

Dr inż. Joanna KOSSAKOWSKA (Politechnika Warszawska),
 dr inż. Zbigniew SIEMIĄTKOWSKI (Uniwersytet Technologiczno- Humanistyczny w Radomiu),
 prof. dr hab. inż. Krzysztof JEMIELNIAK (Politechnika Warszawska):

BADANIA ZALEŻNOŚCI SIŁ SKRAWANIA OD STANU NARZĘDZIA I PARAMETRÓW SKRAWANIA PODCZAS FREZOWANIA ZGRUBNEGO INCONEL 718 PŁYTKAMI CERAMICZNYMI

Streszczenie

W przemyśle lotniczym często stosowane są trudnoobrabialne materiały, jak stal nierdzewna, tytan, czy Inconel. Ich obróbka jest zagadnieniem stosunkowo nowym, dlatego brakuje doświadczeń dotyczących najbardziej wydajnych, ekonomicznych warunków skrawania takich materiałów. Wiele publikacji wskazuje, że wydajną i stosunkowo ekonomiczną obróbkę Inconelu 718 można zapewnić dzięki zastosowaniu okrągłych płytek ceramicznych. Jednak obróbka za pomocą takich płytek niesie za sobą ryzyko powstawania dużych naprężeń w warstwie wierzchniej, co wynika z dużej siły odporowej. Jak wiadomo, ze względu na wysoką odpowiedzialność części lotniczych występowanie niekorzystnych naprężeń jest niedopuszczalne. W ramach badań opisanych w niniejszym artykule przeprowadzono analizę rozkładu siły skrawania podczas zgrubnego frezowania Inconelu 718 okrągłymi płytkami ceramicznymi. Badaniom poddano płytki ostre i stępione, stosując dwa zestawy parametrów skrawania, wytypowane we wcześniejszych badaniach jako optymalne z punktu widzenia trwałości ostrza i wydajności obróbki. W wyniku tych badań wykazano, że optymalny zestaw parametrów do zgrubnego frezowania Inconelu 718 (z uwzględnieniem zarówno wydajności, jak i rozkładu sił skrawania) to: $v_c = 1000$ m/min, $f = 0,1$ mm, $a_p = 2$ mm.

Słowa kluczowe: *siła skrawania, frezowanie zgrubne, płytki ceramiczne, Inconel 718*

AN EXPERIMENTAL STUDY OF CUTTING FORCE DEPENDENCE ON TOOL CONDITION AND CUTTING PARAMETERS IN ROUGH MILLING OF INCONEL 718 WITH CERAMIC INSERTS

Abstract

The aviation industry often employs difficult-to-machine materials, such as stainless steel, titanium, or Inconel. Machining thereof is a relatively new issue, due to which there is not enough experience concerning the most efficient, economic conditions of cutting of such materials. Many publications point out that efficient and relatively economic machining of Inconel 718 may be ensured through use of round ceramic inserts. However, machining with such inserts entails a risk of occurrence of large stresses in the surface layer, resulting from a large passive force. It is known that, due to high reliability of aviation parts, occurrence of adverse stresses is unacceptable. As a part of the study described in this paper, an analysis of distribution of the cutting force during rough milling of Inconel 718 with round ceramic inserts was conducted. Sharp and dulled inserts were tested using two sets of cutting parameters, selected in prior research as optimal from the perspective of blade endurance and machining efficiency. As a result of this research, it has been shown that the optimal set of parameters for rough milling of Inconel 718 (taking account of both efficiency and distribution of cutting forces) is: $v_c = 1000$ m/min, $f = 0,1$ mm, $a_p = 2$ mm.

