

Analiza sił oraz drgań podczas frezowania kompozytu metalowo-ceramicznego

Analysis of forces and vibrations during milling of a metal-ceramic composite

NATALIA ZNOJKIEWICZ
MAREK MADAJEWSKI
PAWEŁ TWARDOWSKI
SZYMON WOJCIECHOWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.127>

Przeanalizowano składowe siły całkowitej oraz drgań podczas frezowania kompozytu metalowo-ceramicznego F3S.10S firmy Duralcan™ frezami, których ostrza są wykonane z dwóch materiałów: PCD oraz CBN. Badanie przeprowadzono przy zmienianych parametrach frezowania, tzn. różnych prędkościach skrawania v_c i posuwu f_z . Pomiary drgań i sił wykonywano w trzech kierunkach: posuwowym (F_f , A_f), posuwowym normalnym (F_{fn} , A_{fn}) oraz odporowym (F_p , A_p). Z otrzymanych przebiegów sił i drgań wyznaczono miary punktowe, takie jak wartości średniokwadratowe. Analizy przeprowadzono zarówno w funkcji czasu, jak i częstotliwości. Analiza w głównej mierze dotyczyła wpływu prędkości skrawania i posuwu na poziom amplitud drgań i sił. Dodatkowo przeprowadzono analizę częstotliwościową.

SŁOWA KLUCZOWE: frezowanie, kompozyt, siły, drgania

Presented is the analysis of the cutting forces and vibrations during milling of the F3S.10S Duralcan™ metal-ceramic composite, using milling cutters made of two materials: PCD and CBN. The test was carried out with variable milling parameters, i.e. cutting speeds v_c and feed f_z . Measurements of vibrations and forces were made in three directions: feed (F_f , A_f), feed normal (F_{fn} , A_{fn}), and resistant (F_p , A_p). The root mean square values were determined from the received forces and vibrations. The analysis was made both as a function of time and frequency. The analysis mainly concerned the impact of the cutting speed and the feed on the level of the amplitudes of the vibrations and forces. An additional frequency analysis was carried out.

KEYWORDS: milling, composite, forces, vibrations

W wielu dziedzinach przemysłu poszukuje się coraz to nowszych materiałów konstrukcyjnych. Najintensywniej rozwijaną wśród nich grupą są kompozyty, złożone z dwóch lub więcej materiałów. Łączą one odmienne właściwości osnowy i wzmocnienia [2].

Spośród metalowych materiałów kompozytowych coraz większe znaczenie w pracach naukowo-badawczych i wdrożeniowych przypisuje się odlewającym kompozytom o osnowie ze stopów aluminium (Al-Si) zbrojonych cząsteczkami ceramicznymi grafitu, SiC oraz Al_2O_3 [1, 7, 9].

Właściwości materiałów kompozytowych zależą od ich przeznaczenia [5, 7]. Obecnie najczęściej kompozytów znajduje zastosowanie w branży transportowej [7].

Obróbka kompozytów MMC (*metal matrix composites*) stanowi poważne wyzwanie, ponieważ powoduje szybkie zużycie narzędzia, a jej koszty są wysokie. Pękanie i odrywanie cząstek wzmocniających wpływa na wydajność narzędzia, dlatego do oceny procesu skrawania można wykorzystać przewidywanie siły skrawania oraz drgań [3, 6].

W artykule [3] przedstawiono model siły oparty na energii, opracowany z myślą o skrawaniu ortogonalnym kompozytów MMC. Wyniki wykazały zgodność między przewidywanymi i zmierzonymi siłami skrawania. Zaproponowany model opiera się na kwantyfikacji różnych wkładów energii zużytych podczas procesu skrawania [3].

Z kolei autor pracy [8] zaproponował dokładny model siły skrawania zastosowany do wykończeniowego frezowania frezem kulistym. Oprócz sił ważnym aspektem wydaje się analiza drgań mechanicznych. W pracy [4] pokazano system przetestowany doświadczalnie, aby wykazać zmniejszenie siły dynamicznej w wyniku wibracji. Przeprowadzono rozległe testy w celu walidacji wydajności systemu pod względem parametrów o praktycznym znaczeniu, takich jak poprawa wykończenia powierzchni i zwiększenie trwałości narzędzia.

