

Dr inż. Bogdan SŁODKI, prof. dr hab. inż. Wojciech ZĘBALA,
dr inż. Grzegorz STRUZIKIEWICZ (Politechnika Krakowska):

SKUTECZNOŚĆ DOPROWADZENIA CIECZY OBRÓBKOWEJ POD CIŚNIENIEM W PROCESIE ŁAMANIA WIÓRA PRZY TOCZENIU WZDŁUŻNYM STOPU Ti6Al4V

Streszczenie

Prezentowane są rezultaty badań nad toczeniem stopu tytanu Ti6Al4V narzędziami z węglików spiekanych. Dla przyjętych wartości parametrów skrawania porównano dwa sposoby podawania cieczy obróbkowej. Konwencjonalny sposób wykorzystujący ciśnienie 7 bar porównano z systemem HPC (high pressure coolant) umożliwiającym podawanie cieczy pod ciśnieniem 70 bar. Badania wykazały użyteczność systemu HPC dla małych wartości posuwów, ponieważ wspomaga proces łamania wiórów. Zaprezentowano fotografie wiórów i analizę ich formy. Zastosowano metodę Taguchiego do wyboru optymalnego zestawu parametrów skrawania ze względu na postać wiórów.

Słowa kluczowe: toczenie, HPC, Taguchi, postać wiórów

THE EFFICIENCY OF HPC SYSTEM IN CHIP BREAKING PROCESS IN Ti6Al4V LONGITUDINAL TURNING

Abstract

The paper presents the results of turning tests of Ti6Al4V alloy with sintered carbide tools. For selected sets of cutting data, two kinds of coolant supply were compared. Conventional coolant supply with the pressure of 7 bar was compared with HPC (High Pressure Coolant) system working with the pressure of 70 bar. The tests revealed the fact that HPC system is useful for small values of feed taking into account chip form. Photographs of chips and their form analysis are presented. Taguchi method was used to select optimal set of cutting data considering chip form.

Keywords: turning, HPC, Taguchi, chip form

SKUTECZNOŚĆ DOPROWADZENIA CIECZY OBRÓBKOWEJ POD CIŚNIENIEM W PROCESIE ŁAMANIA WIÓRA PRZY TOCZENIU WZDŁUŻNYM STOPU Ti6Al4V

Bogdan SŁODKI, Wojciech ZĘBALA, Grzegorz STRUZIKIEWICZ¹

1. WSTĘP

Wielu autorów prowadziło intensywne badania koncentrujące się na problemach związanych z kontrolą i łamaniem wiórów [7,10] zwłaszcza podczas obróbki na obrabiarkach CNC. Spośród wielu grup materiałów trudnoskrawalnych [8] można wyodrębnić stopy HRSA, stopy tytanu i stale hartowane. W artykule skupiono się na stopach tytanu. W ostatnich latach wciąż wzrasta zastosowanie tych stopów. Są szeroko stosowane w przemyśle lotniczym, chemicznym i medycznym. Stopy tytanu są lżejsze niż stal, o większej odporności na korozję oraz zachowują swoje właściwości mechaniczne w wysokich temperaturach. Choć siły skrawania są tylko nieznacznie wyższe od sił skrawania dla stali, stopy tytanu mają właściwości, które czynią je trudniejsze do obróbki niż stali o porównywalnej twardości [6,8]. Skrawanie powoduje powstawanie pola wysokiej temperatury (tytan ma niski współczynnik przewodności cieplnej, na przykład dla stopu tytanu Ti6Al4V współczynnik ten wynosi $7 \text{ W / m}\cdot\text{K}$, dla stali węglowej $50 \text{ W / m}\cdot\text{K}$). Stopy tytanu podatne są na reakcje chemiczne z materiałem narzędzia przy temperaturze powyżej $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Powoduje to powstawanie rowka na powierzchni natarcia narzędzia typowego dla zużycia chemicznego. Z kolei mała długość styku wióra z powierzchnią natarcia powoduje koncentrację pola naprężeń. Możliwe jest również, że powstające ciepło przy obróbce niektórych stopów tytanu może powodować zapłon i spalanie materiału. Niski moduł sprężystości tytanu sprawia, że jest podatny na ugięcia i drgania, szczególnie podczas obróbki zgrubnej.

