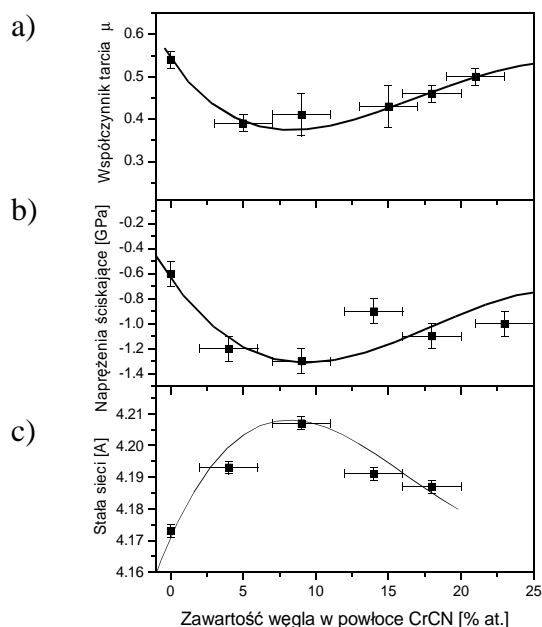
a)

b)



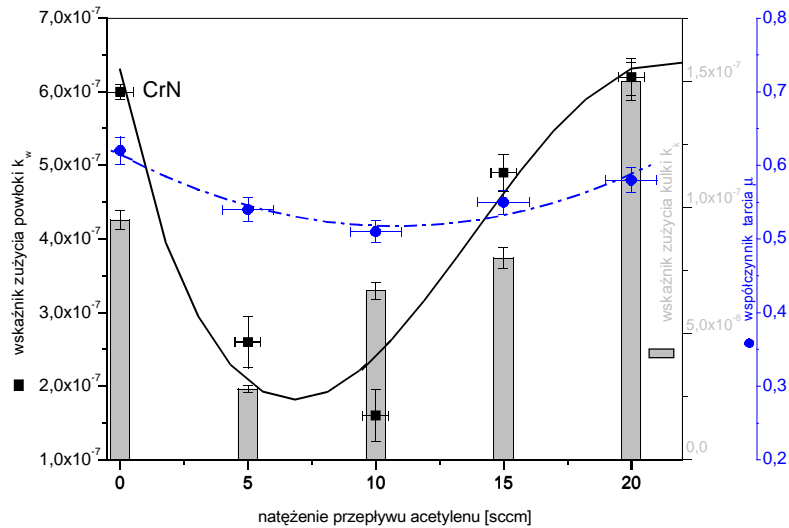
Rys. 5. a) dyfraktogramy rentgenowskie promieniowanie Co - K_{α} , b) twardość i obciążenie krytyczne powłok jednowarstwowych CrCN ze zmienną zawartością węgla.

Wniosek ten potwierdza maksimum naprężeń ściskających (rys. 6b) i stałej sieci (rys. 6c) dla zawartości węgla w powłoce CrCN około 10 % at. Węgiel początkowo wbudowuje się między węzły sieci CrN powodując wzrost naprężeń i zwiększając stałą sieci krystalograficznej. Po przekroczeniu zawartości 10 % at. podstawia azot w sieci CrN zmniejszając w ten sposób naprężenia i stałą sieci. Minimum współczynnika tarcia (rys. 6a) osiągnęte przy zawartości węgla 7-10 % at. może być związane z tworzeniem cienkiej warstwy węgla ulegającego grafitu działającego jak smar stały i obniżającemu oddziaływanie powłoki i alundowej przeciwpróbki. Podobny efekt rejestrował Choi [58].



Rys. 6. Współczynnik tarcia (a), naprężenia (b) i stała sieci (c) powłok CrCN.

Wskaźnik zużycia badanych powłok osiąga wartość minimalną dla przy wyżej określonej zawartości węgla. Podobny efekt liniowej zależności między współczynnikiem tarcia i wskaźnikiem zużycia dla kulki Si_3N_4 przedstawił Zhou [59].



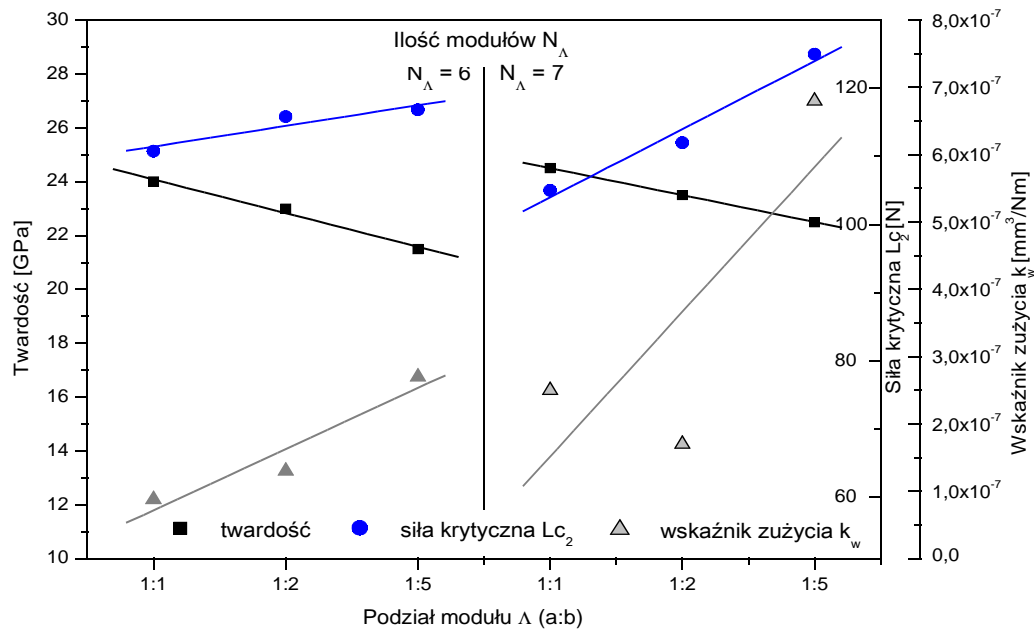
Rys. 7. Wskaźnik zużycia powłoki k_w , przeciwpróbki k_k i współczynnik tarcia μ dla powłok jednowarstwowych CrCN otrzymywanych przy zmiennym natężeniu przepływu acetyleny. Parametry wyznaczone w teście tarcia przy obciążeniu 30 N.

