

**\*Prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski**

**\*Dr hab. inż. Kazimierz Zaleski, prof. PL**

**\*Dr inż. Jakub Matuszak**

**\*Mgr inż. Tomasz Pałka**

**\*\*Mgr inż. Janusz Mądry**

\*

Department of Production Engineering

Mechanical Faculty

Lublin University of Technology

Nadbystrzycka str., 20-618 Lublin, Poland

E-mail: [j.kuczmaszewski@pollub.pl](mailto:j.kuczmaszewski@pollub.pl)

E-mail: [k.zaleski@pollub.pl](mailto:k.zaleski@pollub.pl)

E-mail: [j.matuszak@pollub.pl](mailto:j.matuszak@pollub.pl)

E-mail: [t.palka@pollub.pl](mailto:t.palka@pollub.pl)

\*\*

Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o. - PZL Mielec

[janusz.madry@lmco.com](mailto:janusz.madry@lmco.com)

## **BADANIA WPŁYWU MIKROSTRUKTURY FREZU NA TRWAŁOŚĆ OSTRZA W PROCESIE FREZOWANIA ROWKÓW W STOPIE TYTANU Ti6Al4V**

*W procesie skrawania występują różne formy zużycia narzędzi. Zużycie mechaniczne, które ma szereg odmian, jest typową formą zużycia związaną z eksploatacją frezów. Jedną z odmian zużycia mechanicznego, często pojawiającą się podczas skrawania materiałów trudnoobrabialnych jest niepożądane zużycie katastroficzne. Unikanie tego rodzaju zużycia poprzez odpowiedni dobór parametrów technologicznych, gatunku węglików spiekanych oraz ich mikrostruktury stanowi podstawową informację o niezawodności narzędzia. W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wpływu wielkości ziaren węglików spiekanych we frezach walcowo-czołowych na trwałość ostrza i topografię powierzchni po procesie frezowania rowków w stopie tytanu Ti6Al4V. Wskaźniki zużycia wyznaczono w oparciu o normę PN-ISO 8688: 1996. Wykazano, że frezy o strukturze ultradrobnoziarnistej są najbardziej odporne na wykruszenia, a powierzchnia po obróbce charakteryzuje się najmniejszą chropowatością. Najmniejszą trwałością charakteryzują się frezy o strukturze gruboziarnistej.*

**Słowa kluczowe: stopy tytanu, frezowanie, zużycie, chropowatość powierzchni**

### **1. Wprowadzenie**

W procesie eksploatacji narzędzi skrawających następuje zużywanie się ich ostrzy, co prowadzi do utraty właściwości skrawnych. Trwałość ostrzy wpływa na koszty wytwarzania przedmiotów, które wynikają z ceny zużytego narzędzia oraz kosztów jego regeneracji, a także z kosztów przestoju maszyny technologicznej związanego z koniecznością wymiany narzędzia.

Do głównych czynników wpływających na trwałość ostrzy należy zaliczyć materiał obrabiany, materiał ostrza, rodzaj powłoki przeciwzużyciowej, parametry skrawania i rodzaj cieczy chłodząco – smarującej [5, 8, 13, 17]. Dobierając materiał ostrza narzędzia należy uwzględnić nie tylko aspekty ekonomiczne ale również techniczne [18, 20]. Zużycie ostrzy niekorzystnie wpływa na przebieg obróbki skrawaniem. Ze wzrostem drogi skrawania, a tym samym zużycia ostrza, następuje wzrost zarówno wartości siły skrawania jak i jej amplitudy [10]. Ze wzrostem zużycia ostrza narzędzia następuje wzrost temperatury w strefie skrawania, co może stanowić zagrożenie ze względu na bezpieczeństwo obróbki [11, 21], a także przyczynia się do wzrostu rozciągających naprężeń własnych w warstwie wierzchniej obrabianego przedmiotu [4].

Do materiałów, których obróbka skrawaniem wiąże się z szybkim zużywaniem się ostrzy narzędzi, należą stopy tytanu [1, 2, 9]. Intensywne zużywanie się narzędzi skrawających spowodowane jest właściwościami tych stopów, a mianowicie bardzo małą przewodnością cieplną, dość dużymi oporami skrawania, skłonnością do tworzenia się narostu i zrostów tarciovych wskutek dużej energii powierzchniowej. Badania mechanizmu zużycia płytek z węgliku spiekane pokrytych powłoką TiAlN, ścieranych przeciwpróbką ze stopu tytanu Ti6Al4V, wykazały, że zużycie następuje wskutek oddziaływania adhezyjnego łącznie z intensywnym oddziaływaniem ściernym stopu tytanu i zwiększa się ze wzrostem siły docisku oraz prędkości poślizgu [6]. Mechanizm zużycia ostrzy analizowano również podczas frezowania stopu tytanu Ti-6242S za pomocą frezów z węglików spiekanych niepowlekanych oraz powlekanych warstwą TiN, TiC oraz TiCN [1].

Podczas obróbki stopów tytanu największą wartość osiąga siła odporowa, co jest niekorzystne ze względu na dokładność obrabianych przedmiotów. Siła odporowa wykazuje też większy wzrost w miarę zwiększania się zużycia ostrza w porównaniu z siłą skrawania i siłą posuwową [9]. Zatem biorąc pod uwagę relatywnie mały moduł Younga stopów tytanu należy spodziewać się, że ze wzrostem zużycia ostrza następować będzie zwiększenie błędów kształtu obrabianych przedmiotów.

Ważnym wskaźnikiem jakości obrabianych przedmiotów jest chropowatość powierzchni, która ma wpływ na właściwości eksploatacyjne elementów maszyn, takie jak wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na zużycie tribologiczne oraz odporność na korozję. Do głównych czynników wpływających na chropowatość powierzchni po obróbce skrawaniem zalicza się posuw, promień naroża, kąty przystawienia i materiał obrabiany. W pracy [7] wykazano, że chropowatość powierzchni stopu tytanu TA15 po frezowaniu zależy również od materiału ostrza narzędzia i jego zużycia. Wyniki badań wpływu parametrów skrawania stopu tytanu Ti6Al4V i „czystego” tytanu na jakość obrobionej powierzchni przedstawiono w pracy [19]. Wytypowano optymalne w aspekcie uzyskania minimalnej chropowatości i dokładności parametry technologiczne skrawania. Podczas toczenia kulistej powierzchni, z uwagi na mniejszą prędkość skrawania, wyższe wartości chropowatości otrzymano w pobliżu osi przedmiotu obrabianego.