Keywords: *Inconel 718, rough milling, cutting forces*

BADANIA ZALEŻNOŚCI SIŁ SKRAWANIA OD STANU NARZĘDZIA I PARAMETRÓW OBRÓBKI PODCZAS FREZOWANIA ZGRUBNEGO INCONELU 718 PŁYTKAMI CERAMICZNYMI

Joanna KOSSAKOWSKA¹, Zbigniew SIEMIĄTKOWSKI²
Krzysztof JEMIELNIAK¹

1. WSTĘP



W przemyśle lotniczym często stosowane są trudnoobrabialne materiały jak stal nierdzewna, tytan, czy Inconel. Obróbka tych materiałów jest zagadnieniem stosunkowo nowym i stąd brakuje doświadczeń dotyczących najbardziej wydajnych, ekonomicznych warunków skrawania tych materiałów. Wiele publikacji (np. [3], [6]) wykazuje, iż wydajną i stosunkowo ekonomiczną obróbkę Inconelu 718 można uzyskać za pomocą okrągłych płytek z ceramiki typu Sialon, przy czym Autorzy wskazują, że istotnym jest tutaj stosowanie wysokich prędkości skrawania (ponad 1000 m/min). Obróbka w takich warunkach niesie za sobą ryzyko powstawania niedopuszczalnych dla części lotniczych naprężeń warstwy wierzchniej ze względu na wysokie prędkości skrawania (co pociąga za sobą wysoką temperaturę skrawania) oraz duże siły odporowe towarzyszące płytkom okrągłym. Jak wykazano w [2] efekty termiczne wpływają na występowanie naprężeń rozciągających, podczas gdy wpływy efektów mechanicznych przyczyniają się do naprężeń ściskających. W [1] zwrócono uwagę, że należy również zwrócić uwagę na zużycie ostrza, które niekorzystnie wpływa na głębokość warstwy naprężeń. W [7] wykonano analizę rozkładu siły skrawania podczas frezowania czołowego płytkami okrągłymi. Wykazano tu, że największą wartość siła

¹ Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania; 02-524 Warszawa; ul. Narbutta 86.

² Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Instytut Budowy Maszyn

skrawania osiąga dla składowej F_z (na kierunku osiowym). W [6] dokonywana jest analiza wpływu prędkości skrawania na siły skrawania. Najmniejsze wartości sił uzyskiwano dla prędkości v_c powyżej 1000 m/min. Z kolei w [7] wykonano analizę zależności wartości siły wypadkowej od prędkości skrawania i materiału ostrza. W badaniach zastosowano płytki z różnych materiałów ceramicznych: jednolitych i warstwowych płytek sialonowych oraz whiskersów. Zauważono, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania w zakresie 500-900 m/min siła skrawania spada. Po przekroczeniu prędkości $v_c=900$ m/min wartość siły gwałtownie rośnie. W [5] Autorzy zauważają, że wielkość zdeformowanej warstwy pod powierzchnią obróbką zależy od stanu narzędzia i wynosi średnio 7 μm dla narzędzia nowego i 18 μm dla narzędzia stępionego. Wykresy naprężeń wykazują, że zużyte narzędzie generuje dużo większe naprężenia rozciągające niż narzędzie nowe.

Obiecujące wyniki uzyskano również podczas frezowania Inconelu 718 za pomocą okrągłych płytek z ceramiki typu Sialon, prowadzonych w ramach projektu Innolot-CASELOT w [4]. Obejmowały one badania trwałości ostrza dla różnych kombinacji parametrów skrawania, w zakresach posuwu: 0.05-0.15 mm/obr, głębokości skrawania: 1-2mm oraz w zakresach prędkości skrawania 550-1200 m/min. Spośród zastosowanych parametrów najbardziej obiecujące pod względem trwałości i wydajności okazały się dwa zestawy parametrów:

- 1) $a_p=2\text{mm}$, $f_z=0.1$ mm/z, $v_c=1000$ m/min
- 2) $a_p=1\text{mm}$, $f_z=0.15$ mm/z, $v_c=1000$ m/min

Celem etapu badań opisanych w niniejszym artykule było zbadanie wpływu zużycia ostrza na siły skrawania przy zastosowaniu tych parametrów skrawania.