Podsumowanie

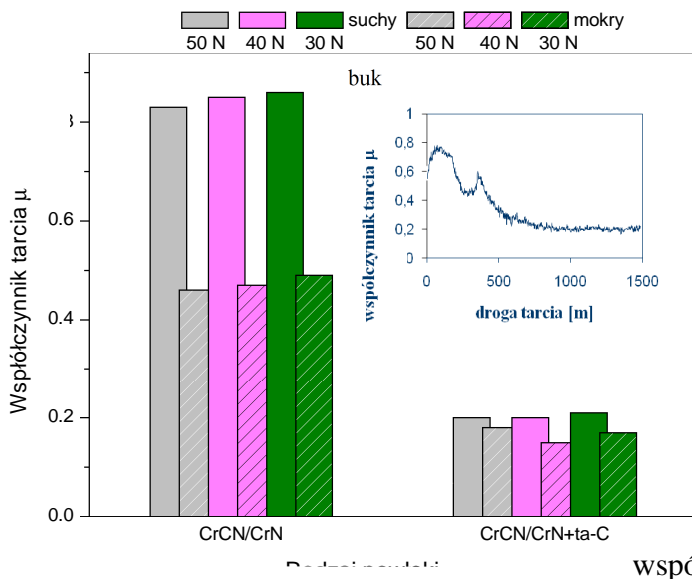
Analiza wyników z przeprowadzonych pomiarów twardości, adhezji, tarcia i zużycia wskazuje, że najlepszymi parametrami cechuje się powłoka jednowarstwowa CrCN zawierająca około 7-10 % at. węgla, otrzymana przy natężeniu przepływu acetyleny 10 sccm. Jej twardość - 22 GPa, siła krytyczna - 80 N, a przede wszystkim niski wskaźnik zużycia - $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ wskazują na potencjalnie dobre właściwości przeciwzużyciowe modelowanej powłoki wielowarstwowej CrCN/CrN.

7.2. Powłoki wielowarstwowe

Wykonano szereg procesów otrzymywania powłok wielowarstwowych CrCN/CrN. Jako odniesienie wytworzono także powłoki $\text{Cr}_2\text{N}/\text{CrN}$ stosowane na narzędzia do obróbki drewna [Faga]. Jako stałą przyjęto wartość stężenia węgla w warstwie CrCN powłoki (7÷9% at.) i grubość powłoki (około $3 \mu\text{m}$). Zmieniano ilość modułów N_A ($4 \div 7$) powłoki i w konsekwencji ich grubość ($400 \text{ nm} \div 700 \text{ nm}$) oraz stosunek podziału warstw CrCN i CrN w module. Wybrane wyniki badań dla powłok charakteryzujących się najlepszymi właściwościami zestawiono na rys. 8.



Rys. 8. Zestawienie wyników twardości, adhezji i zużycia dla powłok wielowarstwowych CrCN/CrN o ilości modułów $N_{\Lambda} = 6$ i 7 .



Rys. 9. Wartość współczynnika tarcia drewna suchego i mokrego dla buka - przekrój poprzeczny trzpienia trącego - powłoki wielowarstwowej CrCN/CrN. Prędkość docierania 1,2 m/s, siła normalna 30, 40, 50N. Wewnątrz zależność współczynnika tarcia od drogi tarcia dla

powłoki
ta-C.

Podsumowanie

Przeprowadzono szereg procesów technologicznych oraz wykorzystano kilkanaście metod badawczo - pomiarowych charakteryzowania powłok. Jako kryterium optymalizacji parametrów technologicznych, ze względu na przewidywane, korzystne cechy eksploatacyjne zmodyfikowanych narzędzi, przyjęto posiadanie przez wytworzoną powłokę następujących właściwości: dobrej adhezji do stali szybko tnącej, małej wartości współczynnika tarcia w układzie powłoka-drewno oraz małej wartości współczynnika zużycia ściernego. Warunki

te spełniają prezentowane na rys. 7 powłoki o ilości modułów 6 i 7 oraz stosunku warstw w CrCN i CrN w module 1:1 i 1:2. Powłoki o podziale 1:5 charakteryzują się najwyższą siłą krytyczną ale równocześnie najwyższym wskaźnikiem zużycia i najniższą twardością wśród powłok w grupie.

8. Badania eksploatacyjne

Do badań eksploatacyjnych wybrano następujące powłoki – tabela 2. Grubość powłoki ta-C wynosiła 1 μ m.

Tabela 2. Testowane na narzędziach powłoki.

Lp.	Powłoka	Ilość modułów N_A	Stosunek grubości warstw CrCN i CrN w module
1	CrCN/CrN	6	1:1
2	CrCN/CrN + ta-C	6	1:1
3	CrCN/CrN	6	1:2
4	CrCN/CrN	6	1:5
5	CrCN/CrN	7	1:1
6	CrCN/CrN	7	1:2
7	CrCN/CrN	7	1:5
8	Cr ₂ N/CrN	7	1:1

8.1. Badania półprzemysłowe

Przedmiot badań półprzemysłowych - wymienne noże do głowicy frezowej o wymiarach 40 × 30 × 5 mm o kącie ostrza 50° wykonane ze stali SW7M. Noże miały modyfikowaną powierzchnią natarcia twardymi powłokami Cr₂N/CrN i noże z różną architekturą powłok CrCN/CrN.

