

Dr hab. inż. Jan BUREK, prof. PRz; dr inż. Łukasz ŻYŁKA;
mgr inż. Michał GDULA; mgr inż. Marcin PŁODZIEN (Politechnika Rzeszowska):

WPLYW ORIENTACJI OSI FREZU TOROIDALNEGO NA SKŁADOWE SIŁY SKRAWANIA W PIĘCIOOSIOWEJ OBRÓBCE ŁOPATKI TURBINY ZE STOPU INCONEL 718

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań składowych sił skrawania podczas procesu symultanicznego 5-osiowego frezowania powierzchni złożonych frezem toroidalnym. Przedmiotem badań była wklęsła oraz wypukła powierzchnia łopatki turbiny ze stopu INCONEL 718. Orientacja osi narzędzia określana jest względem wektora normalnego powierzchni poprzez programowanie kątów wyprzedzenia lub/i pochylenia. Określono wpływ 5-osiowych parametrów orientacji osi narzędzia oraz zmiennego promienia krzywizny na siły skrawania.

***Słowa kluczowe:** symultaniczne 5-osiowe frezowanie, siły skrawania, powierzchnie złożone*

EFFECT OF TOROIDAL CUTTER AXIS ORIENTATION ON THE CUTTING FORCES IN THE FIVE-AXIS MACHINING OF SCULPTURED SURFACE TURBINE BLADE OF INCONEL 718

Abstract

Conducted measurement cutting force components during simultaneous five-axis milling of sculptured surfaces using toroidal cutter. Subject of research was concave and convex surface of the turbine blade of INCONEL 718. The tool axis orientation was determined relative to the surface normal vector by programming lead and / or tilt angle. Based on the obtained the results of research defined the effect of five-axis parameters toroidal cutter orientation and a variable radius of curvature on the cutting forces.

***Keywords:** simultaneous five-axis milling, cutting forces, sculptured surface*

WPLYW ORIENTACJI OSI FREZA TOROIDALNEGO NA SKŁADOWE SIŁY SKRAWANIA W PIĘCIOOSIOWEJ OBRÓBCE ŁOPATKI TURBINY ZE STOPU INCONEL 718

Jan Burek, Łukasz Żyłka, Michał Gdula, Marcin Płodzień¹

1. WPROWADZENIE

W ciągu ostatnich lat obserwuje się dynamiczny rozwój technologii przepływowych maszyn wirnikowych, szczególnie w przemyśle lotniczym i energetycznym. Dotyczy to głównie elementów wirujących w gorącej strefie maszyn wirnikowych, takich na przykład jak łopatki turbin. Łopatki turbin pracujące w wysokich temperaturach wykonywane są z materiałów żaroodpornych i żarowytrzymałych. Najczęściej są to stopy na bazie niklu, np. INCONEL 718 [3].

Wprowadzaną obecnie do praktyki przemysłowej strategią obróbki powierzchni pojedynczych łopatek jest symultaniczne pięcioosiowe frezowanie frezem toroidalnym [2, 4]. Warunkiem wygenerowania prawidłowej trajektorii ruchu freza oraz poprawnego zorientowania jego osi w przestrzeni, względem obrabianej powierzchni krzywoliniowej jest zdefiniowanie kąta prowadzenia α i/lub pochylenia β . Wpływ tych parametrów na proces pięcioosiowej obróbki ma zasadnicze znaczenie. Nieprawidłowa orientacja osi narzędzia może spowodować zmniejszenie wydajności obróbki i obniżenie jakości powierzchni, z powodu m.in. występowania niekorzystnego rozkładu sił skrawania, drgań narzędzia itp. [2, 3, 5].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań zmiany orientacji osi freza toroidalnego oraz promienia krzywizny w kierunku posuwu obrabianej powierzchni wypukłej jak i wklęsłej, na składowe siły skrawania na przykładzie pióra łopatki turbiny ze stopu inconel 718.

