

Łukasz Żyłka, dr inż.

Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa,  
Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji,  
e-mail: [zylka@prz.edu.pl](mailto:zylka@prz.edu.pl)

Marcin Płodzień, mgr inż.

Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa,  
Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji,  
e-mail: [plodzien@prz.edu.pl](mailto:plodzien@prz.edu.pl)

## STABILNOŚĆ 5-OSIOWEGO FREZOWANIA STOPÓW ALUMINIUM

### Streszczenie

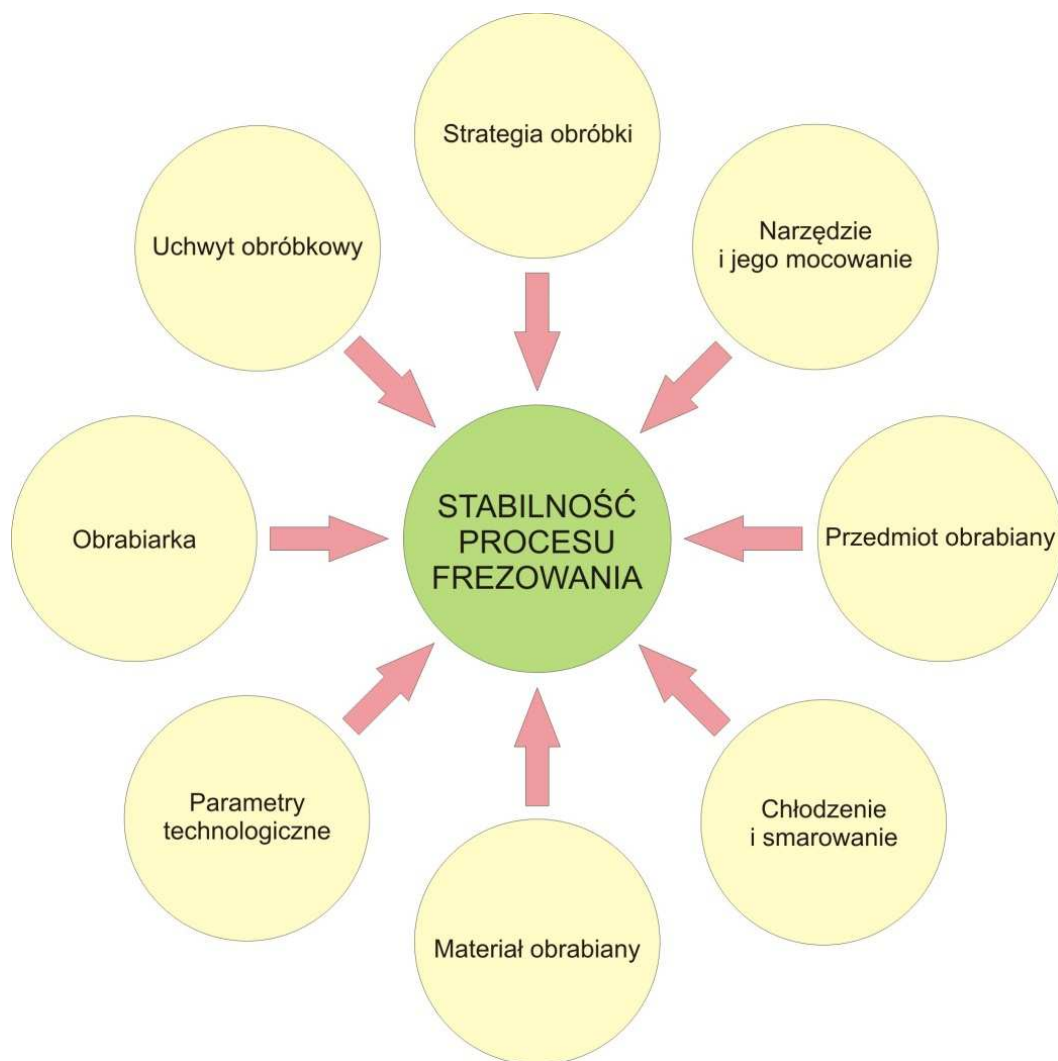
W artykule przedstawiono analizę stabilności procesu 5-osioowego frezowania stopu aluminium na przykładzie obróbki wirnika. Przeanalizowano sztywność narzędzia oraz pióra wirnika w celu określenia częstotliwości drgań własnych. Wyznaczono krzywą workową dla badanego procesu frezowania z wykorzystaniem programu ShopPro oraz przeprowadzono badania doświadczalne frezowania wirnika z jednoczesną rejestracją drgań.

### 1. Wprowadzenie

Z uwagi na dążenie do obniżenia masy wytwarzanych wyrobów, w przemyśle maszynowym powszechnie stosuje się stopy aluminium [1]. Dotyczy to zwłaszcza przemysłu lotniczego oraz motoryzacyjnego, gdzie masa wytwarzanych części w dużym stopniu decyduje o efektach ekonomicznych eksploatacji. Lotnicze części aluminiowe o złożonych kształtach wytwarza się zazwyczaj w procesie 5-osioowego frezowania [4, 5, 6]. Ze względu na wysokie wymagania jakościowe stawiane wobec powierzchni przedmiotów po obróbce istotne jest takie zaprojektowanie procesu obróbki, aby uzyskać wymaganą stereometrię powierzchni [1, 2].

Podczas procesu frezowania mogą powstawać okresowe nierówności powierzchni, które są wynikiem drgań pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym. Skutkuje to znacznym i zazwyczaj nieakceptowalnym pogorszeniem jakości powierzchni oraz przyspieszonym zużyciem narzędzia. Powstawanie drgań w procesie frezowania może również powodować ograniczenie w wydajności obróbki. Z uwagi na powyższe istotnym zagadnieniem jest określenie warunków procesu frezowania zapewniających stabilny przebieg obróbki i uniknięcie drgań [2]. Do tego celu można wykorzystać specjalistyczne oprogramowanie ShopPro, za pomocą którego określić można parametry technologiczne warunkujące stabilny przebieg obróbki.

Na stabilność procesu frezowania ma wpływ wiele czynników, które zostały przedstawione na rys. 1. Do najważniejszych z nich zalicza się sztywność narzędzia obróbkowego, sztywność obrabiarki oraz wartości parametrów technologicznych takich jak prędkość skrawania, prędkość posuwu oraz wartości dosuwu osiowego i promieniowego [3].



