

Mgr inż. Roman WADOWIK, e-mail: rwdowik@prz.edu.pl
Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Dr hab. inż. Janusz PORZYCKI, prof. PRz, e-mail: jpor@prz.edu.pl
Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Dr inż. Piotr NAZARKO, e-mail: pnazarko@prz.edu.pl
Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

PROBLEMATYKA WYBORU CZĘSTOTLIWOŚCI OPERACYJNEJ DRGAŃ NA OBRABIARCE CNC DO REALIZACJI PROCESÓW OBRÓBK ZE WSPOMAGANIEM ULTRADŹWIĘKOWYM

Streszczenie: Artykuł przedstawia analizę możliwości w zakresie wyboru częstotliwości operacyjnej drgań narzędzia dla obrabiarki CNC do realizacji procesów obróbki ze wspomaganiem ultradźwiękowym. W zależności od występujących zjawisk fizycznych przedstawiono charakterystykę różnych zakresów częstotliwości. Do badań zastosowano hybrydową obrabiarkę CNC Ultrasonic 20 linear z układem wzbudzania drgań ultradźwiękowych narzędzia oraz skanujący wibrometr laserowy.

Słowa kluczowe: obróbka ze wspomaganiem ultradźwiękowym, wybór częstotliwości operacyjnej drgań, drgania, oscylacje, ultradźwięki

ISSUES OF THE CHOICE OF VIBRATIONS FREQUENCY FOR CNC MACHINE TOOL APPLIED FOR ULTRASONIC ASSISTED MACHINING PROCESSES

Abstract: The paper presents the analysis of possibilities of the choice tool vibrations frequency for CNC machine tool intended for ultrasonic assisted machining processes. The description of different frequency ranges is worked up and physical phenomena are taken into consideration. The hybrid CNC machine tool Ultrasonic 20 linear with tool vibration and the laser scanning vibrometer are applied for investigations.

Keywords: ultrasonic assisted machining, choice of vibrations frequency, vibrations, oscillations, ultrasound

1. WPROWADZENIE

Realizacja obróbki ze wspomaganiem ultradźwiękowym wymaga określenia danych wejściowych procesu, do których należy, między innymi, częstotliwość drgań. Najczęściej wybierana jest ona w sposób umożliwiający osiągnięcie warunków rezonansu [1, 2], dla którego amplituda drgań ultradźwiękowych jest największa. W przypadku możliwości wyboru różnych wartości częstotliwości prądu generatora ultradźwięków dla danej obrabiarki hybrydowej, istotna jest również analiza częstotliwości innych niż rezonansowa. Wynika to ze specyfiki funkcjonowania układu wzbudzania drgań, np. występujących dla danej częstotliwości zjawisk fizycznych, co powinno być uwzględniane w odniesieniu do realizacji konkretnych zabiegów technologicznych. Dla przykładu, można wskazać trzy różniące się między sobą procesy obróbkowe, do których realizacji zastosowane mogą być ściernice diamentowe lub z regularnego azotku boru: mikroobróbkę konturu zewnętrznego przedmiotu, wykonywanie otworów o średnicy kilku milimetrów tzw. „wiertłem” diamentowym oraz planowanie płaszczyzny.

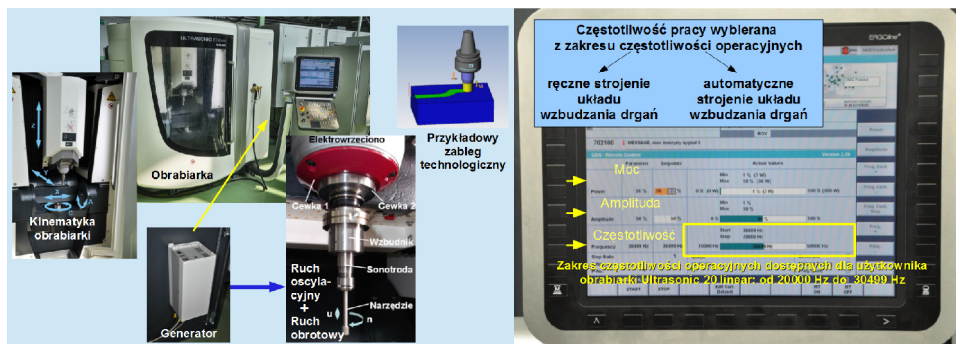
Z uwagi na niewielkie wymiary gabarytowe konturu kształtowanego w procesie mikroobróbki, przy zastosowaniu zbyt dużej amplitudy drgań, mogą wystąpić wykruszenia materiału prowadzące do zniszczenia przedmiotu. W przypadku wiercenia, kryterium optymalizacji procesu będzie zwiększanie wydajności obróbki, dla której większe wartości amplitudy mogą być bardziej korzystne. Natomiast dla planowania powierzchni, istotne

