

# Analiza sił skrawania przy frezowaniu współbieżnym i przeciwbieżnym odlewniczego stopu aluminium EN AC-AISi10Mg

Analysis of cutting forces during in-cut and out-cut milling of EN AC-AISi10Mg cast aluminum alloy

JÓZEF KUCZMASZEWSKI  
PAWEŁ PIEŚKO  
MAGDALENA ZAWADA-MICHAŁOWSKA\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.148>

Przeanalizowano siły skrawania przy frezowaniu współbieżnym i przeciwbieżnym odlewniczego stopu aluminium AISi10Mg. Badania obejmowały pomiar składowych  $F_f$ ,  $F_p$  i  $F_c$  (odpowiednio:  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) siły skrawania oraz wyznaczenie ich amplitud przy stałej wartości posuwu na ostrze  $f_z$  oraz przyjętych zmiennych parametrach technologicznych, tj.: głębokości skrawania  $a_p$ , szerokości frezowania  $a_e$  oraz prędkości skrawania  $v_c$ . Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wraz ze wzrostem głębokości skrawania i szerokości frezowania wartości wybranych składowych i ich amplitudy rosną zarówno dla frezowania współbieżnego, jak i przeciwbieżnego. Przy wzroście prędkości skrawania zaobserwowano, że składowe całkowitej siły skrawania rosną do prędkości  $v_c = 450$  m/min, następnie ich wartości zaczynają spadać. Jest to związane z przejściem z obróbki konwencjonalnej w zakres *high speed cutting*. Warto podkreślić, że w przypadku frezowania przeciwbieżnego odnotowano wyższe wartości sił skrawania niż dla frezowania współbieżnego.

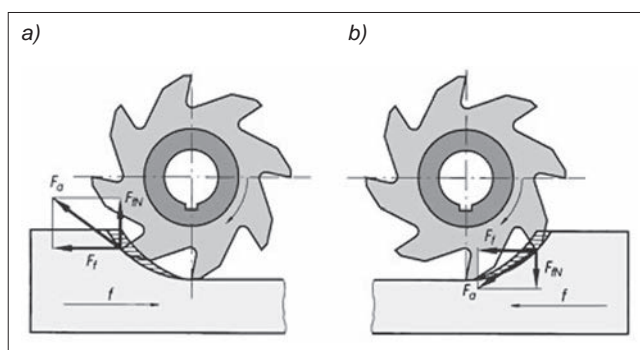
**SŁOWA KLUCZOWE:** frezowanie, siły skrawania, stop aluminium, parametry technologiczne

*The analysis of cutting forces during in-cut and out-cut milling of EN AC-AISi10Mg cast aluminum alloy was presented. The research included measurement of the components of the total cutting force:  $F_f$ ,  $F_p$  and  $F_c$  ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  respectively) and determination of their amplitudes at a constant feed per tooth value and the adopted variable technological parameters, i.e.: depth of cut  $a_p$ , milling width  $a_e$  and cutting speed  $v_c$ . Based on the obtained results, it was found that along with the increase in the depth of cut and the milling width, the values of selected components and their amplitudes increase for both in-cut and out-cut milling. During rise of cutting speed, it was observed that the components of the total cutting force increase to the speed  $v_c = 450$  m/min, then their values begin to decrease. This is related to the transition from conventional machining to the range of High Speed Cutting. It is important that higher values of cutting forces were noted in the case of out-cut milling instead of in-cut milling.*

**KEYWORDS:** milling, cutting forces, aluminium alloy, technological parameters.

Frezowanie jest dynamicznie rozwijającą się metodą obróbki skrawaniem. Ze względu na kinematykę procesu dzieli się ono na [3, 7, 8]:

- frezowanie przeciwbieżne (rys. 1a) – kierunki prędkości stycznej frezu i posuwu przedmiotu są przeciwne,



Rys. 1. Frezowanie: a) przeciwbieżne, b) współbieżne [3, 7]

- frezowanie współbieżne (rys. 1b) – kierunki prędkości stycznej frezu i posuwu przedmiotu są zgodne.

