

Wybrane zagadnienia projektowania sonotrod na potrzeby obróbki ubytkowej wspomagananej drganiami ultradźwiękowymi obrabianego przedmiotu

Designing principles of sonotrodes applied in process of ultrasonic assisted cutting process with workpiece oscillation

MAREK KROK
JANUSZ PORZYCKI
MARCIN ŻÓŁKOŚ *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.10.358

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z projektowaniem sonotrod na potrzeby obróbek ubytkowych, takich jak frezowanie czy szlifowanie, gdzie w ruch drgający wprowadzany jest przedmiot obrabiany. Omówiono materiały stosowane na sonotrody, obciążenia mechaniczne przedmiotu obrabianego oraz charakterystykę pracy falowodu.

SŁOWA KLUCZOWE: projektowanie sonotrod, wspomaganie procesu szlifowania drganiami ultradźwiękowymi, oscylacje przedmiotu obrabianego

The article presents selected issues related to the design sonotrodes for the needs of machining processes such as milling and grinding, wherein the oscillatory motion is inducted into the workpiece. The materials used for the purpose of ultrasonic vibrations, mechanical loads of the workpiece and the operating characteristics of the waveguide are described.

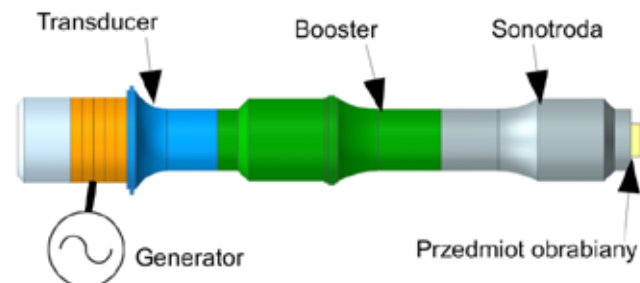
KEYWORDS: sonotrodes design, ultrasonic assisted machining, workpiece oscillations

UAM (*Ultrasonic Assisted Machining*) jako jeden z procesów hybrydowych stanowi alternatywę dla obróbki materiałów trudnoobrabialnych ze względu na swoją stosunkowo prostą kinematykę obróbkową w stosunku do innych hybrydowych metod obróbki. Ma on liczne zalety, takie jak zmniejszenie strefy wpływu ciepła, zmniejszenie sił skrawania, zmniejszenie wpływu oraz zużycia narzędzi, jak również poprawia jakość obrabianej powierzchni i wydajność usuwania materiału w porównaniu z konwencjonalnymi metodami [1÷5].

Budowa układu wzbudzającego drgania ultradźwiękowe obrabianego przedmiotu

Układy wzbudzające drgania ultradźwiękowe w technologiach wytwarzania znajdują zastosowanie przy zgrzewaniu materiałów o różnych właściwościach mechanicznych oraz jako pomocnicze źródło energii w typowych metodach obróbkowych, jak: frezowanie, wiercenie, toczenie, szlifowanie. Układ wzbudzający drgania ultradźwiękowe w podstawowej wersji może się składać z następujących elementów: Generator ultradźwięków przekształca prąd zasilający (240 V 50 Hz) na sygnał elektryczny o napięciu rzędu 800÷1000 V i częstotliwości 20÷30 kHz. Sygnał ten jest przekazywany do pierścieni piezoelektrycznych. Transducer jest odpowiedzialny za przekształcanie energii elektrycznej na intensywne drgania mechaniczne. Element wykonawczy przetwornika zbudowany jest z pierścieni piezoelektrycznych,

zasilanych prądem przemiennym o częstotliwości rezonansowej elementów mechanicznych transducera. Booster jest to opcjonalny element falowodu mający za zadanie zmianę wartości amplitudy drgań, np. 1:2 booster zwiększa amplitudę, 1:0,5 booster zmniejsza amplitudę. W boosterze, tak jak i w każdym z pozostałych elementów falowodu, występuje płaszczyzna neutralna, gdzie amplituda drgań jest równa zero. Ta właściwość płaszczyzny neutralnej może posłużyć do mocowania falowodu do podłoża. Sonotroda jest elementem wykonawczym falowodu, projektowanym dla każdego przypadku technologicznego indywidualnie. Jest aktywną częścią zespołu ultradźwiękowego. Pozostaje w kontakcie z materiałem obrabianym i działa jako młot. Sonotroda może stanowić kolejny element wzmacniający lub redukujący drgania oraz w przypadku występowania płaszczyzny neutralnej można w stosunku do sonotrody stosować dodatkowe podparcia. Budowę falowodu wraz z generatorem przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat budowy falowodu do wzbudzania drgań w przedmiocie obrabianym

