

Wykorzystanie techniki emisji akustycznej w praktyce badawczej

Streszczenie. *Prezentowana praca przedstawia w ogólnym zarysie zakres praktycznych zastosowań nieniszczącej metody badawczej wykorzystującej możliwości pomiaru emisji akustycznej. Istota tej techniki polega na rejestrowaniu sygnałów akustycznych (ultradźwiękowych) generowanych samoistnie lub pod wpływem niezależnego bodźca bez ingerencji w badany układ. Omówiono także parametry mierzone przy zastosowaniu techniki emisji akustycznej.*

Słowa kluczowe: emisja akustyczna, przemiany fazowe, ultradźwięki

Wstęp

"Jeśli chcesz sprawdzić czy siarka jest dobra czy zła, weź kawałek siarki i przyłóż do ucha. Jeśli siarka przy nacisku trzeszczy jest dobra, ale jeśli pozostaje ona cicha i nie trzeszczy to zła siarka" (Codex Germanicus, 1350).

Technika emisji akustycznej (EA) polega na rejestrowaniu fal sprężystych, będących efektem wyzwolenia (pod wpływem pewnych bodźców np. obciążenia zewnętrznego, działania środowiska otoczenia, naprężeń wewnętrznych itp.) energii zawartej w materiale. Pomiar takich impulsów mogą być dogodną metodą monitorowania procesów niszczenia materiałów, wykrywania wad i defektów wewnętrznych, obserwowania reakcji chemicznych, korozji, przemian strukturalnych i przejść fazowych, w badaniach górotworów oraz detekcji jakichkolwiek zjawisk wywołujących powstawanie fal akustycznych lub ultradźwiękowych w materiałach fizycznych i urządzeniach np. elektrotechnicznych [1, 2].

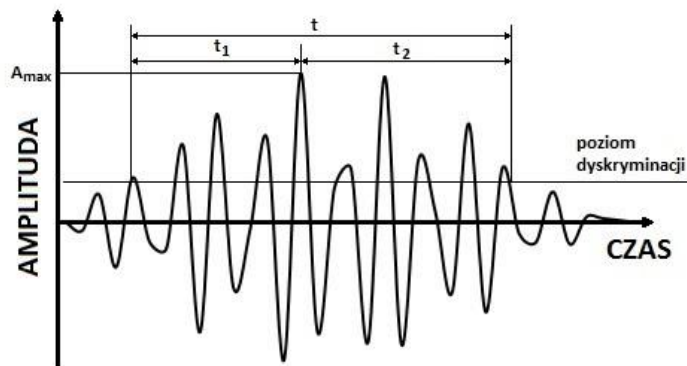
Istota pomiaru metodami EA polega na wychwyceniu drgań, które wyzwalane są w badanym obiekcie. Czujnik akustoelektryczny (najczęściej ceramika piezoelektryczna np. typu PZT) przetwarza takie drgania na sygnał napięciowy, który następnie może być poddawany dalszej obróbce – wzmacnianiu, kształtowaniu, rejestrowaniu i sumowaniu impulsów o odpowiedniej charakterystyce.

W wyniku analizy zarówno ilości sygnałów emisji akustycznej, jak i ich charakterystyk można uzyskać informację dotyczącą procesów zachodzących w badanym materiale pod działaniem obciążenia lub innych czynników zewnętrznych i wewnętrznych. Badania metodą EA mogą być prowadzone w sposób ciągły i długotrwały w miejscu występowania źródła sygnałów.

Mierzone parametry emisji akustycznej

Na rysunku 1 przedstawiony został przykład pojedynczego impulsu EA i jego parametry. Kształt i charakter sygnałów EA zarejestrowanych przez odbiornik akustyczny zależy od procesu zachodzącego w źródle, od rodzaju i właściwości ośrodka, w którym propaguje się sygnał, a także od właściwości kanału pomiarowego. W związku z tym sygnał elektryczny EA zawiera wiele informacji niepotrzebnych dla charakterystyki źródła EA i zjawisk tam zachodzących. Dlatego wydziela się sygnał elektryczny EA, informacje o procesach zachodzących w nim, przez wybranie pewnych określonych

parametrów sygnału EA i badając ich zależności od czasu i innych parametrów zewnętrznych.