Z przeglądu literatury wynika, że niewiele badań dotyczących skrawania kompozytów MMC skupia się na analizie dynamiki podczas frezowania precyzyjnego. W związku z tym w niniejszej pracy dokonano oceny składowych siły całkowitej i drgań z uwzględnieniem miar statystycznych i analiz widmowych sygnału.

Cel, zakres i metodyka badań

Celem pracy była analiza sił i drgań podczas frezowania kompozytu metalowo-ceramicznego, dla różnych parametrów frezowania.

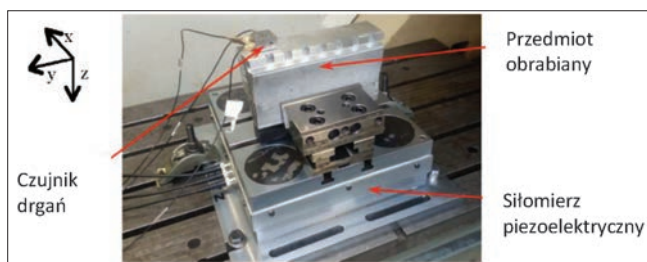
Materiałem obrabianym był kompozyt aluminiowo-ceramiczny F3S.10S firmy Duralcan o osnowie ze stopu aluminium zbrojonego cząsteczkami SiC. Najbardziej użytecznymi cechami tych kompozytów są ich wysoka wytrzymałość, sztywność oraz odporność na ścieranie.

Sposób mocowania materiału obrabianego pokazano na rys. 1. Badania przeprowadzono na trzyosiowym centrum frezarskim firmy DECKEL MAHO model DMC 70V Hi-Dyn o maksymalnej prędkości obrotowej $n = 30\,000$ obr/min.

Mierzona była zmiana sił i drgań w zależności od prędkości obrotowej i posuwu, a ich wartości stosowane podczas frezowania przedstawiono w tabl. I i II.

Jako narzędzia skrawające zastosowano dwa monolityczne frezy walcowo-czołowe (tabl. III) mocowane w oprawce termokurczliwej. Pomiaru składowych siły całkowitej dokonano z zastosowaniem trójskładowej platformy dynamometrycznej połączonej ze wzmacniaczami ładunku, przetwornikiem analogowo-cyfrowym oraz komputerem PC wyposażonym w program do akwizycji i przeważania danych. Drgania zmierzono trójskładowym akcelerometrem piezoelektrycznym zamocowanym do przedmiotu obrabianego. Stanowisko do pomiaru drgań wyposażono w czujnik drgań, wzmacniacz ładunku firmy Brüel&Kjær oraz komputer PC.

* Mgr inż. Natalia Znojkiwicz (natalia.w.znojkiwicz@doctora-te.put.poznan.pl), mgr inż. Marek Madajewski (marek.w.madajewski@doctorate.put.poznan.pl), dr hab. inż. Paweł Twardowski (pawel.twardowski@put.poznan.pl), dr inż. Szymon Wojciechowski (szymon.wojciechowski@put.poznan.pl) – Politechnika Poznańska



Rys. 1. Sposób mocowania materiału obrabianego

TABLICA I. Parametry przyjęte podczas frezowania przy stałym posuwie $f = 0,1$ mm/obr

PCD/CBN	v_c , m/min	n , obr/min	v_f , mm/min
1	50	1 591	159
2	100	3 182	318
3	200	6 364	636
4	300	9 546	955
5	400	12 728	1 273
6	500	15 910	1 591
7	600	19 093	1 909
8	700	22 275	2 227

TABLICA II. Parametry przyjęte podczas frezowania przy stałej prędkości skrawania $v_c = 500$ m/min

PCD/CBN	f_t , mm/obr	f_z , mm/ostrze	v_f , mm/min
1	0,01	0,0049	159
2	0,03	0,015	477
3	0,06	0,030	955
4	0,09	0,045	1 432
5	0,12	0,060	1 910
6	0,18	0,090	2 865
7	0,30	0,150	4 775
8	0,50	0,250	7 958