Dodatkową trudnością jest osiągnięcie prawidłowej postaci wiórów dla różnych zakresów parametrów skrawania. Zwijacz wiórów znajdujący się na powierzchni na-

¹ Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, al. Jana Pawła II 37, 37-864 Kraków

tarcia płytki skrawającej z węgla spiekane ma ograniczony zakres zastosowania. Zazwyczaj stopy tytanu są obrabiane z chłodzeniem, które może być dostarczane przy ciśnieniu około 7 bar lub przy zastosowaniu systemu HPC (ang. High Pressure Cooling) doprowadzającym ciecz obróbkową z ciśnieniem około 70 bar. Analiza literatury dotyczącej toczenia stopu tytanu Ti6Al4V oraz innych materiałów trudnoskrawalnych określa jednoznaczny wpływ zastosowania wysokiego ciśnienia na zmianę postaci wiórów oraz skrócenie ich długości [1,3,4]. Autorzy prac [2,4,7] podkreślają ponadto, że stosowanie systemów HPC w procesie toczenia stopów tytanu powoduje wzrost wydajności produkcji wynikający głównie ze wzrostu prędkości skrawania oraz wydłużenia okresu trwałości ostrza skrawającego. W dostępnej literaturze niewiele jest natomiast opisów wyników badań dotyczących jednoczesnego zastosowania HPC oraz płytek skrawających z ukształtowanym zwijaczem wiórów. Ponadto, brak jest uzytylarnych zależności funkcyjnych pomiędzy wartością ciśnienia HPC a parametrami skrawania i postacią wiórów. W artykule porównano sposób formowania i łamania wiórów przy obróbce z zastosowaniem systemu HPC narzędziami firmy Sandvik Coromant z konwencjonalnym (zalewowym) sposobem podawania cieczy obróbkowej.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania doświadczalne przeprowadzono dla obróbki stopu tytanu typ Ti6Al4V. Skład chemiczny materiału obrabianego przedstawiono w Tabeli 1. Zastosowano oprawkę i płytkę skrawającą firmy Sandvik Coromant o oznaczeniu C6-PCMNN-00115-12HP i CNMG 12 04 08-SMC 1115 [9]. Rys. 1 przedstawia zastosowane narzędzie, natomiast zmierzone wymiary zwijacza wiórów SMC pokazano na rys. 2. Próby skrawania przeprowadzono na tokarce Mazak Integrex 200-IV wyposażonej w system podawania cieczy pod wysokim ciśnieniem. Opracowano plan badań według metody Taguchi’ego [5] dla trzech zmiennych tj. głębokości skrawania (a_p) i ciśnienia (p) o dwóch poziomach wartości oraz posuwu (f) o czterech poziomach wartości. Prędkość skrawania była stała i równa $v_c = 50$ m/min.

Dla każdej próby skrawania realizowano ocenę i klasyfikację formy wiórów. W Tabeli 5 przedstawiono wióry uzyskane w poszczególnych próbach skrawania.

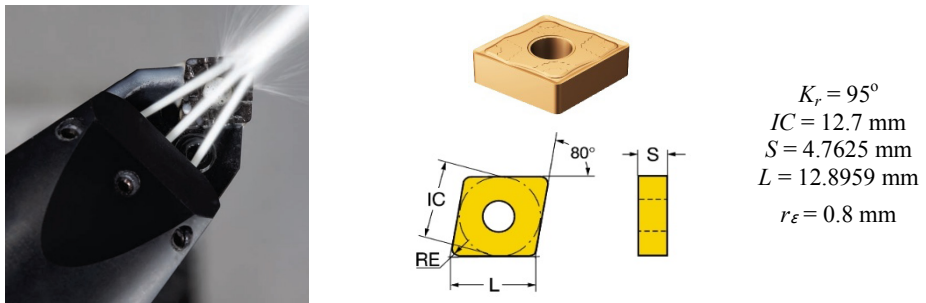
W zależności od formy i liczby wiórów przyjęto wartość współczynnika dla poszczególnych wiórów o wadze z zakresu $<0;1>$, gdzie “0” opisuje korzystną postać wióra i “1” niekorzystną postać wióra. Współczynnik oznaczono jako W_{cfc} i wyznaczano go dla stałego czasu skrawania równego $t = 10$ s według wzoru (1):