Podczas frezowania przeciwbieżnego (rys. 1a) warstwa skrawana na początku zagłębiania się ostrza w materiał rośnie od zera i na końcu osiąga maksimum. Skutkuje to tym, że opór skrawania jest najmniejszy w momencie rozpoczęcia przez ostrze pracy, a największy – w chwili jej zakończenia. Należy jednak podkreślić, że w trakcie frezowania przeciwbieżnego krawędź skrawająca zużywa się szybciej, ponieważ następuje intensyfikacja procesu tarcia, powodująca również pogorszenie jakości powierzchni obrobionej w porównaniu z frezowaniem współbieżnym. Negatywnym zjawiskiem jest gromadzenie się przed narzędziem powstających w trakcie procesu wiórów, które zalepiają rowki i znacząco utrudniają chłodzenie [3, 7, 8].

Przy frezowaniu współbieżnym (rys. 1b) warstwa skrawana jest najgrubsza na początku pracy ostrza, następnie maleje. Podobnie jest z oporami skrawania. Dodatkowo nie występuje zjawisko tarcia krawędzi skrawającej o powierzchnię obrobioną przed rozpoczęciem skrawania. Trwałość ostrzy frezu i wydajność procesu jest więc większa. Lepsza jest również jakość uzyskanych powierzchni ze względu na ułatwione odprowadzanie wiórów ze strefy obróbki [3, 7, 8].

Obróbka skrawaniem jest złożonym procesem fizycznym, podczas którego występuje wiele zjawisk, takich jak [2–5, 8]:

- powstawanie naprężeń powodujących odkształcenia sprężyste oraz plastyczne,
- tarcie wewnętrzne w odkształcanych warstwach materiału oraz tarcie zewnętrzne pomiędzy wiórami a powierzchnią natarcia, a także powierzchni przyłożenia o przedmiot obrabiany,
- powstawanie i rozchodzenie się ciepła, które zmienia właściwości materiału obrabianego i w pewnym stopniu również narzędzia,

\* Prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski (j.kuczmaszewski@pollub.pl), dr inż. Paweł Pieśko (p.piesko@pollub.pl), mgr inż. Magdalena Zawada-Michałowska (m.michalowska@pollub.pl) – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej

- zużywanie się ostrza, powodujące zmianę jego warunków pracy.

Te zjawiska są ze sobą ściśle powiązane i wzajemnie na siebie oddziałują. Badanie ich jest jednak znacznie utrudnione, m.in. ze względu na wysoką temperaturę [2, 4, 5].

Na każdą powierzchnię roboczą ostrza biorącą udział w procesie skrawania działają siły, które są wypadkowymi nacisku (siła normalna) oraz tarcia (siła styczna). Całkowita siła skrawania  $F$  jest przestrzennie usytuowana, powoduje oddzielenie naddatku od materiału, pokonuje jego siły spójności oraz opory tarcia występujące pomiędzy narzędziem, materiałem i wiórem, w określonych warunkach obróbki. Jest ona wypadkową trzech wektorów składowych działających wzdłuż linii wyznaczonych przez układ odniesienia (obrabiarka–przedmiot–narzędzie) [3, 4, 7]:

$$\vec{F} = \vec{F}_c + \vec{F}_f + \vec{F}_p$$

gdzie:  $\vec{F}_c$  – składowa obwodowa;  $\vec{F}_f$  – składowa posuwowa;  $\vec{F}_p$  – składowa odporowa.

Wartość siły skrawania zależy od wielu czynników, m.in. pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej oraz właściwości mechanicznych obrabianego materiału, dlatego może się zmieniać w szerokim zakresie [1, 6, 8].

## Metodyka badań

Celem pracy było określenie wpływu frezowania współbieżnego i przeciwbieżnego odlewniczego stopu aluminium EN AC-AISi10Mg na siły skrawania i ich amplitudy. Skład chemiczny stopu przedstawiono w tabl. I. Jest on szeroko stosowany w odlewach charakteryzujących się skomplikowanymi kształtami i wysoką wytrzymałością.

TABLICA I. Skład chemiczny stopu EN AC-AISi10Mg

Stężenie pierwiastków, %										
Si	Cu	Mg	Mn	Cr	Fe	Ti	Zn	Ni	Pb	Al
10	≤ 0,05	0,33	≤ 0,45	≤ 0,1	≤ 0,55	≤ 0,15	≤ 0,1	≤ 0,55	≤ 0,55	Reszta

Frezowanie prostopadłościennych próbek wykonano na pionowym centrum obróbkowym Avia VMC 800HS. Zastosowano sześć węglkowych, dwuostrzowych frezów trzpieniowych o średnicy  $\varnothing 12$  mm firmy Sandvik (symbol: R216.32-12030-AC22A H10F). W trakcie badań monitorowano stan zużycia ostrzy skrawających.

