

Wpływ kąta pochylenia krawędzi skrawającej frezu na składowe siły skrawania i amplitudy przyspieszenia drgań

The effect of the cutting edge helix angle of the cutter on the cutting force components and vibration acceleration amplitude

JAN BUREK
ŁUKASZ ŻYŁKA
MARCIN PŁODZIEN
PAWEŁ SUŁKOWICZ
JAROSŁAW BUK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.155>

English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono wpływ kąta pochylenia krawędzi skrawającej frezu na składowe siły skrawania oraz amplitudy przyspieszenia drgań w układzie przedmiotu obrabianego w procesie frezowania wysokowydajnego stopu aluminium frezem o falistym zarysie krawędzi skrawającej.

SŁOWA KLUCZOWE: frez, kąt pochylenia, aluminium, obróbka wysokowydajna

The influence of the cutting edge helix angle of the end milling cutter on the cutting force components and vibration acceleration amplitude in the workpiece coordinate system was determined during the high performance milling of aluminum alloy using the cutter with a corrugated cutting edge.

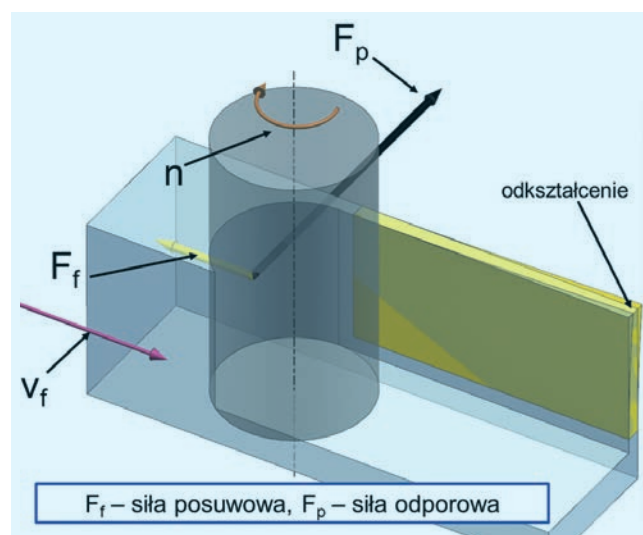
KEYWORDS: cutter, helix angle, aluminum, high performance milling

Stopy aluminium dzięki unikalnym właściwościom, takim jak: niska gęstość, niski opór właściwy oraz dobra obrabialność (zwłaszcza przez kształtowanie ubytkowe), znalazły zastosowanie w lotnictwie, kosmonautyce i motoryzacji. W przemyśle lotniczym najczęściej wykorzystuje się stop aluminium do przeróbki plastycznej AlZn5.5MgCu. Można go znaleźć w konstrukcji elementów nośnych samolotów, np.: wręg, podłużnic i dźwigarów kadłuba oraz skrzydeł [1–3, 6].

Integralne, jednolite struktury elementów konstrukcyjnych wytwarza się z pełnego bloku materiału za pomocą frezowania. Niejednokrotnie podczas obróbki tego typu konstrukcji ponad 90% materiału usuwa się w postaci wiórów. Cechą charakterystyczną złożonej struktury jest jej cienkościenność oraz duża liczba obszarów zamkniętych o relatywnie dużej głębokości [2, 4].

Z uwagi na cienkościenność struktur nośnych ze stopów aluminium oraz dużą objętość usuwanego materiału obróbka ubytkowa tych elementów jest realizowana wieloetapowo. Pierwszy etap – obróbka zgrubna oraz kształtująca – wykonywany jest metodą wysokowydajną HPC (*high performance cutting*), która polega na usuwaniu materiału w jak najkrótszym czasie poprzez zwiększenie wydajności objętościowej Q_w , to jest dosuwu promieniowego a_p , osiowego a_f oraz posuwu na ostrze f_z (rys. 1). Obróbka HPC, oprócz niezaprzeczalnych zalet, ma pewne ograniczenia, wynikające m.in. z dużych

przekrojów warstwy skrawanej, co przyczynia się do powstania dużych wartości składowych siły skrawania. Najistotniejsze są 2 składowe siły skrawania: siła odporna F_p i siła posuwowa F_f , które wpływają na stabilność procesu frezowania oraz działają na przedmiot obrabiany (rys. 1) [4–8].

