

Badania doświadczalne stabilności procesu frezowania stopu Inconel X750

Experimental studies of milling process stability of Inconel alloy X750

ANDRZEJ WEREMCZUK
MICHAŁ RUDZIK
RAFAŁ RUSINEK
JERZY WARMIŃSKI*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.602

W trakcie obróbki skrawaniem mogą występować drgania samowzbudne, które mają negatywny wpływ na jej wydajność i trwałość narzędzi. Z tego względu przeprowadzono badania doświadczalne frezowania stopu Inconel X750 celem badania stabilności procesu skrawania. Wykorzystując oprogramowanie CutPro wykonano analizę modalną i wykreślono krzywe stabilności. Następnie dokonano doświadczalnej weryfikacji obszarów stabilności dla wybranych parametrów obróbki.

SŁOWA KLUCZOWE: frezowanie, drgania samowzbudne, stabilność procesu skrawania, analiza modalna, CutPro

During the machining there may be self-excited vibrations, which have a negative impact on productivity and tool life. Therefore, the experimental studies of Inconel X750 milling process were carried out. Using the CutPro software modal analysis is performed and plotted stability lobes diagram. Next, a verification of stability areas for selected machining parameters is conducted.

KEYWORDS: milling, self-excited vibration, stability of cutting, modal analysis, CutPro

Proces obróbki skrawaniem jest ważną i ciągle popularną metodą wytwarzania zarówno elementów z klasycznych materiałów konstrukcyjnych jak i nowoczesnych superstopów, czy materiałów kompozytowych. Obecnie intensywnie rozwija się obróbka szybkościowa, która jest przejawem dążenia do skrócenia czasu skrawania i poprawienia jakości powierzchni gotowego wyrobu. Nowym wyzwaniem jest obróbka materiałów trudnoskrawalnych takich jak stale specjalne, stopy niklu, tytanu (superstopy) czy kompozyty. Podczas obróbki skrawaniem mogą wystąpić niepożądane drgania samowzbudne pogarszające jakość powierzchni i skracające trwałość narzędzia. Problem rozpoznawania tych drgań i warunków ich powstawania jest ciągle nierozwiązany. Chociaż istnieje wiele prac podejmujących taką tematykę jednak rezultaty w nich przedstawione wciąż są dalekie od ideału i nie do końca zgodne z rzeczywistością.

Pierwsze modele procesu skrawania wyjaśniające mechanizm powstawania drgań typu „chatter” zostały opracowane w połowie XX wieku [1, 2]. Wskazano w nich na zjawisko regeneracji drgań pochodzących od nierówności powierzchni obrabianej we wcześniejszym przebiegu narzędzia (toczenie) lub ukształtowanej przez poprzednie ostrze (np. frezowania) jako główną przyczynę drgań samowzbudnych. W późniejszych pracach [3–7] opracowano metody wyznaczania obszarów stabilnego skrawania bazujących jednak na podejściu liniowym, które nie zawsze jest wystarczająco dokładne. Ponadto, na początku lat dziewięćdziesiątych Grabec [8] wykazał, że inną przyczyną drgań

samowzbudnych typu „chatter” może być tarcie pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym. Mechanizm tarciaowy uznawany jest za główną przyczynę powstawania drgań chaotycznych w układach mechanicznych w tym również w obróbce skrawaniem [9, 10].

Ważnym problemem jest identyfikacja drgań typu „chatter” oraz weryfikacja obszarów stabilności podczas skrawania. W tej kwestii rozbieżność wyników prezentowanych w literaturze jest znaczna, dlatego też w niniejszej pracy zdecydowano się na weryfikację obszarów stabilności uzyskanych w oparciu o jednopunktowy test modalny za pomocą programu CutPro. Do testów użyto stop Inconel X750 uznawany powszechnie za materiał trudno-obrabialny ze względu na wysoką wytrzymałość mechaniczną i opór termiczny. Na początku wykreślono diagram stabilności a następnie mierzone siły skrawania dla wybranych parametrów z zakresu stabilnego i niestabilnego. W końcowym etapie analizy obliczono podstawowe statystyki sił skrawania, aby wykazać różnice pomiędzy procesem stabilnym i niestabilnym.