Chropowatość powierzchni ukształtowana podczas frezowania może mieć wpływ na przebieg kolejnych operacji, jakim poddawane są obrabiane przedmioty. Stwierdzono, że efektywność często stosowanego po frezowaniu kulkowania, oceniana na podstawie wartości współczynnika restytucji, zależy od chropowatości powierzchni [3]. Z kolei, badania [14] dowiodły, że chropowatość powierzchni przedmiotów po frezowaniu z różnym posuwem wpływa na wytrzymałość połączeń adhezyjnych.

W ostatnich latach można zauważyć tendencję, zwłaszcza w przemyśle lotniczym, do wytwarzania tzw. elementów integralnych, które pod względem funkcjonalnym zastępują zespoły składające się z kilkudziesięciu a nawet kilkuset części. Elementy integralne charakteryzują się bardzo złożoną budową, a ich wykonanie zwykle wymaga usunięcia kilkudziesięciu procent objętości półfabrykatu. Występujące w elementach integralnych cienkie ścianki utrudniają wykonanie tych elementów ze względu na łatwość utraty stabilności skrawania. Usuwanie kolejnych warstw materiału zmienia geometrię obrabianego przedmiotu, co powoduje zmianę wskaźnika stabilności [12, 15].

Większość publikacji na temat frezowania stopów tytanu dotyczy obróbki płaszczyzn. W porównaniu z obróbką płaszczyzn znacznie trudniejsze jest kształtowanie rowków, które bardzo często występują w elementach integralnych. Podczas frezowania rowka w pełnym materiale szerokość skrawania jest równa szerokości rowka a kąt styku frezu z materiałem obrabianym wynosi  $180^\circ$ . W takich warunkach utrudnione jest odprowadzanie ciepła ze strefy skrawania, wskutek czego narzędzie bardziej się nagrzewa, co prowadzi do przyspieszonego zużycia jego ostrzy. Duża siła posuwowa powoduje odkształcenia frezu trzpieniowego, co może spowodować pogorszenie chropowatości obrabianej powierzchni, a nawet zużycie katastroficzne (złamanie) narzędzia. W takich przypadkach można zastosować specjalną podpórkę, zwłaszcza gdy stosunek wysięgu frezu do jego średnicy jest bardzo duży, co ma miejsce podczas frezowania głębokich rowków o małej szerokości [16].

Ze względu na kształt frezowanych rowków do ich wykonania zwykle stosuje się frezy jednolite, najczęściej z węglików spiekanych. Właściwości węglików spiekanych zależą od ich składu chemicznego oraz wielkości ziaren. Z analizy literatury wynika, że dotychczasowe badania trwałości ostrzy frezów stosowanych do obróbki rowków w stopach tytanu nie uwzględniały wielkości ziaren węgla. Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu wielkości ziaren jednolitego frezu węglkowego na trwałość ostrzy oraz chropowatość powierzchni w procesie frezowania rowków w przedmiotach wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V.

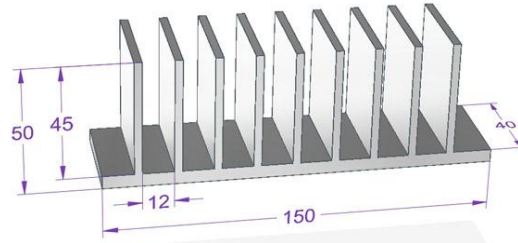
## 2. Metodyka badań

W eksperymencie wykorzystano próbki ze stopu tytanu Ti6Al4V w stanie wyżarzonym, który ze względu na swoje właściwości stosowany jest w przemyśle lotniczym, samochodowym, medycznym i wielu innych. Skład chemiczny i właściwości fizyczne stopu tytanu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości fizyczne stopu tytanu Ti6Al4V

skład chemiczny, %					właściwości mechaniczne		
Al	V	C	Fe	Ti	R <sub>m</sub>	HRC	E
6,25-6,31	4,09-4,12	0,026-0,027	0,18-0,21	reszta	1014 MPa	33	120 GPa

Badania polegały na frezowaniu rowków, przy założeniu, że szerokość frezowania jest równa średnicy frezu:  $a_e = D$ . Przy tego typu warunkach obróbki obciążenie frezu jest stosunkowo duże. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie frezu o mniejszej średnicy niż szerokość rowka i wykorzystanie różnego rodzaju strategii obróbkowych: równoodległej, trochoidalnej itp. Jednak przy założonej głębokości rowka, zmniejsza się sztywność narzędzia z uwagi na zwiększenie się stosunku L/D (wysięgu narzędzia do jego średnicy). Ponadto wydłuża się czas obróbki. Widok przykładowej próbki i modelu z naniesionymi wymiarami przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Kształt i wymiary próbki

Badania przeprowadzono na centrum obróbkowym Avia VMC-800HS. Maszyna wyposażona w sterowanie Heidenhain dedykowana jest do realizacji procesów obróbki HSM dzięki zastosowaniu wrzeciona o dużej mocy 25 kW i maksymalnej prędkości obrotowej 24tys obr/min.

W badaniach zastosowano frezy wykonane z węglików spiekanych o średnicy  $D = 12$  mm. Zastosowano frezy 4-ostrowe o geometrii dedykowanej do obróbki materiałów trudnoobrabialnych. Czynnikiem zmiennym w badaniach była różna wielkość ziarna węglika w osnowie spoiwa, którym jest kobalt. Pierwszą grupę frezów stanowiły narzędzia, których substrat określany jest mianem ultradrobnoziarnistego. Druga grupa to frezy o średniej grubości ziaren węglików. Trzecia grupa narzędzi to frezy o gruboziarnistej strukturze. Do badań użyto po cztery sztuki narzędzi o strukturze ultradrobnoziarnistej i gruboziarnistej oraz sześć sztuk narzędzi o strukturze drobnoziarnistej. W tabeli 2 przedstawiono fotografie mikrostruktury poszczególnych grup frezów przy powiększeniu x1000.