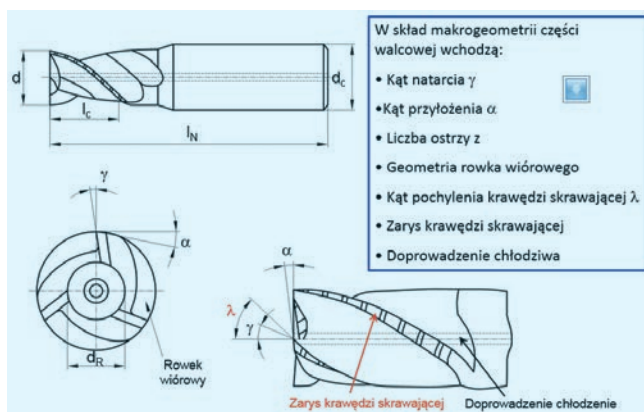


Rys. 1. Składowe siły skrawania we frezowaniu HPC

Pod wpływem dużych wartości składowych siły skrawania może nastąpić odkształcenie sprężyste zarówno frezu, jak i cienkiej ścianki przedmiotu obrabianego. Ponieważ w lotniczych elementach konstrukcyjnych występują profile o dość dużych głębokościach, konieczne jest stosowanie dużych wysięgów narzędzia, co osłabia jego sztywność. Dodatkowo sztywność całego układu OUPN jest obniżana przez cienkościenność przedmiotu obrabianego. Duże wysięgi narzędzia, cienkie ścianki przedmiotu obrabianego i duże wartości składowych siły skrawania w obróbce HPC zwiększają także ryzyko wpadania układu OUPN w drgania samowzbudne. Dlatego należy dążyć do obniżenia składowych siły skrawania w celu zapewnienia stabilności frezowania wysokowydajnego [3, 6, 8].

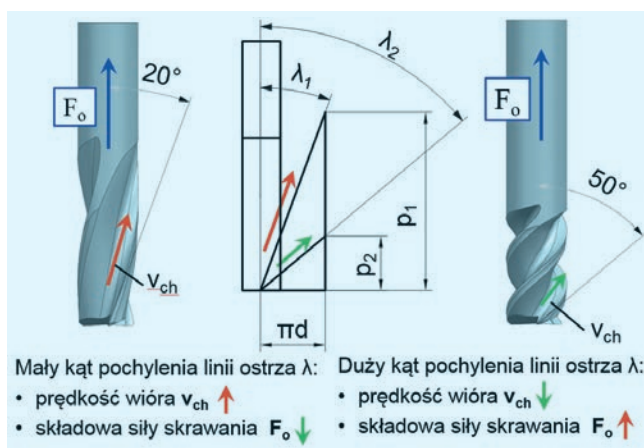
Jednym ze sposobów zmniejszania składowych siły skrawania jest dobór parametrów geometrycznych narzędzia (zarysu i kąta pochylenia krawędzi skrawającej (rys. 2) [2–4]. Przykładowo: wykazano, że zastosowanie falistego bądź przerywanego zarysu krawędzi skrawającej przyczynia się do obniżenia siły skrawania nawet o 30% w porównaniu z frezem o ciągłym zarysie [1, 2].

