

## STANOWISKO DO WIELOASPEKTOWEGO BADANIA PROCESU SZLIFOWANIA KŁOWEGO WAŁKÓW

Paweł LAJMERT<sup>1</sup>, Bogdan KRUSZYŃSKI<sup>2</sup>,  
Dariusz WRĄBEL<sup>3</sup> Małgorzata SIKORA<sup>4</sup>,

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono stanowiska badawcze umożliwiające wieloaspektową ocenę procesu szlifowania kłowego wałków. Stanowiska te pozwalają na akwizycję i wstępne przetwarzanie różnych sygnałów pomiarowych, tj. składowych siły szlifowania, sygnału drgań czy emisji akustycznej oraz pomiar wybranych parametrów jakościowych szlifowanych przedmiotów. Opracowano specjalizowane oprogramowanie do przetwarzania sygnałów pomiarowych i sterowania pracą szlifierek. Przedstawiono wybrane wyniki badań.

**Słowa kluczowe:** szlifowanie, diagnostyka, inteligentny nadzór

**Summary:** In the paper a research test stands for multi-faceted assessment of cylindrical grinding process are presented. These test stands permit acquisition and preliminary analysing of different measurement signals, i.e. grinding force components, vibrations and acoustic emission signals as well as measurement of selected part quality parameters. A specialized software was developed for analysis of measured data and control of machine tools. Selected results of the research are presented.

**Key words:** grinding, diagnostics, intelligent supervision

### 1. WSTĘP

Warunkiem koniecznym efektywnego nadzoru procesu szlifowania jest wyposażenie szlifiarki w odpowiednio zintegrowane zespoły sterujące i pomiarowe, tak aby możliwe było prawidłowe rozpoznawanie stanu procesu i w odpowiedzi podejmowanie odpowiednich działań w zakresie od podjęcia decyzji o kondycjonowaniu ściernicy do modyfikacji wybranych parametrów kinematycznych obróbki w celu utrzymania procesu w optymalnym obszarze szlifowania i uzyskania założonych parametrów wynikowych szlifowanego przedmiotu. W pracy przedstawiono opis urządzeń kontrolnych i pomiarowych wchodzących w skład stanowiska do wieloaspektowego badania procesów szlifowania kłowego wałków. Prezentowane prace są częścią szerszych działań prowadzonych w Instytucie Obrabiarek i TBM zmierzających do budowy inteligentnego systemu szlifowania materiałów trudnoobrabialnych. Budowany system realizuje następujące zadania:

- integruje dane o procesie pochodzące z różnych źródeł, tj. układów pomiarowych oraz układu sterowania CNC szlifiarki,
- automatycznie identyfikuje wszystkie zakłócenia przebiegu procesu szlifowania i kompensuje je poprzez podejmowanie najwłaściwszych strategii i działań korekcyjnych,

---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź,  
plajmert@p.lodz.pl

<sup>2</sup> bogdan.kruszynski@p.lodz.pl

<sup>3</sup> dariusz.wrabel@p.lodz.pl

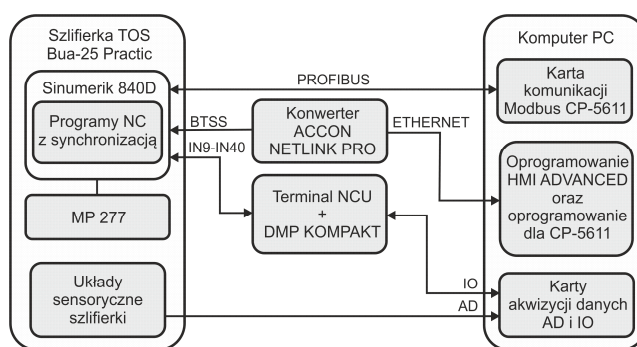
<sup>4</sup> malgorzata.sikora@p.lodz.pl

- automatycznie optymalizuje i modyfikuje przebieg programu CNC cyklu szlifowania na podstawie zadanych przez operatora parametrów dotyczących materiału, narzędzia oraz parametrów jakościowych przedmiotu po obróbce,
- jest odpowiednio zintegrowany z układem sterowania numerycznego szlifierki aby możliwa była wymiana danych pomiędzy tymi układami i bieżąca modyfikacja struktury i przebiegu programu CNC,
- automatycznie wykrywa awarie układów pomiarowych lub ich nieprawidłowe działanie,
- umożliwia douczanie się systemu i posiada możliwość wyjaśniania swoich działań operatorowi szlifierki.