Rys. 1. Czynniki wpływające na stabilność procesu frezowania.

## 2. Wyznaczenie obszaru stabilności procesu frezowania

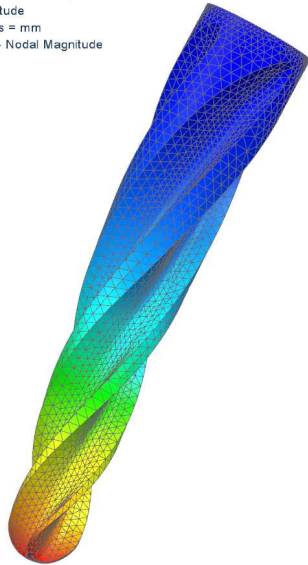
W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę sztywności narzędzia obróbkowego oraz pióra wirnika w celu określenia częstotliwości ich drgań własnych. W tym celu oddzielnie dla pióra i narzędzia obróbkowego przeprowadzono w oprogramowaniu NX 8.0 analizę modalną. Następnie sprawdzono, czy wyznaczone częstotliwości będą miały wpływ na powstawanie drgań podczas procesu frezowania frezem czterostrzowym. Po przeprowadzeniu obliczeń metodą elementów skończonych MES otrzymano częstotliwości drgań własnych dla pióra wirnika na poziomie ok. 9 kHz, natomiast dla frezu stożkowego ok. 5,6 kHz. Na rys. 2a przedstawiono kierunki odkształceń natomiast na rys. 2b rozkład naprężeń pióra wirnika oraz frezu dla wyznaczonych częstotliwości drgań własnych. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że obliczone częstotliwości drgań własnych narzędzia oraz pióra wirnika nie pokrywają się z częstotliwościami ruchu obrotowego wrzeciona.

Jednakże w procesie frezowania występują drgania o różnej amplitudzie oraz różnych częstotliwościach nie tylko związanych z częstotliwościami drgań własnych elementów składowych procesu skrawania. Mnogość częstotliwości drgań występujących w procesie frezowania może powodować powstawanie drgań

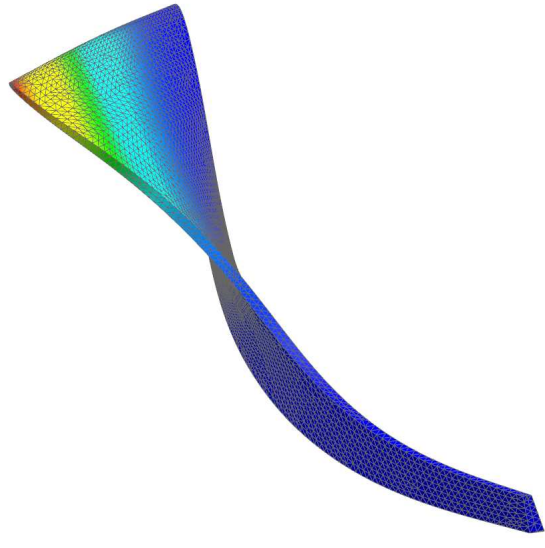
samowzbudnych w układzie OUPN. W związku z tym konieczne jest określenie zakresu parametrów technologicznych, dla których proces obróbki będzie przebiegał w warunkach stabilnych (bez występowania drgań samowzbudnych).

a)

model2\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Eigenvalue Method 1, Mode 1, 5.604e+003 Hz  
Displacement - Nodal Magnitude  
Min : 0.00, Max : 22.47, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

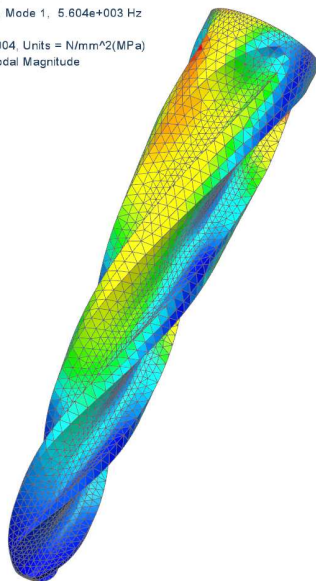


wirnik\_0.5\_MES\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Eigenvalue Method 1, Mode 1, 8.922e+003 Hz  
Displacement - Nodal Magnitude  
Min : 0.00, Max : 134.02, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

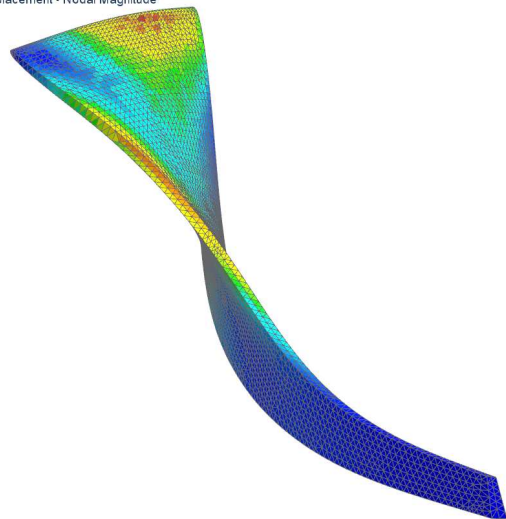


b)

model2\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Eigenvalue Method 1, Mode 1, 5.604e+003 Hz  
Stress - Elemental, Von-Mises  
Min : 1.15E+001, Max : 5.05E+004, Units = N/mm^2(MPa)  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

