

	Organizatorzy: Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Zastosowanie wzorców sygnału emisji akustycznej do identyfikacji wybranych gatunków ziaren ściernych w procesie ich dekohezji

The use of acoustic emission signal patterns to identify the selected types of abrasive grains in the process of decohesion

PAWEŁ SUTOWSKI
KRZYSZTOF NADOLNY *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.393

W artykule przedstawiono wyniki badań nad charakterystyką zjawiska dekohezji ziaren ściernych z zastosowaniem wzorców sygnału emisji akustycznej. Na podstawie zarejestrowanych impulsów sygnału emisji akustycznej wyselekcjonowano składowe harmoniczne, charakterystyczne dla danego gatunku ziarna ściernego. Metoda, przez analizę porównawczą i stopień podobieństwa do wzorca, pozwala określać typ ziarna, który uległ dekohezji. Zaproponowana technika może być wykorzystana w systemach, gdzie istotny jest proces nadzorowania pęknięcia i wykruszania wierzchołków aktywnych ziaren ściernych.

SŁOWA KLUCZOWE: ziarna ściernie, kruche pęknięcie, emisja akustyczna, analiza sygnałów

The article presents the results of basic research focused on the decohesion phenomenon characteristics of selected abrasive grains using acoustic emission signal patterns. On the basis the recorded signals, and their detailed analysis in the time-frequency domain, the characteristic harmonic components were selected. The method developed for estimating the similarity of the harmonic sequences, allows to use the comparative analysis and the degree of similarity of acoustic emission signal patterns to determine the type of grain in decohesion process by the external force or stress field leads. The proposed technique of grain recognition can be used in grinding wheel wear diagnostic systems, especially in cases where it is significant to supervision and control of cracking and chipping abrasive grain vertices.

KEYWORDS: abrasive grains, brittle fracture, acoustic emission, signal analysis

tion, signal analysis

Poszerzanie stanu wiedzy dotyczącej zjawisk podstawowych w procesach szlifowania następuje głównie na drodze badań i analiz procesu mikroskrawania pojedynczym mikroostrzem w tak zwanym teście rysy (ang. *scratch test*). Elementarne zjawiska towarzyszące procesowi mikroskrawania materiałów decydują o przebiegu tego procesu, jego energochłonności, mikrogeometrii i stanie warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego oraz zużyciu ostrza skrawającego (ziarna ściernego) [6, 14]. Jednak stosując najnowsze rozwiązania z zakresu monitorowania i diagnostyki takich procesów (w tym analizę sygnału emisji akustycznej) rejestrowane są sygnały pochodzące zarówno od narzędzia, przedmiotu obrabianego, jak i urządzeń stanowiska badawczego. W celu wyizolowania sygnałów pochodzących wyłącznie od ziaren ściernych w opisywanych pracach badawczych podjęto próbę analizy zjawiska dekohezji ziaren w metodyce jednoosiowego ściskania. Z jednej strony, zastosowana metoda obciążania statycznego ziaren tylko pośrednio odpowiada warunkom rzeczywistych procesów pęknięcia ziaren w dynamicznym procesie kontaktu aktywnych wierzchołków skrawających z powierzchnią obrabianego materiału. Z drugiej zaś, umożliwia analizę sygnałów pochodzących wyłącznie od jednego ośrodka (pękających ziaren ściernych), przy wyeliminowaniu wielu dodatkowych sygnałów, pozwalając na precyzyjną identyfikację zjawisk elementarnych badanego procesu.

Ziarna ściernie poddane badaniom należą do materiałów ceramicznych, które zaliczają się do niemetalowych materiałów inżynierskich scharakteryzowanych w wielu pracach poświęconych materiałoznawstwu [2, 4, 5]. Według tych prac, tlenki aluminium mają wysoką twardość i związaną z tym odporność na ścieranie, ale umiarkowaną wytrzymałość, natomiast węgiel krzemu charakteryzuje się wysoko-

* dr inż. Paweł Sutowski (pawel.sutowski@tu.koszalin.pl), dr hab. inż. Krzysztof Nadolny, prof. PKO (krzysztof.nadolny@tu.koszalin.pl)

temperaturową wytrzymałością i odpornością na ścieranie. Twardość, z kolei, jest tą cechą materiału, która może być odniesiona do miary wytrzymałości na kruche pęknięcie.

