

# Simulation analysis of the wrap angle in internal corners finishing milling

## Analiza symulacyjna kąta opasania przy frezowaniu wykończeniowym naroży wewnętrznych

JAN BUREK  
RAFAŁ FLEJSZAR\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.11.97>

The simulation of the cutting layer in the CAD system during milling internal corners of elements with complex geometry has been presented. A case of variable cutting width in the finishing process was considered and the strategy of multi-transitional corner milling was analyzed.

KEYWORDS: concave corners, cutting layer analysis, machining strategies

Przedstawiono symulację warstwy skrawanej w systemie CAD podczas frezowania wewnętrznych naroży elementów o skomplikowanej geometrii. Rozpatrywano przypadek zmiennej szerokości skrawania przy obróbce wykończeniowej oraz przeanalizowano strategię wieloprzejściowego frezowania naroży. SŁOWA KLUCZOWE: naroża wklęsłe, analiza warstwy skrawanej, strategię obróbkowe

### Wprowadzenie

Jednym z podstawowych problemów w procesie frezowania jest obróbka wykończeniowa naroży wewnętrznych o małym promieniu zaokrąglenia. Problem ten wynika m.in. z nierównomiernej szerokości skrawania dla ostatniego przejścia wykończeniowego. Jest to uzasadnione względami ekonomicznymi: dużo efektywniejsze jest skrawanie zgrubne materiału frezem o większej średnicy niż frezem do obróbki wykończeniowej. Powoduje to zwiększenie szerokości skrawania, co z kolei skutkuje dużą zmianą kąta opasania frezu (rys. 1) [1, 2, 5].

Zmiana kąta opasania bezpośrednio wpływa na pole przekroju warstwy skrawanej oraz pole powierzchni sty-

ku narzędzia z materiałem obrabianym, a co za tym idzie – na znaczny wzrost sił skrawania. Przy obróbce wykończeniowej może to prowadzić do powstania drgań, które przyczyniają się do istotnego pogorszenia dokładności wykonania elementów. W przypadku użycia do obróbki zgrubnej frezu o dużej średnicy lub wystąpienia kąta ostrego pomiędzy obrabianymi ściankami może się okazać, że frez będzie pracował całym zakresem kąta opasania, a to może spowodować uszkodzenie jego lub elementu obrabianego (rys. 2) [1–3, 6].

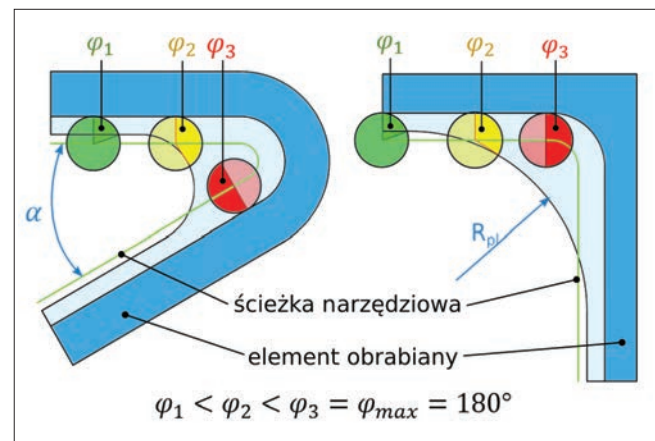


Fig. 2. Impact of the rounding radius of the blank  $R_{pl}$  and the angle of adjacent walls  $\alpha$  of the workpiece on the strategy of single-pass finishing milling

Rys. 2. Wpływ promienia zaokrąglenia półfabrykatu  $R_{pl}$  oraz kąta sąsiednich ścianek  $\alpha$  elementu obrabianego na strategię jednoprzejściowego frezowania wykończeniowego

