

# Tool wear evaluation based on vibration analysis during milling of MMC using diamond coated end mills

## Ocena zużycia frezów z powłoką diamentową na podstawie analizy drgań podczas frezowania kompozytu MMC

MARTYNA WICIAK-PIKUŁA  
PAWEŁ TWARDOWSKI  
AGATA FELUSIAK  
SZYMON ORŁOWSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2020.1.2>

The aim of the research was to analyze the wear of the end mills based on the measurement of mechanical vibration accelerations. The  $VB_B$  index was used as the tool wear criterion, which was measured until a specific maximum wear was obtained. The paper compares the tool wear values at different cutting speeds and determines the possibility of predicting the state of the tool wear based on the measurements of mechanical vibration accelerations.

**KEYWORDS:** metal matrix composite, tool wear monitoring, mechanical vibrations analysis

Celem badań była analiza zużycia frezów na podstawie pomiaru przyspieszeń drgań mechanicznych. Jako kryterium zużycia ostrza przyjęto wskaźnik  $VB_B$ , który mierzono aż do momentu uzyskania określonego stopienia. W pracy porównano wartości zużycia przy różnych prędkościach skrawania oraz określono możliwość przewidywania stanu ostrza na podstawie pomiarów przyspieszeń drgań mechanicznych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** kompozyt MMC, monitorowanie zużycia ostrza, analiza drgań mechanicznych

### Wprowadzenie

Kompozyty metalowo-ceramiczne (*metal matrix composites*) to materiały konstrukcyjne, których osnową jest zazwyczaj miękki i ciągliwy stop odlewniczy lub stop aluminium do obróbki plastycznej, natomiast wzmocnienie ma formę twardych i kruchych dodatków ceramicznych. Ze względu na strukturę takie kompozyty należą do grupy materiałów trudnoskrawalnych, a dzięki swoim właściwościom mechanicznym są stosowane w przemyśle lotniczym, okrętowym czy samochodowym. Największymi zaletami tych materiałów są zwłaszcza wysoka wytrzymałość i sztywność, które w dużym stopniu zależą od rodzaju umocnienia oraz zawartości twardych cząstek [1–4].

Duża odporność na zużycie ścierne, wynikająca ze wzmocnienia w kompozytach MMC, jest związana z utrudnioną obróbką mechaniczną tych materiałów. Konieczny jest odpowiedni dobór materiału narzędziowego, ponieważ występowanie w kompozytach twardych cząstek prowadzi do przyspieszonego zuży-

wania się narzędzi skrawających. Oprócz tego konieczne jest określenie odpowiednich parametrów obróbki (prędkości skrawania, posuwu, głębokości skrawania), co pozwoli na wydłużenie żywotności narzędzia [5, 6].

Podczas obróbki kompozytów metalowo-ceramicznych najczęściej zauważalne jest zużycie abrazyjne i adhezyjne, spowodowane przenikaniem twardych cząstek ceramicznych do materiału ostrza. Skutkiem zużycia ostrza może być nalepianie się twardych cząstek na krawędzi skrawającej narzędzia lub zrywanie cząstek materiału narzędziowego i powstawanie wyżłobień [6]. W materiałach z cząstkami ceramicznymi PMMCs (*particulate metal matrix composites*) powstaje narost, który jest barierą ochronną dla powierzchni natarcia krawędzi skrawającej. Jednym z przykładów jest praca [7], w której przedstawiono formowanie narostu podczas frezowania kompozytu aluminiowego z wtrąceniami węgla boru  $B_4C$ . Pojawianie się narostu na krawędzi skrawającej w dużej mierze zależy od prędkości skrawania, do czego przyczynia się wzrost temperatury w strefie skrawania w efekcie pojawienia się sił tarcia pomiędzy materiałem obrabianym a narzędziem. Im mniejsza prędkość skrawania, tym niższa temperatura w strefie skrawania, a usuwanie narostu w takich warunkach staje się trudniejsze.