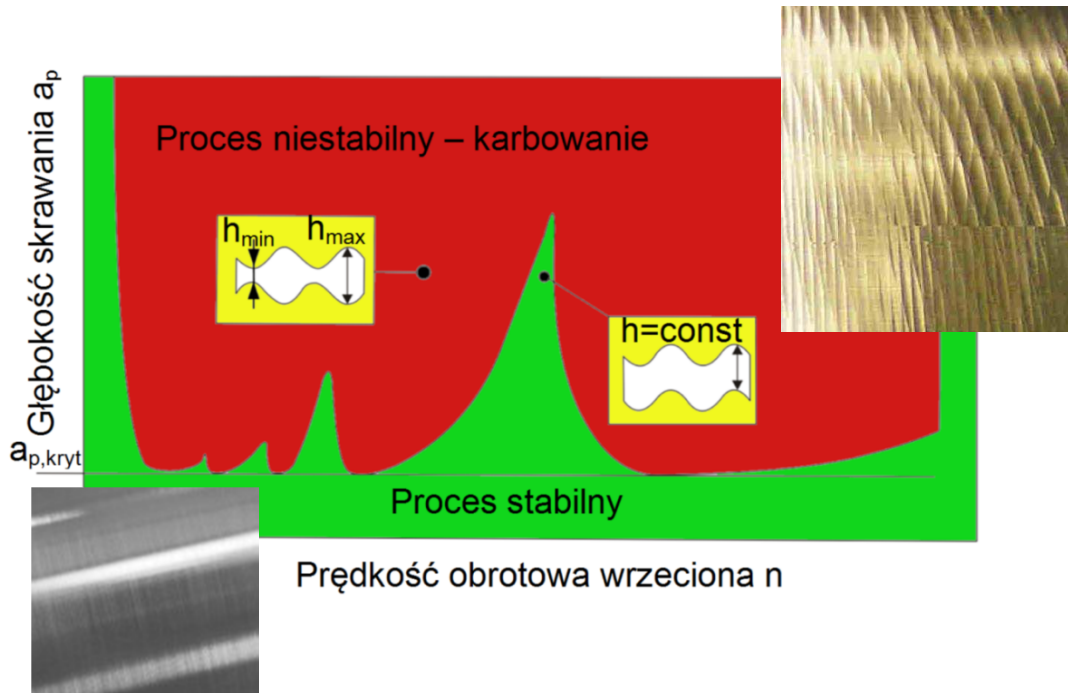


wirnik\_0.5\_MES\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Eigenvalue Method 1, Mode 1, 8.922e+003 Hz  
Stress - Elemental, Von-Mises  
Min : 1.14E+000, Max : 5.51E+004, Units = N/mm^2(MPa)  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Rys. 2. Wyniki analizy MES: a) odkształceń narzędzia i pióra wirnika, b) naprężeń.

Jednym ze sposobów określania stabilności procesu frezowania jest wyznaczenie krzywej workowej dla ustalonych warunków obróbki (materiału obrabianego, narzędzia, obrabiarki). Przykład krzywej workowej przedstawiono na rys. 3.

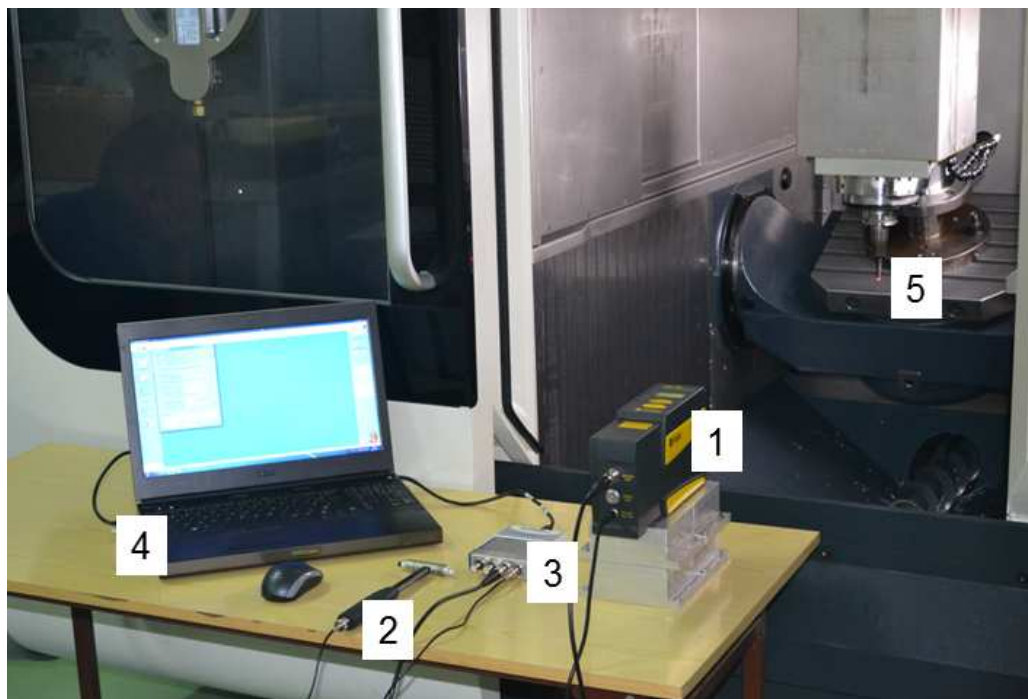


Rys. 3. Krzywa workowa.

Krzywa workowa przedstawia zależność prędkości obrotowej  $n$  w funkcji głębokości skrawania  $a_p$ , w której określone są obszary stabilne i niestabilne procesu frezowania [1, 4]. Specyfika procesu frezowania polegająca na przerywanej pracy ostrza, powoduje odchylenie się narzędzia od przedmiotu obrabianego. W wyniku tego na powierzchni obrabianej kształtuje się falista struktura po przejściu ostrza frezu. Jeśli częstotliwość wchodzenia ostrza nie jest równa częstotliwości drgań pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym, to wynikiem tego będzie przesunięcie fazowe między kolejnymi ostrzami narzędzia. W wyniku takiej sytuacji mocno zmieniająca się wartość szerokości warstwy skrawanej  $h$ , będzie prowadzić do zmiennych sił skrawania, które w konsekwencji doprowadzą do powstawania efektów regresyjnych [7]. W obszarze stabilnym częstotliwość wchodzenia jest równa częstotliwości drgań pomiędzy narzędziem a przedmiotem, co prowadzi do utrzymania szerokości warstwy skrawanej  $h$  w kolejnych wejściach ostrza narzędzia. Graniczna głębokość skrawania  $a_{p,kryt}$  jest to głębokość, przy której możliwe jest nastawienie wszystkich prędkości obrotowych w rozpatrywanym układzie [1].