¹Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

2. PIĘCIOOSIOWE FREZOWANIE POWIERZCHNI ZŁOŻONYCH

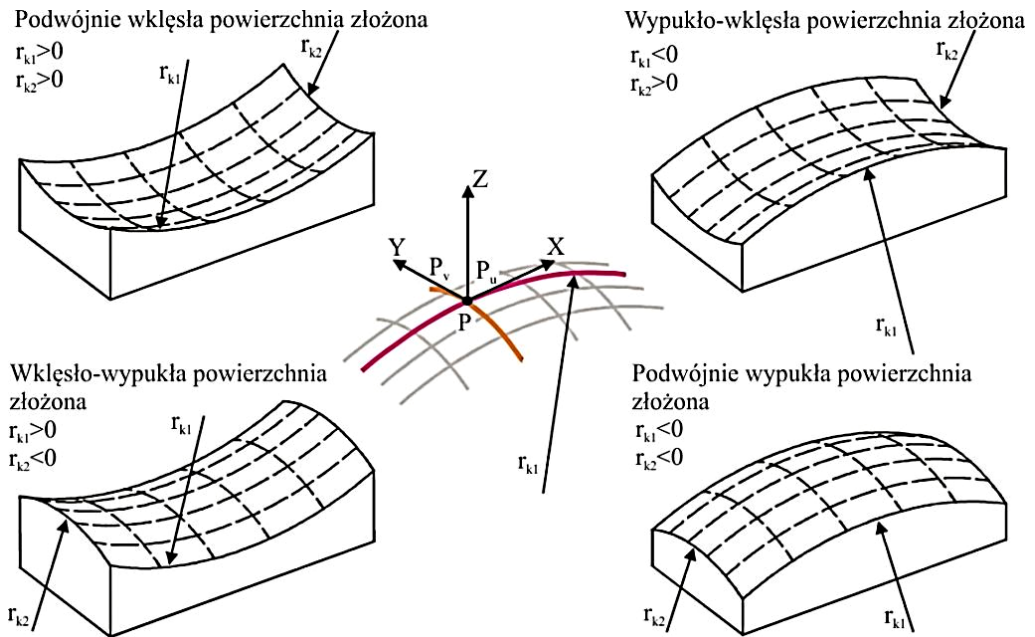
2.1. ZMIENNE WEJŚCIOWE PROCESU PIĘCIOOSIOWEGO FREZOWANIA

Powierzchnie złożone stosowane są do opisu skomplikowanych form o geometrii wypukłej, wklęsłej, dwuwypukłej, dwuwklęsłej oraz wklęsło-wypukłej czy też wypukło-wklęsłej. Powierzchnia złożona jest zakrzywiona w obu głównych kierunkach parametrycznych. Kształt powierzchni charakteryzują wartości krzywizn głównych w otoczeniu wybranego punktu na tej powierzchni. Krzywizny i kierunki główne w dowolnym punkcie powierzchni można wyznaczyć przy użyciu współrzędnych tensora krzywiznowego [3]. Współrzędne tego tensora określa macierz:

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle P_{uu}(u,v), \langle N(u,v) \rangle & \langle P_{uv}(u,v), \langle N(u,v) \rangle \\ \langle P_{vu}(u,v), \langle N(u,v) \rangle & \langle P_{vv}(u,v), \langle N(u,v) \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

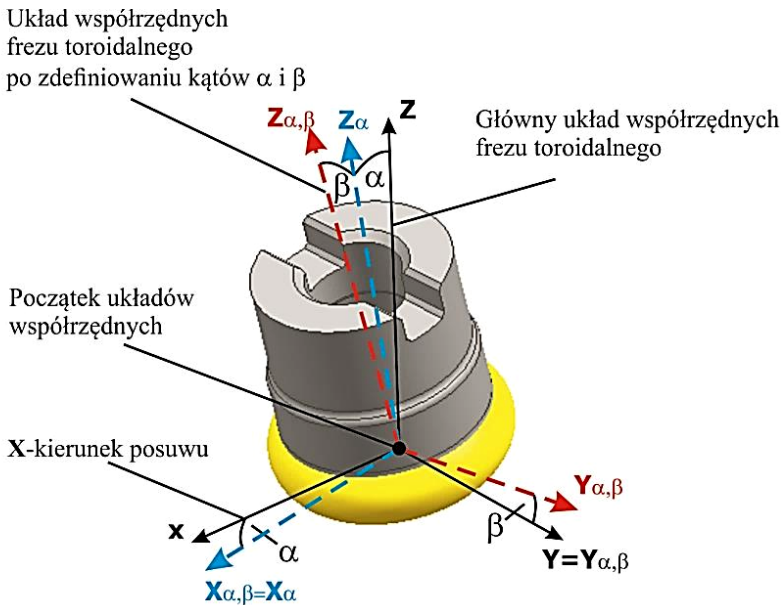
gdzie: P_u, P_v są wektorami stycznymi.

