

Tomasz WALA<sup>1\*</sup>  
Krzysztof LIS<sup>2</sup>

## **ANALIZA DRGAŃ POD KĄTEM OTRZYMYWANEJ CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI CIĘCIA PODCZAS OBRÓBKI WODNO-ŚCIERNEJ**

Artykuł podejmuje dyskusję wpływu drgań występujących w procesie cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na otrzymywaną chropowatość powierzchni przecinanego przedmiotu. O jakości obrabianej powierzchni decydują głównie czynniki wynikające z ustawień samych parametrów procesu cięcia, jednak przedstawione w artykule badania eksperymentalne wykazują, że nie bez znaczenia są również drgania, towarzyszące obróbce.

### **1. WPROWADZNIENIE**

Eliminacja niepożądanych czynników i ewentualna korekta metody badawczej, w ramach poprawy techniki obróbki przedmiotu obrabianego, to nadrzędny cel prezentowanych prac badawczych. Technika kształtowania przedmiotu wysokociśnieniową strugą tnącą, pomimo że jej początki zaczynały się w latach 80-tych ubiegłego wieku, to po dzień dzisiejszy jest ciągle rozwijana i udoskonalana, zarówno pod kątem jakości kształtowania przedmiotu jak i wdrażania coraz to bardziej innowacyjnych rozwiązań konstrukcji elementów maszyn. W części badawczej niniejszego artykułu przedstawiono metodykę określenia stanu maszyny na podstawie zarejestrowanych drgań podczas procesu i ocenę ich wpływu na dokładność obróbki. Aktualny stan maszyny można określać obserwując charakterystykę działania obiektu, jego wyjście główne przekształconej energii lub na podstawie otrzymanego produktu oraz wyjścia dyssypacyjne. W przypadku obserwacji wyjść dyssypacyjnych skupia się ona na kontroli procesów resztkowych, które mogą być związane z temperaturą, drganiami, akustyką itp. Istnieją trzy sposoby obserwacji stanu maszyny [1]:

- **obserwacje procesów roboczych**, monitorując ich parametry w sposób ciągły, lub prowadząc badania sprawnościowe maszyn na specjalnie przeznaczonych do tego stanowiskach,

---

<sup>1</sup> Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska w Gliwicach

<sup>2</sup> Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska w Gliwicach

\* E-mail: tomasz.wala@polsl.pl

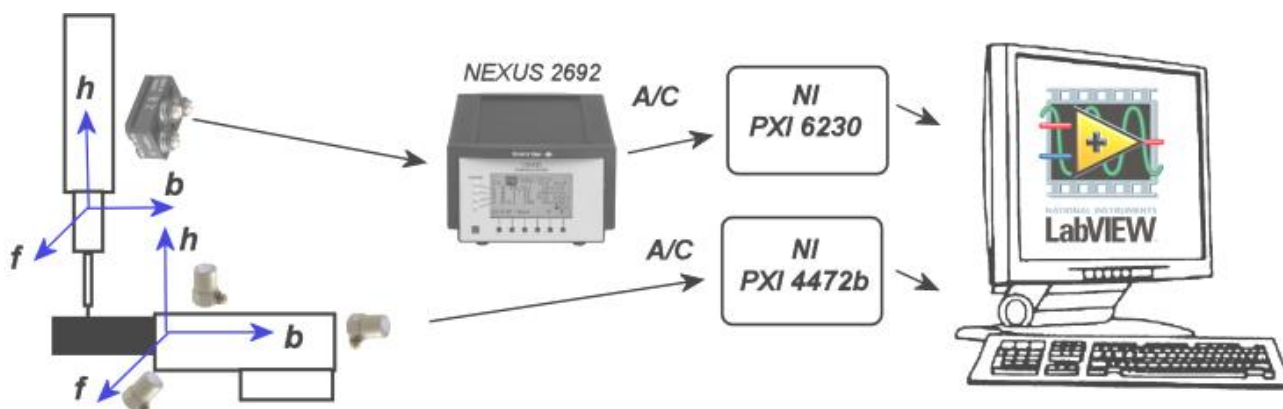
- **badania jakości wyrobów**, kontrola: wymiarów, równoległości, chropowatości powierzchni, pasowań połączeń. Zasadą ogólną jest, że im lepszy stan maszyny tym lepszy wyrób,
- **obserwacje procesów resztkowych**, na których opiera się wiele metod diagnostycznych.

Obecnie wykonuje się wiele badań w odniesieniu do wpływu parametrów procesu cięcia w obróbce wodno-ścierniej na postać drgań [2],[3],[4]. W badaniach tych podejmowano się próby skorelowania widma drgań z otrzymanym profilem wysokości chropowatości powierzchni obrabianej. Korelacja taka może być krokiem do stworzenia i realizacji programu zarządzającego procesem cięcia z wykorzystaniem zmierzonych informacji zwrotnych [2],[4]. W pracach tych udowodniono, że drgania mają znaczący wpływ na chropowatość powierzchni, a redukcja tych drgań pozwala uzyskać znaczącą poprawę w zakresie jakości powierzchni, zwłaszcza jeśli chodzi o morfologię prążkowania. Jakość powierzchni po cięciu wysokociśnieniową strugą tnącą silnie zależy od oddziaływań zewnętrznych – interakcja strugi z oprzyrządowaniem i wanną maszyny i od oddziaływań wewnętrznych – wpływ pulsacji pompy wysokociśnieniowej i systemu ruchu [3]. Wartości składowych drgań, tj. amplituda, częstotliwość mogą się już zmieniać przez wybór innego miejsca zamocowania obrabianego przedmiotu na kratowanym stole lub zmieniając sposób mocowania przedmiotu obrabianego. W artykule [3] przedstawiono badania wewnętrznych oddziaływań podczas rejestracji częstotliwość drgań strugi, które istotnie wpływały na jakość powierzchni obrabianego przedmiotu. Prezentowane w niniejszej pracy przykłady profili wysokości chropowatości powierzchni w odniesieniu do rejestrowanych zmian amplitud przemieszczeń wykazały znaczący ich wpływ na wartość wysokości chropowatości powierzchni.