2. BADANIA ZALEŻNOŚCI SIŁ SKRAWANIA PODCZAS FREZOWANIA ZGRUBNEGO INCONELU 718

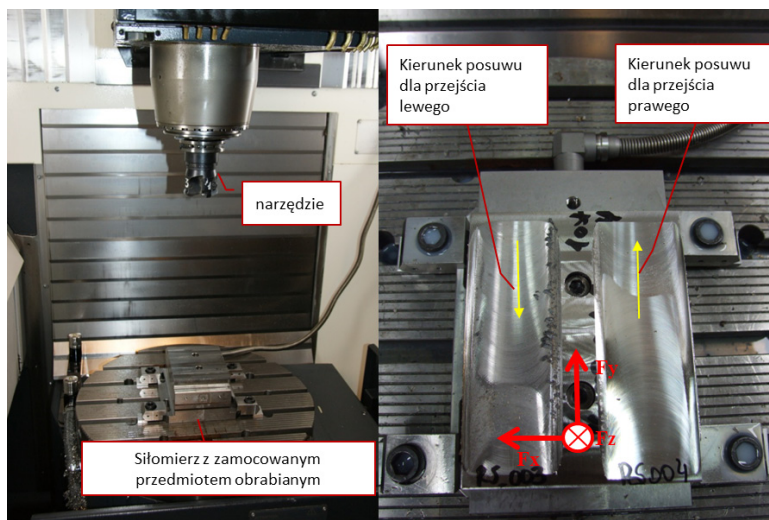
2.1. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania przeprowadzono na przedmiocie obrabianym (PO) z Inconelu 718 w postaci płyty o wymiarach: 100x125, fazowanej w kierunku wejścia i wyjścia narzędzia z przedmiotu. Fazowanie miało za zadanie zapewnienie łagodnego wejścia narzędzia w materiał i uniknięcia dynamicznego obciążenia ostrzy. Frezowanie wykonano za pomocą głowicy R300C-050Q22-12M z płytkami CC6060 (Sialon) o średnicy 12 mm bez chłodzenia na centrum frezarskim DMU40 monoBLOCK ze sterowaniem iTNC530 HEIDENHAIN.

Do rejestracji sił skrawania zastosowano siłomierz 9257B Kistler wraz ze wzmacniaczem typu 5070A10100, na którym dla każdego z kanałów ustawiono filtr dolno-przepustowy 2kHz. Sygnały rejestrowano za pomocą karty pomiarowej DAQ NI USB 6002 16bit z częstotliwością $f_s=10\text{kHz}$.

Frezowanie wykonywano wzdłuż osi Y siłomierza w kierunku do kolumny (przejście z prawej strony PO) oraz w kierunku od kolumny (lewa strona PO), zgodnie z rys.

1. Przed przystąpieniem do badań zbadano częstotliwość rezonansową układu pomiarowego, uderzając młotkiem w przedmiot obrabiany zamocowany na siłomierzu w każdym z trzech kierunków pomiarowych. W osi X zidentyfikowano częstotliwości rezonansowe ok. 250Hz oraz ok. 1400Hz. W osi Y częstotliwość rezonansowa wyniosła ok. 250Hz. Z kolei w osi Z nie zidentyfikowano częstotliwości rezonansowej w badanym paśmie częstotliwości, tj. do 5000 Hz.



Rys. 1 Strefa obróbki (po lewej) oraz osie siłomierza i kierunki posuwu realizowane podczas badań (po prawej)

