

Weryfikacja dynamicznej charakterystyki procesu skrawania przez porównanie teoretycznej i doświadczalnej granicy stabilności

Validation of the dynamic characteristics of the machining process by comparing the theoretical and experimental stability limit

DOMINIKA ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA
MIROSLAW NEJMAN
KRZYSZTOF JEMIELNIAK*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.601

Jedną z metod unikania drgań samowzbudnych podczas skrawania polega na wyznaczeniu i uwzględnieniu granicy stabilności. W pracy przedstawiono wstępną weryfikację zaproponowanego modelu dynamicznej charakterystyki procesu skrawania poprzez porównanie granicy stabilności wyznaczonej teoretycznie z uzyskaną doświadczalnie.

SŁOWA KLUCZOWE: drgania samowzbudne, granica stabilności

Avoiding of self-excited vibrations during cutting involves the determination of the stability limit. The paper presents preliminary verification of the proposed model of the dynamic characteristics of the machining process by comparing the stability limit theoretically determined and experimentally obtained.

KEYWORDS: self-excited vibrations, chatter, stability limit

Występowanie drgań samowzbudnych podczas procesu skrawania jest zjawiskiem wysoce niepożądanym. Jak wiadomo obrabiarka będąc układem o wielu stopniach swobody może zostać pobudzona do drgań oddziaływaniem obciążeń dynamicznych [1,8]. Jeśli warunki będą sprzyjające drganiom, te mogą się rozwinąć powodując utratę stabilności, a tym samym spowodować wystąpienie drgań samowzbudnych, co oznacza między innymi złą jakość powierzchni obrabianej, przyspieszone zużycie narzędzi jak również obrabiarki [1,5,8]. W przypadkach skrajnych, drgania samowzbudne mogą doprowadzić do uszkodzenia powierzchni obrabianej przedmiotu, narzędzia skrawającego, powodując dodatkowe koszty wykonania wyrobu oraz wydłużenie czasu produkcji. Zatem wyznacznikiem prawidłowo przebiegającego procesu technologicznego obróbki skrawaniem jest eliminowanie tych czynników, które mają wpływ na powstawanie drgań samowzbudnych i prawidłowe określenie granicy stabilności.

Projektowanie procesu skrawania wymaga dużego doświadczenia i wiedzy jak uzyskać najdłuższy okres trwałości ostrza przy jak najwyższej wydajności i jak najkrótszych czasach produkcji. Określenie granicy stabilności wymaga opracowania pełnego modelu dynamicznego układu obrabiarka – uchwyt – przedmiot obrabiany – narzędzie (OUPN) [6], a następnie jak w metodzie klasycznej rozwiązania równań różniczkowych bądź przeprowadzenie numerycznej symulacji drgań.

Granice stabilności można wyznaczyć teoretycznie na podstawie modeli matematycznych sił skrawania. Więk-

szość ze znanych modeli zawiera głównie parametr zależny od sztywności procesu skrawania, a znacznie mniej zależy od czynników tłumiących. W pracy przedstawiono wstępną weryfikację zaproponowanego modelu dynamicznej charakterystyki procesu skrawania poprzez porównanie granicy stabilności wyznaczonej teoretycznie z uzyskaną doświadczalnie.

Już w latach 60-tych zaczęto prowadzić głębsze analizy na temat drgań samowzbudnych typu chatter. Tobias [14] i Tlustý [11] wyjaśnili mechanizm regeneracji śladu dając podstawy dla teorii stabilności. Współcześnie zagadnienia te są pogłębiane i dynamicznie rozwijane [3,4,15].

Modelowanie dynamicznej charakterystyki procesu skrawania

Jak już zostało wspomniane, określenie granicy stabilności zależy od znajomości dynamicznej charakterystyki procesu skrawania (DCPS) oraz układu masowo-sprężysto-tłumiącego obrabiarki. Dynamiczna charakterystyka procesu skrawania to zależność siły skrawania od chwilowych zmian grubości warstwy skrawanej oraz prędkości wnikania narzędzia w powierzchnię skrawania. Zmiany grubości spowodowane są przemieszczeniami narzędzia względem przedmiotu obrabianego w kierunku prostopadłym do powierzchni skrawania oraz fal na powierzchni skrawania r_T utworzonych w poprzednim przejściu, jako ja r_t . Zmienne w wyniku drgań siły skrawania, działające w kierunku prostopadłym do powierzchni skrawania i równoległym do niej można zatem opisać jako:

