

Mgr inż. Krzysztof KRUPA; dr inż. Witold HABRAT;  
dr hab. inż. Krzysztof KUBIAK, prof. PRz (Politechnika Rzeszowska):

**ANALIZA SKŁADOWYCH SIŁY SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA  
WYKOŃCZENIOWEGO STOPU TYTANU NA OSNOWIE FAZY  
MIĘDZYMETALICZNEJ TiAl( $\gamma$ )**

Streszczenie

Przedstawiono wpływ warunków toczenia wykończeniowego stopu tytanu na osnowie fazy międzymetalicznej TiAl( $\gamma$ ) na wartości składowych całkowitej siły skrawania. Badania prowadzono dla wkładek ostrzowych typu C wykonanych z węgla spiekane, regularnego azotku boru oraz diamentu polikrystalicznego. Analizowano wpływ rodzaju wkładki ostrzowej oraz parametrów skrawania na wartości oraz intensywność zmian (w wyniku zużycia narzędzia) składowych siły skrawania. Badania realizowano w szerokim zakresie parametrów skrawania (prędkość skrawania  $v_c = 30\div 210$  m/min, posuw  $f = 0,05\div 0,15$  mm/obr, głębokość  $a_p = 0,15\div 0,35$  mm).

**Słowa kluczowe:** stop TiAl( $\gamma$ ), składowe siły skrawania, toczenie wykończeniowe

**ANALYSIS OF CUTTING FORCE COMPONENTS IN FINISH TURNING  
OF GAMMA TITANIUM ALLOY TiAl( $\gamma$ )**

Abstract

This paper presents the influence of finish turning conditions of gamma titanium alloys TiAl( $\gamma$ ) on the component of cutting force. The experimental tests were carried out with use of type C cutting inserts made of cemented carbide, regular cubic boron nitride and polycrystalline diamond. Effects of cutting inserts and machining parameters on value and intensity of changes (as a result of wear) of the cutting force components were analyzed. The research was performed in a wide range of cutting parameters (cutting speed  $v_c=30-210$ m/min, feed rate  $f=0,05-0,15$ mm/rev and depth of cut  $a_p=0,15-0,35$ mm).

**Keyword:** TiAl( $\gamma$ ) alloy, cutting force components, finish Turing

# ANALIZA SKŁADOWYCH SIŁY SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA WYKOŃCZENIOWEGO STOPU TYTANU NA OSNOWIE FAZY MIĘDZYMETALICZNEJ TiAl( $\gamma$ )

Krzysztof KRUPA<sup>1</sup>, Witold HABRAT<sup>2</sup>, Krzysztof KUBIAK<sup>3</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój środków transportu oraz konieczność stosowania coraz nowocześniejszych rozwiązań technicznych przyjaznych dla środowiska, zapewniających wysoki poziom bezpieczeństwa oraz tanich w eksploatacji, sprzyja prowadzeniu prac badawczych skupionych na poszukiwaniu nowoczesnych lekkich materiałów konstrukcyjnych. Stąd rosnące zainteresowanie stopami tytanu na osnowie fazy międzymetalicznej TiAl( $\gamma$ ). Obecnie najważniejsze obszary potencjalnego ich zastosowania to przemysł lotniczy i motoryzacyjny [3-4,7]. Stopy tytanu TiAl trzeciej generacji ze względu na dobre właściwości mechaniczne w temperaturze do 900°C są wprowadzane na stacjonarne i wirujące elementy silników lotniczych – przede wszystkim łopatki i tarcze turbiny niskiego ciśnienia oraz łopatki sprężarki wysokiego ciśnienia [8-9]. Znajdują one również zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym na elementy silników spalinowych m.in. wirniki turbosprężarki, zawory wydechowe, korbowody i sworznie.