W artykule przedstawiono w pierwszej kolejności niezbędne modyfikacje sterowania numerycznego szlifierki w celu budowy inteligentnego systemu szlifowania oraz strukturę układów pomiarowych szlifierki. Następnie omówiono poszczególne tory pomiarowe wraz z przykładowymi wynikami badań. Badania prowadzono dla różnych warunków szlifowania, tj. dla optymalnych warunków szlifowania, w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu oraz w strefie drgań regeneracyjnych przedmiotu i ściernicy. Szlifowano stal 38HMJ ulepszoną do  $50 \pm 2$  HRC przy użyciu ściernicy ceramicznej A99-60K9V firmy Tyrolit. Prędkość szlifowania wynosiła 50 m/s. Badania prowadzono w próbach, w których zeszlifowano około  $80 \text{ mm}^3/\text{mm}$  materiału.

## 2. STRUKTURA UKŁADU STEROWANIA NUMERYCZNEGO SZLIFIERKI

Stanowisko badawcze procesu szlifowania zbudowano na bazie szlifierki kłowej do wałków TOS Bua-25 Practic. W celu odpowiedniej integracji szlifierki z nadrzędnym systemem nadzoru procesu szlifowania zmodyfikowano układ sterowania numerycznego szlifierki. Schemat zmodyfikowanego układu sterowania CNC przedstawiono na rysunku 1.



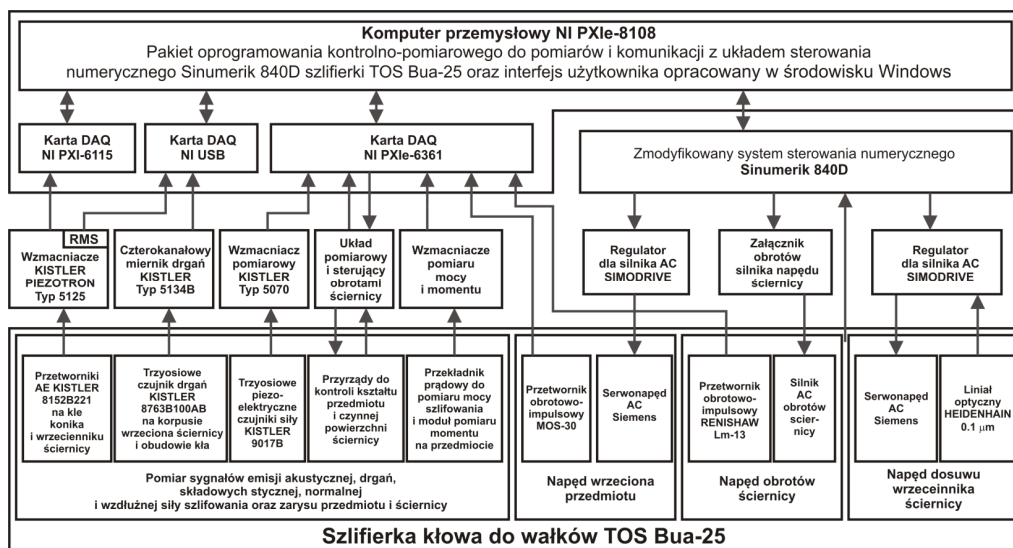
Rys. 1. Struktura komunikacji ze zmodyfikowanym układem sterowania numerycznego Sinumerik 840D.

**MECHANIK NR 8-9/2013**  
**XXXVI NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ**

Zmodernizowany system sterowania umożliwia edycję parametrów maszynowych, programów NC, bieżącą modyfikację parametrów obróbki w kolejnych fazach cyklu szlifowania oraz bezpośrednie sterowanie napędami szlifierki z zewnętrznego nadrzędnego komputera PC. W tym celu szlifierkę wyposażono w zmodyfikowany system sterowania numerycznego dla szlifierek Sinumerik 840D wyposażony w interfejs Profibus, Ethernet oraz wejścia cyfrowe do wymiany niezbędnych danych z zewnętrznym komputerem PC.

### 3. STRUKTURA UKŁADÓW MONITOROWANIA PROCESU SZLIFOWANIA

Przyjęto, iż układ monitorowania stanu procesu szlifowania powinien obejmować pomiary składowych siły szlifowania, drgań, emisji akustycznej, momentu na wrzecionie przedmiotu oraz mocy szlifowania. Wybór takich wielkości został podyktowany pracami innych autorów [4, 9] oraz doświadczeniami własnymi [5, 6]. Ponadto pomiarem objęto pozycje wszystkich zespołów napędowych szlifierki. W celu akwizycji danych pomiarowych opracowano specjalne oprogramowanie pozwalające na rejestrację wszystkich sygnałów pomiarowych w sposób ciągły oraz ich bieżące przetwarzanie z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT), jej krótko-czasowej wersji (STFT, short time Fourier transform) oraz transformaty Huang-Hilberta (HHT). Opracowane oprogramowanie pozwala również na sterowanie cyklem pracy szlifierki. Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy zastosowanych układów pomiarowych, sterujących i napędowych.

