

## MIKROSKOPOWA OCENA PARAMETRÓW OSIOWEGO RUCHU OSCYLACYJNEGO ŚCIERNICY

Roman WDOWIK<sup>1</sup>, Janusz PORZYCKI<sup>1</sup>, Janusz ŚWIDER<sup>2</sup>, Piotr NAZARKO<sup>3</sup>

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia pomiary mikroskopowe osiowego ruchu oscylacyjnego ściernicy. Do badań zastosowano mikroskop optyczny InfiniteFocus Real 3D Alicona oraz specjalnie wykonaną trzpieniową ściernicę diamentową pokrywaną galwanicznie. Na podstawie obrazów śladów ziaren ściernych utworzonych przez zarysowywanie przedmiotu powierzchnią walcową ściernicy określano zmiany amplitudy oscylacji ultradźwiękowych wzdłuż jej osi.

**Słowa kluczowe:** szlifowanie, szlifowanie ze wspomaganie ultradźwiękowym, parametry oscylacji ultradźwiękowych

**Summary:** The paper presents measurements of the grinding wheel ultrasonic oscillations on the InfiniteFocus Real 3D Alicona optical microscope. Galvanic diamond tool prepared for investigations was applied. The changes of axial amplitude of ultrasonic oscillations were defined on the basis of scratch tests which lead to creating traces of diamond grains on the workpiece after scratching with the cylindrical surface of the grinding wheel.

**Key words:** Grinding, ultrasonic assisted grinding, parameters of ultrasonic oscillations

### 1. WSTĘP

Podczas realizacji hybrydowego procesu obróbki ściernicy ze wspomaganie ultradźwiękowym występuje ruch oscylacyjny o częstotliwości powyżej 16 kHz, dla którego amplituda przemieszczeń jest niewielka i może wynosić od kilkunastu nanometrów do kilkudziesięciu mikrometrów w zależności od rodzaju procesu i budowy układu wzbudzania drgań. Stwierdzenie to oparte jest o badania literaturowe z zakresu obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym (w odniesieniu do procesów, dla których drgania związane są z przedmiotem obrabianym lub narzędziem) oraz pomiary wykonane w Politechnice Rzeszowskiej dla procesu wspomaganego ultradźwiękowymi oscylacjami narzędzia.

W zakresie pomiarów amplitudy drgań ultradźwiękowych wskazać można wiele metod pomiarowych. Niektóre z nich oparte są o zjawiska elektryczne, np. pomiary czujnikami wiroprowadowymi, pojemnościowymi, czy też indukcyjnymi. Metody te umożliwiają po odpowiednim skonfigurowaniu układu pomiarowego szybką rejestrację drgań o dużych częstotliwościach. Kolejna grupa metod korzysta z doświadczeń optyki przemysłowej. W tej grupie należy wskazać urządzenia takie jak wibrometry laserowe i mikroskopy optyczne.

Pomiary nowoczesnymi skanującymi wibrometrami laserowymi umożliwiają rejestrowanie drgań całego badanego obiektu, jednak ich zastosowanie do pomiarów parametrów ruchu oscylacyjnego on-line nie jest ze względów techniczno-

---

<sup>1</sup>Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji, 35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 12

<sup>2</sup>Instytut Energetyki Oddział Ceramiki CEREL, 36-040 Boguchwała, ul. Techniczna 1

<sup>3</sup>Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Katedra Mechaniki Konstrukcji, 35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 12

ekonomicznych tak proste, jak na przykład zastosowanie czujników wiropędowych. Problemem są wysokie koszty zakupu aparatury, ograniczenia w zastosowaniu podczas doprowadzania cieczy chłodząco - smarującej do powierzchni, z którą związane są pomiary, itp.

Ciekawe możliwości w zakresie badań amplitudy oraz częstotliwości drgań ultradźwiękowych narzędzi i przedmiotów w obszarze obróbki ubytkowej ze wspomaganiami ultradźwiękowym stwarzają pomiary wykonywane na mikroskopach optycznych. Badane mogą być z ich zastosowaniem ślady ziaren ściernych jakie pozostawiają narzędzia na przedmiocie obrabianym [1-3]. Te analizy dotyczą powierzchni przedmiotu obrabianego jednak wykonywane mogą być zarówno dla procesu, w którym ruch oscylacyjny związany jest z przedmiotem jak i obróbki z oscylacjami narzędzia. Aby możliwe było dostrzeżenie pod mikroskopem amplitudy oraz częstotliwości drgań dobrane muszą być w sposób właściwy parametry technologiczne oraz inne dane wejściowe procesu (tabela 1). Odczyt parametrów ruchu oscylacyjnego może odbywać się w sposób bezpośredni w odniesieniu do powierzchni obrobionej po wykonaniu ściśle określonych zabiegów technologicznych lub na podstawie śladów wykonanych podczas tzw. zarysowywania przedmiotu. W niektórych przypadkach, ślady ziaren ściernych mogą nie umożliwiać oceny parametrów drgań w sposób bezpośredni (na przykład z uwagi na nakładanie się na siebie wielu śladów).

