

DIAGNOSTYKA PROCESU SZLIFOWANIA KŁOWEGO WAŁKÓW

Paweł LAJMERT¹, Bogdan KRUSZYŃSKI¹, Małgorzata SIKORA¹,
Dariusz OSTROWSKI¹

1. WSTĘP

W procesie diagnostyki szlifowania kłowego wałków pomiarem może być objętych szereg sygnałów takich jak moc lub składowe siły szlifowania, sygnały drgań, czy emisji akustycznej AE (ang. acoustic emission) [6, 10, 12, 16]. W wyniku odpowiedniego przetwarzania tych sygnałów w dziedzinie czasu, częstotliwości lub czasu i częstotliwości możliwe jest uzyskanie pojedynczej cechy bądź zbioru cech skorelowanych z analizowanym zjawiskiem. Analizie mogą podlegać zjawiska związane ze zużywaniem się narzędzia ściernego, powstawaniem drgań samowzbudnych, uszkodzeniami cieplnymi przedmiotu bądź wynikowymi parametrami geometrii szlifowanych przedmiotów. W szczególności podczas obróbki materiałów trudnoobrabialnych, takich jak stale wysokostopowe czy stopy na bazie niklu, mogą powstawać duże siły oraz wysokie temperatury szlifowania. Właściwości, które czynią te materiały tak przydatne w produkcji odpowiedzialnych części maszyn czynią je jednak dość kłopotliwe w obróbce ścierniej. Z tych powodów konieczne jest ciągłe monitorowanie stanu procesu w celu modyfikacji jego przebiegu bądź podjęcia decyzji o kondycjonowaniu ściernicy.

W diagnostyce procesu szlifowania pomiar mocy bądź siły szlifowania może być wykorzystany do estymacji zdolności skrawnej ściernicy [16]. Natomiast emisja akustyczna jest związana ze zjawiskami składającymi się na procesy skrawania i dlatego może być użyta do estymacji parametrów geometrycznych warstwy wierzchniej szlifowanej powierzchni, parametrów czynnej powierzchni ściernicy CPS lub identyfikacji niepożądanych stanów procesu, takich jak uszkodzenia cieplne przedmiotu [2, 3, 8, 11, 14, 15]. Sygnał drgań jest z kolei podstawą do identyfikacji

¹ Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

zjawisk związanych z powstawaniem drgań samowzbudnych i może być wykorzystany do estymacji falistości obrabianego przedmiotu i makrogeometrii CPS [11].

W artykule porównano różne metody przetwarzania sygnałów w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz czasu i częstotliwości w zastosowaniu do diagnostyki stanu procesu szlifowania kłowego wałków. Opisano wady i zalety poszczególnych metod. Przedstawiono strukturę budowanego systemu diagnostyki procesu szlifowania oraz przykładowe wyniki badań. W trakcie prób szlifowano próbki wykonane ze stali 38HMJ ulepszonej do około 50 HRC o średnicy 70 mm i szerokości 15 mm przy użyciu ściernicy ceramicznej 38A60K6VBE. Stosowano prędkość skrawania równą 35 m/s. W każdym cyklu szlifowania zbierano około 22 mm³/mm materiału. Jako chłodziwo stosowano 3% wodny roztwór emulsji syntetycznej Mobilcut 321.

2. PRZEGLĄD METOD ANALIZY SYGNAŁÓW

Rejestrowane sygnały we współczesnych systemach akwizycji danych przyjmują postać dyskretnych szeregów czasowych i wymagają dalszego przetwarzania w celu wydobywania informacji powiązanej z analizowanym zjawiskiem. Analizowane sygnały (siła, drgania, emisja akustyczna, itp.) zawierają ważne informacje w dziedzinie czasu, częstotliwości, jak również czasu i częstotliwości.