Tabela 2. Mikrostruktura poszczególnych grup frezów (powiększenie x1000)

struktura ultradrobnoziarnista	struktura drobnoziarnista	struktura gruboziarnista

Wielkość ziarna w znaczący sposób wpływa na zużycie frezu, zwłaszcza o charakterze dynamicznym. Innym czynnikiem wpływającym na wytrzymałość materiału narzędziowego jest procentowy udział kobaltu jako fazy wiążącej, który w narzędziach skrawających może wahać się w granicach od kilku do około 30%. Narzędzia mocowano w oprawkach z zachowaniem stałego wysięgu.

Z uwagi na dynamikę procesu skrawania zużycie ostrza ma charakter złożony i może być kombinacją zużycia mechanicznego, adhezyjnego, dyfuzyjnego, cieplnego oraz chemicznego. W badaniach skupiono się na analizie zużycia mechanicznego, w przypadku którego występuje podział na zużycie ściernie oraz zużycie wytrzymałościowe (doraźne lub zmęczeniowe). Wyróżnić

można kilka kryteriów zużycia ostrza: geometryczne, technologiczne, fizyczne i ekonomiczne. Do pomiarów zużycia bezpośrednio związanych ze stanem ostrza skrawającego wykorzystuje się kryteria geometryczne. Wskaźniki zużycia ostrzy wyznaczono w oparciu o normę PN-ISO 8688: 1996. Mierzono: trwałość narzędzia, drogę skrawania, chropowatość powierzchni na dnie rowka. Wskaźniki zużycia mierzono na mikroskopie cyfrowym Keyence VHX 5000.

Podczas realizacji eksperymentu zastosowano stałe wartości parametrów technologicznych skrawania. Prędkość skrawania przyjęto na poziomie  $v_c = 30$  m/min, posuw na ostrze  $f_z = 0,14$  mm/ostrze. Podczas realizacji procesu frezowania rowka głębokość skrawania wynosiła  $a_p = 2$  mm natomiast szerokość frezowania  $a_e = 12$  mm równa była średnicy badanych frezów. Wartości parametrów zostały przyjęte z przedziału zalecanych przez producentów narzędzi użytych podczas eksperymentu.

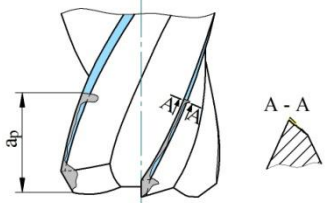
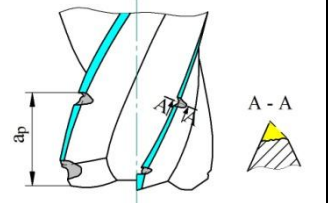
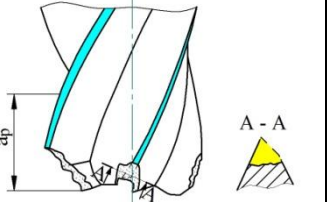
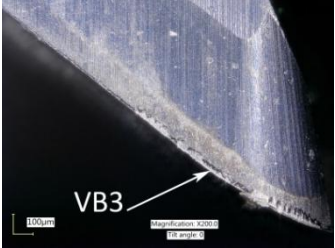
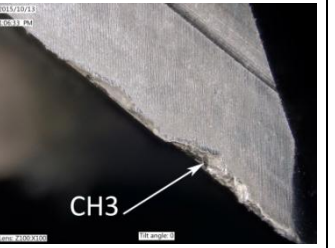

Pomiary chropowatości powierzchni przeprowadzono na urządzeniu do pomiaru chropowatości, topografii 3D i konturu HOMMEL-ETAMIC T8000 RC120.

W celu analizy zużycia narzędzi oraz wpływu ich zużycia na jakość powierzchni proces frezowania przerywano po określonym czasie skrawania w celu przeprowadzenia pomiarów zużycia i chropowatości powierzchni. Przyjęto następujące kroki czasowe  $t$ : 0,1; 0,5; 1; 3; 5; 8; 11; 15 min.

### 3. Wyniki badań

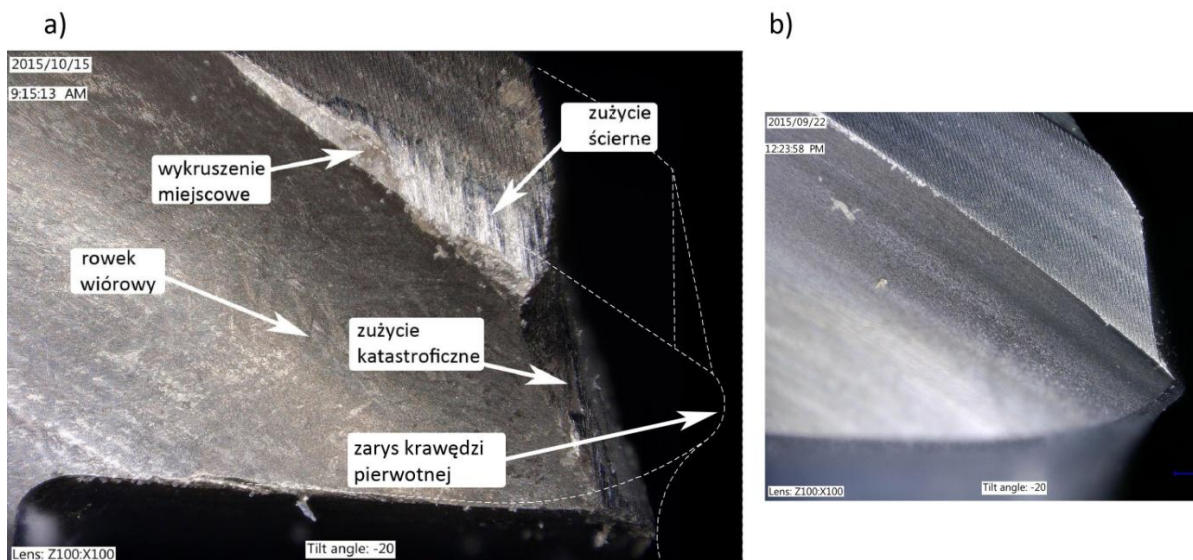
Spśród wielu form zużycia mechanicznego opisanych w normie PN-ISO 8688: 1996, podczas realizacji eksperymentu zaobserwowano trzy odmiany zużycia: zużycie miejscowe powierzchni przyłożenia *VB3*, wykruszenie miejscowe *CH3* oraz zużycie katastroficzne *CF*. Graficzna prezentacja oraz przykładowe widoki zaobserwowanych form zużycia przedstawiono w tabeli 3