Powyższe stwierdzenia są oparte o wyniki badań mikroskopowych opisanych w literaturze, przeprowadzonych dla szlifowania z osiowymi oscylacjami przedmiotu [2, 3] oraz obróbki polegającej na wykonywaniu otworów ściernicą diamentową z otworem drażonym, podczas realizacji której ruch oscylacyjny związany był z narzędziem [1].

W czasie realizacji badań podstawowych związanych z analizą ruchu oscylacyjnego wibrometrem laserowym Polytec PSV-400 na obrabiarkę Ultrasonic 20 linear znajdującej się w Politechnice Rzeszowskiej obserwowano, że wartość amplitudy drgań ultradźwiękowych nie jest jednakowa dla punktów części roboczej ściernicy leżących wzdłuż jej osi. Różnice te można zarejestrować dla wyników pomiarów drgań w kierunku prostopadłym do osi narzędzia. Wiązka laserowa skierowana jest podczas takiego pomiaru na jeden z punktów siatki zdefiniowanej na powierzchni walcowej ściernicy oraz sonotrody.

Natomiast, w przypadku przemieszczeń w kierunku osiowym, nie jest możliwe określenie wartości amplitudy wibrometrem w odniesieniu większej ilości punktów leżących wzdłuż osi ściernicy. Istnieje możliwość zbadania ruchu powierzchni czołowej narzędzia oraz innych powierzchni prostopadłych do jego osi, na które można skierować wiązkę laserową (np. powierzchnia czołowa nakrętki, z zastosowaniem której mocowane jest narzędzie).

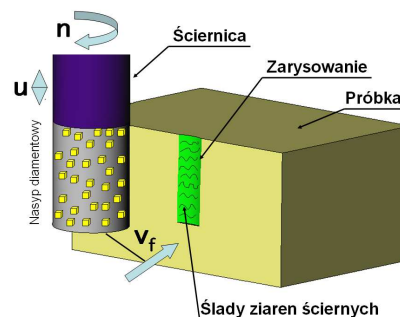
Z uwagi na potrzebę rozszerzenia wiedzy o możliwościach pomiarów na mikroskopach, podjęto próbę oceny wartości osiowej amplitudy przemieszczeń ziaren ściernych, które leżą na roboczej powierzchni walcowej ściernicy trzpieniowej,

**MECHANIK NR 8-9/2013**  
**XXXVI NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ**

podczas gdy realizowany jest proces szlifowania ze wspomaganiami oscylacjami narzędzia. W tym celu wykonywano zarysowania o długości około 50 mm (odpowiadającej długości części roboczej ściernicy) na dwóch próbkach: ze stopu aluminium oraz tlenkowej ceramiki technicznej ( $Al_2O_3$ ). Schemat obróbki przedstawiono na rys. 1.

Prędkość obrotową wrzeciona  $n$  i prędkość posuwu  $v_f$  dobrano na podstawie wyników realizacji podobnych prób wykonywanych wcześniej dla różnych materiałów: stali, stopu tytanu oraz ceramiki technicznej. Częstotliwość prądu generatora  $F_{IGEN}$  dobrano z zakresu częstotliwości operacyjnych obrabiarki (20 000-30 499 Hz), kierując się poziomem hałasu po przyłożeniu metalowej blaszki do drgającego narzędzia. Metoda ta umożliwia zgrubne wyznaczenie zakresu około rezonansowych częstotliwości operacyjnych, dla których występują największe wartości przemieszczeń. Ograniczono się do tej metody ponieważ badania w ramach tej pracy nie przewidują mikroskopowej analizy drgań w całym zakresie częstotliwości operacyjnych, a jedynie określenie możliwości w zakresie pomiarów na mikroskopach.