* Dr hab. inż. Jan Burek (jburek@prz.edu.pl), dr inż. Łukasz Żyłka (zylka@prz.edu.pl), dr inż. Marcin Płodzien (plodzien@prz.edu.pl), mgr inż. Paweł Sułkowicz (psulkowicz@prz.edu.pl), mgr inż. Jarosław Buk (jbuk@prz.edu.pl) – Katedra Techniki Wytwarzania i Automatyzacji na Politechnice Rzeszowskiej



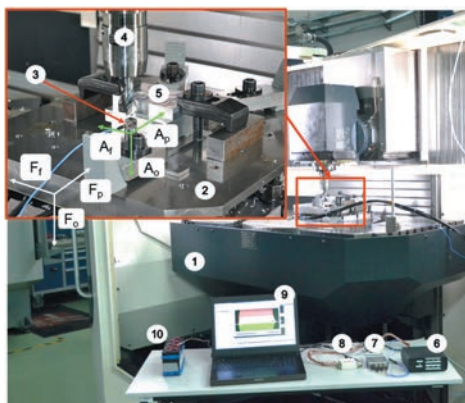
Rys. 2. Frez do obróbki HPC

Kolejnym istotnym parametrem geometrii frezu jest kąt pochylenia krawędzi skrawającej λ (rys. 3). W niniejszej pracy przedstawiono wpływ tego kąta na wartości i rozkład składowych siły skrawania oraz amplitudę przyspieszenia drgań podczas frezowania HPC stopu aluminium AlZn5.5MgCu.

Rys. 3. Wpływ kąta pochylenia λ krawędzi skrawającej na składową osiową F_o siły skrawania

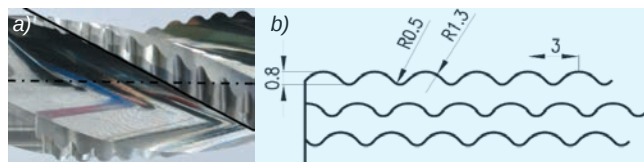
Warunki badań

Badania procesu frezowania wysokowydajnego przeprowadzono na centrum obróbkowym DMU 100 monoBlock firmy DMG (rys. 4).



Rys. 4. Stanowiska badawcze: 1 – centrum frezarskie DMU 100 monoBlock, 2 – platforma składowych siły skrawania, 3 – czujnik amplitudy drgań, 4 – badany frez, 5 – badana próbka, 6 – układ sterowania wzmacniacza ładunku, 7 – przetwornik analogowo-cyfrowy czujnika drgań, 8 – przetwornik analogowo-cyfrowy platformy siły skrawania, 9 – komputer wraz z oprogramowaniem, 10 – zewnętrzne źródło zasilania platformy pomiarowej

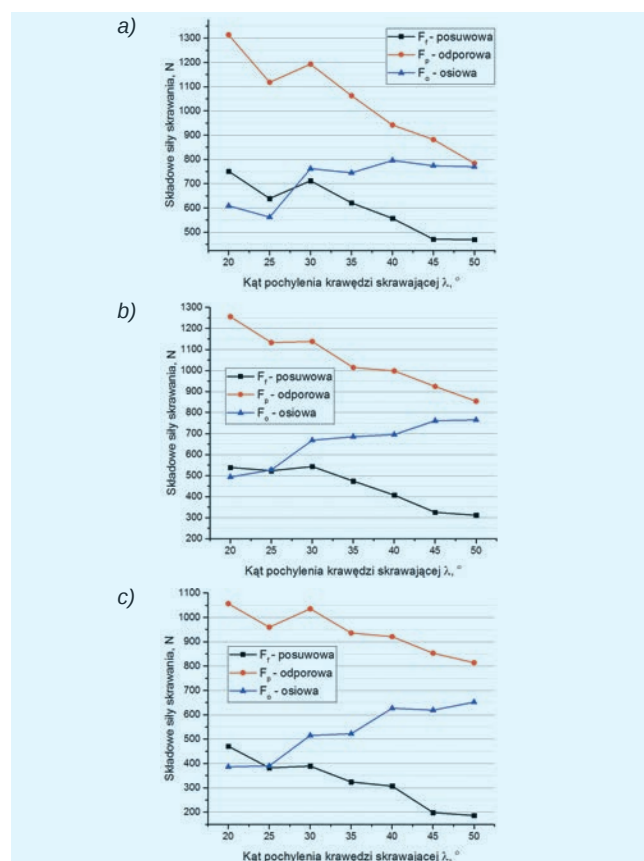
Pomiary składowych siły skrawania rejestrowano za pomocą platformy pomiarowej własnej konstrukcji, złożonej z 4 pojedynczych 3-składowych piezoelektrycznych siłomierzy firmy Kistler typu 9601A31. Pomiar amplitudy przyspieszenia drgań wykonano za pomocą 3-składowego czujnika drgań PCB 356B21. Do badań wykorzystano frezy palcowe monolityczne pełnowęglkowe o średnicy $d = 20$ mm i kącie pochylenia krawędzi skrawającej w zakresie od 20 do 50° z krokiem co 5° (rys. 5a). Frezy te ponadto charakteryzowały się falistym zarysem krawędzi skrawającej (rys. 5b). Próbki badawcze wykonano ze stopu lotniczego aluminium AlZn5.5MgCu (7075).

