

Wyznaczanie oporów skrawania w procesie frezowania konwencjonalnego i trochoidalnego

Determination of cutting resistance in the process conventional and trochoidal milling

GRZEGORZ SKORULSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.149>

Wyznaczono oraz przeanalizowano opory skrawania w procesie konwencjonalnego i trochoidalnego frezowania stopu aluminium 2017. Opracowano strategię obróbki i wytyczne do badań oraz zaprezentowano możliwość wykorzystania platformy pomiarowej bazującej na elementach tensometrii oporowej. Przedstawiono analizę wyników obejmujących rozkład składowych sił skrawania w procesach frezowania konwencjonalnego i trochoidalnego, realizowanych przy tych samych parametrach skrawania i tymi samymi narzędziami. Podjęto próbę interpretacji wyników.

SŁOWA KLUCZOWE: frezowanie, siły skrawania, platforma pomiarowa, frezowanie trochoidalne

Cutting forces in the process of conventional and trochoidal milling of aluminum 2017 alloy were determined and analyzed. A machining strategy, testing guidelines and the possibility of using a measuring platform based on resistance tensometry elements were developed. The paper also presents an analysis of the results concerning the distribution of the cutting forces in the processes of conventional and trochoidal milling, carried out with the same cutting parameters and tools. An attempt was made to interpret the results.

KEYWORDS: milling, cutting forces, measuring platform, trochoidal milling

Każdy proces skrawania, w tym frezowanie, wymaga użycia siły niezbędnej do odkształcenia warstwy skrawanej, oddzielenia jej od materiału w postaci wióra, odkształcenia tego wióra oraz pokonania oporów tarcia występujących głównie między narzędziem a obrabianym materiałem [1, 2].

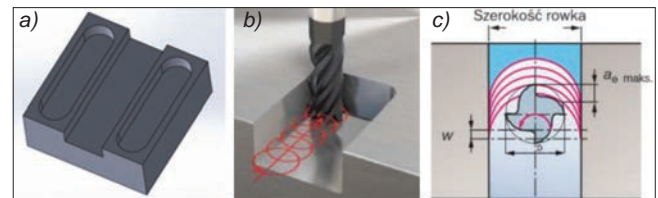
Frezowanie konwencjonalne coraz częściej zastępuje się metodami wysoko wydajnymi. Stało się to możliwe w wyniku rozwoju obrabiarek oraz programowania obróbki w systemach CAD/CAM. Można tu wyróżnić frezowanie trochoidalne TPC (*trochoidal performance cutting*), zaliczane do strategii HSM (*high speed machining*) [6]. Nie jest to związane z podobnymi parametrami obróbki, gdyż te są inne, ale z łagodnymi ruchami narzędzia i wysoką wydajnością objętościową obróbki [7]. Do zalet tej metody zalicza się możliwość obróbki elementów cienkościennych oraz korzystny układ składowych sił skrawania ze względu na duże głębokości warstw skrawanych [5]. Dodatkowo technologia ta jest stosowana przy obróbce stopów w stanie utwardzonym [9, 11].

Poznanie charakteru i rozkładu sił skrawania podczas procesu jest niezbędne do oceny obciążenia narzędzia. Ta wiedza będzie przydatna dla technologów oraz operatorów obrabiarek sterowanych numerycznie; pozwoli im tak sterować parametrami pracy, by skrócić czasy obróbki bez gwałtownego wzrostu działających sił [3, 4].

W oparciu o znajomość wartości i kierunku działania całkowitej siły skrawania można przeciwdziałać sytuacjom krytycznym związanym z wytrzymałością narzędzia. Porównanie rzeczywistych rozkładów składowych sił skrawania przy frezowaniu konwencjonalnym i trochoidalnym pozwala na ocenę przydatności tych metod do takich zadań obróbkowych, w których niewłaściwy dobór parametrów technologicznych może doprowadzić do uszkodzenia przedmiotu lub narzędzia (w przypadku przedmiotów wiotkich, małych sił mocowania w uchwycie).

Założenia wstępne i przygotowanie badań

Do obróbki zaprojektowano kostkę (rys. 1) o wymiarach 50 mm × 50 mm × 20 mm (dł. × szer. × gr.). Na środku detalu znajduje się kieszeń otwarta o szerokości 16 mm i głębokości 6 mm, a po obu jej stronach są rowki – 44,5 mm × 12 mm × 4 mm (dł. × szer. × gł.). Kostkę wykonano ze stopu aluminium PA6 (2017) o twardości w granicach 101÷110 HB.