$$W_{cfc} = \frac{i_{wn}}{i_w} \quad (1)$$

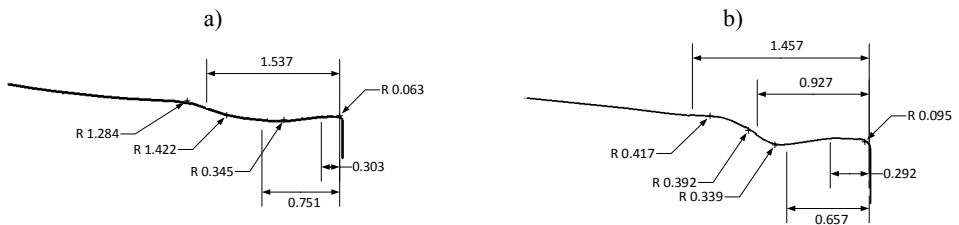
gdzie i_{wn} – liczba wiórów niekorzystnych, i_w – całkowita liczba wiórów.

Przyjęte parametry skrawania przedstawiono w Tabeli 2 a wyniki zaprezentowano w Tabeli 3. Zgodnie z koncepcją metody Taguchiego, w celu określenia współczynnika S/N oraz przeprowadzenia analizy ANOVA przyjęto osiem układów planu badań doświadczalnych. W celu określenia optymalnego zestawu parametrów skrawania najbardziej wpływającego na postać wiórów przyjęto strategię (2) „najniższy - najlepszy”.

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$



Rys. 1. Oprapka C6-PCMNN-00115-12HP i płytka CNMG 12 04 08-SMC 1115 do toczenia z systemem HPC firmy Sandvik Coromant



Rys. 2. Zmierzony wymiary badanego zwijacza wiórów dla głębokości skrawania a) $a_p = 1 \text{ mm}$, b) $a_p = 3 \text{ mm}$

Tabela 1. Skład chemiczny stopu tytanu (Ti6Al4V)

Material	Al	Fe	O	Ti	V
Ti-6Al-4V	6	0.25	0.20	90	4

Tabela 2. Parametry skrawania

Symbol	Parametr	Wartość			
		A	Posuw f [mm/obr]	0.15	0.20
B	Głębokość skrawania a_p [mm]	1.0		3.0	
C	Ciśnienie cieczy obróbkowej p [bar]	7		70	

W Tabeli 3 przedstawiono rzeczywiste wartości parametrów skrawania dla przyjętego planu eksperymentu oraz średnie wartości współczynnika klasyfikacji wiórów W_{cfc} . Ponadto przedstawiono obliczone wartości W_{cfc_obl} uzyskane na podstawie analizy matematycznej. Uzyskano współczynnik $R^2 = 95.89\%$ a wyliczone wartości współczynnika W_{cfc_obl} uzyskano z błędem nieprzekraczającym wartości $\delta = \pm 10\%$. Z przeprowadzonej analizy wynika, że optymalnymi parametrami skrawania ze względu na uzyskiwaną postać wióra są parametry stosowane w próbie 7 ($f = 0.3$ mm/obr, $a_p = 1$ mm, $p = 70$ bar). Należy zauważyć (rys. 3), że stosowanie wysokiego ciśnienia wpływa w sposób najbardziej istotny na uzyskiwaną postać wiórów. We wszystkich próbach skrawania z zastosowaniem HPC uzyskano wysokie wartości współczynnika S/N oraz korzystną postać wiórów. Równanie regresji liniowej dla współczynnika W_{cfc_obl} :