## 2. BUDOWA STANOWISKA POMIAROWEGO

Stanowisko składało się z aluminiowej podstawy bezpośrednio zamocowanej do stołu maszyny, którego najważniejszą częścią jest belka wspornikowa, która z jednej strony zamocowana jest do czteroskładowego czujnika siły Kistler 9272. Sygnały z czujnika siły były wykorzystywane już we wcześniejszych badaniach dotyczących oddziaływań siłowych w procesie cięcia strugą wodno-ścierną [5]. W obecnych badaniach belka stanowiła wspornik, do której zamocowano obrabianą próbkę. Na wsporniku były zamocowane 3 czujniki piezoelektryczne, a każdy z nich odpowiadał za pomiar drgań w innym kierunku. Wykorzystano w tym celu czujnik firmy Brüel & Kjær typu 4393 i dwa czujniki firmy PCB Piezotronics typu 353B15.

Dodatkowo w celu rejestracji drgań głowicy zamocowano trójosiowy akcelerometr piezoelektryczny firmy Brüel & Kjær typu 4326-A z trzema niezależnymi wyjściami do jednoczesnego pomiaru w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. W skład toru pomiarowego wchodził wzmacniacz Brüel & Kjær typu Nexus 2692, komputer firmy National Instruments z kartami pomiarowymi typu PXI 4472B i PXI 6230 oraz oprogramowanie LabVIEW. Schemat toru pomiarowego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat toru pomiarowego  
Fig. 1. Scheme of the measurement chain

### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Podczas badań zarejestrowano kilkadziesiąt przebiegów drgań głowicy tnącej oraz stołu. Próby cięcia były realizowane na próbkach wykonanych ze stali węglowej S235JR oraz stopu aluminium EN AW-7075 o grubości 12 mm i 20 mm. Zostały użyte próbki o różnych grubościach, które były cięte w różnych odległościach od miejsca zamocowania próbki. Podczas badań stosowano następujące parametry obróbki: ciśnienie pompy 330 MPa, natężenie przepływu ścierniwa 340 g/min. W konstrukcji głowicy zastosowano dyszę wodną o średnicy otworu 0,35 mm i dyszę ogniskującą o średnicy otworu 1 mm. Podczas prób cięcia zmieniana była tylko prędkość posuwowa. W tabeli 1 zestawiono wartości prędkości posuwowej dla każdej wykorzystanej próbki.

Tabela 1. Wartości prędkości posuwowej dla próbek użytych w badaniach  
Table 1. The value of the feed rate for samples used during the studies

Próbka nr 1		Próbka nr 2		Próbka nr 3		Próbka nr 4	
aluminium EN AW-7075, grubość próbki: 20 mm		stal S235JR, grubość próbki 20 mm		aluminium EN AW-7075, grubość próbki: 12 mm		stal S235JR, grubość próbki 12 mm	
Nr pomiaru	Posuw [mm/min]	Nr pomiaru	Posuw [mm/min]	Nr pomiaru	Posuw [mm/min]	Nr pomiaru	Posuw [mm/min]
1	137	4	24	9	135	14	42
2	217	5	31	10	176	15	55
3	304	6	43	11	246	16	77
		7	68	12	390	17	123
		8	96	13	546	18	172

#### 4. POMIAR MAKSYMALNYCH AMPLITUD PRZEMIESZCZEŃ GŁOWICY

Wartości maksymalnych amplitud przemieszczeń głowicy tnącej, oraz stołu wyznaczono w kierunku prostopadłym do powierzchni przecięcia i zostały przedstawione w tabeli 2. Dane zostały otrzymane na podstawie analizy zarejestrowanych sygnałów. Sygnały przefiltrowano filtrem górnoprzepustowym, a następnie podwójnie scałkowano w celu otrzymania przemieszczeń. Do wyznaczenia wartości międzyszczytowych wykorzystano fragment sygnału pomiarowego odpowiadający odcinkowi pomiarowemu z pomiarów chropowatości tj. 12,5 mm.

Tabela 2. Wartości międzyszczytowe przemieszczeń głowicy tnącej  
Table 2. Peak-amplitude movements of the cutting head

Próbka nr 1				Próbka nr 2			
aluminium EN AW-7075, grubość próbki: 20 mm				S235JR, grubość próbki: 20 mm			
Nr pomiaru	Posuw [mm/min]	Przemieszczenie [ $\mu\text{m}$ ]		Nr pomiaru	Posuw [mm/min]	Przemieszczenie [ $\mu\text{m}$ ]	
		stół	głowica			stół	głowica
1	137	2,0	11,5	4	24	1,0	18,0
2	217	5,2	10,1	5	31	1,2	10,5
3	304	10,0	14,4	6	43	1,1	6,2
				7	68	1,0	15,0
				8	96	1,1	13,5