Stanowisko do pomiaru składowych sił skrawania składało się z:

- siłomierza piezoelektrycznego 9257B firmy Kistler,
- czterokanałowego wzmacniacza ładunku,
- modułu DAQ z wbudowaną kartą A/D,
- specjalistycznego oprogramowania pozwalającego na akwizycję i analizę danych.

W pierwszej kolejności przeprowadzono pomiary składowych sił skrawania  $F_x$  ( $F_f$ ),  $F_y$  ( $F_p$ ) oraz  $F_z$  ( $F_c$ ) dla frezowania współbieżnego oraz przeciwbieżnego. Dobrano następujące wartości parametrów technologicznych: szerokość frezowania  $a_e = 2$  mm, posuw  $f_z = 0,025$  mm/ostrze, prędkość obrotowa  $n = 8000$  obr/min oraz wynikająca stąd prędkość skrawania  $v_c = 301$  m/min i sześć różnych głębokości skrawania (tabl. II). Z danego przedziału wybrano 10 najwyższych wartości siły oraz obliczono średnią.

W drugiej części eksperymentu zmierzono również trzy składowe całkowitej siły skrawania, przyjmując jako parametry stałe: głębokość skrawania  $a_p = 2$  mm, posuw na ostrze  $f_z = 0,025$  mm/ostrze i prędkość obrotowa  $n = 8000$  obr/min (tabl. III).

TABLICA II. Parametry technologiczne – pierwsza część eksperymentu

Nr próby	Parametr zmienny: głębokość skrawania $a_p$ , mm	Parametry stałe: posuw na ostrze, szerokość frezowania, prędkość obrotowa
1	2	$f_z = 0,025$ mm/ostrze $a_e = 2$ mm $n = 8000$ obr/min
2	4	
3	6	
4	8	
5	10	
6	12	

TABLICA III. Parametry technologiczne – druga część eksperymentu

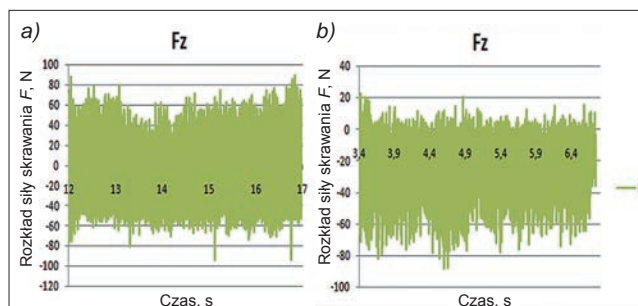
Nr próby	Parametr zmienny: szerokość frezowania $a_e$ , mm	Parametry stałe: posuw na ostrze, głębokość skrawania, prędkość obrotowa
1	2	$f_z = 0,025$ mm/ostrze $a_p = 2$ mm $n = 8000$ obr/min
2	4	
3	6	
4	8	
5	10	
6	12	

Trzeci etap badań obejmował pomiar składowych sił skrawania dla pięciu prędkości skrawania  $v_c = 151$ ; 301; 454; 754 i 904 m/min, przy stałych parametrach, tj.: szerokości frezowania  $a_e = 2$  mm, posuwie  $f_z = 0,025$  mm/ostrze i głębokości skrawania  $a_p = 2$  mm.

## Wyniki badań

Składowe siły skrawania  $F_x$  ( $F_f$ ),  $F_y$  ( $F_p$ ) i  $F_z$  ( $F_c$ ) oraz ich amplitudy przy frezowaniu współbieżnym oraz przeciwbieżnym analizowano w funkcji czasu.

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe przebiegi siły skrawania  $F_z$  dla szerokości frezowania  $a_e = 2$  mm, posuwu  $f_z = 0,025$  mm/ostrze i głębokości skrawania  $a_p = 10$  mm przy frezowaniu przeciwbieżnym (rys. 2a) oraz współbieżnym (rys. 2b). Warto zauważyć, że przy tych samych parametrach technologicznych przedział zmienności siły  $F_z$  jest wyraźnie mniejszy dla frezowania współbieżnego. Ten wariant obróbki jest więc korzystniejszy pod względem stabilności procesu.