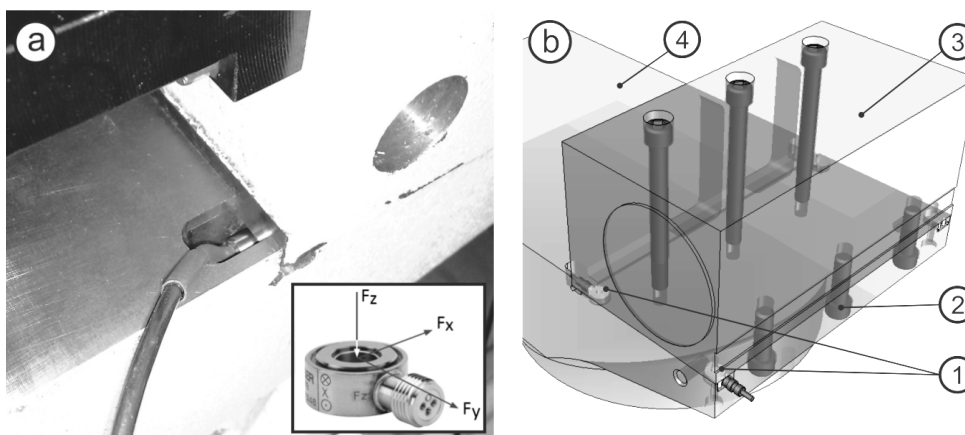


Rys. 2. Ogólna struktura układów sterujących i pomiarowych stanowiska badawczego.

Przedstawiony system kontrolno-pomiarowy wykorzystuje przemysłowy komputer National Instruments PXIe-8108 wyposażony w odpowiednie karty akwizycji sygnałów pomiarowych i karty do komunikacji ze sterowaniem numerycznym szlifierki. Wzmocnienia w poszczególnych torach pomiarowych dobrano tak, aby maksymalnie wykorzystać teoretyczną rozdzielczość przetworników analogowo-cyfrowych poszczególnych kart pomiarowych. Ponadto szlifierkę wyposażono w działające w trybie off-line przyrządy do pomiaru błędów kształtu i falistości przedmiotu oraz makro i mikro-geometrii czynnej powierzchni ściernicy (CPS).

### 3.1. PODSYSTEM MONITOROWANIA SIŁY SZLIFOWANIA

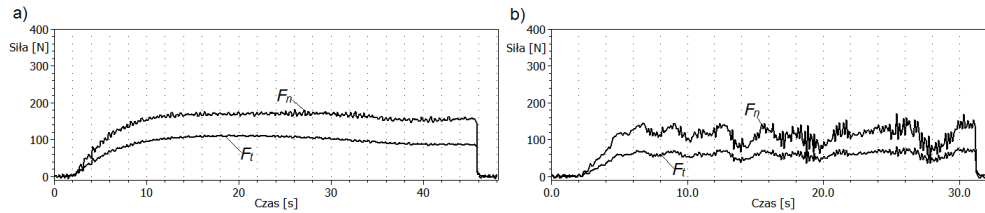
W celu pomiaru składowej stycznej i normalnej siły szlifowania szlifierkę wyposażono w piezoelektryczne czujniki siły 9017B firmy Kistler. Czujniki te zostały umieszczone pomiędzy wrzeciennikiem ściernicy a obrotnicą szlifierki, po stronie tarczy szlifierskiej. Sposób umiejscowienia czujników przedstawiono na rysunku 3. Sygnały pomiarowe składowych siły szlifowania były rejestrowane w sposób ciągły z częstotliwością 20 kHz.



Rys. 3. Umieszczenie czujników siły na szlifierce TOS Bua-25 Practic: a) widok czujnika siły oraz jego montaż na szlifierce; b) widok miejsc zamocowania czujników siły (1 – piezoelektryczne czujniki siły, 2 – jedna z sześciu śrub mocujących obudowę wrzeciona do obrotnicy szlifierki, 3 – wrzeciennik ściernicy, 4 – obrotnica szlifierki).