Stanowisko badawcze

Badania doświadczalne procesu frezowania zostały przeprowadzone w laboratorium Katedry Mechaniki Stosowanej Politechniki Lubelskiej. Stanowisko badawcze zbudowane jest z trzech zasadniczych zespołów: obrabiarki CNC, pulpitu sterowniczego oraz układu pomiarowego i akwizycji danych. Badania wykonano na frezarce z serii MG6037PKK. Jest to uniwersalne urządzenie przeznaczone do obróbki aluminium, stali, metali kolorowych, materiałów kompozytowych itp. Maksymalna prędkość obrotowa elektrowrzecionia to 24000 obr/min. Maszyna wyposażona jest w bezluzowe prowadnice liniowe i śruby toczne. Pulpit sterowniczy jest wyposażony w komputer z oprogramowaniem Mach3. Oprogramowanie umożliwia sterowanie obrabiarką w trzech osiach.

Stanowisko obróbkowe (rys. 1) składa się z elektrowrzecionia z uchwytem obróbkowym, w którym mocuje się narzędzie. W badaniach użyto frez o czterech ostrzach VHM krótki z chwytem walcowym gładkim DIN 6527-A 12 KNZ4 13° o średnicy $d=12\text{mm}$ i swobodnej długości zamocowania wynoszącej $L=40\text{mm}$. Na stole roboczym obrabiarki zamocowano siłomierz piezoelektryczny. Bezpośrednio na siłomierzu umieszczono imadło maszynowe wraz z przedmiotem obrabianym. W trakcie badań frezowano przedmiot wykonany ze stopu Inconel X750.

Dodatkowo stanowisko badawcze wyposażone jest w układ pomiarowy i akwizycji danych (rys. 2). Siły mierzone są za pomocą siłomierza piezoelektrycznego typu 9257B firmy Kistler, który współpracuje ze wzmacniaczem ładunku typu 5017B. Sygnały pomiarowe kierowane są do modułu LMS Scadas Mobile (analyzer pomiarowy). Końcowym elementem toru pomiarowego jest komputer PC wraz z oprogramowaniem LMS do akwizycji danych. Częstotliwość próbkowania została ustalona na poziomie 10,24 kHz.

* dr inż. Andrzej Weremczuk (a.weremczuk@pollub.pl), mgr inż. Michał Rudzik, dr hab. inż. Rafał Rusinek prof. PL (r.rusinek@pollub.pl), prof. dr hab. inż. Jerzy Warmiński (j.warmiński@pollub.pl) - Politechnika Lubelska



