

NANOMATERIAŁY NA I W OSTRZACH NARZĘDZI

Mirosław Dalak

*Zakład Inżynierii Produkcji
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy*

Streszczenie

W pracy przedstawiono niektóre trendy rozwoju węglików spiekanych oraz powłok na ostrzach narzędzi. Analizą objęto węgliki spiekane i nanopowłoki nanoszone na ostrza skrawające.

1. WPROWADZENIE

Obróbka na twardo dała początek wielu pracom rozwojowym, począwszy od ulepszeń właściwości węglików spiekanych (szczególnie w odniesieniu do narzędzi pełnowęglkowych), poprzez badanie przydatności różnego rodzaju ceramiki narzędziowej, aż do materiałów narzędziowych na bazie regularnego azotku boru (CBN). Metale lekkie stwarzają w procesach skrawania specyficzne problemy, których przyczyny są różnorakie, takie jak cieme zachowanie się materiału, np. podczas obróbki nadeutektycznych stopów aluminium ($Al+Si>12\%$), lub intensywniejsze zdolności przywarciove (tworzenie nalepów) w trakcie skrawania stopów magnezu lub stopów aluminium do przeróbki plastycznej. Do badanych zagadnień związanych z obróbką metali lekkich należą: zastosowanie powłok diamentowych do redukcji nalepów i ściernego zużycia narzędzi, zastosowanie węglików spiekanych w narzędziach do gwintowania (ponieważ metale lekkie często wytwarzają krótkie wióry) oraz rosnąca efektywność narzędzi chłodzonych wewnątrznie i z polepszonym odprowadzeniem wiórów. Właśnie do skrawania aluminium opracowano powłoki ostrzy o szczególnie długiej odporności na zużycie. Powłoki te są cienkie i ich grubość mierzy się w nanometrach, wykazują jednak znaczący wpływ na zdolność wytwórczą narzędzi.

W zakresie doboru i techniki osadzania powłok na ostrzach narzędzi nastąpił istotny postęp. Obecnie można już optymalnie dobrać ich powierzchnie do każdorazowego zastosowania, dążąc do zredukowania oddziaływania na twardość ostrzy niekorzystnych czynników, takich jak tarcie czy zużycie. Wysoka wytrzymałość na ściskanie i ścinanie, duża stabilność cieplna i chemiczna, wysoka twardość w podwyższonych temperaturach i dobre właściwości cienne – to wymagania stawiane powłokom osadzonym na ostrzach do obróbki na sucho, na twardo i z wysoką prędkością skrawania oraz stosowanym w innych, innowacyjnych sposobach wytwarzania.

Wprawdzie nie zaprezentowano jeszcze uniwersalnej powłoki, można jednak stwierdzić, że rozwój w tej dziedzinie zmierza do wytwarzania twardych, wielowarstwowych, nanostrukturyzowanych powłok przeciwzużyciowych, jak też powłok gradientowych z lub bez zintegrowanych z nimi warstewek stałego smaru zmniejszających tarcie. Przedmiotem wielu prac są złożone, odporne na utlenianie powłoki, systemy

metastabilne, np. powłoki na bazie (Ti, Al) N oraz mikro- i nanokrystaliczne, jak też wielowarstwowe powłoki diamentowe.

Całkowicie nowymi rozwiązaniami powłok, np. do obróbki na sucho, są ponadto (supernitrides) ze „smarowaniem in situ”. Te nowej generacji materiały powłokowe – nieprzewodzące tytanowo – glinowe azotki, ze szczególnie dużym udziałem aluminium i bardzo drobnoziarnistą strukturą – skutecznie przeciwdziałają tworzeniu się narostów na ostrzu i przyklejaniu się wiórów do przedmiotu dzięki dużej wytrzymałości termicznej i twardości w podwyższonych temperaturach, jak też wysokiej odporności na utlenianie i ścieranie. Powstające w procesie obróbkowym ciepło wytwarza na powierzchni powłoki produkty reakcji o bardzo dobrych właściwościach ciernych, wyzwalające efekt samosmarowania. Zyskuje również na znaczeniu – jako materiał narzędziowy – polikrystaliczny diament (PKD) – ze względu na coraz powszechniejsze zastosowanie stopów aluminium i tworzyw sztucznych wzmacnianych włóknami [5].

