

Wpływ kąta wyprzedzenia i promienia krzywizny na siły skrawania w pięcioosiowym frezowaniu powierzchni złożonych

Effect of the lead angle and the radius of curvature on the cutting forces in a 5-axis milling of sculptured surfaces

MICHAŁ GDULA
JAN BUREK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.1.2>

Przedstawiono badania doświadczalne, których celem było sporządzenie wykresów obrazujących wpływ kąta wyprzedzenia oraz promienia krzywizny obrabianego zarysu krzywoliniowej powierzchni złożonej na składowe siły skrawania. Przedmiotem badań doświadczalnych była wypukła oraz wklęsła powierzchnia pióra łopatki turbiny ze stopu Inconel 718. Do ich przeprowadzenia zastosowano frez toroidalny. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wartości kąta wyprzedzenia w obróbce wypukłej i wklęsłej powierzchni łopatki turbiny powinny być odpowiednio zmieniane w sposób ciągły wraz ze zmianą promienia krzywizny w kierunku posuwu obrabianego profilu powierzchni.

SŁOWA KLUCZOWE: pięcioosiowe frezowanie, siły skrawania, powierzchnie złożone, łopatka turbiny

Experimental studies are presented, were conducted that aimed at determining the mathematical models of the influence of the lead angle and the radius of curvature of the profile of machined sculptured surface on the components of the cutting force. The object of the experimental studies was a convex and concave surface of a turbine blade of Inconel 718 alloy. The toroid cutter was used for the tests. Based on the results of the study it was found that the lead angle in the machining of the convex surface and concave turbine blade should be continuously varied with the change of radius of curvature in the direction of the machined surface profile.

KEYWORDS: 5-axis milling, cutting forces, sculptured surfaces, turbine blade

Technologie pięcioosiowego frezowania są obecnie stosowane do wytwarzania form i matryc oraz skomplikowanych geometrycznie części dla przemysłu lotniczego, samochodowego i biomedycznego. Pięcioosiowe frezowanie – przez połączenie trzech przemieszczeń liniowych oraz dodatkowych dwóch obrotowych – umożliwia realizowanie ruchu narzędzia w przestrzeni w sposób ciągły względem wektora normalnego do obrabianej powierzchni. Dzięki temu skomplikowane geometrycznie kształty mogą być obrabiane w jednym zamocowaniu, przez co skraca się całkowity czas wytwarzania części. Ponadto swoboda kinematyczna obróbki pięcioosiowej pozwala na zwiększenie dostępności narzędzia, a jednocześnie na skrócenie jego wysięgu. Zastosowanie do obróbki pięcioosiowej krótszego narzędzia o odpowiednio dobranej geometrii zapewnia nie tylko większą sztywność układu obrabiarka–uchwyt–przedmiot–narzędzie, lecz także wysoką jakość powierzchni oraz wzrost wydajności. Z tego względu w praktyce przemysłowej do pięcioosiowej obróbki powierzchni złożonych coraz częściej stosuje się frezy toroidalne [1, 4–6].

Poza skróceniem czasu obróbki głównym celem stosowania pięcioosiowego frezowania jest zwiększenie dokładności geometrycznej obrabianych przedmiotów. Nie można tego osiągnąć bez wyprowadzenia zależności modelowych, opisujących relację pomiędzy parametrami geometrycznymi powierzchni złożonej i kinematycznymi orientacji osi narzędzia. Należy uwzględnić fakt, że na skutek ciągłych zmian krzywizny powierzchni złożonej podczas jej obróbki mogą się zmieniać wartości pola przekroju warstwy skrawanej, a w konsekwencji – wartości i kierunek działania składowych siły skrawania, co skutkuje niedokładnością wymiarowo-kształtową. Określenie modelowych zależności pomiędzy wymienionymi parametrami a składowymi siły skrawania nabiera więc znaczenia.

Większość badań dotyczących obróbki pięcioosiowej koncentruje się na generowaniu ścieżek narzędziowych i ich optymalizacji. Dzięki doskonaleniu technologii CAM wyeliminowano pewne ograniczenia geometryczne oraz błędy samego programu, lecz do tej pory nie brano pod uwagę aspektów geometryczno-kinematycznych procesu pięcioosiowego frezowania, odnoszących się do strefy skrawania.

