



## Szlifowanie stopów tytanu na szlifierce kłowej do wałków

### Grinding of titanium alloys on cylindrical grinding machine

PAWEŁ LAJMERT  
DARIUSZ OSTROWSKI  
MAŁGORZATA SIKORA  
BOGDAN KRUSZYŃSKI\*

W procesie szlifowania stopów tytanu na parametry wynikowe obróbki ma wpływ szereg czynników związanych z zastosowaną ściernicą oraz wyborem właściwych parametrów kinematycznych szlifowania. Z powodu specyficznych właściwości stopów tytanu siła szlifowania może osiągać duże wartości, co może powodować powstawanie drgań samowzbudnych, czy też uszkodzenia cieplne obrabianego przedmiotu. W artykule przedstawiono wyniki prób szlifowania stopu tytanu Gr 19 na szlifierce kłowej do wałków dla różnych ściernic i warunków obróbki.

**SŁOWA KLUCZOWE:** stopy tytanu, szlifowanie cylindryczne, monitorowanie.

*In a grinding process of titanium alloys the grinding results depend on several factors related to the used grinding wheel and selection of appropriate grinding kinematic parameters. Because of the specific properties of titanium alloys grinding force components may reach high values which in turn may cause the development of self-excited vibrations or the thermal damage of the workpiece surface. In the paper experimental study was carried out on cylindrical grinding machine to investigate the influence of different grinding wheels and conditions on grinding results.*

**KEYWORDS:** titanium alloys, cylindrical grinding, monitoring.

Stopy tytanu odgrywają ogromną rolę w produkcji szeregu elementów stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym [1, 7, 8]. Chociaż stosowane są do produkcji wąskiej grupy elementów, materiały te są obecnie wiodącym tematem badawczym w zakresie ich obróbki z powodu specyficznych właściwości, które czynią je bardzo kłopotliwe w obróbce ubytkowej. Intermetaliczne stopy tytanu z glinem

TiAl, takie jak stop Grade 19, przeznaczone są do pracy w podwyższonych temperaturach i charakteryzują się niską masą właściwą przy wysokiej wytrzymałości, wysoką wytrzymałością zmęczeniową oraz niskim współczynnikiem przewodności cieplnej. Właściwości, które czynią je tak przydatne w produkcji odpowiedzialnych części maszyn czynią je jednak dość trudnymi w obróbce ściernicą. Do typowych elementów, które wymagają obróbki szlifowaniem należy zaliczyć wiotkie wałki, tuleje, czy też łopatki turbin stosowane w silnikach lotniczych. Niska sztywność tych części oraz niska obrabialność stopów tytanu powoduje powstawanie znacznych odkształceń sprężystych i drgań podczas procesu szlifowania [3]. Relatywnie wysokie współczynniki tarcia powodują ponadto powstawanie dużych ilości ciepła [7]. Jak już wspomniano stopy tytanu słabymi przewodnikami ciepła, co w połączeniu z niską przewodnością cieplną konwencjonalnych ściernic o spoiwie ceramicznym prowadzi do akumulacji dużych ilości ciepła w strefie styku ściernicy z obrabianym przedmiotem i w konsekwencji do nadmiernego obciążenia cieplnego narzędzia i jego szybkiego zużycia. Szybkie zużywanie się narzędzia wynika również z wysokiej reaktywności tytanu w wysokich temperaturach [7, 9]. Ponadto zbyt wysoka temperatura szlifowania wpływa również na wynikowe naprężenia w warstwie wierzchniej obrabianego przedmiotu, co może prowadzić do wzrostu błędów geometrycznych oraz chropowatości szlifowanej powierzchni i w konsekwencji do obniżenia jego właściwości użytkowych.