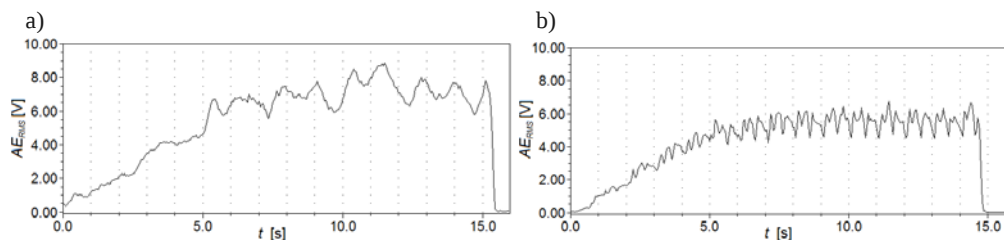
2.1. ANALIZA W DZIEDZINIE CZASU

W przypadku przetwarzania w dziedzinie czasu wyznaczanie miar może odbywać się na podstawie miar statystycznych sygnałów, takich jak wartość średnia, wartość skuteczna, odchylenie standardowe, kurtoza, skośność, itp.. W nadzorze procesów szlifowania praktyczne zastosowanie znalazło monitorowanie amplitudy sygnału drgań (kontrola niewyważenia ściernicy) oraz monitorowanie wartości skutecznej sygnału AE. Ponadto monitorowaniu podlegać mogą wybrane miary tego sygnału, np. skośność czy kurtoza. Miary te są wykorzystywane do diagnostyki stanu narzędzia ściernego, identyfikacji przypałów przedmiotu, czy też do estymacji naprężeń własnych w warstwie wierzchniej szlifowanych przedmiotów.

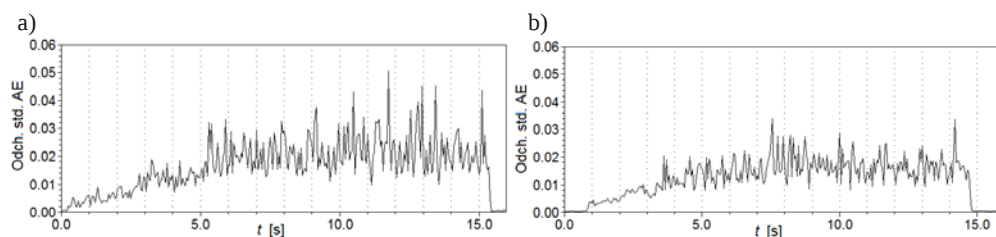
Na rysunku 1 i 2 przedstawiono wybrane przebiegi odpowiednio wartości skutecznej sygnału AE_{rms} i odchylenia standardowego surowego sygnału AE_{std} dla pracy w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu i w optymalnym obszarze szlifowania. Widać, iż zarówno wartość skuteczna jak i odchylenie standardowe tego sygnału znacząco wzrasta dla pracy w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu.

Innymi metodami przetwarzania sygnałów w dziedzinie czasu są metody analizy składowych głównych PCA (ang. Principal Component Analysis) [7] i składowych niezależnych ICA (ang. Independent Component Analysis) [5]. W przypadku metody PCA, jak i nowo opracowanej metody ICA celem jest znalezienie liniowej

reprezentacji oryginalnego sygnału tak, aby wyznaczone składowe sygnału były ze sobą nieskorelowane, albo w przypadku metody ICA dodatkowo statystycznie niezależne. Pozwala to na uchwycenie zasadniczej struktury sygnału i jego dekompozycję na niezależne składowe pochodzące z różnych źródeł informacji w analizowanym procesie.



Rys. 1. Zmiany wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej AE_{rms} podczas szlifowania z wydajnością $Q'_w = 1.5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ dla pracy: a) w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu ($v_w = 0.05 \text{ m/s}$); b) w optymalnych warunkach szlifowania ($v_w = 0.2 \text{ m/s}$)



