

Wpływ średnicy frezu na jego zużycie podczas obróbki stopu tytanu Ti6Al4V

The influence of tool diameter on wear during milling of titanium alloy Ti6Al4V

JÓZEF KUCZMASZEWSKI
KAZIMIERZ ZALESKI
JAKUB MATUSZAK
TOMASZ PAŁKA
RAFAŁ GARWACKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.3.40>

Do głównych problemów towarzyszących obróbce materiałów trudnoobrabialnych należy zużycie narzędzi. Może ono mieć duży udział w kosztach produkcji wyrobu. Stopy tytanu ze względu na swoje właściwości – niską przewodność cieplną, znaczną wytrzymałość i duży współczynnik tarcia – należą do materiałów trudnoobrabialnych. W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu średnicy frezu na jego trwałość w procesie frezowania stopu tytanu Ti6Al4V.

SŁOWA KLUCZOWE: trwałość ostrza, stopy tytanu, frezowanie

One of the main problems associated with machining of difficult-to-cut materials is tool wear. Tool wear may comprise a large proportion of production costs. Titanium alloys due to its properties – low thermal conductivity, high durability and a large coefficient of friction belong to difficult-to-cut materials. The paper presents the results of research on the impact of cutter diameter on tool wear during the milling process of titanium alloy Ti6Al4V.

KEYWORDS: tool wear, titanium alloys, milling

W branży lotniczej stosowane są rozwiązania konstrukcyjne umożliwiające uzyskanie małej masy aparatów latających. Jednym z takich rozwiązań są elementy integralne, które są konstruowane w taki sposób, aby mogły zastępować pracę zespołów składających się z wielu części. Elementy integralne mają złożoną budowę, a ich wykonanie wiąże się z koniecznością kształtowania wgłębień, rowków, cienkościennych żeberk itp. W procesie produkcji tych elementów konieczne jest usunięcie znacznej objętości półfabrykatu, niekiedy nawet ponad 90%, a głównym sposobem obróbki skrawaniem jest frezowanie.

Elementy integralne stosowane w lotnictwie przeważnie wykonuje się ze stopów metali lekkich, w tym ze stopów tytanu. Szerokie zastosowanie stopów tytanu w lotnictwie wiąże się z ich właściwościami, takimi jak: duża wytrzymałość w odniesieniu do masy właściwej, wysoka sprężystość oraz odporność na korozję i utlenianie [7]. Jednak właściwości stopów tytanu (takie jak znaczna wytrzymałość, duży współczynnik tarcia, duża aktywność chemiczna w podwyższonej temperaturze, mały współczynnik sprężystości, a zwłaszcza mała przewodność cieplna) powodują, że materiały te są bardzo trudno skrawalne [1, 2]. Niska wartość współczynnika przewod-

ności cieplnej materiału obrabianego (dla tytanu jest to $21 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) powoduje szybkie nagrzewanie się ostrzy narzędzi, co prowadzi do przyspieszonego ich zużycia. Znaczny wpływ na temperaturę ostrzy ma m.in. prędkość skrawania. Dlatego stopy tytanu są obrabiane ze znacznie mniejszą prędkością niż stopy aluminium czy stal (współczynnik przewodności cieplnej dla tych materiałów jest dużo większy i wynosi dla aluminium $226 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, a dla żelaza $73,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Szybkie zużycie narzędzi, zwłaszcza katastroficzne, może być powodem uszkodzenia przedmiotu obrabianego, zatem podczas obróbki stopów tytanu duże znaczenie ma system diagnostyczny narzędzi skrawających [6].

Dotychczas badania zużycia ostrzy narzędzi w procesie skrawania stopów tytanu były prowadzone głównie podczas toczenia [2, 5, 6] oraz frezowania płaszczyzn [1, 3, 4]. Wykonanie skomplikowanych elementów integralnych wiąże się z koniecznością frezowania żeberk, rowków i zagłębień o różnej geometrii, często o małych promieniach przejścia między kolejnymi powierzchniami, co wymaga zastosowania frezów trzpieniowych o różnej średnicy. Znaczna głębokość frezowanych zagłębień narzuca odpowiednio duży wysięg frezów. W tej sytuacji zmniejszenie średnicy frezu prowadzi do zmniejszenia jego sztywności i pogorszenia warunków odprowadzania ciepła. Celem prezentowanych badań była ocena zużycia ostrzy frezów trzpieniowych o różnej średnicy podczas frezowania stopu tytanu Ti6Al4V.