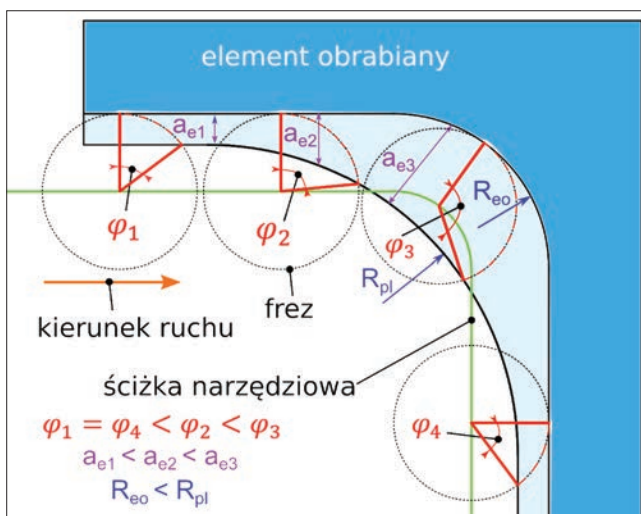


Fig. 1. Changing the wrap angle  $\varphi$  when milling an inner corner with a variable cutting width  $a_e$

Rys. 1. Zmiana kąta opasania frezu  $\varphi$  przy frezowaniu naroża wewnętrznego ze zmienną szerokością skrawania  $a_e$

Aby ograniczyć tego typu problemy, stosuje się:

- zmniejszenie posuwu,
- zmianę narzędzia,
- zwiększenie liczby przejść wykończeniowych.

Modyfikacja posuwu jest najczęściej wybieranym rozwiązaniem, jednak powoduje nie tylko spadek wydajności obróbki, lecz przede wszystkim zmianę warunków skrawania. Producenci narzędzi podają zalecane wartości korekcyjnego posuwu w zależności od geometrii elementu obrabianego oraz kąta opasania frezu, jednak w rzeczywistości parametr ten powinien być sterowany zgodnie ze ściśle określoną funkcją, na co pozwalają jedynie złożone algorytmy matematyczne lub komercyjne programy optymalizacyjne. Dużo rozsądniejsze wydaje się zastosowanie kilku przejść kształtujących przed wykonaniem właściwej obróbki wykończeniowej [4, 6, 7].

Celem badań było przeanalizowanie warstwy skrawanej przy frezowaniu naroży wklęsłych oraz zweryfikowanie wartości kąta opasania dla strategii wieloprzejściowego frezowania wykończeniowego.

\* Dr hab. inż. Jan Burek, prof. PRz, [jburek@prz.edu.pl](mailto:jburek@prz.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0003-2664-5248> – Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Rzeszów, Polska  
Mgr inż. Rafał Flejszar, [r.flejszar@prz.edu.pl](mailto:r.flejszar@prz.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0001-5231-6494> – Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Rzeszów, Polska

## Metoda badań symulacyjnych

Do badań symulacyjnych przygotowano sparametryzowane trójwymiarowe modele półfabrykatu oraz uproszczony model narzędzia. Nie rozpatrywano kąta pochylenia krawędzi skrawającej ani liczby ostrzy frezu, dlatego przyjęto model narzędzia jako walec (rys. 3.)

Zastosowano nadającą się do zaimplementowania w wielu systemach CAD metodykę badań. Model narzędzia przemieszczano o wartość posuwu na obrót –  $f$ , wzdłuż ścieżki narzędziowej, która była krzywą offsetową względem obrabianej krawędzi gotowego elementu.

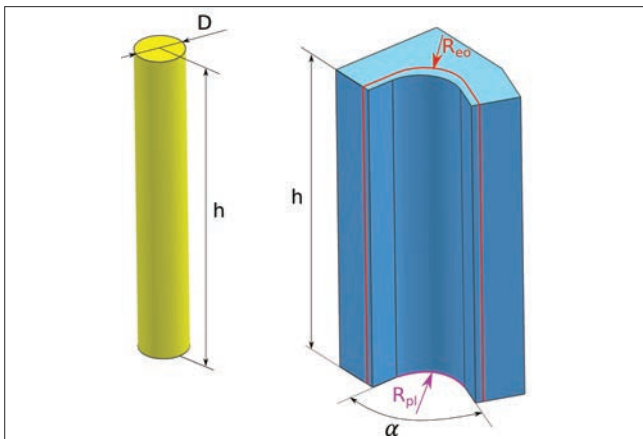


Fig. 3. Parametric models adopted for simulation tests:  $D$  – tool diameter;  $h$  – height of the working part, the tool and the workpiece;  $\alpha$  – angle between adjacent walls of the workpiece;  $R_{pl}$  – radius of the rounding of the blank;  $R_{ee}$  – radius of the rounding of the workpiece