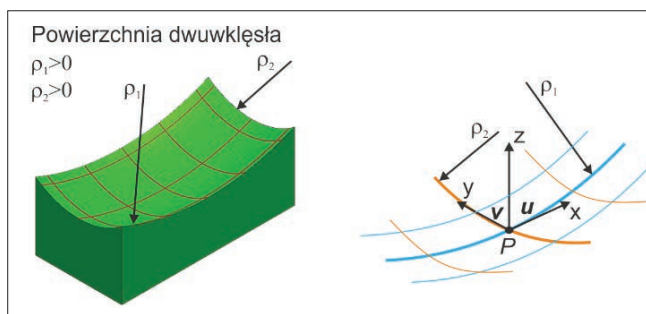
Jedne z najnowszych badań przeprowadzili Ozturk i in. [1], Budak i in. [9] oraz Lazoglu i in. [2]. Dotyczyły one analityczno-doświadczalnego modelowania geometrii warstwy skrawanej dyskretną metodą bezpośrednią CAD, co pozwoliło na uzyskanie danych, które następnie wykorzystano do prognozowania siły skrawania i optymalizacji procesu pięcioosiowego frezowania. Niniejszy artykuł dotyczy badań będących kontynuacją tych realizowanych przez Gdulę i in. [3–6], które polegały na określeniu współzależności parametrów geometrycznych i kinematycznych w procesie pięcioosiowego frezowania frezem toroidalnym złożonych powierzchni łopatek turbin.

Pięcioosiowe frezowanie powierzchni złożonych

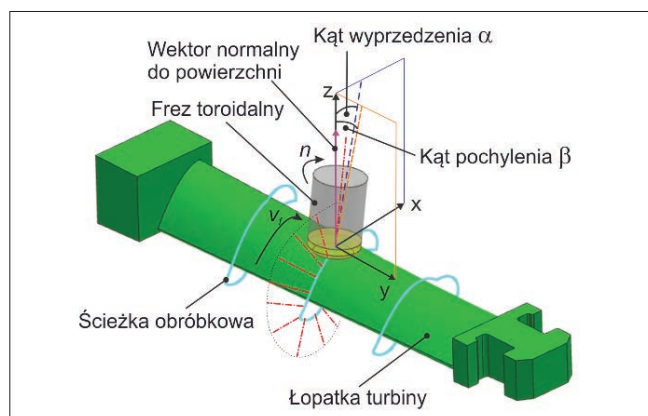
Powierzchnie złożone są stosowane do opisu skomplikowanych kształtów o formie: wypukłej, wklęsłej, dwuwypukłej, dwuwklęsłej, wklęsło-wypukłej oraz wypukło-wklęsłej. Powierzchnia złożona na ogół jest zakrzywiona w obu głównych kierunkach parametrycznych – u i v . Ostateczny kształt powierzchni charakteryzują wartości krzywizn głównych w otoczeniu wybranego punktu P na tej powierzchni. Autorzy przyjęli krzywizny główne jako promienie ρ_1 i ρ_2 (rys. 1).

Jednym z głównych problemów pięcioosiowego frezowania jest dobranie optymalnej orientacji osi frezu toroidalnego, relatywnie do wektora normalnego powierzchni złożonej. Orientację osi frezu definiuje się, programując kinematyczne parametry kąta wyprzedzenia α i/lub kąta pochylenia β (rys. 2).

* Dr inż. Michał Gdula (gdulam@prz.edu.pl); dr hab. inż. Jan Burek, prof. PRz (jburek@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji



Rys. 1. Parametry geometryczne powierzchni złożonych

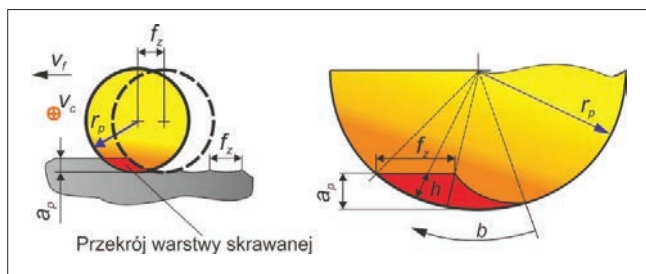


Rys. 2. Parametry kinematyczne procesu pięcioosiowego frezowania

Opisane parametry jednoznacznie określają warunki i strefę styku między frezem toroidalnym a powierzchnią obrabianą [3], natomiast – jak wynika z pracy [4] – na przekrój warstwy skrawanej istotnie wpływają tylko kąt wyprzedzenia α oraz promień krzywizny ρ_1 i właśnie te parametry poddano dalszym analizom.

Warstwa skrawana

Geometria warstwy skrawanej w obróbce frezem toroidalnym ma charakterystyczny kształt „przecinka”, a grubość warstwy skrawanej h zmienia się wzdłuż czynnej krawędzi skrawającej b , co schematycznie pokazano na rys. 3. W obróbce frezem toroidalnym na geometrię warstwy skrawanej wpływają: promień okrągłej płytki skrawającej r_p , posuw na ostrze f_z oraz dosuw osiowy a_p [3–5].