Najważniejsze właściwości tych stopów umożliwiające ich zastosowanie w wytwarzaniu podzespołów nowoczesnych silników to:

- duża wartość modułu sprężystości w odniesieniu do gęstości (o 50% większa w porównaniu do innych stopów stosowanych w technice lotniczej),
- dobra odporność na pełzanie w temperaturze 600-850°C sprawiająca, że stop ten jest konkurencyjny względem nadstopów niklu o dwukrotnie większej gęstości,

---

<sup>1</sup> Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego, Politechnika Rzeszowska

<sup>2</sup> Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji, Politechnika Rzeszowska

<sup>3</sup> Katedra Materiałoznawstwa, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

– brak skłonności do samozapłonu podczas obróbki.

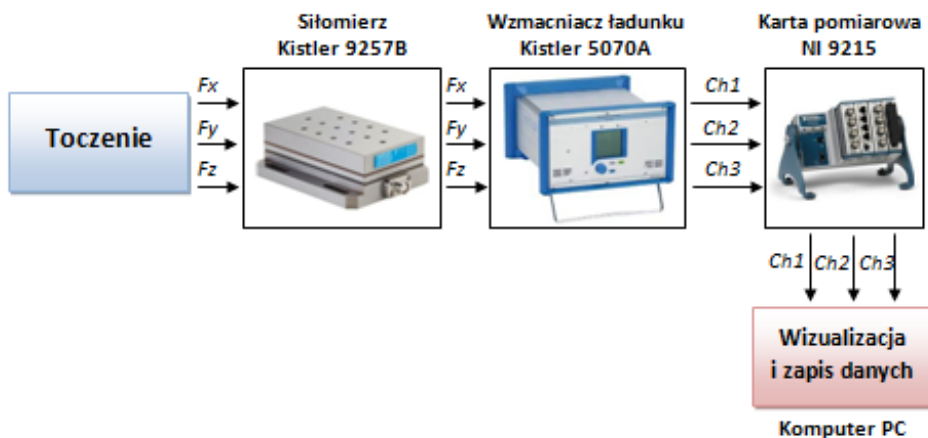
Obecnie w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym większość podzespołów wytwarzana jest z zastosowaniem obróbki skrawaniem, która stanowi jedną z ważniejszych technologii kształtowania elementów maszyn i urządzeń. Wytwarzanie części ze stopów tytanu na osnowie fazy międzymetalicznej TiAl jest szczególnie trudne ze względu na niską skrawalność, która wynika ze specyficznych właściwości stopu: dużej twardości i kruchości, aktywności chemicznej oraz małej przewodności cieplnej [1-3]. Decyduje to o intensywnym zużywaniu się ostrzy narzędzi skrawających, co prowadzi do przesunięcia głównej krawędzi skrawającej oraz dodatkowego zwiększenia tarcia oraz wartości gniotu pomiędzy narzędziem i materiałem obrabianym. Jest to przyczyną podwyższenia temperatury w mikroobjętości materiału narzędzia i warstwie wierzchniej materiału obrabianego. Większe wartości składowych siły skrawania generowane przez wzrost oporu skrawania powodują duże odkształcenie materiału warstwy wierzchniej i jego umocnienie. Dodatkowo wysoka temperatura procesu skrawania i zmiana morfologii składników fazowych powierzchni obrabianego elementu może być przyczyną uszkodzenia powierzchni obrabianej oraz zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej - zwiększa się tendencja do inicjacji i rozwoju mikropęknięć [6]. Stąd pojawia się konieczność opracowania efektywnych strategii wytwarzania pozwalających na zwiększenie wydajności, obniżenie kosztów oraz uzyskanie produktu o dobrej jakości. Z tego względu stawiane są coraz większe wymagania w odniesieniu do materiałów narzędziowych jak również optymalnych warunków obróbki tej grupy stopów na osnowie fazy międzymetalicznej TiAl [5].

## 2. STANOWISKO I METODYKA BADAŃ

Badania wpływu parametrów skrawania: prędkości skrawania  $v_c$ , posuwu  $f$  i głębokości skrawania  $a_p$  oraz rodzaju ostrzy narzędzi skrawających na wartość składowych całkowitej siły skrawania prowadzono w Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej z użyciem tokarki NEF 600 z układem sterowania Fanuc 200is (rys.1).