W celu wykonania badań opracowano specjalną ściernicę trzpieniową pokrywaną warstwą diamentową w procesie galwanicznym. Jak już zostało wspomniane długość części roboczej nasypu ściernicy wynosiła 50 mm, a średnica narzędzia 7,5 mm. Zwrócono szczególną uwagę na wykonanie trzpienia, na który nakładana była warstwa diamentowa, w taki sposób, aby zapewnić jak najmniejsze bicie promieniowe narzędzia po jego zamocowaniu w oprawce.



Rys. 1. Schemat realizacji obróbki

Zarysowania na próbce ze stopu aluminium wykonywano dla prędkości obrotowych wrzeciona wynoszących 1000, 2500, 3000, 5000 oraz 10 000 obr/min. Dla każdej prędkości obrotowej wykonywano dwa zarysowania- z włączonym i wyłączonym generatorem ultradźwięków. Dla próbki z tlenku aluminium ( $Al_2O_3$ ) zastosowano do badań prędkość obrotową wrzeciona 2500 obr/min oraz wykonano zarysowania dla włączonego i wyłączonego generatora. Pozostałe dane wejściowe procesu wynosiły odpowiednio:  $v_f= 0,25$  mm/min,  $F_{IGEN}= 21\ 500$  Hz, wielkość ziarna=

**MECHANIK NR 8-9/2013**  
**XXXVI NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ**

~D63, koncentracja= brak danych, moc generatora  $P$  minimalna= 1%, moc generatora  $P$  nominalna= 50%, moc generatora  $P$  maksymalna= 10%, amplituda  $A_I$  prądu generatora minimalna= 1%, amplituda  $A_I$  prądu generatora nominalna= 50%, amplituda  $A_I$  prądu generatora maksymalna= 10%, zgodnie z możliwościami nastaw parametrów w układzie sterowania Sinumerik 840D sl obrabiarki Ultrasonic 20 linear.

Tabela 1. Dane wejściowe mające wpływ na odczyt amplitudy i częstotliwości drgań na mikroskopie (dane wejściowe: 1, 4, 7, 8- opisany wpływ na ślad został stwierdzony doświadczalnie, dane wejściowe: 2, 3, 5, 6- można przewidywać, że wpływ na ślad ziarna jest zgodny z danymi zamieszczonymi w tabeli, jednak wymagane są dalsze badania w tym zakresie)

Lp.	Nazwa danej wejściowej	Oznaczenie	Jednostka	Wpływ na ślad ziarna
1	Prędkość obrotowa wrzeciona	$n$	obr/min	Zmiana jej wartości powoduje zmianę okresu T
2	Wielkość ziarna	$D_{xx}$	$\mu\text{m}$	Wpływa na widoczność śladów ziaren
3	Koncentracja ziaren	$K$	-	Wpływa na ilość śladów oraz na ich widoczność
4	Materiał obrabiany	np. $\text{Al}_2\text{O}_3$	-	Wpływa na widoczność śladów ziaren
5	Moc generatora	$P$	W	Wpływa na wartości amplitudy oraz częstotliwości drgań
6	Amplituda prądu generatora	$A_I$	A	
7	Częstotliwość prądu generatora	$F_{IGEN}$	Hz	
8	Bicie promieniowe ściernicy	$\delta$	mm	Wpływa na widoczność śladów ziaren

## 2. KONFIGURACJA STANOWISK BADAWCZYCH

Proces obróbki (zgodnie z rys. 1) realizowany był na hybrydowej obrabiarce z układem wzbudzania drgań ultradźwiękowych narzędzia Ultrasonic 20 linear. Mikroskopowe pomiary parametrów ruchu oscylacyjnego wykonywane były na mikroskopie optycznym Infinite Focus Real 3D Alicona. Konfiguracja stanowisk badawczych została przedstawiona na rys. 2.