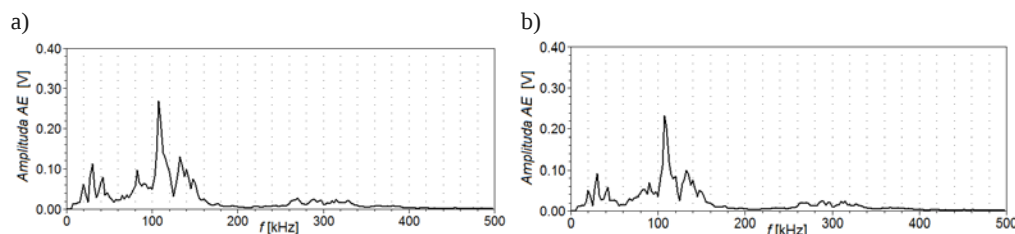
Rys. 2. Zmiany odchylenia standardowego surowego sygnału emisji akustycznej AE_{rms} podczas szlifowania z wydajnością $Q'_w = 1.5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ dla pracy: a) w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu ($v_w = 0.05 \text{ m/s}$); b) w optymalnych warunkach szlifowania ($v_w = 0.2 \text{ m/s}$)

Tak wyznaczone miary sygnałów, choć częściowo skorelowane z analizowanym zjawiskiem, mogą jednak zawierać informację pochodzącą z wielu innych zjawisk, występujących w różnych zakresach częstotliwościowych analizowanych sygnałów.

2.2. ANALIZA W DZIEDZINIE CZĘSTOTLIWOŚCI

W diagnostyce procesu szlifowania podstawową metodą analizy sygnałów w dziedzinie częstotliwości jest szybka transformata Fouriera FFT [9]. Wykorzystuje ona jako podstawę sinusoidalne funkcje okresowe, reprezentujące jedną częstotliwość. Powoduje to utratę informacji o czasie wystąpienia poszczególnych zdarzeń częstotliwościowych. Na rysunku 3 przedstawiono widmo częstotliwościowe surowego sygnału AE dla ściernicy ostrej, gdzie występują procesy wykruszania się

naruszonych ziaren lub mostków spoiwa bezpośrednio po procesie kondycjonowania ściernicy oraz dla ściernicy stępionej (zalepienie ściernicy).



Rys. 3. Widmo surowego sygnału AE podczas szlifowania z wydajnością $Q'_w = 1.5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ ($v_w = 0.2 \text{ m/s}$) dla: a) ściernicy ostrej (pierwszy cykl szlifowania); b) ściernicy stępionej (10 cykl szlifowania)

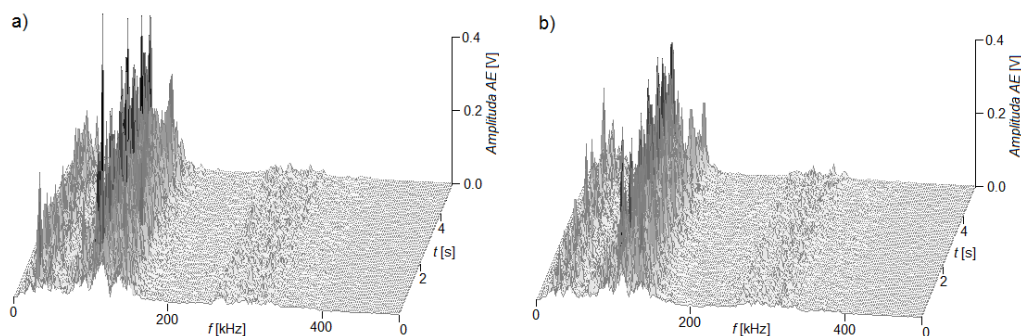
Widać, że amplituda uśrednionego widma surowego sygnału AE dla ściernicy ostrej jest tylko nieznacznie większa niż dla ściernicy zalepionej, chociaż chwilowe wartości amplitudy podlegają wyraźnym wahaniom. Jest to spowodowane uśrednianiem amplitudy sygnału w dziedzinie czasu, przez co występujące w sygnale krótkotrwałe zdarzenia, związane np. z wykruszaniem się ziaren ściernicy, mogą być niewidoczne w widmie FFT.

