

# Pomiary LDV amplitudy osiowych oscylacji narzędzi stosowanych w procesach obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym

Roman Wdowik\*, Piotr Nazarko\*\*, Janusz Porzycki\*

\*Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji, Politechnika Rzeszowska

\*\*Katedra Mechaniki Konstrukcji, Politechnika Rzeszowska

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę pomiaru amplitudy osiowych oscylacji narzędzi stosowanych w procesach obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym. Pomiary zrealizowano za pomocą laserowego wibrometru skanującego LDV (ang. *Laser Doppler Vibrometer*).

**Słowa kluczowe:** obróbka ze wspomaganie ultradźwiękowym, wibrometr laserowy, amplituda osiowych oscylacji

**D**ecydujący wpływ na przebieg obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym ma dobór parametrów nastawnych procesu. Amplituda i częstotliwość oscylacji mierzone w określonym kierunku to, w zależności od odmiany procesu, parametry stosowane do opisu ruchu oscylacyjnego wybranego punktu narzędzia obróbkowego lub obrabianego przedmiotu.

## 1. Wprowadzenie

Realizacja hybrydowych procesów obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym, na przykład szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym UAG (ang. *Ultrasonic Assisted Grinding*), w którym ruch oscylacyjny o częstotliwości ultradźwiękowej związany może być, w zależności od odmiany procesu, z narzędziem lub obrabianym przedmiotem [5, 3], wymaga określenia danych wejściowych procesu. Oprócz parametrów technologicznych charakterystycznych dla konwencjonalnego procesu szlifowania, takich jak prędkość posuwu lub prędkość skrawania, określa się dla obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym parametry ruchu oscylacyjnego. Podstawowe parametry to amplituda oraz częstotliwość oscylacji. Wyznaczanie ich wartości może odbywać się dla określonej powierzchni narzędzia (np. powierzchni czołowej) z uwzględnieniem kierunku, w jakim przeprowadzany jest pomiar (np. w osi narzędzia lub prostopadle do niej). Zastosowane mogą być tu różne techniki pomiarowe. W zależności od przyjętej techniki możliwe jest wyznaczanie jednego lub obydwu z przedstawionych parametrów ruchu oscylacyjnego. Do pomiarów stosowane mogą być mikroskopy optyczne, czujniki indukcyjne, pojemnościowe, wiropądowe, kamery do

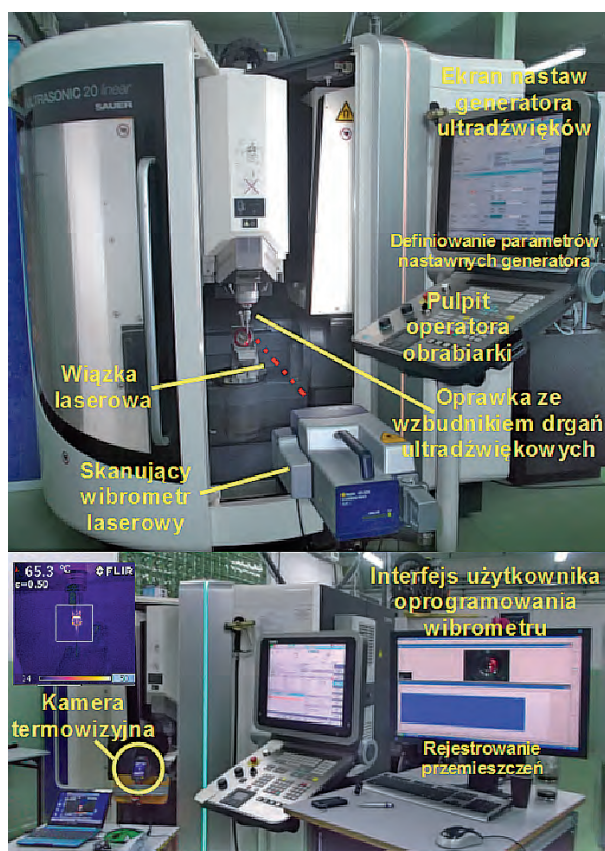
rejestracji procesów szybkozmiennych, a także wibrometria laserowa [2, 6].