Rys. 1. Stanowisko badawcze

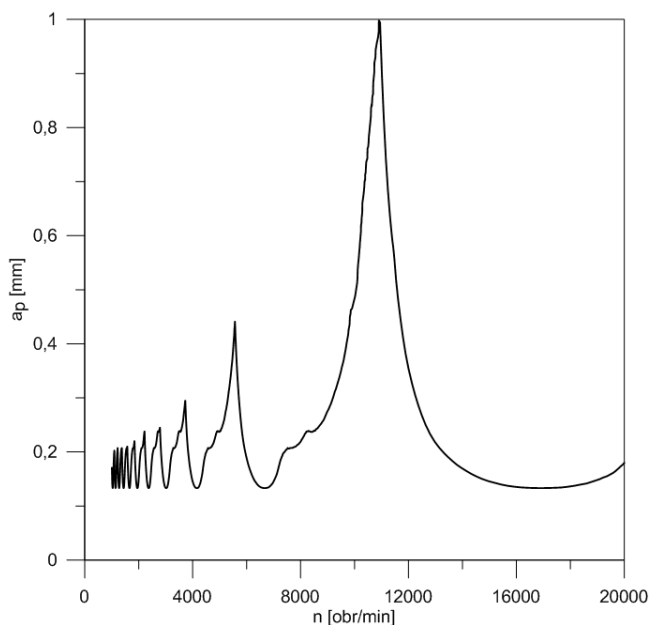


Rys. 2. Tor akwizycji danych

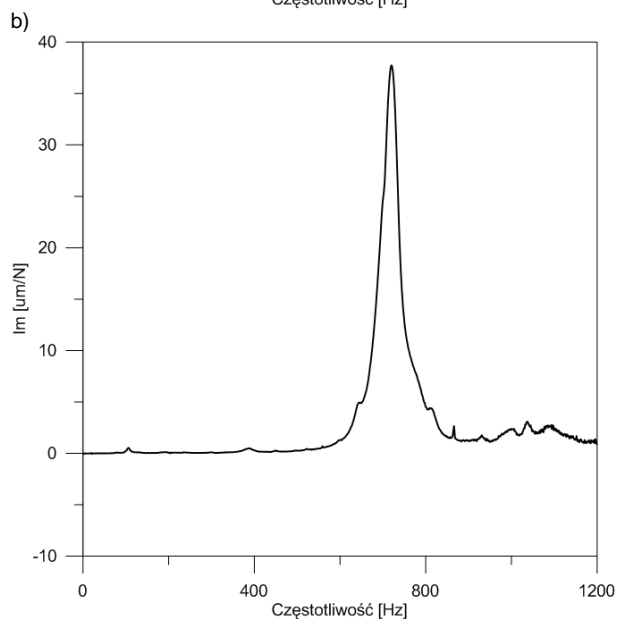
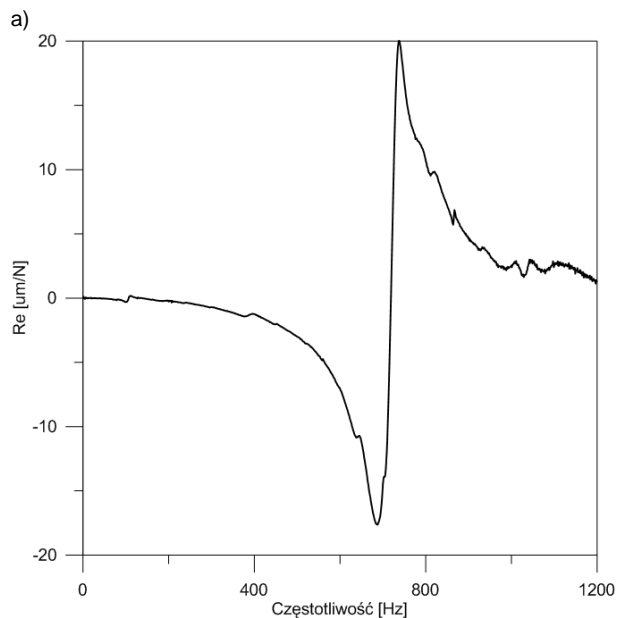
Analiza modalna

W celu identyfikacji podstawowych parametrów dynamicznych narzędzia zamocowanego w uchwycie obróbkowym przeprowadzono analizę modalną. Badania wykonano poprzez wzbudzenie obiektu młotkiem modalnym PCB 070A02 z wbudowanym siłomierzem i jednocześnie pomiar drgań narzędzia akcelerometrem PCB 352B10. Za pomocą analizy modalnej możliwe jest wyznaczenie parametrów modalnych (częstość drgań własnych, masa modalna, tłumienie i sztywność) drgającego narzędzia wraz z zespołem wrzeciona. Test modalny przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania CutPro.

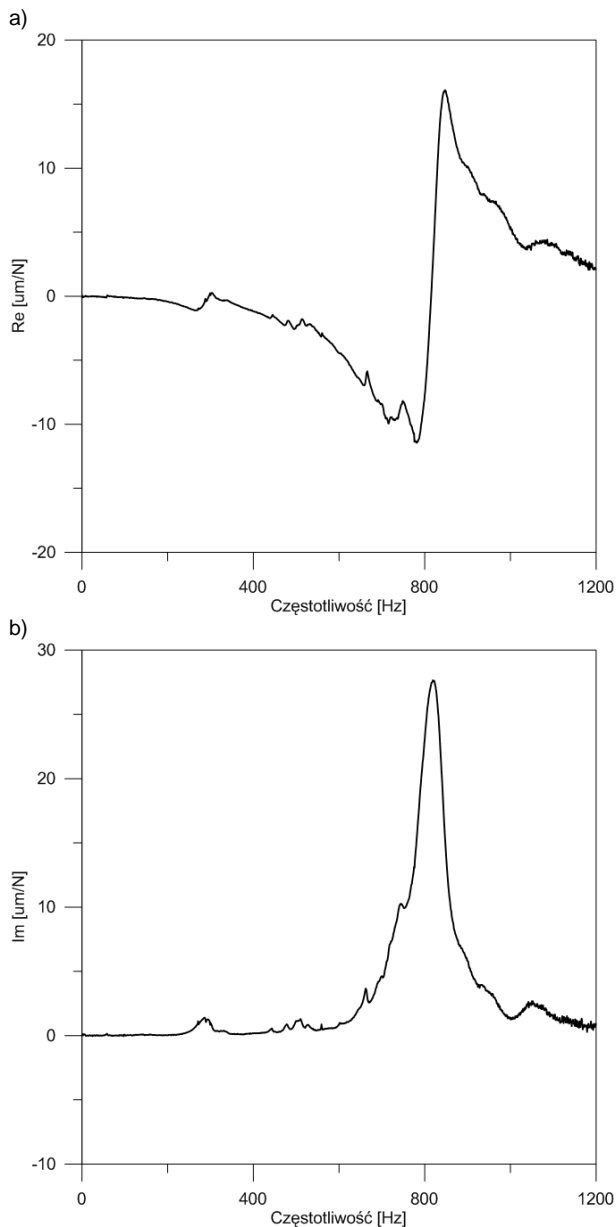
W wyniku badań uzyskano funkcje przejścia w postaci wykresów części urojonej i rzeczywistej dla kierunku x (rys. 4) oraz kierunku y (rys. 5). Również w tym środowisku wykreślono krzywe stabilności (rys. 3) dla procesu frezowania stopu Inconel X750.