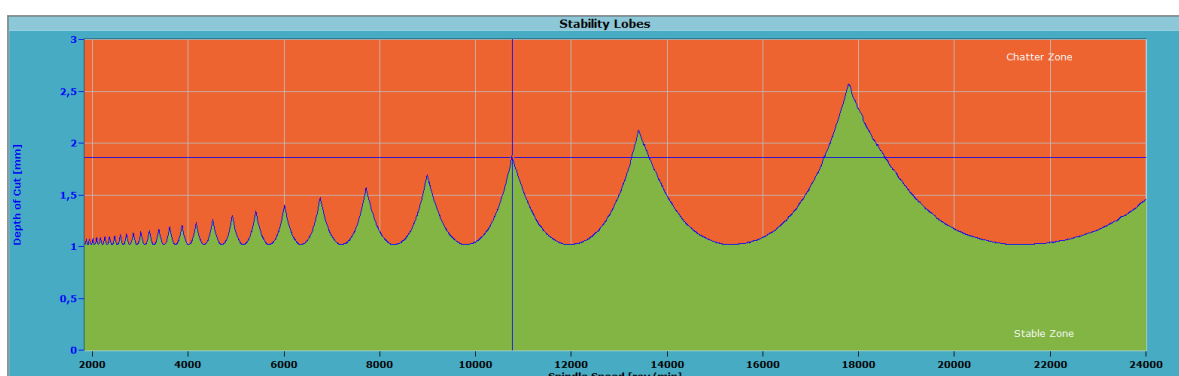
### 3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze zostało zbudowane w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatykacji Politechniki Rzeszowskiej na bazie 5-osiowego centrum obróbkowego HSC55 firmy DMG. Obrabiarka została wyposażona w aparaturę do pomiaru drgań podczas obróbki oraz aparaturę do wyznaczania obszaru stabilności procesu frezowania. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Stanowisko badawcze: 1 – wibrometr laserowy PDV-100 firmy Polytec, 2 – wzbudnik drgań PBC 086C02, 3 – przetwornik A/D NI 9233, 4 – komputer PC, 5 – frez stożkowy.

Stabilność procesu frezowania została określona za pomocą programu ShopPro z zastosowaniem aparatury przedstawionej na rys. 4. Z uwagi na małą średnicę narzędzia obróbkowego, drgania po wzbudzeniu wzbudnikiem były rejestrowane bezstykowo za pomocą wibrometru laserowego. Na podstawie tych danych wyznaczona została krzywa workowa charakteryzująca proces frezowania z zastosowaniem wybranej obrabiarki, narzędzia oraz materiału obrabianego. Na rys. 5 przedstawiono wynik obliczeń z programu ShopPro.



Rys. 5. Krzywa workowa charakteryzująca proces frezowania.

Program ShopPro umożliwia wyznaczenie obszaru stabilności procesu frezowania bez uwzględnienia zmiany strefy styku narzędzia z przedmiotem obrabianym, jaki ma miejsce w przypadku obróbki 5-osiowej. Dlatego też biorąc powyższe pod uwagę podjęto próbę zweryfikowania wyników obliczeń

przeprowadzonych za pomocą programu ShopPro z poziomem rzeczywistych drgań występujących podczas 5-osiowego frezowania. Bazując na opracowaniu [4] można przypuszczać, że wyznaczona krzywa workowa nie będzie znacznie odbiegać od rzeczywistych warunków obróbki.

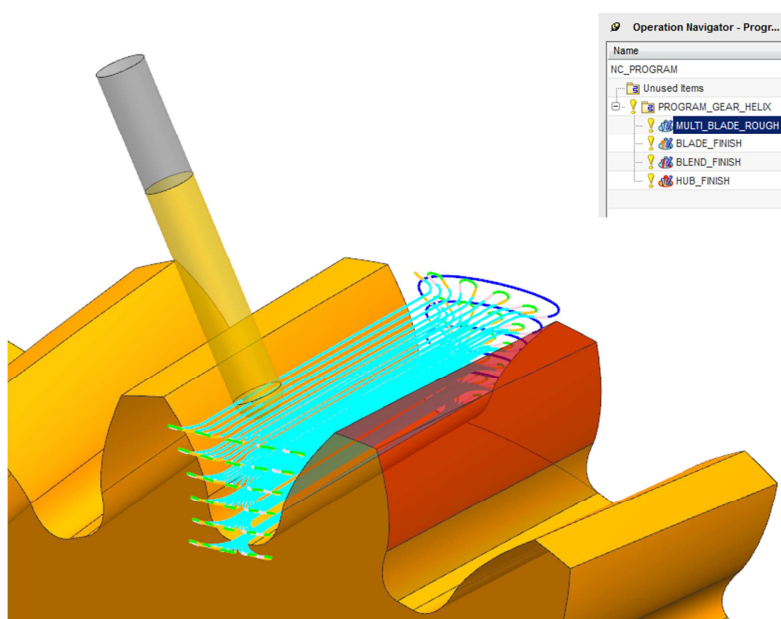
Pomiar drgań realizowany był za pomocą jednokierunkowego czujnika drgań firmy PCB typ 353B03 o czułości pomiarowej 10mV/g i zakresie częstotliwości od 0 do 7 kHz.

#### 4. Programowanie obróbki 5-osiowej

Technologię 5-osiowego frezowania stosuje się w produkcji złożonych części przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego, biomedycznego i produkcji form. Głównymi zaletami obróbki 5-osiowej jest zmniejszenie czasów pomocniczych związanych z koniecznością przemocowywania przedmiotu obrabianego, które niezbędne jest w obróbce 3-osiowej. Kształtowanie wieloosiowe wpływa na polepszenie dokładności wymiarowo-kształtowej i jakości powierzchni po obróbce, co wynika m.in. z możliwości zmniejszenia wysięgu narzędzia z oprawki narzędziowej [5, 6].

