

	<b>Organizatorzy:</b> Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA          OBRÓBKI ŚCIERNEJ</b> Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

## Model symulacyjny szlifowania wibracyjnego powierzchni płaskich

### Simulation model for vibratory grinding of flat surfaces

FRANCISZEK ORYŃSKI  
 ROBERT SYNAJEWSKI \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.380

W artykule zaprezentowano wyniki pracy modelu szlifowania wibracyjnego z wprowadzaniem oscylacji na przedmiot obrabiany. Przedstawiono wybór częstotliwości wprowadzanych do modelu poprzez wyznaczenie widmowej funkcji przejścia struktury szlifierki wykorzystując eksperymentalną analizę modalną.

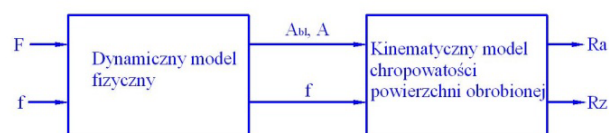
**SŁOWA KLUCZOWE:** modelowanie, szlifowanie wibracyjne

*Model results of vibratory grinding with workpiece stimulated into forced vibration were presented in the article. The selection of frequency values for forced vibration was performed by determination of the spectral transfer function FRF for the grinder using the experimental modal analysis method.*

**KEYWORDS:** modelling, vibratory grinding

Metoda szlifowania wibracyjnego charakteryzuje się wprowadzeniem do kinematyki szlifowania konwencjonalnego dodatkowego ruchu oscylacyjnego o określonych parametrach na przedmiot obrabiany lub ściernicę [2]. Większość publikacji literaturowych dotyczących szlifowania wibracyjnego powierzchni płaskich obejmuje drgania wymuszone w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych [6], [7], [9], [10], [11]. Natomiast pozycje literaturowe ze stosowanymi niskimi częstotliwościami - do 1kHz są nieliczne [3], [8], [12] i również wykazują pozytywne zalety prowadzenia tego procesu. Dlatego warunki szlifowania nie wymagające zastosowania głowic ultradźwiękowych warte są rozpoznania. Zasada polepszania powierzchni po szlifowaniu wibracyjnym nie jest do końca jasna i stąd potrzeba podjęcia

nowych wysiłków ku lepszemu dopasowaniu analiz teoretycznych do badań doświadczalnych. W niniejszym opracowaniu przedstawiono część wyników otrzymanych przez autorów na podstawie symulacji własnego modelu szlifowania wibracyjnego z wyznaczonymi parametrami (opisanymi w [5]) rzeczywistego układu szlifierki do płaszczyzn typu SPC-20. Powiązanie dwóch modeli przedstawionych na rys. 1 umożliwia przeanalizowanie wpływu zmiennych dynamicznych szlifowania wspomaganego drganiami na otrzymaną chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego. Nastawnymi parametrami wejściowymi dynamicznego modelu fizycznego są amplituda  $F$  i częstotliwość  $f$  siły wymuszającej zewnętrzne drgania przedmiotu szlifowanego  $F_{wz}$ . Wielkościami wyjściowymi tego modelu i jednocześnie wyjściowymi parametrami drgań do kinematycznego modelu chropowatości powierzchni obrobionej są: amplituda na biegu luzem  $A_{bl}$ , amplituda podczas skrawania  $A$  i częstotliwość  $f$  drgań ściernicy względem szlifowanej próbki mierzone w kierunku równoległym do osi ściernicy.