Rys. 1. Element obrabiany: a) widoczna kieszeń otwarta i dwa rowki, b) fragment trajektorii narzędzia, c) schemat nastawianych parametrów frezowania trochoidalnego [7]

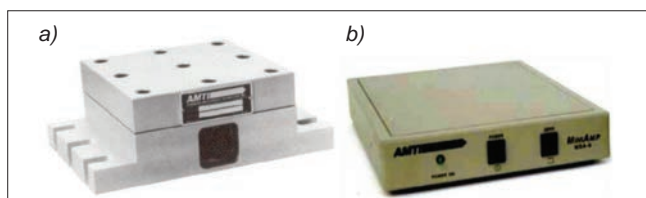
Podczas programowania w systemie CAM obróbki trochoidalnej definiuje się dwa parametry. Zgodnie z rys. 1c dobrano wstępnie maksymalną szerokość warstwy skrawanej: $a_{e \max} = 4$ mm oraz skok narzędzia: $w = 0,8$ mm.

Platforma pomiarowa

Platforma pomiarowa MC6 służy do pomiaru sił w płaszczyznach prostopadłych oraz składowych momentu skręcającego [5]. W jej budowie wykorzystano czujniki tensometryczne mocowane na konstrukcji zapewniającej wysoką sztywność, czułość oraz powtarzalność pomiarów. Konstrukcja przetworników zapewnia stabilność i znikomy wzajemny wpływ mierzonych wielkości. Rozwiązanie jest chronione patentem: U.S. Patent #4493220.

Obudowa jest wykonana w wersji wodo- i olejoszczelnej. Platforma pomiarowa jest stosowana tam, gdzie zachodzi konieczność jednoczesnego rejestrowania kilku wielkości sił i momentów lub pomiarów zmian ich wartości i zwrotu. Wykorzystana w badaniach platforma ma sześcioramienną konstrukcję odpowiadającą siłom F_x , F_y , F_z oraz momentom M_x , M_y , M_z [5]. Wyposażenie stanowiska pokazano na rys. 2.

* Dr inż. Grzegorz Skorulski (g.skorulski@pb.edu.pl) – Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej



Rys. 2. Wyposażenie stanowiska pomiarowego: a) platforma pomiarowa AMTI MC6-6-4000, b) wzmacniacz pomiarowy MiniAmp MSA-6

Dzięki wyświetlaniu przez dedykowane oprogramowanie NetForce wartości w czasie rzeczywistym możliwe jest bieżące monitorowanie danych pochodzących z wieloosiowych czujników siły [10]. Jest to funkcja bliźniaczo podobna w działaniu do oscyloskopu, ale zamiast sygnałów elektrycznych wyświetlane są dane wyjściowe z przetwornika (np. wzmacniacza). W momencie przykładania siły lub obciążenia do czujnika (lub platformy), zmiana wartości zostanie pokazana w oknie sygnału rzeczywistego oprogramowania NetForce [4].

Badania

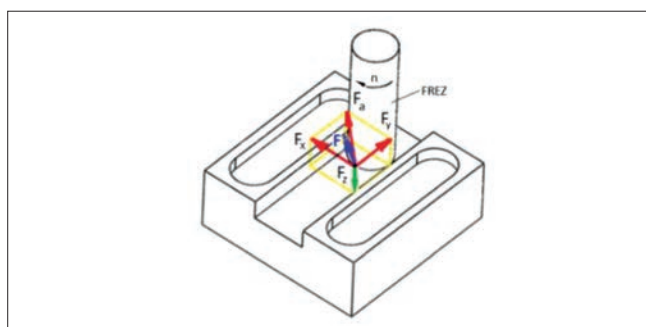
Do obróbki kieszeni otwartej o szerokości 16 mm użyto frezu walcowo-czołowego $\varnothing 12$ mm. Dobrano następujące parametry:

- prędkość posuwu $v_f = 500$ mm/min,
- obroty wrzeciona $n = 4509$ obr/min,
- głębokość skrawania $a_p = 3$ mm.