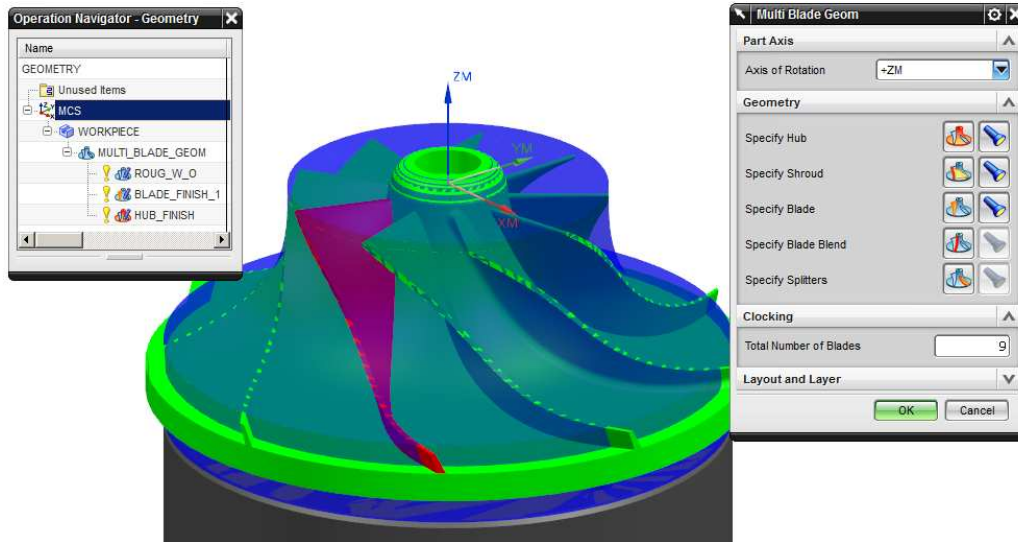
Proces i program obróbkowy wyrobów o swobodnych kształtach, do których można zaliczyć pióro łopatk, wirnik sprężarki, gniazdo matrycy formy wtryskowej, wytwarza się z użyciem systemów komputerowego wspomaganie wytwarzania CAM (ang. Computer Aided Manufacturing).

W niniejszej pracy posłużono się system SIEMENS NX w wersji 8.0 wyposażonym w moduły CAD/CAM/CAE/CMM pozwalające na realizację różnorodnych zadań inżynierskich. Za pomocą oprogramowania NX 8.0 opracowany został proces obróbkowy wyrobu typu wirnik przy użyciu dostępnych operacji obróbkowych dedykowanych do tego typu przedmiotów. Oprócz tego że istnieje możliwość obróbki części typu wirnik, w/w moduł można wykorzystać do programowania obróbki uzębień kół walcowych oraz stożkowych, o prostej, śrubowej czy łukowej linii zęba. Na rys. 6 przedstawiono operację zgrubną obróbki koła zębatego o śrubowej linii zęba.



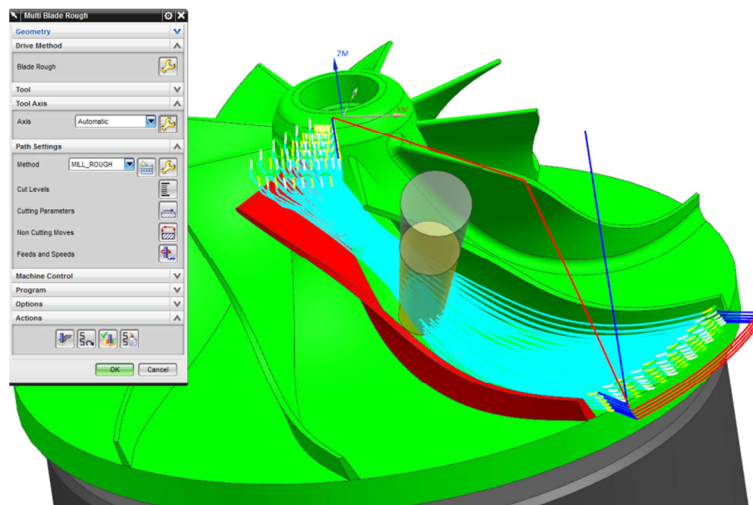
Rys. 6. Obróbka zgrubna wrębu zęba koła śrubowego przy użyciu modułu do wirników w systemie NX 8.0.

W pierwszym etapie procesu obróbkowego definiuje się układ obróbkowy oraz geometrię, która będzie brana pod uwagę podczas generowania ścieżek narzędzia. Na rys. 7 pokazano geometrię półfabrykatu i model nominalny części oraz ustawienie układu obróbkowego MCS (ang. Machine Coordinate System). W skład geometrii części wchodzi powierzchnie, które odnoszą się do typowej geometrii wirnika takie jak: powierzchnie pióra wirnika, powierzchnie dna, promieni przejściowych itd.



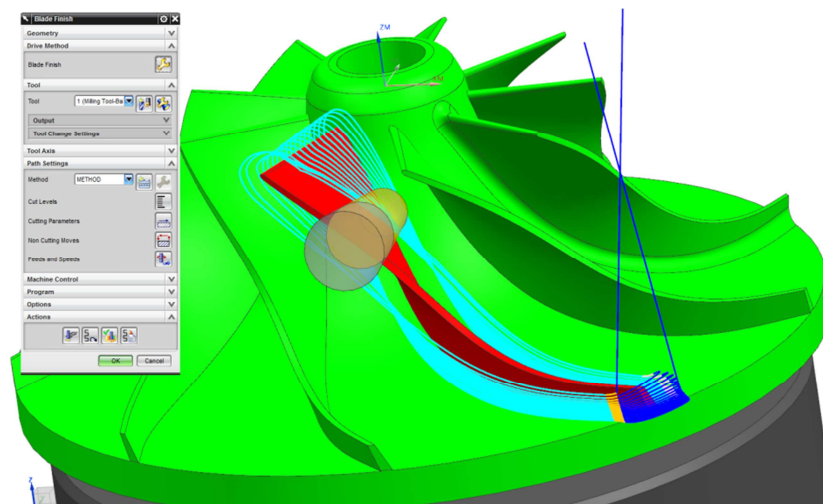
Rys. 7. Definicja półfabrykatu i geometrii wirnika.

Kolejnym etapem przy projektowaniu procesu obróbkowego było zdefiniowanie narzędzia obróbkowego (frez stożkowy) oraz wybranie odpowiedniej operacji do realizacji zadania obróbkowego. W pracy wykonano obróbkę zgrubną wrębu między łopatkowego oraz obróbkę wykończeniową łopatki wirnika. Na rys. 8 i 9 pokazano wygenerowane ścieżki narzędzia dla obróbki zgrubnej i wykończeniowej wirnika wraz z kartami ustawienia operacji.



Rys. 8. Ścieżki narzędzia wygenerowane w operacji obróbki zgrubnej wirnika.

Po przygotowaniu programów obróbkowych w systemie NX w postaci danych pośrednich, przeprowadzono proces postprocessingu w celu uzyskania kodu obróbkowego w standardzie ISO, dla sterowania Sinumerik 840D, którego użyto do wykonania modelu rzeczywistego. Na rys. 10 pokazano fragment kodu obróbkowego użytego do wykonania obróbki zgrubnej wrębu wirnika.



Rys. 9. Ścieżki narzędzia wygenerowane w operacji obróbki wykończeniowej wirnika.