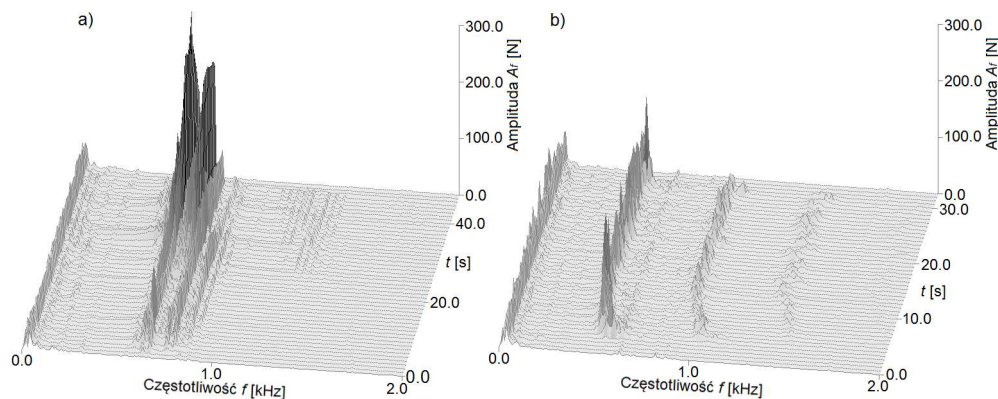
Opracowany układ pomiarowy pozwala na pomiar składowych statycznych i dynamicznych siły szlifowania w zakresie do około 2 kHz. Przykładowe przebiegi składowej normalnej i stycznej siły podczas szlifowania w strefie drgań regeneracyjnych ściernicy i przedmiotu przedstawiono na rysunku 4. Jak widać w przypadku drgań regeneracyjnych przedmiotu przebieg obu składowych siły jest silnie niestacjonarny.

**MECHANIK NR 8-9/2013**  
**XXXVI NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ**



Rys. 4. Przebieg składowej normalnej i stycznej siły szlifowania dla: a) drgań regeneracyjnych ściernicy (**4 próba** po zeszlifowaniu  $V'_w = 240 \text{ mm}^3/\text{mm}$ ,  $Q'_w = 1.9 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ ,  $v_w = 0.6 \text{ m/s}$ ); b) drgań regeneracyjnych przedmiotu (**1 próba** szlifowania,  $Q'_w = 1.9 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ ,  $v_w = 2 \text{ m/s}$ ).

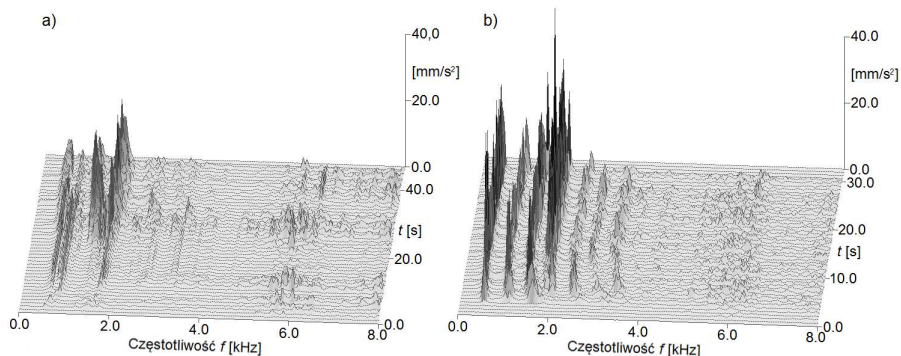
Natomiast na rysunku 5 przedstawiono widmo FFT składowej normalnej siły szlifowania odpowiadające warunkom obróbki z rysunku 4. W przypadku pracy w strefie drgań samowzбудnych przedmiotu, drgania pojawiają się gwałtownie już na samym początku procesu szlifowania, tj. podczas pierwszej próby szlifowania (rysunek 5), zaś w zakresie drgań regeneracyjnych na ściernicy widoczne są drgania skupione przy częstotliwości około 650 Hz (rysunek 5a), dobrze skorelowane z powstającą falistością na ściernicy. Częstotliwość ta podzielona przez częstość obrotów ściernicy daje dokładnie liczbę fal na ściernicy jaka została pomierzona po próbie szlifowania. Pomiar siły szlifowania wydaje się zatem bardzo przydatny do celów identyfikacji stanu narzędzia ściernego. W przypadku widma dla drgań samowzбудnych przedmiotu widoczna jest podstawowa częstotliwość drgań oraz jej kolejne harmoniczne pojawiające się w regularnych odstępach (rysunek 5b). Może to częściowo wynikać z nieliniowości sygnału składowej normalnej siły szlifowania, spowodowanej charakterem oddziaływania ściernicy z przedmiotem obrabianym podczas drgań regeneracyjnych na przedmiocie.