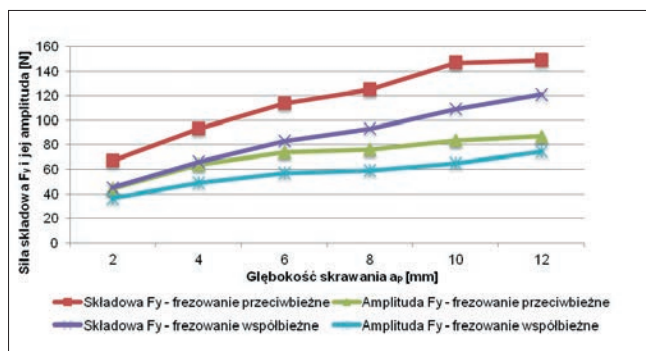


Rys. 2. Przykładowe przebiegi składowej siły skrawania  $F_z$  dla frezowania: a) przeciwbieżnego, b) współbieżnego

Rozpatrując rozkład wszystkich sił składowych  $F_x$  ( $F_f$ ),  $F_y$  ( $F_p$ ) oraz  $F_z$  ( $F_c$ ) uzyskane przy stałej szerokości frezowania  $a_e = 2$  mm i zmiennej głębokości skrawania,

zauważono, że największe wartości odnotowano dla siły  $F_y$ , a najmniejsze – dla  $F_z$ .

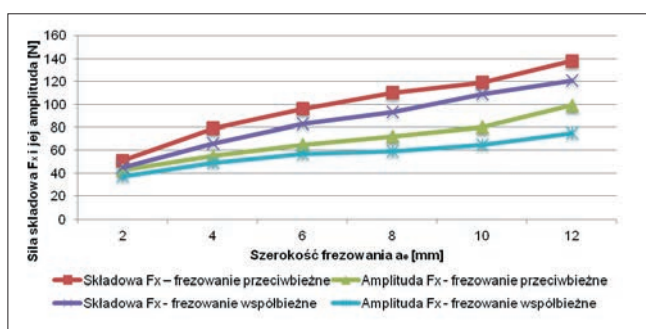
Na rys. 3 przedstawiono charakterystykę składowej siły skrawania  $F_y$  i jej amplitudy w funkcji głębokości skrawania. Na podstawie uzyskanych wyników zauważono, że wraz ze wzrostem głębokości skrawania wartości składowej siły  $F_y$  rosną zarówno dla frezowania współbieżnego, jak i przeciwbieżnego. Amplituda siły rośnie również w miarę zwiększenia głębokości skrawania. Istotne jest, że większe wartości składowej siły skrawania  $F_y$  i jej amplitudy otrzymano dla frezowania przeciwbieżnego.



Rys. 3. Charakterystyka składowej siły skrawania  $F_y$  i jej amplitudy w funkcji głębokości frezowania  $a_p$  dla frezowania współbieżnego oraz przeciwbieżnego

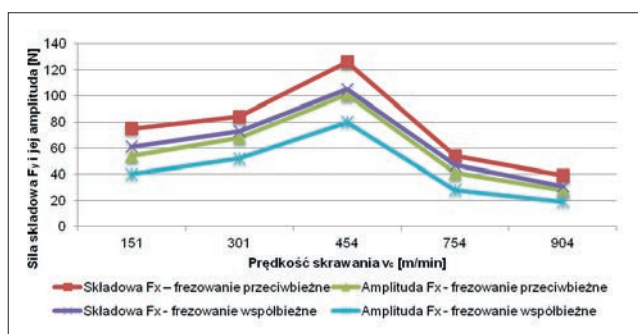
Na podstawie analizy wyników pomiarów składowych siły skrawania  $F_x$  ( $F_f$ ),  $F_y$  ( $F_p$ ) oraz  $F_z$  ( $F_c$ ) otrzymanego przy stałej głębokości skrawania  $a_p = 2$  mm i zmiennej szerokości frezowania  $a_e$ , największe wartości odnotowano dla składowej  $F_x$ , a najmniejsze – dla składowej  $F_z$ .