Kruchość materiałów ceramicznych wynika przede wszystkim z charakteru wiązań i ich budowy mikrostrukturalnej [4]. Odporność na pęknięcie może być interpretowana jako tolerancja materiału na nieciągłości mikrostruktury lub na obecność defektów w postaci już istniejących mikropęknięć. Kruchość, jako wielkość fizyczna charakteryzująca dany materiał, może być interpretowana jako stosunek wytrzymałości na rozciąganie R_m do wytrzymałości na ściskanie R_c , przy którym następuje rozkruszenie. W przypadku materiałów ceramicznych, do których zaliczają się badane ziarna ścierne, relacja ta wynosi 1:15 [1].

Kruche pęknięcie ma związek z tzw. wiążkością materiału (ang. *toughness*) G_c . Określa ona podatność materiału na pęknięcie, odpowiadającą energii pochłanianej w czasie powstawania pęknięcia niszczącego materiał. Odporność na kruche pęknięcie (ang. *fracture toughness*) określana jest wartością krytycznego współczynnika intensywności naprężenia (K_{Ic}) [1]:

$$G_c = \frac{K_{Ic}^2}{E(1+\nu)}, \text{ kJ/m}^2, \quad (1)$$

$$K_{Ic} = Y\sigma_c\sqrt{\pi c}, \text{ MN/m}^{1/2} (= \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}), \quad (2)$$

gdzie: Y – współczynnik kształtu (bliski jedności, zależny od geometrii kształtu), E – moduł Younga, ν – liczba Poissona, σ_c – naprężenie, przy którym rozpoczyna się pęknięcie materiału kruchego zawierającego pęknięcie o długości $2c$.

Obie grupy analizowanych materiałów (tlenki glinu i węgliku krzemu) wykazują zbliżony opór materiału przeciw pękaniu: $G_c = 0,05 \text{ kJ/m}^2$, $K_{Ic} = 2\text{--}5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ [1].

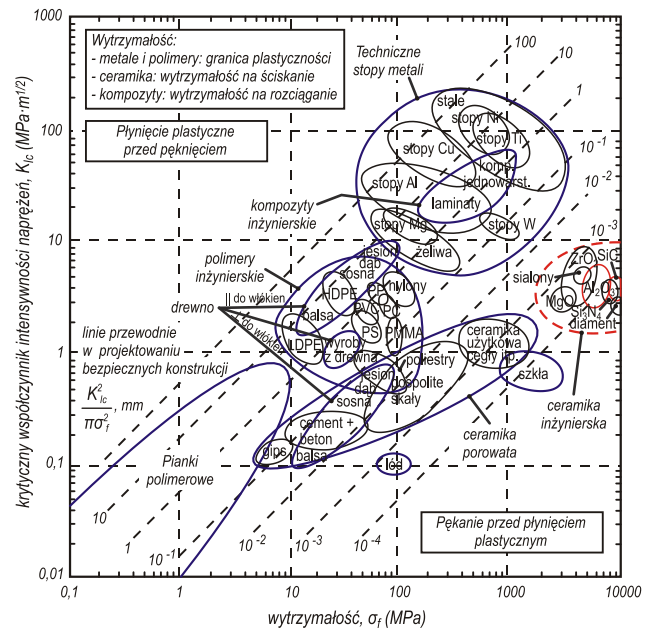
Wykres reprezentujący krytyczny współczynnik intensywności naprężenia w zestawieniu z wytrzymałością różnych grup materiałów (rys. 1), wskazuje na tendencję wzrostu odporności na kruche pęknięcie wraz z wytrzymałością materiału. W procesie szlifowania, mikroskrawanie odbywa się przez kontakt aktywnego wierzchołka ziarna ściernego z materiałem obrabianym. Koncentracja naprężeń w okolicy wierzchołka aktywnego wywołuje powstanie strefy, gdzie następują mikropęknięcia, opór i siły tarcia. Ilość rozproszonej energii zależy od wielkości strefy odkształcenia d_y [1]:

$$d_y = \frac{K_{Ic}^2}{\pi\sigma_f^2}, \text{ mm.} \quad (3)$$

gdzie: σ_f – wytrzymałość na ściskanie/rozciąganie lub granica plastyczności (MPa).

Wielkość strefy odkształcenia (linie przerywane na wykresie – rys. 1) zmienia się w bardzo szerokim zakresie: od 0,0001 mm (dla materiałów bardzo kruchych) do 100 mm (dla plastycznych metali). Z analizy wykresu na rysunku 1 wyraźnie wynika, że badane ziarna ściernie należą do materiałów wytrzymałych na ściskanie, ale również bardzo kruchych.