W celu uproszczenia analizy wyników badań krzywizny główne mogą być rozpatrywane jako promienie, co obrazuje rys. 1.



Rys. 1. Rodzaje powierzchni złożonych o promieniach krzywizny r_{k1} oraz r_{k2}

Jak już wcześniej wspomniano jednym z ważniejszych problemów symultanicznego pięcioosiowego frezowania jest dobranie optymalnej orientacji osi freza, w stosunku do wektora normalnego powierzchni złożonej. Orientację osi freza definiuje się programując parametry kąta prowadzenia α i/lub kąta pochylenia β (rys. 2). Parametry te jednoznacznie określają punkt styku między ostrzem skrawającym a powierzchnią obrabianą i mają kluczowe znaczenie dla ostatecznego rezultatu procesu skrawania [2].



Rys. 2. Układy współrzędnych orientacji osi freza

2.2. PARAMETRY PROCESU PIĘCIOOSIOWEGO FREZOWANIA

Podczas obróbki skrawaniem występuje wiele czynników mających wpływ na kształtowanie się wióra. Opory związane z powstawaniem wióra w procesie skrawania wpływają na siły skrawania i wielkości pochodne takie jak moment skrawania, energia skrawania i moc skrawania [1,3,4].

Poszczególne składowe siły skrawania, (styczna F_t , promieniowa F_r , osiowa F_a) opisane są zależnościami:

$$\begin{aligned}
 F_t(\phi) &= K_{tc}A(\phi) + K_{te}b \\
 F_r(\phi) &= K_{rc}A(\phi) + K_{re}b \\
 F_a(\phi) &= K_{ac}A(\phi) + K_{ae}b
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

gdzie:

K_{te} , K_{rc} , K_{ac} – współczynniki oporu właściwego skrawania dla modelu liniowego, zależne od pola przekroju warstwy skrawanej $A(\varphi)$,

K_{te} , K_{ae} , K_{re} – zależne od czynnej długości krawędzi skrawającej b .

Pole przekroju warstwy skrawanej $A(\varphi)$ opisane jest zależnością:

$$A(\phi) = a_p f_z \sin(\phi) \quad (3)$$

gdzie:

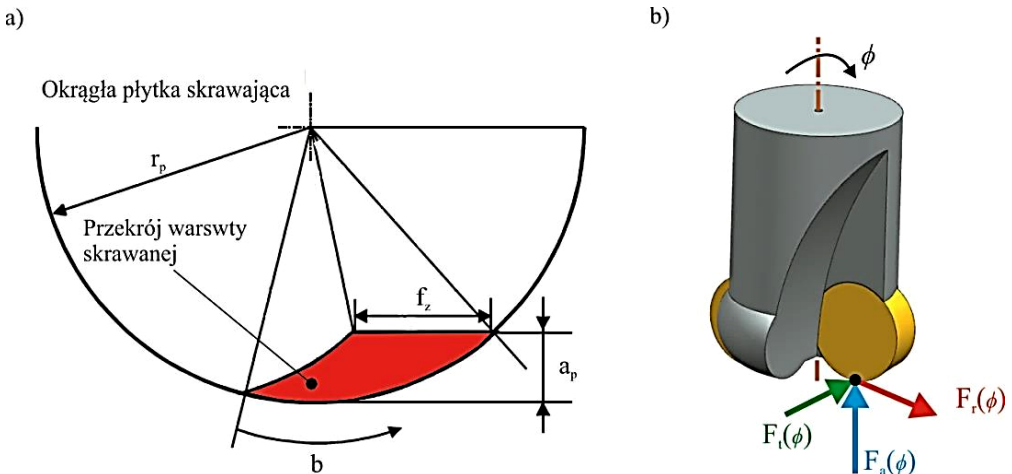
a_p – głębokość skrawania,

f_z – posuw na ostrze,

φ – chwilowy kąt położenia ostrza.