Rys. 1. Przedstawienie zmiennych wejściowych i wyjściowych parametrów dwóch modeli proponowanych w badaniach symulacyjnych

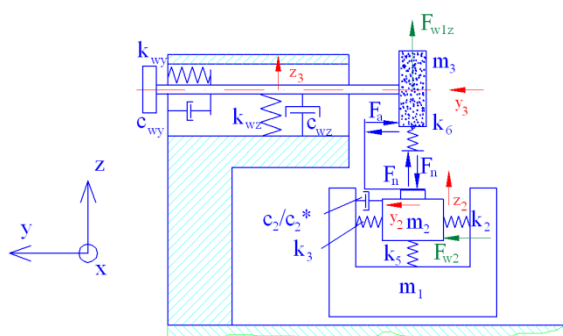
Na podstawie modelu kinematycznego otrzymuje się wartości parametrów chropowatości  $R_a$  i  $R_z$  powierzchni obrobionej po szlifowaniu.

#### Dynamiczny model fizyczny

Rzeczywistym obiektem badań jest szlifierka do płaszczyzn typu SPC-20. Ten układ ma bardzo dużą liczbę punktów materialnych i w związku z tym jeszcze większą liczbę

\*prof. dr hab. inż. Franciszek Oryński (franciszek.orynski@p.lodz.pl),  
 dr inż. Robert Synajewski (robert.synajewski@p.lodz.pl)

stopni swobody. Jeśli nie wprowadzi się układu zastępczego określenie rozwiązania w postaci przebiegów czasowych wszystkich tych punktów staje się niemożliwe [1]. W związku z tym podjęto się wyszczególnienia z rzeczywistego obiektu badań kilku zespołów przypisując im masy brył sztywnych (rys. 2):  $m_1$  - stół szlifierki,  $m_2$  - stolik wibracyjny z oprzyrządowaniem i przedmiotem obrabianym,  $m_3$  - całkowita masa zespołu wrzeciona. Wymienione masy modelu są podparte na elementach sprężystych i tłumione oporem wiskotycznym. Siła  $F_a$  równoległa do osi wrzeciona w strefie skrawania wynika z wprowadzania siły harmonicznej  $F_{w2}$  generowanej przez specjalny stolik wibracyjny zamocowany do stołu szlifierki. Zależność pomiędzy tą siłą a względną prędkością drgań ściernicy i przedmiotu obrabianego ( $\dot{y}_3 - \dot{y}_2$ ) jest określona współczynnikiem proporcjonalności  $k_v$ . Dalsze założenia do opisywanego dynamicznego modelu szczegółowo przedstawiono w pozycji literatury [4].



Rys. 2. Fizyczny model szlifierki i procesu szlifowania płaszczyzn

Z ogólnego opisu modelu uwzględniono tylko równania mające istotny wpływ na wartości parametrów drgań wprowadzanych w kierunku  $y$ , które decydują o chropowatości powierzchni otrzymywanych po szlifowaniu wibracyjnym. Wobec tego na podstawie modelu fizycznego z utworzonego układu równań różniczkowych drugiego rzędu wykorzystano równania dla sił w kierunku osi ściernicy. Tworzą one model matematyczny w postaci:

$$m_2 \ddot{y}_2 + c_2 \dot{y}_2 + k_z y_2 - F_a = F_{w2} \quad (1)$$

$$m_3 \ddot{y}_3 + c_{wy} \dot{y}_3 + k_{wy} y_3 + F_a = 0 \quad (2)$$

$$F_a = k_v (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) \quad (3)$$

Część parametrów modelu fizycznego została wyznaczona analitycznie, a część doświadczalnie na podstawie obiektu rzeczywistego.

#### ■ Wybór wartości częstotliwości drgań wprowadzanych do modelu symulacyjnego

Przyjęty zakres wartości siły  $F$  do symulacji komputerowych wynika z zakresu możliwości technicznych zastosowanego wzbudnika użytego w badaniach doświadczalnych. Wielkościami wejściowymi do dynamicznego modelu procesu szlifowania były:

- amplituda  $F$  siły  $F_{w2}$  drgań wymuszonych zadawana z krokiem 2,5N w zakresie do 22,5N,

- częstotliwość  $f$  zmian siły drgań wymuszonych zadawana w zakresie do 1000Hz.