będzie na przykład osiągnięcie określonej wartości parametrów chropowatości powierzchni. Celem prezentacji powyższych przykładów jest sformułowanie stwierdzenia, że w zależności od koniecznych warunków prowadzenia procesu, może zaistnieć potrzeba zmiany wartości parametrów ruchu oscylacyjnego (częstotliwości i amplitudy drgań).

Przykłady wskazane wyżej, a także inne, oparte o wyzwania związane z realizacją różnych zabiegów technologicznych, uwzględniających wspomaganie ultradźwiękowe, są powodem analizy możliwości w zakresie ustawiania różnych wartości częstotliwości drgań ultradźwiękowych.

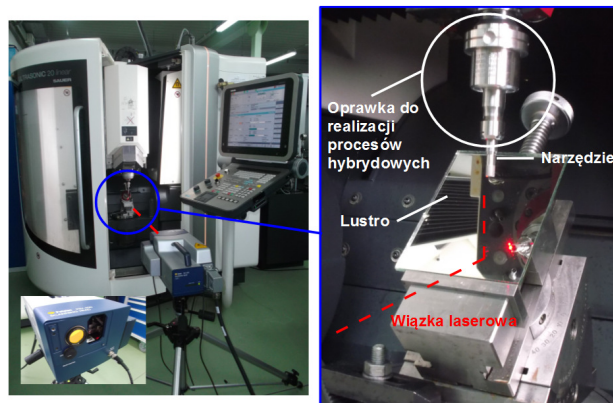
2. BADANIA MAJĄCE NA CELU OKREŚLENIE CZĘSTOTLIWOŚCI OPERACYJNEJ DRGAŃ WŁAŚCIWEJ DLA DANEGO PROCESU OBRÓBK

Do badań zastosowano hybrydową, sterowaną numerycznie obrabiarkę Ultrasonic 20 linear (rys. 1). Maszyna wyposażona jest w układ wzbudzania drgań ultradźwiękowych narzędzia. Sygnał napięciowy o wysokiej częstotliwości, powstający w generatorze, zamieniany jest na drgania mechaniczne narzędzia przez wykorzystanie zjawiska indukcji zachodzącego dla cewek związanych z elektrowrzecionem i oprawką narzędziową oraz odwrotnego zjawiska piezoelektrycznego zachodzącego w piezoprzetworniku (wzbudniku drgań). Strojenie układu wzbudzania drgań (dla konkretnego narzędzia) odbywa się przez ręczną zmianę wartości mocy, amplitudy oraz częstotliwości, odniesionych do wielkości elektrycznych generatora, w nakładce układu Sinumerik 840D sl. W przypadku ostatniego z parametrów możliwa jest zmiana w zakresie od 20 000 do 30 499 Hz, która skutkuje zmianą częstotliwości drgań mechanicznych narzędzia. Zostało to potwierdzone podczas badań wibrometrem laserowym. W nowszych maszynach Ultrasonic producent oferuje (oprócz ręcznego strojenia) funkcję automatycznego strojenia, podczas którego wyszukiwana jest częstotliwość rezonansowa. Rozwiązanie to jest wygodne w przypadku konieczności wyboru częstotliwości rezonansowej drgań do realizacji procesu obróbki.