Tabela 3. Zaobserwowane formy zużycia

symbol wg ISO	starcie miejscowe <i>VB3</i>	wykruszenie miejscowe <i>CH3</i>	zużycie katastroficzne <i>CF</i>
graficzna prezentacja			
widok rzeczywisty			

Na rysunku 2 przedstawiono widok porównawczy frezu po czasie skrawania  $t = 15$  min (rys. 2a) oraz nowego (rys. 2b). Frez należy do grupy narzędzi wykonanych z drobnoziarnistego węgliku.





Rys. 2. Stan ostrza: a) po czasie skrawania  $t = 15$  min, b) nowego

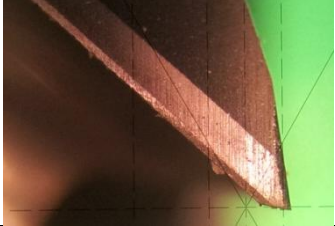
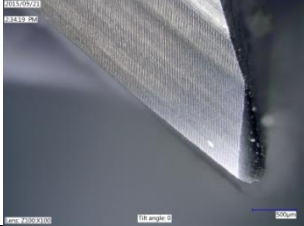
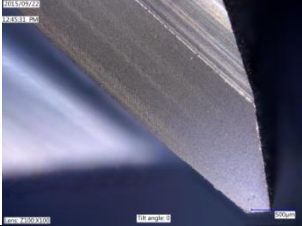

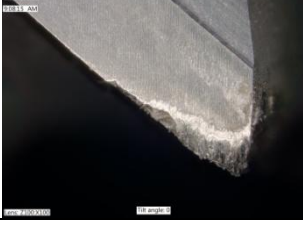
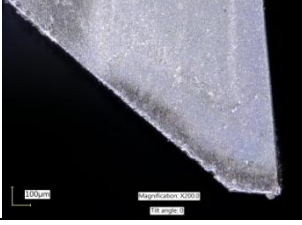
Z reguły na analizowanych ostrzach występowały jednocześnie różne formy zużycia. Początkowo na ostrzu występuje zużycie miejscowe  $VB3$  o charakterze ściernym. Drobne ubytki materiału powodują zmianę warunków skrawania, lokalną koncentrację naprężeń, a w konsekwencji pojawienie się wykruszenia miejscowego  $CH3$ . W obrębie wykruszenia miejscowego może pojawić się niejako "nowa" krawędź skrawająca o niezdefiniowanej, losowej geometrii (zjawisko obserwowane w obróbce ścierniej, za które odpowiada łupliwość ziaren). Po osiągnięciu krytycznej dla danego ostrza wartości zużycia  $VB3+CH3$  narzędzie ulega zużyciu katastroficznemu  $CF$ . Z uwagi na dynamikę procesu skrawania nie zawsze udaje się zaobserwować opisane zjawiska. Często zużycie katastroficzne jednego ostrza, podczas kontynuacji ruchu obrotowego frezu, pociąga za sobą wyłamanie wszystkich ostrzy. W przypadku obrabiarek CNC niewyposażonych w systemy, które pozwalałyby przerwać natychmiast obróbkę, przesuwanie się materiału obrabianego w kierunku narzędzia nieposiadającego ostrzy powoduje niejako wystąpienie kolizji i złamanie całego narzędzia u podstawy zamocowania lub nad linią wyznaczającą powierzchnię obrabianą. Widok tego typu narzędzi przedstawiono na rysunku 3.



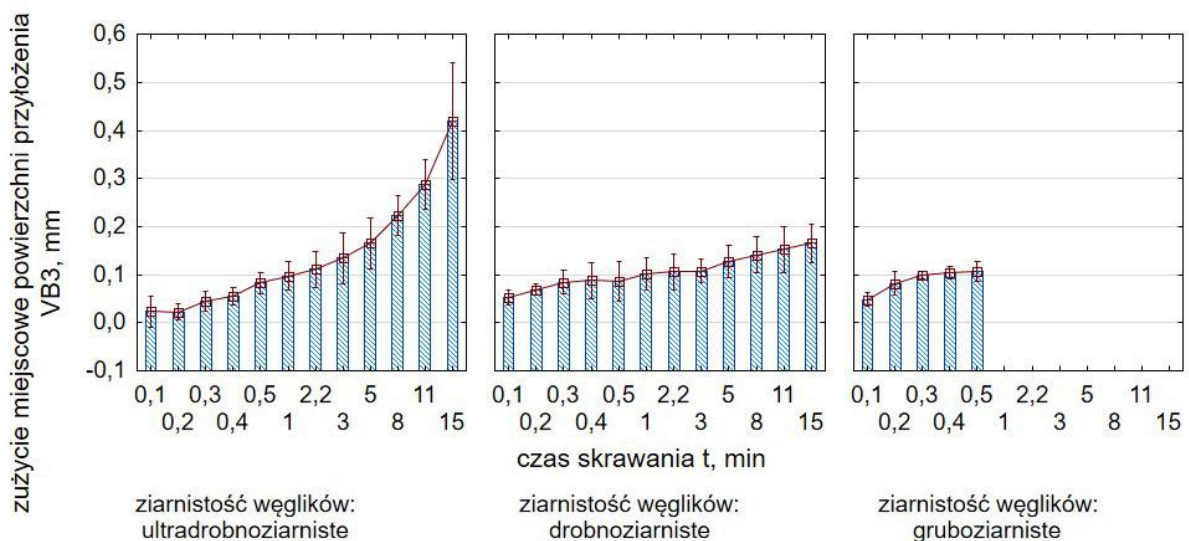
Rys. 3. Przykłady frezów po zużyciu katastroficznym

W tabeli 4 przedstawiono wybrane fotografie przedstawiające stan ostrzy nowych oraz zużytych.