Podczas wyboru wartości częstotliwości drgań wprowadzanych do modelu symulacyjnego kierowano się podstawową zasadą unikania częstotliwości równych bądź bliskich częstotliwościom drgań własnych poszczególnych zespołów szlifierki dla kierunku  $z$  - normalnego do obrabianej powierzchni. Częstotliwości drgań w kierunku  $y$  (kierunek osi wrzeciona ściernicy) mogą wzbudzać drgania w kierunku  $z$ . Wskutek wystąpienia zjawiska rezonansu większe drgania w kierunku  $z$  mogą spowodować pogorszenie chropowatości powierzchni po szlifowaniu.

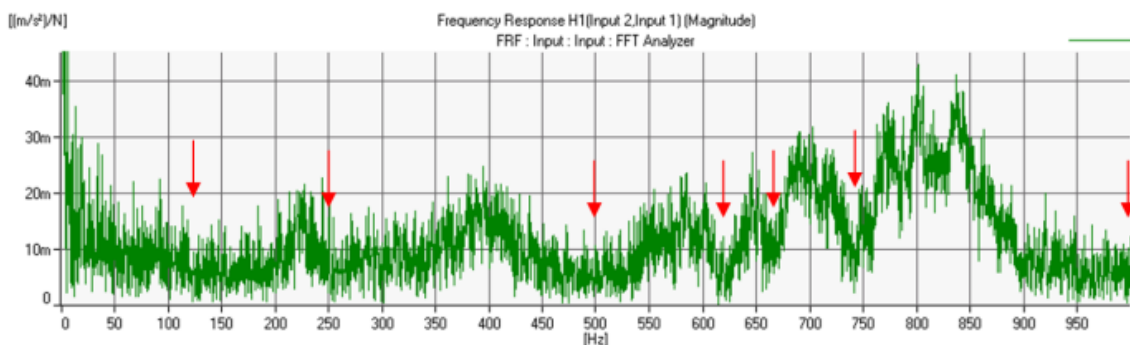
W celu poznania częstotliwości drgań własnych całej struktury dynamicznej szlifierki wyznaczono jej inertancję w kierunku  $z$  metodą eksperymentalnej analizy modalnej. Wykorzystano system pomiaru wymuszenia i odpowiedzi firmy Brüel&Kjær opisany w [4]. W środowisku komputerowym systemu Pulse wyznaczono widmową funkcję przejścia FRF szlifierki dotyczącą impulsowego wymuszenia i rejestracji drgań dla kierunku  $z$  (rys. 3). Na podstawie tego wykresu wybrano częstotliwości, dla których otrzymano kilka minimów lokalnych składowej stałej funkcji FRF. Są to częstotliwości: 125, 250, 500, 620, 670, 740 i 1000Hz i dla tych wartości wprowadzano drgania zewnętrzne.

Dodatkowo w rozważeniach dotyczących wyboru częstotliwości wprowadzanych do układu wzięto pod uwagę właściwości dynamiczne samego zespołu wrzeciona ze ściernicą. Odgrywają one zasadniczą rolę w osiągnięciu wysokiej jakości powierzchni szlifowanych. Dlatego zespół wrzeciona narzędziowego poddano badaniom eksperymentalnej analizy modalnej. Uderzano młotkiem modalnym w ściernicę, a odpowiedź w postaci przyspieszenia drgań mierzono czujnikiem - akcelerometrem przyklejonym do końcówki wrzeciona. Wykorzystując komputerowy system Pulse wyznaczono widmową funkcję przejścia FRF wrzeciona ze ściernicą (rys. 4). Na podstawie przebiegu tej funkcji wyraźnie widać ogólny wzrost jej wartości do maksymalnej przy częstotliwości około 500Hz. Jest to druga częstotliwość drgań własnych wrzeciona ze ściernicą w kierunku  $z$ . Przebieg przedstawiony na rysunku 4 ma również uwidoczniony pik przy częstotliwości 217Hz, która odpowiada pierwszej częstotliwości drgań własnych wrzeciona ze ściernicą w kierunku  $z$ . Otrzymano minima lokalne funkcji FRF dla częstotliwości  $f = 20, 250$  i  $670$ Hz. Przy tych wartościach wprowadzano drgania zewnętrzne. Częstotliwości 250 i 670Hz uwidoczniły się zarówno na rysunku 3 jak i na rysunku 4, ponieważ zespół wrzeciona ze ściernicą wchodzi w skład całej struktury szlifierki.