Rys. 1. Parametry impulsu EA; t - czas trwania impulsu, t_1 – czas narastania, t_2 – czas zaniku, A_{max} – wartość szczytowa.

Podstawowy schemat blokowy układu do rejestracji i analizy emisji akustycznej przedstawiony jest na rys. 2. Sygnały elektryczne po wyjściu ze wzmacniacza można zazwyczaj dodatkowo także obejrzeć na ekranie oscyloskopu lub zapisać w pamięci. Jest to uzupełnienie informacji otrzymanych z ekranu analizatora.



Rys. 2. Schemat pomiarowy wykorzystywany w technice emisji akustycznej.

Najważniejszymi parametrami pomiarowymi techniki EA są:

- suma impulsów emisji akustycznej $\sum N$ - zliczenie wszystkich impulsów, których amplituda przekracza przyjęty poziom dyskryminacji, w pełnym czasie pomiaru,
- tempo impulsów emisji akustycznej $N/\Delta t$ - zliczenie w przyjętym przedziale czasowym (np. 0.1 s) kolejnych amplitud sygnałów, przekraczających poziom dyskryminacji,
- wartość skuteczna sygnału elektrycznego (U_{RMS}) - uśredniona wartość sygnału napięciowego przetworzonego z sygnału akustycznego

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt},$$

gdzie $u(t)$ - chwilowa wartość sygnału napięciowego.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Te trzy parametry pomiarowe są podstawowymi wielkościami mierzonymi w technice EA. Ponadto brane są pod uwagę:

- widmo częstotliwościowe sygnału EA - udział poszczególnych częstotliwości w wytworzonym przez źródło sygnale akustycznym,
- widmo amplitudowe - zależność między częstotliwością występowania impulsów EA od źródła o amplitudzie przekraczającej wartość przyjętego progu dyskryminacji,
- maksymalna amplituda sygnału - największa amplituda pojedynczego sygnału lub ciągu sygnałów,
- suma zdarzeń akustycznych - zliczane są obwiednie sygnałów, a nie pojedyncze impulsy przy przyjętym progu dyskryminacji.

Zakres zastosowań emisji akustycznej

Zjawisko emisji akustycznej można obserwować w bardzo szerokim zakresie częstotliwości, od ułamków Hz do 100 MHz. Powoduje to duże trudności pod względem eksperymentalnym zwłaszcza w obszarze wysokich częstotliwości. Istotne sygnały są często bardzo słabe i zakłócone przez szумы. Dlatego w układzie pomiarowym stosuje się różnego rodzaju filtry wycinające szумы oraz wzmacniacze kształtujące mierzony sygnał, a także odpowiednie izolacje akustyczne badanego obiektu i urządzenia pomiarowego. Najczęściej do analizy EA konieczny jest pomiar impulsów o czasie trwania od mikrosekund do dziesiątych części sekundy. Przetwornik EA jest zazwyczaj umieszczany na powierzchni badanego obiektu lecz czasami istnieje konieczność umieszczenia go wewnątrz. W pewnych sytuacjach konieczne jest wyprowadzenie sygnału z obszaru bardzo wysokich lub bardzo niskich temperatur. W rezultacie rejestrowany sygnał jest zniekształcony przez tłumienie lub wielokrotne odbicia od różnorodnych grani, a pomiar emisji akustycznej staje się metodą jakościową. Nie obniża to jednak przydatności tej techniki pomiarowej, zwłaszcza ze względu na nieniszczący jej charakter.

Źródłami EA między innymi są:

- w ciałach krystalicznych ruch dyslokacji, poślizgi na granicach ziaren,
- łączenie się dyslokacji, powstawanie szczelin i ich rozwój, pękania,
- przemiany fazowe w strukturze krystalicznej materiału,
- praca urządzeń mechanicznych, elektrycznych, wyładowania elektryczne itp.,
- ruchy górotworu,
- zjawiska magnesowania w materiałach ferromagnetycznych,
- dynamiczne zjawiska w materiałach nadprzewodzących,
- niektóre procesy biologiczne.

