

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

Próba oceny właściwości wytrzymałościowych ściernic o kształtach złożonych poprzez pomiar częstotliwości drgań własnych

Attempt to evaluate strength properties for grinding wheels of complex shapes by self-vibration frequency measurement

ANDRZEJ ZORA *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.402

W artykule przedstawiono analizę drgań własnych ściernic o kształtach złożonych na przykładzie ściernicy garnkowej. Mierzono częstotliwość drgań własnych i na tej podstawie wyznaczony był moduł Younga dla materiału ściernicy. Badaniu poddawano zarówno całą ściernicę o kształcie złożonym, jak i ściernice o kształtach podstawowych na które podzielona została ściernica wyjściowa. Na tej podstawie podjęto próbę oceny właściwości wytrzymałościowych ściernicy o kształcie złożonym.

SŁOWA KLUCZOWE: ściernica, kształt złożony, drgania własne, właściwości wytrzymałościowe

In the paper the self-vibrations analysis for grinding wheels of complex shapes focusing on straight cup grinding wheel has been presented. The self-vibration frequency has been measured and basing on which Young's modulus for grinding wheel material has been defined. Both the whole grinding wheel of complex shape as well as grinding wheels of basic shapes on which the initial grinding wheel has been divided have undergo tests. Basing on this the attempt to evaluate strength properties for grinding wheel of complex shape has been undertaken.

KEYWORDS: grinding wheel, complex shape, self-vibrations, strength properties

Wstęp

Zwiększająca się różnorodność obrabianych części maszyn, dążenie do maksymalizacji ekonomicznej efektywności procesu szlifowania, a także pojawiające się operacje

których celem jest obróbka trudno dostępnych powierzchni wymagają zastosowania narzędzi o określonych, specjalnych kształtach. Bardzo często są to narzędzia o kształtach złożonych. Dobór odpowiedniego typu ściernicy do realizacji konkretnego procesu uwarunkowany jest możliwością dostosowania jej wymiarów gabarytowych. Takimi ściernicami są ściernice o spoiwie ceramicznym. Charakteryzują się takimi właściwościami jak łatwe nadawanie żądanych właściwości skrawnych roboczej powierzchni ściernicy czy dużą odpornością na zużycie ściernic. Ponadto ściernice te, z uwagi na dużą elastyczność topograficzną, umożliwiają odpowiedni dobór warunków procesu dla wybranego rodzaju materiału obrabianego oraz stawianych wymogów jakościowych [1].

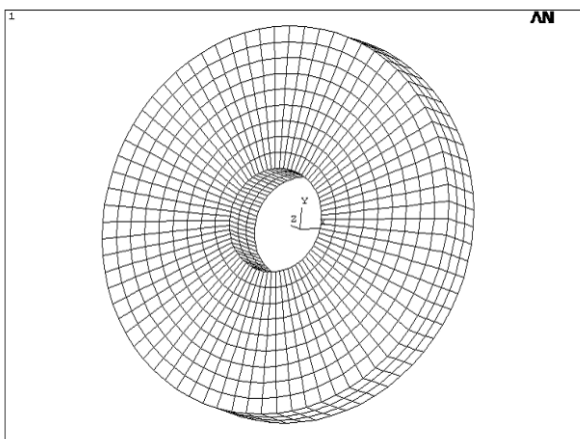
Jednym z warunków ograniczających stosowanie ściernic specjalnych (o kształtach złożonych) ze spoiwem ceramicznym może się okazać trudność z wyznaczeniem ich wytrzymałości. Ściernice te podczas pracy obciążone są złożonym układem sił powstających w procesie skrawania. Dodatkowo są one obciążone siłami odśrodkowymi związanymi z wysokimi prędkościami obrotowymi jakie są charakterystyczne dla procesu szlifowania. Zastosowanie ściernic o kształtach złożonych i obniżonych wymiarach gabarytowych (grubości ścianek) może okazać się niebezpieczne z uwagi na ich obniżoną wytrzymałość na zerwanie.