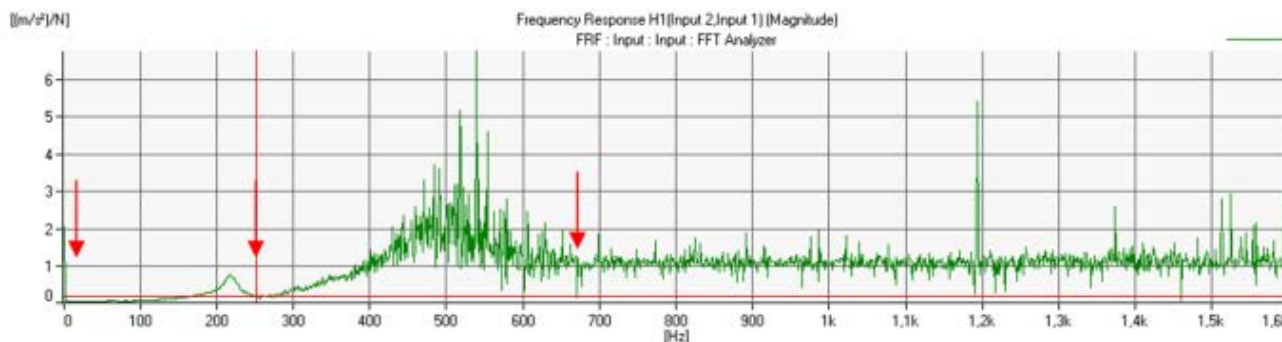
Reasumując w modelu symulacyjnym wprowadzano częstotliwości wymuszenia o wartościach: 20, 125, 250, 500, 620, 670, 740 i 1000Hz.

#### ■ Symulacje modelu matematycznego przy użyciu technik komputerowych

Symulacje komputerowe modelu matematycznego przeprowadzono korzystając z programu Matlab Simulink. Do przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych polegających na całkowaniu numerycznym równań ruchu wykorzystano metodę „ode5”. Jest to stałokrokowa wersja funkcji „ode45”, która jest implementacją metody Rungego-Kutty (4,5) i Dormanda-Prince’a. Przyjęto podstawowy czasowy krok symulacji (krok całkowania) równy 0,0001 s.

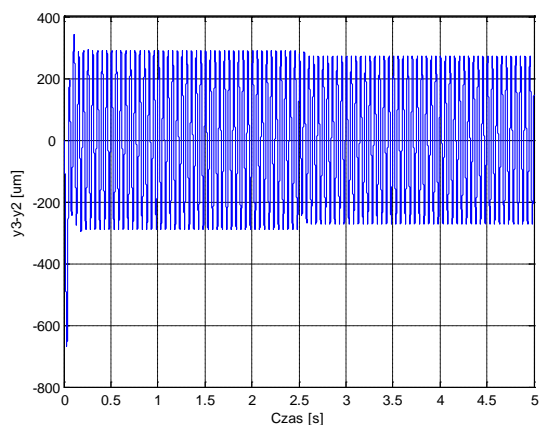


Rys. 3. Przebieg funkcji przejścia FRF dla całej struktury obrabiarki między ściernicą a przedmiotem obrabianym w kierunku z w zakresie do 1000Hz (czerwone strzałki wskazują minima lokalne funkcji, przy których wprowadzano zewnętrzne drgania wymuszone)