Zbliżone właściwości materiałów skrawnych, a w szczególności względnie niewielkie różnice w wartościach parametrów charakterystycznych, takich jak współczynnik intensywności naprężeń oraz wytrzymałość na ściskanie, powodują, że odróżnienie ziaren przez analizę procesu kruchego pęknięcia może być trudne.



Rys. 1. Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń w zestawieniu z wytrzymałością różnych grup materiałów [1]

Rejestracja fal naprężeń, generowanych przez pęknięcia i mikropęknięcia, wymaga opracowania specjalnej metody, ściśle ukierunkowanej na identyfikację zjawisk charakterystycznych dla danego gatunku ziarna ściernego.

Metodyka identyfikacji ziaren ściernych

Ziarna ściernie poddane badaniom należą do materiałów ceramicznych. Są to: polikrystaliczny topiony tlenek glinu Al_2O_3 (elektrokorund szlachetny 99A), azotko-tlenek glinu AION (producent: Alteo Gardanne, nazwa handlowa: Abra[®]), mikrokrystaliczny korund spiekany (wytwarzany w technologii Sol-Gel, producent: Norton Company, nazwa handlowa: SG[™]) oraz zielony węglik krzemu (99C) [8, 9].

Rozróżnienie rodzaju ziarna ulegającego zniszczeniu katastroficznemu jest trudne, gdyż wszystkie badane ziarna należą do grupy materiałów ceramicznych, które mają zbliżony charakter pęknięcia kruchego. Metodyka analizy sygnału wymagała więc zastosowania wieloetapowego przetwarzania sygnałów emisji akustycznej (AE, ang. *acoustic emission*).

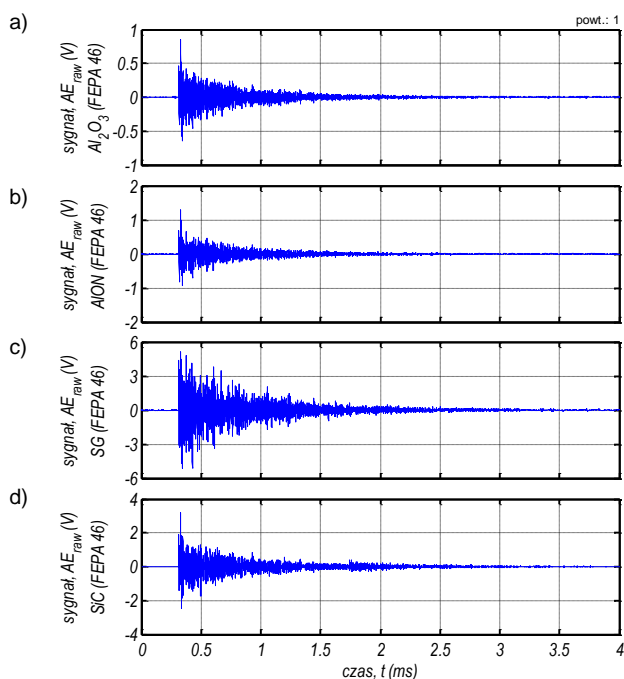
Wstępna część analizy polegała na przygotowaniu sygnału do dalszych badań, w wyniku czego uzyskiwano impuls emisji akustycznej odzwierciedlający pęknięcie ziarna, pozbawiony składowej stałej DC napięcia i wyrównywany z innymi próbkami z użyciem korelacji wzajemnej (krzyżowej) [13]:

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y^*(n-k), \quad (4)$$

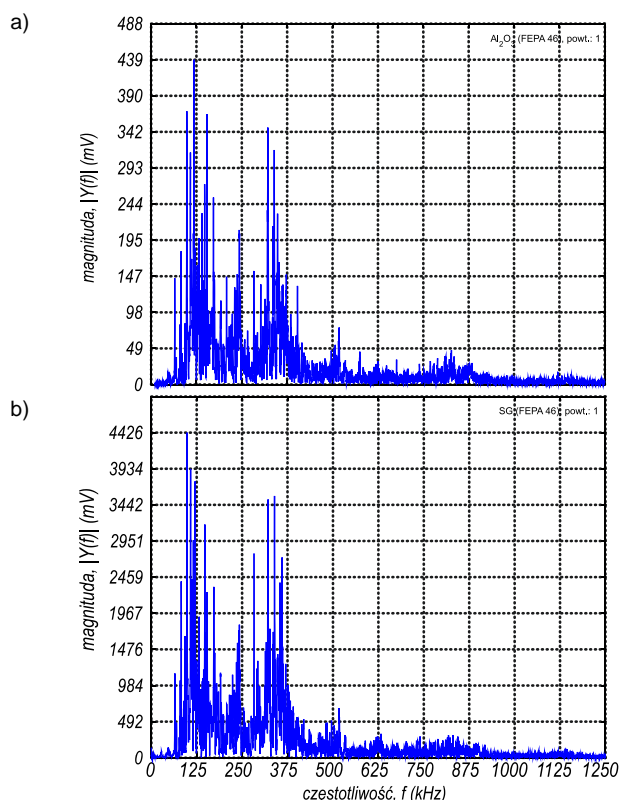
gdzie: R_{xy} – iloczyn skalarny dwóch sygnałów w funkcji przesunięcia jednego z nich, k – przesunięcie (opóźnienie) sygnału, n – numer próbki sygnału, $x()$ – wartość próbki sygnału x , y^* – sprzężenie zespolone próbki sygnału y , N – liczba próbek.

Zasadnicza część tego etapu składała się z wyznaczenia charakterystyki w dziedzinie czasu i częstotliwości. Dla każdej próbki obliczono spektrum amplitudowe (z zastosowaniem dyskretnej transformaty Fouriera, DFT), spektrum fazowe oraz spektrogram (widma amplitudowe sygnału dla każdej chwili czasu t).

z dużą energią (mikrokryształiczny korund spiekany, węglík krzemu) oraz ziarna o blisko pięciokrotnie mniejszej energii (elektrokorund szlachetny, azotko-tlenek glinu).



Rys. 3. Przykładowe impulsy emisji akustycznej (AE_{raw}) zarejestrowane podczas pęknięcia ziaren ściernych w przypadku: a) Al_2O_3 , b) AION, c) SG^{TM} , d) SiC