Rys. 1. Hybrydowa obrabiarka Ultrasonic 20 linear z układem wzbudzania oscylacji narzędzia

Zastosowanie skanującego wibrometru laserowego Polytec PSV-400 umożliwiło analizę drgań mechanicznych narzędzia. Przykładowa konfiguracja, dzięki której możliwy jest pomiar drgań w kierunku zgodnym z osią narzędzia została przedstawiona na rys. 2. Wiązka laserowa pada na lustro ustawione na stole obrabiarki, następnie odbita jest w kierunku powierzchni czołowej narzędzia ściernego zamocowanego w oprawce do realizacji procesów hybrydowych. Po zmianie wartości częstotliwości prądu w nakładce układu Sinumerik możliwy jest pomiar drgań wibrometrem. Podstawowe wielkości jakie uzyskać można podczas pomiaru to wartość przemieszczeń (amplituda drgań w danym kierunku), prędkość oraz przyspieszenie. Utworzone widmo częstotliwości umożliwia także odczyt wartości częstotliwości drgań narzędzia.



Rys. 2. Przykładowa konfiguracja obrabiarki i skanującego wibrometru laserowego Polytec PSV-400

Dodatkowo w celu pomiaru zmian temperatury sonotrody zastosowano kamerę termowizyjną. Pomiary wibrometrem oraz kamerą nie są możliwe podczas doprowadzania do narzędzia cieczy chłodząco - smarującej z uwagi na zakłócenia pomiaru spowodowane jej cząsteczkami.

W tabeli 1 przedstawiony został wpływ zmian częstotliwości operacyjnej na przebieg procesu.

Na podstawie pomiarów drgań wibrometrem, które uwiarydliły, że po zmianie częstotliwości prądu zmienia się także częstotliwość drgań mechanicznych narzędzia, sformułowany został wniosek przedstawiony w tabeli, dotyczący mikrogeometrii powierzchni.

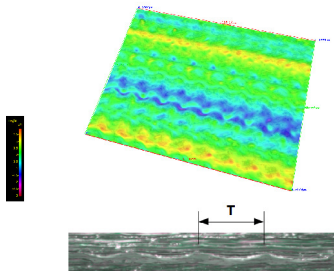
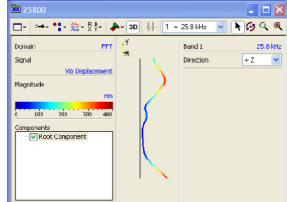
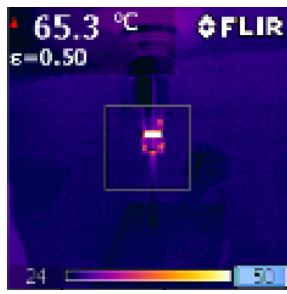
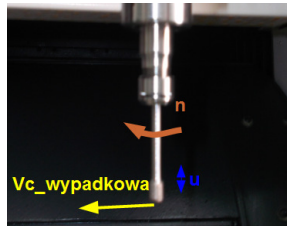
W przypadku amplitudy drgań pomiary wibrometrem uwiarydliły wyraźną zależność jej wartości od ustawionej częstotliwości. Należy przy tym zaznaczyć, że pomiary wykonywane były poza procesem obróbki, gdzie nie uwzględniano ewentualnych zmian amplitudy wynikających z tłumienia drgań. Wartości amplitudy mogą być również (w sposób mniej dokładny) odczytane z obrazów mikroskopowych, po zarysowywaniu przedmiotu jako połowa zmierzonej wartości międzyszczytowej (tablica 1).

Powstające zjawiska cieplne mogą być analizowane dzięki możliwościom jakie stwarzają pomiary termowizyjne. Należy jednak zaznaczyć, że odczyt rzeczywistej wartości temperatury jest możliwy po wybraniu właściwych ustawień kamery termowizyjnej. Istotnym parametrem nastawnym jest emisyjność ϵ . Jednak dla przypadku wyłącznie jakościowych pomiarów zmian temperatury w czasie, wartość parametru ϵ nie jest kluczowa, aby zaobserwować i zinterpretować jakościowo zachodzące zjawiska. Należy jednak pamiętać, że będzie można jedynie stwierdzić kiedy temperatura rosła szybciej, a kiedy wolniej- bez uwzględniania jej rzeczywistej wartości.