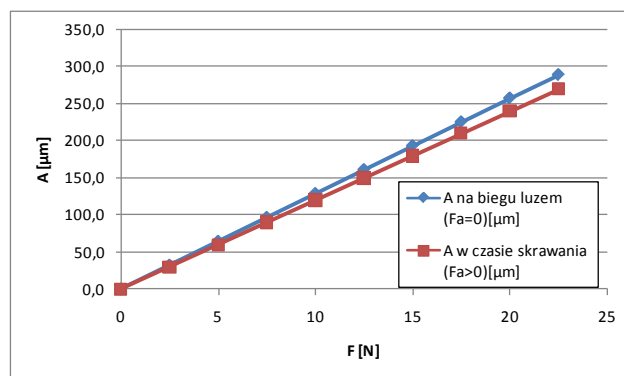


Rys. 4. Przebieg funkcji przejścia FRF dla wrzeciona ze ściernicą w kierunku z (czerwone strzałki wskazują minima lokalne funkcji, przy których wprowadzano zewnętrzne drgania wymuszone)

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy przebieg czasowy drgań względnych ściernicy i przedmiotu w kierunku osi wrzeciona  $y$  z częstotliwością wymuszenia  $f = 20$  Hz i amplitudą  $F = 22,5$  N. W zakresie czasu symulacji od 0 do 2,5s stolik wibracyjny pracuje na biegu luzem - nie występuje jeszcze styk ściernicy z przedmiotem obrabianym. Osiowa siła skrawania  $F_a$  równa jest wtedy zeru. W chwili czasu 2,5s ma miejsce wejście ściernicy w materiał obrabiany i następuje krótkotrwały stan wymuszenia impulsowego. Te drgania swobodne są bardzo szybko tłumione, a amplituda drgań względnych ściernicy i przedmiotu nieznacznie zmniejsza się z  $289,3\mu\text{m}$  do  $270,2\mu\text{m}$ , czyli o 6,6%. Również to niewielkie zmniejszenie można zauważyć dla drgań wzbudzanych mniejszymi amplitudami siły  $F$  (rys. 6). Wszystkie wartości amplitudy drgań  $A$  w czasie skrawania są nieznacznie mniejsze od wartości amplitudy drgań  $A$  na biegu luzem. Z tego wykresu wynika również, że zależności amplitud drgań na biegu luzem jak i podczas skrawania w funkcji siły  $F$  są liniowe.



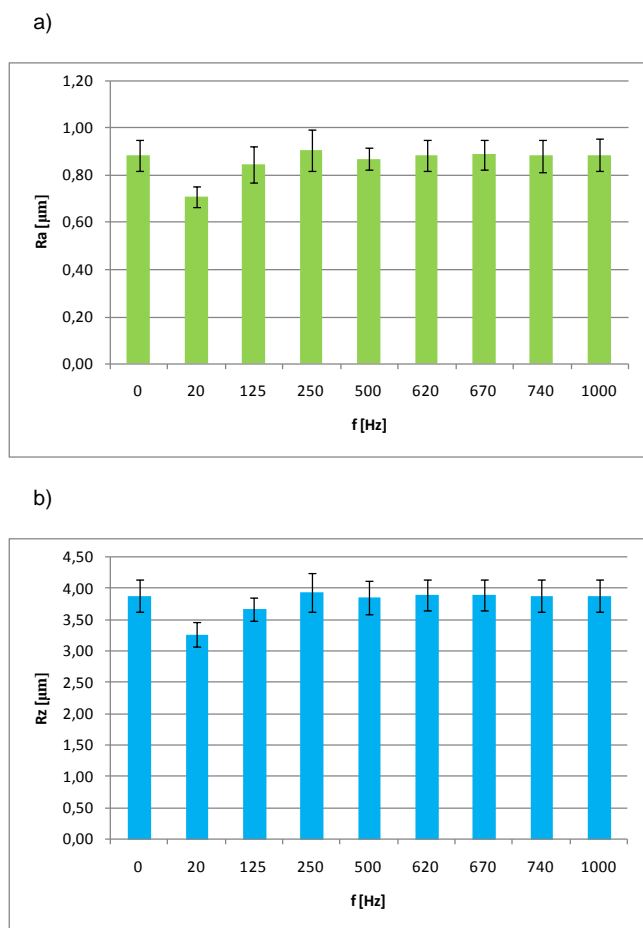
Rys. 5. Przebieg czasowy drgań względnych ściernicy i przedmiotu w kierunku osi wrzeciona  $y$  z częstotliwością wymuszenia  $f = 20$  Hz i amplitudą siły  $F = 22,5$  N w fazie tuż przed wejściem ściernicy w materiał obrabiany i podczas szlifowania wibracyjnego