Celem pracy jest ocena możliwości obróbkowych ostrzy ze szczególnym uwzględnieniem tych z nanomateriałów i z nanopowłokami. Analizą objęto węgliki spiekane i nanopowłoki nanoszone na ostrza skrawające.

2. ELEMENTY CHARAKTERYSTYKI NANOMATERIAŁÓW

Ciała stałe w przyrodzie różnią się stopniem uporządkowania wewnętrznego. Cechami charakterystycznymi, które wyróżniają postać krystaliczną materiałów jest powtarzalność ułożenia atomów w trzech głównych kierunkach w przestrzeni. Poszczególne obszary krystaliczne mogą być odizolowane od siebie warstwami niekrystalicznymi o grubości 2-3 atomów. Są to granice ziaren.

Ciała amorficzne mają natomiast atomy rozłożone całkowicie przypadkowo i nawet w zakresie kilku atomów sąsiadujących ze sobą nie można wyodrębnić powtarzającej się ich sekwencji.

Do niedawna zdania na temat nanoziaren były podzielone. Według członków stowarzyszenia inżynierów metalurgii Fachverband Pulver Metall, aby materiał był uważany za nanoproszek („Nanos” od greckiego słowa „karzeł”) średnie uziarnienie musi wynosić 0,2 μm (pojedyncza czerwona krwinka ma około 8000 nanometrów średnicy). Dodatkowo podano określenie „ultradrobnoziarnistości” jako uziarnienia od 0,2 do 0,5 μm , „superdrobnoziarnistości” od 0,5 do 0,8 μm oraz „drobnoziarnistości” od 0,8 do 1,3 μm , co schematycznie przedstawiono na rysunku 1.

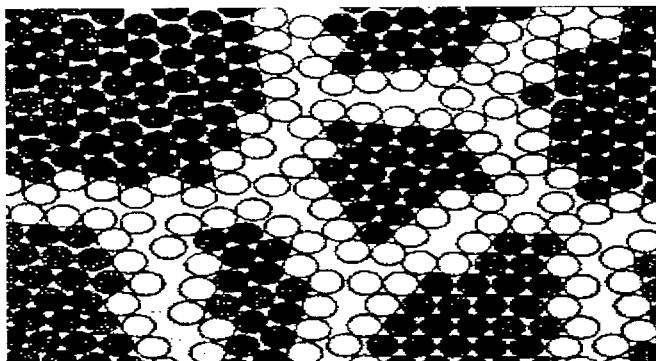
Poprzez powiększenie nanoziarna węgla wolframu powstałoby następujące porównanie				
Piłka do koszykówki (węgliki spiekane konwencjonalne)	Piłka do softballa średnicy 16" (drobnoziarniste)	Piłka do baseballa (superdrobnoziarniste)	Piłka do golfa (ultradrobnoziarniste)	Kulka (nano)

Rys. 1. Porównanie ziaren [7]

W Nanopowder Enterprise, dostawcy nanoskrystalizowanych tlenków, za nanoziarno uznano materiały o wielkości poniżej 0,1 μm , przy której następują znaczące zmiany w strukturze i właściwościach. Właściwości te odpowiadają za podwyższony poziom odporności cieplnej bez strat w twardości i odporności na pękanie [7].

Nanomateriałami przyjęto więc nazywać polikrystaliczne ciała stałe, których jeden z charakterystycznych wymiarów nie przekracza 100 nm, przynajmniej w jednym kierunku. Jest nim zwykle wielkość ziaren, lecz może to być także grubość warstw wytworzonych lub nałożonych na podłożu. W przypadku nanomateriałów trójwymiarowych termin „ziarno” nie jest pojęciem wystarczająco precyzyjnym, dlatego przyjęto używać określenia „krystalit”. Jest nim obszar koherentnie rozpraszający promieniowanie rentgenowskie. Definicja powyższa świadczy o wysokim stopniu uporządkowania materii w obrębie krystalitu. Kilka zrośniętych krystalitów w bezporowaty zespół nazywa się natomiast agregatem, w przeciwieństwie do aglomeratu, który jest porowaty i składa się z wielu krystalitów i ewentualnie agregatów [1].

Na rysunku 2 przedstawiono strukturę dwuwymiarowego materiału nanokrystalicznego, w którym kryształy mają różne orientacje krystalograficzne. Granice ziaren (otwarte kule) charakteryzują się mniejszą gęstością.