Tabela 4. Porównanie stanu ostrzy nowych i zużytych

	gruboziarnisty	drobnoziarnisty	ultradrobnoziarnisty
nowy			
zużyty			

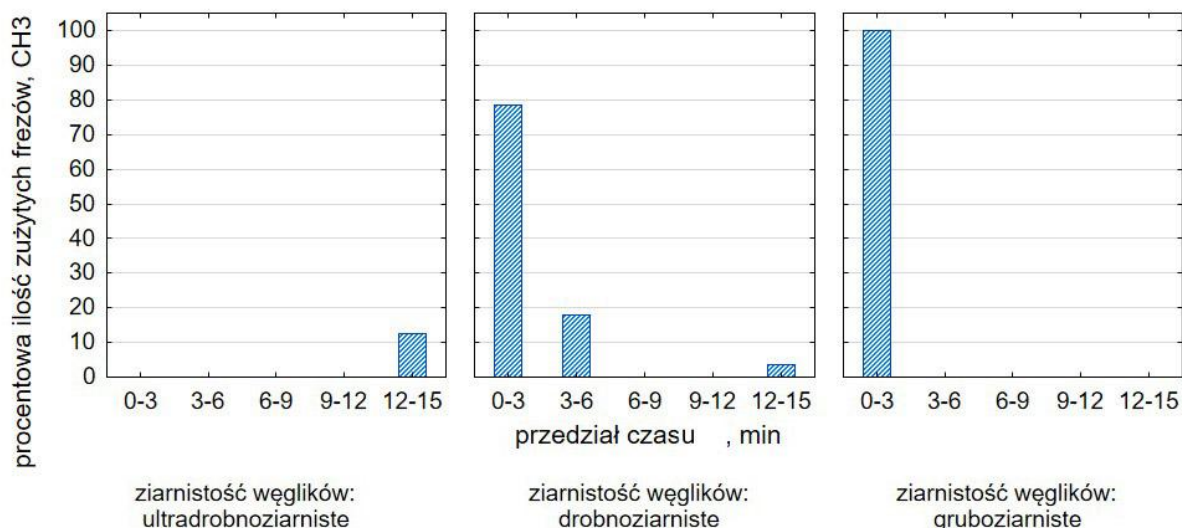
Na rysunku 4 przedstawiono wykres zużycia ściernego  $VB_3$  na powierzchni przyłożenia w funkcji czasu skrawania. Ostrza wykonane z węglików o strukturze gruboziarnistej uległy wykruszeniu w początkowej fazie eksperymentu, dlatego wyniki pomiaru starcia prowadzono do czasu skrawania  $t = 0,5$  min. Najmniejsze zużycie wykazały ostrza o strukturze drobnoziarnistej, dla których średnia wartość starcia po czasie skrawania  $t = 15$  min wyniosła  $VB_3 = 0,17$  mm.



Rys. 4. Zużycie miejscowe powierzchni przyłożenia w funkcji czasu skrawania

Analiza zużycia miejscowego  $VB_3$  nie daje pełnego obrazu trwałości ostrza z uwagi na występowanie innych form zużycia. Na rysunku 5 przedstawiono procentowy udział frezów, dla których pojawiło się zużycie w formie  $CH_3$ .

W przypadku frezów wykonanych z węglików o strukturze ultradrobnziarnistej 12,5% wszystkich frezów uległo zużyciu w ostatnim przedziale czasu 12-15min. Dla populacji 87,5% jedyną formą zużycia było zużycie ściernie  $VB_3$ .



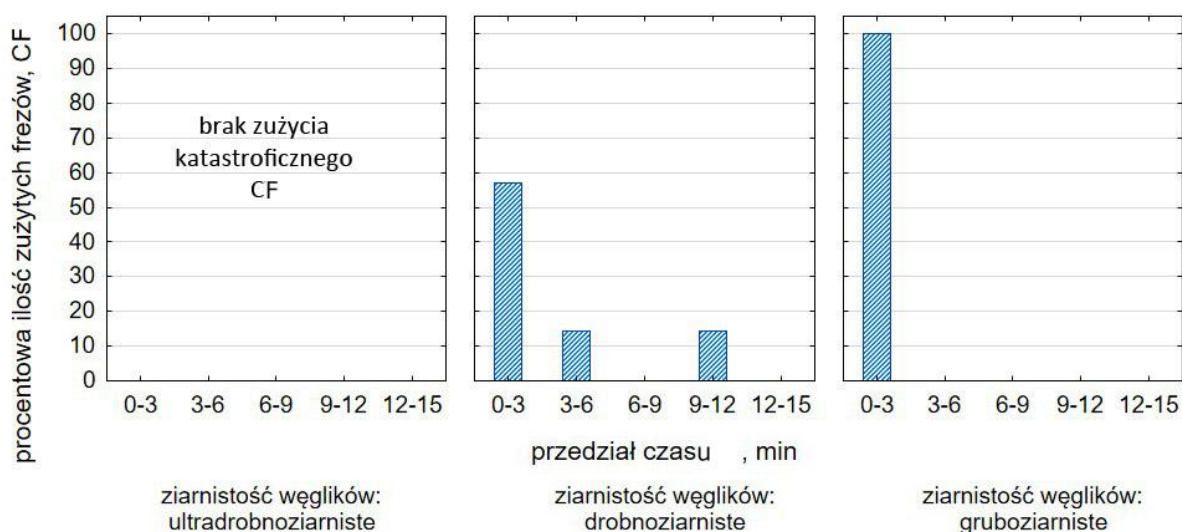
Rys. 5. Procentowy udział zużycia w formie wykruszenia miejscowego  $CH_3$  w poszczególnych przedziałach czasu frezów o różnej ziarnistości węglików

Dla frezów o strukturze drobnoziarnistej największy udział wykruszenia miejscowego miał miejsce w początkowych minutach pracy narzędzi. Po czasie skrawania  $t = 15$  min sumaryczna procentowa ilość frezów, na których wystąpiło zużycie  $CH_3$ , wynosiła 100%.