Rys. 1. Stanowisko badawcze do pomiaru wartości składowych całkowitej siły skrawania



Rys. 2 Schemat układu pomiarowego składowych całkowitej siły skrawania

Pomiar składowych całkowitej siły skrawania:  $F_c$ ,  $F_p$  i  $F_f$  prowadzono z zastosowaniem siłomierza piezoelektrycznego Kistler 9257B o zakresie pomiarowym  $\pm 5\text{kN}$  (rys. 2) – przymocowanego za pomocą oprawki VDI do głowicy. Sygnał z siłomierza przekazywany jest do wzmacniacza ładunku Kistler 5070 i transmitowany do komputera przez złącze USB za pomocą 16-bitowego przetwornika analogowo cyfrowego NI9215 firmy National Instruments o zakresie pomiarowym  $\pm 10\text{V}$ . Wizualizację, przetwarzanie i zapisywanie sygnału prowadzono za pomocą

programu opracowanego w środowisku programistycznym LabVIEW. Częstotliwość próbkowania sygnału ustalono na 10kHz.

### 3. MATERIAŁ OBRABIANY I NARZĘDZIA

Badania prowadzono na elemencie w kształcie walca o średnicy  $\varnothing=70\text{mm}$  wykonanego ze stopu tytanu na osnowie fazy międzymetalicznej  $\text{TiAl}(\gamma)$  -  $\text{Ti-45Al-5Nb-0,2B-0,2C}$ .

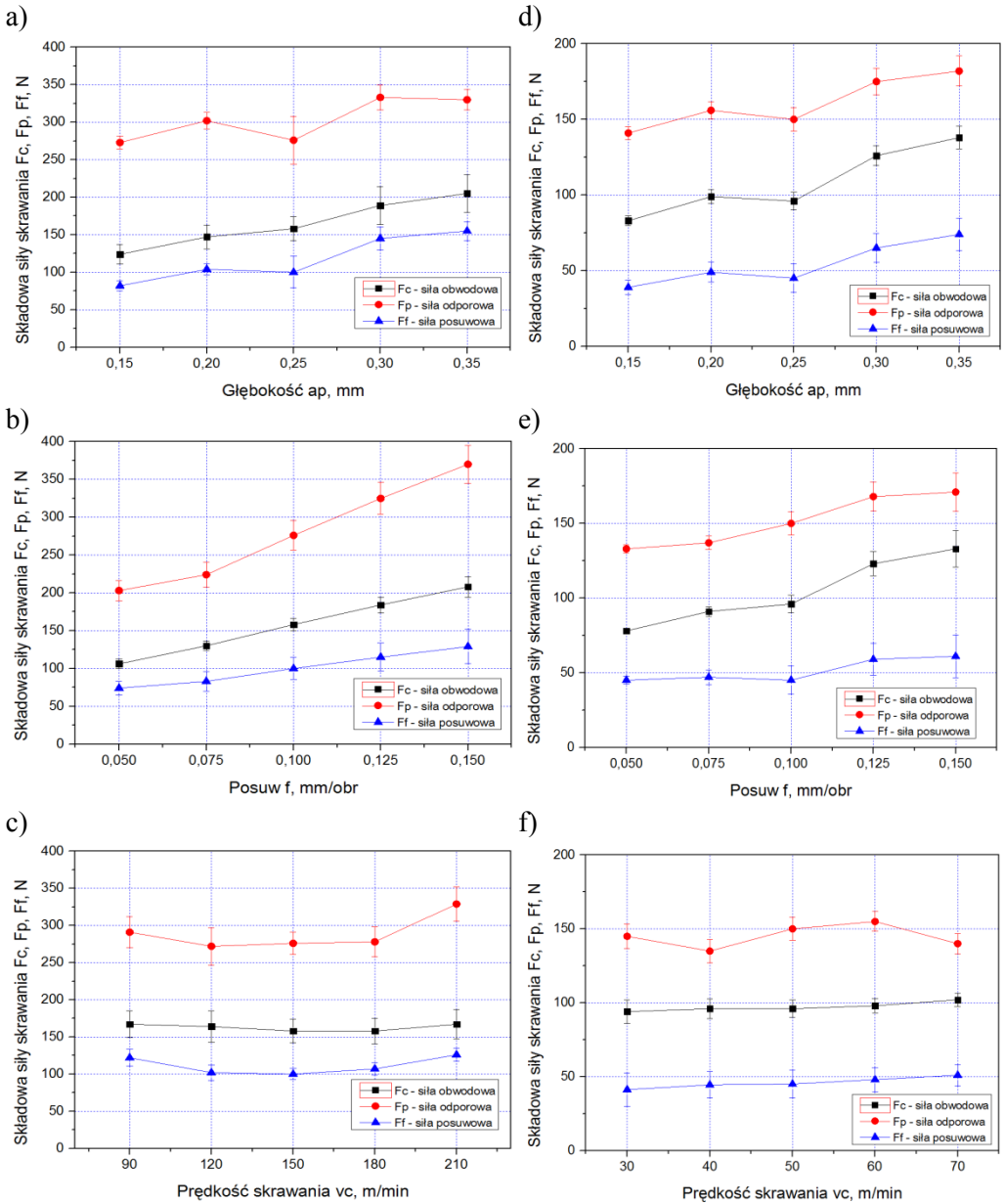
Przyjęto toczenie wzdłużne. Zastosowano wkładki ostrzowe wykonane z węglika spiekanego - CNMG 120412-SM 1115, regularnego azotku boru - CNGA 120412S01530B 7525 oraz diamentu polikrystalicznego CNMA 120408 MD220. Zastosowano wodny roztwór cieczy chłodząco – smarującej Statoil ToolWay S465 o stężeniu 6,5%. Ustalono następujące parametry skrawania (tab. 1).