Rys. 2. Struktura 2-wymiarowego materiału nanokrystalicznego [6]

Nanokryształami mogą być czyste metale, ich stopy, jak również tworzywa ceramiczne. Granica wielkości nanokryształów jest różna dla materiałów o różnorodnych cechach użytkowych i na ogół wiąże się z pojawieniem nowych jakościowo właściwości po jej przekroczeniu.

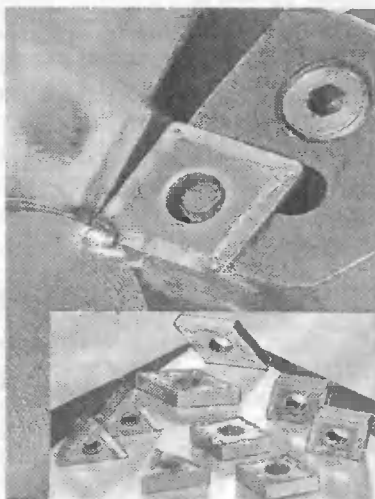
Materiały nanokrystaliczne mogą składać się z faz krystalicznych, krystalicznych i amorficznych oraz z krystalicznej lub amorficznej osnowy. Cechą niekorzystną nanokryształów jest ich metastabilny charakter. W podwyższonej temperaturze następuje obniżenie energii swobodnej układu przez redukcję energii granic ziaren. Powoduje to rozrost ziaren.

3. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ NANOWĘGLIKÓW ORAZ NANOPOWŁOK

Nowe trendy w zakresie obróbki skrawaniem stawiają najwyższe wymagania w stosunku do narzędzi skrawających i materiałów na ich ostrza. Oprócz powszechnie znanych materiałów skrawanych – stali i żeliwa – wprowadzono ostatnio wzmocnione aluminium, magnez, żeliwo lub grafit. Jednocześnie coraz częściej stosuje się technologię o specjalnych wymaganiach, np. obróbkę z dużymi prędkościami skrawania, obróbkę bez użycia chłodziwa i obróbkę materiałów twardych. Po to, aby narzędzia mogły sprostać nowym wymaganiom, muszą być pokryte powłokami odpowiadającymi nowym zadaniom produkcyjnym.

Narzędzia z nanopowłokami TiN/AlN

Firma Sumitomo Electric posiada w swojej ofercie wkładki ostrzowe z powłoką ZX, które przedstawiono na rysunku 3 [3].

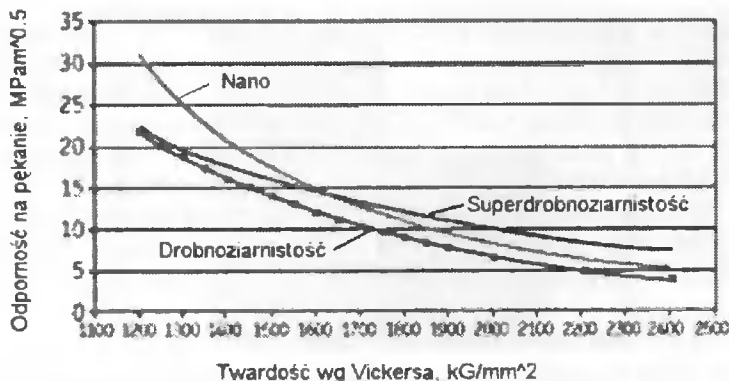


Rys. 3. Wkładki ostrzowe z powłoką ZX [3]

Powłoka ZX jest to ultratwarda, składająca się z 2000 warstw, powłoka TiN/AlN, która została opracowana dla szerokiego spektrum narzędzi frezarskich i wiertarskich stosowanych do obróbki materiałów, takich jak stale konstrukcyjne, stale nierdzewne, stopy żarowytrzymałe czy żeliwa. Powłoka ZX z nadstrukturą ma 2,5 μm grubości (1,25 nm x 2000) i z twardością wynoszącą 4000 HV wykazuje podobieństwo do CBN. Oprócz tego korzystnie wpływa na jakość powierzchni obrabianych przedmiotów, a jej odporność na działanie wysokich temperatur umożliwia obróbkę z dużymi prędkościami posuwu i powoduje wyraźne wydłużenie okresu trwałości ostrza [3].