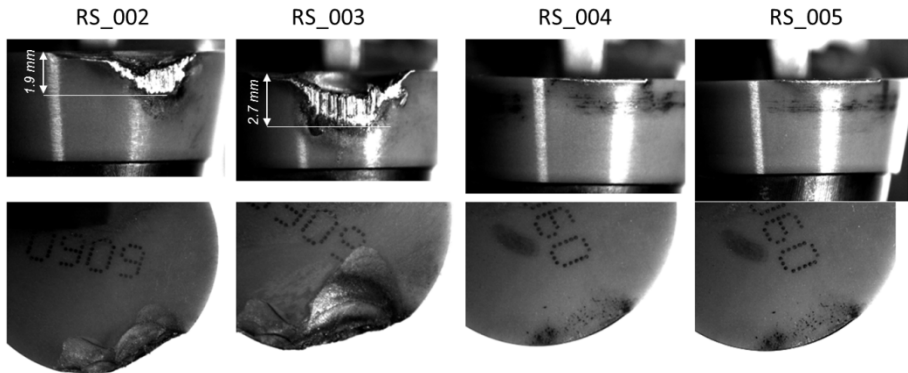
W ramach badań wykonano łącznie cztery próby dla dwóch wspomnianych wyżej zestawów warunków skrawania, przy czym dla obu zestawów zastosowano płytki nowe oraz w stanie znacznie przekraczającym dopuszczalne zużycie ostra. Frezowanie prowadzono za pomocą pojedynczego ostrza, w celu ułatwienia obserwacji zmienności sił przy wchodzeniu i wychodzeniu ostrza z materiału. Warunki prób zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Warunki skrawania podczas wykonywania poszczególnych prób

Nr próby	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	n [obr/min]	Stan płytki	przejście	Częstotliwość wejść [Hz]
RS_002	1000	0.1	2	6781	stępiona	Lewe	113
RS_003	1000	0.15	1	7132	stępiona	Lewe	119
RS_004	1000	0.1	2	6781	nowa	Prawe	113
RS_005	1000	0.15	1	7132	nowa	Prawe	119

Znając prędkości obrotowe obliczono częstotliwości wchodzenia ostrza w materiał, co również odnotowano w tabeli. Częstotliwości te są niższe niż najniższe częstotliwości rezonansowe układu (250Hz).

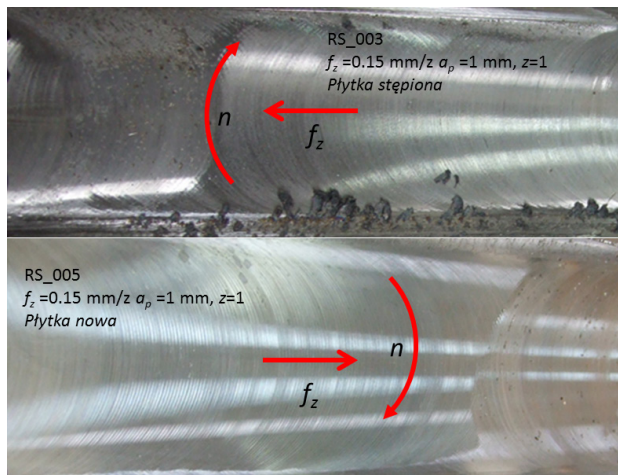
Stan poszczególnych ostrzy przed wykonaniem prób przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zdjęcia powierzchni przyłożenia i natarcia ostrzy zastosowanych do poszczególnych prób

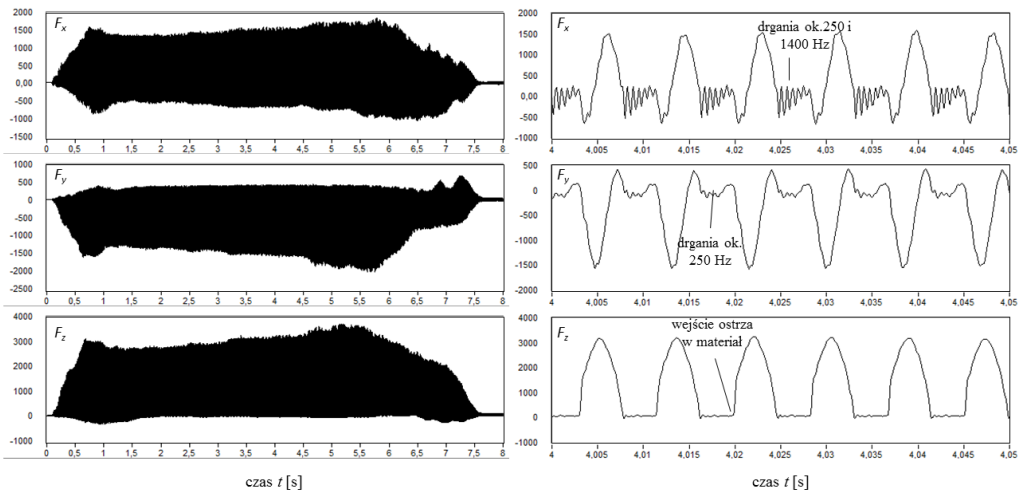
2.2. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Na rys. 3 przedstawiono powierzchnie obrobione w wyniku prób RS_003 oraz RS_005. Krawędzie boczne powierzchni obrobionej płytką stępioną posiadają liczne zadziory, zaś sama powierzchnia posiada liczne nalepy z resztek wiórów. Powierzchnia obrobiona płytką nową jest znacznie lepsza, ale również nie jest pozbawiona drobnych zadziorów i nalepów.