Rys. 3. Wykres stabilności procesu frezowania stopu Inconel X750



Rys. 4. Funkcje przejścia otrzymane na podstawie analizy modalnej dla freza na kierunku x. Część rzeczywista (a) i urojona (b)



Rys. 5. Funkcje przejścia otrzymane na podstawie analizy modalnej dla freza na kierunku y (kierunek posuwu) Część rzeczywista (a) i urojona (b)

Weryfikacja doświadczalna

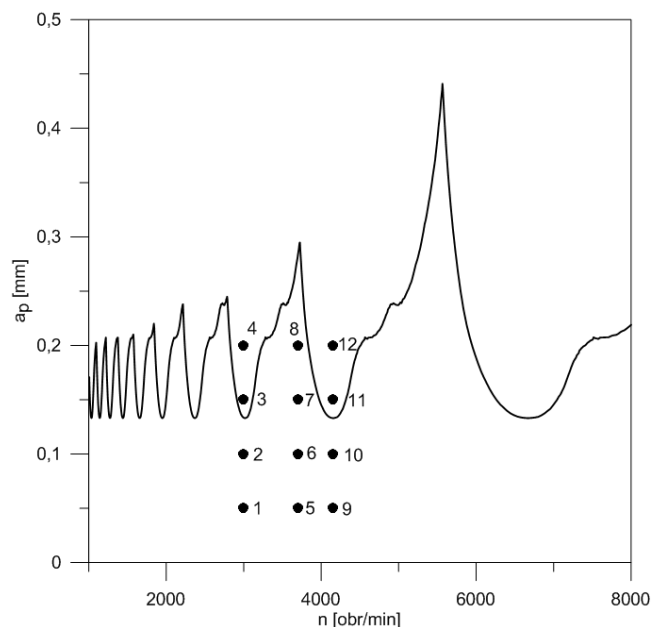
W tej części pracy przedstawiono wyniki doświadczalnej weryfikacji obszarów stabilności dla wybranych parametrów obróbki zgodnie z (tabl. I). Punkty weryfikowane doświadczalnie zostały naniesione na wykres stabilności (rys. 6).

TABLICA I. Parametry punktów weryfikowanych doświadczalnie

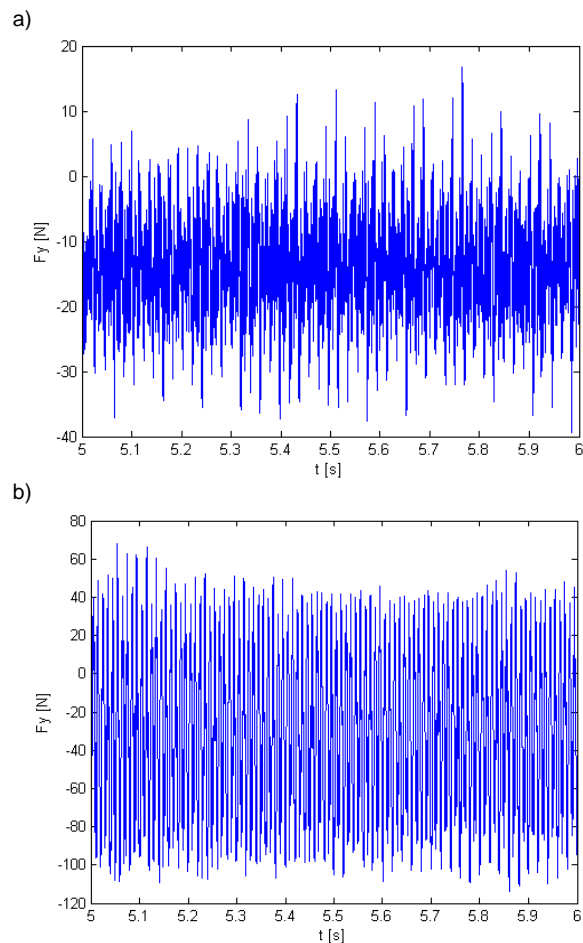
Nr. próby	Prędkość obrotowa wrzeciona n [obr/min]	Głębokość skrawania a_p [mm]	Posuw f [mm/min]
1	3000	0,05	120
2		0,1	120
3		0,15	120
4		0,2	120
5	3700	0,05	148
6		0,1	148
7		0,15	148
8		0,2	148
9	4150	0,05	166
10		0,1	166
11		0,15	166

12	0,2	166
----	-----	-----

Zgodnie z krzywymi stabilności wyznaczonymi z wykorzystaniem oprogramowania CutPro punkty 3,4 oraz 11,12 znajdują się w obszarze niestabilnej obróbki, natomiast pozostałe punkty położone są w obszarze obróbki stabilnej.