Kolejnym aspektem jaki należy wziąć pod uwagę analizując wytrzymałość ściernic o kształtach złożonych jest problem jednorodności materiału w całej objętości takiej ściernicy. Proces produkcyjny, a w szczególności formowanie, zagęszczanie i termiczne utwardzanie ściernic o spoiwie ceramicznym i kształtach złożonych stwarza istotne trudności w zapewnieniu tych samych właściwości wytrzymałościowych we wszystkich częściach tworzących taką ściernicę. Te zagadnienia stanowiły punkt wyjściowy do badań ściernic o kształtach złożonych jakie zostały przedstawione w niniejszym opracowaniu.

* dr inż. Andrzej Zora (andrzej.zora@p.lodz.pl)

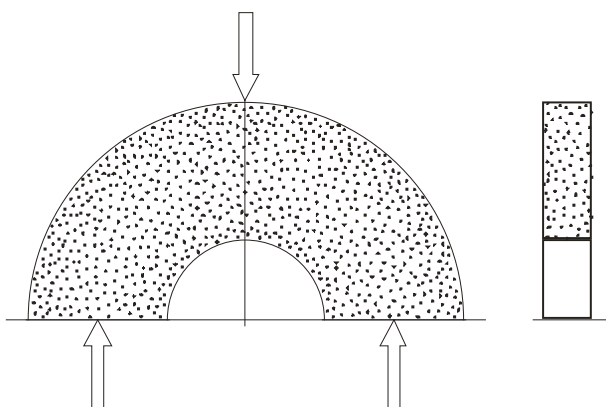
Badania ściernic o kształtach podstawowych

We wcześniejszych badaniach przeprowadzonych wraz z W. Fiksem jako przykład ściernicy o kształcie podstawowym przyjęto ściernice o spoiwie ceramicznym o kształcie "1". Jako model dyskretny ściernicy w obliczeniach MES (przedstawiony na rysunku 1) przyjęto tarczę z otworem, a następnie wyznaczono naprężenia zredukowane uwzględniając charakterystykę materiału ściernicy - materiał kruchy o różnych właściwościach na ściskanie i na rozciąganie.



Rys. 1. Model dyskretny ściernicy o kształcie podstawowym "1"

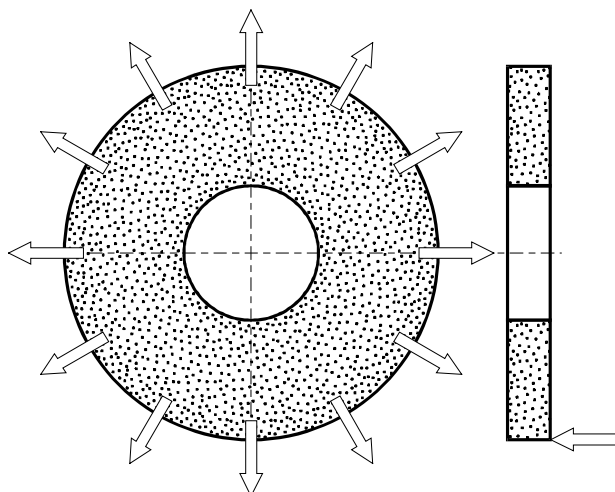
Właściwości wytrzymałościowe materiału ściernicy, niezbędne do obliczenia naprężeń zredukowanych wyznaczono metodą półpierścienia [2]. Schemat tej metody przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat obciążenia próbki podczas badania właściwości wytrzymałościowych materiału ściernicy metodą półpierścienia (schemat zginania trójpunktowego) [2]

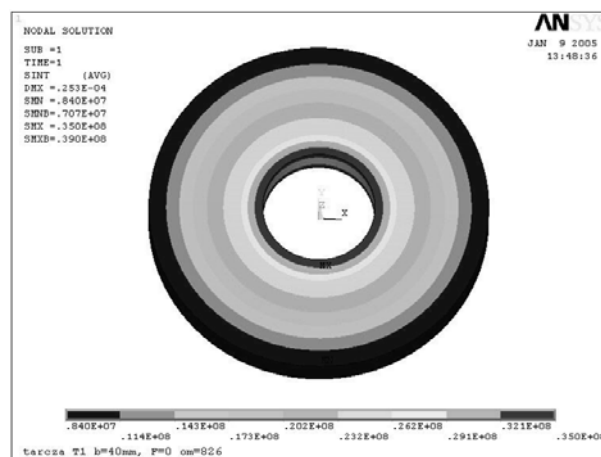
Do wyznaczenia naprężeń zredukowanych w ściernicy przyjęto obciążenie siłami odśrodkowymi i siłą boczną. Jest to rodzaj obciążenia w decydujący sposób wpływający na powstawanie naprężeń w ściernicy [3,4]. Jak wykazano w opracowaniu [2] obciążenie ściernicy siłami normalną i styczną powoduje powstanie naprężeń pomijalnie małych w porównaniu do naprężeń wywołanych siłami odśrodkowymi.