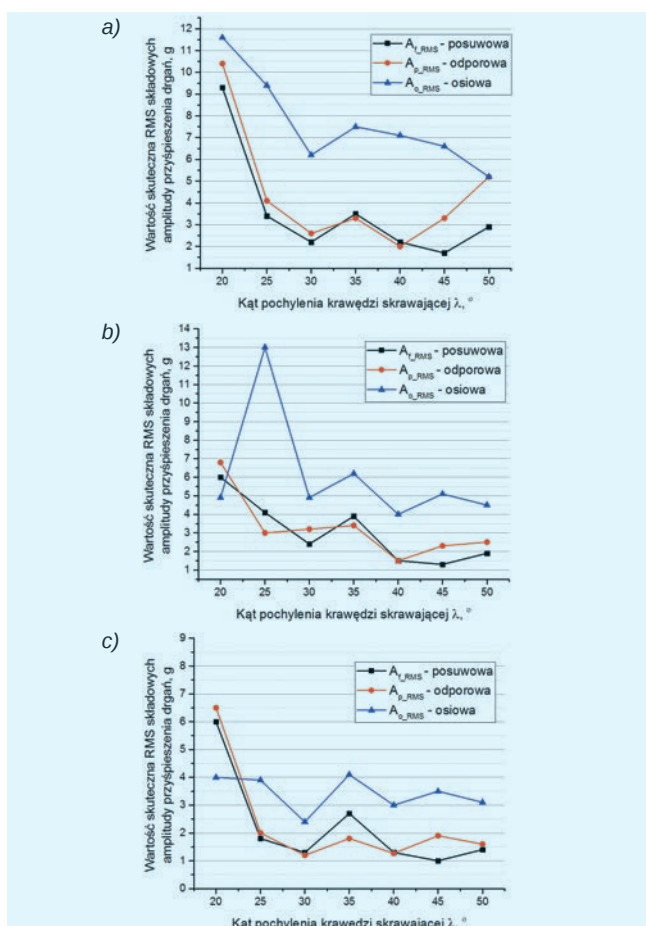
Rys. 5. Frez pełnowęglkowy: a) widok frezu o kącie pochylenia $\lambda = 30^\circ$, b) geometria zarysu krawędzi skrawającej

Badania przeprowadzono z zachowaniem stałych parametrów obróbki: prędkości skrawania $v_c = 694$ m/min, dośuwu osiowego $a_p = 15$ mm oraz wydajności objętościowej $Q_w = 594$ cm³/min. Stałą wydajność objętościową uzyskano poprzez dobór par parametrów technologicznych dośuwu promieniowego $a_e = 8; 12; 16$ mm oraz posuwu na ostrze odpowiednio: $f_z = 0,15; 0,10; 0,075$ mm/ostrze.