Opory skrawania zależą głównie od przekroju warstwy skrawanej. W symultanicznej pięcioosiowej obróbce przekrój warstwy skrawanej zależy od krzywizny powierzchni oraz orientacji osi narzędzia. Stąd też w wyniku zmian tych parametrów następują zmiany wartości i kierunku działania składowych promieniowej $F_r(\varphi)$, stycznej $F_t(\varphi)$ oraz osiowej $F_a(\varphi)$ siły skrawania (rys. 3). Prowadzi to z kolei do zmiennego odkształcenia sprężystego narzędzia oraz przedmiotu obrabianego, czego skutkiem może być niedokładność wymiarowo – kształtowa [3,4,5,6].

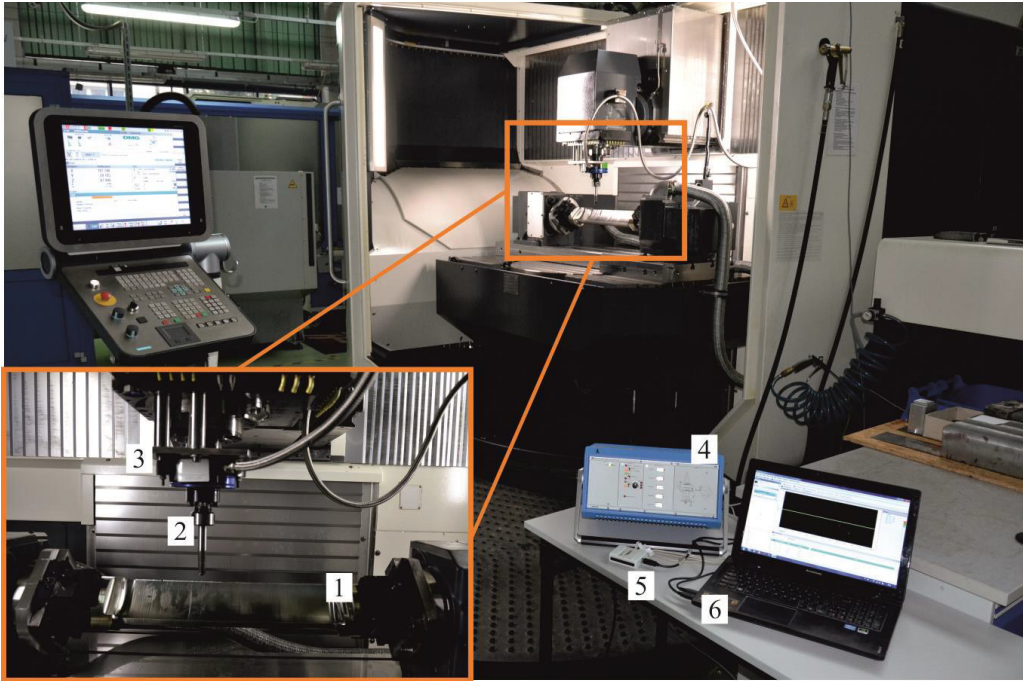
Dokładność wykonania powierzchni opływowych łopatek turbin ma wpływ na trwałość i niezawodność całej turbiny.



Rys. 3. Przekrój warstwy skrawanej: a) parametry, b) składowe siły skrawania

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania doświadczalne przeprowadzono na pięcioosiowym centrum obróbkowym DMU 100 MonoBLOCK firmy DMG (rys.4).



Rys. 4. Stanowisko badawcze: 1 – łopata turbiny, 2 – frez toroidalny, 3 – czteroskładowy piezoelektryczny siłomierz obrotowy, 4 – czterokanałowy wzmacniacz sygnału, 5 – karta pomiarowa KUSB KEITHLEY 3100, 6 – komputer PC z oprogramowaniem quickDAQ

Do pomiaru składowych siły skrawania wykorzystano piezoelektryczny dynamometr obrotowy 9123C firmy Kistler. Rejestrowane sygnały były przetwarzane w czterokanałowym wzmacniaczu ładunku 5223B na analogowe sygnały napięciowe. Sygnały te następnie przesyłano do komputera PC wyposażonego w kartę pomiarową KEITHLEY KUSB 3100. Dane pomiarowe były rejestrowane i zapisywane z wykorzystaniem oprogramowania quickDAQ.