Wszystkie te procesy mają swoje własne charakterystyczne cechy, które znajdują swoje odbicie w emitowanych sygnałach EA. Rejestrowanie i analiza tych sygnałów może dostarczyć wielu informacji, a co więcej nie następuje w tym przypadku żadna ingerencja w badany układ.

Pęknięcie w konstrukcjach technicznych

Zjawisko emisji akustycznej umożliwia śledzenie rozwoju uszkodzeń w obiektach konstrukcji technicznych (zbiorniki, rurociągi, konstrukcje stalowe i żelbetowe). Jest to najczęściej spotykane praktyczne zastosowanie techniki EA. Przykładem tego są badania zbiorników magazynowych umożliwiające oszacować ich stan techniczny bez opróżniania zbiornika oraz zlokalizować wady i uszkodzenia (pęknięcia, deformacje i inne słabe punkty, miejsca degradacji powstałe w wyniku korozji materiału, miejsca tarcia o siebie łączonych elementów itp.).

W przypadku konstrukcji betonowych emisja akustyczna umożliwia śledzenie mikropęknięć na granicach składników betonu, powstawanie i rozwój rys, pęknięcia na granicy beton-zbrojenie i innych także groźniejszych uszkodzeń [3].

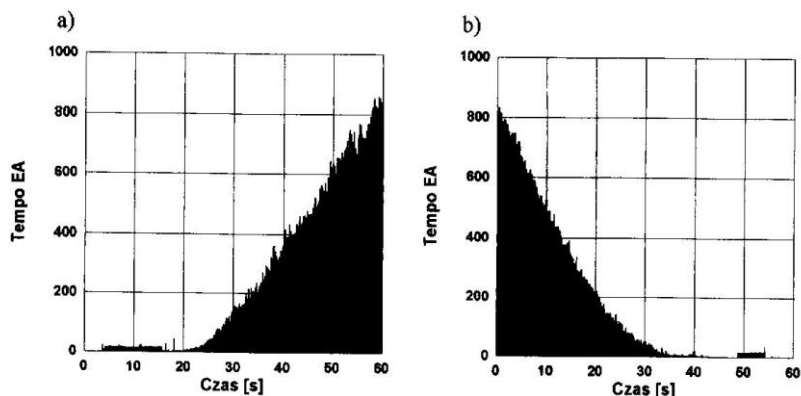
Rozwój metod EA w diagnostyce i monitorowaniu obiektów technicznych jest bardzo dynamiczny. Coraz więcej firm oferuje usługi w tym zakresie. Z pewnością najbliższe lata pokażą jeszcze więcej możliwości wykorzystania tej techniki, także do ciągłego monitorowania obiektów (mosty i wiadukty, tory kolejowe, konstrukcje nośne itp.).

Urządzenia elektroenergetyczne

Źródłami emisji akustycznej są tu zarówno wyładowania zupełne, jak i wyładowania niezupełne, gdy ma miejsce impulsowa przemiana niewielkiej części energii elektrycznej (kilka procent) na energię mechaniczną.

Technika EA jest szczególnie przydatna do badań takich urządzeń elektrycznych jak transformatory, przekładniki, prostowniki, kondensatory, izolatory itp. Istnieje bardzo wiele opracowań pozwalających wiązać obserwowaną emisję akustyczną ze stanem technicznym tych obiektów, wśród nich najważniejsza jest monografia [2], kompleksowo opisująca zakres tych badań. Tego rodzaju prace są tym bardziej przydatne w praktyce, że mogą być wykonywane bez konieczności wyłączania urządzeń z eksploatacji, a zatem mogą służyć do ich monitorowania i zapobiegania awariom w sposób ciągły.

