



Ignacy Malecki

**ANALIZA ROZWOJU I MOŻLIWOŚCI
ZASTOSOWAŃ METODY
EMISJI AKUSTYCZNEJ**

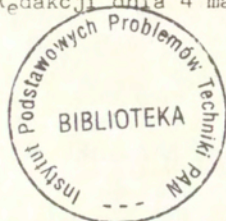
23/1993

P. 269



WARSZAWA 1993

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 4 maja 1993 r.



56667



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark.wyd.2,00 Ark.druk. 2,6
Oddano do drukarni w maju 1993 r.

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.
Warszawa, ul.Jasna 1

Ignacy Malecki

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Centrum Akustoelektroniki

Analiza rozwoju i możliwości zastosowań metody emisji akustycznej

STRESZCZENIE

Zjawisko emisji (EA) akustycznej znane od wieków, ale jego praktyczne zastosowania od początku lat sześćdziesiątych, do obserwacji "mikrosejsmicznych", ale już wcześniej badanie generacji EA w metalach pod obciążeniem. Zwiększenie zakresu pomiarów przez detekcję sygnałów EA wysokiej częstotliwości. Generacja EA przez ruchy dyslokacyjne w metalach i kruche pękanie ceramiki. Wpływ zmęczenia materiału na aktywność EA. Nowe możliwości zastosowań w górnictwie i budownictwie. Prace nad doskonaleniem przetworników EA. Analiza porównawcza kierunków rozwoju metod EA w ciągu ostatnich 25 lat i wynikające stąd wnioski co do podjęcia przyszłych badań. Określenie kierunków doskonalenia metod EA dotyczących głównie obróbki elektronicznej sygnałów EA, ich ekstrakcji i separacji. Fazy aktywności EA przy wzroście naprężenia. "Czas życia" i stopień zmęczenia materiału określane metodą EA. Klasyfikacja źródeł EA. Określenie możliwości zastosowań EA w przemysłach: surowcowym, materiałowym, maszynowym, elektronicznym, energetycznym, budowlanym i chemicznym oraz do badania stanu pojazdów mechanicznych i obiektów inżynierskich. Zasygnalizowanie możliwości zastosowania EA w biologii i medycynie. Określenie pola zastosowań EA do badań poznawczych w fizyce i chemii.

PRACA WYKONANA ZOSTAŁA W RAMACH GRANTU KBN NR 33148-92-03

1. ROZWOJ HISTORYCZNY BADAŃ EMISJI AKUSTYCZNEJ

Sygnaly dźwiękowe towarzyszące wewnętrznym zmianom struktury ośrodka obserwowane były przez człowieka od wieków. Stanowiły one np. ostrzeżenie przy pękaniu lodu, zbliżającej się katastrofie rozbicia kadłuba statku. Wydaje się, że pierwsza pisana wzmianka o zjawisku EA pochodzi z 1350 roku z Codex Germanicus, gdzie czytamy: "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" [1]. Podobnie oceniano też wartość odlewów cynowych, o czym nauczał arabski alchemik Jabir Ibn Mayyan, znany także jako Geber, którego dzieło przetłumaczono w 1545 roku na łacinę [1a].

Pierwsze naukowe zainteresowania sygnałami akustycznymi powstającymi w ośrodku datują się z lat trzydziestych. Zaczęto wówczas badać możliwości wczesnego ostrzegania przed osunięciem się górotworu w kopalniach na podstawie obserwacji infradźwiękowych sygnałów "mikrosejsmicznych" [2]. Stan elektronicznej techniki pomiarowej w tamtym okresie nie dawał możliwości dokładnego zbadania wszystkich parametrów sygnałów mikrosejsmicznych, co ograniczało zakres zastosowań. Niemniej w kopalniach miedzi w USA (Obert, Duval [3]) i w kopalniach złota w Kanadzie (Hodgson [4]) zaobserwowano ścisły związek między gęstością sygnałów mikrosejsmicznych a katastrofą następującą wkrótce potem. Duże znaczenie miały też badania skał pod obciążeniem przeprowadzone przez tych samych autorów. Stwierdzono, że przy początkowym obciążeniu pojawiają się silne sygnały akustyczne, które znikają przy dalszym wzroście obciążenia, by pojawić się znowu w bliskości granicy zniszczenia materiału. Jest to zależność stanowiąca podstawę wielu zastosowań emisji akustycznej rozwiniętych później. Nad wykrywaniem początkowych stadiów zniszczenia górotworu pracowano też w Związku Radzieckim. Były to m.in. prace Szamina [5] i Winogradowa [6].