Rys. 3. Modele parametryczne przyjęte do badań symulacyjnych:  $D$  – średnica narzędzia;  $h$  – wysokość części roboczej narzędzia oraz elementu obrabianego;  $\alpha$  – kąt pomiędzy sąsiednimi ściankami elementu obrabianego;  $R_{pl}$  – promień zaokrąglenia półfabrykatu;  $R_{ee}$  – promień zaokrąglenia elementu obrabianego

Posuw przyjęto jako stały względem środka narzędzia. Pierwszym krokiem było stworzenie części wspólnej modelu narzędzia oraz półfabrykatu. Na jej podstawie zmierzono: kąt opasania –  $\varphi$ , pole powierzchni przekroju warstwy skrawanej –  $A$  oraz pole powierzchni styku

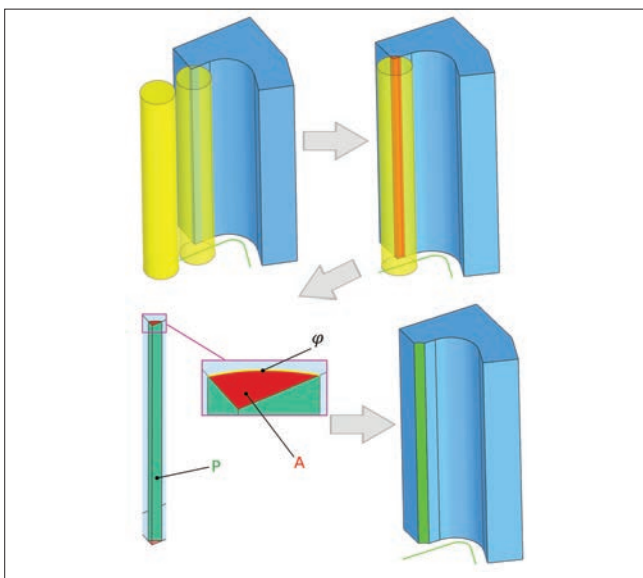


Fig. 4. Scheme of simulation tests with measurement of wrap angle –  $\varphi$ , cross-sectional area of the machined layer –  $A$  and contact area of the tool with the workpiece –  $P$

Rys. 4. Schemat badań symulacyjnych wraz z pomiarem kąta opasania –  $\varphi$ , pola powierzchni przekroju warstwy skrawanej –  $A$  oraz pola powierzchni styku narzędzia z materiałem obrabianym –  $P$

narzędzia z elementem obrabianym –  $P$ . Następnie odjęto bryłę tworzącą część wspólną od półfabrykatu. Operacje te wykonano w tylu krokach iteracyjnych, aby otrzymać gotowy wyrób (rys. 4) [1, 2].

## Strategia wieloprześciowa

Dla uproszczenia rozpatrywano strategię wieloprześciową tylko z dwoma ścieżkami. Ścieżki narzędziowe w strategii wieloprześciowej są zwykle generowane na podstawie krzywych offsetowych od krawędzi przedmiotu obrabianego, w analogiczny sposób jak tradycyjne ścieżki narzędziowe (rys. 5a). Strategie te są bardzo proste do zaimplementowania w dowolnym układzie sterowania, bez stosowania specjalistycznych środowisk CAD/CAM. To rozwiązanie całkowicie niweluje problem zmiany szerokości skrawania, jednak nadal występuje zwiększony kąt opasania w narożach. Aby zminimalizować ten efekt, można zastosować mniejszy promień zaokrąglenia, powstały w wyniku pierwszego przejścia wykończeniowego. Trzeba przyjąć inny promień, niż wynika z promienia ścieżki offsetowej. W ostatnim przejściu można uzyskać najmniejszy naddatek, jeśli w przejściach poprzedzających zastosuje się jak najmniejszy promień – równy promieniowi narzędzia (rys. 5b). Pojawia się jednak wówczas problem występowania ostrego naroża na ścieżce dla przejść poprzedzających przejście wykończeniowe [4, 6, 7].