Współcześnie wiele prac koncentruje się na monitorowaniu zużycia narzędzi skrawających, wykonanych z różnych materiałów narzędziowych, na podstawie pomiarów pośrednich, tj. pomiaru sił skrawania, drgań mechanicznych czy emisji akustycznej, lub na podstawie oceny morfologii wiórów [8–10]. Ocena wielkości, które są skorelowane ze zużyciem ostrza, jest ważna z tego względu, że umożliwia wymianę narzędzia przed wystąpieniem krytycznego stopienia ostrza (KSO). W obróbce materiałów trudnoskrawalnych jest to niezwykle istotne, ponieważ żywotność materiału narzędzi jest znacznie mniejsza w porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi.

Celem przeprowadzonych badań była analiza stanu ostrzy z powłoką diamentową na podstawie pomiaru drgań podczas frezowania kompozytu metalowo-ceramicznego z różnymi prędkościami skrawania: 500, 700 oraz 900 m/min.

\* Mgr inż. Martyna Wiciak-Pikuła, [martyna.r.wiciak@doctorate.put.poznan.pl](mailto:martyna.r.wiciak@doctorate.put.poznan.pl), <https://orcid.org/0000-0003-2648-7091> – Politechnika Poznańska, Poznań, Polska  
Dr hab. inż. Paweł Twardowski, prof. nadzw. PP, [pawel.twardowski@put.poznan.pl](mailto:pawel.twardowski@put.poznan.pl), <https://orcid.org/0000-0002-1823-6279> – Politechnika Poznańska, Poznań, Polska  
Mgr inż. Agata Felusiak, [agata.z.felusiak@doctorate.put.poznan.pl](mailto:agata.z.felusiak@doctorate.put.poznan.pl), <https://orcid.org/0000-0002-4927-4120> – Politechnika Poznańska, Poznań, Polska  
Mgr inż. Szymon Orłowski – ITA spółka z ograniczoną odpowiedzialnością sp.k., Skórzewo, Polska

## Zakres i metodyka badań

Do badań wybrano popularny stop aluminiowo-ceramiczny z wtrąceniami węgla krzemowego SiC o zawartości ok. 10%. Frezowanie walcowo-czołowe przeprowadzono z zastosowaniem frezów monolitycznych z powłoką diamentową, naniesioną metodą CVD. Wybrano frezy trzyostrzowe o średnicy 10 mm.

Zmiennym parametrem podczas badań była prędkość skrawania  $v_c$ : 500, 700 i 900 m/min. Pozostałe parametry były stałe: głębokość skrawania  $a_p = 8$  mm, szerokość skrawania  $a_e = 0,3$  mm, posuw na ostrze  $f_z = 0,05$  mm/ostrze.

Podczas frezowania mierzono przyspieszenia drgań za pomocą piezoelektrycznego czujnika przyspieszeń drgań w celu przeprowadzenia późniejszej analizy stanu ostrza. Pomiar przyspieszeń drgań odbywał się w trzech kierunkach:

- wzdłuż osi  $X$  – składowa zgodna z posuwem  $A_p$ ,
- wzdłuż osi  $Y$  – posuwowa normalna  $A_{fn}$ ,
- wzdłuż osi  $Z$  – wzdłuż kierunku działania siły odporowej  $A_p$ .

Schemat toru pomiarowego zastosowanego podczas badań przedstawiono na rys. 1.

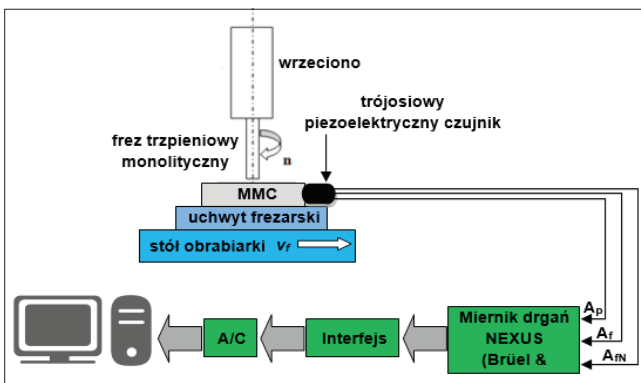


Fig. 1. Diagram of the measuring circuit  
Rys. 1. Schemat toru pomiarowego

Po określonej liczbie przejść mierzono szerokość starcia krawędzi skrawającej na powierzchni przyłożenia (wskaźnik zużycia ostrza  $VB_B$ ). Przyjęto wartość kryterium stępienia ostrza  $VB_B = 0,3$  mm. Na rys. 2 przedstawiono przykład pomiaru szerokości starcia na powierzchni przyłożenia jednego z zastosowanych narzędzi. Wartość kryterium w tym przypadku została znacznie przekroczona:  $VB_B > 0,3$ .