Stosowane materiały

Materiały konstrukcyjne stosowane do budowy falowodu powinny się charakteryzować możliwie niską impedancją akustyczną, która zapewnia dobrą propagację drgań w materiale, niską gęstość, ogranicza zapotrzebowanie energetyczne dla transducera i jednocześnie powinny mieć dużą wytrzymałość mechaniczną. W tabelicy przedstawiono przykładowe wartości gęstości ρ w g/cm^3 , modułu Younga E w GPa, prędkości dźwięku w ośrodku v w m/s oraz wartość impedancji akustycznej R w $\text{kg/m}^2\text{s}$ typowych materiałów stosowanych w konstrukcji falowodów oraz dla porównania dla zwykłej stali.

Stopy aluminium mają najlepsze właściwości pod względem propagacji fal w materiale. Jednak ze względu na stosunkowo niską wytrzymałość, stosowanie tych materiałów w budowie falowodu jest ograniczone wytrzymałością materiału przy wymiarach zapewniających odpowiednią częstotliwość rezonansową.

* Mgr inż. Marek Krok (mkrok@prz.edu.pl), dr. hab. inż. Janusz Porzycki (jpor@prz.edu.pl), mgr inż. Marcin Żółkoś (markos@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska, Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji

TABLICA. Właściwości mechaniczne materiałów stosowanych do budowy sonotrod

Nazwa	ρ , g/cm ³	E , GPa	ν , m/s	R , kg/m ² s
Aluminium	2,70	71,7	6420	17,33
Tytan	4,48	113,8	6100	27,3
Stal nierdzewna	7,89	193	5790	45,7
Stal konstrukcyjna	7,8	206	5900	46,0

Tytan jako materiał stosowany do budowy falowodów ma najlepszy stosunek wytrzymałości do impedancji falowej. Materiał ten jest wykorzystywany do budowy transduserów, boosterów, sonotrod oraz łączników, co sprawia, że układ wzbudzający drgania zachowuje stałą długość fali akustycznej w całym falowodzie.

Stal nierdzewna, pomimo iż właściwościami akustycznymi zbliżona jest do zwykłej stali, może być stosowana na elementy wykonawcze w specyficznych sytuacjach, np. do pracy w środowisku silnie utleniającym. Zastosowanie tego materiału wiąże się jednak z obostrzeniami odnośnie do częstotliwości rezonansowej, która musi być dokładnie dopasowana do częstotliwości pozostałych części falowodu, aby nie powodować odbić i rozproszenia fali.

Obciążenia dynamiczne przedmiotu obrabianego

Przedmiot obrabiany zamocowany na sonotrodzie poddawany jest działaniu sił skrawania oraz sił z powstałych harmonicznym drgań mechanicznych. Mocowanie przedmiotu musi być na tyle stabilne, aby sprostać siłom rzędu:

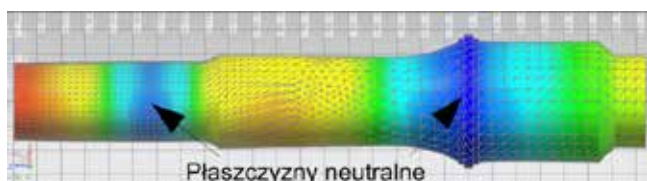
$$F = -m \omega A, N$$

gdzie: m – masa próbki, A – amplituda drgań, ω – częstość kołowa.

Przykładowo maksymalna siła dla przedmiotu obrabianego o masie 40 g przy częstotliwości oscylacji 20 kHz i amplitudzie 5 μm wynosi 31,5 N.