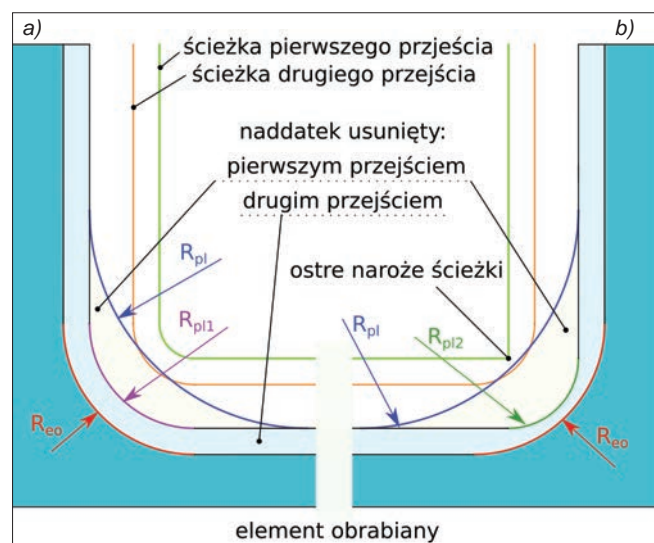


Fig. 5. Diagram of multi-pass strategies: a) strategy A – with constant cutting width; b) strategy B – with variable cutting width, where:  $R_{pl1}$  – rounding of the blank for the finishing pass of strategy A,  $R_{pl2}$  – rounding of the blank for the finishing pass of strategy B

Rys. 5. Schemat strategii wieloprześciowych: a) strategia A – ze stałą szerokością skrawania; b) strategia B – ze zmienną szerokością skrawania, gdzie:  $R_{pl1}$  – zaokrąglenie półfabrykatu dla przejścia wykończeniowego w strategii A,  $R_{pl2}$  – zaokrąglenie półfabrykatu dla przejścia wykończeniowego w strategii B

## Wyniki badań

Przeprowadzono serię badań symulacyjnych dla zmiennego promienia półfabrykatu –  $R_{pl}$  oraz zmiennego kąta pomiędzy ściankami elementu obrabianego –  $\alpha$ . Przyjęto stałe wartości:  $f = 0,5$  mm/obr,  $a = 1$  mm,  $D = 6$  mm,  $R_{ee} = 5$  mm,  $h = 30$  mm. Wszystkie trzy mierzone wartości: kąt opasania –  $\varphi$ , pole przekroju warstwy skrawanej –  $A$  oraz pole powierzchni styku narzędzia z materiałem obrabianym –  $P$ , miały identyczne przebiegi i różniły się jedynie wartościami i jednostkami, dlatego przedstawiono tylko wartości kąta opasania frezu (rys. 6).