Metodyka badań

W badaniach wykorzystano próbki ze stopu tytanu Ti6Al4V w stanie wyżarzonym, który ze względu na wysoką wytrzymałość właściwą (stosunek wytrzymałości do gęstości) znajduje zastosowanie w konstrukcjach, w których istotne jest minimalizowanie masy. W tabl. I przedstawiono skład chemiczny i właściwości mechaniczne według świadectwa kontroli.

W procesie frezowania użyto frezów o różnej średnicy: $D = 6, 12, 16, 20 \text{ mm}$, wykonanych z węglików spiekanych. Parametry narzędzi przedstawiono w tabl. II. Przykładowa seria narzędzi została pokazana na rys. 1. Narzędzia mocowano w oprawkach z tulejami zaciskowymi. Badania przeprowadzono na centrum obróbkowym Avia VMC-800HS wyposażonym w sterowanie Heidenhain.

Aby zachować porównywalne warunki (jednakową liczbę wejść i wyjść narzędzia ze strefy skrawania), wymiary próbek dobrano tak, aby długość pojedynczego przejścia stanowiła 2,5-krotność średnicy frezu. W tabl. II zestawiono wymiary próbek w odniesieniu do średnicy frezu.

* Prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski (j.kuczmaszewski@pollub.pl), dr hab. inż. Kazimierz Zaleski (k.zaleski@pollub.pl), dr inż. Jakub Matuszak (j.matuszak@pollub.pl), mgr inż. Tomasz Pałka (t.palka@pollub.pl) – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej; mgr inż. Rafał Garwacki (rafal.garwacki@lmco.com) – Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o. – PZL Mielec

W celu zachowania porównywalnego obciążenia frezu szerokość frezowania ustalono na poziomie 0,7 średnicy dla każdego narzędzia. Przyjęto stałe parametry skrawania: $v_c = 40$ m/min, $f_z = 0,1$ mm/ostrze, $a_p = 2$ mm. Zastosowano frezowanie współbieżne.

Zużycie narzędzi obserwowano za pomocą warsztatowego mikroskopu optycznego oraz mikroskopu cyfrowego Keyence VHX 5000.

Na podstawie normy PN-ISO 8688:1996 analizowano formy zużycia na roboczych powierzchniach narzędzia.

TABLICA I. Skład chemiczny i właściwości fizyczne stopu tytanu Ti6Al4V

Skład chemiczny, %	Al	6,25÷6,31
	V	4,09÷4,12
	O ₂	0,184÷0,19
	Fe	0,18÷0,21
	C	0,026÷0,027
	N ₂	0,007÷0,009
	H ₂	0,002
	Ti	reszta
Właściwości mechaniczne	<i>R_m</i> , MPa	1014
	<i>R_{p0,2}</i> , MPa	954
	<i>A</i> , %	13
	<i>Z</i> , %	35,8

Objaśnienia: *R_m* – wytrzymałość na rozciąganie, *R_{p0,2}* – granica plastyczności, *A* – wydłużenie, *Z* – przewężenie.

TABLICA II. Wymiary próbek i droga skrawania w odniesieniu do średnicy frezu

Wymiary próbek ze stopu Ti6Al4V, mm <i>L × B × H</i>			
15 × 150 × 50	30 × 150 × 50	40 × 150 × 50	50 × 150 × 50
Średnica frezu <i>D</i> , mm			
6	12	16	20
Liczba ostrzy <i>z</i>			
4	4	4	5
Rodzaj powłoki			
(Ti,Al)N ₂	(Ti,Al)N ₂	AlTiN	AlTiN
Długość drogi pojedynczego przejścia <i>L = 2,5D</i> , mm			
15	30	40	50
Szerokość frezowania <i>B</i> , mm			
4,2	8,4	11,2	14



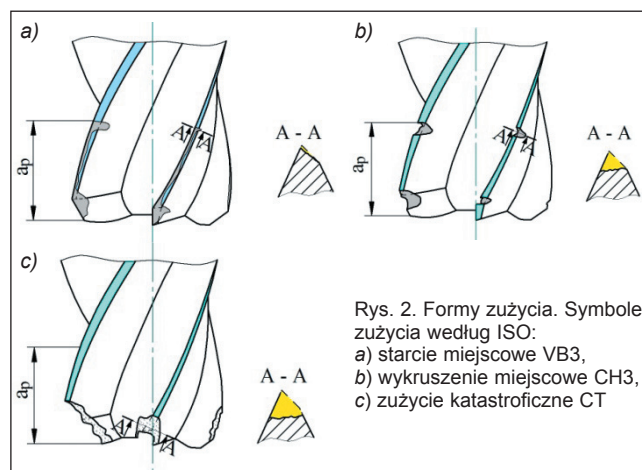
Rys. 1. Przykładowa seria narzędzi użytych do badań