Pierwsze prace nad powstawaniem sygnałów akustycznych w próbkach metali poddanych naprężeniu mechanicznemu datują się z początku lat pięćdziesiątych w Niemczech (praca doktorska J. Kaisera [7]). Kaiser w swojej pracy cytuje tylko jako wczesne badania polskiego metalurga J. Czochralskiego [7a]. Rezultatem było między innymi odkrycie tzw. efektu Kaisera [8]. Były to jednak raczej odosobnione działania. Dopiero w końcu lat pięćdziesiątych, głównie w USA, podjęto na szerszą skalę badania nad mechanizmem powstawania sygnałów akustycznych w różnych ośrodkach. Wyniki tych prac były przedstawione po raz pierwszy na forum naukowym na sympozjum nieniszczących metod badania materiałów w San Antonio w 1962 i 1963 r. Tatro i Liptai [9] badali pojawienie się sygnałów akustycznych w polikrystalicznym aluminium. Doszli oni do wniosku, że głównym źródłem sygnałów akustycznych jest powstawanie rys powierzchniowych. Scheffield [10] badał głównie zachowanie się monokryształów aluminium i cynku. Jego zasługą było rozróżnienie ciągłych i impulsowych sygnałów akustycznych i rozwinięcie hipotezy, że ich powstanie wiąże się z ruchem grup dyslokacji. Istotny postęp stanowiły też późniejsze badania związku EA z ruchami dyslokacji przeprowadzone przez Jamesa i Carpentiera [11]. Wychodzeniem dyslokacji na powierzchnię zajmował się między innymi Nacik [12]. Generacja sygnałów EA przez ruchy dyslokacji jest obecnie przedmiotem badań w wielu laboratoriach na świecie, przy czym chodzi zarówno o udoskonalenie metody EA jako nieniszczącej metody badań, jak i o użycie tej metody jako narzędzia wyjaśnienia mechanizmów powstania ruchów dyslokacji.

Na początku lat sześćdziesiątych termin *emisja akustyczna* zaczął być powszechnie używany. Nie jest on całkowicie ścisły, dotyczy bowiem sygnałów w szerokim paśmie częstotliwości, od infradźwięków do ultradźwięków w zakresie od 10 Hz do 1 MHz. Emisję akustyczną definiuje się ogólnie jako zjawisko polegające na powstawaniu fal sprężystych wewnątrz lub na powierzchni ośrodka. Często ogranicza się rozpatrywanie tego zjawiska do ciał stałych, wtedy stosować można węższą definicję, wedle której emisja akustyczna polega na powstawaniu fal sprężystych na skutek lokalnej, dynamicznej zmiany

w strukturze materiału. Emisja akustyczna powstająca przy procesach fizyko-chemicznych w cieczech nie podlega tej ostatniej definicji. W podręcznikach fizyki i mechaniki spotyka się czasem [13] terminy: emisja fal naprężeniowych (stress wave emission SWE) [14], emisja dźwiękowa (sonic emission) [15], impulsy dźwiękowe [16], aktywność mikrosejsmiczna [17], dźwięki skał [18], efekty akusto-sejsmiczne. Termin *emisja akustyczna* przyjął się jednak powszechnie w literaturze akustycznej i w inżynierii materiałowej. Często używa się skrótu AE od angielskiego terminu *acoustic emission*. Skrótem EA będziemy posługiwać się w całej niniejszej pracy. Pod terminem *emisja akustyczna* rozumie się także metodę pomiarową, w której wykorzystane jest zjawisko EA.

Właściwy rozwój zastosowań EA datuje się od drugiej połowy lat sześćdziesiątych. Duże znaczenie miały tu prace Dunegana [19] [20], który zainicjował pomiary EA w paśmie wysokich częstotliwości, przez co w znacznej mierze można było wyeliminować zakłócające odgłosy środowiska i samej aparatury wytrzymałościowej. Wkrótce rozszerzono zakres pomiarów sygnałów emisji akustycznej do 30 MHz [21]. Zastosowanie w następnym dziesięcioleciu techniki komputerowej znacznie zwiększyło dokładność pomiarów i pozwoliło na wszechstronną analizę wybranych parametrów sygnałów EA.

Równoległe prowadzone były prace teoretyczne i doświadczalne dla wyjaśnienia mechanizmów powstawania EA. Próbowano przedstawić rozmaite modele tego mechanizmu. Prosty model w postaci układu sprężyn podał Pollack [22]. Model oparty na pobudzaniu zakotwionych i zwalnianych dyslokacji zaproponowali Frederick i Felbeck [23], Agarwal [24]. Model ten ukazuje powiązania aktywności EA z parametrami ruchu dyslokacji. Engle [25] na podstawie obserwacji monokryształów związków litu opracował model pobudzenia do drgań sieci krystalicznej przez grupę dyslokacji.