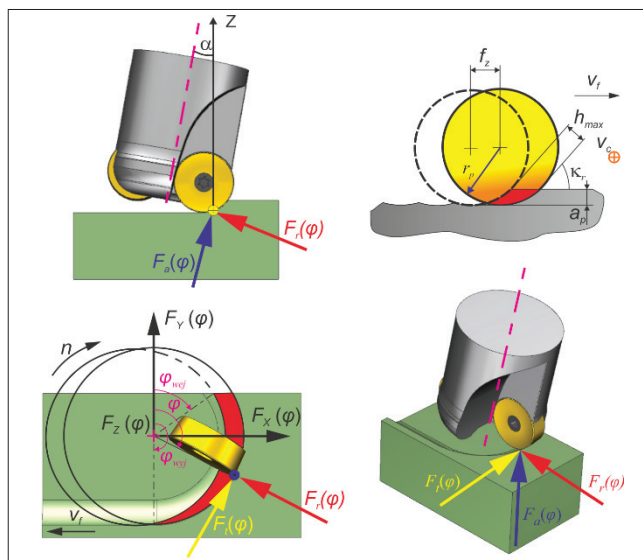
Rys. 3. Geometria warstwy skrawanej

W procesie pięcioosiowego frezowania istotna jest także zmienność parametrów geometrycznych warstwy skrawanej w czasie, wywołana [4]:

- kinematyką procesu, tj. kątowymi parametrami orientacji osi narzędzia;
- geometrią powierzchni, tj. zmiennymi promieniami krzywizny obrabianej powierzchni.

Siła skrawania

Siła całkowita wywierana przez narzędzie na przedmiot obrabiany jest definiowana jako wypadkowa sił skrawania wywieranych przez wszystkie ostrza skrawające narzędzia [2, 3, 6, 9]. Składowe siły całkowite są określane przez rzutowanie prostokątne tej siły wzdłuż kierunków poszczególnych ruchów związanych z kinematyką realizowanego procesu skrawania. Dla pięcioosiowego frezowania frezem toroidalnym autorzy [8] podają rozkład sił pokazany na rys. 4. Wynika on z modelu mechanistycznego siły skrawania Altıntasa-Lee.



Rys. 4. Rozkład sił w pięcioosiowym frezowaniu frezem toroidalnym

W tym modelu całkowitą siłę skrawania wygenerowaną w procesie frezowania frezem toroidalnym można rozłożyć na trzy składowe w układzie narzędzia, działające na pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej w funkcji kąta chwilowego położenia ostrza frezu. Tymi składowymi są siły: styczna $F_t(\varphi)$, promieniowa $F_r(\varphi)$ i osiowa $F_a(\varphi)$. Można je wyrazić następującymi równaniami:

$$\begin{aligned} F_t(\varphi) &= K_{tc} A(\varphi) + K_{te} b \\ F_r(\varphi) &= K_{rc} A(\varphi) + K_{re} b \\ F_a(\varphi) &= K_{ac} A(\varphi) + K_{ae} b \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} – współczynniki oporu właściwego skrawania zależne od pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej $A(\varphi)$; K_{te} , K_{re} , K_{ae} – współczynniki oporu właściwego skrawania zależne od czynnej długości krawędzi skrawającej b .

Podstawowym składnikiem zależności (1) jest pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej $A(\varphi)$:

$$A(\varphi) = \frac{a_p f_z \sin(\varphi)}{\sin \kappa_r} \quad (2)$$

gdzie: a_p – dosuw osiowy, f_z – posuw na ostrze, φ – chwilowy kąt położenia ostrza, κ_r – kąt przystawienia.

Z zależności (1) i (2) wynika, że wartości składowych siły skrawania zależą od geometrii przekroju warstwy skrawanej, na którą wpływają głównie: dosuw osiowy a_p , posuw na ostrze f_z , kąt chwilowego położenia ostrza frezu φ oraz kąt przystawienia κ_r . Kąt przystawienia κ_r