Głównym celem prowadzonych obecnie badań w zakresie parametrów ruchu oscylacyjnego jest ustalenie wpływu drgań na wskaźniki jakości procesów obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym. W tym zakresie należy wskazać przede wszystkim parametry charakteryzujące powierzchnię przedmiotów po obróbce, siły skrawania, wydajność obróbki oraz zużycie narzędzia.

## 2. Konfiguracja stanowiska badawczego

W artykule przedstawiono wyniki pomiaru amplitudy osiowych oscylacji ściernic skanującym wibrometrem laserowym Polytec PSV-400. Narzędzia zamocowane były w oprawkach ze wzbudnikiem oscylacji, przystosowanych dla obrabiarki Ultrasonic 20 linear. Pomiary odbywały się poza procesem obróbki z wyłączonym elektrowrzecionem (bez uwzględniania ruchu obrotowego ściernicy).

Badania przeprowadzono dla obrabiarki Ultrasonic 20 linear znajdującej się w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatykacji Politechniki Rzeszowskiej. Wiązka laserowa podczas pomiarów amplitudy oscylacji osiowych skierowana była na lustro, a następnie odbita w kierunku punktu, dla którego odbywał się pomiar drgań (rys. 1). Drgania mierzone były dla powierzchni czołowej ściernicy oraz dla powierzchni czołowej nakrętki lub śruby (w zależności od rodzaju oprawki), którą mocowana jest ściernica do sonotrody (rys. 2). Podczas pomiarów obserwowane były zjawiska cieplne [6], związane z nagrzewaniem się sonotrody. W celu ograniczenia wpływu temperatury sonotrody na amplitudę w częstotliwościach rezonansowych zastosowano chłodzenie sprężonym powietrzem doprowadzanym dyszą do powierzchni sonotrody i narzędzia. Nie jest możliwe natomiast wykonywanie pomiarów wibrometrem podczas chłodzenia narzędzia cieczą, jeśli jej cząsteczki będą dostawać się do powierzchni, z którą związany jest pomiar [1, 6]. Podczas wykonywania pomiarów wibrometrem kontrolowano zmiany temperatury sonotrody kamerą termowizyjną FLIR i50 (rys. 1). Dzięki temu możliwe jest opracowanie wniosków mówiących o wpływie temperatury zestawu sonotroda–narzędzie na warto-



Rys. 1. Stanowisko do badań oscylacji ultradźwiękowych  
Fig. 1. Test stand for investigations of ultrasonic oscillations

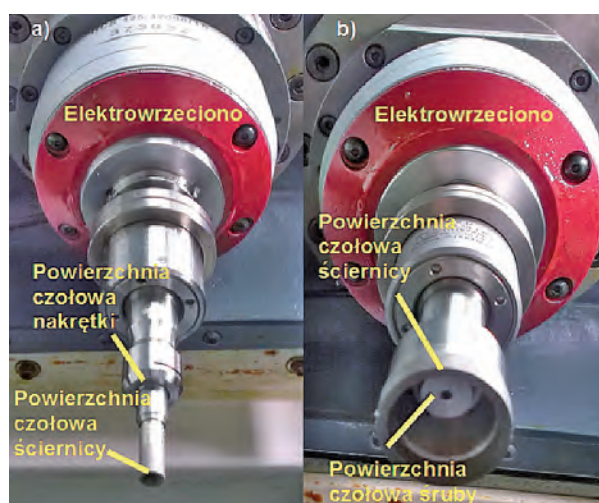
ści amplitudy drgań osiowych. W szczególności istotne jest odkrycie zależności, których zrozumienie pozwoli na przewidywanie zjawisk, tak aby podczas planowania procesów technologicznych obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym właściwie dobierane były parametry nastawne generatora ultradźwięków.