Inny model (Armstrong [26]) oparty był o klasyczną teorię pęknięć Griffitha. Warto też przypomnieć wcześniejszą pracę Eshleby'ego [27], który obliczył energię promieniowaną przez drgającą dyslokację śrubową.

Rozwinięciem tego kierunku był model Gilmana [28] rozkładu gęstości ruchomych dyslokacji przy odkształceniu plastycznym.

Wiele prac z tego okresu dotyczyło współzależności między prędkością rozchodzenia się mikropęknięć a emisją akustyczną w materiałach kruchych i półkruchych, co ma zasadnicze znaczenie dla zastosowania EA do nieniszczącej kontroli tych materiałów. Można tu przykładowo wymienić pracę Gelericha i Hartbowera [29], którzy podali ilościową zależność tych wielkości oraz prawo teoretyczne dotyczące ogólnego ujęcia matematycznego.

Dużą uwagę poświęcano sygnałom akustycznym powstającym przy ruchach górotworu i zmianach struktury materiałów skalnych pod obciążeniem. Teoretyczne prace nad rozchodzeniem się sygnałów EA w płytach i półprzestrzeni były prowadzone przez wielu autorów. Znaczący wkład w te badania wnieśli Pao, Gajewski [30] [31] [32] i Ono [33]. Równolegle prowadzono badania laboratoryjne i terenowe. Interesujące były prace dotyczące lokalizacji mikropęknięć i podobieństwa między sygnałami EA a odgłosami poprzedzającymi trzęsienie ziemi (Mogi [34]). Ważne też było stwierdzenie [35], że po zniszczeniu próbki daje ona jeszcze resztkowe sygnały EA.

Ważnym etapem badań EA było doświadczalne stwierdzenie przez Evansa [36] liniowej zależności między wydłużaniem się pęknięcia a tempem zliczeń EA. W latach siedemdziesiątych rozszerzył się znacznie zakres zastosowań metody emisji do badań różnych rodzajów materiałów [37], zwłaszcza zainteresowano się materiałami niejednorodnymi, w których występuje złożony proces czasowy przy wzroście obciążenia. Należą tu badania kompozytów, które prowadzili między innymi Mechan i Mullin [38].

W badaniach mechanizmów mikropęknięć betonów duży wkład miały prace Hsu [39], które stanowiły punkt wyjścia do badań emisji akustycznej w betonach (np. [40]). Pewne nadzieje wiązano też z zastosowaniem EA w przemyśle drzewnym, najintensywniejsze prace w tym zakresie prowadzono w Japonii (por. np. [41]).

W połowie lat osiemdziesiątych w związku z odkryciem nadprzewodników wysokotemperaturowych wzrosło ogromnie

zainteresowanie badaniami tych materialow. Okazalo sie, ze metoda EA dać moze o nich unikalne informacje. Znaczące byly tu między innymi prace zespołu Nomura [42] [43] i Pasztor-Schmidt [44].

Od badania próbek materialow droga prowadziła do badania calych obiektow technicznych metoda EA. Wiele firm wprowadziło kontrole EA zbiornikow wysokociśnieniowych, zajęto sie możliwościami zastosowania EA do kontroli osłon reaktorow [21] [45]. Firma General Dynamic zajęła sie zastosowaniem EA do ustalenia stopnia zmęczenia części samolotow [46], zastosowano też emisję akustyczną do badania szczelności kadłubow okrętowych [47] i zbiornikow wysokociśnieniowych [48], rezultaty byly na ogół pozytywne.

Rozwinięte też zostały metody EA przeznaczone do badania stabilności obiektow inżynierskich jak tamy i nasypy drogowe [13]. Inny kierunek zastosowań to kontrola procesow technologicznych. Najdawniej (Notvest [49]) stosowano kontrole EA jakości spawania, obecnie jest ona szeroko używana.

Większość badań aktywności EA i zastosowań EA dotyczy sygnalow akustycznych, których generatorami są pęknięcia i mikropęknięcia lub ruchy ośrodka powstające pod wpływem zewnętrznych obciążeń mechanicznych. Istnieje jednak wiele przypadków, gdy EA powstaje na skutek procesow fizyko-chemicznych lub biologicznych. Przykładem od dawna znanym i wykorzystywanym w praktyce jest wytwarzanie dźwięków słyszalnych przez wyładowania niezupełne w urządzeniach elektroenergetycznych. Obecnie monitorowanie sygnalow EA powstających z tej przyczyny rozciąga się na szeroki zakres częstotliwości i jest z powodzeniem stosowane. Pierwsze publikowane prace na ten temat, dotyczące transformatorow, datują się z połowy lat sześćdziesiątych [50]. Zostały one później rozszerzone na inne urządzenia [51] [52].