TABLICA III. Zastosowane frezy

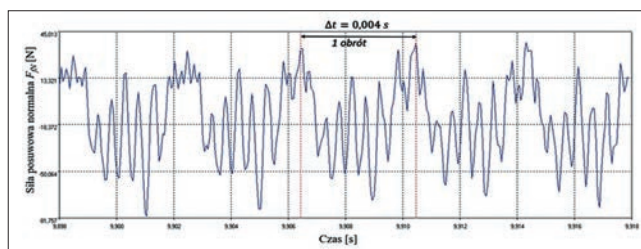
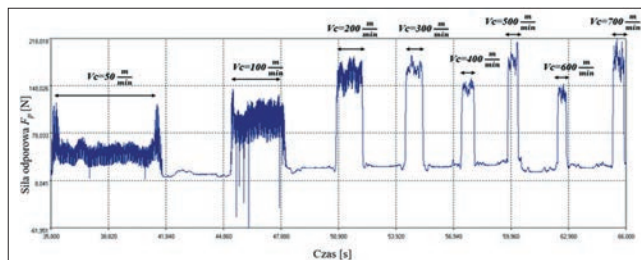
Frez węglkowy z powłoką diamentową PCD: $d = 10$ mm $z = 6$	
Frez CBN z regularnego azotku boru: $d = 10$ mm $z = 2$	

Podczas badań wartości głębokości skrawania a_p i szerokości skrawania a_e były stałe i wynosiły: $a_p = 10$ mm, $a_e = 0,3$ mm. Pomiary drgań i sił wykonywano w trzech kierunkach: posuwowym (F_t , A_t), posuwowym normalnym (F_{tN} , A_{tN}) oraz odporowym (F_p , A_p). Z otrzymanych przebiegów sił i drgań wyznaczono miary punktowe, takie jak wartości średniokwadratowe RMS (*root mean square*). Analizy dokonano w funkcji czasu i częstotliwości. Analiza w głównej mierze dotyczyła wpływu prędkości skrawania i posuwu na poziom amplitud drgań i sił.

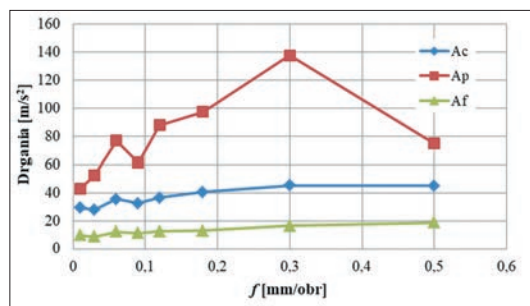
Wyniki badań

■ **Wykresy w funkcji czasu.** Wyniki zostały przedstawione w postaci wykresów sił i drgań w funkcji czasu.

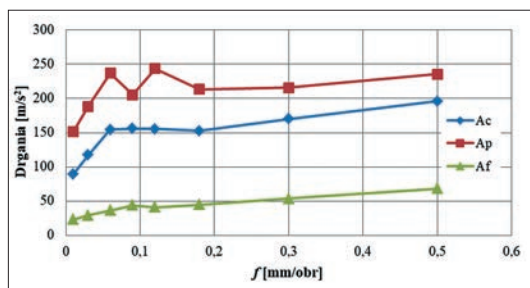
Na rys. 2 pokazano wykres składowej F_{tN} z zaznaczonym przedziałem czasu odpowiadającym jednemu obrotowi narzędzia. Z kolei na rys. 3 przedstawiono wykres przebiegu składowych siły F_p przy różnych prędkościach skrawania dla frezu PCD. Amplitudy składowych sił były odczytywane w każdym przedziale w czasowym dla danej prędkości skrawania.

Rys. 2. Wykres siły posuwowej normalnej F_{tN} w zawężonym przedziale czasu przy posuwie $f = 0,01$ mm/obrRys. 3. Wykres składowej odporowej F_p dla frezu PCD przy różnych prędkościach skrawania (stałe parametry: $a_e = 0,3$ mm, $a_p = 10$ mm, $f = 0,1$ mm/obr, $f_z = 0,02$ mm/ostrze)

■ **Wartości średniokwadratowe sił i drgań.** Otrzymane wartości składowych sił oraz drgań zostały przedstawione na rys. 4–9.