Stwierdzono podczas pomiarów wibrometrem, że zmiany temperatury złącza oprawka-narzędzie wpływają na wartości amplitudy oscylacji.

Określenie wektora wypadkowej prędkości skrawania jest zagadnieniem bardzo złożonym. W szczególności przyjęty musi być właściwy model matematyczny określający ruch oscylacyjny. Opracowanie takiego modelu będzie możliwe po wykonaniu szczegółowych pomiarów drgań narzędzia w różnych kierunkach, tak aby uwzględnione zostały rzeczywiste wartości i kierunki przemieszczeń wybranego punktu ściernicy. Można również przyjąć model uproszczony zakładający drgania wyłącznie w kierunku osiowym i brak zmian amplitudy w czasie.

Tabela 1. Wpływ zmian częstotliwości operacyjnej na przebieg procesu

Wskaźnik określający wpływ zmiany częstotliwości operacyjnej na przebieg procesu	Możliwości w zakresie analizy wskaźników określających wpływ zmiany częstotliwości operacyjnej na przebieg procesu
<p>Mikrogeometria powierzchni Zmiana częstotliwości operacyjnej f drgań wpływa na mikrogeometrię powierzchni. Dla przykładu: podczas zarysowywania przedmiotu powierzchnią walcową części roboczej ściernicy, na skutek zmiany wartości f, zmienia się wartość oznaczona jako T oraz amplituda oscylacji. Wartość T jest odniesiona do śladu ziarna ściernego powstającego na przedmiocie obrabianym.</p>	 <p>Mikroskopowe badania mikrostruktury</p>
<p>Amplituda oscylacji Zmiana częstotliwości operacyjnej f wpływa na zmianę wartości amplitudy drgań zarówno w kierunku zgodnym z kierunkiem osi narzędzia jak i w kierunku do niego prostopadłym</p>	 <p>Pomiar amplitudy drgań promieniowych skanującym wibrometrem laserowym</p>
<p>Zjawiska ciepne W zależności od wartości częstotliwości operacyjnej powstawać mogą zjawiska ciepne odniesione do złącza narzędzie-oprawka, które skutkują wzrostem temperatury w przypadku braku chłodzenia</p>	 <p>Pomiar kamerą termowizyjną</p>
<p>Wypadkowa prędkość skrawania Podczas zmiany częstotliwości operacyjnej zmienia się prędkość ruchu oscylacyjnego odniesiona do ziarna ściernego, co wpływa na wypadkową prędkość skrawania</p>	 <p>Określenie z zależności matematycznej na podstawie pomiarów prędkości drgań wibrometrem laserowym oraz prędkości obrotowej wrzeciona z zastosowaniem tachometru lub odczytu wartości mierzonej przez układ pomiarowy obrabiarki</p>

Na podstawie wykonanych pomiarów określone mogą być kryteria wyboru częstotliwości operacyjnej.

3. KRYTERIA WYBORU CZĘSTOTLIWOŚCI OPERACYJNEJ

Analiza zmian amplitudy wibrometrem laserowym oraz zachodzących zjawisk fizycznych prowadzi do określenia zakresów częstotliwości, dla których wybrane wartości częstotliwości spełniają założone w tabeli 2 kryterium. Dla oprawki z gniazdem pod tulejki ER-11 z zamocowaną ściernicą trzpieniową oraz w odniesieniu do obrabiarki, z którą związane były badania, obserwowano trzy charakterystyczne zakresy częstotliwości operacyjnych (rys. 3):

- częstotliwości przed rezonansem, to te wartości częstotliwości operacyjnych, których wartość jest mniejsza niż częstotliwości rezonansowej. W tym zakresie nie obserwowano znaczących zjawisk cieplnych wpływających na wartości amplitudy,