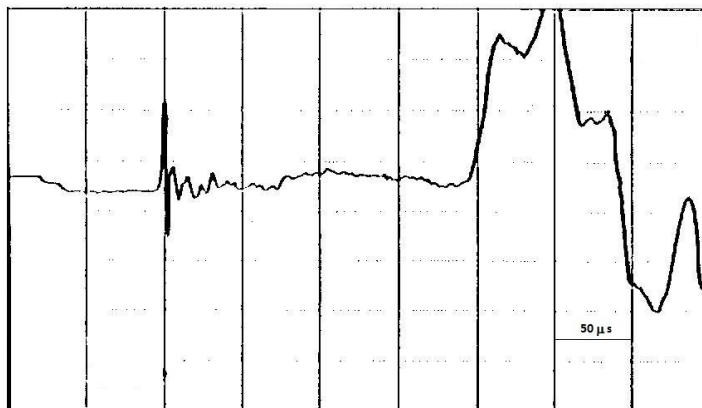
Na rysunku 3 pokazano przykładowy przebieg tempa EA z transformatora wysokonapięciowego podczas wzrostu i obniżania napięcia zasilania od 0 do 60 kV. W praktyce poprzez odpowiedni dobór deskryptorów EA oraz eksperymentalne powiązanie rejestrowanych parametrów z rzeczywistym stanem urządzenia możliwe jest opracowanie procedury przewidywania i zapobiegania uszkodzeniom tego rodzaju urządzeń.



Rys. 3. Tempo EA zarejestrowane podczas wzrostu (a) i obniżania (b) napięcia transformatora z szybkością 1 kVs^{-1} .

Pewną trudność może stanowić fakt, że źródłem EA są wyładowania elektryczne, którym towarzyszy także emisja elektromagnetyczna. Bywają one rejestrowane przez aparaturę pomiarową niezależnie od sygnałów EA, tworząc zarówno tło zakłóceń jak i wyraźne pojedyncze sygnały (rys. 4). mają one jednak inną częstotliwość niż impulsy istotne, dlatego mogą być odfiltrowane w trakcie pomiaru lub też można się przed nimi zabezpieczyć poprzez odpowiednie ekranowania układu rejestracji EA.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



Rys. 4. Oscylogram zarejestrowanego impulsu elektromagnetycznego (lewa strona rysunku) i impulsu EA (prawa strona rysunku).

Metale i materiały ceramiczne

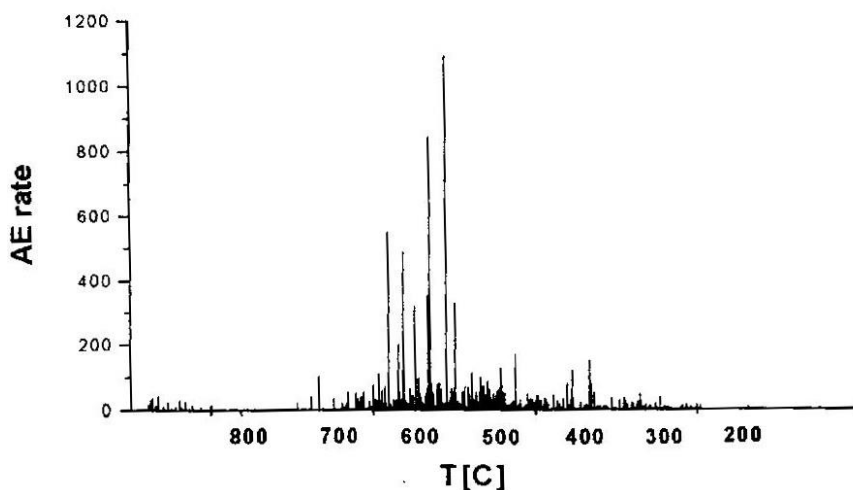
Ze względu na swoją budowę i właściwości mechaniczne, metale poddane obciążeniom zewnętrznym bardzo łatwo emitują fale akustyczne. W tym przypadku główne źródła EA to: ruch dyslokacji i związane z tym odkształcenia plastyczne, powstawanie i rozwój pęknięć, przemiany fazowe, zjawiska korozyjne, zjawiska dynamiczne w miejscach łączenia i spawania. Wszystkie te zjawiska mogą być monitorowane przy użyciu techniki EA [4].