Wpływ obciążenia ściernicy siłą boczną na powstające naprężenia silnie zależy od wymiarów gabarytowych ściernicy, a w szczególności od proporcji jej wysokości w odniesieniu do średnicy zewnętrznej. Model obciążeń przyjęty w obliczeniach MES przedstawiono na rysunku 3.



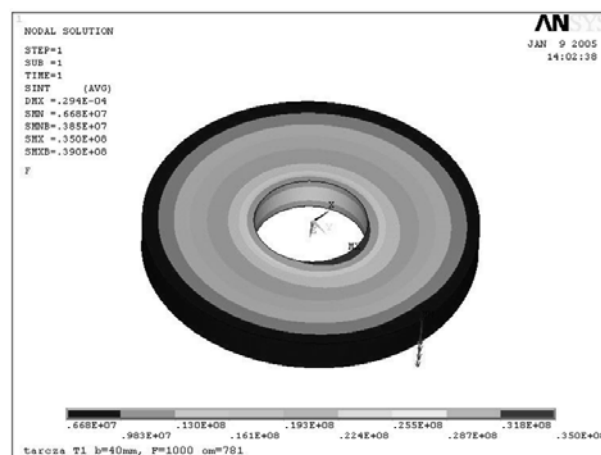
Rys. 3. Schemat obciążenia ściernicy siłami odśrodkowymi i siłą boczną przyjęty w obliczeniach MES

Na rysunku 4 przedstawiono uzyskany w wyniku obliczeń przykładowy rozkład naprężeń w tarczy poddanej wyłącznie działaniu sił odśrodkowych.



Rys. 4. Rozkład naprężeń zredukowanych w ściernicy poddanej działaniu sił odśrodkowych

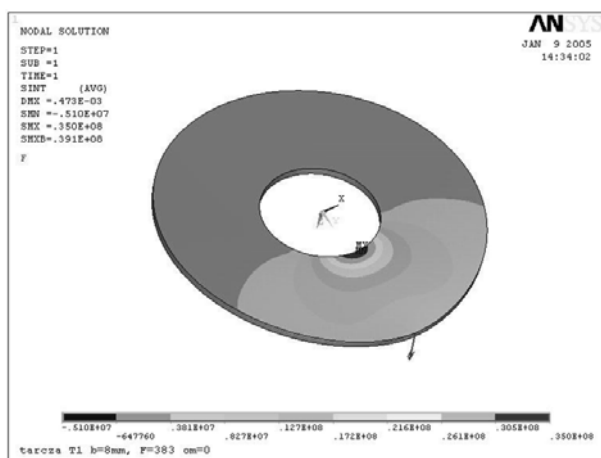
Na rysunku 5 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych w ściernicy obciążonej zarówno siłami odśrodkowymi jak i siłą boczną (1000N). Obliczenia przeprowadzono dla typowych wymiarów gabarytowych ściernic pracujących obwodem: 350x40x127.



Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych dla ściernicy obciążonej siłami odśrodkowymi i siłą boczną $F=1000\text{N}$ ($D=350\text{mm}$, $b=40\text{mm}$)

Uzyskane wyniki wskazują, iż obciążenie siłą boczną wywiera tylko niewielki wpływ na wielkość i rozkład naprężeń. Również zmniejszenie prędkości kątowej, przy której występujące w ściernicy zredukowane naprężenia maksymalne równe są naprężeniom dopuszczalnym, jest niewielkie (z $\omega=826^{-1}$ do $\omega=781^{-1}$).