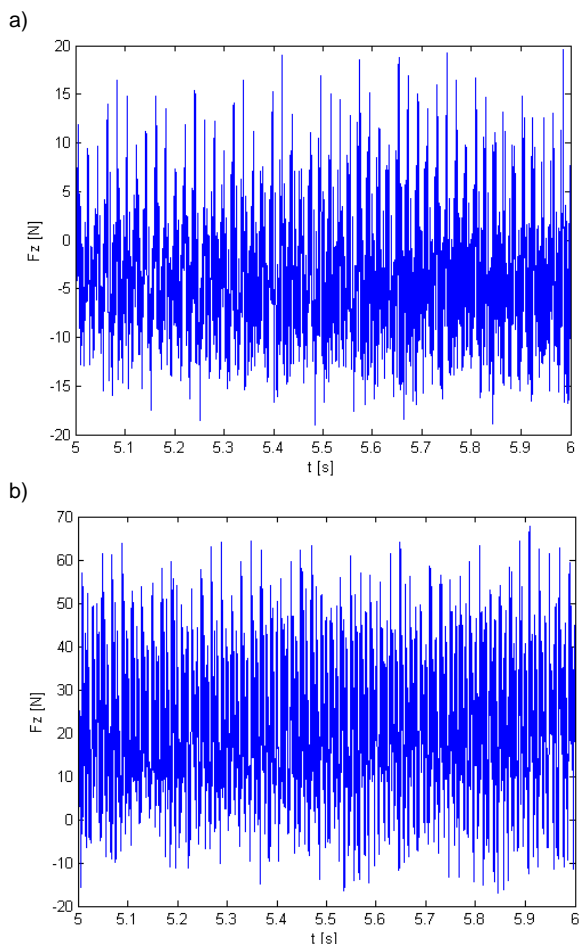
Rys. 6. Wykres stabilności z punktami weryfikowanymi doświadczalnie



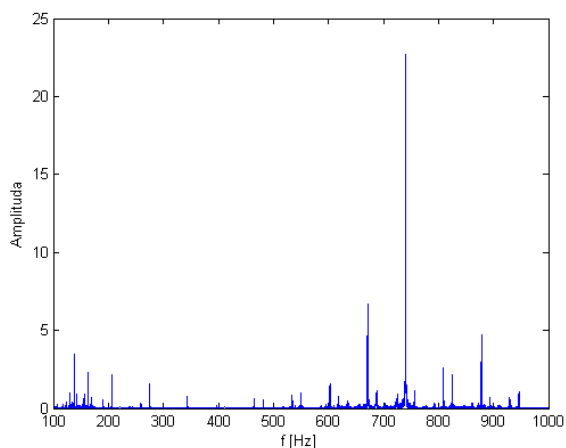
Rys. 7. Przebiegi sił na kierunku posuwu dla obróbki: a) stabilnej – punkt 1, b) niestabilnej – punkt 4.

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg $F_y = f(t)$ i $F_x = f(t)$. Rysunek 7a reprezentuje przebieg czasowy siły dla punktu stabilnego (punkt 1), poniżej (rys. 7b) dla punktu niestabilnego (punkt 4). W przypadku punktu niestabilnego widoczny jest znaczny wzrost sił skrawania.

Natomiast rysunek 8 przedstawia przebieg czasowy siły skrawania na kierunku odporowym (kierunek z) dla dwóch punktów z wykresu stabilności. Na rysunku 8a przebieg czasowy siły dla punktu stabilnego (punkt 1), poniżej (rys. 8b) dla punktu niestabilnego (punkt 4). Również w tym przypadku zaobserwowano wzrost siły skrawania.



Rys. 8. Przebiegi sił na kierunku odporowym dla obróbki: a) stabilnej – punkt 1, b) niestabilnej – punkt 4.