W materiałach ceramicznych emisja akustyczna związana jest z pęknięciami kruchymi. Rejestrowanie jej sygnałów pozwala obserwować powstawanie i rozwój mikro- i makropęknięć, monitorować stan naprężeń wewnętrznych, daje także informacje o przebiegu procesów technologicznych wytwarzania produktów ceramicznych [5].

Reakcje chemiczne i przemiany fazowe

Tego rodzaju źródła impulsów akustycznych są zazwyczaj bardzo silne i z powodzeniem mogą służyć do kontrolowania różnorodnych procesów technologiczno-chemicznych. Sygnały EA pojawiają się podczas rozpuszczania, wytrącania osadu, topnienia i rozkładu fazy stałej itp. Inną grupą zjawisk generujących silną emisję EA są przemiany strukturalne w ciele stałym. Takim koronnym efektem jest przemiana martenzytyczna np. w stali węglowej lub innych różnorodnych stopach metali (a także niemetalu) [6] – przebudowa układu atomów w sieci krystalicznej powoduje bardzo intensywne drgania tej sieci.

Podobna przemiana obserwowana jest podczas wytwarzania nadprzewodników ceramicznych typu $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. Podczas powolnego schładzania od temperatury 900°C do temperatury pokojowej następuje przemiana strukturalna z układu tetragonalnego do ortorombowego. Towarzyszy temu silna emisja akustyczna (rys. 5), co może być wykorzystane do kontrolowania procesu technologicznego [7].



Rys. 5. Tempo EA zarejestrowane podczas schładzania nadprzewodnika $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$.

Emisja akustyczna w górnictwie

Ruchy górotworu emitują fale ultradźwiękowe. Mogą być one rejestrowane za pomocą analizatorów emisji akustycznej. W ten sposób można się ustrzec przed zagrożeniem z powodu tąpnięć lub wypływów gazów.

Badania wykonywane są na próbkach skał poddawanych czynnikom mechanicznym w celu określenia wpływu naprężeń na właściwości mechaniczne i charakter emitowanych impulsów EA. Ogólnie można stwierdzić, że aktywność akustyczna skał zależy wyraźnie od charakteru naprężeń, którym są poddawane [8].

Pomiary emisji akustycznej w skali laboratoryjnej dla skał poddawanych naprężeniom ściskającym oraz spowodowanej sorpcją i desorpcją gazów są zgodne z pomiarami dla górotworu rzeczywistego. Dlatego zjawisko to jest wykorzystywane do przewidywania tąpnięć oraz wyrzutów gazów. Dalszym zastosowaniem EA może być proces składowania dwutlenku węgla w nieczynnych kopalniach węgla kamiennego. W związku z tym problemem prowadzone są badania EA dla próbek łupków dla określenia możliwości sorpcji i desorpcji gazów [9].

Materiały kompozytowe

Kompozyty (najczęściej polimerowe i ceramiczne) powstające w wyniku połączenia materiałów o różnych właściwościach fizycznych, narażone są szczególnie na powstawanie wad podczas wytwarzania i eksploatacji. Właściwości kompozytów zależą od struktury poszczególnych składników, ich zawartości w końcowym materiale oraz od technologii procesu wytwarzania. Powstają wówczas nieuniknione defekty (pęcherze, rozwarstwienia uszkodzenia składników wyjściowych), które jeszcze bardziej powiększają się podczas eksploatacji (naprężenia, oddziaływanie środowiska). W tej

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

sytuacji bieżący stan materiału może być monitorowany w sposób ciągły przy użyciu techniki emisji akustycznej [10, 11].

Analiza sygnałów EA wykonywana jest podczas stałych lub zmiennych obciążeń. W pierwszym przypadku badana jest degradacja chemiczna (np. utlenianie, wpływ wilgotności). Natomiast zastosowanie zmiennych naprężeń umożliwia wykrywanie powstających pęknięć i innych uszkodzeń, grożących zniszczeniem badanego obiektu.

Najczęściej badanymi parametrami w trakcie ciągłego monitoringu materiałów kompozytowych są zależności liczby zdarzeń w funkcji częstotliwości sygnałów oraz tempo EA w funkcji odkształcenia (lub naprężenia) [11].

