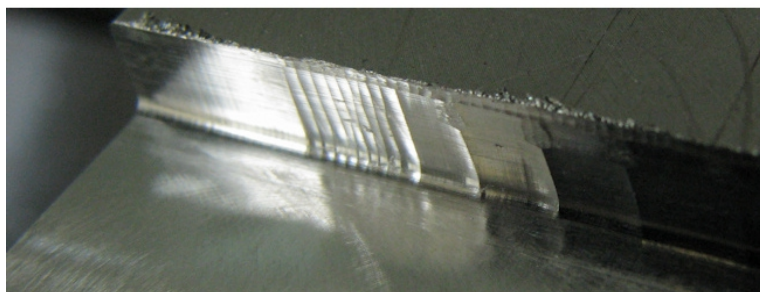


Obróbka stabilna – drgania samowzbudne wprowadzenie

Stabilność obróbki w przypadku obróbek szybkościowych (HSM, HSC, HFM, HPM, HPC) odgrywa bardzo ważną rolę. W ramach technologicznego przygotowania produkcji, w tym opracowanie programów obróbkowych dla obrabiarek CNC analiza wyłącznie geometryczna w ramach programów i systemów CAM nie jest już wystarczająca. Obróbka szybkościowa przy charakterystycznych dla niej parametrach obróbki stanowi technologiczne wyzwanie. Między przedmiotem obrabianym a narzędziem mogą wystąpić (zostać wzbudzone) drgania samowzbudne (ang. chatter). W wyniku ich wystąpienia uszkodzeniu może ulec narzędzie oraz powierzchnia obrabiana (niedokładności geometryczne, w tym wymiary i chropowatość powierzchni).

Skrócenie głównego czasu maszynowego, związane z podwyższeniem parametrów, to nie jedyna zaleta obróbek szybkościowych. Pierwotnie obróbki szybkościowe zostały opracowane do obróbki aluminium, lecz szybko wykazały swoje możliwości w obróbce materiałów twardych (przyjmuje się twardość materiału obrabianego powyżej 45 HRC) oraz przy obróbce elementów cienkościennych. Obróbki szybkościowe polegają na zastosowaniu bardzo szybkich obrotów napędu głównego (ogólnie można przyjąć $n > 10000$ [obr/min]; stosowane są obrabiarki o $n \geq 40000$ [obr/min]), dużego posuwu z jednoczesnym przyjęciem bardzo małych grubości warstw skrawanych, przykładowo od 0,05 do 0,4 [mm]. HSM cechuje się wysoką wydajnością, mniejszymi siłami skrawania, lepszym rozpraszaniem energii cieplnej podczas obróbki.



Jednocześnie stawiane są konkretne wymagania narzędziom (m.in. dokładne wykonanie, wyrównoważenie, oprawki narzędziowe), a także obrabiarkom (m.in. wrzeciona zdolne do zachowania właściwości przy wysokich prędkościach obrotowych, prowadnice). W efekcie otrzymujemy metodę zapewniającą wysoką dokładność geometryczną, bardzo dobrą gładkość obrobionej powierzchni.

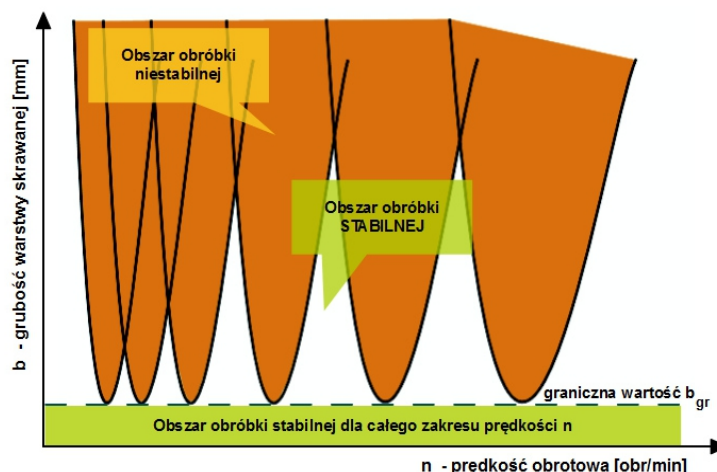
W przypadku obróbek szybkościowych optymalizowanie nie polega tylko na skróceniu czasu, obniżeniu kosztów, lecz ze względu na właściwości parametrów obróbkowych kluczowym kryterium staje się stabilność obróbki. Proces obróbkowy to także zjawiska dynamiczne, które swój negatywny wpływ mogą stanowić poprzez drgania samowzbudne (ang. chatter). Biorąc pod uwagę koszty półfabrykatów (np. w przemyśle lotniczym) uwzględnienie zjawisk dynamicznych wydaje się konieczne i stanowi naturalny etap rozwoju. Kryteria czasu i kosztów nie są wystarczające. Kluczowego znaczenia nabiera **stabilność obróbki**.

