

Wpływ zużycia ostrza na moment skrawania i siłę bierną w procesie frezowania stopu tytanu

Influence of tool wear on the cutting torque and axial force in the milling of titanium alloy

KAZIMIERZ ZALESKI
ANDRZEJ ZYŚKO
JAKUB MATUSZAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.180>

Przedstawiono wyniki badań wpływu zużycia ostrza na moment skrawania oraz siłę bierną podczas frezowania stopu tytanu Ti6Al4V. Do badań wybrano płytki skrawające o różnym stopniu zużycia. Widoczny jest wpływ wartości zużycia na powierzchni przyłożenia oraz prędkości skrawania na wartość siły biernej i momentu skrawania.

SŁOWA KLUCZOWE: stop tytanu Ti6Al4V, zużycie, moment skrawania, siła bierna

The results of the survey on the influence of tool wear on the cutting torque and axial force in the milling of Ti6Al4V titanium alloy are presented. The tests were carried out by selecting cutting inserts with different degree of wear. The influence of the wear value on the flank surface and the cutting speed on the value of axial force and cutting torque is visible.

KEYWORDS: Ti6Al4V titanium alloy, tool wear, cutting torque, axial force

Stopy tytanu, ze względu na takie właściwości, jak: bardzo duża wytrzymałość właściwa (wytrzymałość odniesiona do masy właściwej), odporność na korozję, możliwość eksploatacji w wysokiej temperaturze i brak szkodliwego oddziaływania na organizm człowieka, są dość szeroko stosowane w przemyśle lotniczym, zbrojeniowym, okrętowym, chemicznym, energetycznym i w transplantologii [7, 8]. Jednak mankamentem tych stopów, obok dość wysokiej ceny, są trudności występujące podczas ich obróbki skrawaniem. Są one związane z niektórymi właściwościami tych materiałów, np. małą przewodnością cieplną i dużą podatnością na umacnianie się. Mała przewodność cieplna i duże siły skrawania wpływają na silne nagrzewanie się narzędzi, a to z kolei powoduje ich intensywne zużywanie się.

Na zużycie ostrzy wpływa szereg czynników. Według autorów pracy [5] zużycie ostrzy płytek z węgla spiekane, którymi frezowano stop Ti 6242S, zależy od parametrów technologicznych obróbki, natomiast nie jest znacząco uzależnione od powłoki pokrywającej płytkę.

Badania zużycia ostrzy frezów jednolitych z węgla spiekane o średnicy $\varnothing = 6 \pm 20$ mm podczas frezowania stopu Ti6Al4V wykazały, że ze wzrostem średnicy frezu następuje wyraźne zmniejszenie jego zużycia [3].

Trwałość ostrzy frezów zależy też od struktury węgla spiekane. Stwierdzono, że czas pracy frezów o strukturze ultradrobnociągnionej jest kilkakrotnie dłuższy niż frezów o strukturze grubociągnionej [4].

Składowe całkowitej siły skrawania w procesie obróbki stopów tytanu mają dość duże wartości, na co wpływają takie czynniki, jak: duża wytrzymałość, podatność

na umacnianie się i duży współczynnik tarcia. Wartości i kierunki sił oddziałujących na przedmiot obrabiany mają duży wpływ na dokładność wykonywanych przedmiotów ze względu na mały współczynnik sprężystości wzdłużnej stopów tytanu.

Badania siły skrawania w procesie frezowania stopów tytanu prowadzono najczęściej przy zmiennych parametrach technologicznych. W wielu pracach badano wpływ prędkości na składowe siły skrawania.

Autorzy pracy [2] stwierdzili, że podczas frezowania elementów cienkościennych ze stopu Ti6Al4V ze zmienną prędkością skrawania w zakresie $v_c = 60 \div 120$ m/min następuje wzrost sił odporowej F_y , a w zakresie $v_c = 120 \div 180$ m/min wpływ prędkości nie jest wyraźnie widoczny.

Badania autorów pracy [9] wykazały, że wzrost prędkości skrawania stopu tytanu w zakresie $v_c = 30 \div 40$ m/min przyczynia się do spadku siły skrawania, a dalszy wzrost prędkości do $v_c = 60$ m/min nie wpływa na wartość siły. Badania porównawcze momentu skrawania podczas frezowania stopów tytanu OT4-1, Ti6Al4V, WT22 i WT3-1 wykazały, że obróbka stopu WT22 wymaga użycia największego momentu skrawania. Ponadto zaobserwowano wzrost momentu skrawania wraz ze wzrostem posuwu, natomiast zwiększanie prędkości skrawania powodowało zmniejszanie amplitudy momentu skrawania [11].