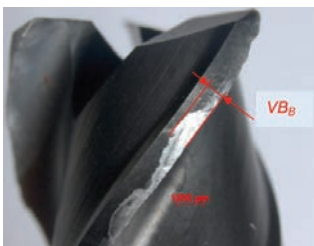


Fig. 2. Measurement of  $VB_B$  wear width on the flank face  
Rys. 2. Pomiar szerokości starcia  $VB_B$  na powierzchni przyłożenia

## Analiza zużycia ostrza

Na podstawie danych z pomiarów szerokości starcia  $VB_B$  przedstawiono zużycie ostrza w funkcji czasu skrawania  $t_s$  dla zastosowanych frezów (rys. 3).

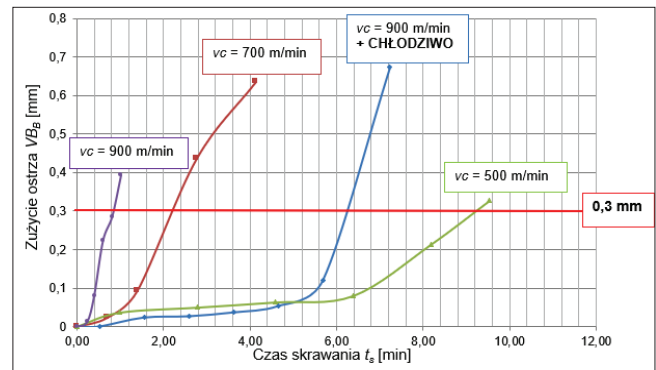


Fig. 3. Dependence of  $VB_B$  tool wear as a function of cutting time  $t_s$   
Rys. 3. Zależność zużycia ostrza  $VB_B$  w funkcji czasu skrawania  $t_s$

Przeprowadzono jedną dodatkową próbę z cieczą chłodziwo-smarującą dla maksymalnej wybranej prędkości skrawania  $v_c = 900$  m/min w celu porównania trwałości ostrza. Na rys. 4 pokazano porównanie uzyskanej trwałości ostrza przy różnych prędkościach skrawania, obliczonej dla kryterium stępienia  $VB_B = 0,3$  mm.

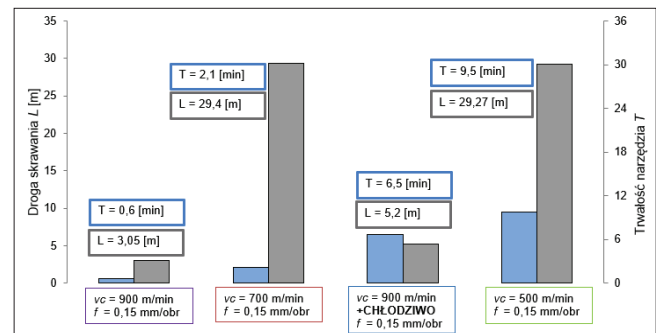


Fig. 4. Summary of  $T$  tool life for each tool with a limit wear criterion of 0.3 mm  
Rys. 4. Zestawienie trwałości ostrza  $T$  dla każdego narzędzia przy kryterium granicznym zużycia ostrza 0,3 mm

## Analiza przebiegu drgań w dziedzinie częstotliwości

Analiza drgań w funkcji częstotliwości jest często stosowana w diagnozowaniu zużycia ostrzy skrawających. Analiza ta polegała na przedstawieniu wartości przyspieszeń drgań mechanicznych w funkcji częstotliwości.

Dzięki oprogramowaniu „Analizator” możliwe było wygenerowanie przebiegów drgań i odczytanie wartości przyspieszeń tych drgań dla charakterystycznych częstotliwości danego procesu.

W pierwszej kolejności wyliczono częstotliwość zależną od prędkości obrotowej:

$$f_{01} = \frac{n_1}{60} = \frac{28\,648}{60} = 477,5 \text{ Hz} \quad (1)$$

gdzie:  $n_1$  – prędkość obrotowa wrzeciona zastosowana w badaniach [obr/min] dla prędkości  $v_c = 900$  m/min.