Obróbka stabilna – drgania samowzbudne wprowadzenie

Obróbki szybkościowe (ang. HSM – High Speed Machining, HSC – High Speed Cutting i inne powiązane) charakteryzują nawet pięciokrotnie zwiększoną prędkością skrawania z jednoczesnym stosowaniem małych grubości warstwy skrawanej i dużego posuwu roboczego. Historia definiowania obróbek szybkościowych pokazuje jak z biegiem czasu zmieniała się jej definicja, tym samym pokazując postęp jakościowy w tej dziedzinie.

Podnoszenie parametrów obróbkowych spowodowało, że stabilność obróbki znalazła się w czołówce podejmowanych zagadnień naukowo-badawczych. Chcąc jeszcze bardziej skrócić czas potrzebny do obrobienia komponentu podwyższanie parametrów jest możliwe tylko wówczas kiedy znajdują się one w obszarach stabilności (rys.1). W przeciwnym przypadku dochodzi do wzbudzenia drgań samowzbudnych między narzędziem a przedmiotem obrabianym, co skutkuje utratą stabilności, zniszczeniem warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej, potencjalnym zniszczeniem narzędzia. Jak widać na rys.1 możliwe jest dobranie takich parametrów obróbkowych, które umożliwiają zastosowanie znacząco większej grubości warstwy skrawanej i prędkości obrotowej z zachowaniem stabilności obróbki. Wymaga to jednak wyznaczenia obszarów stabilnych i niestabilnych.

Utożsamiając analizę stabilności ze stabilnością procesu obróbkowego można wg [MK1991] wykorzystać kryteria stabilności OUPN. Stosowane są różne kryteria, m.in.: Routha, Hurwitza, czy Nyquiste'a. Ze względu na charakter drgań samowzbudnych (układ liniowy zamknięty – ze sprzężeniem zwrotnym, zawierający człon opóźniający) należy stosować amplitudowo-fazowe kryterium Nyquiste'a. Stosowanie tego kryterium pozwala na określenie częstotliwości drgań samowzbudnych.



Rys.1. Stabilność obróbki – krzywe workowe. Obszary obróbki stabilnej i niestabilnej.

Układ rzeczywisty z reguły jest układem nieliniowym, w którym amplituda drgań ustala się na pewnym poziomie, który zależy od parametrów układu. Nieliniowość układu pozwala na określenie/oszacowanie amplitudy drgań samowzbudnych. Z kolei wykorzystanie kryterium Nyquiste'a pozwala na określenie/oszacowanie wartości częstotliwości drgań samowzbudnych.

[BMH2009, EA2001a, EA2001b, LTS1999, MGBR2008] opisali strategię wykrywania drgań chatter z wykorzystaniem krzywych workowych (wykresu stabilności procesu obróbkowego). Zaprezentowana metoda jest zbliżona do opisanej w [LTS1999]. Wyznaczenie stabilnych warunków przebiegu procesu obróbkowego bazuje na zmianach prędkości obrotowej wrzeczona jako parametru lub na zmiennych w czasie prędkościach obrotowych wrzeczona. Wg autorów [BMH2009] algorytm postępowania podzielony został na dwie fazy. W pierwszej następuje diagnostyka procesu i detekcja drgań, a w drugiej wygaszenie drgań lub optymalizacja procesu obróbkowego. Podstawą diagnostyki procesu obróbkowego i detekcji drgań jest analiza sygnału dźwiękowego, z którego odfiltrowane zostają częstotliwości związane z prędkością