Oprócz wyznaczania wartości siły skrawania metodami doświadczalnymi, można je prognozować z zastosowaniem metody elementów skończonych [1, 10]. Badania symulacyjne skrawania stopów tytanu frezem kulistym wykazały, że występuje korelacja między składowymi siłami skrawania a posuwem, natomiast nie ma zależności między tymi składowymi a prędkością skrawania [1]. Z porównania wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych frezowania stopu tytanu wynika, że dokładność badań symulacyjnych metodą elementów skończonych zależy w dużym stopniu od wyboru modelu konstytutywnego obrabianego materiału [6].

Dotychczasowe badania sił w procesie frezowania stopów tytanu dotyczyły głównie wpływu parametrów skrawania na składowe całkowitej siły skrawania. Celem prezentowanych badań była ocena wpływu zużycia płytek frezu składanego na moment skrawania i siłę bierną podczas frezowania stopu tytanu w zakresie konwencjonalnych i podwyższonych prędkości skrawania.

Metodyka badań

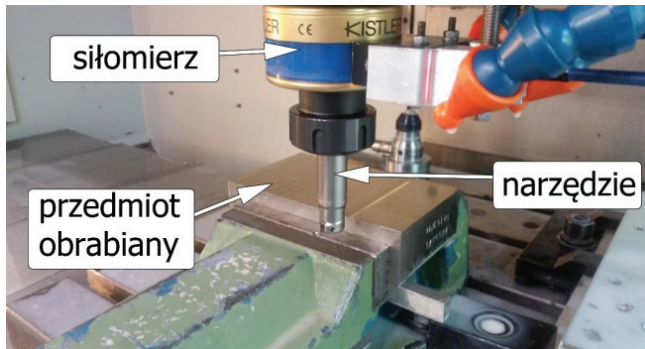
Eksperyment badawczy zrealizowano na pionowym centrum obróbkowym Avia VMC800HS, przeznaczonym do obróbki w warunkach HSC. Jako materiał obrabiany zastosowano próbki ze stopu tytanu Ti6Al4V o wymiarach $150 \times 90 \times 40$ mm. Wykorzystano frez składany

* Dr hab. inż. Kazimierz Zaleski (k.zaleski@pollub.pl), dr inż. Jakub Matuszak (j.matuszak@pollub.pl) – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej; mgr inż. Andrzej Zyśko – Wytwórnia Sprzętu Komunikacyjnego „PZL-Świdnik”

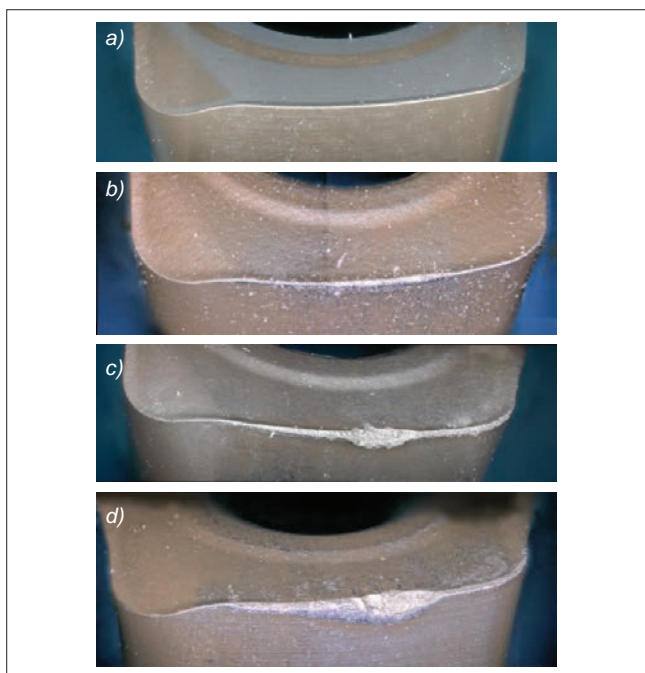
dwuostrzowy o średnicy $\varnothing 20$ mm firmy Seco (symbol R217.21-1820.0-LP06.2A) z płytkami (LPHT060310ER-E05) z węglików spiekanych w gatunku MM4500. Na rys. 1 przedstawiono stanowisko badawcze.

Czynnikami zmiennymi podczas procesu frezowania było zużycie narzędzia (wskaźnik zużycia na powierzchni przyłożenia VB_{max}) oraz prędkość skrawania v_c . Za pomocą mikroskopu cyfrowego określono zużycie partii płytek i dobrano płytki, których wartość zużycia na powierzchni przyłożenia wynosiła VB_{max} : 0 mm (płytki nowe); 0,15 mm; 0,30 mm oraz 0,45 mm.