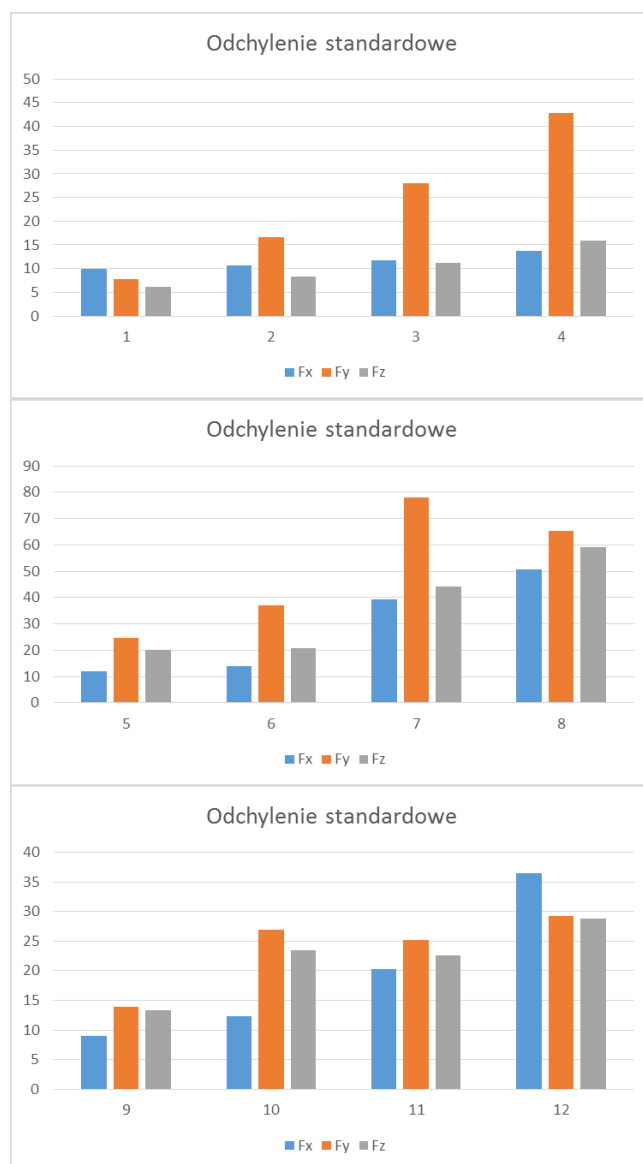
Rys. 9. FFT sygnału siły na kierunku x dla obróbki niestabilnej – punkt 12.

Wykonana została również analiza FFT (rys. 9) sygnału siły na kierunku x dla punktu niestabilnej obróbki (punkt 12).

Widoczny jest charakterystyczny „pik” (ok. 750 Hz) odpowiadający częstości drgań własnych freza. Potwierdzone zostały tym samym wyniki analizy modalnej (rys. 4b).