- częstotliwość rezonansowa i częstotliwości około rezonansowe, to te wartości częstotliwości operacyjnych, dla których wartości przemieszczeń (amplitudy drgań) były największe oraz obserwowano największy wpływ zjawisk cieplnych na wartości amplitudy drgań,

- częstotliwości po rezonansie, czyli te wartości częstotliwości operacyjnych gdzie amplituda drgań odniesiona do części roboczej narzędzia była mniejsza niż w rezonansie, a wartość częstotliwości większa niż częstotliwość, w której występuje rezonans. W przypadku występowania zjawisk cieplnych zakres ten charakteryzuje się coraz mniejszymi zmianami temperatury w czasie (odniesionymi do konkretnej częstotliwości) wraz ze wzrostem wartości częstotliwości operacyjnej.

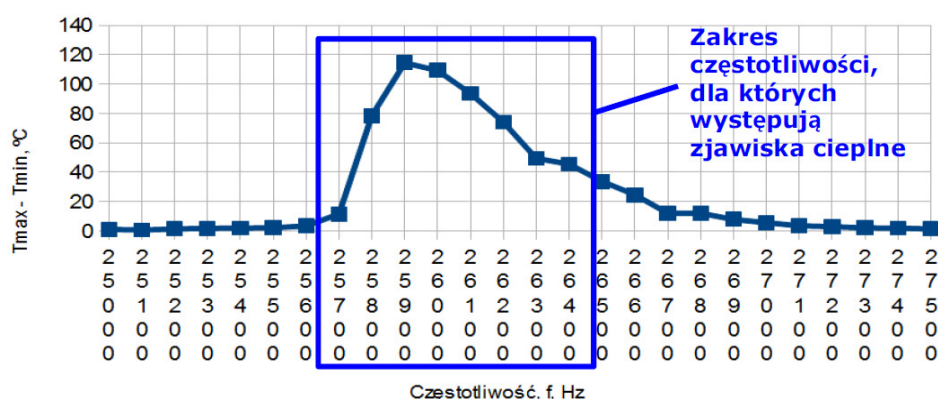
Należy podkreślić, że wartości zmian temperatury $T_{max}-T_{min}$ przedstawione na rys. 4 odczytane były z wyświetlacza kamery termowizyjnej dla współczynnika $\epsilon=0,5$. Pomiary kamerą termowizyjną miały na celu wyłącznie określenie dla jakich częstotliwości operacyjnych występujące zmiany temperatury są największe bez badania rzeczywistej wartości temperatury. Uwidocznily jedynie w jakich częstotliwościach temperatura rośnie najszybciej. Istotnym jest również fakt, że w przypadku efektywnego chłodzenia cieczą lub sprężonym powietrzem oprawka i narzędzie nie rozgrzewały się w każdym z trzech zakresów częstotliwości operacyjnych, a mierzone wartości parametrów ruchu oscylacyjnego podczas chłodzenia (stosowano sprężone powietrze) nie ulegały tak znacznym zmianom jak w przypadku gdy nie zastosowano chłodzenia.



Rys. 3. Główne zakresy częstotliwości operacyjnych i ich wpływ na możliwe zjawiska cieplne dla przykładowego narzędzia ściernego zamocowanego kluczem dynamometrycznym w oprawce z gniazdem na tulejki ER-11

Wykonano również badania dla innej dostępnej dla obrabiarki oprawki z mocowaniem narzędzia na trzpieniu $\Phi 14H6$. Dla zamocowanej w tej oprawce ściernicy garnkowej obserwowano występowanie rezonansu na początku zakresu częstotliwości operacyjnych (tj. blisko częstotliwości 20 000 Hz). Należy stwierdzić, że w tym przypadku, z uwagi na brak możliwości ustawienia niższych częstotliwości, nie było możliwe przebadanie częstotliwości niższych od tej, która została zdefiniowana jako „rezonansowa dla dostępnego zakresu częstotliwości operacyjnych”.