$$F_r = F_{rk}(h) + F_{rc}(r_t'), \quad F_t = F_{tk}(h) + F_{tc}(r_t') \quad (1)$$

$$h = h_0 + h_d = h_0 - r_t + r_T \quad (2)$$

gdzie: F_{rk} , F_{tk} – składowe siły skrawania zależne od nominalnej grubości warstwy skrawanej oraz przemieszczeń względnych między narzędziem, a przedmiotem obrabianym; F_{rc} , F_{tc} – składowe siły skrawania zależące od prędkości wnikania narzędzia w powierzchnię skrawania r_t' ; h – chwilowa grubość warstwy skrawanej; h_0 – statyczna grubość warstwy skrawanej; h_d – składowa dynamiczna h ; $r_t = r(t)$ – wewnętrzna modulacja h ; $r_T = r(t-T)$ – zewnętrzna modulacja h ; v_c – prędkość skrawania; T – czas między kolejnymi przejściami ostrza (dla toczenia – czas jednego obrotu przedmiotu).

Zauważyć można, iż model (1), znany od lat [4,7] uwzględnia wpływ tłumienia procesu skrawania na dynamiczne siły skrawania. Mimo to najczęściej stosowany jest prosty model liniowy Altintas [2,3], w którym siły te zależą jedynie od chwilowej grubości warstwy skrawanej:

$$F_r = k_r b h, \quad F_t = k_t b h \quad (3)$$

* dr inż. Dominika Śniegulska-Grądzka (d.gradzka@yahoo.pl); dr inż. Mirosław Nejman (m.nejman@zaoios.pw.edu.pl); Krzysztof Jemielniak (k.jemielniak@wip.pw.edu.pl) – Zakład Automatykacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem Politechniki Warszawskiej

gdzie: k_r, k_t – stałe współczynniki skrawania, b – szerokość warstwy skrawanej.

W przypadku, gdy nominalna grubość warstwy skrawanej h_0 jest stała model Altintasa jest wystarczający, ma to miejsce przy toczeniu, natomiast już w obróbce skrawania frezowaniem, zmiany grubości warstwy skrawanej występują.

Od najwcześniejszych badań nad drganiami samowzbudnymi zwracano już uwagę, że proces tłumienia ma zasadniczy wpływ na stabilność obróbki zwłaszcza przy niskich wartościach prędkości skrawania [12]. Ze względu na brak dostępnych modeli oraz metod pomiarów bezpośrednich dotychczas pomijano wpływ tłumienia na DCPS. Jednak ostatnio zostały podjęte intensywne prace mające na celu opracowanie opisu procesu tłumienia pośrednio lub poprzez wsteczne dopasowanie wartości współczynników tłumienia do granic stabilności. Należy zwrócić uwagę, że aby tłumienie mogło zostać uwzględnione w analizie stabilności, wartości współczynników tłumienia są uśredniane. Prowadzi to do zależności opisujących proces skrawania w postaci:

$$F_r = b(k_r h + c_r r_t'), \quad F_t = b(k_t h + c_t r_t') \quad (5)$$

gdzie: r_t – prędkość drgań w kierunku prostopadłym do powierzchni skrawania, c_r, c_t – współczynniki tłumienia siły skrawania.

W niniejszym referacie do weryfikacji DCPS przyjęty został model opisany równaniem (5), oparty o dynamiczne współczynniki sił skrawania wyznaczone z badań podczas ortogonalnego toczenia.

Metodyka badań

Aby uzyskać dane do wyznaczenia granicy stabilności niezbędne było przeprowadzenie pomiarów siły skrawania podczas toczenia.

Warunki skrawania

Eksperymenty przeprowadzono na tokarce uniwersalnej TUD50. Obrabiano wałek stalowy gatunku 45 o średnicy 109,5mm i długości 1200mm. Użyto noża tokarskiego CTGPR 2525 M 16 z płytką TPGN 160304 gatunku 1025 o geometrii: $\kappa_r = 90^\circ$, $\gamma_0 = 5^\circ$, $\alpha_0 = 6^\circ$ oraz wybrano następujące parametry skrawania: $a_p = 1,0-3,0\text{mm}$; $f = 0,08\text{mm/obr}$; $v_c = 20$ do 260m/min .