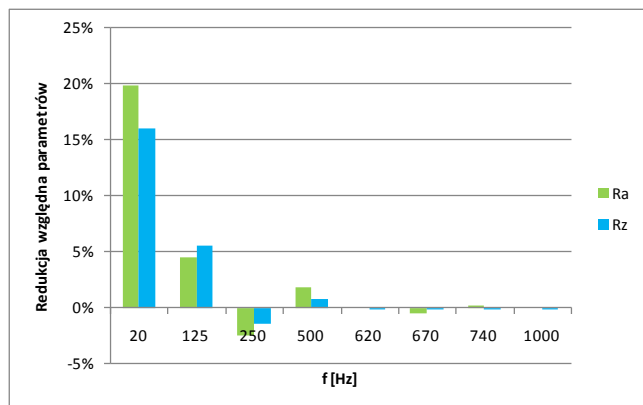
Rys. 6. Amplitudy  $A$  drgań względnych ściernicy i stolika wibracyjnego w kierunku osi ściernicy  $y$  w zależności od amplitudy siły wymuszającej  $F$  dla częstotliwości  $f = 20$  Hz

Z badań symulacyjnych przy wybranych częstotliwościach  $f$  większych niż 20 Hz przy amplitudzie siły  $F = 22,5$  N otrzymywano dużo niższe amplitudy drgań, rzędu kilku mikrometrów lub dziesiątych części mikrometra (tabela 1). Dla tych częstotliwości amplitudy drgań  $A$  w czasie skrawania są minimalnie mniejsze od odpowiednich na biegu luzem, a praktycznie po zaokrągleniu do  $0,1\mu\text{m}$  mają takie same wartości. Przy danej częstotliwości  $f$ , analogicznie do rysunku 6, zależności amplitud drgań od siły  $F$  były proporcjonalne. Zwracając uwagę na zakres stosowanych amplitud drgań przy szlifowaniu wibracyjnym - jak podaje przeglądowa pozycja literatury [2] - jako min.  $0,5\mu\text{m}$ , badania symulacyjne chropowatości przy częstotliwościach w zakresie od 500 Hz do 1000 Hz prowadzono informacyjnie tylko dla największej siły  $F = 22,5$  N.