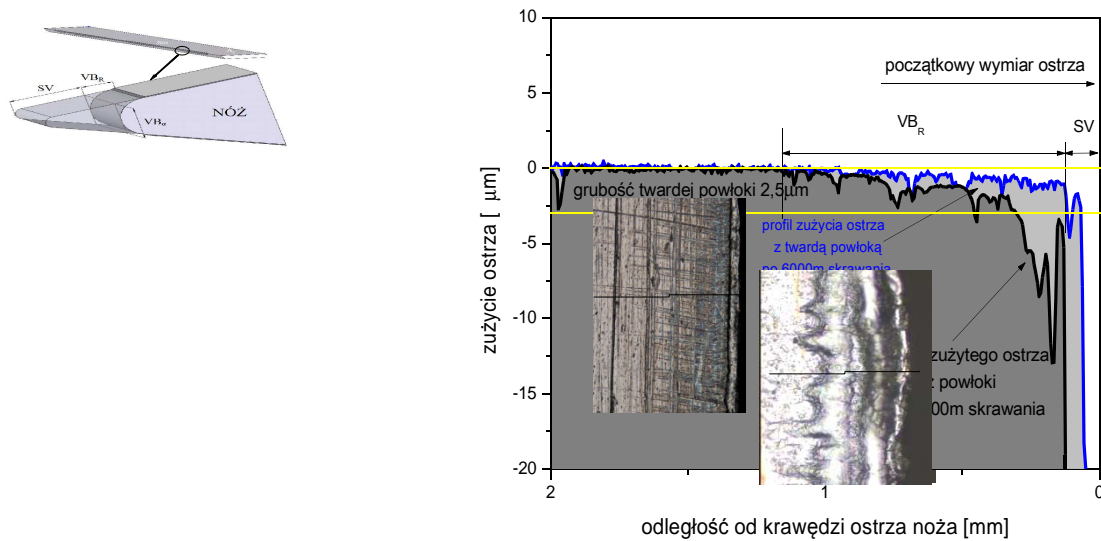
Obiekt badań - drewno sosnowe (III klasa jakości) w postaci tarcicy obrzynanej o grubości 19 mm, jednostronnie struganej. Procesowi skrawania poddawano drewno suche, wcześniej sezonowane w miejscu, w którym przeprowadzono badania. Średnia wilgotność materiału obrabianego wynosiła ok. 8 %.

Obrabiarka - frezarka dolnowrzecionowa typ DFDA-2, produkcji Gorzowskich Zakładów Przemysłu Leśnictwa z zainstalowanym urządzeniem posuwowym.

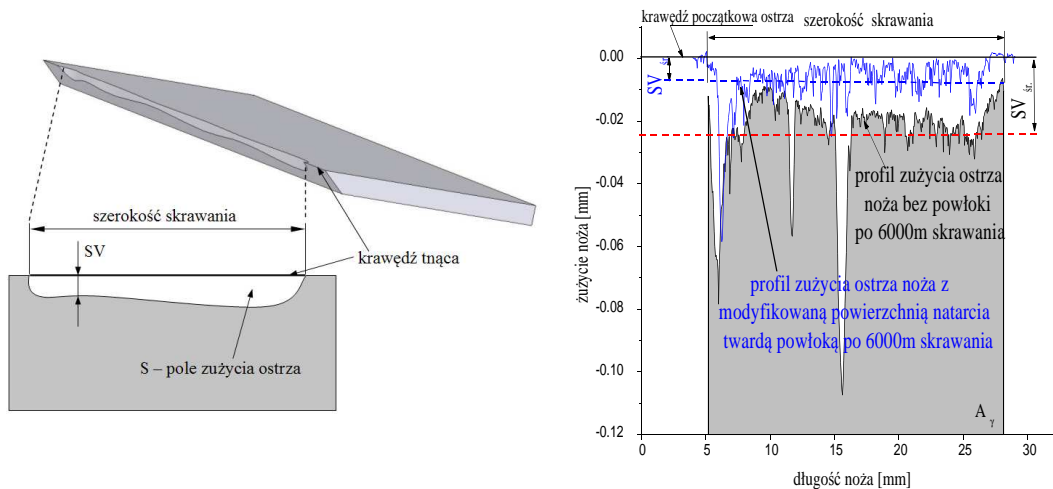
Przy ocenie jakości ostrza z modyfikowaną powierzchnią natarcia posługiwano się wielkościami:

- S – pole powierzchni zużycia ostrza [mm²],
- SV_{sr} – skrócenie do stycznej do ostrza płaszczyzny prostopadłej do powierzchni natarcia [μ m],
- VB_R – starcie powierzchni natarcia [μ m]
- VB_α – stępienie ostrza w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni natarcia stycznej do ostrza [μ m].

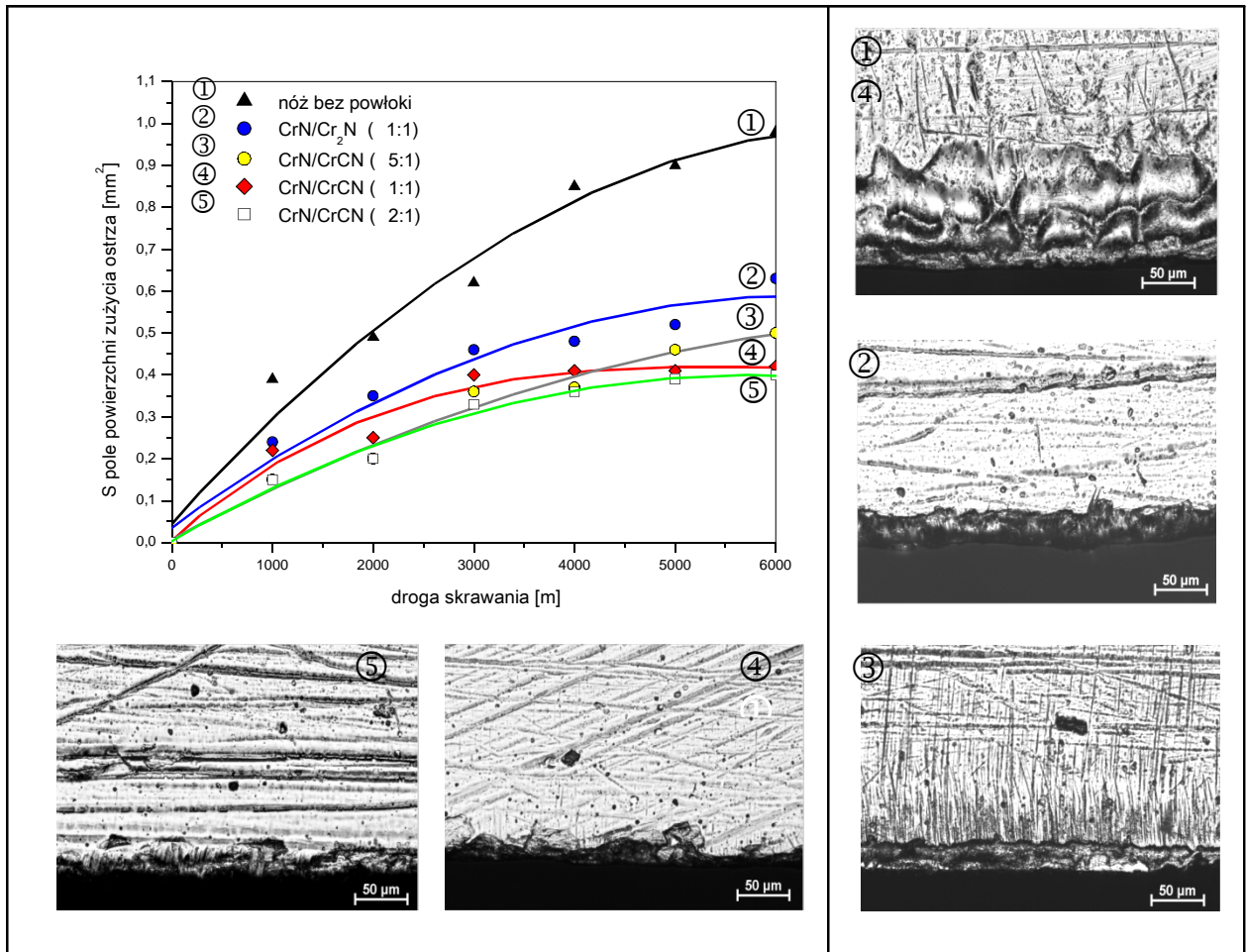
Profil boczny noża bez powłoki (rys. 10) wskazuje na znacznie większe zużycie niż noża z powłoką. Także profil zużycia ostrza (rys. 11) dla noża bez powłoki jest większe. Wyniki pola powierzchni zużycia ostrza dla wybranych powłok obrazuje rys. 12. Powłoki w węglu wykazują niższe zużycie w stosunku do powłoki odniesienia Cr₂N/CrN i noża bez powłoki. Parametry zużycia SV_{sr} i VB_R dla niektórych badanych powłok zestawiono na rys. 13