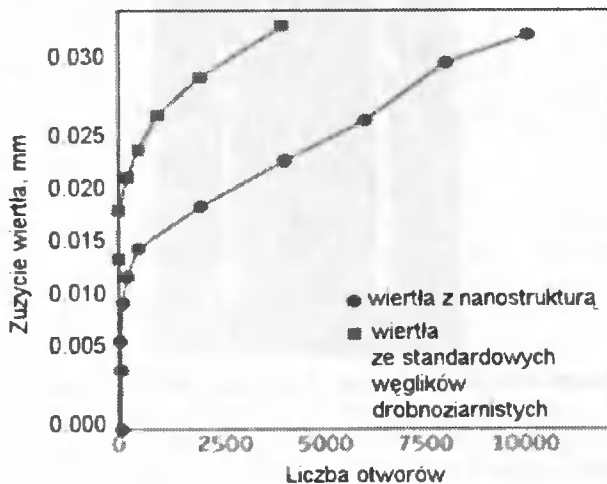
Narzędzia z nanoprošków WC

Twardość nano-WC spowodowana jest większą liczbą granic między ziarnami, co jest bezpośrednio związane ze zmniejszeniem rozmiaru każdego ziarna. Istnieje wiele narzędzi wykonanych z ziaren „superdrobnoziarnistych”, „drobnoziarnistych” i „ultradrobnoziarnistych”, ale bardzo mało jest produkowanych narzędzi do obróbki skrawaniem z nano-WC. Przyczyną, dla której nanokompozyty WC są używane w tak małym stopniu jest fakt, że nanometale mają wysoki poziom odporności cieplnej – a zatem, wysoką odporność na ścieranie w niskich temperaturach. Kiedy temperatura wzrasta podczas operacji skrawania, odporność na ścieranie maleje. Poza tym termiczna przewodność maleje wraz ze zmniejszeniem rozmiaru ziarna, a granice nano-WC ograniczają przepływ ciepła wewnątrz narzędzia, co stwarza problem termicznego zmęczenia narzędzia. Istnieje tendencja, aby używać drobniejszych węglików w produkcji narzędzi, w szczególności powlekanych. Na rysunku 4 przedstawiono relacje pomiędzy odpornością na pękanie a twardością dla różnych uziarnień.



Rys. 4. Relacje pomiędzy odpornością na pękanie a twardością dla różnych uziarnień [7]

Nanoproszki WC produkowane są przy użyciu różnych zastrzeżonych metod i używane są m.in. do produkcji narzędzi z węglkową końcówką dla przemysłu kopalnianego. Przeprowadzone testy wiertel wykazały, iż narzędzia o nanostrukturze cechują się od 30 do 40% mniejszym zużyciem niż standardowe narzędzia. Stwierdzono również, że trwałość narzędzia jest często definiowana jako trwałość przy $0,3 \mu\text{m}$ podstawowego zużycia. Według powyższego kryterium trwałość testowanych nanowiertel była 2,5 razy większa niż standardowych wiertel (rys. 5).



Rys. 5. Zależność pomiędzy liczbą wierceń a zużyciem ostrza [7]

Wytwarzanie narzędzi z nano-WC proszku wymaga użycia specjalnych spowalniczy wzrostu uziarnienia i różnych technik konsolidacji ziaren, gdyż ziarna osiągają rozmiar poza nanoskalę w momencie, kiedy narzędzie jest spiekane.

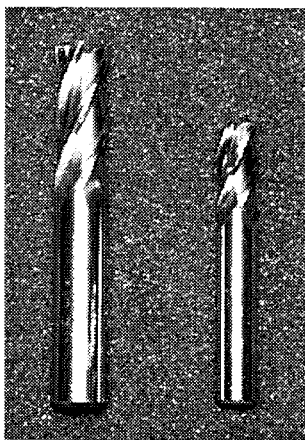
Prasowane części są poddane procesowi spiekania w temperaturze od 1250°C do 1500°C , co powoduje powiększenie rozmiaru ziaren. Materiały poddane procesowi spiekania nie są już rozmiaru nano i nie wykazują wymaganej wysokiej odporności i trwałości na pęknięcia. Nanocząsteczki WC są szczególnie podatne na „zwiększenie ziarnistości” podczas procesu spiekania. Wzrost ziaren może być zahamowany poprzez

dodanie niewielkiej ilości wanadu albo chromu. Pomimo że dodanie wanadu jest jednym z bardziej znanych sposobów spowalniania wzrostu ziaren, do spowalniania używane są także tantal, krzem i bor choć są znacznie droższe. Ilość spowalniczy dodawanych do materiału jest uzależniona od uziarnienia, jakie ma być uzyskane. Im mniejszy rozmiar ziarna, tym więcej potrzeba wkładu ze spowalniczem. Ilość dodanego spowalnicza rośnie także wraz z zawartością kobaltu.