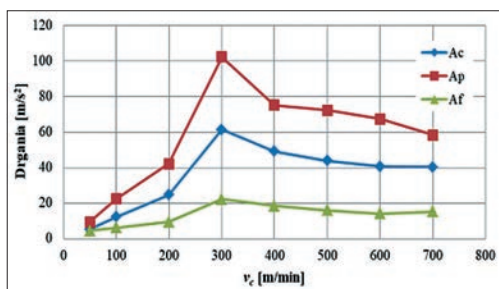
Rys. 4. Wykres wartości średniokwadratowych drgań dla frezu PCD przy stałej prędkości skrawania



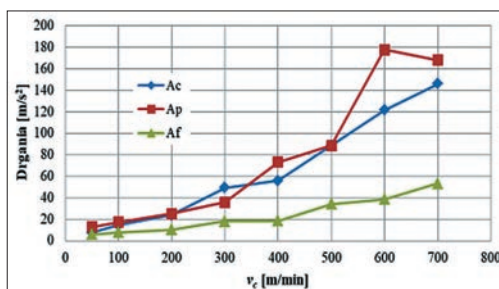
Rys. 5. Wykres wartości średniokwadratowych drgań dla frezu CBN przy stałej prędkości skrawania

Można zauważyć, że najmniejsze wartości amplitud drgań występują przy obróbce frezem z powłoką diamentową PCD. Podobnie jest w przypadku frezu z regularnego azotku boru CBN. Jednak z rys. 5 wynika, że wraz ze wzrostem posuwu wartości drgań osiągają zdecydowanie wyższe amplitudy niż w przypadku frezu z PCD. Największe amplitudy są dla drgań w kierunku odporowym A_p . Najmniejsze wartości, identycznie jak dla frezu z PCD, występują w kierunku Y – posuwowym A_f .

Tak jak przy zmiennym posuwie, także przy zmiennej prędkości skrawania (rys. 6 i 7) amplitudy drgań są mniejsze dla frezu z PCD w porównaniu z frezem z CBN. W przypadku frezu z PCD dla $v_c = 300$ m/min pojawiły się drgania samowzbudne, co skutkowało kilkukrotnym wzrostem amplitud.

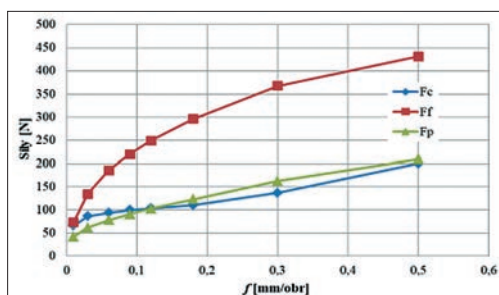


Rys. 6. Wykres wartości średniokwadratowych drgań dla frezu z PCD przy stałym posuwie na obrót

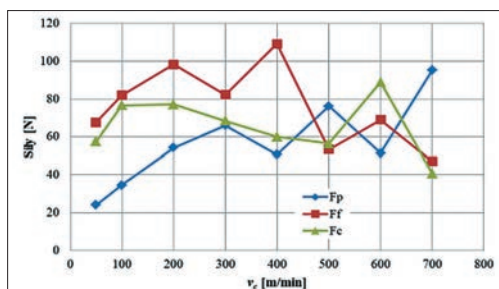


Rys. 7. Wykres wartości średniokwadratowych drgań dla frezu z CBN przy stałym posuwie na obrót

Na rys. 8 i 9 pokazano przykładowe wartości średniokwadratowe dla składowych siły całkowitej. Wraz ze wzrostem posuwu na obrót wartości sił monotonicznie rosną, co jest zgodne z modelami teoretycznymi. Ponadto wartości składowych siły całkowitej są znacznie większe w porównaniu z wynikami dla frezu z PCD.



Rys. 8. Wykres wartości średniokwadratowych sił dla frezu z CBN przy stałym posuwie na obrót



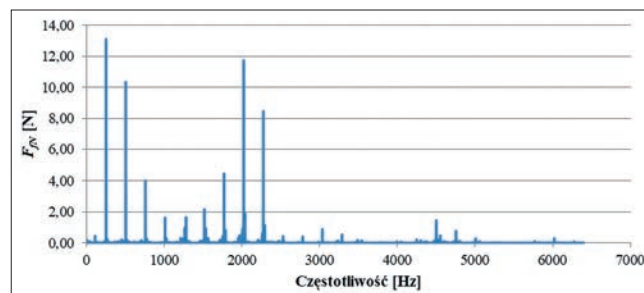
Rys. 9. Wykres wartości średniokwadratowych sił dla frezu z CBN przy stałej prędkości skrawania

Przy zmianie prędkości skrawania (rys. 9) odnotowano niemonotoniczne zmiany amplitud dla wszystkich składowych. Taka sama tendencja wystąpiła dla ostrza z PCD, tzn. przebiegi niemonotoniczne i wartości amplitud były zdecydowanie mniejsze niż dla CBN.