Inny przykład to aktywność EA, jaką jest akustyczny efekt Barkhausena powstający w zmieniającym się polu magnetycznym na skutek zerwań i nagłych przesunięć ścian domen magnetycznych. Pierwsze systematyczne badania na ten temat datują się z końca lat siedemdziesiątych. Były to prace Kusanagi [53] i Ono [54]. Efekt ten bywa stosowany jako nieniszcząca metoda testowania materialow

ferromagnetycznych, dając informacje nie tylko o ich powierzchni, jak magnetyczny efekt Barkhausena, lecz także o ich wnętrzu.

W przeciwieństwie do sygnałów EA przy wyładowaniach elektrycznych, aktywność EA towarzysząca reakcjom chemicznym jest przeważnie słaba i wymaga do wykrycia bardzo czułej aparatury, toteż liczniejsze prace na ten temat zaczęły się dopiero na początku lat osiemdziesiątych. Ich przegląd można znaleźć w pracy Wade'a i innych [55].

Na pograniczu zjawisk obejmowanych zakresem terminu *emisja akustyczna* leżą sygnały akustyczne generowane w uchu. Jest to tzw. wywołana emisja akustyczna (Evoked Oto-Acoustic Emission EOAE) opisana po raz pierwszy przez Kempa [56]. Na razie jako ciekawostkę traktować można wykrycie przez Milburna i współpracowników emisji akustycznej u roślin zielonych [57]. Prawdopodobnie wiąże się to z powstaniem kawitacji w słupie wody w przewodach prowadzących od korzeni do liści. Inną przyczyną aktywności EA w drzewach są procesy kurczenia się i rozprężania przy zmianie wilgotności [58], czego krańcowym objawem jest trzaskanie drzew na mrozie. Obserwowano także emisję akustyczną drażenia drzewa przez owady [59].

Niezbędnym warunkiem postępu w badaniach EA było doskonalenie techniki pomiarowej. Następowало to w ścisłym związku z ogólnym doskonaleniem elektronicznej techniki pomiarowej. Opis historii tego rozwoju wykracza poza ramy niniejszego opracowania. Warto natomiast zwrócić uwagę na zapoczątkowanie pewnych prac specyficznych dla metody EA, której rozwój wymagał doskonalenia metod przetwarzania sygnałów EA na sygnały elektryczne.

Aparatami używanymi przez Oberta [2] do wykrywania sygnałów mikrosejsmicznych były "geofony". Geofon składał się z rury stalowej, w której zamontowany był przetwornik piezoelektryczny i układ wzmacniaczy. Geofony umieszczano w otworach wierconych w skale będącej przedmiotem obserwacji. Geofony odbierały sygnały w paśmie słyszalnym do 10 kHz. Postępem było zastosowanie sieci kilku geofonów [3], co pozwalało na lokalizację źródła. W tym czasie pracowano też z geofonami elektrodynamicznymi.

Prace Masona i współpracowników [60] były punktem wyjścia do zastosowania do pomiarów EA przetworników reagujących na ultradźwięki. Odpowiednie pomiary EA zapoczątkował Dunegan [20]. Postępem było zastosowanie, między innymi przez Schofielda [10], automatycznej analizy amplitudowej i częstotliwościowej sygnałów EA. Przetworniki piezoelektryczne są powszechnie używane do pomiarów EA [61]. Ich zasadniczą wadą jest konieczność dokładnego styku z badanym obiektem, a więc zakłócenie zjawisk w nim zachodzących, dlatego podjęto próby stosowania innych typów przetworników. Można tu wymienić przetwornik pojemnościowy skonstruowany przez Scruby'ego [62], którego zaletą jest łatwa kalibracja do pomiarów bezwzględnych przemieszczeń obserwowanej powierzchni. Jednak przetwornik ten jest dość kłopotliwy w użyciu i nie znalazł szerszego zastosowania. Natomiast w warunkach laboratoryjnych stosuje się coraz częściej pomiary laserowe, które mają tę zaletę, że pozwalają na obserwację bardzo małego pola na powierzchni badanego obiektu. Prace te były zapoczątkowane i są nadal prowadzone na szeroką skalę przez Greena [63] [64] [65].