Na rys. 4 przedstawiono wartości wybranej składowej siły skrawania  $F_x$  i jej amplitudy w funkcji szerokości frezowania. Bazując na otrzymanych wynikach, stwierdzono, że wartość składowej siły skrawania  $F_x$  i jej amplituda rosną wraz ze wzrostem szerokości frezowania zarówno przy frezowaniu współbieżnym, jak i przeciwbieżnym. Także w tym przypadku większe wartości odnotowano dla frezowania przeciwbieżnego.



Rys. 4. Charakterystyka składowej siły skrawania  $F_x$  i jej amplitudy w funkcji szerokości frezowania  $a_e$  dla frezowania współbieżnego oraz przeciwbieżnego

Na ostatnim etapie badań analizowano wpływ prędkości skrawania na wartość składowej siły skrawania  $F_y$  i jej amplitudy. Na rys. 5 przedstawiono charakterystykę składowej siły skrawania  $F_y$  i jej amplitudy w funkcji prędkości skrawania dla frezowania współbieżnego oraz przeciwbieżnego. Gdy zwiększa się prędkość skrawania, siła rośnie do osiągnięcia maksimum przy prędkości ok.  $v_c = 450$  m/min, następnie spada. Wartości otrzymane przy frezowaniu współbieżnym są niższe niż przy frezowaniu przeciwbieżnym.



Rys. 5. Charakterystyka składowej siły skrawania  $F_y$  i jej amplitudy w funkcji prędkości skrawania dla frezowania współbieżnego oraz przeciwbieżnego

Podobne zależności stwierdzono dla pozostałych składowych sił skrawania przy wszystkich analizowanych zmiennych.

## Podsumowanie

Na podstawie opisanych badań sformułowano następujące wnioski:

- Amplituda sił skrawania jest jedną z miar stabilności procesu obróbki. Można stwierdzić, że frezowanie współbieżne jest bardziej korzystne pod względem dynamiki procesu.
- Dla zmiennej głębokości skrawania zarówno dla frezowania współbieżnego, jak i przeciwbieżnego zauważono, że największe wartości odnotowano dla składowej  $F_y$ , a najmniejsze dla  $F_z$ .
- Przy zmiennej szerokości frezowania największe wartości odnotowano dla składowej  $F_x$ , a najmniejsze – również dla  $F_z$ , zarówno dla frezowania współbieżnego, jak i przeciwbieżnego.
- Wartości wybranych sił składowych i ich amplitudy rosną wraz ze wzrostem głębokości skrawania i szerokości frezowania, zarówno dla frezowania współbieżnego, jak i przeciwbieżnego.
- Dla szerokości frezowania powyżej 6 mm, a więc powyżej 50% średnicy frezu, stosunek amplitudy siły do jej wartości maleje. To oznacza, że można zwiększać wydajność obróbki poprzez wzrost szerokości frezowania przy relatywnie niewielkiej zmianie stabilności obróbki.
- Przy zwiększaniu prędkości skrawania siła  $F_y$  rośnie i osiąga maksimum przy prędkości ok.  $v_c = 450$  m/min, następnie jej wartość spada.

## LITERATURA

1. Bławucki S., Matuszak J., Zaleski K. „Badania sił skrawania podczas frezowania superstopu Inconel 718 z podwyższoną prędkością skrawania”. *Mechanik*. 8–9 (2016): s. 1090–1091.
2. Baohai W., Xue Y., Ming L., Ge G. “Cutting force prediction for circular end milling process”. *Chinese Journal of Aeronautics*. 26, 4 (2013): s. 1057–1063.
3. Dul-Korzyńska B. „Obróbka skrawaniem i narzędzia”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2009.
4. Jemieliński K. „Obróbka skrawaniem”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2004.
5. Kuczmazewski J., Zagórski I. „Badania sił skrawania i ich amplitud podczas frezowania stopów magnezu”. *Postępy Nauki i Techniki*. 15 (2012): s. 228–237.
6. Małkiński J., Siemiński P. „Badanie wpływu szerokości skrawania i prędkości posuwu na wartość sił skrawania podczas frezowania frezami palcowymi”. *Mechanik*. 2 (2015): s. 1–11.
7. Olszak W. „Obróbka skrawaniem”. Warszawa: WNT, 2009.
8. Drodz K. „Analiza sił skrawania przy frezowaniu współbieżnym i przeciwbieżnym frezami trzpieniowymi”. Praca magisterska. Promotor: prof. dr hab. inż. J. Kuczmazewski. Lublin: Politechnika Lubelska, 2011.