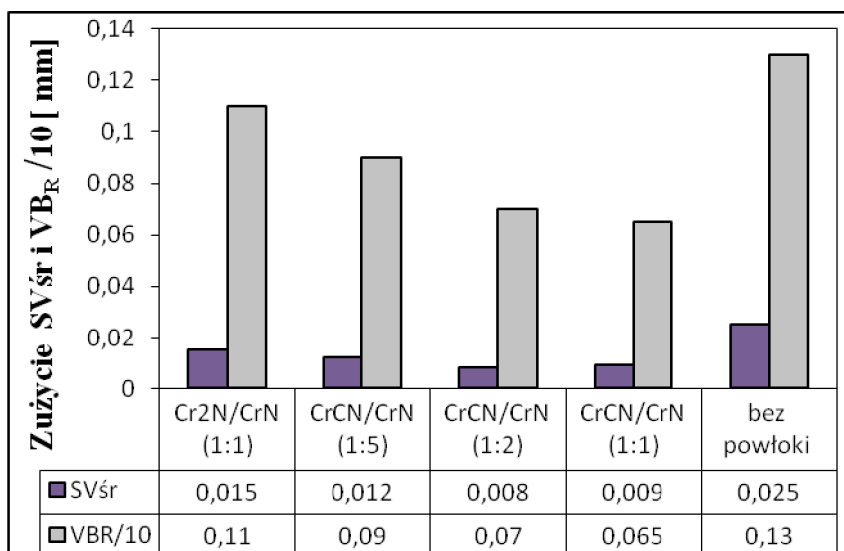
Rys. 10. Profil boczny zużycia ostrza po frezowaniu tarcicy sosnowej ostrzem z modyfikowaną powierzchnią natarcia powłoką CrCN/CrN o $\Lambda = 7$ podział 1:5 oraz profil boczny zużycia ostrza bez powłoki po 6000m skrawania (linia przerywana na zdjęciach wskazuje kierunek pomiaru profilu - prostopadle do krawędzi ostrza).



Rys. 11. Profil zużycia wzdłuż krawędzi ostrza po frezowaniu tarcicy sosnowej ostrzem z modyfikowaną powierzchnią natarcia powłoką CrCN/CrN o $N_{\Lambda} = 7$ o podziale 1:2 oraz profil zużycia ostrza bez powłoki po 6000m skrawania.

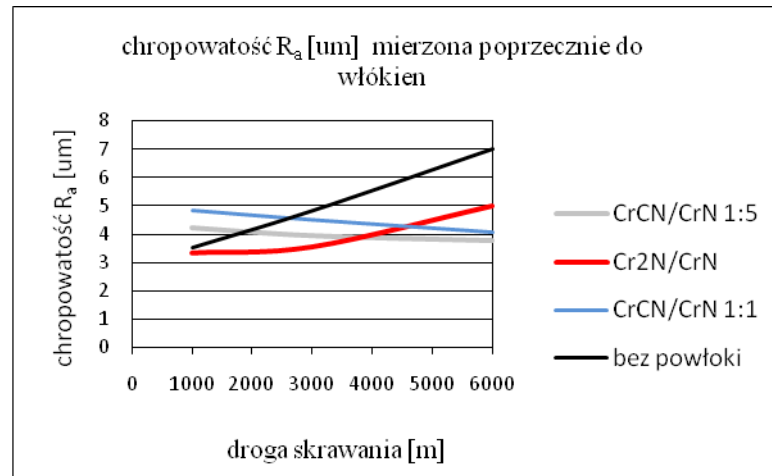


Rys. 12. Pole powierzchni zużycia ostrza S noży o różnej architekturze twardych powłok wielowarstwowych CrCN/CrN, CrN/Cr₂N naniesionych na powierzchnię tarcia oraz pole powierzchni zużycia ostrza noża niepokrytego po 6000 m skrawania w funkcji drogi skrawania. Fotografie ostrza z mikroskopu optycznego (pow. x1000) przedstawiają stan jego zużycia po procesie skrawania.



Rys. 13. Parametry zużycia SV_{sr} i VBR ostrza noży z różną architekturą powłok

wielowarstwowych typu CrCN/CrN, Cr₂N/CrN oraz ostrza noża bez powłoki po 6000 m skrawania tarcicy sosnowej.