### 3. Warunki przeprowadzania pomiarów

Pomiary przeprowadzono dla dwóch wybranych diamentowych narzędzi ściernych. Zastosowano dwa rodzaje oprawek ze wzbudnikiem oscylacji, różniące się między sobą sposobem mocowania narzędzia. Pierwszy rodzaj oprawki (rys. 2a) umożliwia ustalenie narzędzia w gnieździe stożkowym ER-11 oraz jego zamocowanie nakrętką. Drugi sposób mocowania (rys. 2b) polega na ustaleniu narzędzia na trzpieniu i zamocowaniu go śrubą. Do badań zastosowano narzędzia firmy Schott: trzpieniową ściernicę o średnicy 6 mm z otworem drażonym i oznaczeniu F-Da.1-8-8 D91 oraz garnkową ściernicę diamentową o średnicy 24 mm i oznaczeniu 6A2-Da.24-2-6-10 D126N-MN.

W przypadku ściernicy trzpieniowej (rys. 2a) pomiar dotyczył wybranego punktu leżącego na powierzchni czołowej ściernicy oraz punktu leżącego na powierzchni czołowej nakrętki. Dla ściernicy garnkowej (rys. 2b) pomiary amplitudy drgań osiowych odbywały się dla wybranego punktu leżącego na czole ściernicy oraz dla punktu leżącego na

powierzni czołowej śruby mocującej narzędzie. Po ustaleniu danej częstotliwości operacyjnej z dostępnego zakresu częstotliwości (20 000–30 499 Hz) w nakładce układu CNC Sinumerik włączano generator na określony czas oraz odczytywano wartości amplitudy korzystając z oprogramowania wibrometru. Dodatkowo w czasie wykonywania pomiarów amplitudy mierzono kamerą termowizyjną zmiany temperatury sonotrody. Pomiary wibrometrem wykonywano na przemian z chłodzeniem powietrzem doprowadzonym z dyszy oraz bez chłodzenia dla zadanych wartości częstotliwości operacyjnych. Z uwagi na sprawdzony wpływ momentu mocowania narzędzia do sonotrody [6] na amplitudę oscylacji (co zostało stwierdzone również podczas badań przeprowadzonych w Politechnice Rzeszowskiej), wszystkie narzędzia mocowane były kluczem dynamometrycznym z tym samym momentem.



Rys. 2. Punkty dla których mierzono amplitudę oscylacji osiowych: a) ściernica trzpieniowa zamocowana w oprawce ze wzbudnikiem drgań w gnieździe ER-11, b) ściernica garnkowa ustalona na trzpieniu oprawki ze wzbudnikiem drgań i zamocowana śrubą

Fig. 2. Points for axial oscillation amplitude measurements: a) the tool clamped in the ultrasonic actor with ER-11 socket, b) the tool clamped to the ultrasonic actor with the screw

### 4. Wyniki pomiarów amplitudy osiowej

W tab. 1 przedstawiono uzyskane podczas pomiarów wyniki odniesione do amplitudy drgań osiowych. Pomiary dla ściernicy garnkowej oznaczonej G lub G2 odbywały się w czasie 1000 s. Dla ściernicy trzpieniowej dokonywano pomiaru w czasie 1000 s lub 100 s, w zależności od ustawionej częstotliwości prądu generatora. W trakcie pracy generatora ultradźwięków (przy ustawionej jednej ściśle określonej częstotliwości) notowano wartości amplitudy. Zauważono, że w przypadku oprawki z zamocowaną ściernicą garnkową największe przemieszczenia występują w częstotliwościach bliskich dolnej granicy dostępnych częstotliwości operacyjnych tj. od 20 000 Hz do 22 000 Hz. W przypadku oprawki z zamocowaną ściernicą trzpieniową największe przemieszczenia zanotowano dla zakresu czę-