Tabela 1. Parametry skrawania

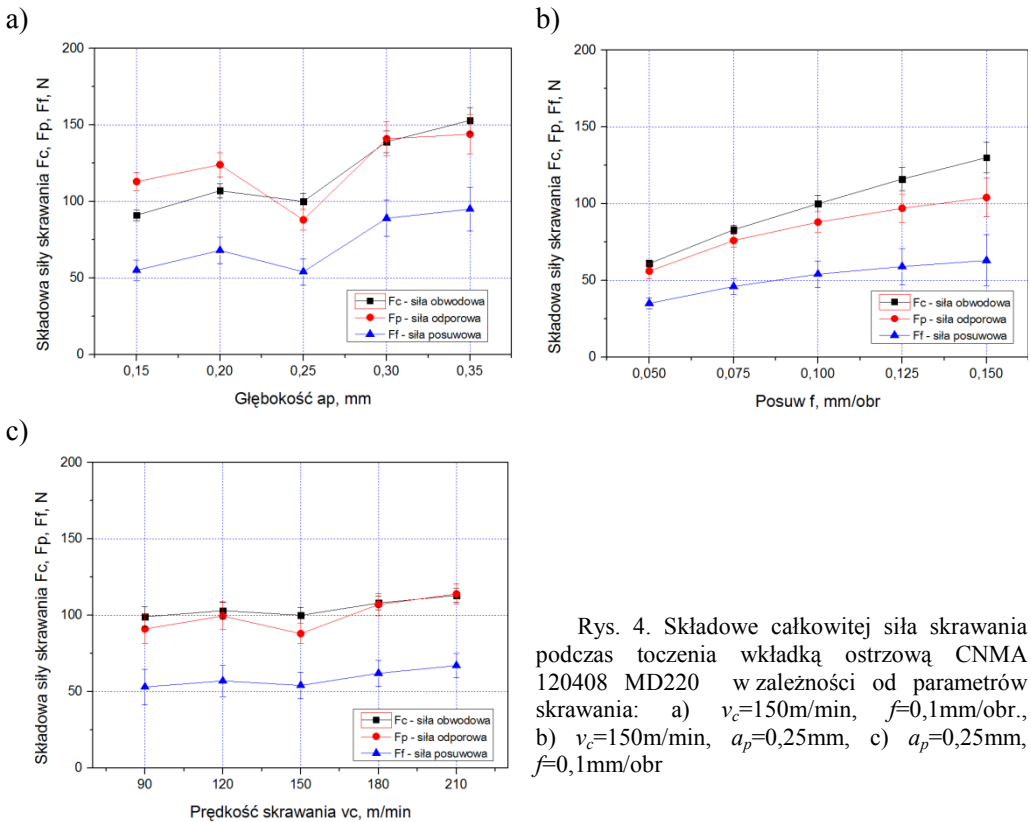
Wkładka ostrzowa	CNMG 120412-SM 1115	CNGA 120412S01530B 7525	CNMA 120408 MD220
Oprawka	DCLNL 2525M 12		
Prędkość skrawania $v_c$ , m/min	30-70	90-210	
Głębokość skrawania $a_p$ , mm	0,15-0,35		
Posuw $f$ , mm/obr.	0,05-0,15		