Bardzo ważne przy pomiarach EA jest uzyskanie deskryptorów sygnałów zawierających informacje najistotniejsze dla oceny procesów zachodzących w materiale. Wymaga to zastosowania złożonej obróbki sygnałów. Wieloparametrowe analizatory służące temu celowi były w latach siedemdziesiątych konstruowane między innymi przez Grahama [66].

Od początku prac badawczych nad zjawiskiem EA jedną z głównych trudności był fakt, że prawie wszystkie pomiary dają wielkości elektryczne, których wartość nie pozwala na wyznaczenie wartości bezwzględnej sygnałów EA, np. amplitudy drgań powierzchni badanego obiektu. Dlatego powszechnie stosowane są metody kalibracji względnej polegające na porównaniu badanego źródła EA ze źródłem wzorcowym. Teoretyczne opracowanie tego zagadnienia zostało podane przez Breckenridge'a i innych [67]. Jako źródło wzorcowe Hsu i inni [68] wprowadzili jedni z pierwszych łamanie kapilary. Wymienieni autorzy przyczynili się zresztą [69] do dalszego udoskonalenia techniki

źródeł wzorcowych. Innym typem źródła wzorcowego dającego ciągły szum jest strumień gazu. Źródło to zostało znormalizowane i przystosowane do badań EA przez McBride'a i Huchisona [70]. Od początku lat osiemdziesiątych coraz szerzej stosowane w warunkach laboratoryjnych jest źródło wzorcowe w postaci impulsu promienia laserowego. Jedno z pierwszych badań tą metodą wykonał Scruby [71]. Z wcześniejszych prac można wymienić np. Hatano [72].

Jak widać z powyższego przeglądu prac badawczych, które zapoczątkowały obecny rozwój metod EA, zakres możliwych zastosowań EA jest bardzo szeroki. Niektóre z tych zastosowań zdały egzamin. W latach osiemdziesiątych metody EA stały się cennym narzędziem technicznym. Można tu wymienić przykładowo kontrolę zbiorników wysokociśnieniowych, kontrolę stopnia zmęczenia części samolotów, nadzór jakości spawania, wczesne ostrzeżenie o ruchach górotworu. Otworzyły się też nowe możliwości zastosowań, np. do badania materiałów w stanie przejściowym do nadprzewodnictwa. Jednakże wiele z wyżej wymienionych obszarów nie zostało w pełni opanowanych, toteż prace badawcze i techniczne są nadal prowadzone.

Obok zastosowań technicznych metoda EA stała się w ostatnim dziesięcioleciu wartościowym narzędziem badawczym, uzupełniającym strukturalne badania rentgenowskie i ultradźwiękowe. Metoda ta daje bowiem unikalne informacje o procesach przebudowy mikrostruktury materiału (ruchy dyslokacji, powstawanie mikropęknięć). Nadzieje związane z metodą EA spowodowały, że prace nad jej doskonaleniem są nadal intensywnie prowadzone w wielu laboratoriach.

W Polsce pierwsze prace nad opanowaniem techniki pomiarów EA przypadają na początek lat siedemdziesiątych, w tym też czasie rozpoczęto próby techniczne zastosowań EA. Badania te nie były zatem opóźnione w czasie do prac prowadzonych w innych krajach.

Właściwy rozwój prac naukowych i technicznych datuje się w Polsce od początku lat osiemdziesiątych. Zostały one włączone najpierw do Programu Międzyresortowego [73], a od 1985 do Centralnego Programu Badań Podstawowych (CPBP Nr 02.03) [74], co pozwoliło na ich lepsze finansowanie i koordynację w skali krajowej. Krajowe sympozja

sprawozdawcze odbywające się pod koniec każdego roku były okazją do wymiany doświadczeń i oceny postępu badań. System Programów Centralnych został zlikwidowany w związku ze zmianami gospodarczymi w Polsce. Niemniej wiele badań z zakresu EA jest nadal finansowanych centralnie poprzez system grantów. Prace podjęte w latach osiemdziesiątych są kontynuowane i rozwijane, a wymiana doświadczeń jest zapewniona przez dalsze prowadzenie dorocznych sympozjów.

Trudno wymienić wszystkie jednostki badawcze, które zajmują się w Polsce badaniem zjawiska EA i jego zastosowaniami. Ograniczę się głównie do wymienienia tych, które partycypowały w Programie Centralnym i kontynuują swe prace w zakresie EA. Kolejność wymienienia jednostek badawczych nie ma znaczenia.

- Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa (metale, ceramika, skały, aparatura).
- Instytut Podstaw Metalurgii PAN, Kraków (metale).
- Instytut Technologii Nieorganicznej Politechniki Warszawskiej, Warszawa (ceramika, technologia).
- Instytut Fizyki Politechniki Śląskiej, Gliwice (górnictwo, nadprzewodniki).
- Instytut Podstaw Elektroniki i Elektrotechniki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (nadprzewodniki).
- Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (betony, konstrukcje).
- Zakład Wysokich Ciśnień PAN (materiały pod wysokim ciśnieniem, źródła wzorcowe).
- Instytut Technologii Drewna Akademii Rolniczej, Poznań (technologia drewna).
Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, Lublin (grunty).
- Instytut Budownictwa Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce (pręty).
- Instytut Mechaniki Stosowanej Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce (kompozyty).
- Instytut Wibroakustyki Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków (elementy maszyn).

- Instytut Lotnictwa Warszawa (kontrola części samolotów).
- Instytut Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej, Poznań (elementy maszyn).
- Instytut Elektrotechniki Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Opole (spawanie, urządzenia elektroenergetyczne).
Instytut Inżynierii Lądowej Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Opole.
- Instytut Analizy Chemicznej Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa (procesy chemiczne).
Instytut Elektrotechniki, Warszawa (wyładowania aniezupełne).
- Klinika Oto-laryngologiczna Akademii Medycznej, Warszawa (otomisja).

2. PROBLEMY NAUKOWE I TECHNICZNE DOSKONALENIA METOD EMISJI AKUSTYCZNEJ

Rozwój różnorodnych zastosowań EA uwarunkowany jest doskonaleniem metod pomiarowych i pogłębieniem znajomości procesów fizycznych zachodzących przy generacji i rozchodzeniu się sygnałów EA. Procesy te są bardzo do siebie podobne, niezależnie do czego służyć ma ich monitorowanie. Dlatego tak ważna jest analiza teoretyczna i doświadczalna tych procesów, która stanowi dział badań podstawowych fizyki ciała stałego, akustyki i mechaniki. Sygnały EA generowane są przez dynamiczne zmiany mikro- lub makrostruktury ośrodka, a więc związane są z ruchami ośrodka. Fakt ten jest punktem wyjścia wspólnego ujęcia teoretycznego zjawisk EA.

Modelem symulującym te zjawiska jest określony rozkład przestrzenny, ciągły lub dyskretny, lokalnie działających sił mechanicznych, zmiennych w czasie, generujących różne mody fal sprężystych, które rozchodzą się w ośrodku. Mogą to być siły różnego typu: rozprężające, rozciągające, ściskające lub skręcające i o różnym stopniu wzajemnej korelacji.

Procesy generujące sygnały EA można klasyfikować zależnie od przyczyn ich generacji. Ogólnie można wyróżnić trzy grupy takich przyczyn:

- (a) działanie zewnętrznego obciążenia mechanicznego zmieniającego się w czasie,
- (b) zmiany w działaniu obiektów technicznych w czasie eksploatacji,
- (c) procesy chemiczne i termiczne powodujące zmiany struktury ośrodka.

Przedmiotem badań i związanych z nimi zastosowań metody EA jest najczęściej pierwsza grupa przyczyn. Przy wzroście naprężenia wywołanego obciążeniem zewnętrznym od zera do naprężenia niszczącego pojawiają się sygnały EA o rozkładzie w czasie zależnym od rodzaju obciążanego materiału. Można jednak określić pewne charakterystyczne cechy przebiegu zmian aktywności EA w funkcji wzrostu obciążenia,

wspólne dla ogromnej większości materiałów będących przedmiotem badań.

Przebieg aktywności EA w funkcji wzrostu obciążenia podzielić można na trzy charakterystyczne fazy:

(i) Pojawienie się pierwszej grupy sygnałów EA, które rosną wolniej lub szybciej zależnie od rodzaju materiału i w dużej mierze zależą od stopnia jego kruchości. Sygnały te spowodowane są głównie pojawieniem się stabilnych mikropęknięć materiału w zakresie obciążeń bliskich granicy odkształceń sprężystych.

(ii) Faza pośrednia, w której zależnie od typu materiału i stopnia jego plastyczności aktywność EA może wzrastać lub ulegać znacznemu zmniejszeniu.

(iii) Nagły, silny wzrost aktywności EA związany z początkiem procesu zniszczenia materiału, gdy pojawiają się niestabilne mikropęknięcia, a następnie makrorysy.