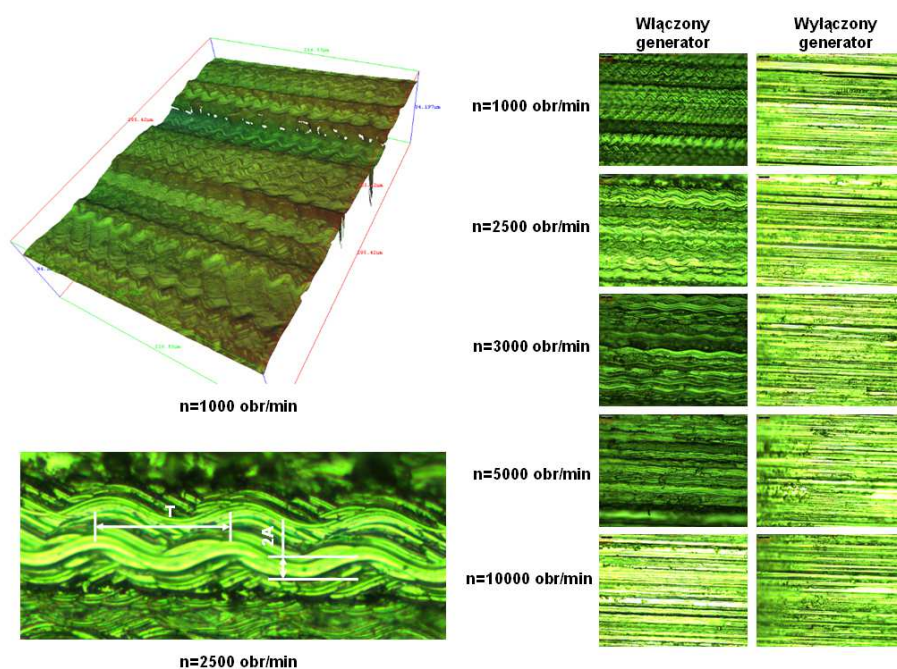
Rys. 2. Konfiguracja stanowisk badawczych: a) hybrydowa obrabiarka Ultrasonic 20 linear z układem wzbudzania drgań ultradźwiękowych narzędzia, b) mikroskop optyczny Infinite Focus Real 3D Alicona

Obrabiarka Ultrasonic 20 linear to 5-cio osiowe centrum obróbkowe ze stołem obrotowo-uchylnym przeznaczone do realizacji procesów hybrydowych oraz konwencjonalnych. Podczas wykonywania obróbki przedmiot ustalony był na stole obrabiarki i zamocowany dociskiem. Powierzchnia, na której wykonywane były zarysowania ustawiona była przed obróbką w taki sposób, aby była równoległa do płaszczyzny YZ układu współrzędnych obrabiarki.

Mikroskop optyczny Infinite Focus Real 3D Alicona umożliwia prowadzenie szczegółowych badań ukierunkowanych na pomiary, między innymi, mikrostruktury powierzchni. Mikroskop wykorzystuje ograniczoną zdolność optyki do ogniskowania, tzn. mierzone są obiekty rozpoznawane jako ostre, a wykonywanie kolejnych pomiarów w efekcie zmiany położenia obiektywu prowadzi do utworzenia trójwymiarowego modelu powierzchni.

## 2. MIKROSKOPOWE BADANIA PARAMETRÓW OSCYLACJI

Na rys. 3 przedstawiono obrazy uzyskane dla płytki ze stopu aluminium na mikroskopie Alicona w odniesieniu do niewielkiego fragmentu powierzchni obrobionej. Jest to obszar odpowiadający końcowej części ściernicy diamentowej.



Rys. 3. Ślady ziaren ściernych na próbce wykonanej ze stopu aluminium

Na rysunkach przedstawiających powierzchnię obrobioną ze wspomaganie

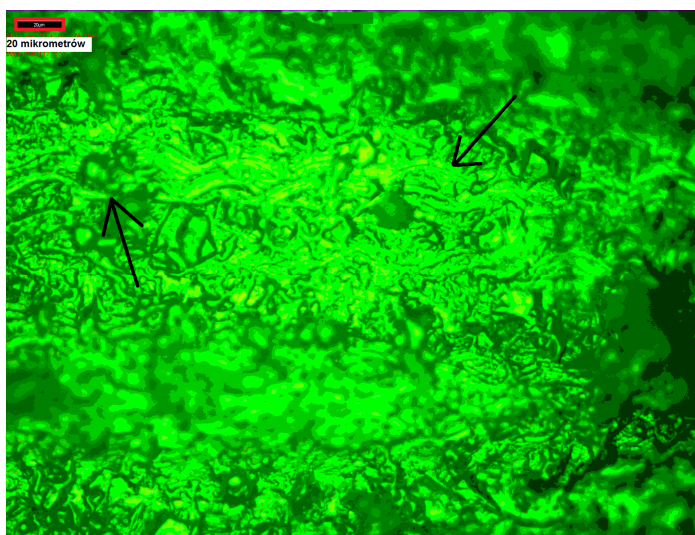


ultradźwiękowym są wyraźnie widoczne sinusoidalne ślady pozostawiane przez ziarna diamentowe. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wrzeciona wzrasta wartość parametru  $T$ , który wynika z częstotliwości drgań  $f_{US}$  wyrażonej w Hz obliczanej ze wzoru 1:

$$f_{US} = \frac{\Pi dn}{60T_{\cap}} \quad (1)$$

gdzie:  $d$ - średnica ściernicy [mm],  $n$ - prędkość obrotowa wrzeciona [obr/min],  $T_{\cap}$  - wartość parametru  $T$  z rys. 3 mierzona z uwzględnieniem wklęsłej powierzchni śladu (jako długość łuku) [mm]. Amplituda drgań może być obliczana jako połowa wartości międzyszczytowej  $2A$ .