3.1. WARUNKI REALIZACJI BADAŃ

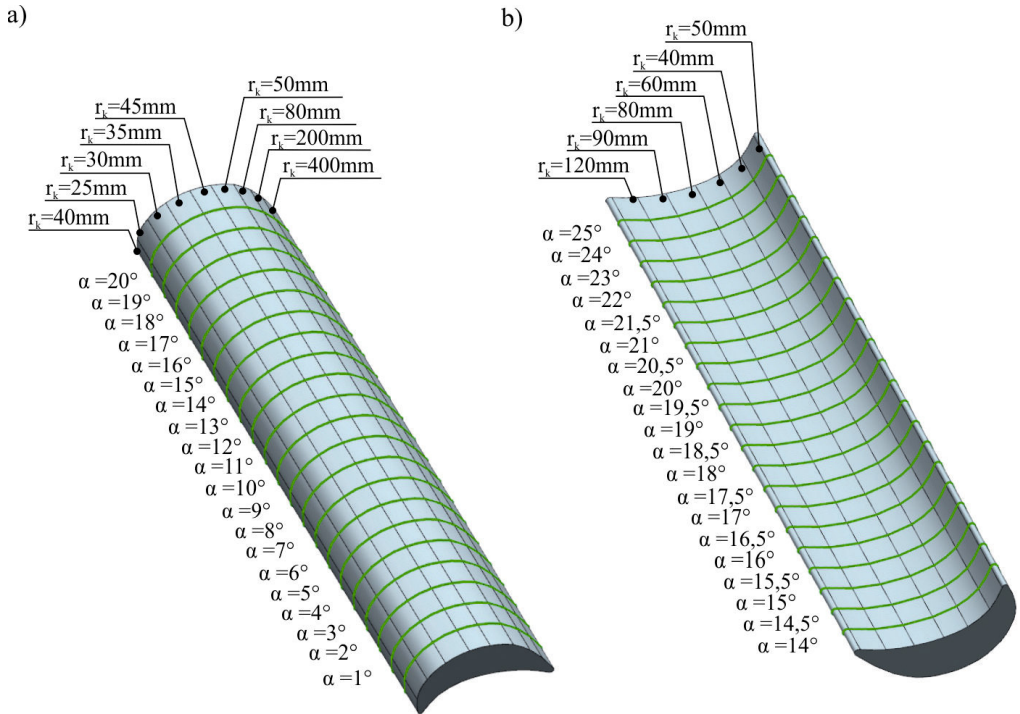
Warunki prowadzonych badań były następujące:

- materiał obrabiany: INCONEL 718,
- narzędzie: frez toroidalny R300-016B20L-08L Sandvik Coromant,
- dwie okrągłe płytki skrawające z węgla typu S30T z pokryciem PVD.

Parametry technologiczne procesu obróbki przyjęto jako stałe dla każdej z obrabianych powierzchni:

- posuw na ostrze: $f_z=0.14 \text{ mm/ostrze}$,
- szerokość skrawania: $a_e=1.5 \text{ mm}$,
- głębokość skrawania: $a_p=0.25 \text{ mm}$,
- prędkość skrawania: $v_c=40 \text{ m/min}$.

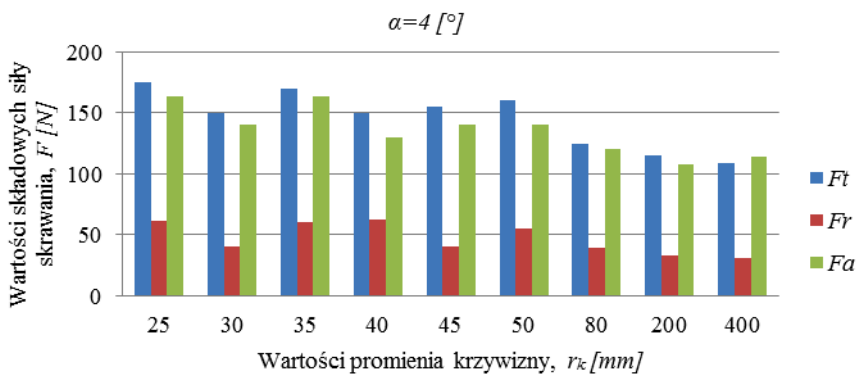
Jako parametry zmienne przyjęto wartość kąta prowadzenia α oraz promień krzywizny r_k w kierunku posuwu (rys. 5).