Istotnie inne wyniki obliczeń otrzymano dla ściernicy o niestandardowych proporcjach wymiarów gabarytowych (wysokość $b=8\text{mm}$). Zastosowanie takich właśnie ściernic może być konieczne przy obróbce trudnodostępnych powierzchni. Już obciążenie siłą boczną $F=383\text{N}$ powoduje powstanie w ściernicy maksymalnych naprężeń zredukowanych równych naprężeniom dopuszczalnym. Oznacza to, że taka ściernica nie może być obciążona żadnymi dodatkowymi siłami (np. siłami odśrodkowymi), powodującymi powstanie dodatkowych naprężeń - tzn. nie może się obracać, a więc nie może pracować. Rozkład naprężeń zredukowanych dla takiej ściernicy przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych dla ściernicy o niestandardowych wymiarach geometrycznych ($D=350\text{mm}$, $b=8\text{mm}$) obciążonej jedynie siłą boczną $F=383\text{N}$ (nieobracającej się)

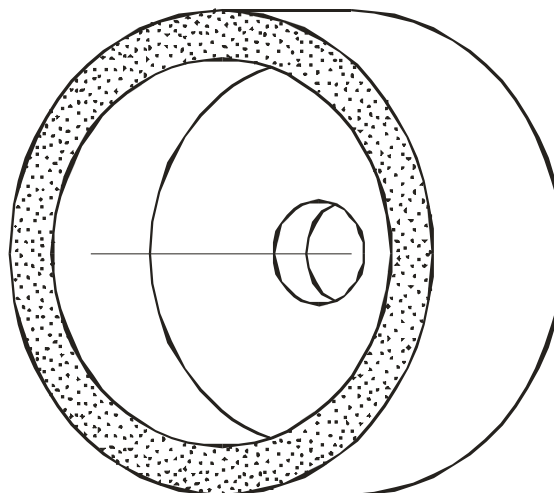
Jednak obliczenia przeprowadzone dla ściernicy o standardowych wymiarach (350×40) obciążonych działaniem siły odśrodkowej wykazały, iż jej wytrzymałość pozwala na jej pracę ze znacznie większymi parametrami. W szczególności dotyczy to prędkości obrotowej, a co za tym idzie prędkości obwodowej (prędkości skrawania). Przy maksymalnej dopuszczalnej prędkości obrotowej podawanej przez producenta równej 1800 obr/min z przeprowadzonych obliczeń wynika, iż naprężenia dopuszczalne zostaną osiągnięte przy prędkości powyżej 8100 obr/min . Nawet zachowując współczynnik bezpieczeństwa pracy narzędzia $k=2$ prędkość pracy ściernicy mogłaby być zwiększona ponad dwukrotnie.

Przedstawiona powyżej analiza potwierdza kluczowe znaczenie wymiarów geometrycznych, a w szczególności ich wzajemnych proporcji dla wytrzymałości ściernicy, a w konsekwencji dla możliwości ich praktycznego zastosowania. Wniosek ten jest szczególnie istotny dla ściernic o kształtach złożonych, których wyniki badań zostaną przedstawione w dalszej części artykułu.

Badania ściernic o kształtach złożonych

Badania te zostały przeprowadzone dla przykładowej ściernicy o kształcie złożonym, tj. ściernicy garnkowej o wymiarach $150 \times 80 \times 32$ (rys. 7). Pierwszym etapem wyznaczania wytrzymałości ściernicy jest określenie właściwości materiału z którego zbudowane jest narzędzie oraz

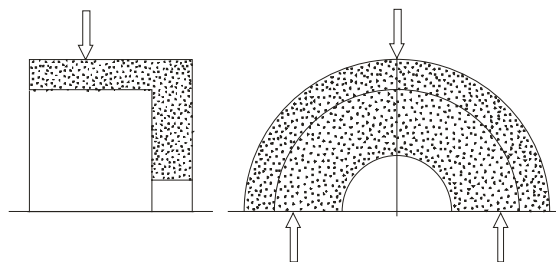
jednorodności tego materiału w różnych częściach bryły złożonej.