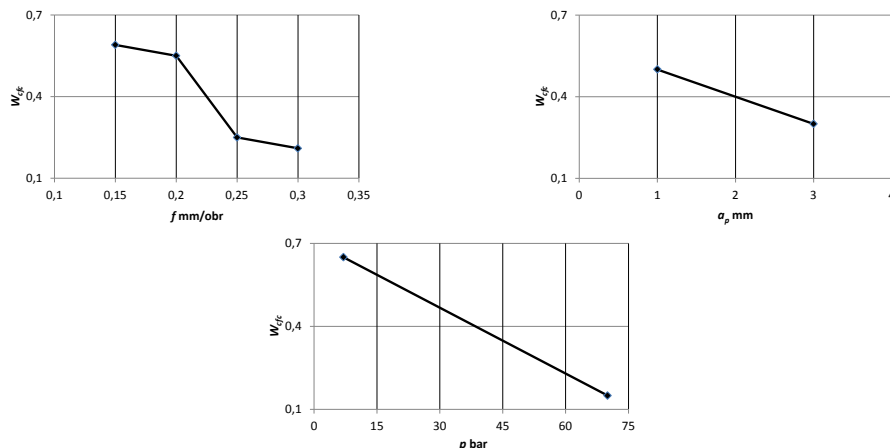
$$W_{cfc_obl} = 1.69 - 3.01 \cdot f - 0.131 \cdot a_p - 0.00869 \cdot p \quad (3)$$

Tabela 3. Wyniki doświadczeń

No.	Wartość zakodowana			Wartość rzeczywista			Klasyfikacja formy wiórów (współczynnik) W_{cfc}	S/N [dB]	Wartość wyliczona W_{cfc_obl}
	A	B	C	f	a_p	p			
1.	1	1	1	0.15	1.0	7	1.00	0.00	1.05
2.	1	2	2	0.15	3.0	70	0.20	13.97	0.24
3.	2	1	1	0.20	1.0	7	1.00	0.00	0.90
4.	2	2	2	0.20	3.0	70	0.18	14.89	0.09
5.	3	1	2	0.25	1.0	70	0.10	19.97	0.20
6.	3	2	1	0.25	3.0	7	0.396	7.99	0.48
7.	4	1	2	0.30	1.0	70	0.075	22.49	0.05
8.	4	2	1	0.30	3.0	7	0.35	9.11	0.33

Tabela 4. Analiza wariancji dla formy wiórów w obróbce stopu tytanu Ti6Al4V przeprowadzona w programie MiniTab

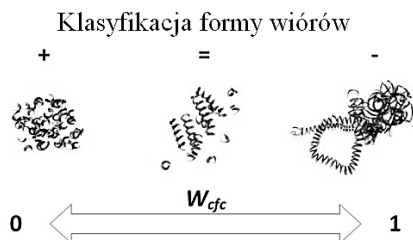
Source	DoF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	3	0.267	0.267	0.089	819.6	0.001
B	1	0.137	0.137	0.137	1264.0	0.001
C	1	0.600	0.600	0.600	5524.6	0.000
Residual Error	2	0.0002	0.0002	0.0001		
Total	7	1.005				



Rys. 3. Wpływ parametrów skrawania na współczynnik opisujący formę wiórów









Na rys. 4 przedstawiono schematycznie sposób klasyfikacji wiórów oraz określania wartości współczynnika W_{fc} . Tabela 5 prezentuje fotografie wiórów uzyskanych w poszczególnych testach wraz z klasyfikacją ich formy. Przyjęto następujące oznaczenia:

- "+" – wióry korzystne
- "-" – wióry niekorzystne
- "=" – wióry akceptowalne.

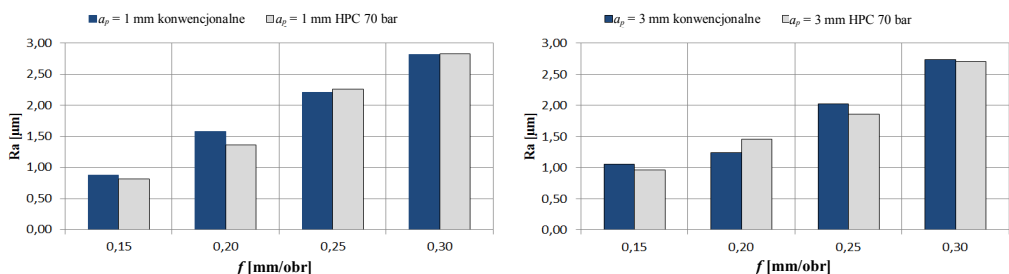


Rys. 4. Współczynnik klasyfikacji formy wiórów

Tabela 5. Klasyfikacja wiórów w poszczególnych próbach

Numer próby	Numer próby i wartości parametrów skrawania i współczynnika W_{cfc}			
	1	2	3	4
f	0.15	0.15	0.20	0.20
a_p	1.0	3.0	1.0	3.0
p	7	70	7	70
Klasyfikacja wiórów	-	+	-	+
Współczynnik W_{cfc}	1.0	0.2	1.0	0.18
				