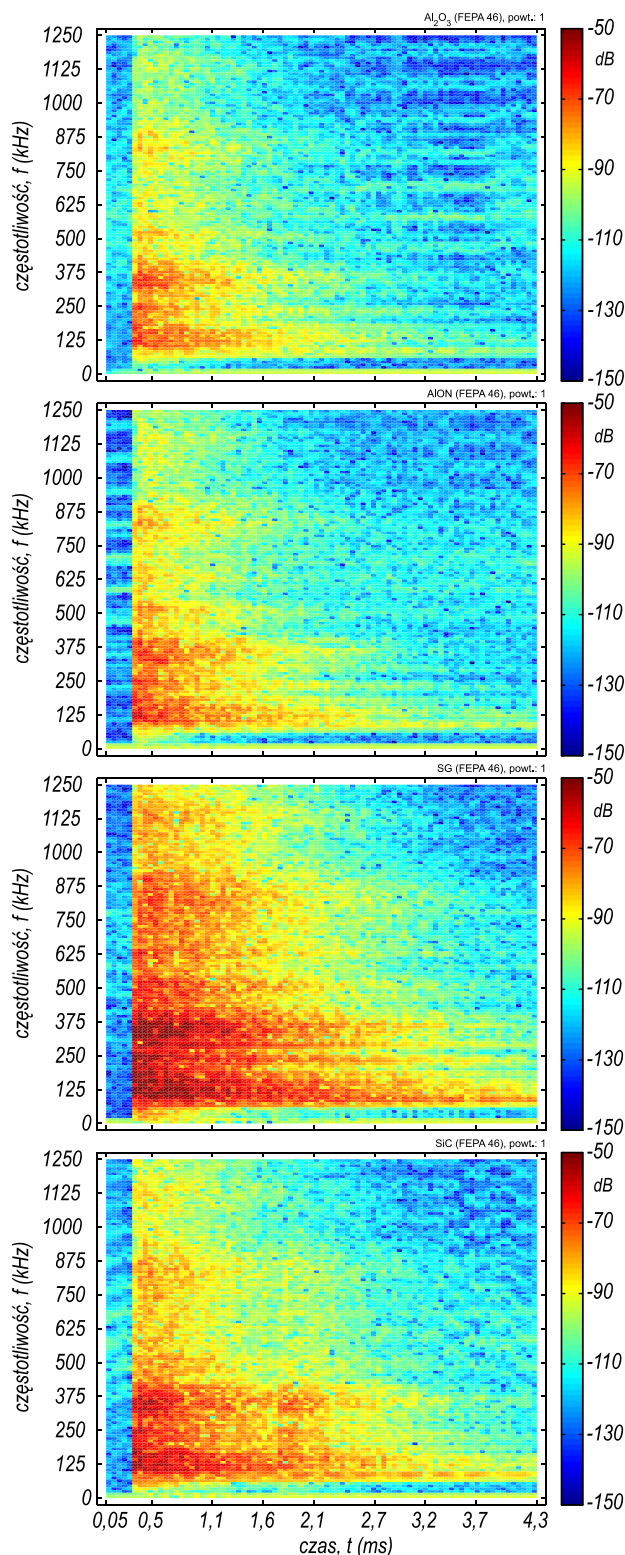


Rys. 4. Przykładowe widma amplitudowe (dyskretna transformata Fouriera, dl. transf.: 2^{14} próbek) impulsów akustycznych w przypadku ziaren pękających ze skrajnie różną energią: a) Al_2O_3 , b) SG^{TM}

Otrzymane wykresy widma amplitudowego są zatem charakterystyczne dla sygnałów dolnopasmowych, dla których gęstość widmowa maleje do zera wraz ze wzrostem pulsacji do nieskończoności. Stąd też, w uśrednionej analizie, zrealizowanej za pomocą transformaty Fouriera, ujawnia się wyraźna przewaga niskich częstotliwości (50–500 kHz).

Największe natężenie posiadają składowe harmoniczne w przedziale od 100 do 400 kHz. W tym przedziale, główny udział mają składowe 120, 240 oraz 360 kHz – rys. 4.

Transformata Fouriera reprezentuje uśrednione widmo sygnału (z całej próbki) emisji akustycznej dekohezji ziaren ściernych, niezależnie od czasu trwania rejestrowanego zjawiska. Spektrogramy (rys. 5) ujawniają natomiast, że wraz z upływem czasu impulsy AE pęknięcia ziaren ściernych

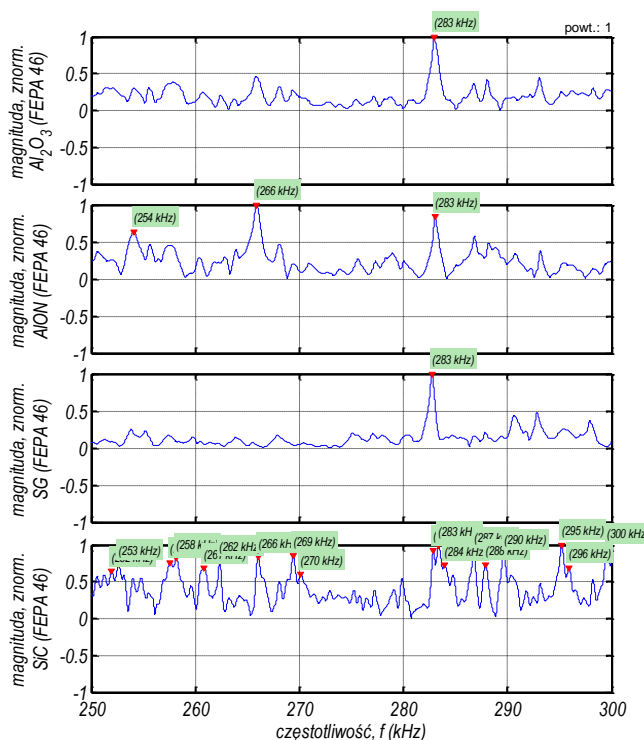


Rys. 5. Przykładowe spektrogramy analizowanych sygnałów (okno czasowe Hamminga, dl. okna: 256, liczba nakładających się próbek sąsiednich segmentów: 50%) dla impulsów akustycznych pęknięcia ziaren: a) Al_2O_3 , b) AION, c) SG^{TM} , d) SiC

nych charakteryzują się zanikaniem kolejnych częstotliwości. Składowe są tłumione w różnym tempie, odwrotnie proporcjonalnie do częstotliwości. Po 1-2 μs wytłumione są wysokie częstotliwości (powyżej 1000 kHz), po 2-3 μs częstotliwości średnie (500–875 kHz). Niskie częstotliwości (do 375 kHz), charakteryzują się najwyższą amplitudą i występują w sygnale najdłużej. Po 2 μs ich energia jest wytłumiona o -90 dB lub mniej.