Rys. 14. Wpływ zużycia ostrza noża na parametr struktury geometrycznej R_a powierzchni drewna sosnowego mierzony poprzecznie do włókien po frezowaniu.

W każdym z testów struktura geometryczna obrabianej powierzchni charakteryzuje się lepszymi parametrami (rys. 14) gdy ostrze noża pokryte jest powłoką wielowarstwową z węglem (CrCN/CrN) w porównaniu do powierzchni po obróbce nożami z powłoką wielowarstwową Cr_2N/CrN , szczególnie dla dłuższych dróg skrawania. Zdecydowanie najgorszą strukturę geometryczną powierzchni obserwuje się dla ostrza bez żadnej powłoki. W tym przypadku, ostrze bez powłoki wykazuje w trakcie skrawania nierównomierne zużycie (wykruszenia, wytarcia), co powoduje wzrost parametrów R_a , R_z i W_t . Twarda powłoka zapobiega nierównomiernemu zużywaniu się krawędzi ostrza, w wyniku czego obserwowana jest poprawa stereometrii powierzchni.

8.2. Badania przemysłowe

Efekty testów przemysłowych przedstawiono poniżej.

Zakład	Narzędzie	Materiał	Powłoka	Efekt
Swedwood z grupy IKEA w Resku	Nóż prosty firmy Gopol do głowic strugarskich ze stali SW18 o wymiarach 160x30x3 i kącie ostrza $\beta = 39^\circ$	Sosna (lamela do klejenia)	CrCN/CrN, $N_A = 7$, (1:2)	210 %
Barlinek S.A. w Barlinku	Nóż prosty firmy Leitz	Sosna (deska)	CrCN/CrN, $N_A = 6$, (1:2)	200 %
			CrCN/CrN + ta-C ($N_A = 6$, 1:2)	240 %
Seeger Dach Lębork		Sosna (deska, łaty i krawędziaki)	CrCN/CrN, $N_A = 7$, (1:2)	200 %
WAKO w Świeszynie	Zdzierak i gładzik	Sosna i świerk (bale Φ 280)	CrCN/CrN, $N_A = 6$, (1:2)	260 %

k/Koszalina		mm, długość 10 m)	CrCN/CrN + ta-C ($N_{\Lambda} = 6, 1:2$)	500 %
-------------	--	----------------------	---	-------

W zakładzie Swedwood Resko noże do głowic strugarskich z modyfikowaną powierzchnią natarcia powłoką CrCN/CrN zastąpiły całkowicie, w technologicznym procesie strugania drewna sosnowego, stosowane dotychczas noże z wkładką z węgla spiekanego.

9. Wnioski

Możliwość kształtowania właściwości fizycznych powłok poprzez dobór parametrów technologicznych procesu ich otrzymywania oraz modelowanie architektury powłok umożliwiło zwiększenie odporności ściernej narzędzi do obróbki drewna. Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Opracowano technologię powtarzalnego nanoszenia powłok jednowarstwowych na bazie azotku chromu ze zmienną zawartością węgla, metodą katodowego odparowania łukowego.
2. Stwierdzono, że najlepszymi parametrami charakteryzują się warstwy CrCN z 9 % at. zawartością węgla, tj. niskim współczynnikiem tarcia względem przeciwpróbek (Al_2O_3 i stal) - około 0,4, niskim wskaźnikiem zużycia $k_w \sim 5 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ oraz dobrą adhezją $L_{c2} \sim 90 \text{ N}$.
3. Zaprojektowano powłokę wielowarstwową CrCN/CrN łączącą korzystne cechy powłok jednowarstwowych CrCN i CrN. Jej właściwości - wskaźnik zużycia zawierający się w przedziale $1,7 \div 7 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ oraz dobra adhezja $L_{c2} \sim 110 \div 120 \text{ N}$, zależne są od jej architektury (ilości powtórzeń N_{Λ} modułu Λ , stosunku podziału (a:b) warstw w module Λ i zawartości węgla w warstwie CrCN). Powłoki CrCN/CrN są znacząco lepsze pod względem właściwości tribologicznych niż powłoki jednowarstwowe CrCN.
4. Wytypowane do badań przemysłowych powłoki składające się z 7 modułów CrCN/CrN o grubości około 400 nm każdy i stosunku podziału warstw w module jak 1:1, 1:2 i 1:5 nakładane na noże do głowic strugarskich wykazują zwiększoną trwałość w stosunku do noży bez powłoki. Najlepsze wskaźniki trwałości ostrza, około 200 %, wykazują noże z powłokami CrCN/CrN o architekturze - $N_{\Lambda} = 7$ i podział warstw w module (1:2). Podobną poprawę odporności na zużycie wykazują noże z powłoką złożoną z 6 modułów. Modyfikacja noża dodatkową powłoką diamentopodobną typu ta-C o grubości $1 \mu\text{m}$ umożliwiła dodatkowy wzrost trwałości ostrza o 20 %. Obserwacje powyższe potwierdzono we wszystkich zakładach testujących modyfikowane narzędzia.
5. Zastosowanie zmodyfikowanych narzędzi prowadzi do poprawy jakości powierzchni obrabianego drewna.
6. Osiągnięte wskaźniki trwałości narzędzi wykonanych ze stali szybko tnącej z modyfikowaną powierzchnią natarcia są porównywalne do noży z wkładkami z węglików spiekanych i były powodem ich zastąpienia w zakładzie IKEA Swedwood w Resku.