Przy nagłym lub stopniowym przejściu z jednej fazy do drugiej zmienia się kształt sygnałów i powodujące ich powstawanie mikro- i makroprocesy zachodzące w materiale.

Z punktu widzenia badania procesów fizycznych i możliwości zastosowań szczególnie interesująca jest pierwsza faza obciążenia. Sygnały EA pojawiające się w czasie jej trwania niosą bowiem informację o rozpoczynających się właśnie mikroprocesach, które w tym stadium nie dadzą się zaobserwować innymi metodami. Problem naukowy i techniczny polega przy tym na znalezieniu zależności liczbowych między aktywnością EA a parametrami wytrzymałościowymi materiału.

Dotychczasowe badania pozwalają, chociaż w sposób nie dość jeszcze precyzyjny i jednoznaczny, na określenie tych trzech parametrów:

(1) Naprężenie niszczące. Wielkość ta, zwłaszcza dla materiałów kruchych, może być określana jako funkcja liniowa wartości naprężenia, przy którym pojawiają się pierwsze sygnały EA. Ze względu na to, że owo naprężenie występuje w metalach poniżej pojawiania się odkształceń plastycznych próbki, metoda EA może być w tym przypadku traktowana jako metoda nieniszcząca.

- (2) "Czas życia" materiału. Przy stałym obciążeniu eksploatacyjnym jest on obliczany metodami statystycznymi. Podobieństwo między rozkładem statystycznym Weibulla występującym przy działaniu długotrwałych obciążeń i przy pojawieniu się sygnałów EA pozwala na określenie związków ilościowych przydatnych do oceny "czasu życia" materiału w zależności od charakteru aktywności EA.
- (3) Stopień zmęczenia materiału lub jego "historia". Przy obciążeniu cyklicznym występuje efekt Kaisera polegający na zmniejszaniu się aktywności EA przy powtarzających się zmianach obciążenia. Efekt ten odpowiada w pewnej mierze stopniowi zmęczenia materiału, choć ta zależność jest bardzo skomplikowana i trudna do liczbowego ujęcia. Również dane dotyczące zmniejszenia się aktywności EA próbek materiałów, które pochodzą z obiektów eksploatowanych przez kilka lat, mają raczej jakościowy charakter. W porównaniu z nowymi materiałami wykazują one mniejszą aktywność EA, co stanowi ogólną prawidłowość przydatną dla wielu zastosowań EA.

Druga grupa metod EA dotyczy obiektów technicznych w warunkach eksploatacyjnych. Skala tych obiektów jest bardzo duża, należą do nich między innymi zbiorniki i przewody wysokociśnieniowe, osłony reaktorów atomowych, zapory wodne, szyby i chodniki górnicze. Zasadnicza różnica w stosowaniu metody EA w tych przypadkach polega na tym, że miarodajne pomiary muszą odbywać się *in situ* na testowanym obiekcie i muszą mieć charakter ciągłego monitorowania, które ma na celu wykrycie nieprawidłowości w działaniu obiektu. Gdy w pierwszej grupie przyczyną sygnałów EA było jedynie zewnętrzne naprężenie mechaniczne, tutaj przyczyny te mogą być wielorakie. Do najbardziej typowych należą:

- (a) przesunięcia wzajemne części badanego obiektu, np. ruchy ośrodka skalnego w kopalniach,

- (b) wystąpienie obszarów lokalnego, dynamicznego wzrostu naprężenia mechanicznego, np. przy raptownym zapełnieniu zbiorników wodnych.
- (c) wpływ gazu lub cieczy ze zbiorników i przewodów,
- (d) lokalne naprężenia termo-mechaniczne występujące np. w urządzeniach energetycznych.

W każdym z tych przypadków mechanizm powstawania sygnałów EA jest nieco inny, a ponieważ mogą one działać równocześnie, ilościowa ocena procesów metodą EA jest przeważnie niemożliwa. Monitorowanie ogranicza się do stwierdzenia, że aktywność EA przekroczyła pewną granicę określoną dość arbitralnie. Przekroczenie tej granicy stanowi sygnał ostrzegawczy dla służb eksploatacyjnych, a czasem daje dodatkowe informacje o rodzaju nieprawidłowego działania lub o miejscu jego powstania (np. wpływ gazu).