Aby wyznaczyć kolejną częstotliwość charakterystyczną dla procesu, uwzględniono liczbę ostrzy skrawających narzędzi  $z = 3$  oraz obliczono częstotliwość poszukiwaną w widmie  $f_1$  i drugą harmoniczną  $2f_1$ :

$$f_1 = z \cdot f_{01} = 3 \cdot 477,5 \approx 1433 \text{ Hz} \quad (2)$$

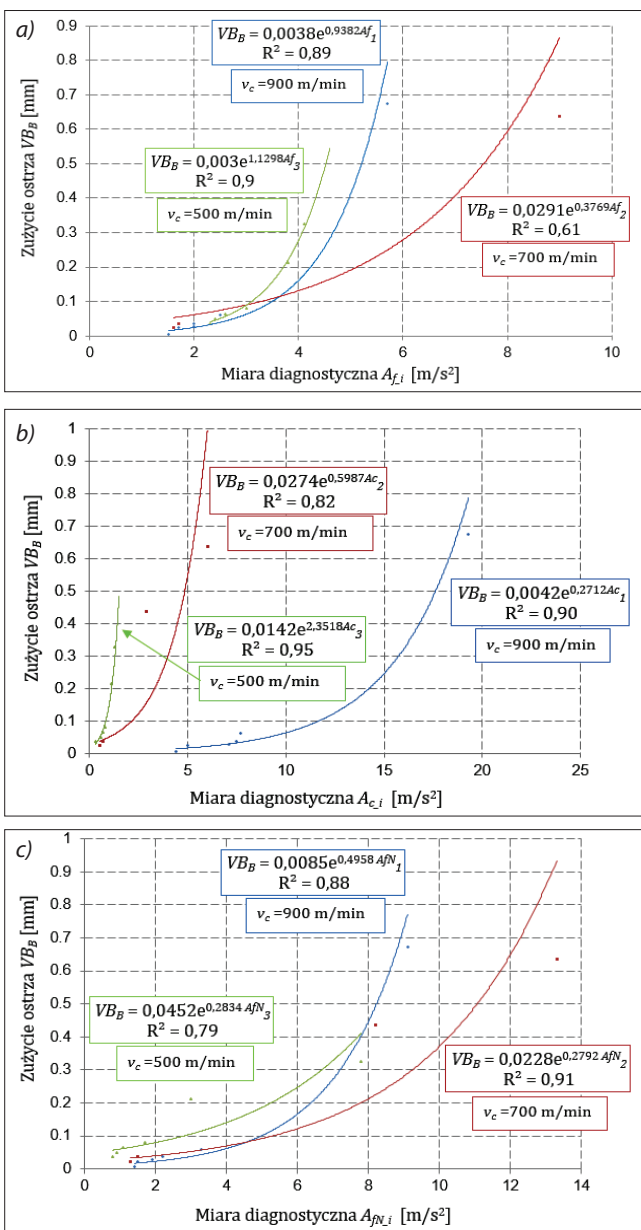
$$2f_1 = 2 \cdot f_1 = 2 \cdot 1433 = 866 \text{ Hz} \quad (3)$$

gdzie:  $z$  – liczba ostrzy frezu.

Na rys. 5 przedstawiono zależność między szerokością starcia na powierzchni przyłożenia  $VB_B$  a wartością przyspieszeń drgań we wszystkich trzech rozpatrywanych kierunkach.

Zależność opracowano i przedstawiono jako funkcję potęgową  $VB_B = a \cdot e^{b \cdot A_i}$ , natomiast współczynnik  $R^2$  określa zgodność wyniku z przyjętymi założeniami.

Na rysunku zestawiono dane uzyskane z badań przeprowadzonych dla trzech prędkości skrawania. Widoczny duży rozrzut wyników można tłumaczyć nierównomiernością rozkładu cząstek ceramicznych w materiale MMC, co może mieć duży wpływ na pojawianie się losowych wartości przyspieszeń drgań podczas frezowania.



Rys. 5. Zestawienie zużycia ostrza  $VB_B$  w funkcji miar diagnostycznych przy różnych prędkościach skrawania: a) dla miary  $A_{f_i}$ , b) dla miary  $A_{c_i}$  oraz c) dla miary  $A_{n_i}$

## Podsumowanie i wnioski

Na podstawie badań można sformułować następujące wnioski.