Tor pomiarowy

W torze pomiarowym zastosowano siłomierz płytowy KISTLER 9257BA, akcelerometr KISTLER 8763A50, czujnik przemieszczeń Lion Precision C23-C oraz młotek modalny Brüel&Kjær 8207. Budowę stanowiska pomiarowego z wykorzystaniem wymienionych czujników opisano w [7,8]. Sygnały z czujników rejestrowano na komputerze wyposażonym w kartę pomiarową NI USB-6259, z częstotliwością próbkowania 40kS/s.

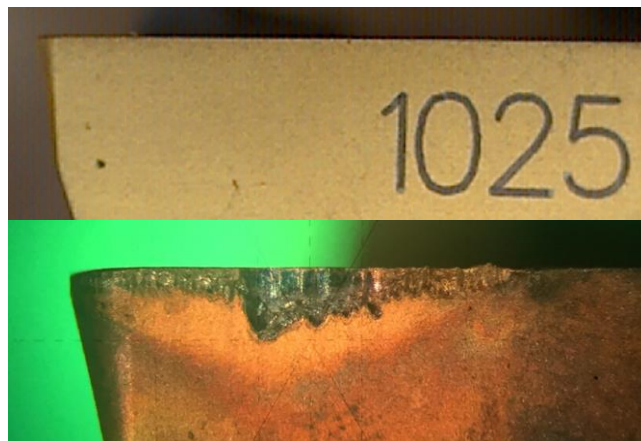
Opis pomiarów

Badania przeprowadzono w trzech seriach. W serii pierwszej skrawano płytką z nową krawędzią skrawającą, natomiast w serii drugiej użyto płytki z krawędzią o zużyciu bliskim końcu okresu trwałości – aby przygotować taką krawędź skrawano ten sam wałek, przy głębokości skrawania 2,5mm, z posuwem 0,13mm/obr i prędkością skrawania 205m/min, aż do uzyskania zużycia wskaźnika $VB_{Bmax} = 0,34\text{mm}$ (rys. 1).

Dla wymienionych wcześniej parametrów skrawania przeprowadzono próby skrawania wraz z rejestracją sygnałów z czujników. Jeśli wystąpiły drgania samowzbudne próbę przerywano, a jeśli drgania samowzbudne nie wystąpiły i obróbka była stabilna, w siłomierz uderzano młotkiem modalnym [10] (tabl. II).

W trzeciej serii badań wykonano badanie statyczne sił skrawania, w którym dla wszystkich przyjętych kombinacji głębokości skrawania oraz prędkości skrawania notowano

występowanie drgań samowzbudnych. W ten sposób doświadczalnie uzyskano przebieg granicy stabilności.



Rys. 1. Zdjęcie nowej krawędzi skrawającej oraz z zużyciem $VB_{Bmax} = 0,34\text{mm}$

Opracowanie wyników badań polegało na zestawieniu wyników uzyskanych z doświadczalnego pomiaru granicy stabilności z granicą stabilności uzyskaną analitycznie na podstawie przyjętego modelu siły (wzór 6) oraz zmierzonych doświadczalnie dynamicznych współczynników sił skrawania. W przeprowadzonej analizie zastosowano model liniowy:

$$F_r = b(F_0 + k_{r1} h) + b c_{r1} r_t' = F_{rk} + F_{rc} \quad (6)$$

Warte zauważenia jest, że dla nowej krawędzi skrawającej, obróbka prawie zawsze wpadała w drgania samowzbudne. Natomiast dla krawędzi zużytej do prędkości 100m/min występowały drgania samowzbudne powyżej nie. W związku z tym metoda obliczenia dynamicznych współczynników sił skrawania różniła się. Tam gdzie drgania samowzbudne występowały używano innowacyjnej metody wyznaczania dynamicznych współczynników sił skrawania opisanej w [9,10,13]. Uzyskane przykładowe wyniki przedstawiono w tabl. I.

Badania stabilności przeprowadzono stosując imak specjalny o jednym stopniu swobody [9] o parametrach wyznaczonych przy pomocy analizy modalnej:

$$m_x = 13,98 \text{ [kg]} \quad k_x = 25780 \text{ [N/mm]} \quad c_x = 1,17 \text{ [Ns/mm]}$$

gdzie: m_x – masa układu MST, k_x – sztywność układu MST, c_x – tłumienie układu MST.

Granica stabilności, w oparciu o powyższe dane została obliczona analitycznie [6].