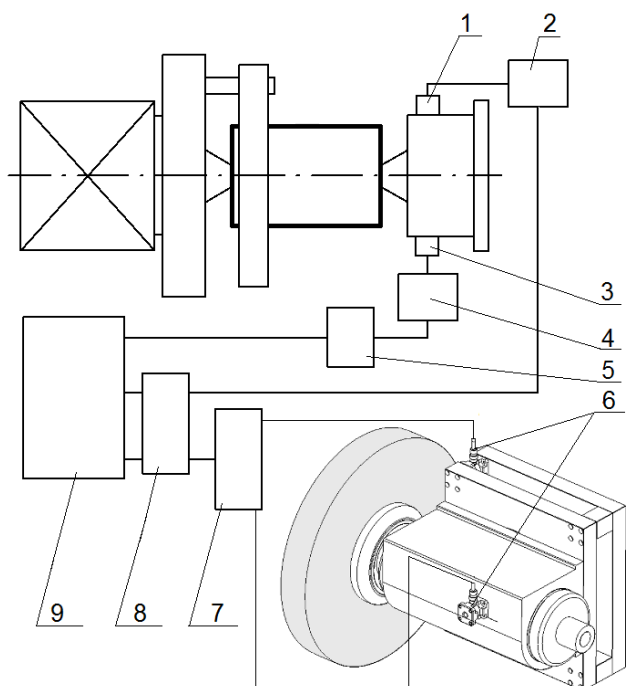
Z powodu wspomnianych problemów z obróbką stopów tytanu konieczne jest poznanie wpływu warunków obróbki na przebieg i parametry wynikowe procesu szlifowania oraz ciągłe monitorowanie stanu procesu szlifowania w celu modyfikacji warunków obróbki lub podjęcia decyzji o kondycjonowaniu ściernicy. W procesie szlifowania monitorowaniu mogą podlegać różne wielkości towarzyszące procesowi szlifowania, z których możliwe jest wyznaczenie pojedynczej bądź zbioru cech skorelowanych ze stanem narzędzia ściernego lub parametrami warstwy wierzchniej szlifowanych przedmiotów. W systemach monitorowania procesów

\* Paweł Lajmert ([pawel.lajmert@p.lodz.pl](mailto:pawel.lajmert@p.lodz.pl)), Dr inż. Dariusz Ostrowski ([dariusz.ostrowski@p.lodz.pl](mailto:dariusz.ostrowski@p.lodz.pl)), Dr inż. Małgorzata Sikora ([malgorzata.sikora@p.lodz.pl](mailto:malgorzata.sikora@p.lodz.pl)), Dr inż. Prof. Dr hab. inż. Bogdan Kruszyński ([Bogdan.kruszynski@p.lodz.pl](mailto:Bogdan.kruszynski@p.lodz.pl))

szlifowania pomiar mocy bądź siły szlifowania może być wykorzystany do estymacji zdolności skrawnej ściernicy [4]. Z kolei emisja akustyczna AE (ang. *acoustic emission*) jest związana z procesami skrawania i dlatego może być użyta do estymacji chropowatości szlifowanej powierzchni, parametrów czynnej powierzchni ściernicy CPS lub identyfikacji niepożądanych stanów procesu, takich jak uszkodzenia cieplne przedmiotu [2, 5]. W pracy przedstawiono wpływ dwóch rodzajów ściernic o spoiwie ceramicznym oraz parametrów kinematycznych szlifowania na wybrane wielkości towarzyszące procesowi szlifowania oraz parametry wyników szlifowanych przedmiotów.

### Budowa stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze powstało w oparciu o zmodernizowaną szlifierkę kłową do wałków Tacchella 4M. Działanie wszystkich układów pomiarowych oparto o komputer PC wyposażony w odpowiednie karty pomiarowe [6]. Strukturę układów pomiarowych szlifierki przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura układów pomiarowych stanowiska badawczego; (1, 2 – czujnik drgań i wzmacniacz, 3, 4 – czujnik emisji akustycznej i wzmacniacz, 5 – karta akwizycji danych USB 6366, 6, 7 – czujniki siły oraz wzmacniacz, 8 – karta akwizycji danych USB 6351, 9 – komputer PC)