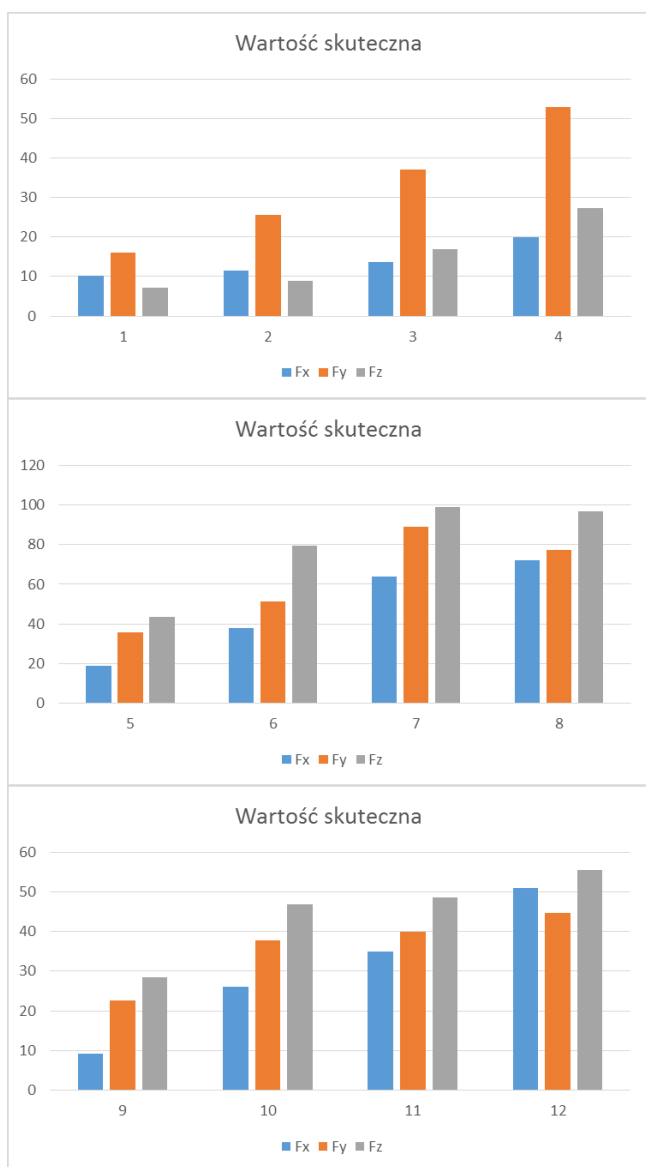
Analiza wyników doświadczalnych

W tej części pracy przeprowadzono analizę statystyczną sił otrzymanych na podstawie badań doświadczalnych. Za pomocą wykresów słupkowych przedstawiono wyniki kolejnych prób dla sił w trzech kierunkach. Rozkład odchylenia standardowego pokazano na rysunku 10. W przypadku próby 3, 4 oraz 7 widoczny jest znaczny wzrost wartości na kierunku posuwu (kierunek y), przy niewielkich zmianach na kierunkach x oraz z. Pozostałe próby nie wykazywały większych rozbieżności przy zachowanej tendencji wzrostowej wraz ze zwiększającą się głębokością skrawania przy zadanej prędkości obrotowej narzędzia.



Rys. 10. Wartość odchylenia standardowego sił skrawania wyników doświadczalnych.

Rozkłady wartości skutecznej sił skrawania zaprezentowano na rysunku 11. W przypadku pierwszej serii prób (punkty 1-4 dla prędkości obrotowej 3000 obr/min) widoczna jest dominacja wartości dla kierunku y w stosunku do pozostałych kierunków. Kolejne serie pomiarowe odznaczają się wyrównaną wartością skuteczną we wszystkich rejestrowanych kierunkach, choć większe głębokości skrawania generują siły o wyższej wartości skutecznej dla każdej z analizowanych prędkości.

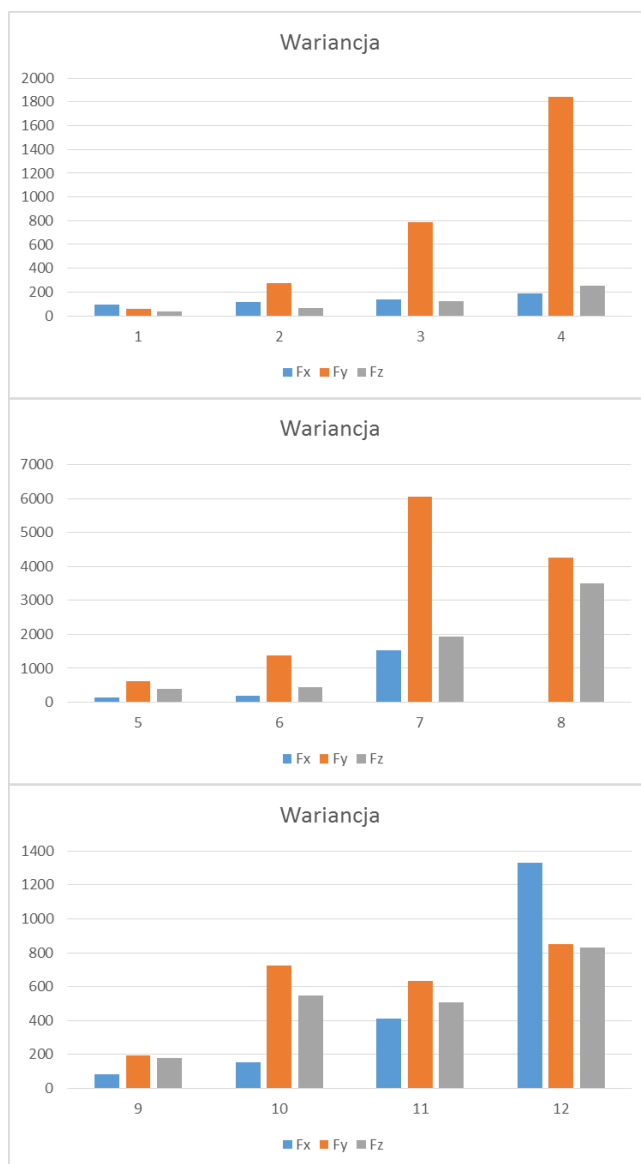


Rys. 11. Wartość skuteczna sił skrawania dla poszczególnych prób.