Natomiast na wszystkich ostrzach frezów o strukturze gruboziarnistej pojawiło się wykruszenie miejscowe w przedziale czasu 0-3 min.

Wykruszenie miejscowe  $CH_3$  nie oznacza, że narzędzia tracą całkowicie swoją zdolność skrawną. Jednak często w krótkim odstępie czasu może pojawić się zużycie katastroficzne  $CF$ .

Na rysunku 6 przedstawiono rozkład procentowego zużycia katastroficznego  $CF$  frezów o różnej ziarnistości węglików. W przypadku narzędzi o strukturze ultradrobnoziarnistej nie wystąpiła ta forma zużycia w całym założonym przedziale czasu procesu skrawania. Zużycie katastroficzne jest najmniej pożądaną formą zużycia, stanowiącą problem w procesie automatycznej obróbki CNC, wiąże się z koniecznością wymiany narzędzia, przerwania programu obróbkowego, stałej kontroli operatora itp.



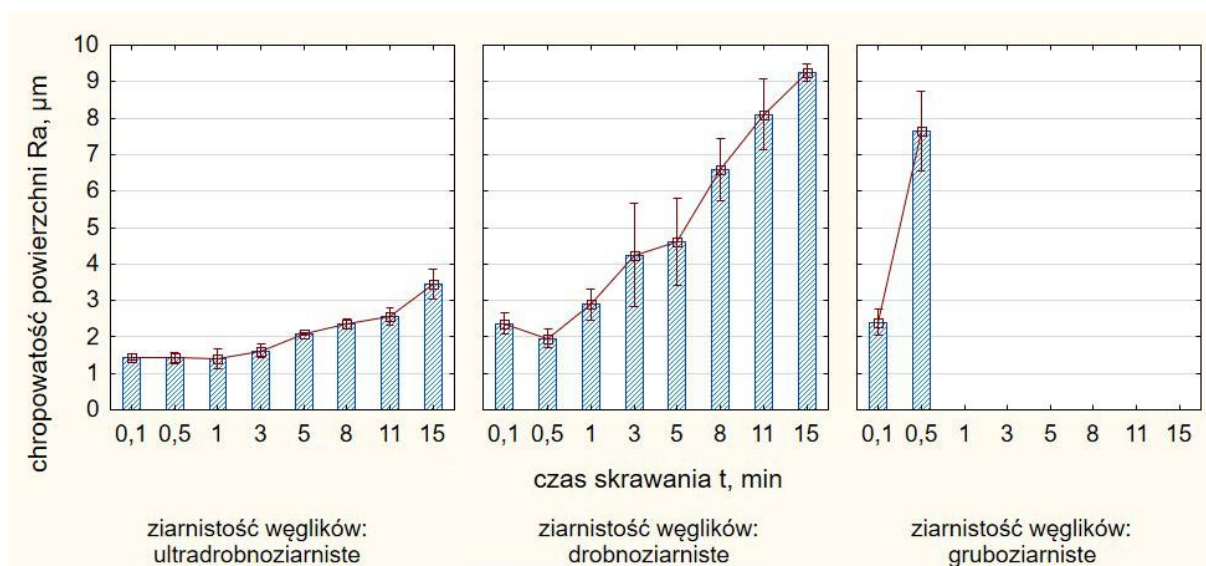
Rys. 6. Procentowy udział zużycia katastroficznego  $CF$  w poszczególnych przedziałach czasowych frezów o różnej ziarnistości węglików



Dla narzędzi o drobnoziarnistej strukturze około 85% narzędzi uległo zużyciu katastroficznemu po czasie skrawania  $t = 15$  min.

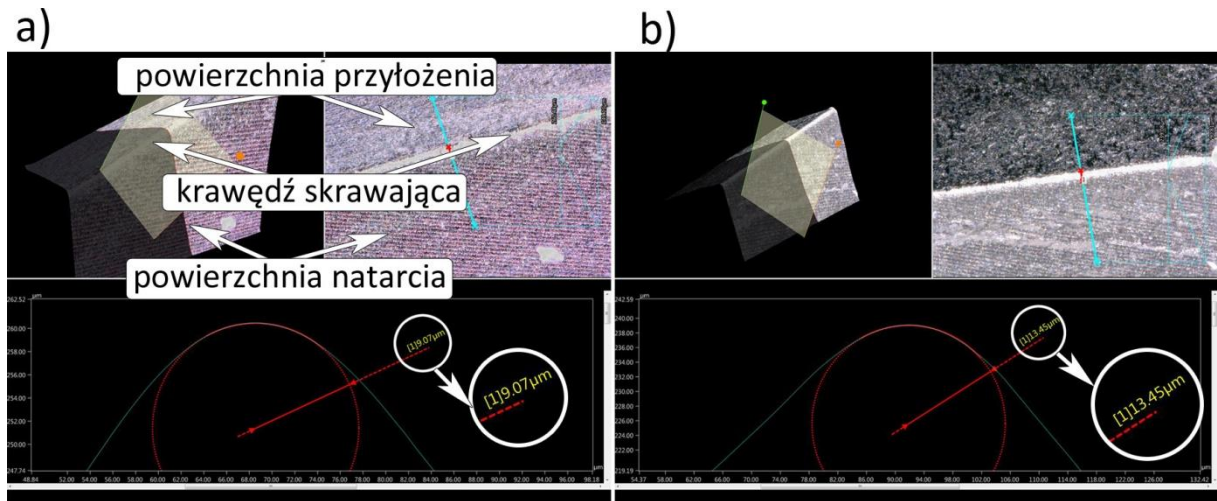
W przedziale czasu 0-3 min wszystkie badane narzędzia o strukturze gruboziarnistej uległy zużyciu katastroficznemu.