Na układ monitorowania procesu szlifowania składały się układy pomiaru siły szlifowania, drgań i emisji akustycznej. Ponadto do oceny stanu przedmiotu po obróbce wykorzystano chropowatościomierz HOMMEL Tester T500. Do pomiaru składowych siły szlifowania zastosowano piezoelektryczne trzyosiowe czujniki siły firmy Kistler 9317B. Czujniki te umieszczono pomiędzy korpusem obudowy wrzeciona ściernicy a korpusem obrotnicy szlifierki (rysunek 1). Składowe siły szlifowania w kierunku normalnym i stycznym rejestrowano w sposób ciągły w pamięci komputera z częstotliwością 40 kHz. Zbudowany układ pomiarowy pozwala na pomiar składowej statycznej siły szlifowania jak i składowej dynamicznej w zakresie częstotliwości do około 3 kHz. W celu poznania szerszego obrazu zjawisk zachodzących w procesie szlifowania równoległe z pomiarami siły szlifowania dokonywane były pomiary emisji akustycznej. Do pomiaru sygnału emisji akustycznej zastosowano przewodowy czujnik Kistler 8152B121, który przymocowano do

kła konika szlifierki. Ustalono, że tarcie w kłach konika, jak również pozycja strefy skrawania wzdłuż obrabianego przedmiotu nie wpływa na wartość sygnału i nie zakłóca w znaczący sposób sygnału emisji akustycznej. Zakres pomiarowy zastosowanego czujnika emisji zawiera się w przedziale częstotliwości od około 100 kHz do 900 kHz. Sygnał z czujnika był wzmacniany i filtrowany przy użyciu wzmacniacza Kistler typ 5125A wyposażonego w filtr pasmowo-przepustowy o częstotliwościach odcinania wynoszących odpowiednio 50 kHz i 1MHz. Charakterystyka zastosowanego czujnika pozwala na pomiar sygnału na poziomie 48 dBref 1Vs/m dla fal powierzchniowych i podłużnych. Sygnał ten jest następnie we wzmacniaczu podawany do przetwornika wartości skutecznej o okresie całkowania sygnału wynoszącym  $\tau_s = 0,12$  ms. Surowy sygnał emisji akustycznej oraz jego wartość skuteczną rejestrowano w pamięci komputera przy użyciu karty NI USB 6366. Oba sygnały rejestrowane były w sposób ciągły z częstotliwością 2 MHz.