Rys. 3 Porównanie powierzchni obrobionej płytką stępioną oraz płytką ostrą

Przebiegi sygnałów F_x i F_y oraz F_z (odpowiednio dla osi X , Y i Z siłomierza) oraz ich fragmentów (0.05s) przedstawiono na przykładzie próby RS_003 na rys. 4. Wartości sygnałów wykazują widoczny trend rosnący, mimo krótkiego czasu obróbki (8s). Z kolei w widocznych fragmentach sygnałów F_x i F_y występują składowe o częstotliwości równej częstotliwości rezonansowej czujnika na danym kierunku. Dla sygnału F_z , dla którego nie zidentyfikowano żadnej częstotliwości rezonansowej w zakresie badanych częstotliwości sygnału, wyraźnie można zidentyfikować moment wejścia ostrza w materiał. Dlatego też określać kąt φ obrotu frezu w stosunku do materiału obrabianego postanowiono wyznaczać na podstawie sygnału siły F_z .



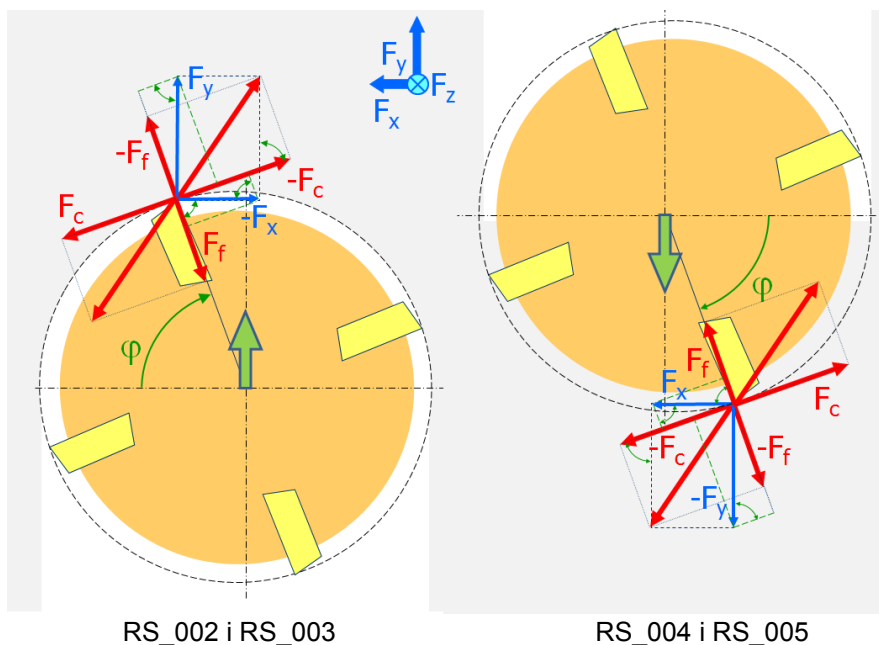
Rys. 4. Przebieg sygnałów F_x , F_y oraz F_z (po lewej) oraz ich fragmenty (0.05s) dla próby RS_003