Numer próby	5	6	7	8
f	0.25	0.25	0.30	0.30
a_p	1.0	3.0	1.0	3.0
p	70	7	70	7
Klasyfikacja wiórów	+	0	+	0
Współczynnik W_{cfc}	0.1	0.39	0.075	0.35
				

Należy zauważyć, że w próbach skrawaniem bez stosowania wysokiego ciśnienia forma wiórów zmienia się wraz ze wzrostem wartości posuwu. Z rys. 3 można odczytać, że dla wartości posuwu większych od $f = 0.2$ mm/obr postać wiórów zmienia się z niekorzystnej na dopuszczalną. Wynika z tego wniosek, że czynnikiem decydującym o wyborze sposobu obróbki (zalewowe lub z HPC) może być kryterium jakości powierzchni, np. opisane parametrem chropowatości powierzchni a więc kryterium sposobu obróbki jako wykończeniowej lub zgrubnej. Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiaru wartości chropowatości R_a w funkcji posuwu dla przypadku toczenia z zastosowaniem chłodzenia zalewowego i HPC.



Rys. 5. Chropowość powierzchni

W pomiarów wynika, że stosowanie systemu HPC nie wpływa istotnie na wartość parametru chropowości powierzchni. Do podobnych wniosków doszli autorzy prac [1,2,7].

3. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań toczenia stopu tytanu Ti6Al4V z ciśnieniem ciecży obróbkowej równym 7 i 70 bar. Zastosowana wagowa metoda przypisania wartości współczynnika W_{cfc} wraz z metodą Taguchi'ego daje dobre rezultaty w doborze optymalnych parametrów skrawania ze względu na uzyskiwaną postać wiórów. Analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że optymalnym obszarem zastosowania systemu HPC przy toczeniu stopu tytanu Ti6Al4V jest obróbka wykończeniowa dla niskich wartości posuwu (poniżej $f = 0.2$ mm/obr). Dla wyższych wartości posuwu i głębokości skrawania efektywność stosowania HPC do wspomagania łamania wiórów maleje i rozwiązanie to może okazać się zbyt kosztownym.

LITERATURA

- [1] Da Silva R.B. et al, *Tool life and wear mechanism in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures*. W: Journal of Materials Processing Technology 213, 2013, 1459-1464.
- [2] Ezugwu E.O., Bonney J., Da Silva R.B., Cakir O., *Surface integrity of finished turned Ti-6Al-4V alloy with PCD tools using conventional and high pressure coolant supplies*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, 2007, 884-891.
- [3] Ezugwu E.O., Bonney J., *Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools*. W: Journal of Materials Processing Technology 153-154, 2004, 1045-1050.
- [4] Kaminski J., Alvelid B., *Temperature reduction in water-jet assisted turning*. W: Journal of Materials Processing Technology 106, 2000, 68-73.
- [5] Nalbant M., Gökçaya H., Sur G., *Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning*. W: Materials and Design 28, 2007, 1379-1385.
- [6] OCZOŚ K.E., *Zwiększenie efektywności procesów skrawania stopów tytanu*. W: Mechanik vol.10, 2003, 543 - 550.

- [7] Palanisamy S., McDonald S.D., Dargush M.S., *Effects of coolant pressure on chip formation while turning Ti6AlV alloy*. W: Int. Journal of Machine Tools&Manufacture 49, 2009, 739-743.
- [8] SANDVIK Coromant - *Application Guide: Aerospace Engine*, 2004.
- [9] SANDVIK Coromant – *Narzędzia tokarskie*, 2011.
- [10] Zębała W., Słodki B., *Cutting data correction in Inconel 718 turning*. W: Int J Adv Manuf Tech 65, 2013, 881-893.