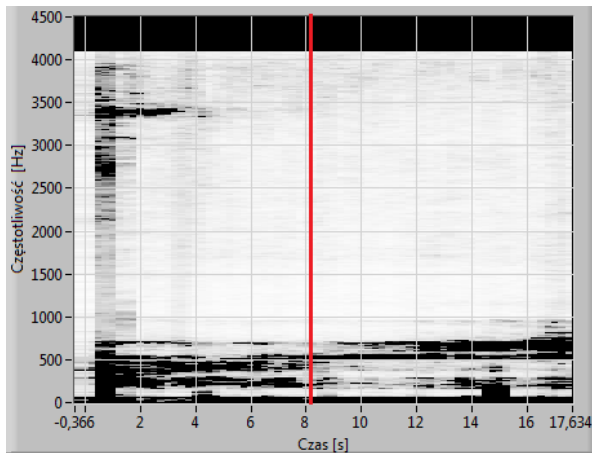
Próbka nr 3				Próbka nr 4			
aluminium EN AW-7075, grubość próbki: 12 mm				stal S235JR, grubość próbki 12 mm			
Nr pomiaru	Posuw [mm/min]	Przemieszczenie [ $\mu\text{m}$ ]		Nr pomiaru	Posuw [mm/min]	Przemieszczenie [ $\mu\text{m}$ ]	
		stół	głowica			stół	głowica
9	135	1,0	14,1	14	42	1,1	7,7
10	176	1,2	8,3	15	55	1,3	11,2
11	246	1,5	7,0	16	77	1,2	14,1
12	390	2,0	20,1	17	123	1,1	14,0
13	546	2,0	14,5	18	172	1,2	15,0

Przemieszczenia stołu wahają się w przedziale 1÷3  $\mu\text{m}$ . Ze względu na tak małe wartości amplitudy przemieszczeń oraz na zbyt małe ich zróżnicowanie w dalszej części pracy nie będą one brane pod uwagę w celu określenia wpływu przemieszczeń na jakość obróbki. Przemieszczenia na stole oraz głowicy w większości przypadków zwiększają się wraz ze wzrostem posuwu.

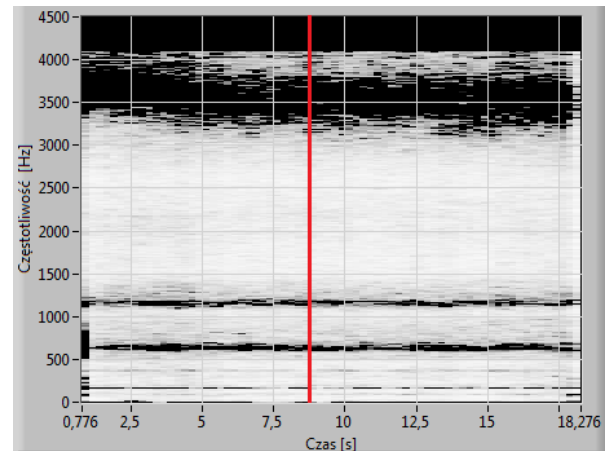
Przemieszczenia głowicy tnącej wahają się w przedziale 6÷15  $\mu\text{m}$  i są znacznie większe niż w przypadku przemieszczeń stołu.

## 5. ANALIZA DRGAŃ PODCZAS CIĘCIA STRUGĄ WODNO-ŚCIERNĄ

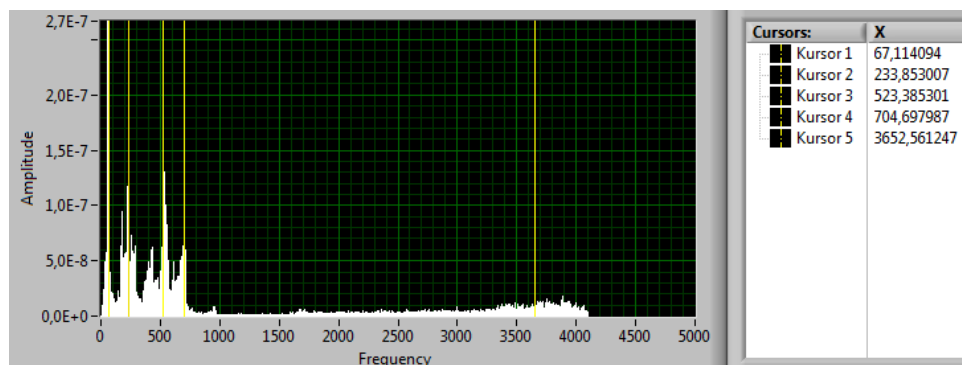
Na podstawie zarejestrowanych sygnałów przeprowadzono ich transformację z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości za pomocą transformacji Fouriera.



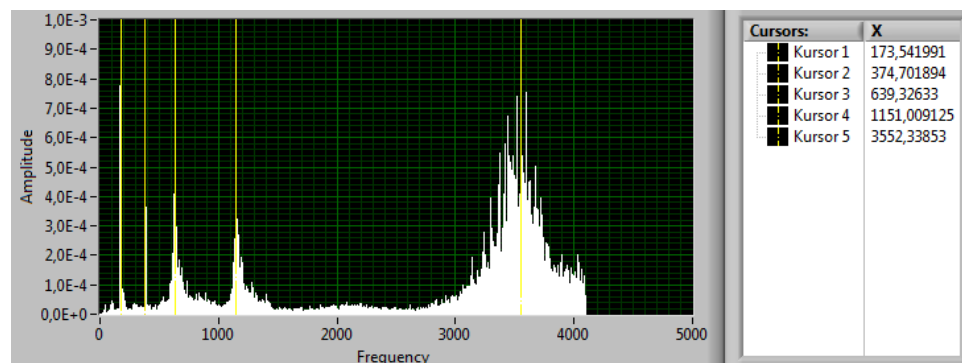
Rys. 2. Spektrogram Gabora, nr pomiaru 2, stół  
Fig. 2. Gabor spectrogram, nr of measurement 2, the table