Wyniki badań doświadczalnych

Wyniki wpływu kąta pochylenia λ krawędzi skrawającej na wartości składowych siły skrawania oraz na wartości amplitudy drgań przedstawiono na rys. 6 i 7.

Rys. 6. Wpływ kąta pochylenia λ krawędzi skrawającej na składowe siły skrawania dla parametrów obróbki: a) $a_e = 8$ mm; $f_z = 0,15$ mm/ostrze, b) $a_e = 12$ mm; $f_z = 0,10$ mm/ostrze, c) $a_e = 16$ mm; $f_z = 0,075$ mm/ostrze



Rys. 7. Wpływ kąta pochylenia λ krawędzi skrawającej na wartości amplitudy drgań dla parametrów: a) $a_e = 8$ mm; $f_z = 0,15$ mm/strze; b) $a_e = 12$ mm; $f_z = 0,10$ mm/strze; c) $a_e = 16$ mm; $f_z = 0,075$ mm/strze

Analiza wyników ukazała monotoniczny charakter przebiegu wartości składowych siły skrawania wraz ze zmianą kąta λ pochylenia krawędzi skrawającej. Wzrost kąta pochylenia krawędzi skrawającej powoduje osłabienie składowej odporowej F_p oraz posuwowej F_f siły skrawania. Odwrotną sytuację zauważono w przypadku składowej osiowej F_o siły skrawania, która we wszystkich próbach rośnie wraz ze zwiększaniem kąta λ .

Analizując składowe F_f i F_p siły skrawania i porównując wyniki dla maks. i min. wartości kąta λ , można zauważyć, że w zestawieniu z frezem o kącie pochylenia $\lambda = 20^\circ$ dla $\lambda = 50^\circ$ oraz:

- pary parametrów obróbki $a_e = 8$ mm i $f_z = 0,15$ wartości składowych siły skrawania spadły kolejno: F_f o ok. 38% i F_p o ok. 40% (rys. 6a);
- przy $a_e = 12$ mm i $f_z = 0,1$ mm/strze F_f spadło o ok. 42% i F_p o ok. 32% (rys. 6b);
- przy $a_e = 16$ mm i $f_z = 0,075$ mm/strze F_f spadło o ok. 60% i F_p o ok. 23% (rys. 6c).

Natomiast w przypadku składowej osiowej F_o siły skrawania dla $\lambda = 50^\circ$ zaobserwowano wzrost jej wartości przy przyjętych parametrach obróbki kolejno o ok. 26% (rys. 6a), 55% (rys. 6b) oraz 69% (rys. 6c) w stosunku do kąta pochylenia $\lambda = 20^\circ$. Ponadto na podstawie analizy pary parametrów technologicznych można stwierdzić, że najniższe wartości składowych siły skrawania uzyskano dla pary $a_e = 16$ mm i $f_z = 0,075$ mm/strze. Te wyniki pokazują, że przy utrzymaniu stałej wydajności obróbki korzystniej jest stosować większe dosuwy promieniowe a_e niż posuwy na ostrze f_z (rys. 6c).

Badania wpływu kąta pochylenia λ na wartości skutecznej amplitudy przyspieszenia drgań pokazują niemono-

niczny charakter zmian składowych amplitudy przyspieszenia drgań wraz ze zmianą tego kąta (rys. 7). Zmiany składowej posuwowej A_f oraz odporowej A_p amplitudy przyspieszenia drgań przebiegają w podobny sposób i cechują się tą samą wartością skuteczną amplitudy. Składowa osiowa ma charakter dominujący i charakteryzuje się najwyższymi wartościami w stosunku do pozostałych składowych.