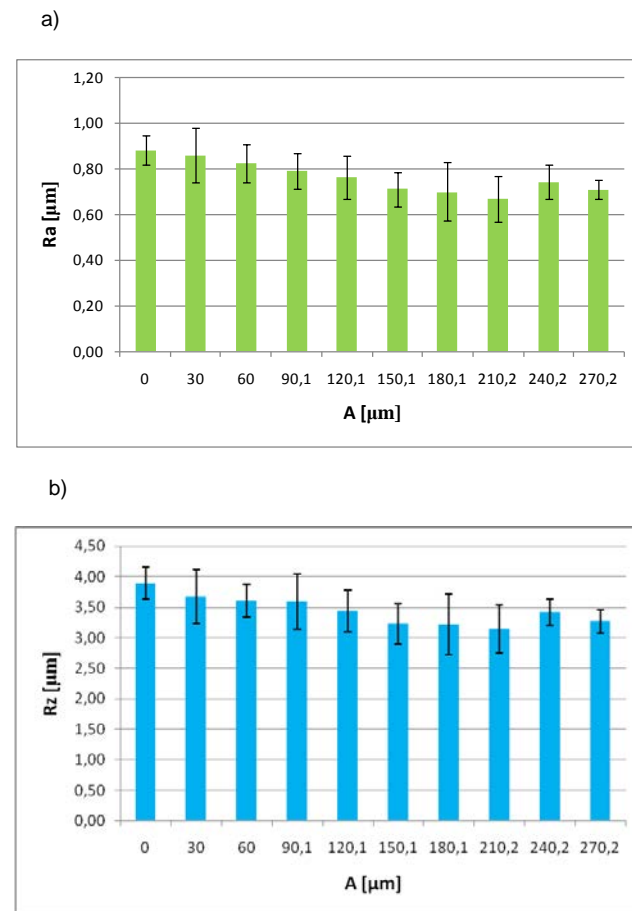
Rys. 9. Wartości średnich arytmetycznych parametrów chropowatości: a)  $R_a$  i b)  $R_z$  przedmiotu obrabianego w zależności od częstotliwości  $f$  siły wymuszającej  $F_{w2}$  o amplitudzie  $F=22,5\text{N}$ ,  $v_w = 1\text{ m/min}$



Rys. 10. Redukcja względna średnich arytmetycznych parametrów chropowatości  $R_a$  i  $R_z$  przedmiotu obrabianego w odniesieniu do szlifowania konwencjonalnego w zależności od częstotliwości drgań wymuszonych przy amplitudach określonych w tabeli 1,  $v_w = 1\text{ m/min}$

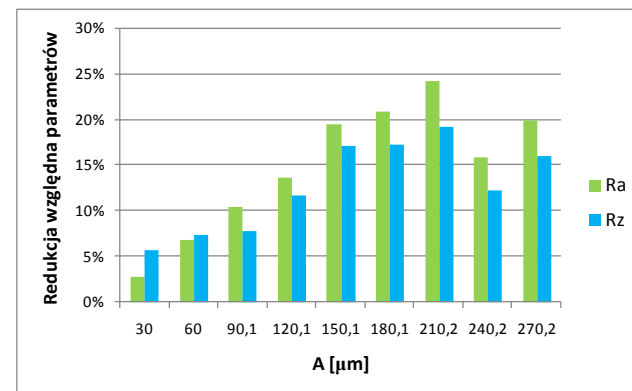
Spośród przyjętych wyżej częstotliwości przy wartościach 20, 125 i 250 Hz otrzymywano stosunkowo większe amplitudy drgań wymuszonych dla zadawanych amplitud sił w zakresie do  $F=22,5\text{N}$  (tabela 1). Dla tych wartości przeprowadzono badania wpływu amplitudy drgań wymuszonych na parametry chropowatości powierzchni po szlifowaniu. Poniżej przedstawiono wyniki dla częstotliwości 20Hz, przy której otrzymano najlepsze efekty zmniejszenia chropowatości. Na podstawie wykresu z rys. 11 można zauważyć, że naj-

większe zmniejszenie badanych parametrów osiągnięto przy amplitudzie  $A = 210,2\mu\text{m}$ .



Rys. 11. Wartości średnich arytmetycznych parametrów chropowatości: a)  $R_a$  i b)  $R_z$  przedmiotu obrabianego w zależności od amplitudy drgań wymuszonych  $A$  przy częstotliwości  $f = 20\text{Hz}$ ,  $v_w = 1\text{ m/min}$

W tym przypadku (rys. 12) otrzymano największą względną redukcję wartości średnich parametrów chropowatości: dla  $R_a$  ponad 24 %, zaś dla  $R_z$  ponad 19%. Zakresy dotyczące błędów symulacji wielokrotnej dla wartości średnich parametrów nie pokrywają się porównując szlifowanie konwencjonalne z wibracyjnym dla amplitud  $A$  począwszy od 210,2 $\mu\text{m}$  i dla większych badanych wartości, co świadczy o dużym prawdopodobieństwie poprawy chropowatości.