2.2. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W celu wyznaczenia sił skrawania w układzie narzędzia F_f , F_c oraz F_p należy rzutować siły działające na siłomierz F_x , F_y oraz F_z na kierunki. Rozkłady te są zależne od kierunku posuwu: pierwszy przypadek odpowiada posuwowi zgodnemu z kierunkiem siły F_y siłomierza, drugi posuwowi przeciwnemu. Rozkłady siły ułatwiające ich rzutowanie przedstawiono na rysunku 5. Wynikają z nich zależności (1) dla prób RS_002 i RS_003 oraz (2) dla prób RS_004 i RS_005.

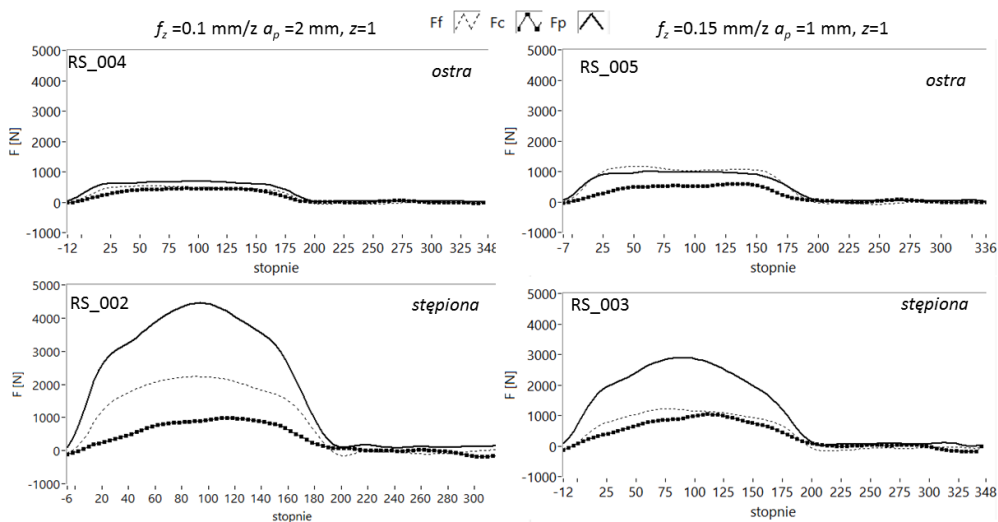
$$(1)$$

$$(2)$$



Rys. 5. Rozkład siły skrawania na składowe F_f , F_p oraz F_c w zależności od kierunku posuwu względem osi siłomierza

Ze względu na zmienność sygnałów w czasie zabiegu, dla każdej próby wyodrębniono 3 fragmenty – na początku, po środku oraz na końcu zabiegu. Każdy fragment zawierał kolejnych 50 obrotów frezu, począwszy od wejścia ostrza w materiał - tu za początek obrotu przyjęto minimalną wartość dla składowej F_z . Celem wyeliminowania drgań pochodzących z rezonansu układu, sygnały poddane zostały filtrowaniu dolno-przepustowemu. Następnie dla danego fragmentu wyznaczono wartość średnią zależności składowych siły od obrotu frezu, zamieniając jednocześnie dziedzinę czasu na dziedzinę kąta obrotu frezu φ . Zauważono jednak, że składowa F_p ma wartość dodatnią dla większej niż połowa części obrotu, co oznacza, że kąt opasania wynosił ponad 180° . Wynika to zarówno z wpływów/karbów pojawiających się na powierzchni obrabianej, jak i trudnego do usunięcia wióra, usuwanego poza frez po pewnym czasie od zakończenia skrawania. Założono tu z pewnym uproszczeniem, że kąt opasania jest symetryczny względem kierunku posuwu (czyli kąta $\varphi = 90^\circ$), a co za tym idzie, skrawanie zaczyna się dla kąta $\varphi < 0^\circ$ i kończy symetrycznie dla $\varphi > 180^\circ$. Przykładowe przebiegi obliczone z powyższą procedurą dla wszystkich czterech prób przedstawiono na rys. 6 zaś zbiorcze wyniki, uśrednione dla trzech fragmentów sygnałów, przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 6. Wartości składowych F_f , F_c oraz F_p siły skrawania dla wybranych prób RS_002-RS_004