Inną metodą ograniczającą wzrost ziaren jest proces spiekania mikrofalowego. Proces charakteryzuje się krótkim czasem spiekania oraz gwałtowną konsolidacją ziaren, która ogranicza ich wzrost [7].

Narzędzia z powłokami z nanokrystalicznego niklu

Nanokrystalizowane powłoki ze stopu niklu są kolejnym sposobem na zwiększenie trwałości i odporności narzędzi skrawających. Nanoniklowe powłoki produkowane są za pomocą techniki powlekania elektrolitycznego. Na podłoże nanoszona jest warstwa w postaci „błonki”, która może mieć różną grubość i może być stosowana na różne narzędzia. Materiał użyty do powlekania nie występuje w postaci proszku. Proces można poza tym stosować do powlekania całego narzędzia. Na rysunku 6 przedstawiono frezy trzpieniowe z powłoką nanokrystalizowanego stopu niklu [7].

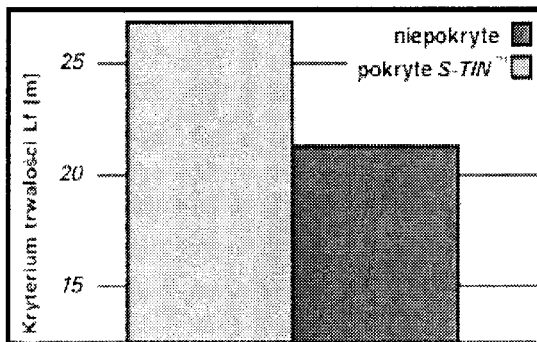


Rys. 6. Frezy wykonane z węglików wolframu z nałożoną powłoką nanokrystalizowanego stopu niklu [7]

Narzędzia z nanopowłokami TiN

Po raz pierwszy powłoki z azotku tytanu zostały wprowadzone już 20 lat temu. TiN koloru złotego jest powłoką typu PVD, która może być zastosowana do narzędzi skrawających z węglików spiekanych i ze stali szybko tnącej. Proces nakładania powłok w niskich temperaturach i „cienkość” warstwy stwarzają możliwość powlekania narzędzi z ostrymi krawędziami. Złota powłoka typu SUPERTIN jest powłoką o rozmiarach nanometrycznych i może występować w 2000 kombinacji.

Narzędzia z nanopowłoką typu SUPERTIN używane są do obróbki stali z niskimi i średnimi prędkościami skrawania. Na rysunku 7 przedstawiono porównanie trwałości ostrza wiertła pokrytego S-TiN i niepokrytego, użytych do wiercenia określonej jednokowej ilości otworów w stali węglowej C45 [2].



Rys. 7. Porównanie trwałości ostrza wiertła pokrytego S-TiN i niepokrytego [2]

Narzędzia z nanopowłokami NCD

Warstwy z nanokrystalicznego diamentu (NCD) stosuje się m.in. na pokrycia narzędzi z węglików spiekanych i stali szybko tnącej. Przeznaczone mogą być do obróbki metali nieżelaznych (aluminium, miedź, itp.) oraz materiałów drewnopochodnych (płyty MDF, HDF, laminaty i inne).