Obróbka stabilna – drgania samowzbudne wprowadzenie

obrotową wrzeciona, wejściami poszczególnych ostrzy narzędzia w materiał przedmiotu obrabianego oraz ich harmoniczne i powielenia usytuowane poza obszarem występowania drgań. Autorzy wykorzystali zasady logiki rozmytej, w której pomiędzy stanem 0 (fałsz) a stanem 1 (prawda) znajduje się szereg wartości pośrednich, które to określają stopień przynależności danego elementu do zbioru. Logika rozmyta jest użyteczna w zastosowaniach inżynierskich, czyli tam, gdzie klasyczna logika klasyfikująca jedynie według kryterium prawda/fałsz nie potrafi jednoznacznie poradzić sobie z wieloma czynnikami, nierzadko o niejednoznacznym charakterze i stanowiącymi sprzeczności. Z tego powodu logika rozmyta jest stosowana przy budowie systemów eksperckich. Według autorów [BMH2009, LTS1999] dobór/dopasowanie/regulacja prędkości obrotowej wrzeciona dla zapewnienia stabilności procesu obróbkowego nie wymaga zaawansowanej wiedzy z zakresu dynamiki i stanowi łatwą w implementacji technikę. Strategia polega na detekcji częstotliwości drgań typu chatter i wyznaczenia nowej wartości prędkości obrotowej wrzeciona, tak by nowa częstotliwość (również kolejne harmoniczne) wchodzenia ostrzy narzędzia w przedmiot obrabiany stanowiła wielokrotność częstotliwości drgań. Pozwala to na minimalizowanie kąta przesunięcia fazowego między falą ostrza wychodzącego z przedmiotu a wibracją ostrza będącego w przedmiocie – działanie prewencyjne minimalizujące możliwość wzbudzenia drgań chatter.

Autorzy [BMH2009] odwołali się do kryterium Nyquist'a w celu wyznaczania zakresów stabilności obróbki (krzywych workowych), Podstawową dotychczas metodą pozwalającą na dobór parametrów obróbkowych jest wykorzystanie selektora stabilnych prędkości obrotowych [CFBL2008, GK2009, LTS1999]. W metodzie tej wykorzystuje się również szerokość lub osiową głębokość skrawania frezu oraz wykresy przedstawiające tzw. krzywe workowe. Wymienione krzywe workowe [GK2009] mają ograniczone zastosowanie dla niestacjonarnych układów mechanicznych. W [BMH2009, MGBR2008, QCT2008] nawiązano do rozwijania metod z wykorzystaniem tzw. krzywych workowych, przy czym prędkość obrotową wybrano jako główny czynnik decydujący o stabilności procesu obróbkowego. Rozbudowano metodykę syntezy krzywych workowych wprowadzając 3 oś opisującą pozycję narzędzia wzdłuż przedmiotu obrabianego. Wg autorów [MGBR2008] takie rozszerzenie krzywych workowych pozwala na analizę wszystkich stanów podczas obróbki.

Sygnał dźwiękowy jest rejestrowany poprzez mikrofon i poddawany analizie. Jeżeli drgania samowzbudne nie zostaną wykryte możliwe jest zwiększenie wydajności obróbki skrawaniem (ang. MRR – Material Removal Rate) poprzez zwiększenie głębokości warstwy skrawanej lub posuwu roboczego. W przypadku detekcji drgań samowzbudnych wykorzystywana jest strategia oscylacji/zmienności prędkości obrotowej wrzeciona. Dla krzywych wyższego poziomu obszary obróbki stabilnej mają smukłe kształty. Określenie parametrów w takim uwarunkowaniu jest utrudnione. Autorzy przyjęli ograniczenie iteracji dla strategii, które wynosi przekroczenie 5 powtórzeń pętli tej strategii. W takim przypadku stosowany jest odmienny algorytm, który proponuje wartości prędkości obrotowej wrzeciona poniżej i powyżej aktualnej prędkości, które mają zapewnić stabilność procesu obróbkowego.

Obróbka stabilna – drgania samowzbudne wprowadzenie

Przyjęty algorytm syntezy krzywych workowych (ang. SLD – Stability Lobe Diagram) [MGBR2008, MR2009] wymaga znajomości częstości/częstotliwości drgań własnych OUPN. W tym celu należy przeprowadzić analizę modalną, której celem jest określenie tych wartości. Wykorzystanie poniższych zależności:

$$\varphi = 2 \arctg \left\{ c \cdot \left[\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right] \cdot \frac{1}{k\omega} \right\}$$

gdzie: φ – kąt przesunięcia fazowego; c – sztywność; ω – częstość drgań; ω_0 – częstość drgań własnych; k – współczynnik tłumienia;