Opracowane w tabeli 2 kryteria wyboru częstotliwości operacyjnej uwzględniają badania przeprowadzone dla dwóch rodzajów oprawek i oparte są o wymagania jakie mogą być stawiane w odniesieniu do realizacji określonych zabiegów technologicznych (o czym wspomniano we wstępie tego artykułu).



Rys. 4. Wykres zmian wartości temperatury złącza oprawka-narzędzie, odczytanej z wyświetlacza kamery termowizyjnej, uzyskany po pomiarze w czasie 3 minut przy braku efektywnego chłodzenia cieczą lub sprężonym powietrzem (odczyt temperatury na wyświetlaczu kamery Flir i50 dla $\epsilon=0,5$)

Tabela 2. Kryteria doboru częstotliwości operacyjnej i ich przewidywane zastosowanie

Kryterium doboru częstotliwości operacyjnej	Zastosowanie kryterium w procesie technologicznym uwzględniającym obróbkę ze wspomaganie ultradźwiękowym
Największa amplituda drgań i pominięcie zakresu jej zmian	Większość zastosowań, gdzie liczy się uzyskanie wpływu oscylacji na wielkości wyjściowe procesu, np. spadek sił procesowych
Niewielki zakres zmian amplitudy i jej względnie duże wartości	Większość zastosowań, gdzie liczy się uzyskanie wpływu oscylacji na wielkości wyjściowe procesu i brak zmian założonej wartości amplitudy
Niewielki zakres zmian amplitudy i jej niewielkie wartości	Mikro i nanoobróbka
Wymagana określona częstotliwość drgań bez względu na amplitudę drgań	Uzyskanie określonej mikrostruktury powierzchni i wymaganego funkcjonowania falowodu
Wymagana określona częstotliwość drgań jako funkcja danych wejściowych procesu, $f=f$ (dane wejściowe), np. $f=f$ (prędkość obrotowa wrzeciona, średnica ściernicy)	Inne, specjalne zalecenia technologiczne, np. uzyskanie określonej wartości parametru T (patrz. Tabela 1)

4. WNIOSKI

W większości zastosowań wspomagania ultradźwiękowego do realizacji procesów obróbki dąży się do zapewnienia warunków rezonansu, gdzie wpływ oscylacji ultradźwiękowych na przebieg procesu będzie związany z wykorzystywaniem największych przemieszczeń krawędzi skrawających (np. ziaren ściernych), oraz związanej z tym największej amplitudy drgań. Z uwagi na szerokie spektrum przyszłych zastosowań procesów obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym oraz ze względu na występujące w układach wzbudzania oscylacji zjawiska fizyczne wpływające na przebieg ruchu oscylacyjnego częstotliwości rezonansowe i około rezonansowe stanowią jedynie pewien obszar możliwych do zastosowania częstotliwości operacyjnych. Wynika z tego wniosek, że w niektórych przypadkach technologicznych (np. w odniesieniu do mikroobróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym) mogą być rozpatrywane także inne częstotliwości operacyjne, w których występujące wartości amplitudy drgań będą mniejsze niż w rezonansie, jednak zakres zmian amplitudy w czasie, wpływ zjawisk cieplnych oraz wartość amplitudy drgań będą odpowiednie dla przebiegu danego procesu. Szczegółowa analiza wyników realizacji różnych zabiegów technologicznych doprowadzi do rozszerzenia wiedzy na temat wpływu częstotliwości operacyjnej drgań oraz innych parametrów nastawnych generatora na wielkości wyjściowe procesów obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym (również procesów, dla których drgania ultradźwiękowe związane są z przedmiotem obrabianym).

LITERATURA

- [1] Ultrasonic Assisted Grinding of brittle hard materials, final technical report, CORNET project, Austria, April 2010.
- [2] Yao Z., Guo Z. N., Zhang Y. J., Deng Y., Zhang W. T.: Research on the frequency tracking in rotary ultrasonic machining. *Procedia CIRP* 6 (2013) 557 – 561.