Materiały ferromagnetyczne

Emisja akustyczna z materiałów ferromagnetycznych (emisja magnetoakustyczna) generowana jest w wyniku lokalnych odkształceń materiału będącymi skutkiem skokowych ruchów granic domen (ścianek Blocha) ferromagnetyka poddanego działaniu zmiennego zewnętrznego pola magnetycznego (efekt Barkhausena). Granice domen przesuwają się w sposób skokowy pomiędzy położeniami stabilnymi – zaczepiają się w miejscach defektów mikrostruktury materiału. Siły potrzebne do zerwania ich zakotwiczenia powodują wprawienie sieci krystalicznej w drganie w momencie wprawienia w ruch ścianki Blocha. Ten efekt odpowiada za rejestrowane impulsy EA. Ich charakter można powiązać z dynamiką przemagnesowywanego materiału i, co za tym idzie, z jego właściwościami magnetycznymi.

Jednocześnie metoda ta umożliwia także detekcję, lokalizację i śledzenie rozwoju mikropęknięć powstających w ferromagnetyku na skutek działania sił związanych ze zmiennym polem magnetycznym. Może zatem być skutecznym narzędziem ostrzegającym przed zniszczeniem materiału [12].

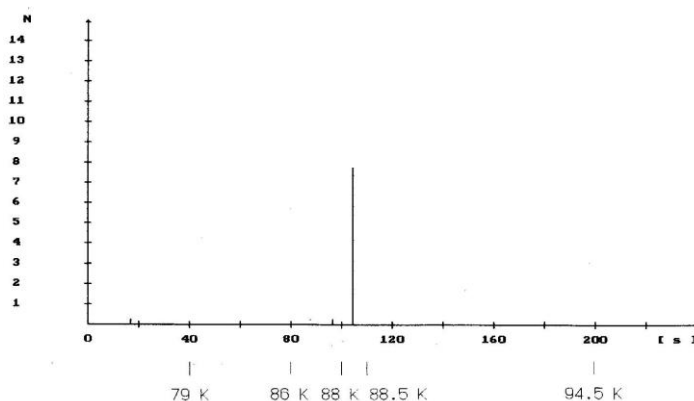
Nadprzewodniki

Technika emisji akustycznej znalazła zastosowanie także w przypadku badań materiałów nadprzewodzących.

Emisja akustyczna była początkowo mierzona w elektromagnesach i przewodach nadprzewodzących z konwencjonalnych nadprzewodników niskotemperaturowych Nb₃Sn i Nb-Ti [13-15]. Pomiaru te miały na celu oszacowanie możliwości przewidywania stanu krytycznego w materiałach nadprzewodzących podczas zwiększania przepływającego prądu aż do wartości krytycznej. Wynikiem badań było stwierdzenie pojawiania się impulsów EA tuż przed osiągnięciem stanu krytycznego (przed przywróceniem stanu niezerowej rezystancji). Przyczynę tego zjawiska można wiązać, podobnie jak w przypadku materiałów ferromagnetycznych, z relaksacją sieci krystalicznej w wyniku oddziaływania sieci nici wirowych stanu mieszanego z defektami mikrostruktury, na których nici są zaczepione w sposób stabilny. Zwiększanie wartości przepływającego prądu powoduje zwiększenie siły Lorenza działającej na nici, wprawienie ich w ruch, a tym samym wywołanie drgań w materiale. Można więc w ten sposób monitorować stany niebezpieczne dla nadprzewodnika. Jednocześnie intensywność i charakter rejestrowanych sygnałów powiązany jest z właściwościami nadprzewodzącymi materiału, a więc technika EA może służyć do oszacowania jakości nadprzewodników.

Podobne próby pomiarowe w przypadku wysokotemperaturowych nadprzewodników ceramicznych nie dały tego samego rezultatu – nie zaobserwowano impulsów w funkcji przepływającego prądu. Prawdopodobnie przyczyną tego są zupełnie inne mechanizmy osiągania stanu normalnego w tym przypadku. Natomiast zarejestrowane zostały sygnały EA podczas przejścia fazowego nadprzewodnictwo-stan normalny pod wpływem

temperatury w nieobecności zewnętrznego pola magnetycznego i bez przepływu prądu. Na rys. 6 pokazano przykład EA pojawiającej się w pobliżu temperatury krytycznej nadprzewodnika. W tej sytuacji nie pojawia się stan mieszany, a zatem mechanizm emisji musi być inny. Prawdopodobnie źródłem EA jest niewielka zmiana objętości nadprzewodnika zachodząca w momencie przejścia fazowego [16-18].