Wygenerowany fragment kodu składa się z dodatkowych słów dedykowanych dla sterowania Sinumerik 840D, do których zaliczamy słowa orientacji układu obróbkowego i osi (**ORIWSK**, **ORIAxes**). Dodatkowo użyto funkcji TRAORI, nadążania osi sterowanych za punktem charakterystycznym narzędzia oraz cyklu 832, realizującego dodatkowe obliczenia wygładzania ścieżki narzędzia, co umożliwia płynniejszą pracę narzędzia na maszynie.

```
N420 ;Initial Move
N450 G54
N460 ;
N470 ORIWKS
N480 ORIAxes
N490 GO A-12.86152 C230.57742
CYCLE832(_camtolerance,112103)
TRAORI
N500 GO X44.01221 Y-34.98464 Z55. S8000 D1 M3
N510 ;Approach Move
N520 X44.05806 Y-35.23548 Z13.25008
N530 X38.70626 Y-30.95538 Z13.25008
N540 ;Engage Move
N550 G1 X38.21914 Y-30.89873 Z13.06852 M8 F2000.
N560 X37.70694 Y-30.85201 Z12.97402
N570 X37.18523 Y-30.81665 Z12.96947
N580 ;Cutting
N590 X37.12002 Y-30.81298 Z12.97456 A-12.84915 C230.5313
N600 X36.98937 Y-30.80548 Z12.98477 A-12.82837 C230.43865
N610 X36.85858 Y-30.79796 Z12.99498 A-12.80758 C230.34551
N620 X36.79307 Y-30.79414 Z13.0001 A-12.79878 C230.29873
N630 X36.72746 Y-30.79026 Z13.00524 A-12.79151 C230.25179
N640 X36.59613 Y-30.78248 Z13.01553 A-12.77696 C230.15754
N650 X36.46456 Y-30.77462 Z13.02584 A-12.76446 C230.06274
N660 X36.33267 Y-30.76662 Z13.03623 A-12.75616 C229.96731
N670 X36.26667 Y-30.7626 Z13.04142 A-12.75201 C229.91941
N680 X36.23365 Y-30.7606 Z13.04401 A-12.74993 C229.89541
```

Rys. 10. Fragment programu obróbkowego na sterowanie Sinumerik 840D.

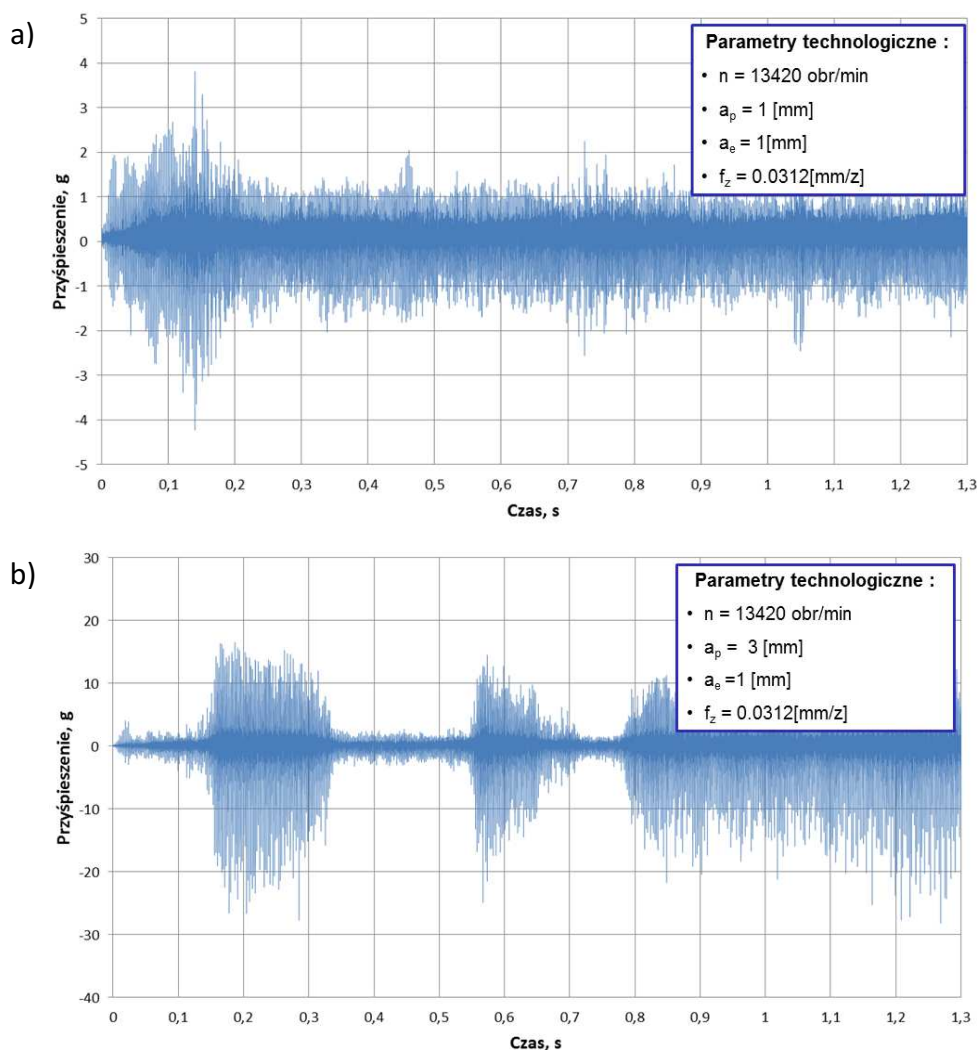


## 5. Analiza wyników badań doświadczalnych

Badania doświadczalne prowadzono podczas frezowania 5-osiowego wirnika. Warunki prowadzonych badań były następujące:

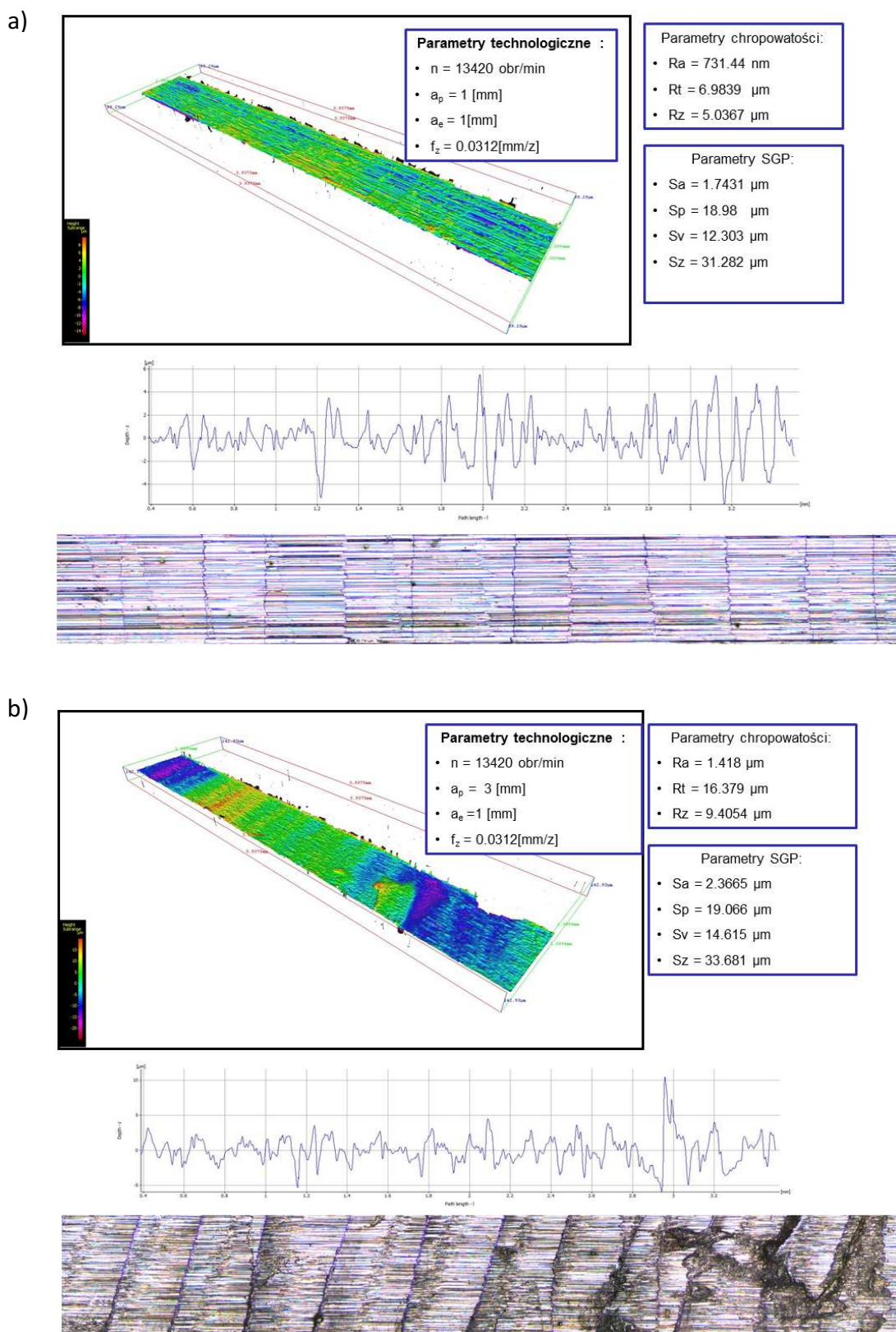
- narzędzie: frez stożkowy fi 6 firmy Sandvik Coromant,
- materiał obrabiany: AlMgSi0.5,
- obrabiarka: DMG HSC 55 linear,
- parametry technologiczne:
  - posuw na ostrze  $f_z = 0.0312$  mm/z,
  - szerokość skrawania  $a_e = 1$  mm,
  - głębokość skrawania i prędkość skrawania dobrane zostały z krzywej workowej dla warunków stabilnych i niestabilnych.

Przeprowadzono obróbkę pióra wirnika z parametrami technologicznymi odpowiadającymi zakresowi stabilnemu oraz z parametrami technologicznymi z zakresu wskazującego na powstawanie drgań. Jednocześnie rejestrowano drgania podczas obróbki w celu weryfikacji krzywej workowej w procesie frezowania 5-osiowego. Na rys. 11 przedstawiono porównanie drgań zarejestrowanych podczas stabilnej i niestabilnej obróbki.



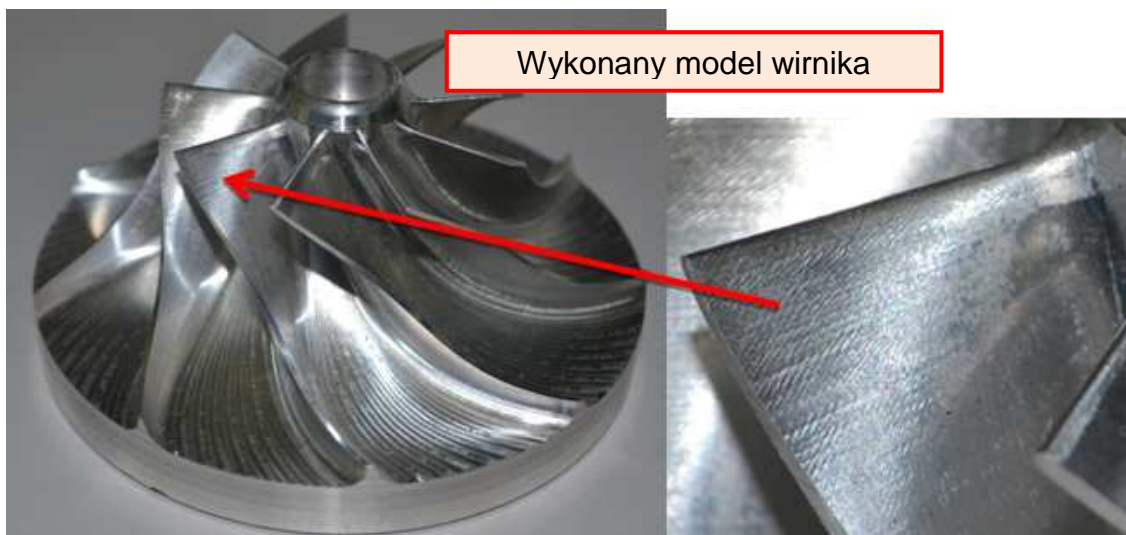
Rys. 11. Poziom drgań podczas obróbki: a) w warunkach stabilnych, b) niestabilnych.