Rowki wykonano frezem walcowo-czołowym o średnicy $\varnothing 8$ mm przy parametrach:

- prędkość posuwu $v_f = 450$ mm/min,
- obroty wrzeciona $n = 5570$ obr/min,
- głębokość skrawania $a_p = 2$ mm.

Na stole obrabiarki zamontowano platformę z imadłem maszynowym (rys. 2). Sygnał z platformy był przekazywany przez wzmacniacz do komputera stacjonarnego. Wyniki pomiarów zostały zapisane w plikach tekstowych. Z otrzymanych, uśrednionych na podstawie 15 punktów, maksymalnych wartości sił została obliczona (zgodnie z rys. 3) siła czynna skrawania F_a , zmierzona siła $F_p = F_z$ oraz obliczona całkowita siła skrawania F .

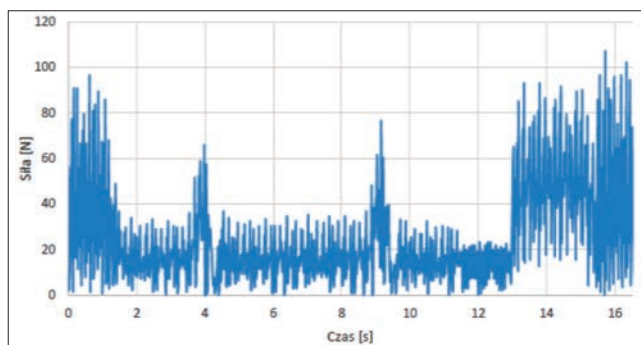


Rys. 3. Schemat składowych wyznaczanej siły skrawania

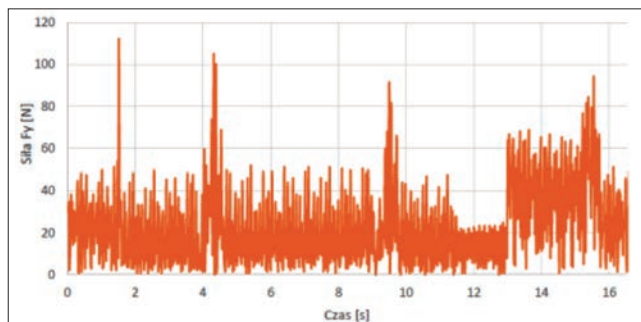
Wyniki badań

Wyniki w postaci plików tekstowych zostały przekształcone w Excelu w wykresy składowych sił skrawania, uzyskane dla frezowania obiema metodami obróbkowymi, z zastosowaniem tych samych narzędzi i tych samych parametrów obróbki.

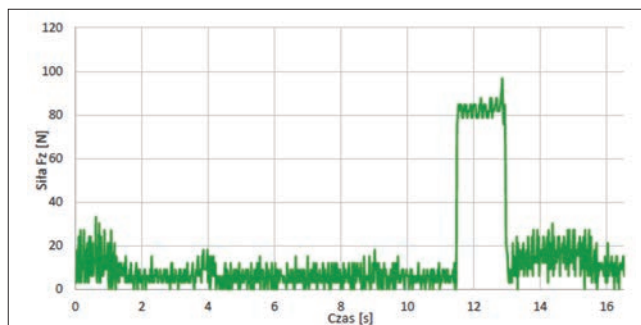
Przykładowe wyniki odnośnie do rejestrowanych sił skrawania przy frezowaniu rowków frezem walcowo-czołowym, $\varnothing 8$ mm, metodą konwencjonalną zaprezentowano na rys. 4–6, a metodą trochoidalną – na rys. 7–9.



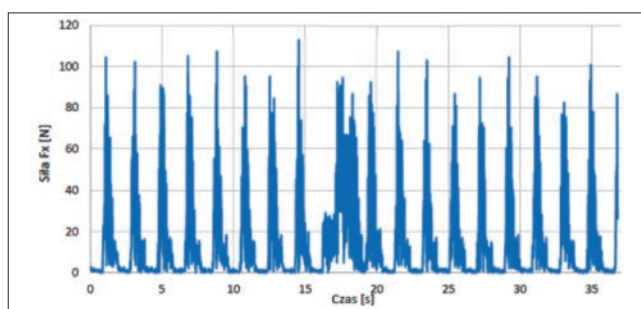
Rys. 4. Wykres składowej siły F_x przy frezowaniu rowka metodą konwencjonalną