Rys. 7. Przykład ściernicy o kształcie złożonym - ściernica garnkowa z zaznaczoną powierzchnią roboczą

■ Określenie właściwości materiałowych ściernicy garnkowej

Dla ściernicy o kształcie podstawowym (typ "1") do wyznaczenia wytrzymałości materiału użyto metody półpiersienia. Niestety zastosowanie jej dla ściernicy garnkowej okazało się niemożliwe ze względu na niesymetryczny kształt bryły narzędzia (rys. 8).



Rys. 8. Niesymetryczny układ obciążenia uniemożliwiający zastosowanie metody półpiersienia dla ściernicy garnkowej.

Dodatkowo przyjęcie takiej metody wyznaczenia właściwości wytrzymałościowych ściernicy dawałoby wielkości uśrednione dla całej objętości bryły i nie pozwalałoby ocenić jednorodności materiału narzędzia skrawającego.

Oczywistym ograniczeniem stosowania metody półpiersienia do wyznaczenia właściwości wytrzymałościowych narzędzia jest także konieczność rozcięcia ściernicy w płaszczyźnie symetrii, a więc jest to metoda niszcząca niemożliwa do przyjęcia w warunkach produkcyjnych.

W tej sytuacji podjęto próbę wyznaczenia właściwości wytrzymałościowych ściernicy o kształcie złożonym poprzez pomiar częstotliwości drgań własnych. Do tego zadania zastosowano dynamiczny analizator właściwości sprężystych.

■ Układ do wyznaczania właściwości sprężystych materiału

Depa - Dynamic Elastic Properties Analyzer jest zaawansowanym systemem do testowania właściwości sprężystych materiałów i produktów, wykorzystującym technikę wzbudzenia impulsowego - IET (Impulse Excitation Technique).

Zasada działania systemu wykorzystuje analizę drgań wzbudzanych w badanym obiekcie, z wykorzystaniem szybkiej transformacji Furiera (FFT). System pozwala wyznaczyć następujące parametry:

- podłużny moduł sprężystości,
- poprzeczny moduł sprężystości,
- współczynnik Poissona,
- twardość ściernicy

Dla prowadzenia prób wielokrotnych w systemie przewidziano moduł z analizą statystyczną wyników oraz możliwością generowania raportów z przeprowadzonych badań.

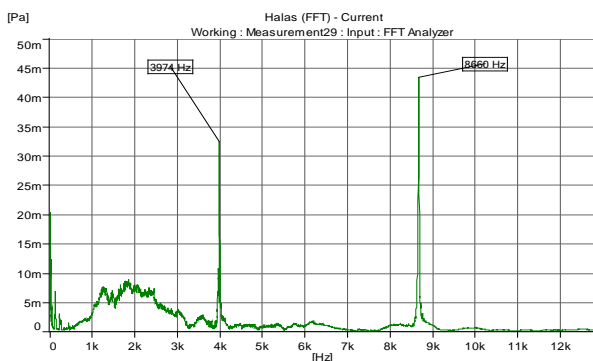
W celu wyznaczenia szukanych parametrów badanego obiektu konieczne jest określenie i wyznaczenie:

- współczynnika kształtu badanego obiektu,
- jego wymiarów geometrycznych (objętości),
- masy obiektu,
- wartości częstotliwości drgań własnych obiektu.

W systemie DEPA istnieje możliwość wyznaczenia właściwości materiałowych dla obiektów o różnym kształcie. Dostępne są następujące opcje kształtu próbki:

- płytką,
- pręt,
- rura,
- tarcza,
- tarcza z otworem,
- tarcza z wybraniem,
- tarcza o dużej grubości.

Niestety w badaniach ściernicy o kształtach złożonych występują problemy związane z oceną ich właściwości. Na przebiegu FFT pojawiają się co najmniej dwa wyraźne piki o różnych częstotliwościach, związane prawdopodobnie z poszczególnymi "częściami składowymi" bryły ściernicy złożonej (rys. 9).