Tabela 2. Zestawienie zbiorcze średnich wartości składowych sił skrawania

Stan płytki	$f_z=0.1 \text{ mm/z } a_p=2 \text{ mm}$			$f_z=0.15 \text{ mm/z } a_p=1 \text{ mm}$		
	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c
ostra	RS_004			RS_005		
	391	320	542	732	382	726
stepiona	RS_002			RS_001		
	1618	598	3169	960	600	2148

3. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można zauważyć, że:

- kąt opasania podczas obróbki jednym ostrzem wynosi ok. 200° , zamiast nominalnego 180° . Jest to wynikiem zarówno wypływek/karbów pojawiających się na powierzchni obrobionej, jak i trudnego do usunięcia wióra, usuwanego poza frez po pewnym czasie od zakończenia skrawania,
- składowe F_f i F_p siły skrawania wykazują jednoznacznie wzrost wartości wraz z upływem czasu w ramach danego zabiegu. Mimo krótkiego czasu obróbki (kilkanaście sekund) poszczególne składowe niekiedy podwajają swoją wartość. Świadczy to o nawarstwianiu się wiórów i nalepów materiału obrabianego na ostrzu oraz – w pewnej mierze – przyrostowi zużycia ostrza,
- dla płytek nowych (por. próby RS_004 oraz RS_005), mniejsze wartości dla

- wszystkich składowych osiągnięto dla próby RS_004, czyli dla $f_z=0.1$ mm/z $a_p=2$ mm,
- dla płytek stepionych (por. próby RS_002 oraz RS_003) większe siły składowe F_f i F_p osiągnięto dla $f_z=0.15$ mm/z $a_p=1$ mm. Kluczowe znaczenie dla wyniku obróbki ma jednak składowa F_p prostopadła do powierzchni obrobionej, której przyrost w próbce dla $f_x a_p=0.1 \times 2$ był blisko sześciokrotny, przy ok trzykrotnym wzroście dla $f_x a_p=0.15 \times 1$. Nadmierny wzrost siły mógłby być niepokojący, gdyby badania metalograficzne wskazały na niedopuszczalne zmiany w warstwie wierzchniej na zbyt dużej głębokości.

PODZIĘKOWANIA

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – Nr umowy INNOLOT/1/9/NCBR/2013 (2013-2018) - CASELOT

LITERATURA

- [1] Arunachalam R.M., Mannan M.A., Spowage A.C. *Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools* International Journal of Machine Tools & Manufacture 2004, 44, 879–887
- [2] Axinte D.A., Dewes R.C., *Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling—experimental data and empirical models*, Journal of Materials Processing Technology 2002, 127, 325–335
- [3] Choudhury I.A., El-Baradie M.A. *Machinability of nickel-base super alloys: a general review* Journal of Materials Processing Technology 1998, 77, 278–284
- [4] Jemielniak K., Kossakowska J. *Badania skrawności narzędzi ceramicznych przy frezowaniu zgrubnym Inconel 718-etap II* Projekt INNOLOT-CASELOT Zaawansowane techniki wytwarzania kadłuba silników lotniczych, 2014
- [5] Sharman A, Hughens J, Ridgway K: *Surface integrity and tool life when turning Inconel 718 using ultra-high pressure and flood coolant systems*, Journal of Engineering Manufacture, 2008, 653-664
- [6] Tian X, Zhao J, Zhao J, Gong Z, Dong Y *Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, Volume 69, 2669-2678
- [7] Zheng G., Zhao J., Zhou Y., Li A., Cui Xx, Tian X. *Performance of graded nano-composite ceramic tools in ultra-high-speed milling of Inconel 718* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67, 2799-2810