Rys. 5. Widma sygnału składowej normalnej siły szlifowania odpowiadające warunkom obróbki z rysunku 4, tj. a) **4 próba** szlifowania dla drgań regeneracyjnych ściernicy, b) **1 próba** szlifowania dla drgań regeneracyjnych przedmiotu.

### 3.2. PODSYSTEM MONITOROWANIA SYGNAŁÓW DRGAŃ

Do pomiaru sygnałów drgań zastosowano trzyosiowe czujniki przyspieszenia 8763B100AB firmy Kistler zamocowane na kle konika szlifierki oraz na przedniej ścianie korpusu wrzeciennika ściernicy w osi wrzeciona po stronie ściernicy. Sygnał ten jest szczególnie przydatny do identyfikacji drgań samowzbudnych i estymacji parametrów geometrii szlifowanego przedmiotu [3]. Takie umiejscowienie czujników wynikało z warunków konstrukcyjnych szlifierki oraz z wymogu uzyskania możliwie największego stosunku sygnału użytecznego do szumu. W przypadku czujnika zamocowanego w osi wrzeciona ściernicy zachowany został ponadto warunek stałej odległości czujnika od strefy skrawania dla różnych przypadków technologicznych. Opracowane oprogramowanie pomiarowe umożliwia jednoczesną rejestrację sygnałów z obu czujników, z dwóch osi w kierunku stycznym i normalnym do wektora prędkości dosuwu wrzeciennika ściernicy. Składowe sygnały drgań rejestrowane były z częstotliwością 20 kHz przy użyciu karty analogowo cyfrowej NI PXI 6220. Na rysunku 6 przedstawiono widmo składowej normalnej sygnału drgań zarejestrowanego na kle konika. Z przedstawionych wykresów wynika, iż w sygnale drgań znajduje się znacznie więcej składowych częstotliwościowych będących częstościami drgań własnych szlifowanego wałka i struktury obrabiarki. Utrudnia to wykorzystanie tego sygnału do prognozowania makrogeometrii ściernicy czy falistości przedmiotu. W przypadku drgań regeneracyjnych przedmiotu, podobnie jak dla sygnału sił, widoczne są składowe rozłożone w regularnych odstępach.



Rys. 6. Widmo normalnej składowej sygnału drgań na kle konika dla: a) drgań regeneracyjnych ściernicy (**4 próba** po zeszlifowaniu  $V'_w = 330 \text{ mm}^3/\text{mm}$ ,  $Q'_w = 1.9 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ ,  $v_w = 0.6 \text{ m/s}$ ); b) drgań regeneracyjnych na przedmiocie (**1 próba** szlifowania,  $Q'_w = 1.9 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ ,  $v_w = 2 \text{ m/s}$ ).

Ponadto porównując widmo sygnału drgań z widmem sygnału siły szlifowania dla drgań regeneracyjnych ściernicy widać, że sygnał siły szlifowania jest bardziej przydatny do diagnozowania narastających drgań samowzbudnych, gdyż głównie obejmuje zjawiska zachodzące w strefie styku ściernicy z przedmiotem obrabianym.