Na rys. 2 przedstawiono przykłady płytek z przyjętym stopniem zużycia.



Rys. 1. Stanowisko badawcze



Rys. 2. Przykładowy widok płytek skrawających o różnym stopniu zużycia: a) $VB_{max} = 0$ mm; b) $VB_{max} = 0,15$ mm; c) $VB_{max} = 0,30$ mm; d) $VB_{max} = 0,45$ mm

Chociaż norma PN-ISO 8688 sugeruje, by po przekroczeniu wskaźnika zużycia $VB_{max} > 0,3$ mm kwalifikować ostrze jako zużyte, to w praktyce przemysłowej bazuje się głównie na wskaźnikach pośrednich, zwłaszcza o charakterze technologicznym, takich jak: wzrost chropowatości powierzchni, przekroczenie tolerancji wymiarowej czy pojawienie się zadziórów na krawędziach przedmiotów. Dlatego w celach porównawczych przeprowadzono badania z płytkami o zużyciu $VB_{max} = 0,45$ mm. W przypadku wzrostu wskaźnika zużycia w trakcie badań powyżej 0,05 mm płytki wymieniano, aby uniknąć wpływu wzrostu zużycia na dokładność pomiarów.

Zastosowano dwie prędkości skrawania:

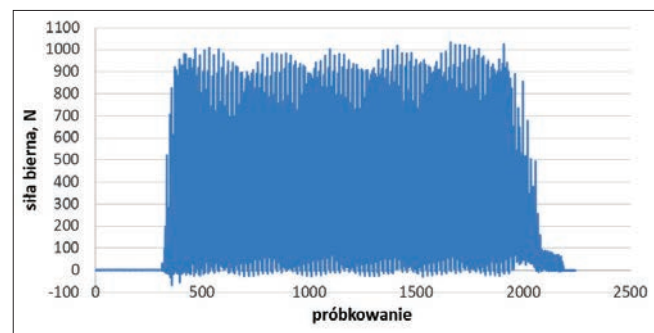
- $v_c = 70$ m/min – ta prędkość dla tego gatunku materiału obrabianego jest utożsamiana z zakresem konwencjonalnych wartości;
- $v_c = 250$ m/min – odpowiada obróbce HSC trudnoobrabialnego stopu tytanu, jakim jest Ti6Al4V.

Przyjęto stały posuw na ostrze $f_z = 0,2$ mm/ostrze oraz jedną głębokość skrawania $a_p = 0,5$ mm. Aby uniknąć wpływu zmiennej głębokości skrawania na siły i moment skrawania ze względu na nieprostokątne ustawienie powierzchni obrabianej w stosunku do osi frezu po zamocowaniu próbek w imadle, przeprowadzono planowanie powierzchni za pomocą głowicy, wyznaczając długość narzędzi z użyciem sondy narzędziowej.

Zastosowano tradycyjną zalewową metodę chłodzenia. Do pomiaru siły bierniej (działającej w osi narzędzia) i momentu skrawania wykorzystano siłomierz Kistler 9125A. Ze stabilnego przebiegu siły (pomijając strefę wejścia narzędzia w materiał i wyjścia z niego) wyznaczono wartości średnie oraz amplitudy siły bierniej i momentu skrawania. Amplitudę przedstawiono jako różnicę pomiędzy wartościami maksymalnymi a wartością średnią. Badania powtórzono pięciokrotnie.

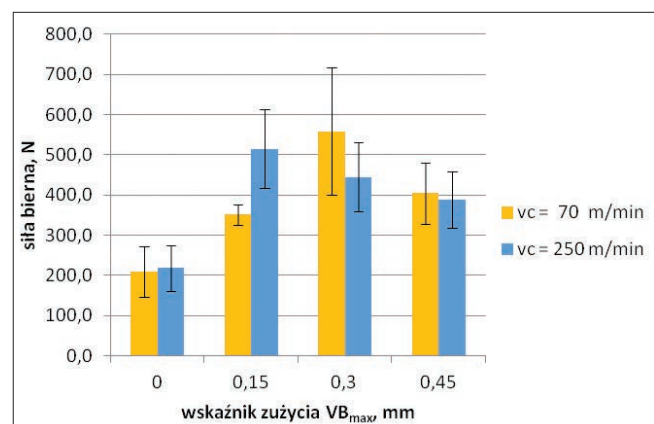
Wyniki badań

Na rys. 3 przedstawiono przykładowy przebieg sygnału podczas skrawania z prędkością $v_c = 250$ m/min płytkami o zużyciu $VB_{max} = 0,3$ mm.