■ Wzorce częstotliwościowe sygnałów

W celu wyznaczenie wzorców impulsów AE przeznaczonych do identyfikacji różnych gatunków ziaren ściernych w procesie ich dekohezji zastosowano szczegółową dekompozycję sygnału emisji akustycznej w dziedzinie częstotliwości. Przykładowe wartości bezwzględne amplitudy dla poszczególnych harmonicznych, w zakresie wartości znormalizowanych, zaprezentowano na rys. 6.



Rys. 6. Przykład harmonicznych impulsu emisji akustycznej pęknięcia ziaren wyznaczonych w wąskim przedziale częstotliwości (250–300 kHz) za pomocą transformaty świergotowej – zaznaczone składowe przekraczają umowną granicę 60% wartości znormalizowanej

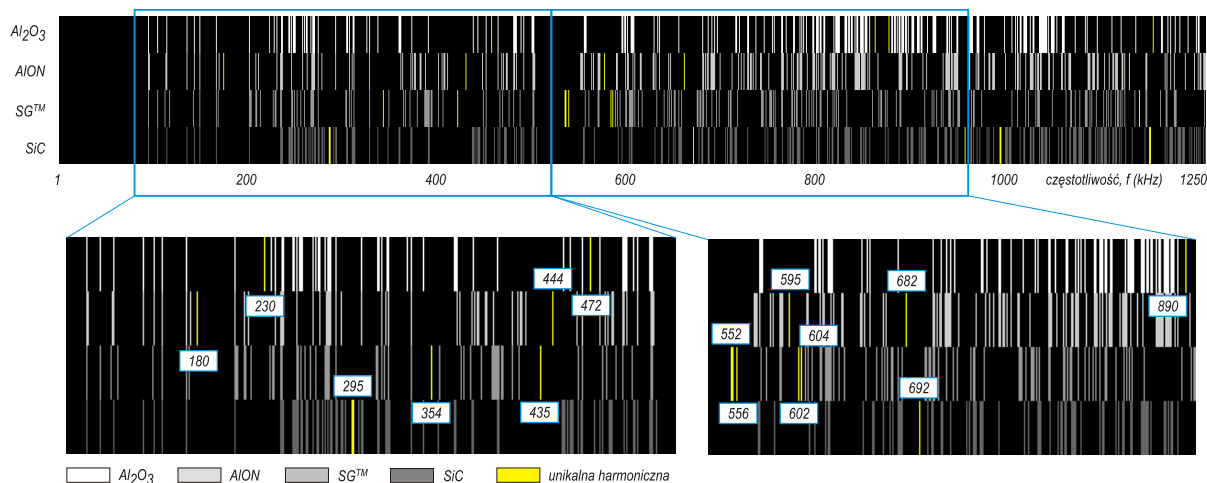
Metodyka wyszukiwania specyficznych składowych sygnału uwzględniała wybór tych częstotliwości, dla których magnituda osiągała wartość 60% lub więcej wartości maksymalnej. W ten sposób udało się wyselekcjonować składowe harmoniczne sygnału AE, które występują w procesie pęknięcia danego ziarna ściernego i jednocześnie ich moc jest większa od tła sygnału, dla kolejnych przedziałów całego widma.

Analizy tej oraz wskazania częstotliwości charakterystycznych dokonano dzieląc pełne widmo sygnału emisji akustycznej (1–1250 kHz) na wąskie pasma o szerokości 50, 40, 20 lub 10 kHz, w zależności od zagęszczenia liczebności harmonicznych spełniających warunek wysokości amplitudy. Na rys. 6 zaprezentowano powiększone widmo amplitudowe w zakresie 250–300 kHz. W tym przypadku, w paśmie o szerokości 50 kHz największej składowych (około 18 pozycji) wyróżniono dla ziarna SiC. Zdecydowanie mniej, bo zaledwie 3, dla ziarna AION. Pojedyncze harmoniczne wskazano w przypadku pozostałych analizowanych materiałów – Al_2O_3 i SG.