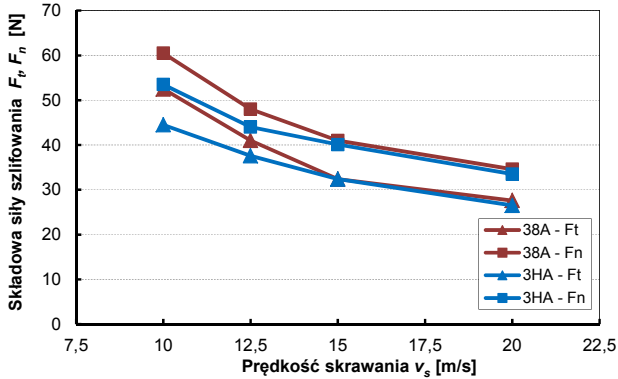
### Warunki przeprowadzonych prób

Badania doświadczalne przeprowadzono w celu ustalenia przydatności wybranych ściernic do szlifowania stopu tytanu Grade 19 (Ti3Al8V6Cr4Mo4Zr) oraz w celu ustalenia wpływu warunków obróbki na przebieg procesu i parametry wynikowe szlifowanych przedmiotów. W przeprowadzonych próbach szlifowano próbki w postaci pierścieni o średnicy 55 mm i szerokości 10 mm mocowane na trzpieniu. Badania przeprowadzono z użyciem konwencjonalnej ściernicy ceramicznej z ziarnem z elektrokorundu szlachetnego 38A60K5VBE oraz ściernicą z ziarnem mikrokryształicznym 3HA060J8V114 Molelab. Badania realizowano dla różnych wydajności objętościowych szlifowania  $Q'_w$  poprzez zmiany prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  wynoszącej 50, 100 i 200 mm/s dla stałej grubości warstwy skrawanej  $a_e$  wynoszącej 6  $\mu\text{m}$ . W wyniku dało to wartości  $Q'_w$  równe 0,3, 0,6 i 1,2  $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ . We wszystkich próbach szlifowania zmieniano ponadto prędkość skrawania  $v_s$  na czterech poziomach wynoszących 10, 12,5, 15 i 20 m/s. Zakres zmian prędkości skrawania ustalono na podstawie przeglądu literatury [1, 7, 8, 9] i wstępnych prób szlifowania sugerując się wyników parametrami geometrii szlifowanej powierzchni oraz wartościami sił skrawania i emisji akustycznej. Szlifowano w cyklach składających się z dosuwu roboczego bez wyiskrzania i szybkiego odsokoku z prędkością 200  $\mu\text{m/s}$ , każdorazowo zbierając naddatek o wielkości dla pierwszego przejścia 50  $\mu\text{m}$  i każdego kolejnego 100  $\mu\text{m}$ , aż do stopienia ściernicy. Jako kryterium stopienia ściernicy przyjęto chropowatość obrabianej powierzchni, błędy geometrii przedmiotu oraz poziom drgań rejestrowanych na kłach konika szlifierki. W zależności od zastosowanych warunków obróbki okres trwałości ściernicy obejmował od 1 do 4 cykli szlifowania, co odpowiadało właściwemu ubytkowi materiału  $V'_w$  wynoszącemu od około 10 do 65  $\text{mm}^3/\text{mm}$ . W procesie kondycjonowania ściernicy przyjęto prędkość obwodową ściernicy równą 33 m/s, dosuw kondycjonowania ściernicy  $a_d$  wynoszący 20  $\mu\text{m}$  i posuw wzdłużny kondycjonowania  $v_{fd}$  równy 100 mm/min. Jako chłodziwo zastosowano 3% wodny roztwór emulsji syntetycznej Mobilcut 321.

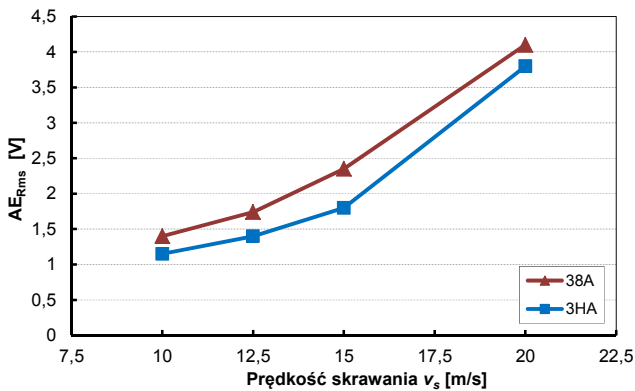
### Wyniki badań

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono odpowiednio zmiany składowych siły szlifowania i wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej  $AE_{rms}$  w funkcji prędkości skrawania dla obu zastosowanych ściernic. Widać, że wartości składowych siły szlifowania maleją wraz ze wzrostem prędkości skrawania, natomiast wartość  $AE_{rms}$  rośnie. Wzrost sygnału  $AE_{rms}$  może świadczyć o przewadze zjawisk związanych

z mikrodeformacją i tarciami zachodzącym w obrabianym materiale. Ponadto wzrost poziomu  $AE_{rms}$  może świadczyć o zachodzących procesach mikrowykruszania się ziaren spowodowanych większą temperaturą w strefie skrawania i w efekcie większym obciążeniem cieplnym narzędzia ściernego. W przypadku ściernicy elektrokorundowej efektem tego było szybsze zużycie narzędzia, tj. rozwój falistości na powierzchni ściernicy prowadzący do powstawania drgań obrabianego przedmiotu i pogorszenia parametrów jakości jego warstwy wierzchniej.