2.2. ANALIZA W DZIEDZINIE CZASU I CZĘSTOTLIWOŚCI

Aby pokonać wadę związaną z uśrednianiem amplitudy w dziedzinie czasu można zastosować krótko czasową transformatę Fouriera STFT (ang. Short Time Fourier Transform), w której wykonuje się transformatę Fouriera na sygnale okienkowanym w ramach analizowanego ciągu czasowego, przy czym okno jest przesuwane monotonicznie w czasie, przez co możliwe jest wychwycenie krótkotrwałych zmian widma sygnału w kolejnych chwilach czasu. O czułości tej metody decyduje głównie szerokość okna. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany widma surowego sygnału AE odpowiadające warunkom z rysunku 3. Widać, że dla ściernicy ostrej, bezpośrednio po procesie kondycjonowania, chwilowe wartości amplitudy podlegają wyraźnym zmianom i są większe niż dla ściernicy stępionej, co nie jest widoczne na wykresie uśrednionego widma sygnału AE przedstawionego na rysunku 3. Jednakże główną wadą transformaty STFT jest stała szerokość okna czasowego, co powoduje, że jakość informacji częstotliwościowej jest odwrotnie proporcjonalna do jakości informacji czasowej.

Metodą wolną od tej wady jest dyskretna DWT, bądź ciągła transformata falkowa CWT (ang. Discrete and Continuous Wavelet Transform). W metodach tych szerokość okien maleje wraz ze wzrostem analizowanych częstotliwości, przez co charakteryzują się one większą czułością niż transformata STFT. Obie metody są głównie

wykorzystywane do analizy sygnałów niestacjonarnych, takich jak sygnały drgań i emisji akustycznej. Główny obszar zastosowania transformat STFT i DWT obejmuje analizę sygnału AE w celu identyfikacji przypałów przedmiotu obrabianego, naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu, czy też identyfikacji zużycia narzędzia ściernego [13].

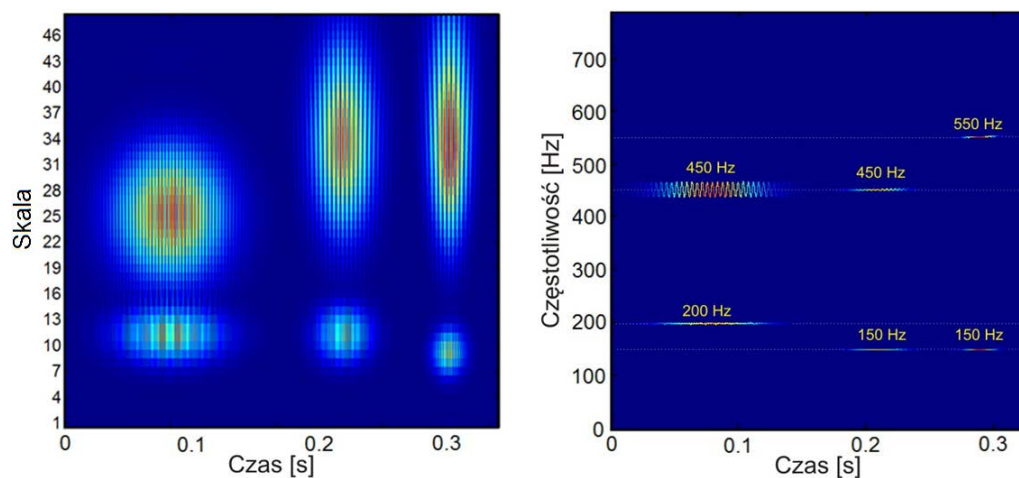


Rys. 4. Zmiany widma surowego sygnału AE podczas szlifowania z wydajnością $Q'_w = 1.5 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ ($v_w = 0.2 \text{ m/s}$) dla: a) ściernicy ostrej (pierwszy cykl szlifowania); b) ściernicy stępionej (10 cykl szlifowania)

Kolejną metodą przetwarzania sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości stosowaną w diagnostyce procesu szlifowania, pozwalającą ponadto analizować sygnały nieliniowe, jest transformata Hilberta-Huanga HHT (ang. Hilbert-Huang Transform) [4]. Metoda ta pozwala analizować sygnały, które mogą się zmieniać nawet w ramach jednego okresu oscylacji sygnału. Wykorzystuje ona dwie techniki przetwarzania sygnałów:

- empiryczną dekompozycję sygnału na nieliniowe składowe modalne (ang. Intrinsic Mode Functions IMF), przy czym w przeciwieństwie do typowych składowych harmonicznych funkcje te mogą posiadać zmienną amplitudę oraz częstotliwość w dziedzinie czasu,
- transformatę Hilberta, która wyznacza zmiany amplitudy i częstotliwości poszczególnych składowych modalnych w czasie.