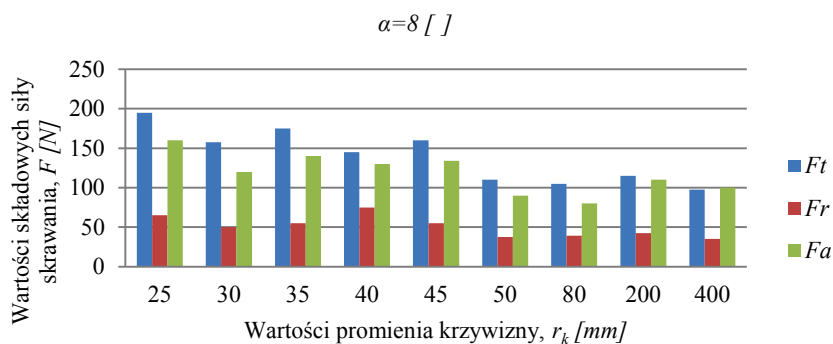
Rys. 5. Obszary testowe powierzchni w zależności od wartości promieni krzywizny r_k oraz kąta prowadzenia α : a) powierzchni wypukłej, b) powierzchni wklęsłej

3.2. WYNIKI BADAŃ

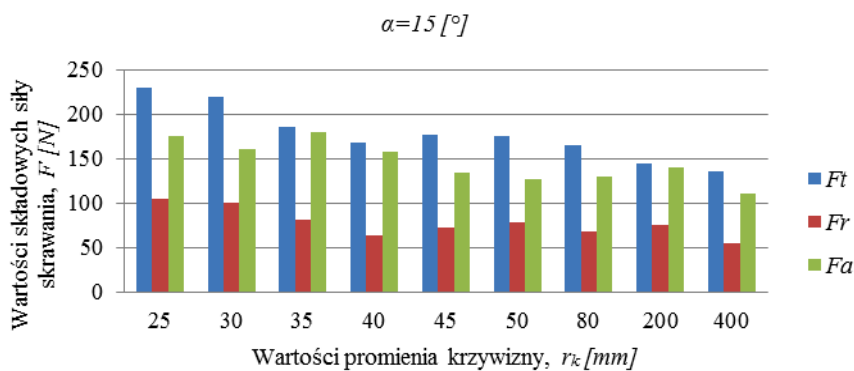
Wartości zmierzonych składowych siły skrawania obróbki powierzchni wypukłej pokazano na rys. 6÷9, natomiast powierzchni wklęsłej na rys. 10÷13.



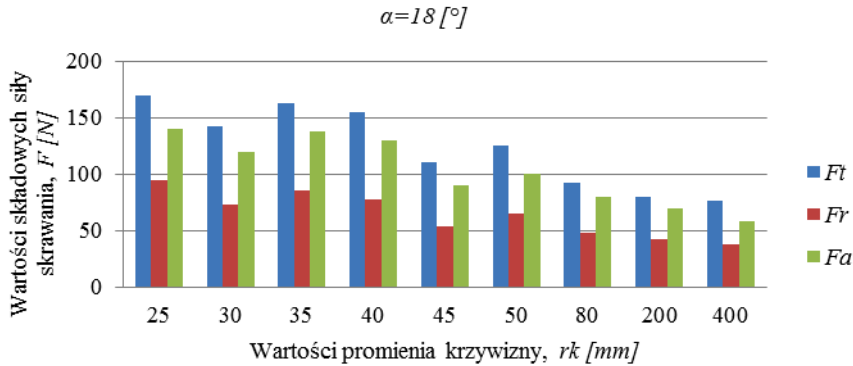
Rys. 6. Wartości składowych siły skrawania w zależności od promienia krzywizny r_k powierzchni wypukłej przy zastosowaniu kąta prowadzenia $\alpha=4^\circ$



Rys. 7. Wartości składowych siły skrawania w zależności od promienia krzywizny r_k powierzchni wypukłej przy zastosowaniu kąta prowadzenia $\alpha=8^\circ$