**Tab. 1.** Wyniki pomiarów amplitudy oscylacji osiowych

**Tab. 1.** Results of measurements of axial oscillations amplitude

Lp.	NARZ.	MIEJSCE POMIARU	F [kHz]	Amin [nm]	Amaks [nm]	Trend	CHŁODZ.
1	G	SG	21,5	999	1408	M	B
2	G	SG	21,5	750	1380	BT	P
3	G	SG	21,5	705	976	S	B
4	G	SG	21,5	742	1444	BT	P
5	G	SG	21,5	195,6	669	R	B
6	G	SG	21,5	291,8	400,5	S	P
7	G2	SG	21,5	199,3	240,1	M	B
8	G2	SG	21,5	233,5	244,7	S	P
9	G2	CG	21,5	520,5	605,5	M	B
10	G2	CG	21,5	562,8	617,6	S	P
11	G	CG	21,5	570,6	1135	R	B
12	G	CG	21,5	402,6	747	R	P
13	G	CG	21,5	526,8	974	R	B
14	G	CG	21,5	391,8	448,7	S	P
15	G	CG	21,73	577	792,3	R	B
16	G	CG	21,73	431,1	503,7	S	P
17	G	CG	21,73	424,6	659,3	R	B
18	G	SG	21,73	359,9	477,9	R	B
19	G	SG	21,73	333,3	364,5	S	P
20	G	SG	21,73	322,3	457,2	R	B
21	G	SG	21,73	338,8	361,8	S	P
22	G	SG	21,73	277,1	435,5	R	B
23	G	SG	21,73	336	439,6	R	B
24	G	SG	21,73	304,4	322,9	S	P
25	G2	SG	21,73	282	315,1	S	B
26	G2	SG	21,73	289,1	305,7	S	P
27	G2	SG	21,73	266	292,5	S	B
28	G	SG	21,73	426,1	444,1	S	B
29	G	SG	25,5	45,9	47,44	S	B
30	G	SG	25,5	49,45	51,16	S	P
31	G	CG	25,5	78,4	86,8	S	B
32	G	CG	25,5	81,27	96,96	S	P
33	G2	SG	25,5	28,5	33,37	S	B
34	G2	SG	25,5	30,6	37,75	S	P
35	G2	CG	25,5	167,3	174,7	S	B
36	G2	CG	25,5	171,4	174,6	S	P
37	G2	SG	20,7	496,3	1217	M	B
38	G2	SG	20,7	655	987	M	P

Tab. 1. Wyniki pomiarów amplitudy oscylacji osiowych (cd.)

Tab. 1. Results of measurements of axial oscillations amplitude (cont.)

39	G2	SG	20,7	464,9	626,4	BT	B
40	G2	SG	20,7	652,7	688,8	S	P
41	G2	SG	20,7	430,5	707	M	B
42	G2	CG	20,7	1028	1590	M	B
43	G2	CG	20,7	1546	1616	S	P
44	G2	SG	20,7	347,6	592,5	M	B
45	G2	SG	20,7	361,7	522,8	M	B
46	G2	SG	20,7	623,5	635,9	S	P
47	T	NT	27,5	995	1058	M	–
48	T	CT	27,5	1377	1449	S	–
49	T	CT	27,5	1405	1455	S	P
50	T	NT	27,5	1007	1022	S	P
51	T	NT	26,1	1770	3995	R	–

Objaśnienia do tablicy:

**Narzędzie (NARZ.):**  
 G – ściernica garnkowa ustalana na trzpieniu i mocowana śrubą (OPRAWKA nr 1),  
 G2 – ściernica garnkowa ustalana na trzpieniu i mocowana śrubą (OPRAWKA nr 2),  
 T – ściernica trzpieniowa ustalana w gnieździe ER-11 i mocowana nakrętką.