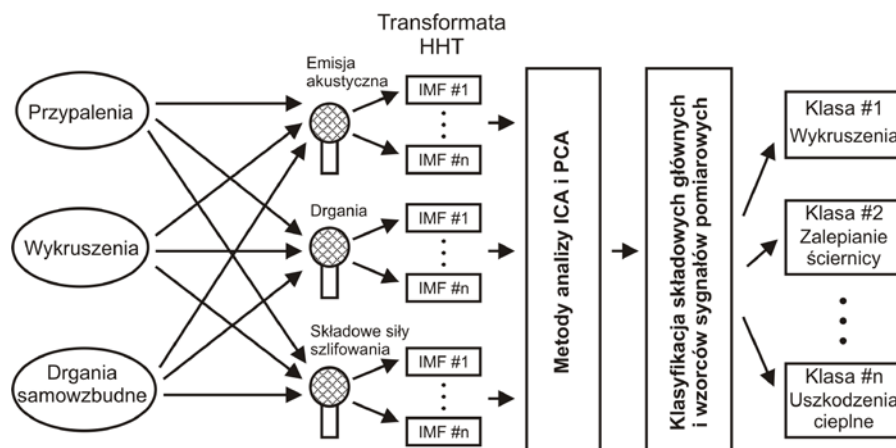
W celu zweryfikowania użyteczności transformaty falkowej i transformaty HHT stworzono sygnał testowy składający się z trzech par interferujących ze sobą narastających i malejących wykładniczo fal sinusoidalnych o różnych częstotliwościach i czasach trwania w celu symulacji długotrwałych i krótkotrwałych, gwałtownie narastających sygnałów, które mogą być znalezione w rejestrowanych przebiegach sygnału emisji akustycznej bądź sygnału drgań. Wyniki przetwarzania tego sygnału dla obu metod przedstawiono na rysunku 5. Widać, że transformata HHT pozwala na bardzo dokładną lokalizację energii zawartej w analizowanym sygnale w dziedzinie czas-częstotliwość.



Rys. 5. Widmo syntetycznego sygnału testowego z zastosowaniem ciągłej transformaty falkowej oraz transformaty HHT

3. STRUKTURA SYSTEMU DIAGNOSTYKI

Przedstawione metody przetwarzania sygnałów mogą być podstawą do budowy efektywnych systemów diagnostyki procesu szlifowania. Strukturę inteligentnego systemu wydobywania informacji z danych pomiarowych oraz diagnostyki stanu procesu szlifowania budowanego w Instytucie Obrabiarek i TBM PŁ przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Struktura automatycznego systemu wydobywania informacji z danych pomiarowych oraz diagnostyki stanu procesu szlifowania

Przedstawiony system wykorzystuje w pierwszej kolejności transformatę HHT w celu wyznaczenia kolejnych nieliniowych składowych IMF dla surowego sygnału emisji akustycznej, sygnału drgań oraz sygnałów składowych siły szlifowania. Składowe te zawierają informacje o chwilowej amplitudzie sygnału oraz jego chwilowych częstotliwościach. Dzięki zastosowaniu transformaty HHT wyznaczane są składowe zawierające skokowe zmiany amplitudy, pojawiające się np. podczas procesu wykruszania ziaren ściernych, jak również składowe zawierające powolne zmiany amplitudy, np. związane z rozwojem drgań samowzbudnych ściernicy lub jej zalepianiem. Dla poszczególnych składowych IMF wyznaczane są następnie wybrane cechy statystyczne obejmujące wartość maksymalną sygnału, wartość średnią, odchylenie standardowe, kurtozę, skośność rozkładu sygnału, itp. W następnej kolejności stosowana jest analiza składowych głównych oraz składowych niezależnych w celu zredukowania wymiaru zbioru cech sygnałów bez istotnego obniżenia poziomu informacji zawartej w zredukowanym zbiorze cech [1, 7, 11]. Ostatecznie przeprowadzana jest klasyfikacja wzorców sygnałów w celu ustalenia stanu procesu bądź parametrów wynikowych procesu szlifowania.