W przypadku próbki wykonanej z ceramiki korundowej również obserwowano pod mikroskopem ślady pozostawiane przez ziarna diamentowe (rys. 4), jednak są one mniej wyraźne i występujące w mniejszej ilości niż dla próbki ze stopu aluminium.



Rys. 4. Ślady ziaren ściernych na próbce wykonanej z ceramiki korundowej ( $n=2500$  obr/min)

#### 4. WNIOSKI

Mikroskopowa ocena parametrów osiowego ruchu oscylacyjnego ściernicy polega na badaniach mikrostruktury powierzchni powstałej po realizacji ściśle określonego zabiegu technologicznego. Ślady jakie pozostawiają ziarna ściernic na przedmiocie obrabianym umożliwiają ocenę wartości amplitudy drgań osiowych oraz

częstotliwości drgań przy znanej wartości prędkości obrotowej ściernicy. Ślady te są wyraźne w przypadku materiałów ciągliwych i właściwie dobranych parametrów realizacji procesu. Obserwacja śladów oraz ocena parametrów ruchu jest utrudniona jeśli zmieniony zostanie materiał przedmiotu na ceramikę techniczną przy pozostawieniu niezmiennych, pozostałych danych wejściowych procesu. W pracy [1] pojawia się informacja o braku możliwości pomiaru amplitudy na próbkach ceramicznych. Być może spowodowane to było innym zabiegiem technologicznym, po którym wykonywano pomiary mikroskopowe. W odniesieniu do badań wykonanych w Politechnice Rzeszowskiej należy stwierdzić, że sinusoidalne ślady były widoczne również na próbkach ceramicznych, jednak były mniej wyraźne i występujące w mniejszej ilości niż w przypadku próbek np. stalowych. Bezpośredni pomiar wartości amplitudy na dwuwymiarowych lub trójwymiarowych obrazach mikroskopowych jest możliwy, jednak należy liczyć się z pewnym rozrzutem wyników pomiaru. Dla przeprowadzonych badań mikroskopowych uwzględniających jedno narzędzie i dwa różne materiały (ceramikę korundową i stop aluminium) zaobserwowano, że zmierzona wartość amplitudy drgań mieściła się w zakresie od około 2 do około 5 mikrometrów. Widoczne były sinusoidalne ślady ziaren ściernych leżące wzdłuż obrobionej powierzchni (co odpowiada długości nasypu), jednak pomiar różnic w ich geometrii prowadzących do ustalenia zmian wartości amplitudy drgań wzdłuż osi ściernicy nie przyniósł do tego czasu zadowalających rezultatów. Stosowanie pomiarów podobnych do przedstawionych w niniejszym opracowaniu jest jednak zasadne w celu oceny wartości amplitudy oraz częstotliwości drgań. Pomimo występujących niedoskonałości tej metody jej zastosowanie w odniesieniu do analizy mikrogeometrii powierzchni po obróbce ze wspomaganie ultradźwiękowym jest znaczne w odniesieniu do powszechnie spotykanych zaleceń technologicznych dotyczących stanu powierzchni po obróbce. Metoda ta może natomiast nie być wystarczająco dokładna w przypadku szczegółowej analizy zjawisk występujących podczas mikro i nanoobróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym.

#### LITERATURA

- [1] CONG W. L., PEI Z. J., MOHANTLY. 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, Vol. 133, June 2011, 034501-1 do 5.
- [2] SPUR G., UHLMANN E., HOLL S.-E., DAUS N.-A.: *Ultrasonic Machining of Ceramics. Handbook of Advanced Ceramics Machining pod red. Ioan D. Marinescu*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2007, str. 327-353.
- [3] MARINESCU I. D., HITCHINER M., UHLMANN E., ROWE W.B., INASAKI I.: *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007.
- [4] *Ultrasonic Assisted Grinding of brittle hard materials*, final technical report, CORNET project, Austria, April 2010.