Rys. 6. Tempo EA w funkcji temperatury dla nadprzewodnika $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ o temperaturze krytycznej około 90 K.

Emisja akustyczna może być dobrym narzędziem dla wstępnego szacowania właściwości nadprzewodników ceramicznych, np. zakres pojawiania się sygnałów zależy wyraźnie od szerokości przejścia nadprzewodzącego materiałów.

Emisja akustyczna w technologii żywności

EA wykorzystywana jest też do monitorowania jakości żywności, np. chipsów ziemniaczanych, płatków śniadaniowych, owoców, warzyw, pieczywa itp. Może też być stosowana podczas magazynowania, transportu, suszenia czy zamrażania żywności.

Czipsy, ze względu na swoją naturę, są obiektem bardzo odpowiednim do badań techniką EA [19]. Ich właściwości, przede wszystkim tekstura, mogą być badane przez pomiary wielu deskryptorów (amplituda zdarzeń, energia zdarzeń, średni czas trwania zdarzenia, liczba zdarzeń). Parametry te są rejestrowane z materiałów poddanych naprężeniom zewnętrznym. Na tej podstawie możliwe jest określenie jakości i walorów smakowych badanej żywności.

Podobne właściwości (kruchość, chrupliwość, soczystość, mączystość) są badane w przypadku owoców, np. jabłek [20]. Otrzymano tu korelację pomiędzy liczbą zdarzeń emisji akustycznej i tradycyjną oceną sensoryczną (organoleptyczną) jabłek. Tego samego rodzaju zależności otrzymane zostały w wyniku badań pieczywa chrupkiego [21]. W literaturze przedmiotu istnieje jeszcze wiele innych przykładów wykorzystania techniki EA do określania właściwości produktów spożywczych.

Prowadzone są również próby zastosowania techniki emisji akustycznej do badania ziarn zbóż [22]. Mierzono amplitudę, liczbę zdarzeń EA, energię akustyczną oraz charakterystyki widmowe dla kilku odmian pszenicy. Stwierdzono istotne różnice w widmie spektralnym oraz ilością zliczeń impulsów EA dla poszczególnych odmian. Możliwe jest także skorelowanie deskryptorów EA z właściwościami technologicznymi np. zawartością białka, szklistością i twardością ziarna.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Podsumowanie i wnioski

Technika emisji akustycznej jest jedną z nieniszczących metod pomiarowych. Może być stosowana w szerokim zakresie badawczym. Znajduje zastosowanie szczególnie w przypadku badań materiałowych, przy określaniu wytrzymałości materiałów, przejść fazowych w ciele stałym, a także w każdych okolicznościach, którym towarzyszy generowanie fal ultradźwiękowych.

Przedstawione zastosowania emisji akustycznej mają jedynie charakter przykładowy. Rzeczywisty zakres badań z udziałem tej metody jest o wiele szerszy. Podobnie bogata jest również literatura przedmiotu. Z pobieżnego już przeglądu metod EA wynika, że dziedzina potencjalnego wykorzystania rejestracji i analizy sygnałów emisji akustycznej będzie nadal powiększała się.