4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono i porównano wybrane metody przetwarzania sygnałów pomiarowych oraz przedstawiono budowany system diagnostyki procesu szlifowania kłowego wałków. Wydaje się, że najlepszym podejściem będzie zastosowanie metod przetwarzania w dziedzinie czasu i częstotliwości, np. transformaty HHT. Do budowy systemu diagnostyki planuje się zastosowanie metody hybrydowych, wykorzystujących nieliniowe wersje analizy składowych głównych lub analizy dyskryminacyjnej z metodami modelowania danych takimi jak sieci neuronowe bądź metody regresji. Zastosowanie takiego podejścia umożliwi budowę automatycznych systemów diagnostyki procesu szlifowania oraz jego efektywny nadzór.

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] BAIR E., HASTIE T., PAUL D., TIBSHIRANI R., *Prediction by supervised principal components*. W: Journal of the American Statistical Association. Vol. 101/473, 2006, 119-137.
- [2] CHEN X., GRIFFIN J., *Grinding acoustic emission classification in terms of mechanical behaviours*. W: Key Engineering Materials, Vol. 329, 2007, 15-20.

- [3] HUNDT W., LEUENBERGER D., REHSTEINER F., GYGAX P., *An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission (AE) technique*. W: Annals of the CIRP, Vol. 43/1, 1994, 295-298.
- [4] HUANG N., et al., *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis*. Proc. Roy. Soc. Lond., 1998.
- [5] HYVÄRINEN A., OJA E., *Independent component analysis: algorithms and applications*. W: Neural Networks, Vol. 13, 2000, 411-430.
- [6] INASAKI I., KARPUSZEWSKI B., LEE H., *Grinding chatter – origin and suppression*. W: Annals of the CIRP, Vol. 50/2, 2001, 515-535.
- [7] JOLLIFFE, I.T., *Principal Component Analysis*. Springer Verlag, New York, 2002.
- [8] KARPUSZEWSKI B., WEHMEIER M., INASAKI I., *Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors*. W: Annals of the CIRP, Vol. 49/1, 2000, 235-240.
- [9] KORBICZ J., KOŚCIELNY J.M., *Modelowanie, diagnostyka i sterowanie nadrzędne procesami*. Warszawa, WNT, 2009.
- [10] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., *A diagnostic system for cylindrical plunge grinding process based on Hilbert Huang transform and principal component analysis*. W: Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 34/3, 2010, 19-35.
- [11] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., WRĄBEL D., *Modelowanie zależności w procesie szlifowania kłowego wałków z wykorzystaniem metody analizy składowych głównych i drzew decyzyjnych*. W: Mechanik nr 8-9, 2012.
- [12] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., WRĄBEL D., SIKORA M., *Stanowisko do wieloaspektowego badania procesu szlifowania kłowego wałków*. W: Mechanik 8-9, 2013, 273-282.
- [13] LIAO T. W. TING C., QU J., BLAU P.J., *A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.47, 2007, 580-592.
- [14] LIAO T., *Feature extraction and selection from acoustic emission signals with an application in grinding wheel condition monitoring*. W: Journal Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 23/1, 2010, 74-84.
- [15] WEBSTER J., MARINESCU I., *Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding*. W: Annals of the CIRP, Vol. 43/1, 1994, 299-304.
- [16] WEGENER K., HOFFMEISTER H.-W., KARPUSCHEWSKI B., KUSTER F., HAHMANN W.-C., RABIEY M., *Conditioning and monitoring of grinding wheels*. W: Annals of the CIRP, Vol. 60/2, 2011, 757-777.