Najwyższe wartości składowych amplitudy przyspieszenia drgań odnotowano dla kąta pochylenia $\lambda = 20^\circ$. Średnia wartość skuteczna składowej posuwowej A_f wyniosła ok. 8g, składowej odporowej A_p – ok. 9g, natomiast składowej osiowej A_o – ok. 6g. Zwiększanie kąta λ pochylenia krawędzi skrawającej wpływa korzystnie na zmiany składowych amplitudy przyspieszenia drgań. Można zauważyć, że wzrost kąta λ powoduje obniżenie składowej posuwowej A_f oraz odporowej A_p amplitudy, co było również zauważalne w przypadku odpowiadających im składowych siły skrawania. Natomiast odwrotną sytuację odnotowano w przypadku składowej osiowej A_o . Wraz ze wzrostem kąta λ obniżeniu ulega wartość składowej osiowej A_o amplitudy drgań, pomimo że w tym samym czasie obserwowano wzrost składowej osiowej F_o siły skrawania. Jest to widoczne zwłaszcza dla kąta pochylenia $\lambda > 35^\circ$. Efekt ten powoduje wzrost częstotliwości drgań własnych układu OUPN pod wpływem działania obciążenia, a tym samym stabilizację procesu frezowania.

Podobnie jak w przypadku składowych siły skrawania najniższe wartości składowych amplitudy przyspieszenia drgań uzyskano dla $a_e = 16$ mm i $f_z = 0,075$ mm/strze. Wyniki potwierdzają, że stosowanie większych dosuwów promieniowych a_e niż posuwów na ostrze f_z przyczynia się do stabilniejszej pracy frezu (rys. 7c).

Podsumowanie

Na podstawie badań stwierdzono, że stosowanie kątów pochylenia krawędzi skrawającej w zakresie $\lambda = 40\text{--}50^\circ$ powoduje obniżenie składowych posuwowej oraz odporowej średnio o ok. 30%, co ma istotne znaczenie podczas obróbki HPC wyrobów o obniżonej sztywności. Ponadto stosowanie takich kątów pochylenia wpływa korzystnie na znaczne obniżenie amplitudy drgań, średnio na poziomie ok. 3–5g. Należy jednak zaznaczyć, że w przypadku tak dużych kątów pochylenia krawędzi skrawającej wymagane jest stosowanie odpowiednich systemów mocowania narzędzi, aby zapewnić wystarczającą siłę mocowania, zapobiegając możliwości wysunięcia się narzędzia pod wpływem działania składowej osiowej siły skrawania o dużej wartości. Trzeba również pamiętać o nieprzekraczaniu dopuszczalnej siły osiowej we wrzecionie obrabiarki.

LITERATURA

1. Burek J., Żyłka Ł., Płodzień M., Buk J. „Wpływ zarysu ostrza freza na kształtowanie wiórów w wysokowydajnym frezowaniu stopu aluminium”. *Mechanik*. 8–9 (2016) s. 1216–1217.
2. Burek J., Żyłka Ł., Gdula M., Płodzień M. „Wpływ zarysu linii ostrza freza na siłę skrawania w procesie wysokowydajnej obróbki stopu AlZn5.5MgCu”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 275–284.
3. Kuczmarszewski J., Zaleski K. „Obróbka skrawaniem stopów aluminium i magnezu”. Lublin: OWPL, 2015.
4. Burek J., Płodzień M. „Wysoko wydajna obróbka części ze stopów aluminium o złożonych kształtach”. *Mechanik*. 7 (2012): s. 542–549.
5. Kawalec A., Oczko K.E. „Kształtowanie metali lekkich”. Warszawa: PWN, 2012.
6. Izamshah R., Yuhazri M.Y., Hadzley M., Amran M. „Effects of end mill helix angle on accuracy for machining thin-rib aerospace component”. *Applied Mechanics and Materials*. 315 (2013): s. 773–778.
7. Oczko K.E. „Obróbka wysokowydajna – HPC”. *Mechanik*. 11 (2004): s. 701–709.
8. Delio T. „Putting the High in Machining Performance”. *Tooling and Production*. 68, 7 (2002): s. 38–4110.