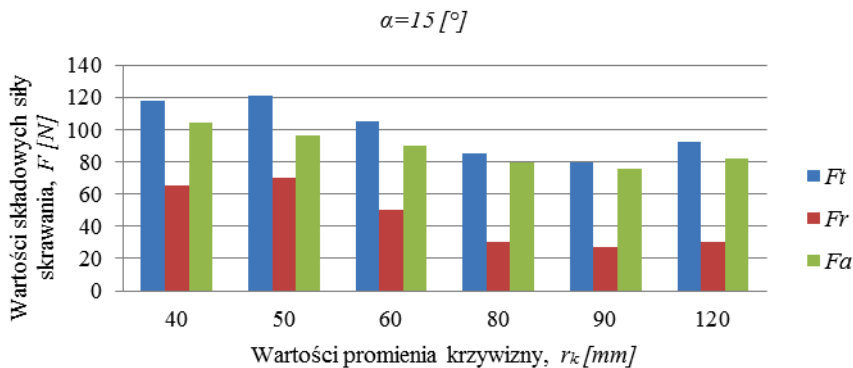
Rys. 8. Wartości składowych siły skrawania w zależności od promienia krzywizny r_k powierzchni wypukłej przy zastosowaniu kąta prowadzenia $\alpha=15^\circ$



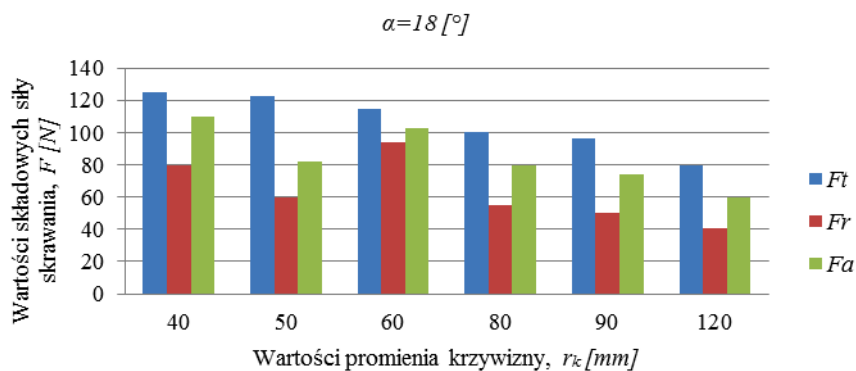
Rys. 9. Wartości składowych siły skrawania w zależności od promienia krzywizny r_k powierzchni wypukłej przy zastosowaniu kąta prowadzenia $\alpha=18^\circ$

Analizując otrzymane wartości składowych siły skrawania przy frezowaniu powierzchni wypukłej oraz wklęsłej łopatki widać, iż największy wpływ na proces obróbki pięcioosiowej będą miały składowe styczna F_t oraz osiowa F_a . Siły te maleją wraz ze zmniejszeniem wartości krzywizny obrabianej powierzchni w kierunku posuwu i zwiększeniem wartości kąta prowadzenia α . Ponadto można zaobserwować, że dla powierzchni frezowanych z wartością kąta prowadzenia $\alpha=15^\circ$ oraz $\alpha=18^\circ$, wartości składowych siły skrawania dla powierzchni wklęsłej są mniejsze aniżeli dla powierzchni wypukłej.

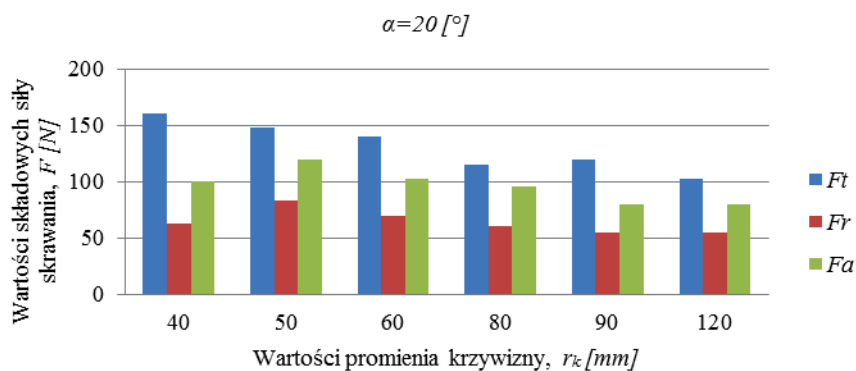
Zmiany wartości składowych siły skrawania wynikają ze zmian przekroju warstwy skrawanej, który zależy od parametrów orientacji osi freza toroidalnego oraz od krzywizny konturu w kierunku posuwu.