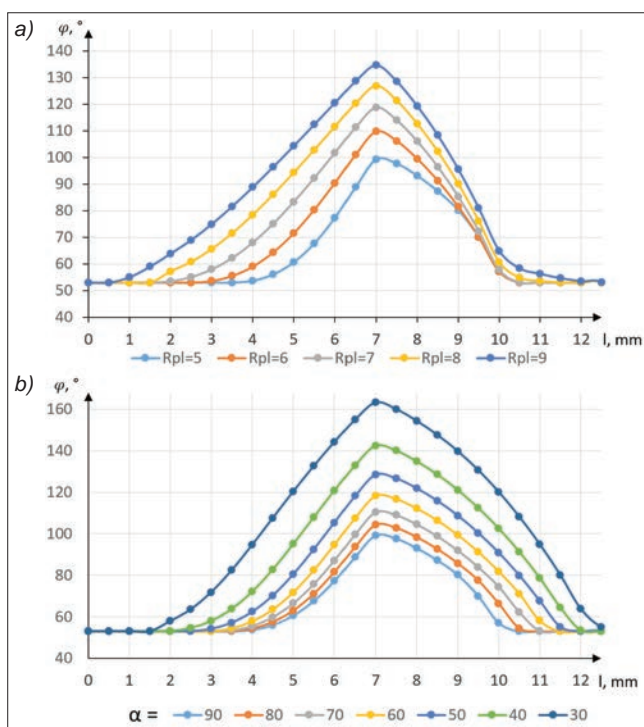


Fig. 6. Change of wrap angle  $\varphi$  depending on the traveled distance of the tool  $l$  for: a) for a variable radius of the blank  $R_{pl}$  and a constant  $\alpha = 90^\circ$ , b) for a variable angle of inclination between the walls  $\alpha$  and fixed radius of the blank  $R_{pl} = 5$  mm

Rys. 6. Zmiana kąta opasania  $\varphi$  w zależności od przebytej drogi narzędzia  $l$  dla: a) dla zmiennego promienia półfabrykatu  $R_{pl}$  i stałego  $\alpha = 90^\circ$ , b) dla zmiennego kąta pochylenia pomiędzy ściankami elementu  $\alpha$  i stałego  $R_{pl} = 5$  mm

Widoczny jest wzrost kąta opasania przy wzroście promienia zaokrąglenia półfabrykatu. Zwiększenie zaokrąglenia z 5 do 9 mm powoduje wzrost wartości kąta opasania o 35%. Analogicznie – jednak z innym przebiegiem – można zauważyć wzrost kąta opasania wraz ze zmniejszaniem kąta pomiędzy ściankami modelu. Warto zauważyć, że zmniejszenie kąta pomiędzy ściankami elementu obrabianego z  $90^\circ$  do  $80^\circ$  powoduje zmianę kąta opasania frezu o ok.  $4^\circ$ , w przypadku gdy zmiana kąta ścianek elementu z  $40^\circ$  do  $30^\circ$  spowodowałby wzrost kąta opasania aż o  $20^\circ$ .

Aby przeanalizować strategię wieloprześciową, założono stałe parametry:  $f = 0,5$  mm/obr,  $D = 6$  mm,  $R_{pl} = 7$  mm,  $R_{eo} = 5$  mm,  $\alpha = 90^\circ$ . Zastosowano dwa przejścia oraz przetestowano dwie strategie (A i B) (rys. 7).

Można stwierdzić, że nie każdy sposób modyfikacji przyniesie pożądany rezultat. W przypadku strategii A widać dość wysoki chwilowy wzrost kąta opasania przy pierwszym przejściu, a w przypadku strategii B skok ten

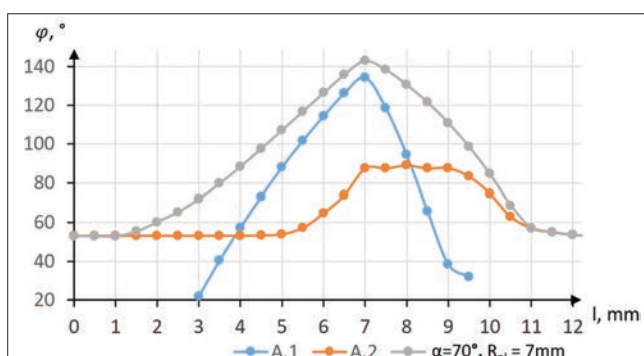


Fig. 7. Change in wrap angle  $\varphi$  depending on the tool path  $l$  traveled for A and B strategies