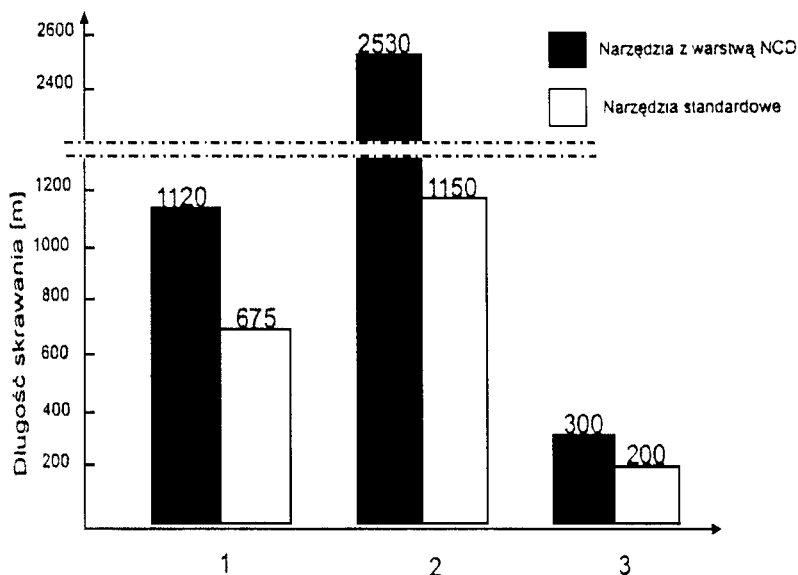
Poprzez zastosowanie powłoki diamentowej na węglkach spiekanych dla freza piłkowego PI-406 [4] uzyskano ponad 120% wzrost trwałości w stosunku do freza z węglików spiekanych. Frezem tym wykonywano rowek o głębokości 8 mm w twardej płycie wiórowej. W przypadku zespołu frezów, z których jeden był z powłoką diamentową, uzyskano 66% wzrost jego trwałości w porównaniu z frezem standardowym. Obróbka polegała bowiem na przecinaniu twardej płyty wiórowej o grubości 18 mm. Zastosowanie powłoki diamentowej na ostrzach skrawających kształtowej głowicy frezarskiej GPU-1 miało wpływ na wzrost jej okresu trwałości o około 50% w stosunku do głowicy standardowej. Mniejszy wzrost trwałości ostrza wiąże się z trudniejszymi warunkami skrawania. Operacja obróbkowa dotyczyła bowiem zaokrąglenia brzegu twardej płyty wiórowej o grubości 18 mm. Występujące punktowe obciążenie krawędzi skrawającej, zmienna prędkość skrawania oraz niejednorodność materiału płyty wiórowej spowodowały obok ściernego zużycia krawędzi, także jej mikrowykruszenia, co przyczyniło się do skrócenia okresu trwałości głowicy frezarskiej.

Porównanie trwałości tych narzędzi przedstawiono na rysunku 8.

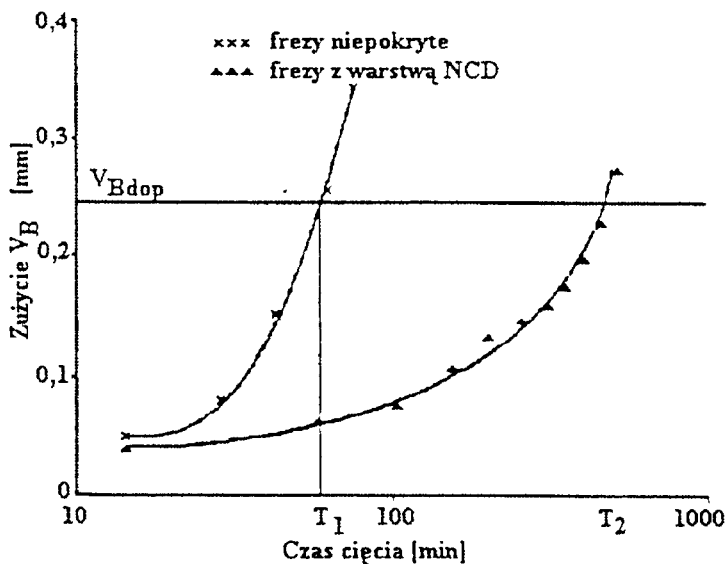
Podobnie zwiększenie odporności na zużycie i dziewięciokrotny wzrost trwałości frezu uzyskano stosując stal szybko tnącą pokrytą nanokrystalicznym diamentem. Frezem tym obcinano końcówki z metali kolorowych w płytkach obwodów drukowanych. Okresy trwałości frezów wynosiły odpowiednio: $T = 58$ min dla frezów po obróbce cieplnej i $T = 520$ min dla frezów z wytworzoną warstwą nanokrystalicznego diamentu.