Na rysunku 7 przedstawiono wpływ struktury węglików na chropowatość powierzchni mierzoną na dnie próbki, podczas frezowania rowków w przyjętych w eksperymencie krokach czasu. W przypadku analizy chropowatości powierzchni podczas skrawania może pojawić się tzw. "faza docierania", która powoduje, że do pewnego momentu wraz ze wzrostem czasu skrawania chropowatość maleje lub nie ma jej widocznego wzrostu. Dla narzędzi o strukturze ultradrobnoziarnistej faza ta widoczna jest do czasu skrawania  $t = 1$  min. Można to tłumaczyć tym, że w początkowej fazie skrawania ostra krawędź skrawająca, której zarys odzwierciedla się w materiale obrabianym, powoduje wytworzenie większych mikronierówności, natomiast po okresie początkowego zużycia i wzroście promienia zaokrąglenia krawędzi chropowatość maleje. Na rysunku 8 przedstawiono porównanie promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej nowej, narzędzia o strukturze ultradrobnoziarnistej oraz po czasie skrawania  $t = 1$  min. Po tym czasie widoczny jest stopniowy powolny wzrost chropowatości wraz ze wzrostem czasu skrawania, co związane jest z narastającymi wartościami wskaźników zużycia ostrza. Dla narzędzi o strukturze drobnoziarnistej faza docierania jest krótsza. Po czasie skrawania  $t = 0,5$  min widoczny jest stopniowy wzrost chropowatości powierzchni, przy czym tempo tego wzrostu jest większe w porównaniu z narzędziami o strukturze ultradrobnoziarnistej.



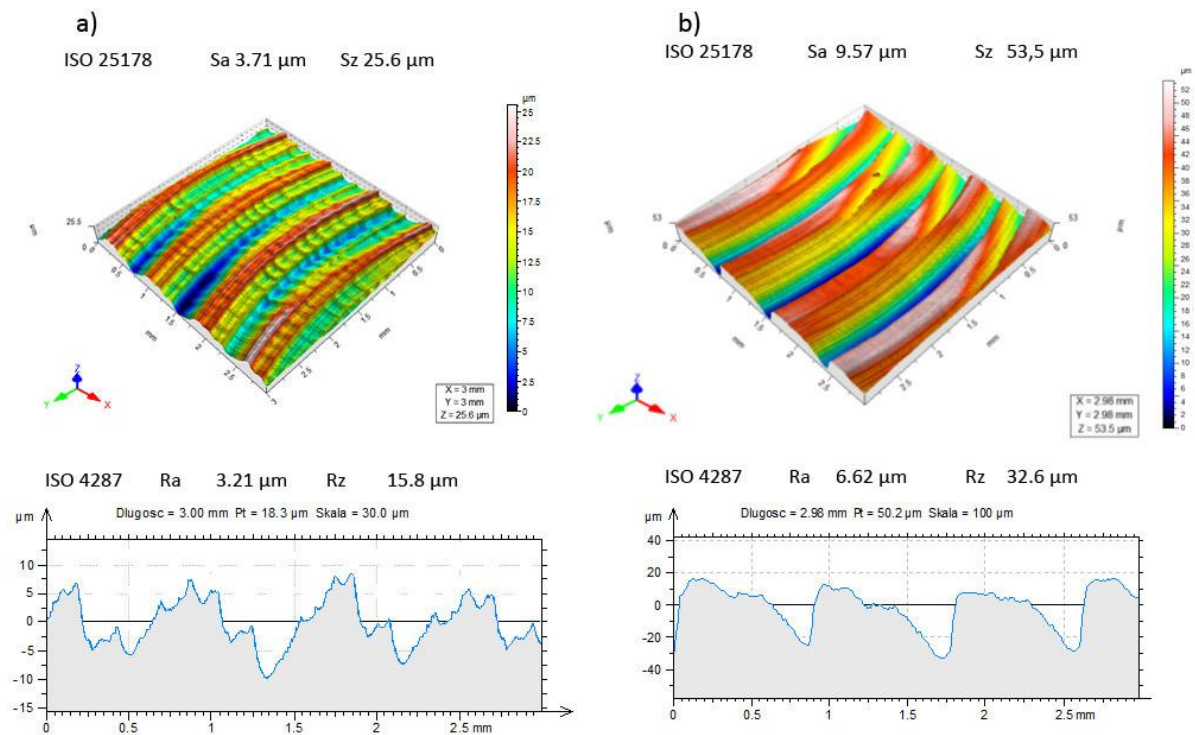
Rys. 7. Wpływ struktury węglików na chropowatość powierzchni podczas frezowania rowków

Dla narzędzi o strukturze gruboziarnistej zaobserwowano jedynie szybki wzrost chropowatości powierzchni od początkowego etapu skrawania. Pomiary prowadzono do momentu zużycia CF. Najmniejszą chropowatość powierzchni uzyskano dla narzędzi o strukturze ultradrobnoziarnistej.



Rys. 8. Porównanie promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej narzędzia o strukturze ultradrobnoziarnistej w przypadku krawędzi: a) nowej, b) po czasie skrawania  $t = 1$  min

Na rysunku 9 przedstawiono porównanie topografii powierzchni w przypadku narzędzi o strukturze drobno i ultradrobnoziarnistej po czasie skrawania  $t = 8$  min.



Rys. 9. Porównanie topografii powierzchni po czasie skrawania  $t = 8$  min narzędzi o strukturze: a) ultradrobnoziarnistej, b) drobnoziarnistej

Widoczny jest charakterystyczny periodyczny układ mikronierówności odpowiadający odwzorowaniu krawędzi skrawającej w przedmiocie obrabianym oraz znacznie większe wartości parametrów chropowatości powierzchni dla narzędzi o strukturze drobnoziarnistej.

## 4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania eksperymentalne wpływu narzędzi o różnej wielkości ziarna węglików spiekanych na trwałość ostrza i chropowatość powierzchni obrabianej podczas frezowania rowków, przy ustalonych parametrach technologicznych obróbki, w stopie tytanu Ti6Al4V pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Spośród wskaźników zużycia opisujących zużycie mechaniczne najczęściej obserwowanymi formami zużycia było starcie miejscowe powierzchni przyłożenia *VB3*, wykruszenie miejscowe *CH3* oraz zużycie katastroficzne *CF*.

2. Pożądane jest, by wielkość ziarna węglika była tak dobrana do materiału obrabianego aby jedyną formą zużycia występującą w całym okresie trwałości ostrza było starcie miejscowe *VB3*. Pozwala to, przy założonych parametrach technologicznych skrawania, przewidzieć moment wymiany narzędzia.

3. Najmniejsze wartości starcia powierzchni przyłożenia *VB3* pojawiły się podczas skrawania narzędziami o strukturze drobnoziarnistej.