10. Bibliografia

1. Pancielejko M. Wpływ parametrów nakładania twardych warstw typu TiC_xN_{1-x} na stal narzędziową metodami fizycznego osadzania z par na ich właściwości tribologiczne. Praca doktorska. Politechnika Koszalińska 2001
2. Yao S. H., Su Y. L., The tribological potential of CrN and Cr(C,N) deposited by multi-arc PVD process, *Wear* 212, 85-94, 1997
3. Wang D. Y., Weng K. W., Chang C. L., Ho W. Y., Synthesis of Cr_3C_2 coatings for tribological applications, *Surf. Coat. Technol.* 120 –121, 622-628, 1999
4. Esteve J., Romero J., Gómez M., Lousa A., Cathode chromium carbide coatings for molding die applications; *Surf. Coat. Technol.* 188-189, 506-510, 2004
5. Ashby M. F., Jones D. R. H., *Materiały inżynierskie*, WNT Warszawa. 1996
6. Kourtev J., R.Pascova, E.Weißmantel, *Vacuum*, 48 (1) 1997
7. Walkowicz J., J.Smolik, K.Miernik, J.Bujak , *Problemy Eksploatacji.* 2(15) (1995) 3
8. Hantzsche E., B.Jüttner, Current density in arc spots. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 13,1985
9. Boxman R,L, Goldsmith S., Principles and applications of vacuum arc coatings *IEEE Trans, Plasma Sci*, 17, 5, 1989
10. Marszałek K., E. Leja, Przemysłowe urządzenia do produkcji powłok dekoracyjnych ze źródłem łukowym, *Materiały X Międzynarodowej Szkoły Letniej MIELNO '98 „Modern Plasma Surface Technology”*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin czerwiec1998
11. Vyskocil J., M.Musil; “Arc evaporation of hard coating; Process and film properties” *Surf. Coat. Technol.* 1990; 43-44:299
12. Miernik K., Generacja i seperacja mikrokropli w metodzie łukowo- próżniowej, *Przegląd Techniczny*, 22. 1997.
13. Miernik K., *Elektronika*, 4 (1999) 5
14. Burakowski T., Wierzchoń T. *Inżynieria powierzchni metali*, WNT 1995
15. Miernik K., Działanie i budowa magnetronowych urządzeń rozpylających, *Biblioteka Problemów Eksploatacji, ITE Radom* 1997
16. Gabriel H.M. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 21 (5) 1993
17. Krzysik F. *Nauka o drewnie*, PWN. Warszawa 1975
18. Požgaj A., Chovanec D., Kurjatko S., Babiak M., *Štruktura a vlastnosti dreva, PRÍRODA a.s., Bratislava* 199
19. Błazewski S., Mikoszewski J., *Pomiary twardości metali*, WNT, Warszawa 1981.
20. Porankiewicz B. *Kryteria i metody oceny stopnia stopienia ostrzy narzędzi skrawających do obróbki drewna*, Wyd. Akademia Rolnicza 1978 Poznań
21. Beer P., *Badania wpływu materiałowej modyfikacji powierzchni narzędzi na proces obwodowego skrawania drewna okrągłego.* Praca doktorska. SGGW WTD Warszawa 1998

22. Grobelny T. Stan cieplno-mechaniczny ostrza narzędzia w procesie frezowania drewna i tworzyw drewnopochodnych. Praca doktorska SGGW. W-wa 1999
23. Beer P., Djouadi M. A., Marchal R., Sokolowska A., Lambertin M., Miklaszewski S., Influence of knife surfaces modification with hard coatings on peeling wood process, J. Mater. Proc. Technol. 92-93 (1999) 264-268
24. Michalski A., Miklaszewski S., Badania trwałości narzędzi do obróbki skrawaniem drewna pokrytych TiN i (Ti, Al, V, Cr, Mo)N. Proceedings II Ogólnopolskiej Konferencji - Obróbka Powierzchniowa, Częstochowa, 1993, Polska, 163-165
25. Walkowicz J., Smolik J., Miernik K., Bujak J., Comparative investigation of the wear behavior of TiN monolayer coatings, Ti(C,N) multicomponent coatings and TiC/Ti(C,N)/TiN multilayer coatings deposited by the vacuum arc method. Proceedings of the 11th Conference on High Vacuum Interfaces and Thin Films. Dresden, Niemcy, 1994, 587-591
26. Nouveau C., Djouadi M.A., Decès-Petit C., Beer P., Lambertin M, (2001) Influence of Cr_xN_y coatings deposited by magnetron sputtering on tool service life in wood processing. Surf. Coat. Technol. 142-144 (2001) 94-101
27. Chafik Labidi - praca doktorska, Amelioration de la durée de service d'outils d'usage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe. ENSAM Cluny, 2006
28. König W.; Horizons in manufacturing technology. University of Michigan; Michigan 1967
29. Castanho J. M., D. Pinheiro, M. T. Vieira, New Multilayer Coatings for Secondary Wood Products Cutting, Materials Science Forum 455-456 (2004) 619-622
30. Stueber M., U. Albers, H. Leiste, S. Ulrich, H. Holleck, P.B. Barna, A. Kovacs, P. Hovsepian, I. Gee, Multifunctional nanolaminated PVD coatings in the system Ti–Al–N–C by combination of metastable fcc phases and nanocomposite microstructures, Surf. Coat. Technol. 200 (2006) 6162–6171
31. Faga M. G., L. Settineri, Innovative anti-wear coatings on cutting tools for wood machining, Surface and Coatings Technology 201 (2006) 3002–3007
32. Warcholiński B., A. Gilewicz, Powłoki przeciwzużyciowe CrN/CrCN na narzędzia do obróbki drewna, Inżynieria Materiałowa 6 (153) (2009) 516-519
33. Beer P., Djouadi, A., Marchal R., Sokolowska A., Lambertin M., Czyzniewski A., Precht W, Antiabrasive coatings in a new application - wood rotary peeling process. Vacuum 53 (1999) 363-366
34. Djouadi M.A., P. Beer, R. Marchal, A. Sokolowska , M. Lambertin , W.Precht, C.Nouveau Antiabrasive coatings: application for wood processing, Surf. Coat. Technol. 116–119 (1999) 508–516
35. Quinto D. T., Twenty-Five Years of PVD Coatings at the Cutting Edge, SVC Bulletin, Fall (2007) 17-22
36. B. Schultrich, H.-J. Scheibe, D. Drescher, H. Ziegele, Deposition of superhard amorphous carbon films by pulsed vacuum arc deposition, Surf. Coat. Technol. 98 (1998) 1097