Płaszczyzny neutralne i mocowanie układu drgającego

Drgania wzdłużne falowodu posiadają charakterystyczne dla ich postaci płaszczyzny neutralne, w których amplituda drgań jest zerowa. Płaszczyzny te są umiejscowione poprzecznie do fali wzdłużnej i rozmieszczone co połowę długości fali. W trakcie projektowania układu drgającego, w miejscach występowania płaszczyzn neutralnych należy stosować podpory (ich położenie $\pm 5\%$ długości fali), aby nie przekazywać energii fali do podłoża. Przykładowe płaszczyzny neutralne pokazano na rys. 2 w przekrojach o współrzędnych 0 oraz 133 mm. Mimo iż w płaszczyźnie neutralnej amplituda drgań jest zerowa, ze względu na zmienne właściwości materiału i możliwość niewielkiej ich zmiany, podpory powinny być projektowane jako mechaniczny filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej mniejszej od częstotliwości rezonansowej układu. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe rozwiązanie podpory tłumiącej.



Rys. 2. Płaszczyzny neutralne w falowodzie

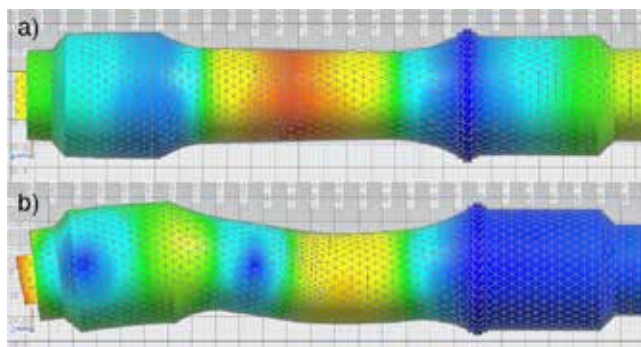


Rys. 3. Podpora sprężysta nieprzenosząca drgań na korpus obrabiarki

Metoda elementów skończonych w projektowaniu falowodu

Zazwyczaj w analizach numerycznych wykonywanych na potrzeby przemysłu występuje konieczność określenia częstotliwości modalnej. Kiedy konstrukcja będzie poddawana cyklicznym obciążeniom z częstotliwością bliską częstotliwości własnej, dochodzi wówczas do niebezpiecznego wzrostu amplitudy drgań konstrukcji i może skutkować jej nadmiernym obciążeniem lub nawet zniszczeniem. Zjawisko to jest nazywane rezonansem i zazwyczaj w przemyśle jest zjawiskiem niepożądanym. Jednakże w przypadku projektowania falowodu rezonans mechaniczny elementów jest wykorzystywany w celu wzmocnienia drgań przenoszonych na przedmiot obrabiany.

Przykładowy wynik symulacji dla sonotrody wraz z boosterem przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wynik symulacji MES sonotrody wraz z boosterem: a) poprawna postać drgań o częstotliwości rezonansowej 21 kHz, b) jedna z wielu niepoprawnych postaci drgań dla częstotliwości rezonansowej 3,6 kHz

Podsumowanie

Projektowanie sonotrod do obróbki mechanicznej to złożone zagadnienie mechaniczne, do którego rozwiązania należy stosować nowoczesne metody projektowania przy uwzględnieniu właściwości indywidualnego przypadku technologicznego.

Artykuł stanowi częściowe przedstawienie wyników uzyskanych w realizacji projektu PBS2/B6/17/2013.

LITERATURA

- Wang Y., Lin B., Wang S., Cao X. "Study on the system matching of ultrasonic vibration assisted grinding for hard and brittle materials processing". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. No. 77 (2014): pp. 66-73.
- Wang Y., Lin B., Zhang X. "Research on the system matching model in ultrasonic vibration-assisted grinding". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. No. 70 (2014): pp. 499-458.
- Bhaduri D., Soo S.L., Novovic D., Aspinwall D.K., Harden P., Waterhouse C., Bohr S., Mathieson A.C., Lucas M. "Ultrasonic assisted creep feed grinding of Inconel 718". *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*. (2013): pp. 615-620.
- Peng Y., Liang Z., Wu Y., Guo Y., Wang C. "Characteristics of chip generation by vertical elliptic ultrasonic vibration – assisted grinding of brittle materials". *International Journal of Manufacturing Technology*. No. 62 (2012): pp. 563-568.
- Nik M.G., Movahhedy M.R., Akbari J. "Ultrasonic-Assisted Grinding of Ti6Al4V Alloy". *5th CIRP Conference on High Performance Cutting*. (2012): pp. 370-375.