4. Najbardziej odporne na wykruszenia miejscowe oraz zużycie katastroficzne są narzędzia wykonane z węglików ultradrobnoziarnistych.

5. Dla całej populacji narzędzi o strukturze ultradrobnoziarnistej w założonym przedziale czasu skrawania  $t = 15$  min nie odnotowano zużycia katastroficznego. Wszystkie narzędzia zachowały swoją zdolność skrawną.

6. Wszystkie narzędzia o strukturze gruboziarnistej uległy zużyciu katastroficznemu *CF* w początkowej fazie skrawania (przedział 0-3 min).

7. Najlepszą jakość powierzchni uzyskano dla narzędzi o strukturze ultradrobnoziarnistej.

Biorąc pod uwagę trwałość ostrzy oraz chropowatość powierzchni najlepsze efekty uzyskano po obróbce narzędziami o strukturze ultradrobnoziarnistej. Pomimo większego starcia miejscowego *VB3*, w porównaniu z narzędziami o strukturze drobnoziarnistej, istotniejsze jest, że wszystkie narzędzia zachowały swoją zdolność skrawaną generując najmniejszą, ze wszystkich badanych grup, chropowatość powierzchni.

Nie zaleca się stosowania narzędzi o strukturze gruboziarnistej do obróbki materiałów trudnoobrabialnych z uwagi na duże prawdopodobieństwo pojawienia się zużycia katastroficznego *CF*.

Na podstawie badań wstępnych oraz przeprowadzonego eksperymentu można stwierdzić, że zmiana parametrów technologicznych skrawania może mieć wpływ na wartość starcia oraz procentową ilość zużytych frezów w poszczególnych przedziałach czasu, jednak ogólne tendencje związane z wpływem struktury frezów na trwałość i jakość powierzchni pozostaną na porównywalnym poziomie.

## Literatura

1. Abdel - Aal H A, Nouari M, Mansori M El. Influence of thermal conductivity on wear when machining titanium alloys. Tribology International 2009; 42: 359-372.
2. Bach P, Trmal G, Zeman P, Vana J, Maly J. High performance titanium milling at low cutting speed. Procedia CIRP 2012; 1: 226-231.

3. Bławucki S, Zaleski K. The effect of the aluminium alloy surface roughness on the restitution coefficient. *Advances in Science and Technology Research Journal* 2015; 9(27): 66-71.
4. Chen L, El-Wardany T I, Harris W C. Modelling of the effects of flank wear land and chip formation on residual stresses. *Annals of the CIRP* 2004; 53(1): 95-98.
5. Ezugwu E O, Wang Z M. Titanium alloys and their machinability - a review. *Journal of Materials Processing Technology* 1997; 68: 262-274.
6. Grzesik W, Małecka J, Zalisz Z, Żak K, Niesłony P. Investigation of friction and wear mechanisms of TiAlN coated carbide against Ti6Al4V titanium alloy using pin – on discs tribometer. *Archive of Mechanical Engineering* 2016; 63(1): 113-127.
7. Honghua S U, Peng L I U, Yucan F U, Jiuhoa X U. Tool life and surface integrity in high – speed milling of titanium alloy TA15 with PCD/PCBN tools. *Chinese Journal of Aeronautics* 2012; 25: 784-790.
8. Krolczyk G M, Niesłony P, Legutko S. Determination of tool life and research wear during duplex stainless turning. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2015; 15(2): 347-354.
9. Krupa K, Sieniawski J, Laskowski P. Zużycie narzędzi skrawających podczas toczenia stopu Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo. *Mechanik* 2010; 10: 654-661.
10. Kuczmaszewski J, Pieśko P. Wear of milling cutters resulting from high silicon aluminium alloy cast AlSi21CuNi machining. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16(1): 37-40.
11. Kuczmaszewski J, Zagórski I, Dziubinska A. Investigation of ignition temperature, time to ignition and chip morphology after the high-speed dry milling of magnesium alloys. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal* 2016; 88(3): 389-396.
12. Kuczmaszewski J, Zaleski K, Ed. *Obróbka skrawaniem stopów aluminium i magnezu*. Lublin: Politechnika Lubelska, 2015.
13. Nabhani F. Machining of aerospace titanium alloys. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 2001; 17: 99-106.
14. Rudawska A, Reszka M, Warda T, Miturska I, Szabelski J, Stancekova D, Skoczylas A. Milling as a method of surface pre-treatment of steel for adhesive bonding. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2016; 30(23): 2619-2636.
15. Rusinek R, Zaleski K. Dynamics of thin – walled element milling expressed by recurrence analysis. *Meccanica* 2016; 51(6): 1275-1286.
16. Shamato E, Saito A. A novel deep groove machining method utilizing variable – pitch end mill with feed – directional thin support. *Precision Engineering* 2016; 43: 277-284.



17. Su Y, He N, Li L. An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high – speed end milling of Ti-6Al-4V. *Wear* 2006; 261: 760-766.
18. Twardowski P, Legutko S, Krolczyk G M , Hloch S. Investigation of wear and tool life of coated carbide and cubic boron nitride cutting tools in high speed milling. *Advances in Mechanical Engineering* 2015; 7(6): 1-9.
19. Zębala W, Gawlik J, Matras A, Struzikiewicz G, Ślusarczyk Ł. Research of surface finish during titanium alloy turning. *Key Engineering Materials* 2014; 581: 409-414.
20. Zareena A R, Rahman M, Wong Y S. Binderless CBN tools, a breakthrough for machining titanium alloys. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2005; 127(2): 277-279.
21. Zoya Z A, Krishnamurthy R. The performance of CBN tools in the machining of titanium alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 2000; 100: 80-86.

#### **Acknowledgement:**



Badania realizowane w ramach projektu sektorowego INNOLOT (Akronim AMpHOra) pt. "Badania technologii przyrostowych procesów hybrydyzacji obróbki dla potrzeb rozwoju innowacyjnej produkcji lotniczej", koordynowanego przez Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o. - PZL Mielec, współfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w zakresie Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka Priorytet I., Działanie 1.5 PO IG., nr umowy INNOLOT /I/6/NCBR/2013