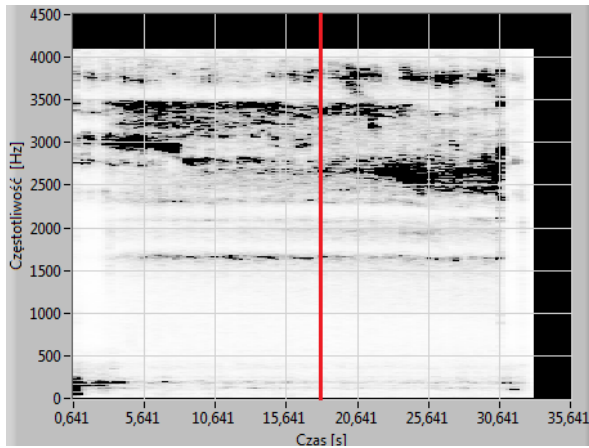
Rys. 3. Spektrogram Gabora, pomiar 2, głowica tnąca  
Fig. 3. Gabor spectrogram, nr of measurement 2, the cutter head



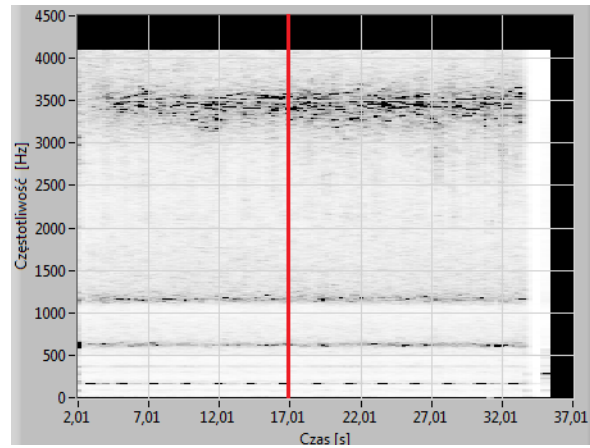
Rys. 4. Transformacja Fouriera, pomiar 2, stół  
Fig. 4. Fourier transformation, nr of measurement 2, the table



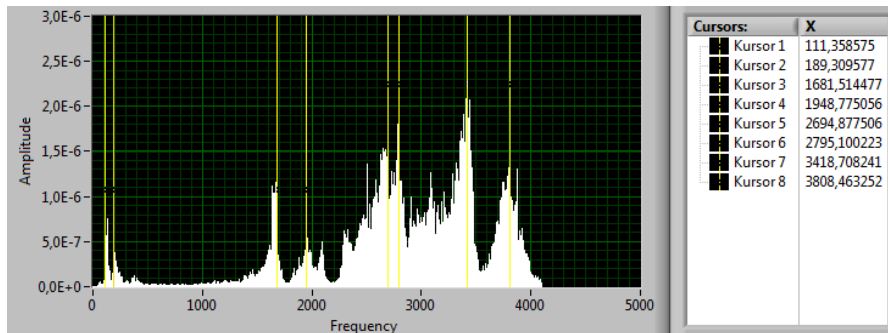
Rys. 5. Transformacja Fouriera, pomiar 2, głowica tnąca  
Fig. 5. Fourier transformation, nr of measurement 2, the cutter head



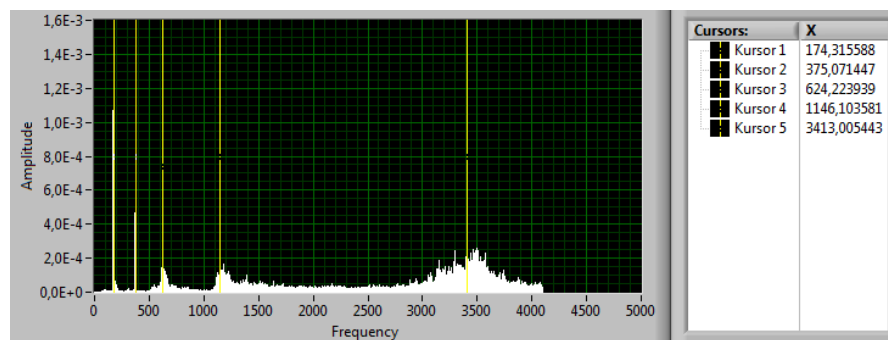
Rys. 6. Spektrogram Gabora, pomiar 8, stół  
Fig. 6. Gabor spectrogram, nr of measurement 2, the table



Rys.7. Spektrogram Gabora, pomiar 8, głowica tnąca  
Fig. 7. Gabor spectrogram, nr of measurement 2, the cutter head