Wyniki badań

Zaobserwowano trzy formy zużycia frezów, które w oparciu o normę identyfikowano za pomocą mikroskopu cyfrowego:

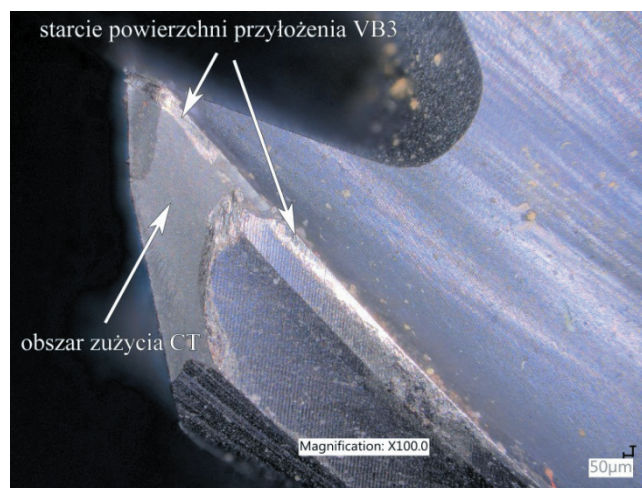
- VB3 – zużycie miejscowe powierzchni przyłożenia, rozumiane jako obszar starcia o charakterze lokalnym,
- CH3 – wykruszenie miejscowe (określane jako niewielki, lokalny ubytek w postaci wykruszenia),
- CT – zużycie katastroficzne.

Formy zużycia zostały zaprezentowane na rys. 2.



Rys. 2. Formy zużycia. Symbole zużycia według ISO:
a) starcie miejscowe VB3,
b) wykruszenie miejscowe CH3,
c) zużycie katastroficzne CT

Dla frezów o średnicy 6 mm zużycie katastroficzne pojawiło się na wszystkich ostrzach już w pierwszej minucie skrawania. Przykład ostrza ze zużyciem CT pokazano na rys. 3. W obszarze obszernego ubytku ostrza widoczne jest dodatkowe starcie świadczące o kontynuacji procesu skrawania po czasie, w którym wystąpił ubytek. Zużycie CT świadczy o całkowitej utracie właściwości skrawnych przez narzędzie.

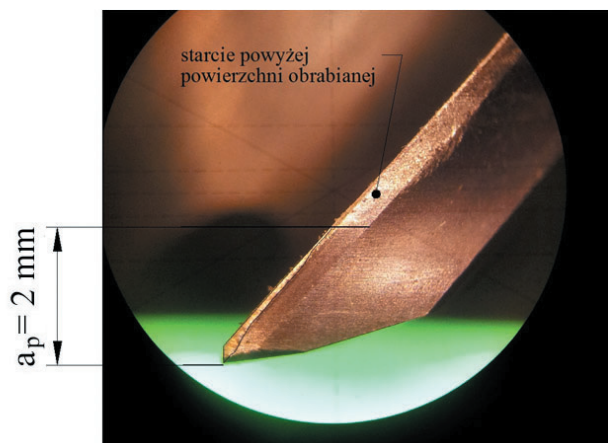


Rys. 3. Widok zużycia katastroficznego CT

Zużycie katastroficzne frezów o średnicy $D = 6$ mm prawdopodobnie wynikało z niewielkiej sztywności, która mogła się przyczynić do powstania drgań podczas obróbki.

Narzędzia o średnicy $D = 12$ mm zachowały zdolności skrawne do czasu skrawania $t = 15$ min, jednak po 10 min zaobserwowano pojawienie się miejscowego wykruszenia CH3. Po czasie $t = 15,3$ min na kolejnych ostrzach zaobserwowano wykruszenie miejscowe CH3. Rozwój zużycia przykładowego ostrza w kolejnych przedziałach czasu przedstawiono w tabl. III.

W procesie skrawania wióry spływają po powierzchni natarcia. Kierunek spływu wióra wyznacza płaszczyzna największego spadku powierzchni natarcia. Położenie tej płaszczyzny w układzie roboczym jest uzależnione od kąta natarcia i kąta pochylenia linii śrubowej. W przypadku badanych frezów kombinacja tych dwóch kątów powodowała, że spływające wióry uderzały w powierzchnię przyłożenia powyżej powierzchni obrabianej. Charakterystyczne starcie powyżej linii skrawania – spowodowane przez uderzające wióry – przedstawiono na rys. 4.