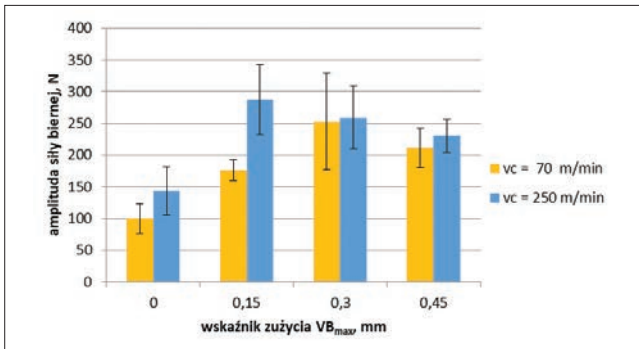
Rys. 3. Przebieg sygnału podczas skrawania z prędkością $v_c = 250$ m/min płytkami o zużyciu $VB_{max} = 0,3$ mm.

Na rys. 4 przedstawiono wyniki badań wpływu zużycia na powierzchni przyłożenia dla różnych płytek na wartość siły bierniej podczas obróbki z prędkością skrawania $v_c = 70$ m/min i 250 m/min. Widoczne są znacznie mniejsze wartości siły bierniej, gdy obróbka była prowadzona nowymi płytkami w porównaniu ze zużytymi płytkami.



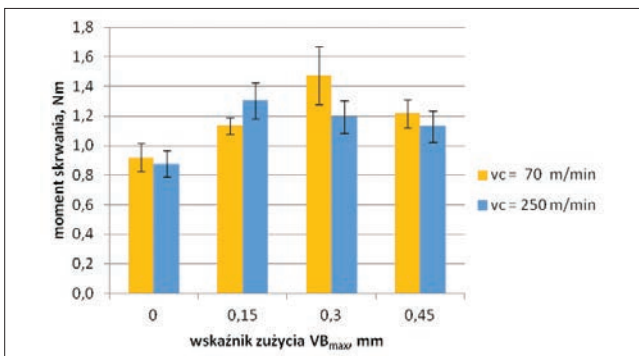
Rys. 4. Wpływ zużycia na wartość siły bierniej dla prędkości $v_c = 70$ m/min i 250 m/min

Na rys. 5 przedstawiono wpływ zużycia na amplitudę siły biernej. Dla prędkości skrawania $v_c = 250$ m/min odnotowano wyższe wartości amplitudy siły biernej w porównaniu z prędkością $v_c = 70$ m/min. Amplituda siły biernej charakteryzuje się dość dużymi wartościami w porównaniu z wartościami średnimi. Tak duże wartości amplitudy spowodowane są charakterem pracy dwustrzowego frezu.



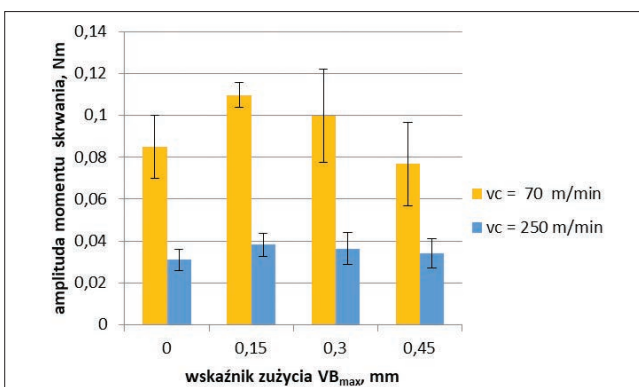
Rys. 5. Wpływ zużycia na wartość amplitudy siły biernej dla prędkości $v_c = 70$ m/min i 250 m/min

Na rys. 6 przedstawiono wyniki badań wpływu zużycia na moment skrawania. Podobnie jak w przypadku siły biernej, najmniejsze wartości zaobserwowano w przypadku płytek o zużyciu $VB_{max} = 0$ mm.



Rys. 6. Wpływ zużycia na wartość momentu skrawania dla prędkości $v_c = 70$ m/min i 250 m/min

Na rys. 7 zobrazowano wpływ zużycia na amplitudę momentu skrawania. Zaobserwowano znacznie większe wartości amplitudy momentu skrawania podczas obróbki z prędkością $v_c = 70$ m/min. Przy większej prędkości skrawania, a tym samym – prędkości obrotowej, wzrasta liczba wejść ostrzy do strefy skrawania, co może powodować zmniejszanie się amplitudy momentu skrawania.