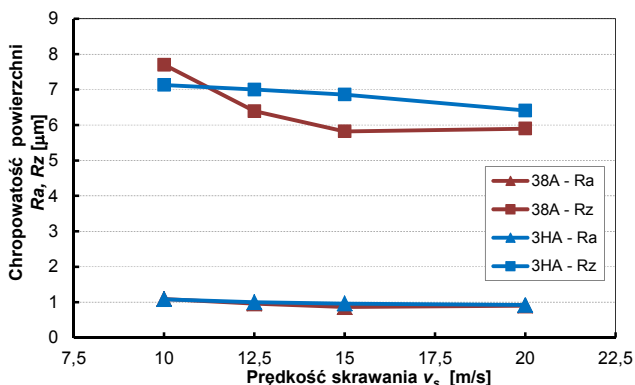


Rys. 2. Zmiany składowych siły szlifowania w funkcji prędkości skrawania  $v_s$



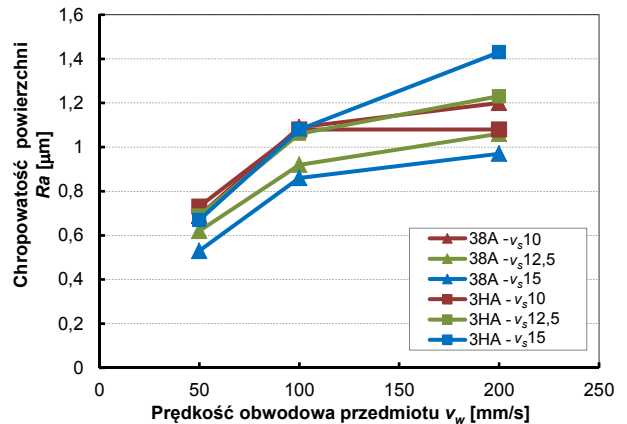
Rys. 3. Zmiany wartości skutecznej  $AE_{rms}$  w funkcji prędkości skrawania  $v_s$

Na rysunku 4 przedstawiono zmiany parametrów chropowatości  $Ra$  i  $Rz$  szlifowanej powierzchni w funkcji prędkości skrawania  $v_s$ . Widać, że w przypadku ściernicy z ziarnem konwencjonalnym chropowatość powierzchni maleje. W przypadku ściernicy z ziarnem mikrokryształicznym spadek chropowatości jest niewielki.

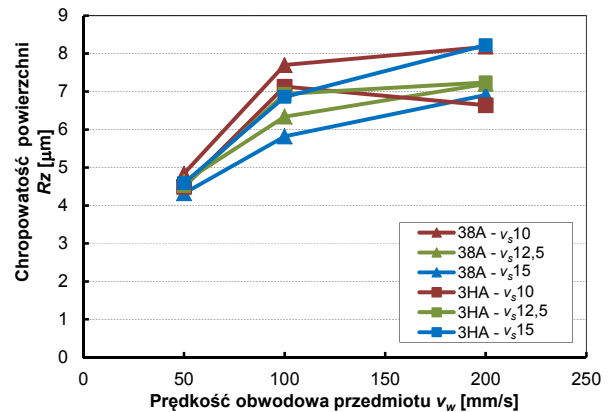


Rys. 4. Wpływ prędkości skrawania  $v_s$  na chropowatość powierzchni  $Ra$  i  $Rz$

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono z kolei zmiany parametrów chropowatości  $Ra$  i  $Rz$  w funkcji prędkości obwodowej przedmiotu. Z przedstawionych rysunków widać, że chropowatość powierzchni ulega zmniejszeniu wraz ze zmniejszeniem prędkości obwodowej przedmiotu dla obu zastosowanych ściernic.

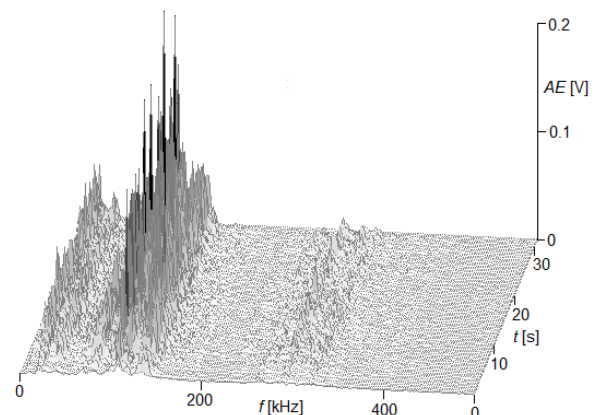


Rys. 5. Wpływ prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  na chropowatość powierzchni  $Ra$