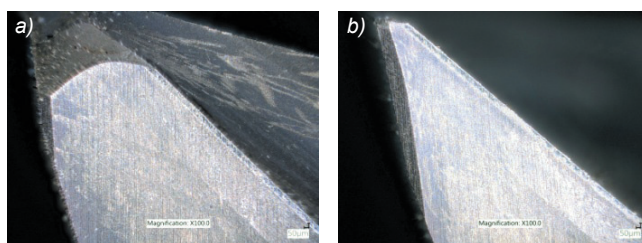


Rys. 4. Starcie powyżej powierzchni obrabianej

TABLICA III. Rozwój zużycia w kolejnych przedziałach czasu narzędzia o średnicy $D = 12$ mm

Czas	Główna powierzchnia przyłożenia	Pomocnicza powierzchnia przyłożenia
$t = 5$ min		
$t = 10$ min		
$t = 15$ min		

W przypadku narzędzi o średnicy $D = 16$ mm i 20 mm nie zaobserwowano zużycia katastroficznego po czasie skrawania $t = 15$ min. Pojawiały się jednak miejscowe wykruszenia CH3. Przykładowy stan ostrzy po 15 min skrawania dla narzędzi o średnicy $D = 20$ mm przedstawiono na rys. 5. Widoczny jest typowy rozwój zużycia ściernego.



Rys. 5. Przykładowy stan ostrzy narzędzi o średnicy $D = 20$ mm po czasie skrawania $t = 15$ min: a) wykruszenie miejscowe CH3, b) starcie miejscowe VB3

Podsumowanie

Na podstawie badań wpływu średnicy frezu na trwałość ostrzy podczas frezowania stopu tytanu Ti6Al4V można stwierdzić:

- Dla frezów o średnicy 6 mm już w pierwszej minucie skrawania nastąpiło zużycie katastroficzne CF wszystkich ostrzy.
- Dla pozostałych badanych narzędzi pojawiło się charakterystyczne starcie na głównej powierzchni przyłożenia powyżej linii skrawania, spowodowane zawijaniem się wiórów podczas obróbki i ich uderzaniem o lub nacieraniem na główną powierzchnię przyłożenia.
- W przypadku frezu o średnicy 12 mm do 5 min pracy dominowało zużycie ściernego. Po 10 min pracy nastąpił dalszy rozwój zużycia ściernego; na ostrzu nr 1 wystąpiło zużycie katastroficzne CF, natomiast na ostrzu nr 3 pojawiło się wykruszenie na powierzchni przyłożenia CH3. Po czasie $t = 15$ min wystąpiło wykruszenie miejscowe CH3 wszystkich ostrzy.
- Narzędzia o średnicy $D = 16$ mm i $D = 20$ mm mimo miejscowych wykruszeń CH3 zachowały zdolności skrawane w czasie skrawania $t = 15$ min.



Badania realizowane w ramach projektu sektorowego INNOLOT (akronim AMPhOra) pt. „Badania technologii przyrostowych procesów hybrydyzacji obróbki dla potrzeb rozwoju innowacyjnej produkcji lotniczej”, koordynowanego przez Polskie Zakłady Lotnicze z Sp. z o.o. – PZL Mielec, współfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w zakresie Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka Priorytet I, Działanie 1.5 PO IG., nr umowy INNOLOT /I/6/NCBR/2013.

LITERATURA

1. Abdel-Aal H.A., Nouari M., Manson M.El. „Influence of thermal conductivity on wear when machining titanium alloys”. *Tribology International*. 42 (2009): s. 359–372.
2. Arrazolla P.-J., Garay A., Iriarte L.-M., Armendia M. „Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3)”. *Journal of Materials Processing Technology*. 209 (2009): s. 2223–2230.
3. Bach P., Trmal G., Zeman P., Vana J., Maly J. „High performance titanium milling at low cutting speed”. *Procedia CIRP*. 1 (2012): s. 226–231.
4. Jawaid A. Sharif S. Koksai S. „Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy”. *Journal of Materials Processing Technology*. 99 (2000): s. 266–274.
5. Krupa K., Sieniawski J., Laskowski P. „Życie narzędzi skrawających podczas toczenia stopu Ti-6Al-2Sn-4Zr6Mo”. *Mechanik*. 10 (2010): s. 655–661.
6. Lipski J., Zaleski K. „System diagnostyczny narzędzi skrawających w procesie obróbki stopów tytanu”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*. Nr 227. *Mechanika*. z. 66 (2006): s. 147–152.
7. Ocoś K.E. „Kształtowanie ubytkowe tytanu i jego stopów w przemyśle lotniczym i technice medycznej. Cz. I”. *Mechanik*. 8–9 (2008): s. 639–656.