Wytworzona na powierzchni roboczej frezów piłkowych twarda, dobrze przylegająca warstwa nanokrystalicznego diamentu zwiększa odporność na zużycie oraz ogranicza występowanie zjawiska zalepiania ostrzy produktami skrawania (wiórami). Ostrza frezów po obróbce cieplnej pokryte są dużymi ilościami materiału skrawanego, natomiast na ostrzach frezów z warstwą nanokrystalicznego diamentu obserwowane są tylko śladowe cząstki materiału skrawanego. Różnice te znajdują duże odzwierciedlenie w mechanizmie powstania i intensywności zużycia frezów. Frezy po obróbce cieplnej zużywają się bardzo intensywnie na powierzchniach przyłożenia i natarcia (dla $T_1 = 80$ min). Ślady zużycia ostrza, w postaci nieregularnych mikrowykruszeń materiału, wskazują na

zużycie adhezyjne. W przypadku frezów z warstwą nanokrystalicznego diamentu zużycie ostrzy, których przebieg przedstawiono na rysunku 9, zachodzi znacznie wolniej w wyniku powolnego i równomiernego ścierania na powierzchni przyłożenia (dla $T_2 = 520$ min) [4].



Rys. 8. Porównanie trwałości narzędzi skrawających w próbach skrawania: 1 - zespół frezów piłkowych, 2 - frez piłkowy PI-406, 3 - kształtowa głowica frezarska [4]



Rys. 9. Przebieg zużycia frezów piłkowych [4]

Narzędzia pokryte diamentem znajdują zastosowanie do obróbki tworzyw sztucznych. Pokryta diamentem płytka wieloostrzowa ma większą odporność na ścieranie (zaleta w stosunku do węglików spiekanych) i wyższą skrawność (zaleta w stosunku do PKD). Odporność na zużycie przy zastosowaniu powłok diamentowych jest nawet 3÷5 razy większa aniżeli ostrza z PKD. Dzięki temu ostrza z powłoką diamentową umożliwiają ekonomiczną obróbkę. Być może ostrza z PKD w najbliższej przyszłości mogą zostać w wielu przypadkach zastąpione ostrzami z powłoką diamentową.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzona analiza z uwzględnieniem badań literaturowych z zakresu tematu pracy upoważnia do stwierdzenia, że dzięki zastosowaniu nanowęglików i nanopowłok można uzyskać dłuższe okresy trwałości narzędzi skrawających. Można dzięki temu ograniczyć też koszty przestojów i wymiany narzędzi oraz zakupy narzędzi. Stosowanie nanowęglików i nanopowłok umożliwia zwiększenie prędkości skrawania, ograniczenie chłodzenia oraz obróbkę coraz trudniej obrabialnych materiałów.

Nanowęgliki i nanopowłoki mają wpływ także na zwiększenie odporności narzędzi na ścieranie, jak też na lepsze odprowadzenie wióra ze strefy skrawania.

Dodatkowo poprzez zastosowanie nanowęglików i nanopowłok uzyskać można:

- bardziej efektywną produkcję, większą ilość cykli, mniej przestojów maszyn,
- wysoki standard wytwarzania dzięki większej dokładności uzyskiwanych powierzchni, lepszemu zachowaniu wymiaru oraz mniejszej liczbie etapów procesu technologicznego,
- ochronę zasobów naturalnych i oszczędność surowców poprzez eliminowanie środków smarujących i chłodzących w zastosowaniu obróbki na sucho,
- redukcję kosztów wytwarzania na całej linii produkcyjnej dzięki mniejszemu zużyciu narzędzi, mniejszej liczbie ich uszkodzeń oraz przewidywalnej wymianie narzędzi.

LITERATURA

- [1] Jurezyk M., 2000. Hydrogen storage properties of amorphous and nanocrystalline $MmNi_{4,2}Al_{0,8}$ alloy. *J. Alloys Compounds* 307, 279-282.
- [2] Materiały promocyjne, www.cemecon.com.pl
- [3] Materiały promocyjne, www.sumitool.com
- [4] Niedzielski P., 2002. Warstwy nanokrystalicznego diamentu na narzędzia skrawające do obróbki materiałów nieżelaznych i drewnopochodnych. Materiał nr 71 z posiedzenia Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Badań Maszyn PAN, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, 65-80.
- [5] Oczko K., 2004. Trendy rozwojowe narzędzi skrawających - część I. *Mechanik* 1, 7-13.
- [6] Pampuch R., Haberko K., Kordek M., 1992. *Nauka o procesach ceramicznych*. PWN Warszawa.
- [7] Richter A., 2000. Size Matters. *Cutting Tool Engineering* 6(52).

NANOMATERIALS COVERING AND WITHIN CUTTING TOOL POINT

Summary

Paper deals with nanomaterials analysis review that cover tool point as well as within cutting tool and its application. It was determined some phenomena and the grade of nano-covering tool insert and its further developments also.