Rys. 6. Wpływ prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  na chropowatość powierzchni  $Rz$

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono widmo surowego sygnału  $AE$  dla odpowiednio ściernicy 38A i 3HA i prędkości skrawania wynoszącej 15 m/s. Widać, że w przypadku ściernicy konwencjonalnej 38A amplituda surowego sygnału  $AE$  jest znacznie większa od amplitudy sygnału dla ściernicy mikrokryształicznej 3HA.

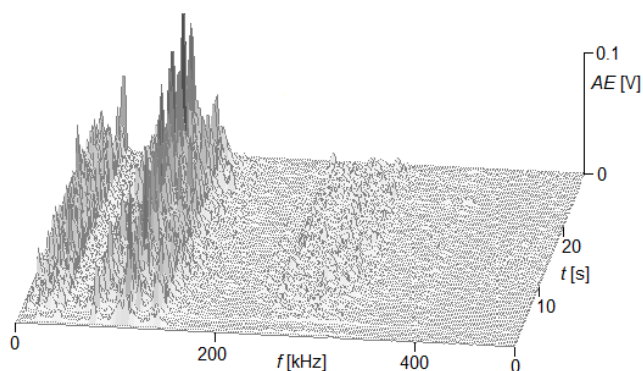


Rys. 7. Widmo amplitudy surowego sygnału  $AE$  dla ściernicy 38A i prędkości skrawania  $v_s = 15$  m/s (2 cykl szlifowania)

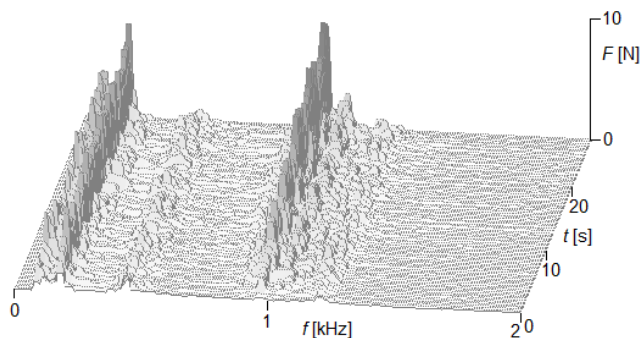


Może z tego wynikać, że w przypadku ściernicy konwencjonalnej przeważa tarcie i generowane są większe temperatury w strefie skrawania, co intensyfikuje procesy zużywania się ściernicy (mikrowykruszanie się ziaren i rozwój falistości na CPS).

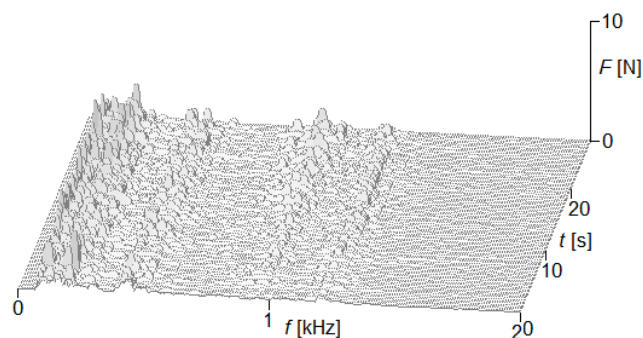
Dowodem na to mogą być zmiany widma amplitudy składowej normalnej siły szlifowania dla obu ściernic przedstawione na rysunkach 9 i 10 dla trzeciego cyklu szlifowania. Widać, że w przypadku ściernicy konwencjonalnej amplituda składowej normalnej dla częstotliwości około 1kHz jest znacznie większa niż w przypadku ściernicy z ziarnem mikrokryształicznym w trzecim cyklu szlifowania. Ponadto w przypadku zmniejszenia prędkości skrawania dla ściernicy konwencjonalnej do 10 m/s intensywność zużywania się ściernicy (rozwoju falistości na ściernicy) maleje, zobacz rysunek 11.