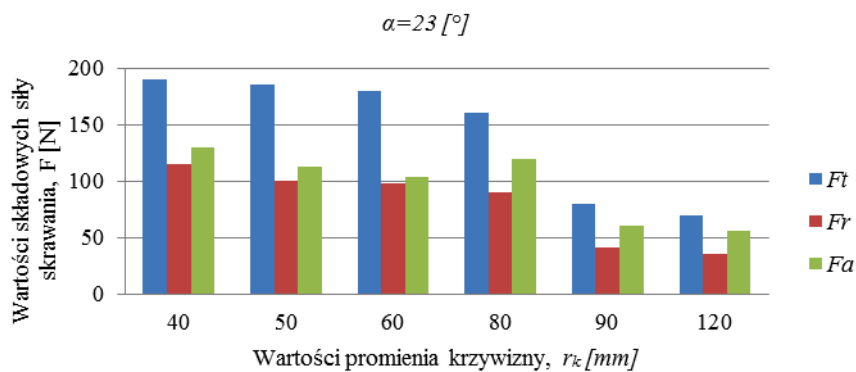
Rys. 10. Wartości składowych siły skrawania w zależności od promienia krzywizny r_k powierzchni wklęsłej przy zastosowaniu kąta prowadzenia $\alpha=15^\circ$



Rys. 11. Wartości składowych siły skrawania w zależności od promienia krzywizny r_k powierzchni wkleślej przy zastosowaniu kąta prowadzenia $\alpha=18^\circ$



Rys.12. Wartości składowych siły skrawania w zależności od promienia krzywizny r_k powierzchni wkleślej przy zastosowaniu kąta prowadzenia $\alpha=20^\circ$



Rys.13. Wartości składowych siły skrawania w zależności od promienia krzywizny r_k powierzchni wkleślej przy zastosowaniu kąta prowadzenia $\alpha=23^\circ$

Z analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że zachodzi korelacja pomiędzy kątem prowadzenia α i promieniem krzywizny powierzchni złożonej a wartościami składowych siły skrawania. Najmniejsze wartości sił dla powierzchni wklęsłej jak i wypukłej otrzymano dla niskich wartości kątów α oraz dla dużych wartości promieni krzywizny r_k .

4. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych wynika, że zarówno kąt prowadzenia α oraz promień krzywizny r_k obrabianej powierzchni ma istotny wpływ na rozkład składowych siły skrawania w procesie pięcioosiowego frezowania frezem toroidalnym. Rozkład wartości sił jest zróżnicowany w zależności od parametrów orientacji osi narzędzia jak i parametrów krzywizny obrabianej powierzchni.

Na podstawie powyższych wniosków można stwierdzić, że parametry orientacji osi narzędzia nie mogą być definiowane jako wartości stałe odniesione do wektora normalnego powierzchni złożonej oraz, że istnieje możliwość opracowania takiej metody sterowania parametrami pozycjonowania w zależności od krzywizny powierzchni złożonej, która umożliwi uzyskanie jak najmniejszych wartości składowych siły skrawania.

LITERATURA

- [1] BOZ Y., ERDIM H., LAZOGLU I.: *Modeling Cutting Forces for 5-Axis Machining of Sculptured Surface*. Mitsubishi Electric Research Laboratories, inc., 2010.
- [2] BUREK J., ŻYŁKA Ł., GDULA M., PŁODZIEN M.: *Wpływ orientacji osi frezu toroidalnego na chropowatość powierzchni w obróbce 5-osiowej*. Mechanik nr 8-9/2013. VII Konferencja Szkoły Obróbki Skrawaniem.
- [3] GDULA M., BUREK J., ŻYŁKA Ł., TUREK P.: *Analysis of accuracy of the shape of sculptured surface in simultaneous five axis machining of parts made from difficult to machine materials used in aviation technology*. International Conference MANUFACTURING, Poznań 2014.
- [4] GILLES P., COHEN G., MONIES F.: *Torus cutter positioning in five-axis milling using balance of the transversal cutting force*. International Journal Advanced Manufacturing Technology 66/2013, 965-973.
- [5] OZTURK E., TUNC T., BUDAK E.: *Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 49/2009, 1053–1062.
- [6] SUN Y., GUO Q.: *Numerical simulation and prediction of cutting forces in five-axis milling processes with cutter run-out*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 51/2011, 806-815.