Ostatnim analizowanym parametrem statystycznym jest wariancja pokazana na rysunku 12. W większości przeprowadzonych prób zaobserwowano znaczne różnice pomiędzy poszczególnymi kierunkami sił. Jednocześnie widoczna jest dominacja składowej y (kierunek posuwu) oraz wzrost wartości na wszystkich kierunkach wraz ze zwiększaniem głębokości skrawania bez względu na prędkość obrotową narzędzia. Takie zachowanie występuje również dla prób 5-8, które teoretycznie powinny znajdować się w obszarze stabilnych parametrów skrawania.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania miały na celu doświadczalną weryfikację krzywych stabilności wyznaczonych na podstawie analizy modalnej narzędzia zamocowanego we wrzecionie obrabiarki z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania CutPro. W badaniach wykorzystano trudnoobrabialny stop Inconel X750. Weryfikację doświadczalną przeprowadzono dla dwunastu punktów pomiarowych. Zgodnie z wyznaczonymi krzywymi stabilności cztery próby odbyły się w warunkach skrawania niestabilnego (3, 4, 11, 12).



Rys.12. Wariancja sił skrawania wyników doświadczalnych dla poszczególnych prób.

Następnie wykonano analizę statystyczną zarejestrowanych doświadczalnie sił skrawania. Na podstawie wykonanej analizy można stwierdzić, że w przypadku pierwszej serii pomiarowej (dla prędkości obrotowej narzędzia $n=3000$ obr/min) potwierdzono doświadczalnie wynik uzyskany przy użyciu oprogramowania CutPro. Zaobserwowano znaczny wzrost sił skrawania, w szczególności siły na kierunku posuwu dla punktów 3 i 4 leżących w obszarze niestabilnej obróbki.

W przypadku drugiej oraz trzeciej serii pomiarowej (dla prędkości obrotowej narzędzia $n=3700$ obr/min i $n=4150$ obr/min) wyniki uzyskane doświadczalnie nie dają jednoznacznych wyników. Punkty 5-10 znajdują się w obszarze stabilnego skrawania, natomiast 11-12 w obszarze niestabilnym. Rezultaty doświadczalnie nie potwierdzają powyższych warunków, co może świadczyć o ułomności procedury zastosowanej w programie CutPro, zwłaszcza w zakresie położenia krzywych stabilności względem prędkości obrotowej n . Natomiast, dla wszystkich weryfikowanych doświadczalnie serii potwierdzono minimalną granicę stabilnego skrawania, która wynosi ok. 0,13mm.

Podsumowując analizę stabilności punktów pomiarowych można mieć wątpliwości co do poprawności zastosowanego w programie CutPro algorytmu, choć graniczna głębokość skrawania została przewidziana poprawnie.

Podziękowanie

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Pierwszy autor dziękuje za wsparcie finansowe w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki zgodnie z decyzją nr DEC-2013/09/N/ST8/01202.

LITERATURA

1. Kudinov V A. "Theory of Vibration Generated from Metal Cutting". *New Technology of Mechanical Engineering*. (1955): s. 1÷7.
2. Kudinov V A. "Dynamics of Machine Tools". *Maszynostrojnie*. (1967).
3. Gradisek J., Govekar E. and Grabec I. "Chatter Onset in Non-Regenerative Cutting: A Numerical Study". *Journal of Sound and Vibration*. Nr 242 (2001): s. 829÷838.
4. Gradisek J., Kalveram M., Insperger T., Weinert K., Stepan G., Govekar E. and Grabec I. "On stability prediction for milling". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Nr 45 (2005): s. 769÷781.
5. Gradisek J., Siegert S., Friedrich R. and Grabec I. "Analysis of Time Series from Stochastic Process". *Physical Review E*. Nr 62 (2000): s. 3146÷3155.
6. Stepan G., Szalai R. and Insperger T. "Nonlinear Dynamics of High-speed Milling Subjected to Regenerative Effect". *Nonlinear Dynamics of Production Systems*. (2004): s. 111–127.
7. Stepan G. and Kalmar-Nagy T. "Nonlinear Regenerative Machine Tool Vibrations". *Proceedings of DETC'97*. California: September 17-17, 1997.
8. Grabec I. "Chaos Generated by the Cutting Process". *Physics Letters A*. Nr 117 (1986): s. 384–386.
9. Wiercigroch M. and Krivtsov A M. "Frictional Chatter in Orthogonal Metal Cutting". *Phil.Trans.The Royal Society Society of London A Mathematical Physical and Engineering Science*. Nr 359 (2001): s. 713–738.
10. Gradisek J., Govekar E. and Grabec I. "A Chaotic Cutting Process and Determining Optimal Cutting Parameter Values Using Neural Networks". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Nr 36 (1996): s. 1161–1172.