■ **Analiza częstotliwościowa.** Na rys. 10 przedstawiono charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową siły F_{IN} dla frezów z PCD przy stałej prędkości skrawania i posuwie. Amplitudy poszczególnych prążków są kilkukrot-

nie mniejsze dla ostrzy z PCD w porównaniu z ostrzami z CBN, co potwierdza wcześniejsza analiza wartości RMS w dziedzinie czasu. Z kolei charakter widma jest ściśle skorelowany z dwiema podstawowymi częstotliwościami:

- f_o – częstotliwością związaną z prędkością n , $f_o = n/60$,
- f_{oz} – częstotliwością procesu frezowania $f_{oz} = f_o \times z$.



Rys. 10. Składowa F_{IN} dla frezu z PCD przy stałej prędkości skrawania i posuwie $f = 0,01$ mm/obr

We wszystkich analizowanych widmach sił i przyspieszeń drgań największe amplitudy występują dla składowych sygnału o częstotliwościach f_o i f_{oz} oraz ich harmonicznych, co świadczy o zdeteminowaniu przebiegów podstawową kinematyką procesu frezowania.

Podsumowanie

- We wszystkich rozpatrywanych parametrach amplitudy drgań dla kierunku posuwowego A_f są najmniejsze.
- Frezowanie frezem z CBN daje większe amplitudy drgań w porównaniu z frezem z PCD.
- Wzrost prędkości skrawania wywołał nieznaczne obniżenie wartości sił F_f oraz F_{IN} . W przypadku F_p zaobserwowano niewielki wzrost siły wraz ze wzrostem prędkości skrawania.
- Podczas zmiany posuwu z zachowaniem stałej prędkości obrotowej widoczny jest znaczny wpływ na wzrost wszystkich składowych siły całkowitej.
- Analiza częstotliwościowa wykazała, że przebiegi (sygnały) składowych siły całkowitej i składowe przyspieszeń drgań są zdeteminowane głównie przez kinematykę procesu frezowania.

LITERATURA

1. Bienias J., Walczak M., Surowska B., Sobczak J. "Microstructure and corrosion behavior of aluminium Fly ash composites". *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 5, 2 (2003): s. 493–502.
2. Karolczak P., Kowalski M. „Możliwości kształtowania toczeniem metalowych materiałów kompozytowych o zwiększonej zawartości wzmocnienia”. G. Wróbel (red.). *Polimery i kompozyty konstrukcyjne*. Cieszyń: Wydawnictwo Logos Press, 2010. s. 150–157.
3. Kishawy H.A., Kannan S., Balazinski M. "An energy based analytical force model for orthogonal cutting of metal matrix composites". *CIRP Annals*. 53, 1 (2004): s. 91–94.
4. Rashid A., Nicolescu C.M. "Active vibration control in palletised work-holding system for milling". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 46 (2006): s. 1626–1636.
5. Sobczak J. „Metalowe materiały kompozytowe”. Kraków–Warszawa: Wyd. Instytutu Odlewnictwa i Instytutu Transportu Samochodowego (2002).
6. Teti R. "Machining of composite materials". *CIRP Annals*. 51, 2 (2002): s. 611–634.
7. Walczak M., Pieniak D., Bienias J. „Zużycie i struktura powierzchni aluminium kompozytów zbrojonych cząsteczkami SiC w warunkach tarcia technicznie suchego”. *Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*. 13, 7–8 (2012): s. 167–173.
8. Wojciechowski S. "The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 89 (2015): s. 110–123.
9. Vencla A., Bobic I., Arostegui S., Bobic B., Marinkovica A., Babić M. "Structural, mechanical and tribological properties of A356 aluminium alloy reinforced with Al_2O_3 , SiC and SiC +graphite particles". *Journal of Alloys and Compounds*. 506, 2 (2010): s. 631–639.