### 4. WYNIKI BADAŃ

W prowadzonych badaniach toczenia stopu tytanu na osnowie fazy międzymetalicznej  $\text{TiAl}(\gamma)$  dla przyjętych wartości parametrów skrawania oraz wkładek ostrzowych z węglika spiekanego i regularnego azotku boru stwierdzono, że największą wartość przyjmuje siła odporowa. Wynosi ona odpowiednio  $F_p < 200\text{N}$ , oraz  $F_p < 400\text{N}$ . Natomiast dla wkładki z diamentu polikrystalicznego  $F_p < 150\text{N}$ . W tym przypadku wartość siły odporowej  $F_p$  i obwodowej  $F_c$  przyjmują podobne wartości. Najmniejszą wartość przyjmuje natomiast siła posuwowa -  $F_f \approx 0,3F_p$  (rys.3-4). Stwierdzono, że na wartość składowych całkowitej siły skrawania największy wpływ ma posuw i głębokość skrawania. Nie zaobserwowano natomiast istotnego wpływu prędkości skrawania.

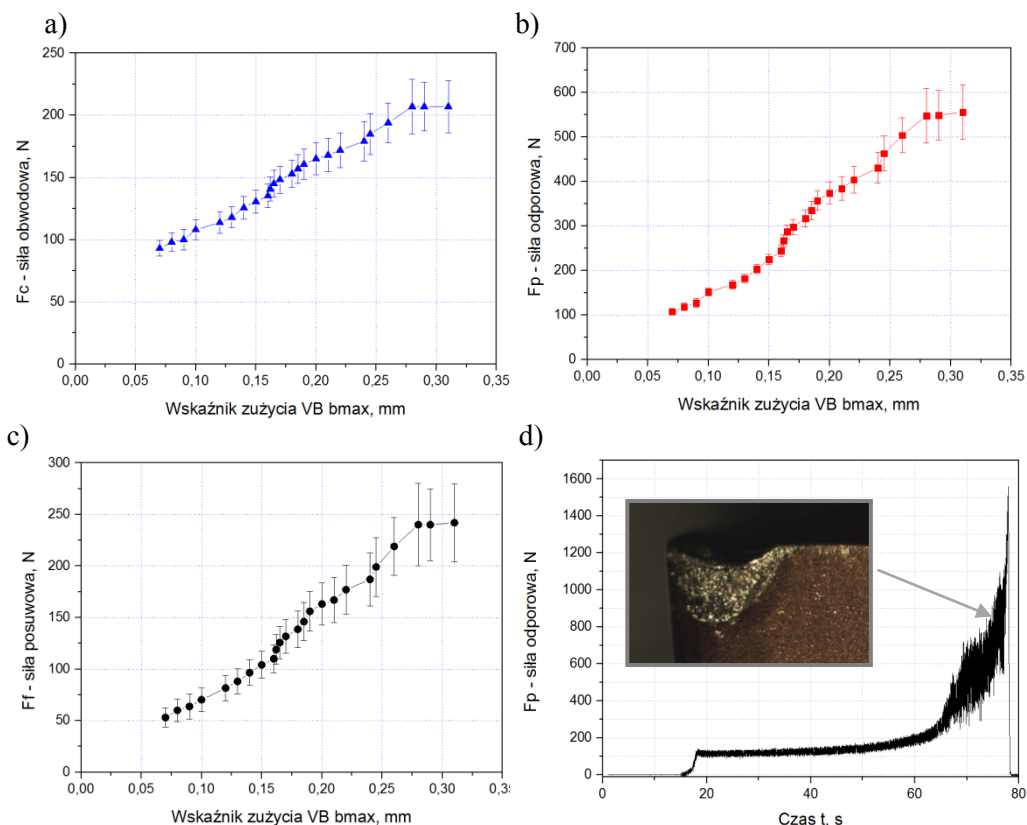


Rys. 3. Składowe całkowitej siła skrawania podczas toczenia wkładką CNGA 120412S01530B 7525 dla parametrów skrawania: a)  $v_c=150\text{m/min}$ ,  $f=0,1\text{mm/obr.}$ , b)  $v_c=150\text{m/min}$ ,  $a_p=0,25\text{mm}$ , c)  $a_p=0,25\text{mm}$ ,  $f=0,1\text{mm/obr}$  oraz podczas toczenia wkładką CNMG 120412-SM 1115 dla parametrów skrawania: d)  $v_c=50\text{m/min}$ ,  $f=0,1\text{mm/obr.}$ , e)  $v_c=50\text{m/min}$ ,  $a_p=0,25\text{mm}$ , f)  $a_p=0,25\text{mm}$ ,  $f=0,1\text{mm/obr}$