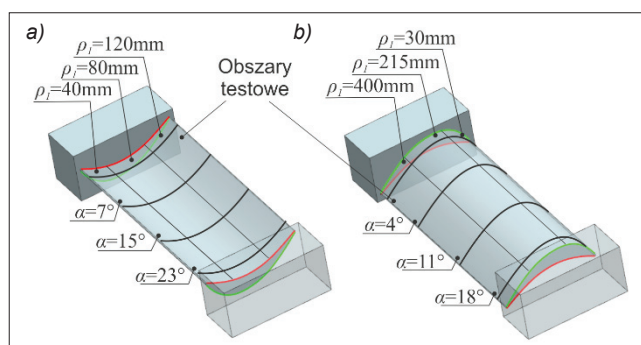
determinuje geometrię warstwy skrawanej i generowaną w procesie pięcioosiowej obróbki siłę skrawania. W wyniku zmiennych promieni krzywizny obrabianej powierzchni następuje zmiana kąta przystawienia κ_r zawartego pomiędzy krawędzią skrawającą ostrza frezu a powierzchnią obrabianą. Ciągła zmiana kąta przystawienia κ_r , nawet przy stałych parametrach technologicznych skrawania, powoduje ciągłą zmianę punktu styku ostrza frezu z obrabianą powierzchnią, a jednocześnie zmianę przekroju warstwy skrawanej. W wyniku zmian tych parametrów następują zmiany wartości i kierunku działania wszystkich składowych siły skrawania. Prowadzi to do zmiennego odkształcenia sprężystego narzędzia oraz przedmiotu obrabianego, co ma duży wpływ na dokładność kształtu.

Dalej przedstawiono przebieg doświadczeń z wytypowanymi (na podstawie wcześniej zrealizowanych badań [3–6]) nastawami parametrów kąta wyprzedzenia α osi narzędzia oraz promienia krzywizny ρ_1 powierzchni, co miało na celu określenie wpływu tych parametrów na wartość składowych siły skrawania.

Badania doświadczalne

Budowę modelu do badań doświadczalnych przedstawiono na rys. 5. Przedmiotem tych badań była wypukła oraz wklęsła powierzchnia pióra łopatki turbiny. Powierzchnie te rozpięto na stałych wzdłuż długości pióra profilach. Zarys profili łopatki opisano łukami o różnych wartościach promienia krzywizny ρ_1 , określonych na podstawie rzeczywistej geometrii pióra łopatki turbiny (rys. 6). Powierzchnie wypukłą i wklęsłą podzielono na obszary testowe w zależności od promienia krzywizny ρ_1 oraz kąta wyprzedzenia α (rys. 7). Parametry frezowania zestawiono w tabelicy.

Na każdym z etapów obróbki stałymi parametrami były: dosuw osiowy a_p , dosuw promieniowy a_e , posuw na ostrze f_z , średnica frezu toroidalnego $D = 16$ mm i promień okrąg-



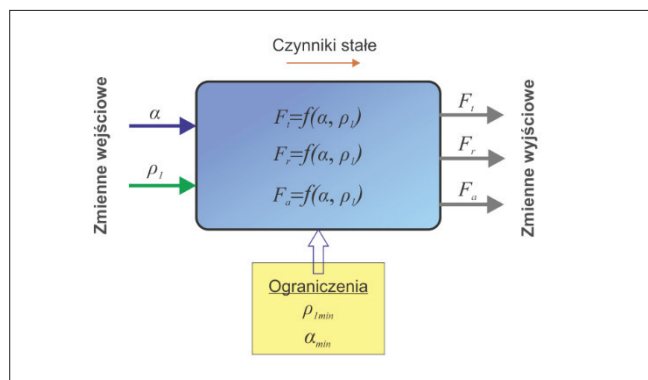
Rys. 7. Obszary testowe w zależności od wartości promienia krzywizny ρ_1 oraz kąta wyprzedzenia α : a) powierzchni wklęsłej, b) powierzchni wypukłej

TABLICA. Parametry obróbki

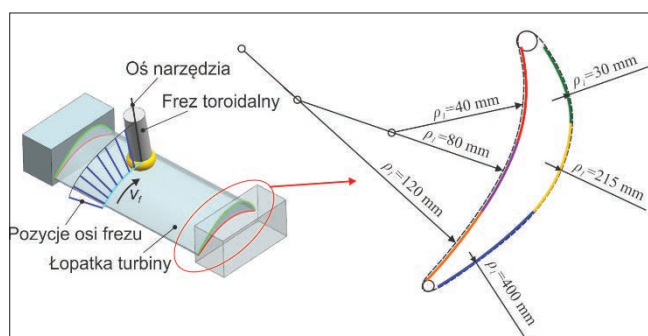
Obrabiana powierzchnia	Wypukła	Wklęsła
a_p , mm	0,25	0,25
a_e , mm	1,5	1,5
f_z , mm/ostrze	0,26	0,26
v_c , m/min	40	40
ρ_1 , mm	30÷400	40÷120
α , °	4÷18	7÷23

łej płytki skrawającej $r_p = 4$ mm. Ponadto w celu uniknięcia podcięcia powierzchni wklęsłej obliczono graniczną minimalną wartość kąta prowadzenia $\alpha_{\min} = 7^\circ$ dla promienia $\rho_1 = 40$ mm tej powierzchni.