Literatura

1. Małecki I., Ranachowski J. (red.), *Emisja akustyczna. Źródła, metody, zastosowania*, IPPT PAN, Warszawa, 1994.
2. Skubis J., *Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych*, IPPT PAN, Warszawa, 1993.
3. Ranachowski Z., *Emisja akustyczna w diagnostyce obiektów budowlanych*, Drogi i Mosty 2012, 2, 151-173.
4. Roberts T.M., Talebzadeh M., *Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation*, J. Constr. Steel Res. 2003, 59, 695-712.
5. Rajewska K., Kowalski S.J., *Emisja akustyczna jako narzędzie monitorowania procesu pękania materiałów suszonych*, Diagnostyka 2002, 27, 95-100.
6. Niemann R., Kopeček J., Heczko O., Romberg J., Schultz L., Fähler S., E. Vives, Mañosa L., Planes A., *Localizing sources of acoustic emission during the martensitic transformation*, Phys. Rev. B, 2014, 89, 214118
7. Dopierała D., Woźny L., Kisiel A., *Detekcja sygnałów emisji akustycznej podczas syntezy $YBa_2Cu_3O_x$* , Seminarium i Warsztaty Naukowe „Zastosowania Nadprzewodników ZN-8”, Nałęczów, 17-20.06.2007, Lublin Liber Duo, 2008, 52-57.
8. Gawryś J., Krzysztoń D., *Analiza emisji akustycznej zarejestrowanej podczas ściskania próbek piaskowca i węgla*, Górnictwo i Geoinżynieria 2007, 31, 9-34.
9. Strzępowicz A., Ziętek J., Zych M., Hanus R., *Badania emisji akustycznej i odkształceń generowanych sorpcją i desorpcją gazów przez próbki skalne*, Przegląd Elektrotechniczny, 2015, 8, 54-57.
10. Kurzydłowski K.J., Boczkowska A., Schmidt J., Konopka K., Spychalski W., *Monitorowanie uszkodzeń w kompozytach metodami nieniszczącymi*, Polimery 2005, 50, 255-261.
11. Lusa T., Paradowski K., Ciesielski M., Witemberg-Perzyk D., Kurzydłowski K.J., *Zastosowanie emisji akustycznej do monitorowania degradacji kompozytów włóknistych*, Kompozyty 2008, 8, 379-384.
12. Hasse L., Spiralski L., Šikula J., *Pomiar i obróbka sygnałów emisji akustycznej w diagnostyce obiektów*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 2004, 20, 77-84.
13. Nomura H., Takahira K., Sakai T., *Acoustic Emission from Superconducting Magnets*, Cryogenics 1977, 17, 471-481.
14. Nomura H., Sinclair M.N.L., Iwasa Y., *Acoustic Emission in Composite Copper NbTi Superconductor*, Cryogenics 1980, 20, 283-289.
15. Pasztor G., Schmidt C., *Acoustic Emission from NbTi Superconductors during Flux Jump*, Cryogenics 1979, 19, 608-610.

16. Woźny L., Mazurek B., *Acoustic emission to accompany the superconducting transition of $YBa_2Cu_3O_x$* , Physica B 1991, 173, 309-312.
17. Woźny L., Mazurek B., Lubicki P., *Acoustic emission from high T_c superconductors during current flow*, Cryogenics 1993, 33, 825-827.
18. Woźny L., Kisiel A., Rutkowski J., *Acoustic emission from $YBa_2Cu_3O_x$ superconductors*, Supercond. Sci. Technol. 2010, 23, 025035.
19. Gozdecka G., Domowicz B., *Charakterystyka cech akustycznych czipsów ziemniaczanych w zależności od rodzaju testu mechanicznego*, Żywność. Nauka. Technologia. Jakość 2013, 87, 126-136.
20. Zdunek A., *Instrumentalna metoda oceny wybranych cech tekstury jabłek na podstawie emisji akustycznej*, Acta Agrophysica 155 (2008) 1-98.
21. Marzec A, Borowiec M., Lewicki P.P., *Badanie tekstury pieczywa chrupkiego metod emisji akustycznej*, Żywność 2005, 4, 75-85.
22. Marzec A., Jakubczyk E., Cacak-Pietrzak G., *Próba zastosowania metody emisji akustycznej do badania ziarna wybranych odmian pszenicy jarej i ozimej*, Żywność. Nauka. Technologia. Jakość 2008, 4, 161-167.

Autorzy: dr inż. Leszek Woźny; Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wydział Elektryczny, Politechnika Wroclawska, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: leszek.wozny@pwr.edu.pl; dr inż. Anna Kisiel; Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wydział Elektryczny, Politechnika Wroclawska, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: anna.kisiel@pwr.edu.pl;