**Miejsce pomiaru (MIEJSCE POMIARU):**  
 CG – powierzchnia czołowa ściernicy garnkowej, SG – powierzchnia czołowa śruby,  
 CT – powierzchnia czołowa ściernicy trzpieniowej, NT – powierzchnia czołowa nakrętki.  
 F – częstotliwość oscylacji ultradźwiękowych.  
 Amin – minimalna odczytana amplituda oscylacji ultradźwiękowych.  
 Amaks – maksymalna odczytana amplituda oscylacji ultradźwiękowych.  
 Trend: R – rosnąca, M – malejąca, S – stabilna, BT – brak trendu.

**Chłodzenie (CHŁODZ.):**  
 B – brak, P – sprężone powietrze o ciśnieniu 6 bar podawane na powierzchnię sonotrody i narzędzia.  
 Znak „–” oznacza brak danych.

stotliwości od około 25 500 Hz do 27 000 Hz. Do badań amplitudy drgań osiowych wybrano jedynie kilka wartości częstotliwości operacyjnych, by pokazać różnice w wartościach amplitudy oraz zwrócić uwagę na wpływ zjawisk cieplnych na jej wartość.

## 5. Wnioski

Przeprowadzone badania pomogły lepiej zrozumieć funkcjonowanie układu wzbudzania oscylacji na obrabiarce Ultrasonic 20 linear. Wyniki pomiarów wibrometrem laserowym dotyczą dwóch różnych rozwiązań konstrukcyjnych oprawek: z mocowaniem narzędzia w gnieździe ER-11 oraz mocowaniem na trzpieniu. W całym dostępnym na obrabiarce zakresie częstotliwości operacyjnych (tj. od 20 000 Hz do 30 499 Hz) obserwowano dla każdego rodzaju oprawki występowanie osiowych drgań sonotrody oraz przymocowanego do niej narzędzia obróbkowego. Mie-

rzne amplitudy przemieszczeń różniły się w zależności od ustawionej wartości częstotliwości operacyjnej prądu generatora. Największe przemieszczenia, czyli amplitudę oscylacji, zanotowano dla częstotliwości określanych jako rezonansowe. W tych częstotliwościach obserwowano wzrost temperatury złącza (sonotroda-narzędzie), jeśli oprawka nie była efektywnie chłodzona. Chłodzenie sprężonym powietrzem o ciśnieniu 6 bar pozwala chłodzić sonotrodę i wykonywać podczas chłodzenia pomiary wibrometrem laserowym. W pozostałym zakresie częstotliwości operacyjnych zjawiska cieplne nie występowały lub występowały w mniejszym stopniu niż w rezonansie.

Obserwowano, że wzrost temperatury złącza wpływa na wartości amplitudy drgań ultradźwiękowych narzędzia. Najmniejsze zmiany chwilowej wartości amplitudy występowały przy częstotliwościach pozarezonansowych, w których nie zanotowano wzrostu temperatury sonotrody. Wskazania wibrometru pozwalają stwierdzić, że

zmiany te nie są wtedy większe niż kilka do kilkunastu nanometrów. W częstotliwościach rezonansowej i około-rezonansowych zmiany amplitudy były większe i dochodziły podczas nagrzewania się sonotrody zwykle do kilku dziesiątych mikrometra, a w przypadku zastosowania chłodzenia powietrzem były stabilne w zakresie około 0,1  $\mu\text{m}$ .