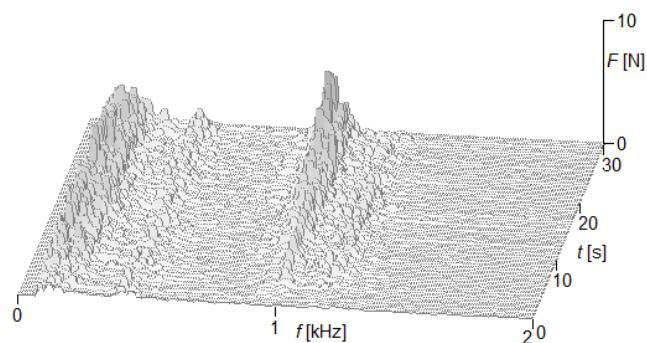
Rys. 8. Widmo amplitudy surowego sygnału AE dla ściernicy 3HA i prędkości skrawania  $v_s = 15\text{m/s}$  (2 cykl szlifowania)



Rys. 9. Widmo amplitudy składowej normalnej siły szlifowania dla ściernicy 38A i prędkości skrawania  $v_s = 15\text{m/s}$  (3 cykl szlifowania)



Rys. 10. Widmo amplitudy składowej normalnej siły szlifowania dla ściernicy 3HA i prędkości skrawania  $v_s = 15\text{m/s}$  (3 cykl szlifowania)



Rys. 11. Widmo amplitudy składowej normalnej siły szlifowania dla ściernicy 38A i prędkości skrawania  $v_s = 10\text{m/s}$  (3 cykl szlifowania)

## Wnioski

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- Zwiększenie prędkości skrawania powoduje zmniejszenie siły szlifowania, jednakże z powodu wzrostu temperatury skrawania prowadzi do intensywniejszego zużywania się obu rodzajów ściernic, co wpływa na wzrost błędów geometrii szlifowanych przedmiotów. W przypadku ściernicy elektrokorundowej maksymalna prędkość skrawania wynosi około 12 m/s, natomiast dla ściernicy mikrokryształicznej około 20 m/s.
- W celu zmniejszenia wynikowej chropowatości szlifowanej powierzchni należy stosować odpowiednio niskie prędkości obrotowe przedmiotu.
- Zwiększenie prędkości skrawania powoduje nieznaczne zmniejszenie chropowatości szlifowanej powierzchni.

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

## LITERATURA

1. Beranoagirre A., Lopez de Lacalle L., Grinding of gamma TiAl intermetallic alloys. *Procedia Engineering*, Vol. 63, 489-498, 2013.
2. Hundt W., Leuenberger D., Rehsteiner F., Gyax P., An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission (AE) technique. *Annals of the CIRP*, Vol. 43/1, 295-298, 1994.
3. Inasaki I., Karpuszewski B., Lee H., Grinding chatter – origin and suppression. *Annals of the CIRP*, Vol. 50/2, 515-535, 2001.
4. Karpuszewski B., Wehmeier M., Inasaki I., Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors. *Annals of the CIRP* Vol. 49/1, 235-240, 2000.
5. Lajmert P., Kruszyński B., Wrąbel D., Identyfikacja wczesnych symptomów niepożądanych stanów procesu w szlifowaniu kłowym wałków, XXXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, 2011.
6. Lajmert P., Kruszyński B., Wrąbel D., Sikora M., Stanowisko do wieloaspektowego badania procesu szlifowania kłowego wałków. *Mechanik* 8-9, 273-282, 2013.
7. Ocoś K. E., Kształtowanie ubytkowe tytanu i jego stopów w przemyśle lotniczym i technice medycznej – część 2, *Mechanik*, 10, 753-767, 2008.
8. Razavi H., Kurfess T., Danyluk S., Force control grinding of gamma titanium aluminide. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, 185-191, 2003.
9. Xu X., Yu Y., Huang H., Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys. *Wear*, Vol. 255, 1421-1426, 2003.