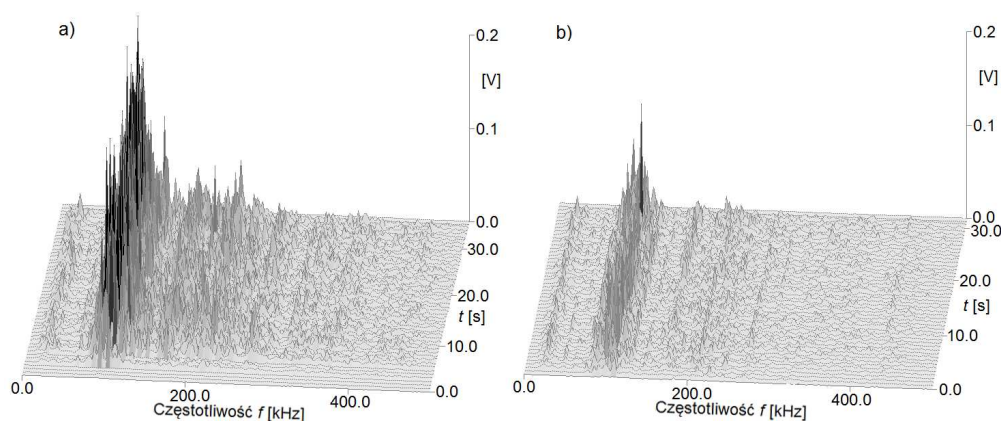


### 3.3. PODSYSTEM MONITOROWANIA SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ

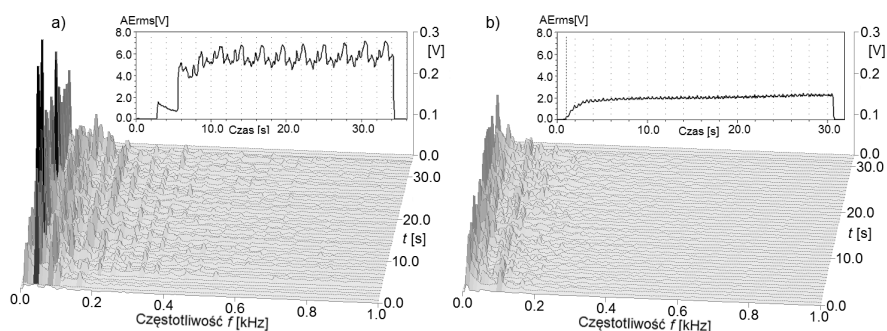
Sygnał emisji akustycznej (AE) jest szczególnie przydatny do monitorowania stanu mikro-geometrii CPS, identyfikacji uszkodzeń cieplnych oraz estymacji parametrów warstwy wierzchniej przedmiotu. Jego analiza pod tym kątem była przedmiotem wielu prac [7, 8].

Do pomiaru sygnału emisji akustycznej zastosowano małogabarytowy przewodowy czujnik emisji akustycznej firmy Kistler 8152B121, który przymocowano do kła konika szlifierki. Ustalono ponadto, że tarcie w kłach konika jak również pozycja strefy skrawania wzdłuż przedmiotu obrabianego nie zakłóca w znaczący sposób rejestrowanego sygnału emisji akustycznej. Zakres pomiarowy zastosowanego czujnika emisji akustycznej zawiera się w przedziale częstotliwości od 50 do 400 kHz. Oba sygnały rejestrowano w postaci cyfrowej na komputerze NI PXI w sposób ciągły z częstotliwościami wynoszącymi odpowiednio 20 kHz dla sygnału wartości skutecznej oraz 2 MHz dla surowego sygnału emisji akustycznej. Na rysunku 7 i 8 przedstawiono przykładowe widma surowego sygnału AE i jego wartości skutecznej  $AE_{rms}$  (wraz z przebiegiem wartości  $AE_{rms}$ ) dla pracy w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu i dla pracy w optymalnej strefie szlifowania.

Z przedstawionych rysunków wynika, iż dla pracy w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu amplituda widma sygnału emisji akustycznej oraz jego wartości skutecznej wzrasta w całym zakresie analizowanych częstotliwości. Ponadto wartość skuteczna sygnału emisji akustycznej znacząco wzrasta dla pracy w strefie uszkodzeń cieplnych (rysunek 8a). Sygnal emisji akustycznej może być zatem z powodzeniem wykorzystany do przewidywania uszkodzeń cieplnych przedmiotu.



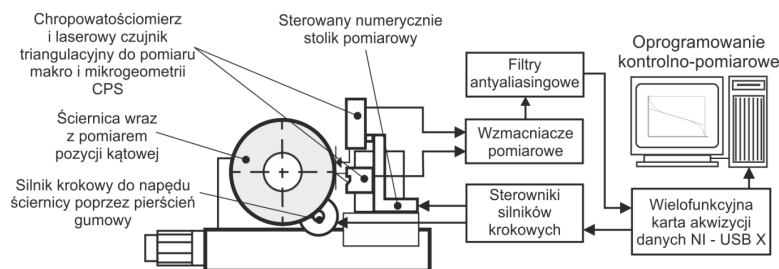
Rys. 7. Widmo surowego sygnału emisji akustycznej AE dla: a) pracy w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu ( $Q'_w=1.9 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ ,  $v_w = 0.1 \text{ m/s}$ ); b) optymalnych warunków szlifowania ( $Q'_w=1.9 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ ,  $v_w = 0.6 \text{ m/s}$ ).