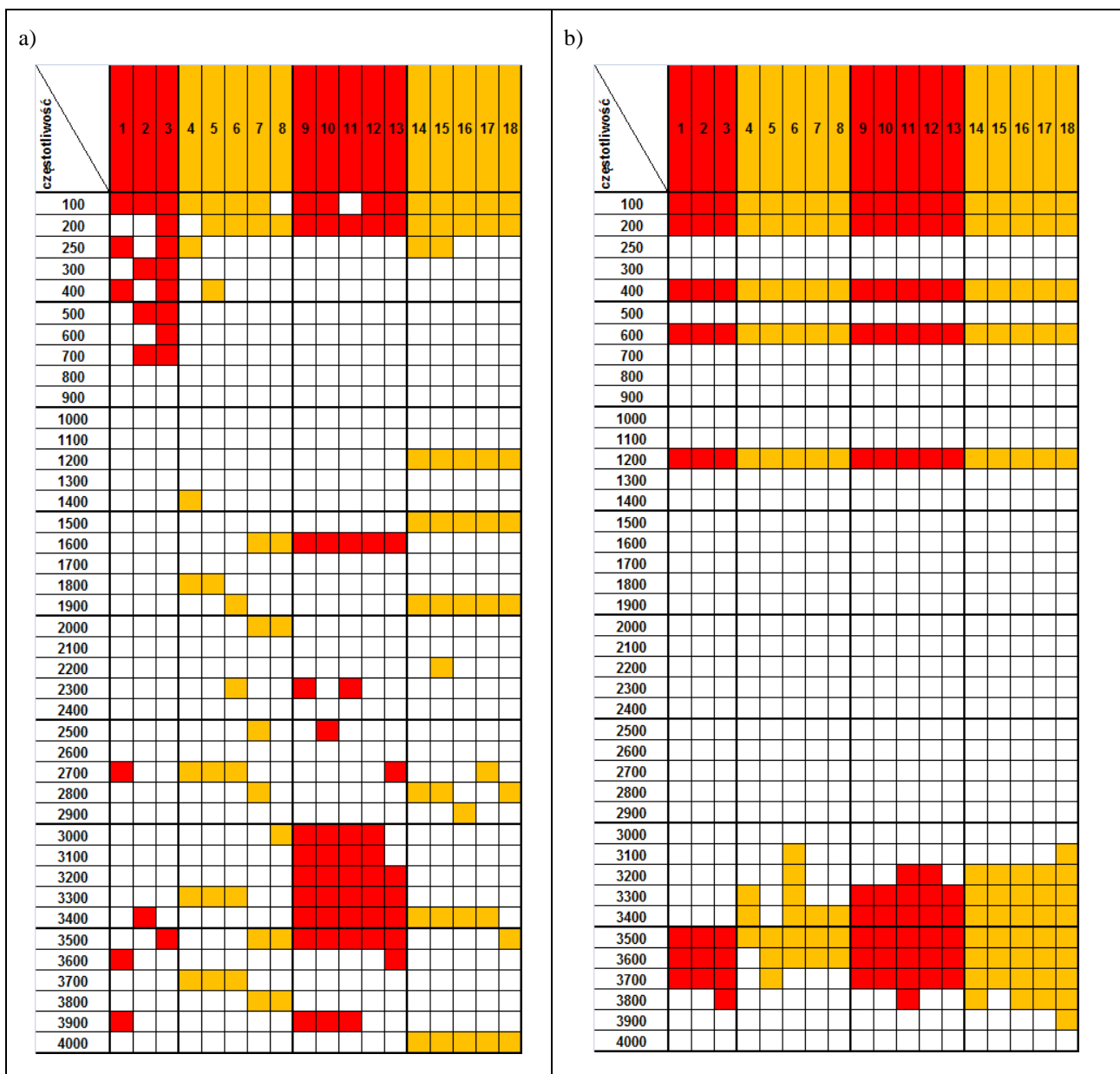
Rys. 8. Transformacja Fouriera, pomiar 8, stół  
Fig. 8. Fourier transformation, nr of measurement 8, the table



Rys. 9. Transformacja Fouriera, pomiar 8, głowica tnąca  
Fig. 9. Fourier transformation, nr of measurement 8, the cutter head

Dzięki temu określono występowanie zwiększonych amplitud na konkretnych częstotliwościach. Transformacja została wykonana dla przebiegów drgań stołu i głowicy tnącej. Na spektrogramie Gabora przedstawiono dodatkowo, na jakich częstotliwościach występowały zwiększone amplitudy drgań oraz jak rozkładały się one w czasie podczas cięcia próbek.

Powyżej przedstawiono przykłady spektrogramów Gabora oraz wykresy z transformacji Fouriera dla przykładowych przebiegów drgań stołu i głowicy tnącej dla wybranych ciętych próbek. Spektrogramy (rys. 2, 3, 6, 7) przedstawiają zwiększone amplitudy drgań dla różnych częstotliwości, wygenerowane w oparciu o paletę barw bazujących na odcieniach szarości. Zwiększenie amplitudy drgań jest zobrazowane przez czarny obszar znajdujący się na spektrogramie. Na spektrogramach znajduje się czerwona pionowa linia, która oznacza punkt, dla którego została wykonana transformacja Fouriera.



Rys. 10. Zestawienie zarejestrowanych zwiększonych amplitud drgań dla określonej częstotliwości a) stół maszyny, b) głowica tnąca

Fig. 10. Summary of registered increased vibration amplitudes for a given frequency a) the table, b) the cutter head

Na wykresach z transformacji Fouriera (rys. 4, 5, 8, 9) z prawej strony znajdują się kolejne kursory, które występują na wykresie, jako pionowe linie w kolorze żółtym. Kursory przedstawiają wartości częstotliwości wybranych amplitud drgań. Na podstawie analizy każdego ze spektrogramów Gabora dla wszystkich pomiarów przedstawiono zestawienie (rys. 10), w którym zaznaczono zaobserwowane zwiększone amplitudy drgań dla danej częstotliwości dla stołu (rys. 10a) i głowicy tnącej (rys. 10b).