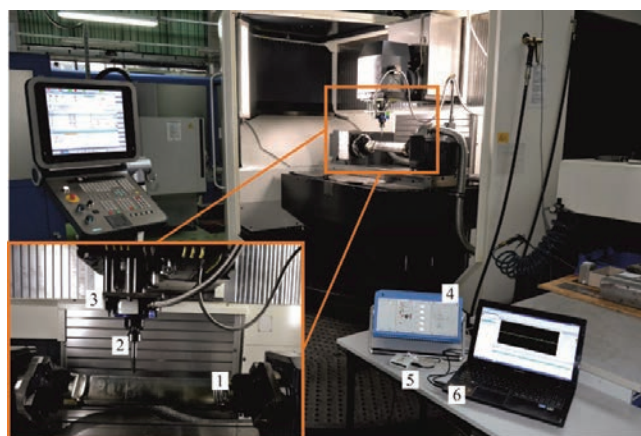
Stanowisko badawcze oraz tor do pomiaru składowych siły skrawania zbudowano na bazie pięcioosiowego centrum frezarskiego CNC 100 DMU MonoBlock firmy DMG (rys. 8), stanowiącego wyposażenie Katedry Technik Wytwarzania i Automatyzacji Politechniki Rzeszowskiej.



Rys. 5. Budowa modelu obiektu badań doświadczalnych



Rys. 6. Przedmiot badań doświadczalnych



Rys. 8. Tor pomiarowy składowych siły skrawania: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – frez toroidalny, 3 – czteroskładowy siłomierz obrotowy, 4 – czterokanałowy wzmacniacz sygnału, 5 – karta pomiarowa KUSB KEITHLEY 3100, 6 – komputer z oprogramowaniem quickDAQ do podglądu, rejestracji i analizy sygnałów pomiarowych

Obrabiarka została wyposażona w głowicę podziałową NC oraz narzędzia umożliwiające obróbkę zgrubną i wykończeniową przedmiotu badań.

Do pomiaru składowych siły skrawania zastosowano czteroskładowy piezoelektryczny siłomierz obrotowy marki KISTLER typu 9123C, zamocowany w gnieździe HSK-63A wrzeciona obrabiarki.

Badaniom doświadczalnym poddano łopatkę wykonaną ze stopu Inconel 718 (W. Nr. 2.4668). W badaniach wykorzystano korpus frezu toroidalnego R300-016B20L-08L Sandvik Coromant o średnicy $D = 16$ mm, w którym montowano okrągłe płytki skrawające R300-0828E-PL o promieniu $r_p = 4$ mm.

Badania prowadzono dwuetapowo. Na pierwszym etapie realizowano proces indeksowanej obróbki zgrubnej powierzchni łopatki. Obróbka zgrubna nie była analizowana, a jej celem było ukształtowanie przedmiotu badań z założonym naddatkiem na obróbkę wykończeniową. Na drugim etapie realizowano obróbkę wykończeniową.

Realizacja badań przebiegała zgodnie z planem statycznym trójpoziomowym kompletnym PS/DK 3ⁿ, z liczbą powtórzeń pomiarów wynoszącą 3 oraz z przyjętym poziomem istotności 0,05. Plan ten umożliwia uzyskanie modelu matematycznego badanego procesu w postaci funkcji wielomianowej, która jest wygodna do analizy matematycznej i badań modelowych [4].

Wyniki badań

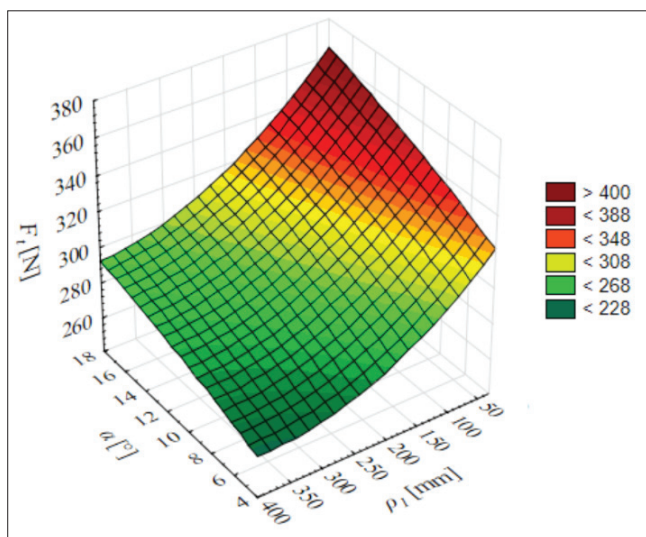
■ **Składowa styczna siły skrawania.** Wykresy uzyskane na podstawie otrzymanych zależności modelowych,

obrazujące wpływ promienia krzywizny ρ_1 i kąta wyprzedzenia α na przebieg składowej stycznej F_t siły skrawania w obróbce powierzchni wypukłej i wklęsłej, przedstawiono na rys. 9 i 10.