TABLICA I. Dynamiczne współczynniki sił skrawania oraz granica stabilności wyznaczone dla nowej krawędzi skrawającej

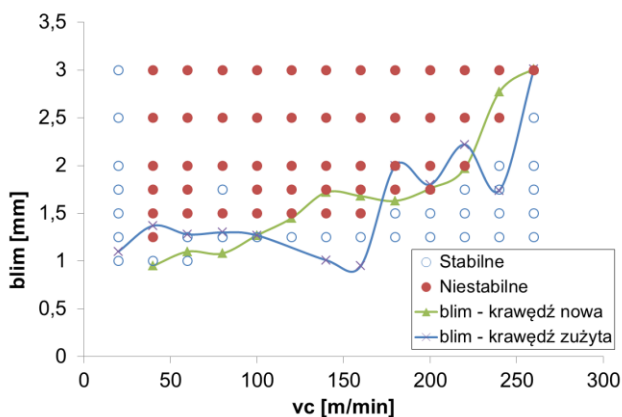
v_c m/min	F_{r0} N	k_{r1} N/mm ²	c_{r1} Ns/mm ²	F_{t0} N	k_{t1} N/mm ²	c_{t1} Ns/mm ²	b_{lim} mm
40	24,55	1718,3	-0,605	-50,48	4144,5	-0,813	0,95
60	17,59	1481,3	-0,461	-18,68	3388,9	-0,617	1,1
80	-5,10	1517,1	-0,378	-68,83	3700,3	-0,544	1,08
100	7,96	1285,2	-0,249	-18,57	2949,3	-0,195	1,27
120	21,51	1126,2	-0,166	-15,98	2870,6	-0,223	1,45
140	30,19	947,3	-0,144	1,69	2610,0	-0,194	1,72
160	23,56	973,4	-0,158	-17,32	2742,6	-0,288	1,68
180	16,85	1004,8	-0,155	-32,84	2880,7	-0,268	1,63
200	27,35	932,2	-0,137	-4,06	2570,6	-0,114	1,76
220	42,19	837,7	-0,149	18,94	2288,7	-0,029	1,97
240	63,89	593,0	-0,081	16,24	2286,6	0,040	2,77
260	72,29	533,6	-0,079	28,70	2102,4	-0,083	3,01

TABLICA II. Zestawienie występowania drgań samowzbudnych (D) i stabilnej obróbki (S)

vc	m/min	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
VB _{Bmax}	0.00mm	S	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
VB _{Bmax}	0.34mm	S	D	D	D	D	S	S	S	S	S	S	S	S

Weryfikacja wyników badań

Dzięki przyjętej procedurze badań uzyskano możliwość weryfikacji poprawności opracowanej innowacyjnej metody pomiaru dynamicznych współczynników sił skrawania. Dzięki tym współczynnikom można zamodelować przebieg granicy stabilności (teoretyczny), a następnie porównać z granicą stabilności uzyskaną doświadczalnie.



Rys. 2. Porównanie granicy stabilności wyznaczonej na podstawie dynamicznych współczynników sił skrawania z granicą stabilności wyznaczoną doświadczalnie

Na (rys. 2) przedstawiono wyniki badania statycznego – punkty z czerwonym wypełnieniem reprezentują parametry skrawania dla których występowały drgania samowzbudne, natomiast punkty bez wypełnienia parametry dla których drgania nie występowały. Wykres ten doskonale dokumentuje powszechnie znaną wiedzę, że poprawę stabilności obróbki można uzyskać dla niskich prędkości skrawania. Jednakże głównym celem badań było nałożenie na tę siatkę punktów granicę stabilności uzyskaną na drodze analitycznej. I tak linią z trójkątnymi znacznikami zaznaczono przebieg granicy stabilności uzyskany podczas pomiarów nową krawędzią skrawającą. Natomiast linią z krzyżkowymi znacznikami zaznaczono przebieg granicy stabilności uzyskany dla płytki ze zużytą krawędzią skrawającą.