Rys. 8. Widmo wartości skutecznej  $AE_{rms}$  sygnału emisji akustycznej dla: a) pracy w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu ( $Q'_w=1.9 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ ,  $v_w = 0.1 \text{ m/s}$ ); b) optymalnych warunków szlifowania ( $Q'_w=1.9 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ ,  $v_w = 0.6 \text{ m/s}$ ).

### 3.4. SYSTEM POMIARU MIKRO I MAKRO-GEOMETRII ŚCIERNICY

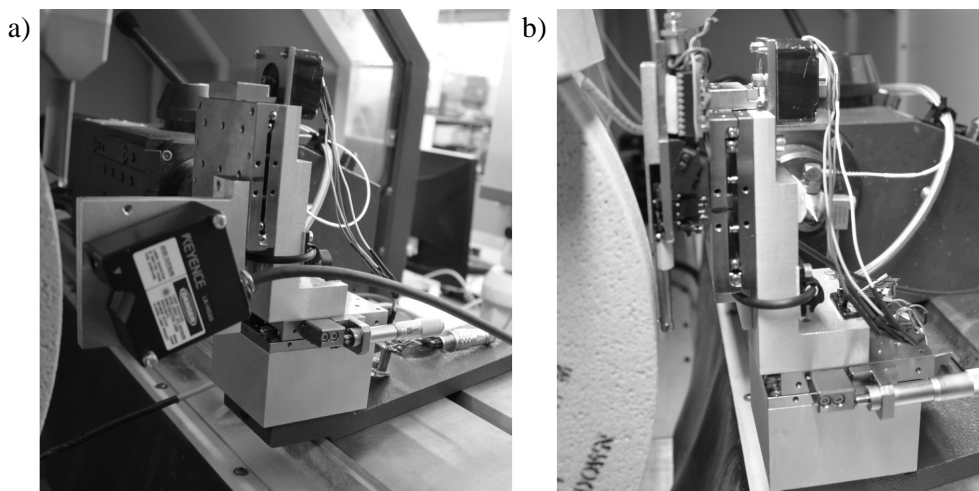
Prócz przedstawionych dotychczas układów pomiarowych działających w trybie on-line, szlifierka została wyposażona w działające w trybie off-line układy pomiaru parametrów makro i mikrogeometrii CPS. Na rysunku 9 przedstawiono schemat stanowiska do pomiaru makro i mikrogeometrii CPS. Do pomiaru falistości ściernicy wykorzystano laserowy triangulacyjny czujnik położenia LK-H025 firmy Keyence o rozdzielczości pomiarowej  $0.1 \mu\text{m}$  z kreską pomiarową o szerokości  $1.5 \text{ mm}$  i grubości  $25 \mu\text{m}$ . Natomiast do pomiaru mikrogeometrii ściernicy zastosowano czujnik laserowy triangulacyjny LK-H020 z płamką o średnicy  $25 \mu\text{m}$  oraz głowicę chropowatościomierza Carl Zeiss Jena. Czujniki te umieszczono na specjalnym sterowanym numerycznie stoliku pomiarowym. Opracowany przyrząd pozwala na pomiar zarysu ściernicy w kierunku obwodowym oraz pomiar topografii CPS. Na rysunku 10 przedstawiono widok wykonanych przyrządów z głowicą laserową i końcówką chropowatościomierza, natomiast na rysunku 11 przedstawiono przykładową topografię ściernicy uzyskaną przy użyciu głowicy laserowej po zeszlifowaniu około  $250 \text{ mm}^3/\text{mm}$  materiału. Widoczne są wyraźnie stępienia i zalepienia powierzchni ściernicy.