Zaobserwowane zjawiska oraz ich wpływ na amplitudę oscylacji pozwalają stwierdzić, że podczas obróbki można stosować częstotliwości inne niż rezonansowe, w zależności od specjalnych wymagań technologicznych (np. zastosowanie wspomaganie ultradźwiękowego do mikro- i nano-obróbki, gdzie są wymagane względnie małe wartości przemieszczeń). Natomiast częstotliwości rezonansowe mogą być stosowane w przypadku procesów, w których wymagana jest jak największa amplituda drgań. Różnice występujące w wartościach amplitudy drgań osiowych, obserwowane podczas pomiarów dla tych samych danych wejściowych, mogą wynikać z przesuwania się plamki laserowej oraz niewielkich zmian wymiarów zachodzących dla oprawki narzędziowej (np. na skutek zmian temperaturowych sonotrody). Nie zmienia to jednak podstawowych wniosków z przeprowadzonych badań, które wskazują na:

- zależność wartości amplitudy od ustawionej częstotliwości operacyjnej,
- mniejsze zmiany wartości amplitudy w przypadku chłodzenia sonotrody sprężonym powietrzem (w szczególności dla częstotliwości, w których bez chłodzenia występują zjawiska cieplne),
- wpływ budowy falowodu na wartość częstotliwości rezonansowej.

Przeprowadzone badania pozwalają na dogłębną, przysięłą analizę wpływu parametrów ruchu oscylacyjnego procesu na jego wielkości wyjściowe (możliwa jest analiza, m.in. wpływu amplitudy na wartość sił procesowych, zużycie narzędzia i jakość obrabianej powierzchni).

*Do badań wykorzystano aparaturę zakupioną w projekcie nr POPW.01.03.00-18-012/09 z Funduszy Strukturalnych w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

## Bibliografia

1. Cong W.L., Pei Z.J., Mohanty N., Van Vleet E., Treadwell C., *Vibration Amplitude in Rotary Ultrasonic Machining: A Novel Measurement Method and Effects of Process Variables*, "Journal of Manufacturing Science and Engineering", June 2011, Vol. 133, 034501-1-5.
2. Nazarko P., *Ocena stanu konstrukcji. Detekcja uszkodzeń z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2010.
3. Porzycki J., Wdowik R., *Możliwości 5-cio osiowego centrum ULTRASONIC 20 linear w zakresie badań hybrydowych procesów obróbkowych*. Świat Obrabiarok, październik-grudzień 2012, 16–22.
4. Porzycki J., Wdowik R., Krupa K., Habrat W., *Zastosowanie centrum obróbkowego Ultrasonic 20 linear do badań procesu szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym*. Mechanik, sierpień/wrzesień 2012, CD.
5. Spur G., Uhlmann E., Holl S.-E., Daus N.-A., *Ultrasonic Machining of Ceramics. Handbook of Advanced Ceramics Machining* (red. Ioan D. Marinescu), CRC Press Taylor & Francis Group, 2007, 327–353.
6. *Ultrasonic Assisted Grinding of brittle hard materials, final technical report*, CORNET project, Austria, April 2010. ■

### LDV measurements of axial oscillation amplitude of tools for ultrasonic assisted machining processes

**Abstract:** The article presents axial oscillations amplitude measurements of tools for ultrasonic assisted machining processes. Laser Doppler Vibrometer (LDV) is applied for these investigations.

**Keywords:** machining with ultrasonic assistance, laser vibrometer, amplitude of axial oscillations

Artykuł recenzowany, nadesłany 12.09.2013 r., przyjęty do druku 5.11.2013 r.

#### dr hab. inż. Janusz Porzycki, prof. PRZ

Profesor nadzwyczajny na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Zainteresowania naukowe: zagadnienia budowy i eksploatacji maszyn.

e-mail: [jpor@prz.edu.pl](mailto:jpor@prz.edu.pl)



#### dr inż. Piotr Nazarko

Adiunkt na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się nieniszczącymi technikami wykrywania i oceny uszkodzeń oraz zastosowaniem metod sztucznej inteligencji.

e-mail: [pnazarko@prz.edu.pl](mailto:pnazarko@prz.edu.pl)



#### mgr inż. Roman Wdowik

Asystent na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się hybrydowymi procesami obróbki ubytkowej oraz eksploatacją maszyn CNC.

e-mail: [rwdowik@prz.edu.pl](mailto:rwdowik@prz.edu.pl)