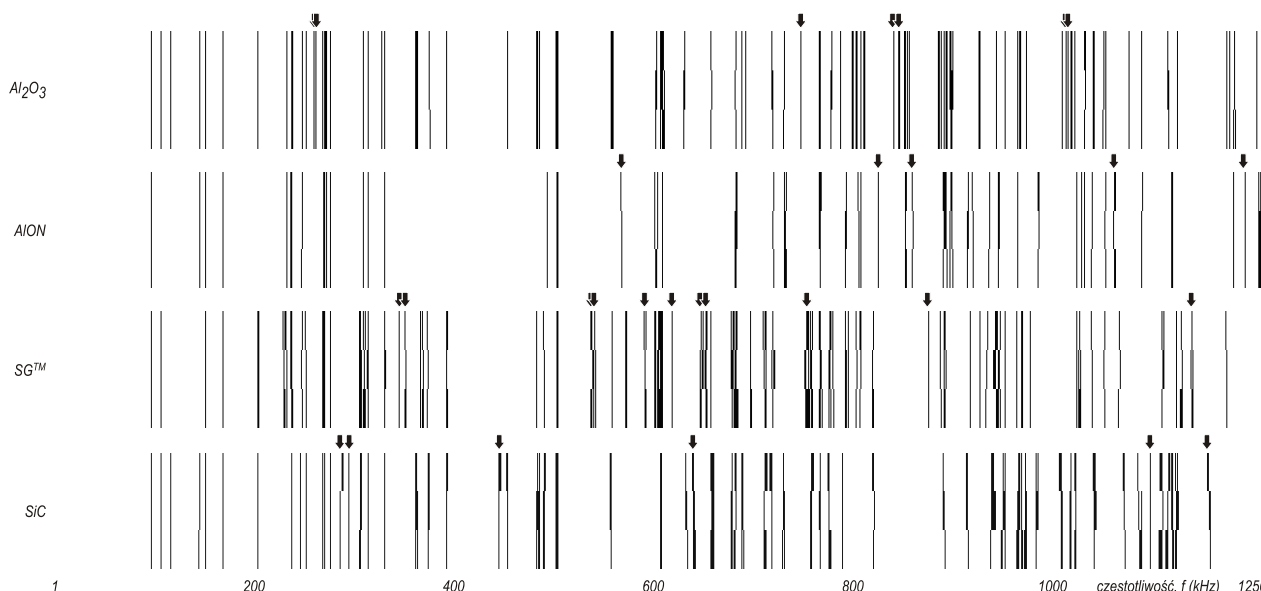
Kolejne wyniki badań dowiodły, że opisana tendencja nie jest zachowana dla każdego analizowanego wycinka pasma widma amplitudowego sygnału AE. Ilość charakterystycznych składowych harmonicznych wyraźnie zależy od analizowanego zakresu częstotliwości, a w mniejszym stopniu od gatunku ziarna ściernego. W generalnym ujęciu pełnego widma sygnału AE, największą liczbę wyselekcjonowanych harmonicznych zaobserwowano dla ziarna mikrokryształicznego korundu spiekane go SG, a najmniejszą dla polikryształicznego topionego tlenku glinu Al_2O_3 .

Na rys. 7 zaprezentowano sekwencje częstotliwości charakterystycznych dla procesu pęknięcia z podziałem na badane gatunki ziarna ściernego. Na czarnym tle umieszczono markery odpowiadające konkretnej częstotliwości (z rozdzielczością do 1 kHz). Przykład ten dotyczy pojedynczej próby badań eksperymentalnych. Analiza przedstawionych wzorców wskazuje na nierównomierny (dla danego ziarna) i niejednorodny (różne ziarna) rozkład wyróżnionych składowych harmonicznych sygnału emisji akustycznej w procesie kruchego pęknięcia ziaren ściernych.

Pomimo wyraźnych różnic, wiele ze składowych o danej częstotliwości zostało wyselekcjonowanych z sygnału jednocześnie w przypadku badań dwóch lub więcej gatunków ziaren ściernych. W celu uniknięcia niejednoznaczności w procesie identyfikacji ziarna ulegającego dekohezji, algorytm budowy wzorca oddzielił do dalszych analiz podzbiory



Rys. 7. Reprezentacja graficzna składowych sygnału emisji akustycznej o amplitudzie powyżej 0,6 wartości maksymalnej, w tym harmoniczne unikalne (oznaczone kolorem żółtym) w przypadku pojedynczego powtórzenia badań dekohezji ziarna ściernego



Rys. 8. Reprezentacja graficzna wzorców impulsów emisji akustycznej dekohezji ziarna ściernego wraz z oznaczeniem unikalnych sekwencji harmonicznych sygnału z uwzględnieniem powtórzeń badań eksperymentalnych

reprezentatywnych składowych harmonicznych – występujących wyłącznie w przypadku danego ziarna ściernego. Wybrane tą metodą składowe sygnału AE wyróżniają dany proces pęknięcia ziarna na tle pozostałych przypadków.