Rys. 9. Przebieg drgań FFT w ściernicy o kształcie złożonym

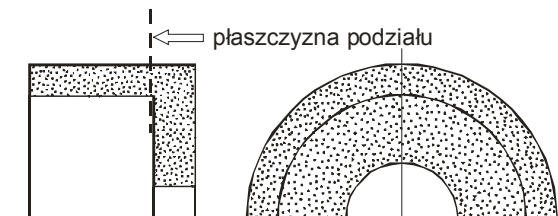
W systemie DEPA brak jest opcji opisujących badane ściernice o kształtach złożonych (ściernice garnkowe). Próba zastosowania standardowych kształtów wpisanych do systemu skończyła się niepowodzeniem - uzyskiwane wyniki pomiarów częstotliwości drgań wzbudzonych w narzędziu cechowały się bardzo dużym rozrzutem i brakiem powtarzalności. W efekcie niemożliwe było wyznaczenie modułu Younga czy twardości ściernicy.

Po analizie przeprowadzonych badań aby uzyskać możliwość wyznaczenia właściwości materiałowych badanej ściernicy o kształtach złożonych podzielono bryłę narzędzia na części o kształtach podstawowych opisanych w systemie DEPA. Umożliwiło to nie tylko przeprowadzenie pomiaru częstotliwości wzbudzonych drgań własnych, ale także porównanie wyników uzyskanych dla różnych "części składowych"

ściernicy o kształcie złożonym i ocenę jednorodności materiału narzędzia w całej jego objętości.

■ Badania obiektów o kształtach podstawowych - części składowych ściernicy garnkowej

Sposób podziału ściernicy o kształcie złożonym na elementy o kształtach podstawowych pokazuje rysunek 10.

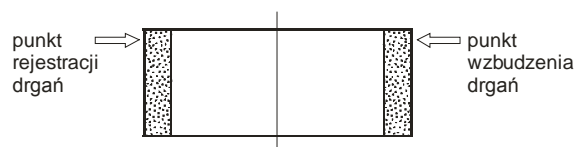


Rys. 10. Sposób podziału ściernicy o kształtach złożonych (ściernicy garnkowej) na części o kształtach podstawowych

Po podziale otrzymano tarczę odpowiadającą ściernicy płaskiej typ "1" o średnicy 150mm i otworze 32mm oraz część odpowiadającą ściernicy pierścieniowej typ "2" o wymiarach 150 x 60 -W15. Następnie przy pomocy systemu DEPA przeprowadzono pomiary częstotliwości drgań własnych wzbudzanych w tych bryłach.

Przed rozpoczęciem pomiaru konieczne jest wpisanie do systemu DEPA wymiarów geometrycznych badanej bryły oraz jej masy - na tej podstawie wyznaczany jest jej ciężar właściwy. Ciężar ściernicy pierścieniowej wynosił 810 G, a jej gęstość 2,158 G/cm³.

Schemat przedstawiający umiejscowienie punktu wzbudzenia drgań własnych w ściernicy pierścieniowej i punktu pomiaru częstotliwości, ustalone zgodnie z zaleceniami systemu DEPA obrazuje rys. 11.



Rys. 11. Schemat umiejscowienia punktu wzbudzenia drgań i punktu pomiaru częstotliwości dla części pierścieniowej.

Wyniki pomiarów częstotliwości drgań własnych dla tej ściernicy przedstawione są w tabeli 1.

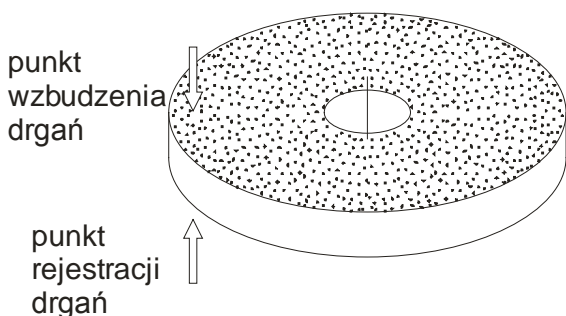
Tab. 1. Zmierzone częstotliwości drgań własnych oraz wyznaczony moduł Younga dla części składowej ściernicy garnkowej - ściernicy pierścieniowej.