Rys. 7. Wpływ zużycia na wartość amplitudy momentu skrawania dla prędkości $v_c = 70$ m/min i 250 m/min

Podsumowanie

Przedstawiono wpływ zużycia ostrza na siłę bierną i moment skrawania podczas frezowania stopu tytanu Ti6Al4V. Badania przeprowadzono z użyciem płytek skrawających nowych ($VB_{max} = 0$ mm) oraz zużytych ($VB_{max} = 0,15$ mm; 0,30 mm i 0,45 mm). Zastosowano dwie prędkości skrawania $v_c = 70$ m/min oraz 250 m/min.

Wyciągnięto następujące wnioski:

- Podczas obróbki z prędkością $v_c = 70$ m/min do wartości zużycia $VB_{max} = 0,30$ mm wraz ze wzrostem zużycia obserwuje się wzrost siły biernej. Natomiast przy obróbce płytkami o zużyciu $VB_{max} = 0,45$ mm zaobserwowano spadek wartości siły biernej w porównaniu z płytkami ze zużyciem $VB_{max} = 0,30$ mm.
- Podczas obróbki z prędkością $v_c = 250$ m/min maksymalną wartość siły biernej ($F = 515$ N) zaobserwowano przy zużyciu $VB_{max} = 0,15$ mm, a wzrost zużycia powodował spadek wartości siły biernej.
- Obróbka z prędkością $v_c = 250$ m/min charakteryzuje się większymi wartościami amplitudy siły biernej w porównaniu z obróbką z prędkością $v_c = 70$ m/min.
- W zakresie podwyższonych wartości zużycia ($VB_{max} = 0,30$ mm i 0,45 mm) niższe wartości momentu odnotowano przy większej prędkości skrawania.
- Znacznie niższe wartości amplitudy momentu skrawania zaobserwowano podczas obróbki z prędkością $v_c = 250$ m/min w porównaniu z mniejszą prędkością skrawania.

LITERATURA

1. Burek J., Żurawski K., Żurek P. „Analiza składowych siły skrawania i naprężeń w warstwie wierzchniej metodą elementów skończonych w obróbce stopu tytanu Ti6Al4V”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 720/37–45.
2. Huang P.L., Li J.F., Sun J., Zhou J. „Study on performance in dry milling aeronautical titanium alloy thin-wall components with two types of tools”. *Journal of Cleaner Production*. 67 (2014): s. 258–264.
3. Kuczmaszewski J., Zaleski K., Matuszak J., Pałka T., Garwacki R. „Wpływ średnicy frezu na jego zużycie podczas obróbki stopu tytanu Ti6Al4V”. *Mechanik*. 3 (2017): s. 198–200.
4. Kuczmaszewski J., Zaleski K., Matuszak J., Pałka T., Mądry J. „Studies on the effect of mill microstructure upon tool life during slot milling of Ti6Al64V alloy parts”. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 19, 4 (2017): s. 590–596.
5. Lebaal N., Nouari M., Ginting A. „A new optimization approach based on Kriging interpolation and sequential quadratic programming algorithm for end milling refractory titanium alloys”. *Applied Soft Computing*. 11 (2011): s. 5110–5119.
6. Niestony P., Habrat W. „Badania eksperymentalne oraz symulacje MES dla różnych modeli konstytutywnych procesu frezowania stopu Ti6Al4V”. *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 730/63–72.
7. Oczko K.E. „Kształtowanie ubytkowe tytanu i jego stopów w przemyśle lotniczym i technice medycznej. Część I”. *Mechanik*. 8–9 (2008): s. 639–656.
8. Sieniawski J. „Nickel and titanium alloys in aircraft turbine engines”. *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 27, 3 (2003): s. 23–33.
9. Vijay S., Krishnaraj V. „Machining parameters optimization in end milling of Ti-6Al-4V”. *Procedia Engineering*. 64 (2013): s. 1079–1088.
10. Wang Z.G., Rachman M., Wong Y.S., Li X.P. „A hybrid cutting force model for high-speed milling of titanium alloys”. *Annals of the CIRP*. 54, 1 (2005): s. 71–74.
11. Zaleski K., Matuszak J. „Badania porównawcze wpływu parametrów technologicznych frezowania wybranych stopów tytanu na moment skrawania i chropowatość obrobionej powierzchni”. *ZN Politechniki Rzeszowskiej*. 295. *Mechanika*. 89. RUTMech, t. XXXIV, z. 89 (4/17): s. 563–572.