### 5.1. WNIOSKI Z BADAŃ DRGAŃ STOŁU MASZYNY I GŁOWICY

Zwiększone amplitudy drgań głowicy tnącej, występują zawsze przy pięciu częstotliwościach, jest to około: 174 Hz, 376 Hz, 630 Hz, 1150 Hz i 3430 Hz. Dla głowicy tnącej można było zauważyć zwiększoną amplitudę dla częstotliwości 100 Hz, ale z powodu znacznie mniejszej amplitudy od pozostałych nie została ona zaznaczona na wykresach. Amplituda drgań o niewielkiej wartości na poziomie 100 Hz odpowiada pierwszej częstotliwości drgań własnych głowicy, która została ona wyznaczona w eksperymentalnych badaniach modalnych, których wyników nie ujęto w niniejszym opracowaniu.

Zwiększona amplituda drgań występuje na poziomie 173÷174 Hz dla głowicy tnącej oraz przy częstotliwości 172÷178 Hz dla stołu. Jest to częstotliwość pracy pompy wysokociśnieniowej napędzanej silnikiem asynchronicznym [6]. Występują też drgania głowicy tnącej przy częstotliwości 375÷378 Hz. Częstotliwości te występują w małym zakresie i występują tylko i wyłącznie na głowicy. Prawdopodobnie są to częstotliwości własne drgań głowicy tnącej.

Kolejne drgania pojawiają się w przedziale częstotliwości 625÷640 Hz. Wąski przedział częstotliwości i powtarzalność ich występowania w każdym pomiarze oraz brak występowania drgań stołu o zbliżonych częstotliwościach sugeruje, że drgania te mogą również odpowiadać częstotliwościom drgań własnych głowicy tnącej.

Głowica tnąca drga również w przedziale 1140÷1170 Hz. Podobne drgania pojawiają się także na stole, o nieco niższej częstotliwości, jest to przedział 1135÷1165 Hz. Występowanie tych drgań po stronie stołu i głowicy, pozwala na stwierdzenie, że jest to częstotliwość drgań własnych testowanych próbek wraz z mocowaniem.

Podobnie jest z zakresem częstotliwości drgań 3410÷3450 Hz, która występuje dla głowicy tnącej oraz w znacznie szerszym zakresie na stole (3300÷3900 Hz). Przypuszcza się, że także jest to kolejna częstotliwość drgań własnych próbek i mocowania lub jej harmoniczna, a występowanie tych częstotliwości w tak szerokim zakresie na stole jest spowodowane jego konstrukcją.

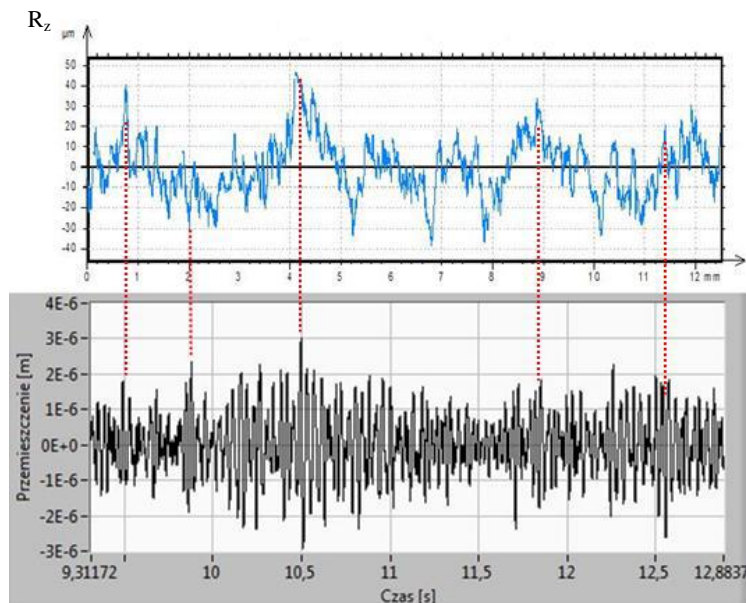
Częstotliwości, przy których występowały zwiększone amplitudy drgań dla stołu zmieniały się wraz ze zmianą próbki. Jest to bardzo dobrze widoczne na przykładzie próbki wykonanej ze stali węglowej o grubości 20 mm (pomiar 7÷11).

W przypadku stołu zwiększone amplitudy drgań, są znacznie zróżnicowane. Prawdopodobnie jest to spowodowane sposobem mocowania próbek oraz konstrukcją samego stołu, który został wykonany na potrzeby badań.