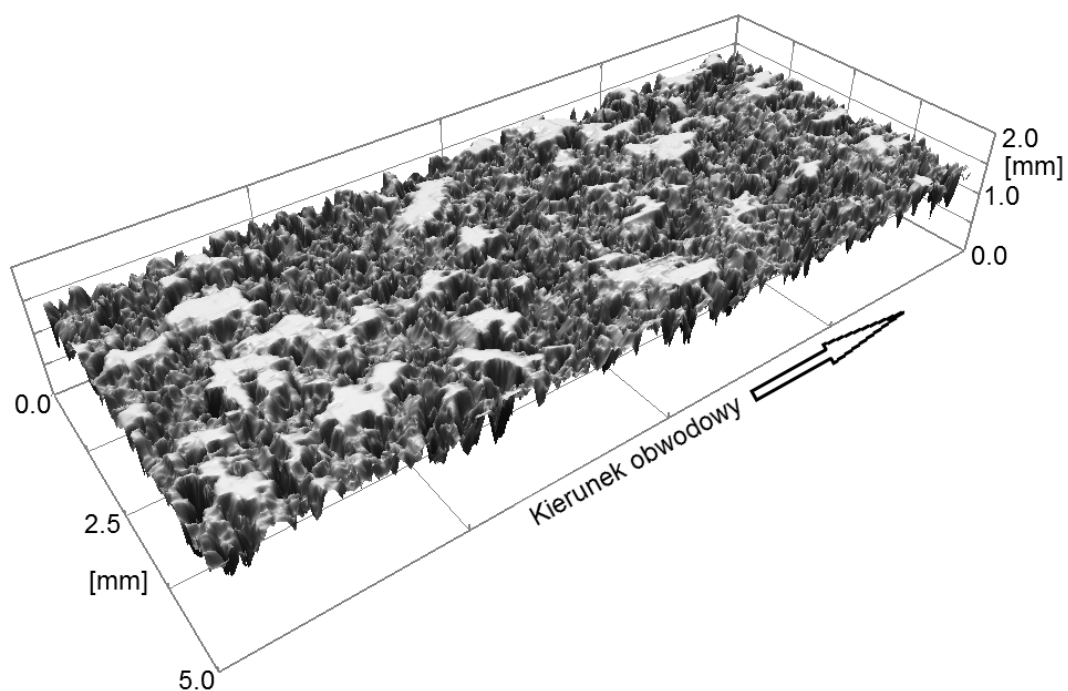
Rys. 9. Schemat stanowiska do pomiaru parametrów CPS.



**MECHANIK NR 8-9/2013**  
**XXXVI NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ**



Rys. 10. Widok przyrządu do pomiaru mikrogeometrii CPS wykorzystującego: a) głowicę laserową, b) głowicę chropowatościomierza.



Rys. 11. Widok topografii ściernicy zarejestrowany przy użyciu głowicy laserowej (po usunięciu  $V'_w = 250 \text{ mm}^3/\text{mm}$  materiału,  $Q'_w = 3.14 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ ,  $v_w = 0.1 \text{ m/s}$ ).

#### 4. WNIOSKI

W pracy przedstawiono stanowisko do badania procesu szlifowania kłowego wałków, pozwalające na wieloaspektową ocenę procesu szlifowania. Przyjęty zestaw sygnałów pomiarowych może być z powodzeniem zastosowany do identyfikacji niepożądanych stanów procesu oraz estymacji parametrów wynikowych procesu szlifowania. Wymaga to jednak zastosowania zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów niestacjonarnych i nieliniowych oraz wyznaczenia odpowiednich miar tych sygnałów. Metodami umożliwiającymi takie przetwarzanie mogą być transformata HHT [2] lub nowo opracowana metoda dekompozycji sygnałów HVD (Hilbert vibration decomposition) [1]. Zbudowane stanowisko badawcze oraz uzyskane wyniki badań będą podstawą do opracowania inteligentnego systemu szlifowania kłowego wałków [5, 6].

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 (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

#### LITERATURA

- [1] FELDMAN M., *Time-varying vibration decomposition and analysis based on the Hilbert transform*. Journal of Sound and Vibration. 2006, Vol 295, 518-530.
- [2] HUANG N., et al., *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis*. Proc. Roy. Soc. Lond., 1998.
- [3] INASAKI I., KARPUSZEWSKI B., LEE H.-S., *Grinding chatter – origin and suppression*. Annals of the CIRP Vol. 50/2, 2001, 515-534.
- [4] KARPUSZEWSKI B., WEHMEIER M., INASAKI I., *Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors*. Annals of the CIRP Vol. 49/1, 2000, 235-240.
- [5] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., *A diagnostic system for cylindrical plunge grinding process based on Hilbert Huang transform and principal component analysis*, Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 34/3, 2010, 19-35.
- [6] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., WRĄBEL D., *Modelowanie zależności w procesie szlifowania kłowego wałków z wykorzystaniem metody analizy składowych głównych i drzew decyzyjnych*. Mechanik nr 8-9, 2012.
- [7] LIU Q., GINDY N., *Investigating of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, 2006, 284-292.
- [8] WANG Z., WILLET P., DEAGUIAR P., R., WEBSTER J., *Neural network detection of grinding burn from acoustic emission*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 41, 2001, 283-309.
- [9] WEGENER K., HOFFMEISTER H.-W., KARPUSCHEWSKI B., KUSTER F., HAHMANN W.-C., RABIEY M., *Conditioning and monitoring of grinding wheels*. Annals of the CIRP, Vol. 60/2, 2011, 757-777.