Z przedstawionych przebiegów wynika, że w warunkach niestabilnych dochodzi do prawie 5-krotnego zwiększenia amplitudy drgań. Ma to bezpośrednie przełożenie na jakość powierzchni po obróbce, co przedstawia rys. 12.



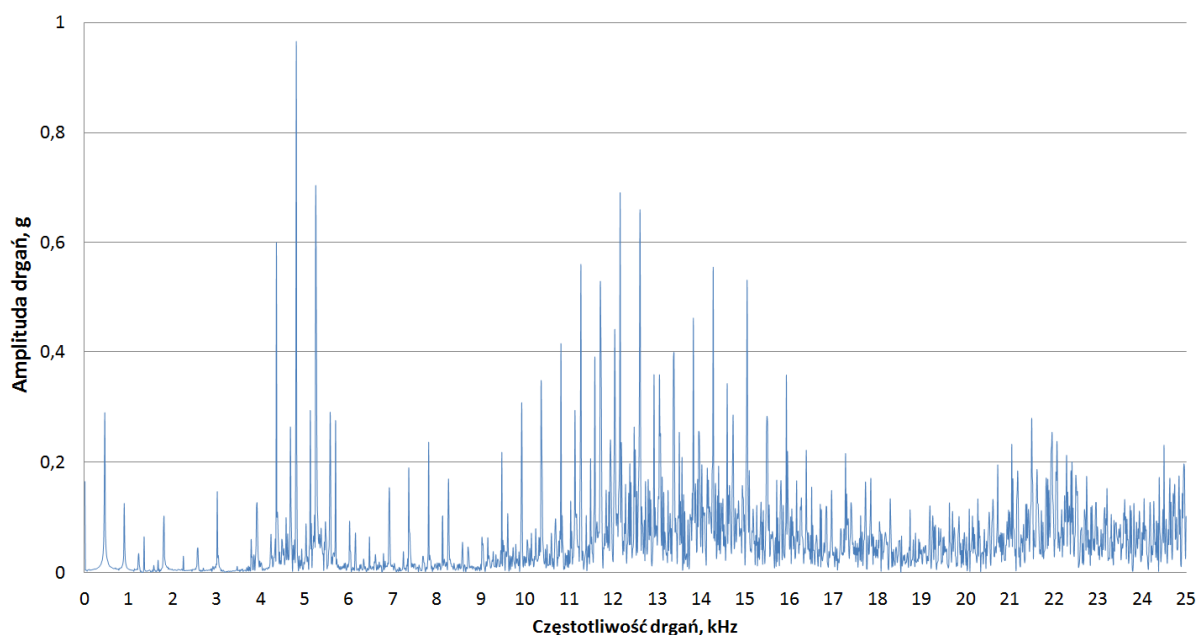
Rys. 12. Jakość powierzchni po obróbce: a) w warunkach stabilnych, b) niestabilnych.

Badania powierzchni zostały przeprowadzone z zastosowaniem mikroskopu optycznego 3D światła białego Alicona. Z przeprowadzonych badań wynika, że powstawanie drgań w procesie frezowania wpływa znacząco na jakość powierzchni, powodując ok. dwukrotne pogorszenie parametrów SGP. Potwierdzeniem tego jest widok powierzchni pióra wirnika z widocznymi śladami drgań.



Rys. 13. Wykonany wirnik z widocznymi drganiami na powierzchni łopatki.

Przyczyną znacznego zwiększenia amplitudy drgań jest pokrywanie się częstotliwości drgań własnych narzędzia określonych za pomocą analizy MES (rys. 2) z częstotliwością drgań mierzonych podczas obróbki. Potwierdzeniem tego jest rozkład widmowy zarejestrowanych drgań, gdzie dominująca częstotliwość jest zbliżona do częstotliwości drgań własnych narzędzia i wynosi ok. 5 kHz.



Rys. 14. Rozkład widmowy drgań.

## 6. Wnioski

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych można wywnioskować, że:

- obszary stabilności wyznaczone za pomocą oprogramowania ShopPro sprawdzają się tylko w wybranym zakresie prędkości obrotowych dla frezów stożkowych,
- w zakresie niskich prędkości obrotowych układ OUPN jest stabilniejszy niż wynikałoby to z krzywej workowej, brak jest korelacji krzywej workowej z rzeczywistą stabilnością frezowania,
- w zakresie wysokich prędkości obrotowych krzywa workowa znacznie lepiej odzwierciedla rzeczywisty proces skrawania, a obszar występowania drgań określony za pomocą krzywej workowej pokrywa się z drganiami występującymi podczas procesu frezowania,
- w przypadku frezowania 5-osioвого krzywa workowa wygenerowana za pomocą oprogramowania ShopPro nie odzwierciedla rzeczywistych obszarów stabilności, co może być spowodowane zmianą strefy styku narzędzia z przedmiotem obrabianym, a więc miejsca przyłożenia wypadkowej siły skrawania.

## 7. Literatura

- [1] Burek J., Płodzień M.: Wysoko wydajna obróbka części ze stopów aluminium o złożonych kształtach. *Mechanik* nr 7/2012.
- [2] Burek J., Ostrowski R., Szular A.: Cutter rotational speed optimization in high performance cutting of aluminum alloys. *Międzynarodowa Konferencja Naukowa Budowa Maszyn i Technosfera XXI wieku. Doniecki Narodowy Uniwersytet Techniczny 2009*, 54 ÷ 58.
- [3] Burek J., Ostrowski R., Szular A.: High performance cutting of aluminum alloys. *Międzynarodowa Konferencja Naukowa Budowa Maszyn i Technosfera XXI wieku. Doniecki Narodowy Uniwersytet Techniczny 2009*, 49 ÷ 53.
- [4] Ozturk E., Ozlu E., Budak E.: Modeling Dynamics and Stability of 5-axis Milling Processes, 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Calabria, Italy 2007.
- [5] Zhu, R., Kapoor, S. G., DeVor, R. E., 2001, Mechanistic Modeling of the Ball End Milling Process for Multi-axis Machining of Free-form Surfaces, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 123, 369-379.
- [6] Larue, A., Altintas, Y., 2005, Simulation of Flank Milling Processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 549-559.
- [7] Altintas, Y., Shamoto, E., Lee, P., Budak, E., 1999, Analytical Prediction of Stability Lobes in Ball End Milling, *Transactions of ASME*, Vol. 121, pp 586-592.