37. Wiklund U., Influence of Residual Stresses on Fracture and Delamination of Thin Hard Coatings, from Ph.D. Dissertation "Mechanics and Tribology of Micro- and Nanolayered PVD Coatings", Uppsala University, Acta Universitatis Upsaliensis Uppsala, Sweden, 1999
38. [Labidi C.](#), [Collet R.](#), [Nouveau C.](#), [Beer P.](#), [Nicosia S.](#), [Djouadi M.A.](#) Surface treatments of tools used in industrial wood machining. [Surf. Coat. Technol.](#) 200 (2005) 118-122
39. [Faga M.G.](#), [Gautier G.](#), [Calzavarini R.](#), [Perucca M.](#), [Boot E.](#), [Cartasegna F.](#); [Settineri L.](#), AlSiTiN nanocomposite coatings developed via Arc Cathodic PVD: Evaluation of wear resistance via tribological analysis and high speed machining operations, [Wear](#) 263 (2007) 1306-1314
40. [Nouveau C.](#), [Martin J.P.](#), [Ferreira;](#) [Collet, R.](#); [Djouadi, A.](#), Application of CrAlN coatings on carbide substrates in routing of MDF, [Wear](#) 263 (2007) 1291-1299
41. [Niedzielski P.](#); [Miklaszewski S.](#); [Beer P.](#); [Sokolowska A.](#), Tribological properties of NCD coated cemented carbides in contact with wood, [Diamond and Rel. Materials](#) 10 (2001) 1-6
42. Burakowski T. Rozważania o synergizmie w inżynierii powierzchni, Radom 2004
43. Holleck H. Schier V. Multilayer PVD coatings for wear protection. [Surf. Coat. Technol.](#) 1995;76-77:328-336.
44. Yashar Philip C., William D. Sproul; Nanometer scale multilayered hard coatings, [Vacuum](#) 55 (1999) 179-190
45. Høglund U. Cutting edge wear in microscale physical conditions wear processes; [CIRP Annalen](#), 1976, 25/1
46. Martin P.J., R.P. Natterfield, T.J.Kinder, L.Descootes, [Surf. Coat. Technol.](#),49 (1991) 239
47. Matthews A., A. Leyland, B. Dorn, P.R. Stevenson, M. Bin Sudin, .C.Rebholz, [J. Vac. Sci. Technol. A](#) 13 (3) (1995)
48. Ducros C., C. Cayron, F. Sanchette; [Surf. Coat. Technol.](#), 201 (2006) 136 – 142
49. Samsonow G.W. Nitridy. Izdatielstwo" Naukowa dumka" Kijew 1969
50. Knotek O. Loffer F., Scholl H.J. Propertis of arc-evaporated CrN and (CrAl)N coatings. [Surf. Coat. Technol.](#) 45 (1991) 53-58
51. Rebholz C., H. Ziegele, A. Leyland, A. Matthews, [Surf. Coat. Technol.](#) 115 (1999) 222
52. Navinšek B., P. Panjan, I. Milošev, [Surf. Coat. Technol.](#) 97(1997) 182
53. Tu J.N., J.G. Duh, S.Y. Tsai, [Surf. Coat. Technol.](#) 133-134 (2000) 181
54. Era H., Y. Ide, A. Nino, K. Kishitake, [Surf. Coat. Technol.](#) 194 (2005) 265 – 270
55. Dobrzański L.A., Podstawy nauki o materiałach, WNT W-wa 2002
56. Michalski A.J. Fizykochemiczne podstawy otrzymywania powłok z fazy gazowej, PW Warszawa 2000
57. Hultman L., Muenz W.Z., Musil J., Kadlec S., Petrov I., Green J.E., : Low - energy ion irradiation during growth of TiN deposited by reactive magnetron sputtering: Effect of ion flux on film microstructure. [J.Vac.Sci. Tech. A](#) 9(1991)
58. Choi Eun Y., .M.Ch. Kang, D.H. Kwon, D.W. Shin, K.H. Kim; Comparative studiem on microstructure and mechanika properties of CrN, Cr-C-N and Cr-Mo-N coatings, [J. Mater. Proc. Technol.](#) 187-188, 2007, 566-570

59. F. Zhou, K. Chen, M. Wang, X. Xu, H. Meng, M. Yu, Z. Dai, Friction and wear properties of CrN coatings sliding against Si₃N₄ balls in vWykaz publikacji doktoranta (2008) 1029.

Wykaz publikacji doktoranta

Czasopisma z listy filadelfijskiej

1. W. Gulbiński, T. Suszko, A. Gilewicz, B. Warcholiński, Z. Kukliński, *Ti-Si-C Sputter Deposited Thin Film Coatings*, Surf. Coat. Technol. 180-181 (2004) 341-346
2. W. Gulbiński, S. Mathur, H. Shen, T. Suszko, A. Gilewicz, B. Warcholiński, *Evaluation of phase, composition, microstructure and properties in TiC-aC:H thin films deposited by magnetron sputtering*, Appl. Surf. Sci. 239/3-4 (2005) 302-310
3. K. Reszka, J. Rakoczy, Z. Żurek, A. Czyżniewski, A. Gilewicz, M. Homa, *Catalytic properties of Al₂O₃ deposited by ion sputtering using DC and RF sources*, Vacuum 78 (2005) 149-155
4. W. Gulbiński, T. Suszko, A. Gilewicz, B. Warcholiński, Z. Kukliński, *Structure and High Temperature Tribological Behavior of Ti-Si-C Nanocomposite Thin Films*, Surf. Coat. Technol. 200 14-15 (2006) 4179-4184
5. P. Myśliński, P. Kamasa, A. Gilewicz, J. Staśkiewicz, *Detection of mechanical effects of adhesive thin films on substrate using the modulated-temperature dilatometry*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 88 (2007) 737-740
6. B. Warcholiński, A. Gilewicz, Z. Kukliński, P. Myśliński, *Arc-evaporated CrN and CrCN coatings*, Vacuum 83 (2009) 715-718
7. B. Warcholinski, A. Gilewicz, P. Myslinski, *Tribological properties of TiAlCrN thin films*, Rev. Adv. Mater. Sci. 22 (2009) 81-88
8. B. Warcholinski, A. Gilewicz, Z. Kukliński, P. Myslinski, *Hard CrCN/CrN multilayer coatings for tribological applications*, Surf. Coat. Technol. 204 (2010) 2289–2293

Artykuły zgłoszone do publikacji

9. Gilewicz, B. Warcholinski, P. Myslinski, W. Szymański, *Anti-wear multilayer coatings based on chromium nitride for wood machining tools*, Wear
10. Warcholinski, A. Gilewicz, *Scratch resistance and wear of CrCN coatings*, Surf. Coat. Technol.
11. Warcholinski, A. Gilewicz, *Mechanical properties of multilayer TiAlN/CrN coatings embedded by cathodic arc evaporation*, Surface Engineering