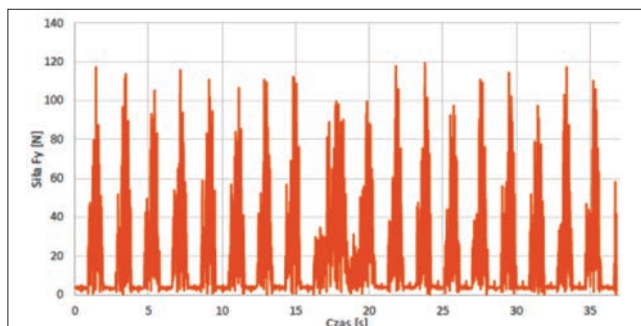
Rys. 5. Wykres składowej siły F_y przy frezowaniu rowka metodą konwencjonalną



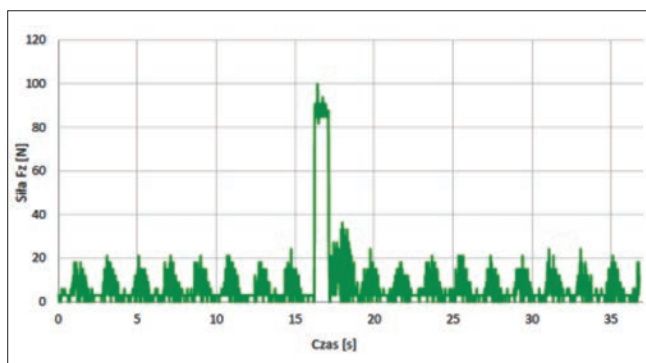
Rys. 6. Wykres składowej siły F_z przy frezowaniu rowka metodą konwencjonalną



Rys. 7. Wykres składowej siły F_x przy frezowaniu rowka metodą trochoidalną

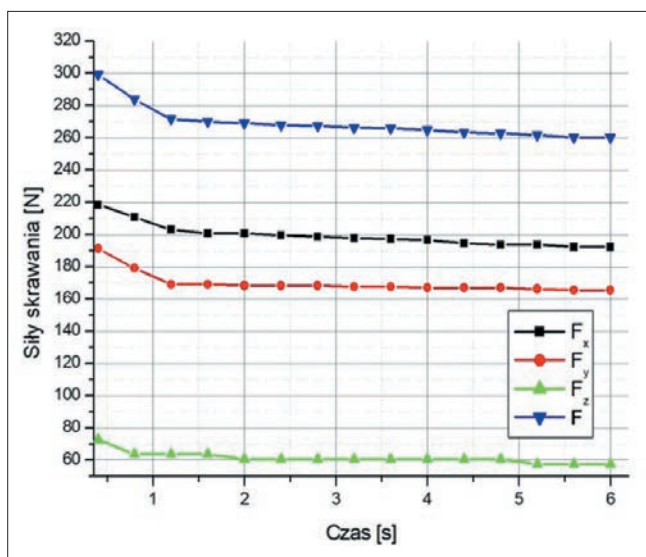


Rys. 8. Wykres składowej siły F_y przy frezowaniu rowka metodą trochoidalną



Rys. 9. Wykres składowej siły F_z przy frezowaniu rowka metodą trochoidalną

Widoczne na wykresach gwałtowne zmiany mierzonych sił są spowodowane zmianami geometrii warstwy skrawanej (rys. 4, 5) oraz ruchem narzędzia z posuwem wgłębnym przy rozpoczęciu frezowania rowków (rys. 6 i 9). Jak wspomniano, w zakresie ustalonym procesu frezowania wybrano 15 punktów pomiarowych dla maksymalnych wartości poszczególnych składowych. Pokazano to na rys. 10; znajdują się tam dodatkowo obliczone analitycznie wartości całkowitej siły skrawania F .