Rys. 4. Składowe całkowitej siły skrawania podczas toczenia wkładką ostrzową CNMA 120408 MD220 w zależności od parametrów skrawania: a)  $v_c=150\text{m/min}$ ,  $f=0,1\text{mm/obr.}$ , b)  $v_c=150\text{m/min}$ ,  $a_p=0,25\text{mm}$ , c)  $a_p=0,25\text{mm}$ ,  $f=0,1\text{mm/obr}$

W procesie skrawania stopu  $\text{TiAl}(\gamma)$  obserwowano występowanie krótkiego odcinka styku wiór – narzędzie. Prowadzi to do zwiększenia dynamicznych sił skrawania powodujących koncentracje naprężeń na narożu narzędzia oraz intensywne zużycie ostrza narzędzia skrawającego czego przejawem jest szybkie zwiększenie wartości składowych całkowitej siły skrawania. Stwierdzono największe zużycie na powierzchni przyłożenia. Na powierzchni natarcia występuje natomiast tylko nieznaczne zużycie z niewielkim przesunięciem głównej krawędzi skrawającej. Podczas toczenia stopu  $\text{TiAl}(\gamma)$  zużycie wkładki ostrzowej do wartości  $VB_{Bmax} \approx 0,3\text{mm}$  przebiega równomiernie. Zużycie narzędzia skrawającego wywołuje zmianę wartości siły skrawania działającej na ostrze. W zależności od rodzaju zużycia i powierzchni na której występuje, poszczególne wartości składowych siły skrawania mają tendencję do wzrostu. Stwierdzono największy przyrost wartości składowej odporowej. Dla parametrów skrawania:  $v_c=40\text{ m/min}$ ,  $a_p=0,25\text{ mm}$ ,  $f=0,1\text{ mm/obr.}$  przyrost wartości składowej obwodowej, odporowej i posuwowej dla ostrza zużytego ( $VB_{Bmax} \approx 0,3\text{mm}$ ) w porównaniu do nowej wkładki ( $VB_{Bmax} \approx 0\text{mm}$ ) wynosi odpowiednio 200, 600 oraz 500% (rys. 5).