Analizując trwałość ostrza poszczególnych narzędzi stosowanych przy różnych prędkościach skrawania, można stwierdzić, że przy prędkości skrawania  $v_c = 500 \text{ m/min}$  uzyskano najlepszą trwałość ostrza – ok. 4,5-krotnie większą niż przy prędkości  $v_c = 700 \text{ m/min}$ . Najmniejszą trwałość uzyskano podczas frezowania z maksymalną prędkością skrawania  $v_c = 900 \text{ m/min}$ , zatem z punktu widzenia zużycia ostrza stosowanie tej prędkości skrawania bez chłodziwa nie daje zadowalających efektów. Dzięki zastosowaniu chłodzenia przy tej prędkości uzyskano ok. 10-krotnie większą trwałość ostrza.

Analiza przebiegów drgań w dziedzinie częstotliwości pozwoliła na określenie kierunku pomiaru, który daje najkorzystniejszy efekt pod względem monitorowania. Najlepsze rezultaty i najkorzystniejsze współczynniki korelacji uzyskano przy analizie miar  $A_c$  oraz  $A_{n_i}$ . Można stwierdzić, że w tych kierunkach funkcja potęgowa ma największe dopasowanie, a co za tym idzie – informacje o zużyciu ostrza są najbardziej zbliżone do rzeczywistych.

Podsumowując uzyskane wyniki, monitorowanie frezowania trudnoskrawalnych materiałów, jakimi są kompozyty MMCs, na podstawie drgań mechanicznych przynosi zadowalające efekty. Problemem może być pojawianie się nierównomiernego rozkładu cząstek ceramicznych w materiale obrabianym, co prowadzi do zwiększonego zużycia narzędzia oraz niespodziewanego nagłego wykruszania się krawędzi skrawającej. Zastosowanie pomiarów przyspieszeń drgań mechanicznych pozwala na skorelowanie ich ze zużyciem ostrza.

## LITERATURA

- [1] Arun Premnath A., Alwarsamy T., Rajmohan T. "Experimental investigation and optimization of process parameters in milling of hybrid metal matrix composites". *Materials and Manufacturing Processes*. 27, 10 (2012): 1035–1044.
- [2] Gururaja S., Ramulu M., Pedersen W. "Machining of MMCs: a review". *Machining Science and Technology*. 17, 1 (2013): 41–73.
- [3] Han J., Hao X., Li L., Wu Q., He N. "Milling of high volume fraction SiCp/Al composite using PCD tools with different structures of tool edges and grain sizes". *Int. Journal Adv. Manuf. Technol.* 92 (2017): 1875–1882.
- [4] Wiciak M., Twardowski P., Wojciechowski S. "Comparison of various tool wear prediction methods during end milling of Metal Matrix Composite". *Archives of Mechanical Technology and Materials*. 38, 1 (2018): 1–7.
- [5] Przystacki D., Chwalczyk T. "Materiały narzędziowe stosowane podczas skrawania kompozytów metalowo-ceramicznych". *Mechanik*. 8–9 (2013): 339–344.
- [6] Tomadi S.H., Ghani J.A., Mas Ayu H., Daud R. "Tool wear of uncoated carbide and PVD TiAlN coated carbide tools in end milling of AlSi/AlN metal matrix composite". *Int. Journal of Advanced and Applied Sciences*. 4, 9 (2017): 150–155.
- [7] Ubeyli M., Acir A., Serdar Karakas M., Ogel B. "Effect of feed rate on tool wear in milling of Al-4%Cu/B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> Composite". *Materials and Manufacturing Processes*. 23, 8 (2008): 866–870.
- [8] Kieruj P., Przystacki D., Chwalczyk T. "Analiza drgań podczas toczenia węglików spiekanych napawanych laserowo". *Mechanik*. 8–9 (2016): 1116–1117.
- [9] Felusiak A., Twardowski P. "Diagnosis of edge condition based on force measurement during milling of composites". *Archives of Mechanical Technology and Materials*. 38, 1 (2018): 8–14.
- [10] Caggiano A. "Tool Wear Prediction in Ti-6Al-4V Machining through Multiple Sensor Monitoring and PCA Features Pattern Recognition". *Sensors MDPI*. 18, 3 (2018): 823–1–14.