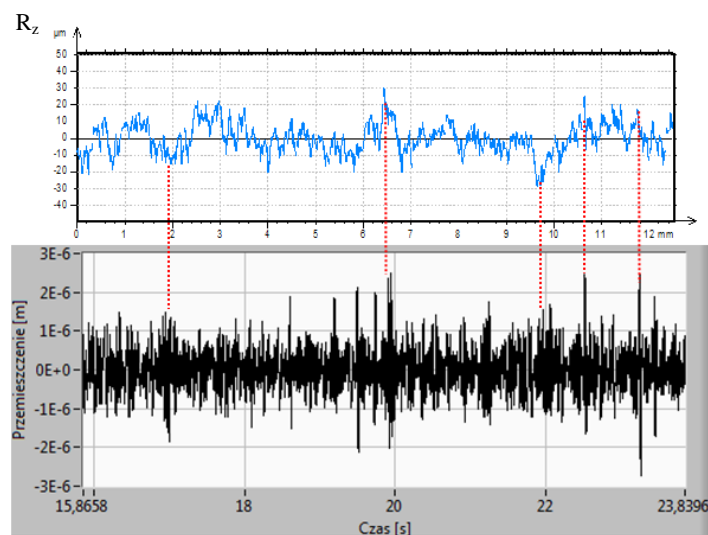


## 6. WYNIKI POMIARÓW DRGAŃ A PROFILE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

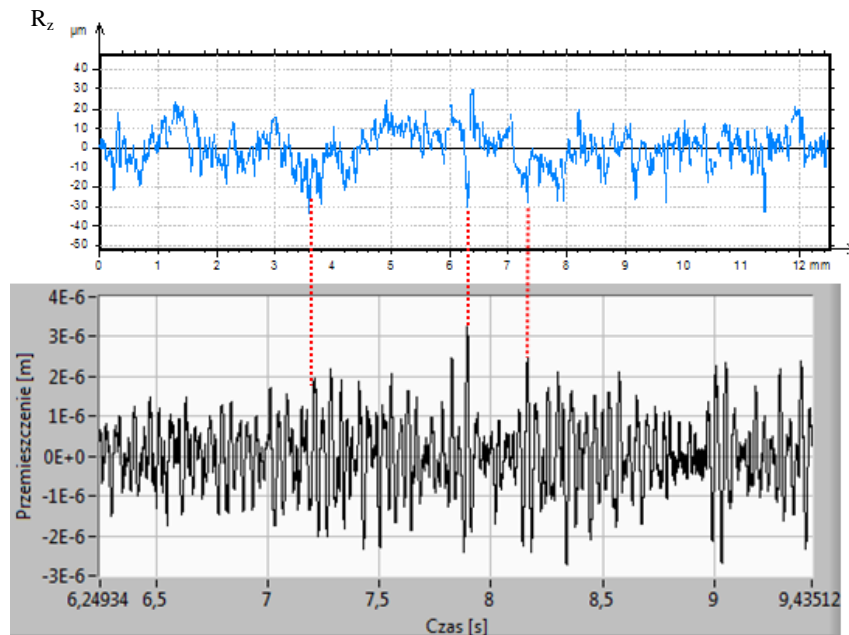
W celu wykazania bezpośredniego związku pomiędzy drganiami a jakością, opracowane podczas analizy dane pomiarowe zostały zestawione razem. Porównano przemieszczenia głowicy tnącej w formie przebiegów i zestawiono z zebranymi pomiarami chropowatości  $R_z$ . Porównania te wykonano dla każdej próbki i wybranego posuwu. Poniżej znajduje się zestawienie chropowatości i przemieszczeń głowicy (rys. 11,12,13,4).



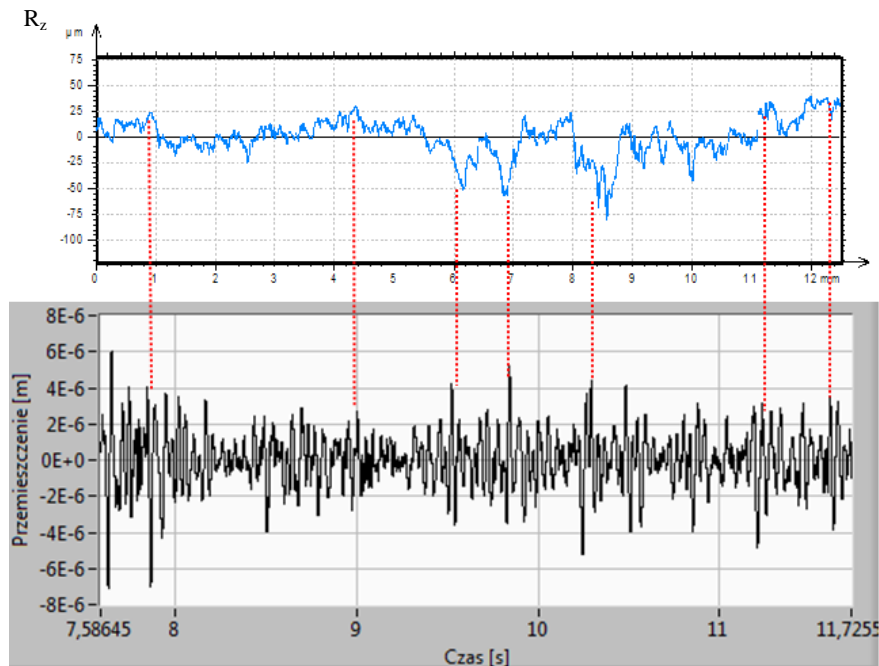
Rys. 11. Zestawienie chropowatości  $R_z$  z amplitudą przemieszczeń głowicy tnącej, próbka 1, posuw 217 mm/min  
 Fig. 11. The view of the roughness profile and displacement amplitudes of the cutter head, sample 1, the feed rate 217 mm/min



Rys. 12. Zestawienie chropowatości  $R_z$  z amplitudą przemieszczeń głowicy tnącej, próbka 2, posuw 96 mm/min  
 Fig. 12. The view of the roughness profile and displacement amplitudes of the cutter head, sample 2, the feed rate 96 mm/min



Rys. 13. Zestawienie chropowatości  $R_z$  z amplitudą przemieszczeń głowicy tnącej, próbka 3, posuw 246 mm/min  
Fig. 13. The view of the roughness profile and displacement amplitudes of the cutter head, sample 3, the feed rate 246 mm/min



Rys. 14. Zestawienie chropowatości  $R_z$  z amplitudą przemieszczeń głowicy tnącej, próbka 4, posuw 172 mm/min  
Fig. 14. The view of the roughness profile and displacement amplitudes of the cutter head, sample 4, the feed rate 172 mm/min

Pomiar chropowatości znajduje się na górnym wykresie, a amplituda przemieszczeń głowicy tnącej na dolnym. Czerwoną przerywaną linią zaznaczone są punkty, w których zmiana wysokości chropowatości związana jest z zarejestrowaną zwiększoną amplitudą przemieszczeń głowicy tnącej.