Rys. 7. Zmiana kąta opasania  $\varphi$  w zależności od przebytej drogi narzędzia  $l$  dla strategii A oraz B

jest większy niż pierwotnie występujący w strategii jednoprześciowej. Taki wzrost jest spowodowany ostrym narożem ścieżki narzędziowej – w momencie jego osiągnięcia narzędzie ma maksymalny możliwy kąt opasania. Przejście wykończeniowe w obu przypadkach wykazało spadek kąta opasania w stosunku do strategii jednoprześciowej rzędu 25%. Dla strategii B – mimo że mierzona wartość maksymalna jest prawie identyczna jak w strategii A – maksymalny kąt opasania pozwala uzyskać prawie o połowę krótszy czas obróbki. Może mieć to duże znaczenie, gdy liczy się osiągnięcie jak najlepszej jakości powierzchni obrabianego elementu.

Zweryfikowano również, czy strategie wieloprześciowe działają w podobny sposób dla elementu o bardziej skomplikowanej geometrii. Wybrano strategię A jako bardziej stabilną oraz założono kąt pomiędzy ściankami elementu obrabianego  $\alpha = 70^\circ$  (rys. 8).

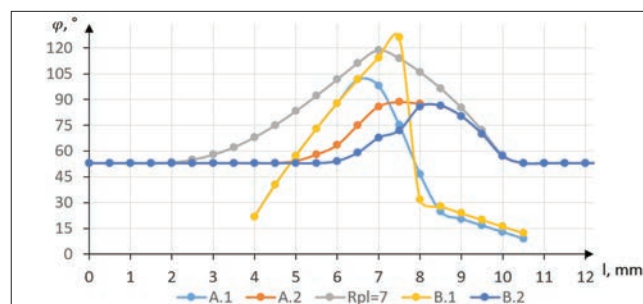


Fig. 8. Simulation results using a multi-pass strategy A for a workpiece with an acute angle  $\alpha = 70^\circ$

Rys. 8. Wyniki symulacji z zastosowaniem strategii wieloprześciowej A dla przedmiotu obrabianego z kątem ostrym  $\alpha = 70^\circ$

## Wnioski

Z analizy wynika, że kąt opasania narzędzia przy frezowaniu naroży wewnętrznych można zmniejszyć na kilka sposobów. Uzyskane charakterystyki potwierdzają możliwość otrzymania znacznie mniejszego kąta opasania dla przejścia wykończeniowego również w przypadku, gdy kąt pomiędzy ściankami elementu obrabianego jest mniejszy niż  $90^\circ$ . Jeżeli konieczne jest zmniejszenie kąta opasania w pierwszym przejściu (kształtującym), należy zmienić narzędzie lub zmodyfikować posuw.

Zaprezentowane strategie wieloprześciowe mają charakter uniwersalny – mogą być łatwo zaprogramowane w układzie sterowania obrabiarki, nawet bez specjalistycznego oprogramowania CAD/CAM.

## LITERATURA

- [1] Boz Y., Erdim H., Lazoglu I. "A comparison of solid model and three-orthogonal dexelfield methods for cutter-workpiece engagement calculations in three- and five-axis virtual milling". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 81, 5–8 (2015): 811–823, <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7251-7>.
- [2] Burek J., Flejszar R. „Analiza warstwy skrawanej w obróbce elementów cienkościennych o złożonej geometrii”. *Mechanik*. 8–9 (2018): 778–780, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.132>.
- [3] Han X., Tang L. "Precise prediction of forces in milling circular corners". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 88 (2015): 184–193, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2014.09.004>.
- [4] Sui S., Li Y., Shao W., Feng P. "Tool path generation and optimization method for pocket flank milling of aircraft structural parts based on the constraints of cutting force and dynamic characteristics of machine tools". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 85, 5–8 (2016): 1553–1564, <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8050-x>.
- [5] Yue C., Liu X., Ding Y., Liang S.Y. "Off-line error compensation in corner milling process". *Journal of Engineering Manufacture*. 232 (2016): 1172–1181, <https://doi.org/10.1177/0954405416666901>.
- [6] Sandvik Coromant. „Milling – good practice. Setting solid foundations”. Application Guide (2015).
- [7] Dokumentacja systemu NX 11.