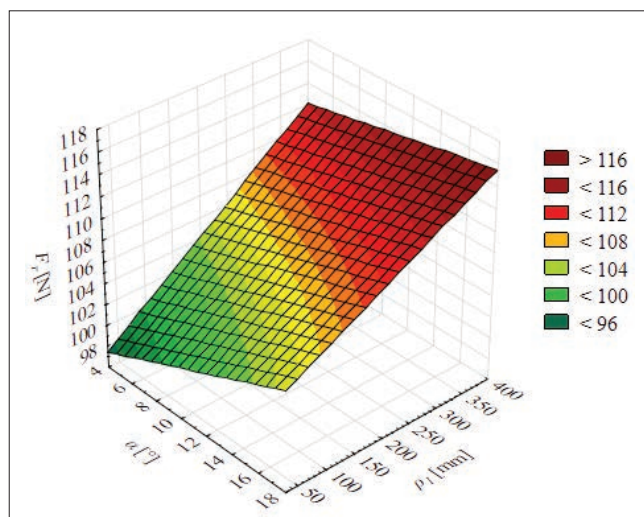
Po analizie sporządzonych wykresów stwierdzono, że w całym zakresie badanych promieni krzywizny ρ_1 – zarówno powierzchni wypukłej, jak i wklęsłej – wartość składowej F_t siły skrawania rośnie wraz ze wzrostem wartości promienia krzywizny ρ_1 . Zaobserwowano też, że wraz ze wzrostem pochylenia osi frezu w kierunku posuwu wartość składowej stycznej F_t siły skrawania maleje. Wynika to ze zmian strefy styku narzędzia z obrabianą powierzchnią i pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej.

■ **Składowa promieniowa siły skrawania.** Wykresy sporządzone na podstawie otrzymanych zależności modelowych, obrazujące wpływ promienia krzywizny ρ_1 i kąta wyprzedzenia α na przebieg składowej promieniowej F_r siły skrawania w obróbce powierzchni wypukłej oraz powierzchni wklęsłej przedstawiono odpowiednio na rys. 11 i 12.

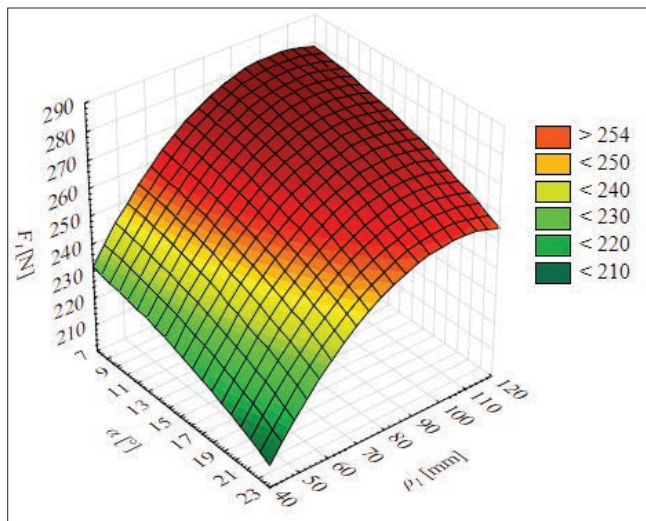
Z zaprezentowanych wykresów wynika, że w przypadku obróbki powierzchni wypukłej wartość składowej F_r rośnie wraz ze wzrostem parametru ρ_1 w całym przyjętym



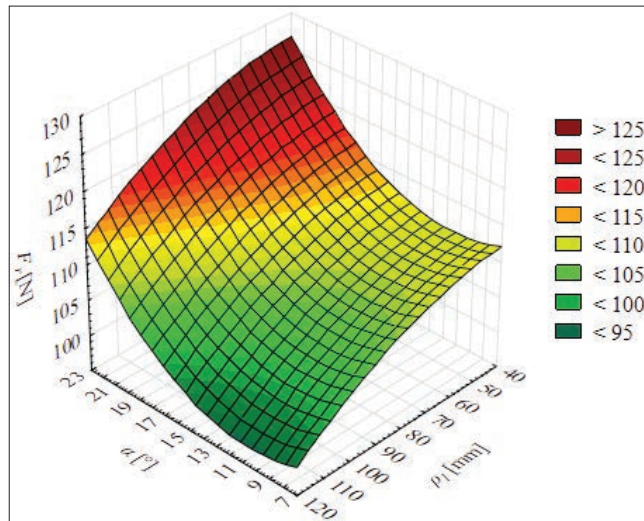
Rys. 9. Wpływ promienia krzywizny ρ_1 i kąta wyprzedzenia α na przebieg składowej stycznej F_t siły skrawania w obróbce powierzchni wypukłej