Z powodu, że pomiary chropowatości realizowane były na odcinku elementarnym o długości 12,5 mm i za każdym razem były wykonywane na środku próbki, możliwe było określenie, na podstawie prędkości posuwu, w której chwili próby cięcia był analizowany odcinek. Z przebiegów amplitud przemieszczeń głowicy tnącej zostały wyznaczone odcinki, w których przebiegał proces cięcia próbki na długości 12,5 mm. Podczas wyznaczania chropowatości realizowane były trzy pomiary. Jako najbardziej miarodajny określa się pomiar realizowany na górnej powierzchni (najbliżej głowicy tnącej). Powierzchnia ta została oznaczona kolorem zielonym na rysunku 15.



Rys. 15. Istota pomiaru profilu wysokości chropowatości  $R_z$   
 Fig. 15. The essence of measuring of the roughness profile  $R_z$

Na podstawie przedstawionego zestawienia profilu wysokości chropowatości  $R_z$  i charakterystyki przebiegu przemieszczeń głowicy tnącej w czasie, można zaobserwować, że występuje ścisła zależność pomiędzy przemieszczeniami głowicy a chropowatością powierzchni przecięcia przedmiotu. Przedstawione zestawienie dotyczy chropowatości powierzchni cięcia zmierzonej w górnej części strefy cięcia. Wyznaczone dla tej strefy cięcia zmiany wysokości chropowatości  $R_z$  najbliższe odpowiadały chwilowym zmianom wartości amplitud przemieszczeń w danym punkcie.

## 7. PODSUMOWANIE BADAŃ

Przeprowadzone badania drgań głowicy tnącej oraz stołu, jednoznacznie potwierdzają wyniki wcześniejszych badań poświęconych tej tematyce [5],[6]. Podczas każdej próby występowały drgania o częstotliwościach około 100 Hz oraz 200 Hz. Drgania o częstotliwości 100 Hz, odpowiadają pierwszej częstotliwości drgań własnych głowicy tnącej. Natomiast drgania o częstotliwości około 200 Hz pochodzą z pompy wysokociśnieniowej, a konkretnie jest to częstotliwość pracy tej pompy, która wynika z jej konstrukcji [6].

Analiza sygnałów w dziedzinie częstotliwości oraz ich wizualizacja na spektrogramach Gabora, potwierdza wcześniejsze spostrzeżenia, że częstotliwości

na poziomie 1150 Hz oraz 3430 Hz odpowiadają częstotliwościom drgań własnych próbek oraz mocowania. Zwiększone amplitudy widoczne są na każdym wykresie z tym, że raz są bardziej zauważalne na wykresach drgań głowicy tnącej, a raz na wykresach drgań stołu. Na głowicy tnącej występują zwiększone amplitudy drgania na poziomie 376 Hz i 630 Hz. Drgania na poziomie około 630 Hz prawdopodobnie odpowiadają kolejnym częstotliwościom drgań własnych głowicy, ale należałoby ten fakt jeszcze dodatkowo zbadać. Na głowicy występują bardzo wyraźnie drgania przy częstotliwości około 376 Hz. Jest to najprawdopodobniej kolejna częstotliwość własna, ale obecnie nie można jednoznacznie tego potwierdzić.

Analiza zarejestrowanych drgań przedmiotu oraz głowicy tnącej pod kątem amplitud przemieszczeń wykazała istotny ich wpływ na jakość obrabianej powierzchni. Podczas analizy drgań w czasie odpowiadającym czasowi pomiaru chropowatości na długości 12,5 mm, zidentyfikowano amplitudy w chwilach, które bezpośrednio odpowiadają zmianom wysokości wyznaczonego profilu chropowatości.

#### LITERATURA

- [1] ŻÓLTOWSKI B., 1996, *Podstawy diagnostyki maszyn*, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz.
- [2] HLOCH S., PERZEL V., HREHA P., TOZAN H., VALICEK J., 2011, *Vibration as a Source of Information for Abrasive Waterjet Monitoring*, Journal of Naval Science and Engineering, 7/1, 71-85.
- [3] MONNO M., RAVASIO C., 2005, *The Effect of Cutting Head Vibrations on The Surfaces Generated by Waterjet Cutting*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45/3, 355-363.
- [4] HREHA P., RADVANSKA A., HLOCH S., PERZEL V., KRÓLCZYK G., MONKOVA K., 2015, *Determination of Vibration Frequency Depending on Abrasive Mass Flow Rate During Abrasive Water Jet Cutting*, Int J Adv Manuf Technol, 77, 763-774.
- [5] WALA T., LIS K., 2015, *Badanie oddziaływań siłowych podczas cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną*, Mechanik, 9.
- [6] WALA T., LIS K., 2014, *Analiza wpływu procesu obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na drgania maszyny*, Inżynieria Maszyn, 19/1.

#### THE ANALYSIS OF VIBRATIONS IN TERMS RECEIVED ROUGHNESS SURFACE DURING THE ABRASIVE WATERJET CUTTING

Article undertakes discussion about the impact of vibrations occurring during the abrasive waterjet machining on the surface roughness of the workpiece. The quality of the machined surface depends mainly on factors arising from the cutting process parameters, however, the presented experimental studies also show that the size of the frequency of oscillation also directly affect on the roughness machined surface.

Keywords: *abrasive waterjet cutting, vibrations, the roughness measurement*