Rys. 12. Redukcja względna średnich arytmetycznych parametrów chropowatości  $R_a$  i  $R_z$  przedmiotu obrabianego w odniesieniu do szlifowania tradycyjnego w zależności od amplitudy drgań wymuszonych  $A$  przy częstotliwości  $f = 20\text{Hz}$ ,  $v_w = 1\text{ m/min}$

## Podsumowanie

Na podstawie komputerowych badań symulacyjnych pracy modelu szlifowania wibracyjnego wykazano, że istnieje możliwość znacznego obniżenia chropowatości powierzchni obrabianej przez wprowadzenie odpowiednich drgań na szlifierkę do płaszczyzn równoległe do osi ściernicy (w kierunku  $y$ ). Zostało to udowodnione zmniejszeniem obliczonych wartości wyjściowych parametrów  $Ra$  i  $Rz$  modelu chropowatości.

## LITERATURA

1. Giergiel J.: Drgania układów mechanicznych, Skrypty uczelniane 1037, AGH Kraków 1986.
2. Koziarski A, Gołąbczak A.: Kierunki rozwoju obróbki ściernej. XXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Łódź 2003, s. 9-40.
3. Oryński F., Bechciński G., Eksperymentalne badania dynamiki szlifierki do wibracyjnego szlifowania podczas dobiegu i obróbki płaszczyzn. IM Inż. Masz. 2010 Vol.15 z.4 s.113-123,
4. Oryński F., Synajewski R., Bechciński G., Fizyczny model szlifowania wibracyjnego płaszczyzn w kierunku poprzecznym. Mechanik, Nr 1/2013, s. 30-34.
5. Oryński F., Synajewski R., Bechciński G., Model fizyczny do badań symulacyjnych szlifowania wibracyjnego w kierunku poprzecznym. Rozdział w monografii: „Podstawy i technika obróbki ściernej” pod redakcją A. Gołąbczaka i B. Kruszyńskiego. XXXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Łódź 2010, s. 241-250.
6. Peng Y., Liang Z., Wu Y., Guo Y., Wang C., Characteristics of chip generation by vertical elliptic ultrasonic vibration-assisted grinding of brittle materials. Int J Adv Manuf Technol (2012) 62:563–568.
7. Peng Y., Wu Y. B., Liang Z. Q., Guo Y. B., Lin X., An experimental study of ultrasonic vibration-assisted grinding of polysilicon using two-dimensional vertical workpiece vibration. Int J Adv Manuf Technol (2011) 54: 941–947.
8. Tsiakoumis V., Batako A.D., Vibration assisted surface grinding of mild and hardened steel: Performance of a novel vibrating jig design. Proceedings of the 37th International Matador Conference, p. 185. Editors: Srichand Hinduja, Lin Li. Springer Verlag London 2013.
9. Wu Y. B., Nomura M., Feng Z. J., Kato M, Modeling of Grinding Force in Constant–depth–of–cut Ultrasonically Assisted Grinding. Materials Science Forum Vols. 471- 472 (2004) pp. 101÷106.
10. Yan Wang, Bin Lin, Xiaoyan Cao, Shaolei Wang: An experimental investigations of system matching in ultrasonic vibration assisted grinding of titanium. Journal of Materials Processing Technology, 214 (2014) 1871 ÷ 1878.
11. Yan Wang, Bin Lin, Shaolei Wang, Xiaoyan Cao, Study on the system matching of ultrasonic vibration assisted grinding for hard and brittle materials processing. International Journal of Machine Tools & Manufacture <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.11.003>.
12. Zhong Z. W., Rui Z. Y., Grinding of single-crystal silicon using a microvibration device. Materials and Manufacturing Processes, 20: 687–696, 2005.