Rys. 11. Wpływ promienia krzywizny ρ_1 i kąta wyprzedzenia α na przebieg składowej promieniowej F_r siły skrawania w obróbce powierzchni wypukłej



Rys. 10. Wpływ promienia krzywizny ρ_1 i kąta wyprzedzenia α na przebieg składowej stycznej F_t siły skrawania w obróbce powierzchni wklęsłej



Rys. 12. Wpływ promienia krzywizny ρ_1 i kąta wyprzedzenia α na przebieg składowej promieniowej F_r siły skrawania w obróbce powierzchni wklęsłej

zakresie analizy, a maleje w przypadku obróbki powierzchni wklęsłej. Wzrost siły F_r podczas obróbki powierzchni wypukłej może wynikać z wydłużenia linii styku ostrza frezu z zarysem obrabianej powierzchni oraz ze zwiększenia kąta opasania frezu. Wraz ze zwiększaniem pochylenia osi frezu w kierunku posuwu wartość składowej promieniowej F_r siły skrawania wzrasta w obróbce obu rodzajów powierzchni. Jest to spowodowane wzrostem wartości przekroju warstwy skrawanej.

■ **Składowa osiowa siły skrawania.** Wykresy utworzone na podstawie otrzymanych zależności modelowych, obrazujące wpływ promienia krzywizny ρ_1 i kąta wyprzedzenia α na przebieg składowej osiowej F_a siły skrawania w obróbce powierzchni wypukłej oraz wklęsłej, przedstawiono na rys. 13 i 14.

Ze wspomnianych wykresów wynika, że wartość składowej osiowej F_a siły skrawania rośnie wraz ze wzrostem wartości promienia krzywizny ρ_1 , natomiast wzrost wartości kąta prowadzenia α osi frezu powoduje redukcję składowej osiowej F_a siły skrawania w przypadku obróbki obu

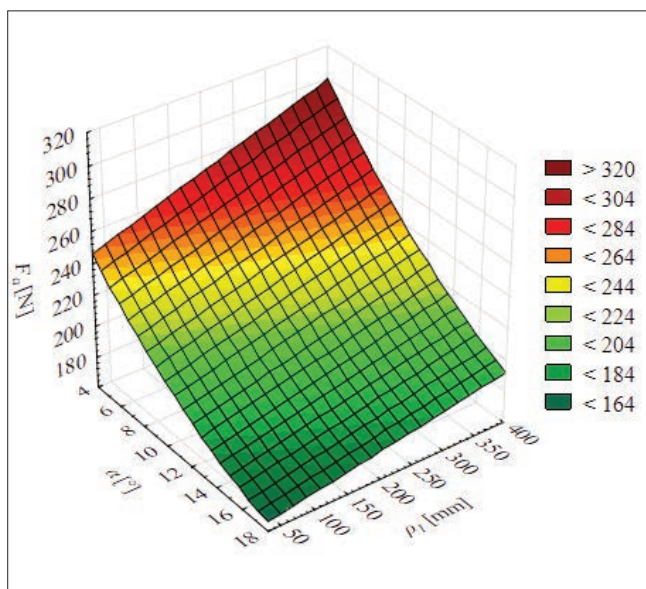
powierzchni. Porównując otrzymane przebiegi składowej osiowej F_a siły skrawania w funkcji kąta wyprzedzenia α oraz promienia krzywizny ρ_1 , można ponadto stwierdzić, że podczas obróbki powierzchni wypukłej wartości składowej osiowej F_a siły skrawania są większe niż podczas obróbki powierzchni wklęsłej.