Lp.	Częstotliwość [Hz]	Moduł Younga [GPa]	Lp.	Częstotliwość [Hz]	Moduł Younga [GPa]
1	1494,75	27,745	6	1493,95	27,716
2	1495,15	27,760	7	1494,14	27,723
3	1494,09	27,721	8	1494,26	27,727
4	1494,93	27,752	9	1494,01	27,718
5	1495,09	27,758	10	1493,89	27,721

Jak widać uzyskane wyniki pomiaru częstotliwości drgań własnych cechują się wysoką powtarzalnością. Wyznaczony na ich podstawie moduł Younga odpowiada twardości ściernicy F.

Dla ściernicy płaskiej zmierzony ciężar wynosił 759 G, a jej gęstość $2,250 \text{ G/cm}^3$.

Schemat przedstawiający umiejscowienie punktu wzbudzenia drgań własnych w ściernicy płaskiej i punkt pomiaru częstotliwości, ustalone zgodnie z zaleceniami systemu DEPA obrazuje rys. 12.



Rys. 12. Schemat umiejscowienia punktu wzbudzenia drgań i punktu pomiaru częstotliwości dla części płaskiej.

Wyniki pomiarów częstotliwości drgań własnych dla tej ściernicy przedstawione są w tabeli 2.

Tab. 2. Zmierzone częstotliwości drgań własnych oraz wyznaczony moduł Younga dla części składowej ściernicy garnkowej - ściernicy płaskiej.

Lp.	Częstotliwość [Hz]	Moduł Younga [GPa]	Lp.	Częstotliwość [Hz]	Moduł Younga [GPa]
1	3829,84	46,799	6	3828,22	46,759
2	3829,75	46,797	7	3830,11	46,805
3	3828,25	46,760	8	3829,85	46,799
4	3832,37	46,861	9	3831,45	46,838
5	3829,59	46,793	10	3829,85	46,799

Również w tym przypadku uzyskane wyniki pomiaru częstotliwości drgań własnych są bardzo zbliżone. Wyznaczony na ich podstawie moduł Younga odpowiada twardości ściernicy K.

■ Porównanie właściwości materiałów wyznaczonych dla brył o kształtach podstawowych - części składowych ściernicy garnkowej

Już porównanie podstawowej wielkości opisującej materiał obu brył otrzymanych z podziału ściernicy garnkowej - ich ciężaru właściwego wykazuje istotne różnice. Ciężar właściwy materiału tarczy jest o ponad 4% większy od ciężaru właściwego materiału części pierścieniowej.

Jednak znacznie bardziej znaczące, a w konsekwencji znacznie bardziej istotne dla pracy ściernicy różnice otrzymano przy wyznaczeniu modułu Younga, a na jego podstawie twardości ściernicy. Właściwości materiału części pierścieniowej odpowiadały twardości F, natomiast dla części płaskiej twardości K. Wielkości te uzyskano badając części składowe uzyskane z podziału ściernicy garnkowej o oznaczonej przez producenta twardości J.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, iż pomiar częstotliwości drgań własnych brył o kształtach złożonych jaką jest na przykład ściernica garnkowa nie pozwala na określenie cech materiału z którego jest wykonana. Badania właściwo-

ści materiału brył o kształtach podstawowych - części składowych na które podzielono ściernicę garnkową wykazały istotne różnice mogące wpływać na cechy użytkowe ściernicy. Jednakże niszczący charakter takich badań wyklucza ich zastosowanie w praktyce przemysłowej. Wobec takich rezultatów badań konieczne jest dalsze poszukiwanie metody badawczej pozwalającej na wiarygodną ocenę właściwości materiałowych części składowych brył o kształtach złożonych.

LITERATURA

- Oczoł K., Charakterystyka trendów rozwojowych szlifowania ściernicowego. Sekcja Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN, XXIII Szkoła Obróbki Ściernej. Rzeszów-Myczkowce 2000.
- Fiks W., Wytrzymałość ściernic ze spoiwem ceramicznym. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 895. Seria Rozprawy Naukowe, z. 302, Łódź 2002.
- Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., Wytrzymałość materiałów. WNT Warszawa, 1997.
- Timoshenko S., Goodier J. N., Teoria sprężystości. Arkady, 1962.