Rys. 10. Wykresy składowych i całkowitej siły skrawania F na podstawie 15 punktów pomiarowych

Wnioski

W oparciu o wykresy sił skrawania można sformułować następujące wnioski:

- dobór 10 lub 15 punktów pomiarowych jest wystarczający do oszacowania maksymalnych wartości sił składowych i pozwala na wyznaczenie średniej wartości całkowitej siły skrawania,
- przy tych samych parametrach obróbki i z użyciem tych samych narzędzi średnie całkowite siły skrawania w obróbce konwencjonalnej zarówno kieszeni otwartej, jak i rowka wynosiły: 268 N oraz 129 N i były niższe niż siły uzyskane podczas frezowania trochoidalnego, które wynosiły: 307 N i 154 N,
- porównano dwie metody obróbki, analizując chwilowe siły maksymalne; inna interpretacja powoduje obniżenie ich wartości przez okresy braku kontaktu narzędzia z materiałem obrabianym, gdy siły są bliskie 0,

- przy tych samych parametrach obróbkowych czas frezowania trochoidalnego był trzykrotnie dłuższy od czasu obróbki konwencjonalnej trwającej 2 min 51 s – jest to spowodowane różnicą w długości toru ruchu narzędzia,
- można znacznie skrócić obróbkę trochoidalną poprzez zwiększenie głębokości skrawania a_p do wartości ok. 1,5 średnicy narzędzia; wówczas jednak nie byłoby możliwe porównanie obu procesów,
- gwałtowne przyrosty mierzonych składowych, występujące w obróbce konwencjonalnej podczas zmian geometrii warstwy skrawanej, są niwelowane w obróbce trochoidalnej – należy to uznać za zaletę tej metody (mniejsze prawdopodobieństwo występowania drgań),
- systemy CAD/CAM pozwalają na zaprojektowanie obróbki w taki sposób, aby uniknąć deformacji cienkiej ścianki obrabianego przedmiotu. W tym celu należy pozostawić po obróbce zgrubnej dość duży naddatek. Przystępując do obróbki wykończeniowej, należy zmniejszyć głębokość i szerokość skrawania, a także prowadzić narzędzie po łuku, stycznie do obrabianego profilu, co powoduje łagodne narastanie sił,
- w przypadku jednakowych parametrów frezowania konwencjonalnego i trochoidalnego nie występują znaczące różnice w oporach skrawania. Może to być spowodowane parametrami technologicznymi, ustawionymi w systemie CAM. Dwa najważniejsze spośród nich to: maksymalna szerokość warstwy skrawanej (4 mm) oraz promień zależny od szerokości kieszeni – rowka (2 mm).

Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że zaprezentowana metoda pomiarów z wykorzystaniem platformy pomiarowej, mimo konieczności zastosowania specjalistycznego sprzętu, daje dobre rezultaty, jest szybka i czytelna dla użytkownika. Do jej zalet można zaliczyć także dużą funkcjonalność i możliwość przystosowania praktycznie do każdego rodzaju zabiegu obróbkowego.

LITERATURA

1. Montgomery D., Altintas Y. "Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling". *J. Eng. Ind.* 113, 2 (1991): s. 160–168.
2. Olszak W. „Obróbka skrawaniem”. Warszawa: WNT, 2009.
3. Rauch M., Duc E. Hascoet J.Y. "Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modeling". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 49, 5 (2009): s. 375–383.
4. Stós J. „Obróbka skrawaniem w praktyce: poradnik inżyniera, konstruktora i mechanika”. Warszawa: Wydawnictwo Verlag Dashöfer, 2008.
5. Katalogi firmy Advanced Mechanical Technology, Inc. 176 Waltham Street, Watertown, MA 02472–4800, USA.
6. Otkur M., Lazoglu I. "Trochoidal milling". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 47, 9 (2007): s. 1324–1332.
7. Waszczuk K., Socha K. „Frezowanie trochoidalne – sposób obróbki ubytkowej materiałów w stanie utwardzonym”. Interdyscyplinarność badań naukowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej (2015): s. 247–256.
8. SANDVIK. „Przewodnik po zastosowaniach. Superstopy zarodoporne”. 2015.
9. Kosmol J. „Programowanie obrabiarek sterowanych numerycznie”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.
10. Józwiak J., Kobyłka M. „Badanie wpływu parametrów geometrycznych kieszeni prostokątnej oraz warunków realizacji procesu skrawania na drgania podczas frezowania trochoidalnego”. *Postępy Nauki i Techniki*. 8 (2011): s. 37–43.
11. Skorulski G. „Platforma pomiarowa do wyznaczania oporów skrawania”. *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna*. 19, 2 (2014): s. 155–162.
12. Zalewski A. „Obróbka trochoidalna na frezarkach CNC”. *Mechanik*. 4 (2007): s. 303–304.