Wnioski

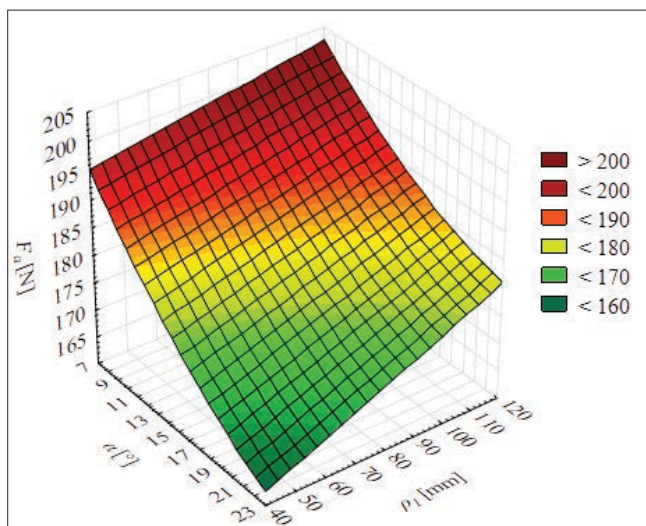
Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz analizy otrzymanych wyników dotyczących składowych siły skrawania można stwierdzić, że wraz ze wzrostem promienia krzywizny ρ_1 w badanym zakresie następuje zwiększenie strefy styku pomiędzy narzędziem a obrabianą powierzchnią – zarówno wypukłą, jak i wklęsłą. W konsekwencji prowadzi to do wzrostu składowych siły skrawania. Wynika to z faktu, że wraz ze zwiększającą się strefą styku zwiększa się przekrój warstwy skrawanej, a w rezultacie rosną wartości sił skrawania. Natomiast wraz ze wzrostem kąta wyprzedzenia α następuje zmniejszenie się strefy styku. Wynikiem tego jest zmniejszenie przekroju warstwy skrawanej i tym samym spadek wartości sił skrawania. Wyjątek stanowi składowa promieniowa F_r siły skrawania, której wartość nieznacznie rośnie wraz ze wzrostem kąta wyprzedzenia α .

Stwierdzono ponadto, że na składowe siły skrawania, generowane w trakcie procesu obróbki powierzchni wypukłej i wklęsłej, można istotnie wpływać poprzez kinematyczny parametr kąta wyprzedzenia α . Przypuszczalnie tym parametrem można też pośrednio wpływać na odchyłkę kształtu Δ_k oraz na parametry chropowatości powierzchni, jednak aby to potwierdzić, konieczne jest przeprowadzenie badań w tym kierunku.

Podsumowując: wartości kąta wyprzedzenia α w obróbce powierzchni wypukłej lub wklęsłej łopatki wirnika turbiny należy zmieniać w sposób ciągły odpowiednio do zmiany promienia krzywizny ρ_1 obrabianego profilu powierzchni.



Rys. 13. Wpływ promienia krzywizny ρ_1 i kąta wyprzedzenia α na przebieg składowej osiowej F_a siły skrawania w obróbce powierzchni wypukłej



Rys. 14. Wpływ promienia krzywizny ρ_1 i kąta wyprzedzenia α na przebieg składowej osiowej F_a siły skrawania w obróbce powierzchni wklęsłej

LITERATURA

1. Berglind L., Plakhotnik D., Ozturk E. "Discrete cutting force model for 5-axis milling with arbitrary engagement and feed direction". *Procedia CIRP*. 58 (2017): s. 445–450.
2. Boz Y., Erdim H., Lazoglu I. "Modeling cutting forces for 5-axis machining of sculptured surfaces". *Advanced Materials Research*. 223 (2011): s. 701–712.
3. Burek J., Gdula M., Żyłka Ł., Płodzień M. „Wpływ orientacji osi frezu toroidalnego na składowe siły skrawania w pięcioosiowej obróbce łopatki turbiny ze stopu Inconel 718”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 764–774.
4. Gdula M. „Proces symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchni złożonych frezem toroidalnym”. Praca doktorska. Rzeszów, 2017.
5. Gdula M., Burek J., Żyłka Ł. "Cross section of the cutting layer in simultaneous five-axis machining of sculptured surfaces". *Archives of Mechanical Technology and Automation*. 34, 4 (2014): s. 25–36.
6. Gdula M., Burek J., Żyłka Ł., Turek P. "Analysis of accuracy of the shape of sculptured surfaces in simultaneous five-axis machining of parts made from difficult to machine materials used in aviation technology". *Archives of Mechanical Technology and Automation*. 34, 4 (2014): s. 11–24.
7. Gilles P., Monies F., Rubio W. "Optimum orientation of a torus milling cutter: Method to balance the transversal cutting force". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 47 (2007): s. 2263–2272.
8. Luo S., Dong Z., Jun M. "Chip volume and cutting force calculations in 5-axis CNC machining of free-form surfaces using flat-end mills". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 90 (2017): s. 1145–1154.
9. Ozturk E., Budak E. "Modelling of 5-Axis Milling Forces". *Machining Science and Technology. An International Journal*. 11, 3 (2007): s. 287–311.