Rys. 5. Zależność składowych całkowitej siły skrawania: a) obwodowej ( $F_c$ ), b) odporowej ( $F_p$ ) c) posuwowej ( $F_f$ ) od zużycia wkładki ostrzowej na powierzchni przyłożenia  $VB_{max}$  dla parametrów skrawania:  $v_c=40\text{m/min}$ ,  $a_p=0,2\text{mm}$ ,  $f=0,1\text{mm/obr}$ . d) zależność odporowej siły skrawania ( $F_p$ ) od czasu skrawania dla parametrów skrawania:  $v_c=70\text{m/min}$ ,  $a_p=0,25\text{ mm}$ ,  $f=0,1\text{ mm/obr}$ .

Wraz ze zwiększeniem zużycia ostrza narzędzia skrawającego na powierzchni przyłożenia obserwowano charakterystyczne zwiększenie amplitudy składowych całkowitej siły skrawania  $F_c$ ,  $F_p$  i  $F_f$ . W początkowym okresie zużycia wartość amplitudy jest mała - np. dla składowej odporowej  $F_p$  wynosi ok. 3N. Natomiast dla narzędzia zużytego ( $VB_{Bmax}=0,3\text{mm}$ ) wartość amplitudy zwiększa się do 45N. Powoduje to, że proces staje się niestabilny, pojawiają się drgania oraz pogarsza się jakość powierzchni obrabianej.

Największy wpływ na zużycie ostrza narzędzia skrawającego ma prędkość skrawania. Dla dużej wartości prędkości skrawania po początkowym, krótkim etapie równomiernego zużycia następuje gwałtowne zużycie objawiające się zwiększeniem wartości składowych całkowitej siły skrawania (rys. 6).



## WNIOSKI

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że największą wartość przyjmuje siła odporowa, co jest wynikiem relacji przyjętej głębokości skrawania do promienia naroża wkładki ostrzowej. W przyjętym zakresie parametrów skrawania nie zaobserwowano istotnego wpływu prędkości skrawania na składowe całkowitej siły skrawania.

Na podstawie analizy wartości składowych całkowitej siły skrawania stwierdzono, że w miarę zużycia ostrza narzędzia skrawającego wartości wszystkich składowych zwiększają się w różnym stopniu. Największym przyrostem wartości charakteryzowała się składowa odporowa  $F_p$ . Symptodem świadczącym o zużyciu ostrza jest również zwiększenie amplitudy składowych siły skrawania.

**Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.**

## LITERATURA

- [1] BAUR H., WORTBERG D.B.: *Titanium Aluminides fo passenger vehicles*. Materials Science and Engineering 2002, A329-331, 582-588.
- [2] BERGMANN S., KEMPMANN, C. i WEINERT, K.: *Super hard abrasives for g-Titanium aluminide alloy machining*. In: Diamond Business, 2, 2006, S. 42-48.
- [3] DIMIDUK D.M. *Gamma titanium aluminide alloys—an assessment within the competition of aerospace structural materials*, Materials Science and Engineering A263 (1999) 281–288.
- [4] FROES F. H., SURYANARAYANA C., ELIZER D.: *Production, Characteristics and Commercialization of Titanium Aluminides*. :ISIJ International: 1991, 10, 1235-1248.
- [5] HABRAT W., ŻYŁKA Ł., KRUPA K., LASKOWSKI P.: Wybrane problemy modelowania i optymalizacji procesów obróbki ubytkowej trudnoobrabialnych stopów lotniczych. MECHANIK, 8-9/2012
- [6] MANTLE A. L., ASPINWALL, D. K.: *Temperature measurement and tool wear when turning gamma TiAl intermetallic*. In: Proc. of the 13th Irish Manufacturing Conf., 1996, S. 427-436.
- [7] NODA T.: *Application of cast gamma TiAl for automobiles*. „Intermetallics” 1998, 6, 709-713.
- [8] OCZOŚ K.E., KAWALEC A., *Kształtowanie metali lekkich*, PWN, Warszawa 2012.
- [9] SZKLINIARZ W., *Stopy na osnowie faz międzymetalicznych z układu TiAl*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.