$$g_{gr} = \frac{k\omega}{k_{xd} \cdot \sin\varphi}$$

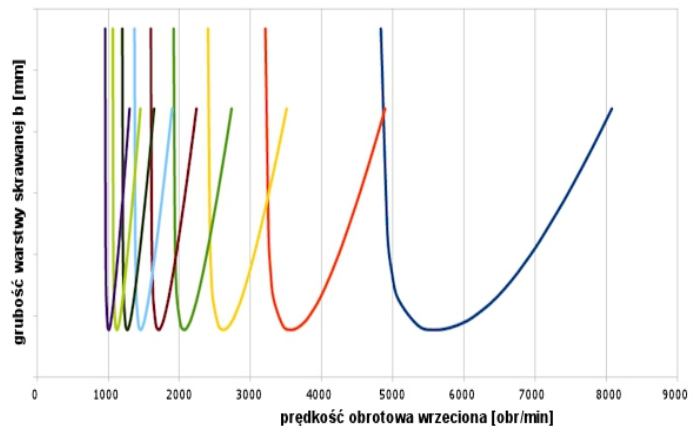
gdzie: g_{gr} – wartość granicznej szerokości/głębokości skrawania; k_{xd} – dynamiczny opór właściwy skrawania;

$$n = \frac{60 \cdot \frac{\omega}{z}}{2\pi \cdot N - \varphi}$$

gdzie: n – prędkość obrotowa napędu głównego; N – numer fali; z – liczba zębów narzędzia.

pozwala na wyznaczenie krzywych workowych (rys. 2). Na rys.2 wyraźnie uwidoczniła jest tzw. graniczna wartość szerokości/głębokości warstwy skrawanej poniżej której obróbka jest obróbką stabilną. (Wykres powstał na podstawie rzeczywiście przeprowadzonych pomiarów). Wykorzystanie krzywych workowych polega na odnalezieniu takich parametrów obróbkowych (n , ap lub ae), które znajdują się w obszarze obróbki stabilnej i zapewniających wysoką wydajność obróbki.

Jak widać szczególnie efektywne mogą być wyniki dla fali N od 1 do 5 (licząc od prawej strony). Dla fal wyższego rzędu ze względu na smukłość obszarów wyznaczanie parametrów powyżej szerokości/głębokości skrawania może nie być efektywne.



Rys.2 Przykładowe krzywe workowe.



CADblog.pl

CADylobe.pl



Obróbka stabilna – drgania samowzbudne wprowadzenie

Źródła

- [BMH2009] I.Bediaga, J.Munoa, J.Hernández, L.N. López de Lacalle, An automatic spindle speed selection strategy to obtain stability in high-speed milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009) p. 384-394
- [CFBL2008] A.A.Cardi, H.A.Firpi, M.T.Bement, S.Y.Liang, Workpiece dynamic analysis and prediction during chatter of turning process, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22 (2008) p.1481-1494
- [EA2001a] S.Engin, Y.Altintas, Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical end mills, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001) p. 2195-2212
- [EA2001b] S.Engin, Y.Altintas, Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part II: inserted cutters, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001) p. 2213-2231
- [GK2009] M.Galewski, K.Kaliński, Nadzorowanie drgań przy frezowaniu szybkościowym smukłymi narzędziami ze zmienną prędkością obrotową, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2009
- [LTS1999] E.Leigh, J.Tlusty, J.Schueller, Applying high-speed machining techniques on rotor grip configurations, 55th Annual Forum, Montreal, Quebec, Canada, May 25-27, 1999
- [MK1991] K.Marchelek, Dynamika obrabiarek, wyd.II WNT 1991
- [MR2009] R.Morek, Analiza modalna. Stabilność obróbki (drgania samowzbudne). Materiały niepublikowane, ZAOiOS ITW WIP PW 2009
- [MGBR2008] I.Mane, V.Gagnol, B.C.Bouzgarrou, P.Ray, Stability-based spindle speed control during flexible workpiece high-speed milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) p.184-194
- [QCT2008] G.Quintana, J.Ciurana, D.Teixidor, A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) p.1637-1645

© MorekTECH Radosław Morek 2015

Publikowane materiały są objęte prawem autorskim. Przedruk materiałów w jakiegokolwiek formie tylko za wcześniejszą zgodą autora.

Opracowanie: MorekTECH
radek_morek@morektech.com.pl
www.morektech.com.pl

Warszawa, 12.11.2015, nr 6/2015 (6) wersja 1