Aby opracowane wzorce impulsów emisji akustycznej mogły być wykorzystane w procesie monitorowania pęknięcia oraz do identyfikacji ziarna ściernego, przeszukano przestrzenie wszystkich alternatywnych rozwiązań (kolejnych próbek sygnałów zarejestrowanych w powtórzeniach badań eksperymentalnych) w celu selekcji harmonicznych sygnału właściwych dla danego gatunku ziarna. Wyniki tych analiz zaprezentowano na rysunku 8.

Reprezentacja graficzna wzorców impulsów emisji akustycznej dekohezji ziarna ściernego wskazuje wyłącznie na te częstotliwości, które występują w sygnale niezależnie od numeru powtórzenia badań eksperymentalnych. Dodatkowo nad sekwencją wyróżnionych częstotliwości oznaczono unikalne harmoniczne (strzałki na rys. 8), które, jak można przypuszczać, z dużym prawdopodobieństwem charakteryzują proces pęknięcia danego gatunku ziarna ściernego. Ich występowanie w widmie sygnału AE jest ściśle powiązane z danym gatunkiem ziarna, co oznacza że także z jego budową, głównie mikrostrukturą powstałą w wyniku procesu technologicznego wytwarzania.

Wnioski

Kruche katastroficzne pęknięcie ziaren ściernych, spowodowane przez obciążenie mechaniczne, stanowi źródło fali naprężeń, która może być zarejestrowana w postaci impulsu emisji akustycznej.

Zaprezentowane wyniki badań wykazały, że określenie różnic między właściwościami mechanicznymi materiałów ceramicznymi, do których zaliczają się analizowane ziarna ściernie, jest możliwe metodami statycznymi i z zastosowaniem wyłącznie sygnału emisji akustycznej. Analiza składowych harmonicznych tego sygnału pozwoliła określić wzorce odpowiadające unikalnym cechom poszczególnym gatunkom ziaren ściernych.

Zaproponowane wzorce mogą być wykorzystane w systemach monitorowania i diagnostyki procesów, dla których

przewidziano istotność nadzorowania pęknięcia i wykruszania wierzchołków aktywnych ziaren ściernych.

LITERATURA

1. Ashby M.F., Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim. Wydanie polskie pod red. S. Wojciechowskiego. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1998. ISBN: 83-204-2167-5.
2. Dobrzański L.A., Nietalowe materiały inżynierskie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008. ISBN: 978-83-7335-516-3.
3. Izidorczyk J., Płonka G., Tyma G., Teoria sygnałów. Wstęp. Kompendium wiedzy na temat sygnałów i metod ich przetwarzania. Wydanie 2. Helion, Gliwice, 2006. ISBN: 83-246-0401-4.
4. Kaczorowski M., Krzyńska A., Konstrukcyjne materiały metalowe, ceramiczne i kompozytowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2008. ISBN: 978-83-7207-761-5.
5. Kucharczyk W., Mazurkiewicz A., Żurowski W., Nowoczesne materiały konstrukcyjne. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo: Politechnika Radomska, Radom, 2011. ISBN: 978-83-7351-354-9.
6. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Inasaki I., Tribology of abrasive machining processes. William Andrew, Norwich, 2004.
7. Martin G.D., Chirp Z-Transform Spectral Zoom Optimization with MATLAB. Sandia National Laboratories, 2005-7084, report printed November 2005.
8. Nadolny K., Wytwarzanie, właściwości i zastosowanie ziaren ściernych z mikro- i submikrokryształicznego korundu spiekane. Mechanik, 10, 850-857, 2012.
9. Nadolny K., Sutowski P., Herman D., Badania właściwości mechanicznych nowej generacji ziaren ściernych z azotko-tlenku glinu AlON z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej. Mechanik 08/09, 663, 2012. [Dokument elektroniczny, 375-390].
10. Rabiner L.R., The Chirp z-Transform Algorithm - A Lesson In Serendipity, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 21, No. 2, 118-119, 2004.
11. Rabiner L.R., Schafer R.W., Rader C.M., The Chirp z-Transform Algorithm. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, Vol. AU-17, No. 2, 86-92, June 1969.
12. Stoica P., Moses R., Spectral Analysis of Signals. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 2005. ISBN 0-13-113956-8.
13. Zieliński T., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005. ISBN 83-206-1596-8.
14. Xu X., Yu Y., Huang H., Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys. Wear, 255/7-12, 1421-1426, 2003.