Podstawowym spostrzeżeniem jest to, że granica stabilności uzyskana we wszystkich trzech seriach badań jest do siebie zbliżona. Zgodnie z oczekiwaniem, dla ostrej krawędzi skrawającej odwzorowanie przebiegu granicy stabilności jest dość dobre. Nieco słabsze dopasowanie można zaobserwować dla eksperymentu ze zużytą krawędzią skrawającą. Jest to jednakże uzasadnione, z uwagi na to że granica stabilności może się przesunąć ze względu na stan krawędzi skrawającej. Byłoby wręcz zaskakujące, gdyby efekt taki nie wystąpił. Można mieć wątpliwość, czy uzyskano poprawny kształt przebiegu dla zużytej krawędzi skrawającej, gdyż dla prędkości skrawania większych niż 150m/min następuje skokowy przyrost stabilności. Jednakże, o ile dla nowej krawędzi skrawającej drgania samowzbudne występowały dla wszystkich przyjętych parametrów skrawania (oprócz najniższej prędkości skrawania), o tyle dla krawędzi zużytej od prędkości 120m/min w górę zarejestrowano brak drgań samowzbudnych [10]. Na podstawie (rys. 2) stwier-

dzić można, że metoda teoretyczna jest mniej dokładna i dla innej prędkości zarejestrowała skok wartości granicy stabilności, niż w rzeczywistości. Należy wspomnieć, że skok granicy spowodowany był również zastosowaniem innej metody wyznaczania dynamicznych współczynników sił skrawania dla sygnałów zarejestrowanych w czasie występowania drgań samowzbudnych, a inną gdy drgań nie było.

Podsumowanie

Przeprowadzoną analizą wykazano, iż opracowana innowacyjna metoda pomiaru dynamicznych współczynników sił skrawania pozwala na dość dokładne teoretyczne wyznaczenie granicy stabilności. Wśród zalet tej metody względem badań statycznych można wymienić mniejszą liczbę eksperymentów do przeprowadzenia celem uzyskania przebiegu granicy stabilności. Oraz niewątpliwie wartością dodaną jest uzyskanie dynamicznych współczynników sił skrawania bezpośrednio z pomiaru, a nie na drodze mniej lub bardziej dokładnego modelowania.

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.

LITERATURA

- Altintas Y. "Manufacturing Automation". Cambridge University Press (2000)
- Budak, E., Altintas, Y., Armarego, E.J.A, "Prediction of Milling Force Coefficients From Orthogonal Cutting Data". Journal of Manufacturing Science and Engineering 118:216-224. (1996)
- Cheng K, Budak E. i in. "Machining Dynamics". Springer-Verlag (2009)
- Das, M.K., Tobias, S.A., "The Relation Between the Static and the Dynamic Cutting of Metals". Int. J. Mach. Tool Des. Res., , 7:63-89. (1967)
- Eynian M., Altintas Y. "Chatter Stability of General Turning Operations With Process Damping". Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 131 (2009)
- Galewski M., Kaliński K. „Nadzorowanie drgań przy frezowaniu szybkościowym smukłymi narzędziami ze zmienną prędkością obrotową”. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk (2009)
- Jemieliński K. „Analiza stabilności dynamicznego układu OUPN”. Archiwum Technologii Budowy Maszyn, Zeszyt 10 (1992)
- Jemieliński, K., "Modelling of Dynamic Cutting Coefficients in Three - Dimensional Cutting". Int. J. Mach. Tools Manufact, 32/4:509-519. (1992)
- Jemieliński K. „Obróbka Skrawaniem”. Oficyna Wydawnicza PW (2004)
- Jemieliński, K., Nejman, M., Śniegulska-Grądzka, D., Wypysiński R. „Urządzenie do pomiaru dynamicznych składowych sił skrawania. Device for dynamic components of cutting force measurement". Patent P-398818 (2012).
- Jemieliński K., Nejman M., Śniegulska-Grądzka D., Wypysiński R.; „Wyznaczanie dynamicznych współczynników sił skrawania metodą doświadczalną". Mechanik. ISSN 0025-6552. pp. 708, (2013) s. 563+570.
- Koenigsberger, F., Tlustý J. "Machine Tool Structures" - Vol. I: Stability Against Chatter. Pergamon Press (1967)
- Kegg, R.L., "Chatter Behavior at Low Cutting Speeds". CIRP Annals, 17:97-106. (1969)
- Nejman, M., Śniegulska-Grądzka, D., Jemieliński K. „Porównanie dynamicznych współczynników sił skrawania zmierzonych w czasie występowania drgań samowzbudnych dla ostrej i zużytej krawędzi skrawającej". Mechanik. Nr 8-9 (2015) s. 98+104
- Tobias, S.A, "Machine Tool Vibration" Blackie and Sons Ltd. (1965)
- Vela-Martínez L., i in. "Analysis of compliance between the cutting tool and the workpiece on the stability of a turning process, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008)