Publikacje w czasopismach krajowych

12. W. Gulbiński, A. Gilewicz, T. Suszko, Z. Kukliński, B. Warcholiński, *Właściwości tribologiczne cienkich warstw węglika tytanu nanoszonych metodą reaktywnego rozpylania magnetronowego*, Inżynieria Powierzchni 4 (2004) 51 – 56
13. W. Gulbiński, B. Warcholiński, T. Suszko, A. Gilewicz, Z. Kukliński, *Właściwości tribologiczne cienkich warstw TiC-aC:H implantowanych krzemem*, Inżynieria Materiałowa 3 (2006) 395-398
14. A. Gilewicz, B. Warcholiński, Z. Kukliński, *Właściwości tribologiczne twardych warstw Cr(C,N) otrzymywanych metodą katodowego odparowania tlenkowego*, Inżynieria Materiałowa 5 (153) (2006) 972-975
15. B. Warcholiński, A. Gilewicz, *Właściwości mechaniczne powłok Cr_xN*, Inżynieria Powierzchni 3 (2009) 27 – 33
16. R. Olik, J. Ratajski, T. Suszko, J. Michalski, J. Dobrodziej, A. Gilewicz, *Precyzyjne kształtowanie budowy fazowej oraz grubości warstwy azotowanej na przykładzie matryc do ciśnieniowego odlewania aluminium*, Inżynieria Powierzchni 3 (2009) 27 – 33

17. B. Warcholiński, A. Gilewicz, *Powłoki przeciwzużyciowe CrN/CrCN na narzędzia do obróbki drewna*, Inżynieria Materiałowa 6 (153) (2009) 516
18. B. Warcholiński, A. Gilewicz, *Tribological properties of CrCN coatings*, Manuf. Eng. 37 (2) (2009) 498-504
19. J. Ratajski, W. Gulbiński, J. Staśkiewicz, J. Walkowicz, P. Myśliński, A. Czyżniewski, T. Suszko, A. Gilewicz, B. Warcholiński, *Hard coatings on tools for woodworking – state of the art*, J. Achiev. Mater. Manuf. Eng. 37(2) (2009) 668-674
20. J. Ratajski, R. Olik, T. Suszko, J. Dobrodziej, J. Michalski, A. Gilewicz, *Precise formation the phase composition and the thickness of nitrided layers*, J. Achiev. Mater. Manuf. Eng. 37 (2) 2009 675-689
21. A. Gilewicz, B. Warcholiński, Z. Kukliński, P. Myśliński, *Twarde powłoki ta-C otrzymane metodą impulsowego katodowego odparowania tlenkowego*, Inżynieria Materiałowa 1 (2010) 50-53

Artykuły zgłoszone do publikacji

22. J. Ratajski, R. Olik, T. Suszko, J. Michalski, B. Warcholiński, A. Gilewicz, *Modelowanie procesów azotowania i PVD podwyższających trwałość form odlewniczych do aluminium*, Pomiar Automatyka Kontrola,
23. B. Warcholiński, A. Gilewicz, *Wpływ zawartości węgla w powłokach CrCN na zużycie – próba optymalizacji*, Inżynieria Materiałowa
24. J. Ratajski, R. Olik, B. Warcholiński, A. Gilewicz, J. Michalski, J. Kwiatkowski, Ł. Szparaga, *Przeciwzużyciowa, dwustopniowa obróbka powierzchniowa narzędzi stosowanych w przemyśle drzewnym*, Inżynieria Materiałowa
25. P. Myśliński, A. Gilewicz, P. Kamasa, *Badanie stabilności termicznej adhezyjnych powłok przeciwzużyciowych metodą termomechaniczną*, Inżynieria Materiałowa

Publikacje konferencyjne zagraniczne

26. W. Gulbiński, T. Suszko, A. Gilewicz, B. Warcholiński, Z. Kukliński, *Ti-Si-C Sputter Deposited Thin Film Coatings*, E-MRS Spring Meeting, Strasbourg 2003, Symposium G, contributed paper G-VII-5
27. W. Gulbiński, T. Suszko, A. Gilewicz, B. Warcholiński, Z. Kukliński, *Structure and High Tribological Behavior of Ti-Si-C Nanocomposite Thin Film Coatings*, Abstracts of International Conference on metallurgical coatings and thin films, San Diego (2004) EP-4, 82
28. W. Precht; P. Małek; Z. Kukliński; A. Gilewicz; M. Holzherr, *Increasing the wear resistance of hot-work tool steel using multilayer coatings produced by Cathodic Arc Plasma Deposition(CAPD)*, Abstract book- 13th International Congress on Thin Films; 8th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, ICTF13/ACSIN 8 ;19-23 June 2005 Stockholm
29. B. Warcholiński, A. Gilewicz, Z. Kukliński, P. Myśliński, *Arc-evaporated CrN and CrCN coating*, Symposium on Vacuum based Science and Technology, Greifswald (2007) C10
30. A. Gilewicz, B. Warcholiński, P. Myśliński, W. Szymanski, *Anti-wear multilayer coatings based on chromium nitride for wood machining*, IV Symposium on Vacuum based Science and Technology, Koszalin/Kołobrzeg (2009) P30

Inne

31. W. Gulbiński, A. Gilewicz, T. Suszko, Z. Kukliński, B. Warcholiński, *Metoda wyznaczania mikrotwardości cienkich warstw*, Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego, Politechnika Koszalińska 33 (2004) 57 – 66

32. G. Pinkowski, W. Szymański, A. Gilewicz, A. Krauss, *Impact of the wear of the cutting edge on selected parameters of the surface geometric structure* Wykaz publikacji doktoranta of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology No 67, 2009: 187-191 (Ann. WULS - SGGW, For. and Wood Technol., 69, 2009)
33. W. Szymański, A. Gilewicz, G. Pinkowski, P. Beer, *Durability of blades covered by multilayer anti-wear coatings during wood milling*, Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology No 69, 2009: 353-357, (Ann. WULS - SGGW, For. and Wood Technol., 69, 2009)