Trzecia grupa obejmuje obserwacje procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych powodujących zmiany ośrodka. W tym zakresie stosowanie metod EA jest najmniej zaawansowane. Przykładem pozytywnym jest monitorowanie niektórych typów reakcji chemicznych oraz badania ceramicznych nadprzewodników wysokotemperaturowych w stanach bliskich temperatury krytycznej. Do tej grupy badań można zaliczyć prace nad wtórną emisją oto-akustyczną z tego względu, że przy badaniach używa się podobnej aparatury pomiarowej jak przy innych zastosowaniach EA. Główna trudność polega w tej grupie badań na złożoności, a czasem i niecałkowitym wyjaśnieniu, mikroprocesów towarzyszących aktywności EA. Często nie można przyporządkować aktywności EA do określonych wielkości fizycznych badanego procesu. Inną przeszkodą w ilościowej ocenie zjawisk jest występowanie trudnych do wyeliminowania szumów pobocznych towarzyszących temu procesowi, np. spowodowanych wydzielaniem się pęcherzyków gazu.

Powyżej użyto ogólnego terminu *aktywność EA*. Problem polega na tym, jak tę aktywność ocenić. Zależy to od sposobu, w jaki analizowane będą sygnały EA. Obecnie wielkościami stosowanymi powszechnie przy analizie sygnałów EA są:

tempo i suma zliczeń
tempo i suma zdarzeń
amplituda i suma amplitud
RMS sygnału EA i ich sumy
gęstość widmowa energii chwilowa i uśredniona.

Wielkości te nie zawsze wystarczają do scharakteryzowania procesów, którym towarzyszy aktywność EA. Dlatego stosuje się często bardzo złożoną obróbkę cyfrową sygnałów EA aby uzyskać wielkości (deskryptory) najlepiej odpowiadające procesom będącym przedmiotem obserwacji. Oceny deskryptorów używanych dotychczas i ustalenia nowych jest nadal aktualna i wymaga prac badawczych. Na przykład jednym z takich deskryptorów może być prędkość narastania i zanikania sygnału EA, innym - energia pojedynczego impulsu. Istniejące propozycje nie wyczerpują kwestii. Uzyskanie potrzebnych deskryptorów sygnału wymaga zastosowania jego złożonej, elektronicznej obróbki. W tym zakresie zrobiono w ostatnich latach ogromny krok naprzód, głównie przez powszechne zastosowanie cyfrowej obróbki sygnałów EA, niemniej dalsze udoskonalenia techniki obróbki sygnału specyficznej dla metody EA jest ciągle potrzebne.

Obok struktury samego sygnału istotne jest, zwłaszcza w pomiarach terenowych, określenie miejsca jego powstania. Przy zastosowaniu aparatury wielokanałowej z odpowiednią liczbą czujników lokalizacja źródła na powierzchni w zasadzie nie nastręcza trudności, pewną komplikację stanowi lokalizacja przestrzenna wewnątrz monitorowanego obiektu. Przy dalszym doskonaleniu i rozbudowie wielokanałowych układów pomiarowych EA, pełne opanowanie zagadnienia lokalizacji nie wydaje się trudne. Jak wyżej wielokrotnie zaznaczono, związki między zjawiskami zachodzącymi w materiale a aktywnością EA są przeważnie ustalone jako jakościowe. Główną tego przyczyną jest fakt, że nie ma możliwości [74] pomiaru absolutnej wielkości sygnałów EA w miejscu ich generacji. Nie ma bowiem metody, która byłaby odpowiednikiem pomiarów absolutnych pola akustycznego przy pomocy krążka Rayleigha. Wynika to z kilku powodów:

- (a) źródła EA znajdują się z zasady wewnątrz materiału, a więc sygnały od nich pochodzące ulegają tłumieniu i wielokrotnym odbiciom, zanim wydostaną się na powierzchnię. Jeśli więc nawet zastosować metody (laserowa) pozwalające na absolutny pomiar przemieszczeń mechanicznych na powierzchni próbki, nie będzie to bezwzględny pomiar sygnału EA.
- (b) ośrodek sprzęgający między obiektem a przetwornikiem wprowadza dodatkowe tłumienie i obciążenie przetwornika trudne do zmierzenia.
- (c) sam przetwornik wprowadza dodatkowy element nieoznaczoności, może bowiem dawać zniekształcenia liniowe, a jego współczynnik transmisji nie zawsze jest dokładnie określony.
- (d) ogniwa kanału elektronicznego: przedwzmacniacz, wzmacniacze, filtry częstotliwościowe i bramki czasowe wprowadzają dalsze zmiany wielkości transmitowanego sygnału w stosunku do sygnału pierwotnego.

W rezultacie pomiary bezwzględne sygnałów EA nie są stosowane poza bardzo nielicznymi wyjątkami. Nie rezygnuje się jednak z coraz szerszego wprowadzania pomiarów ilościowych EA opartych na pomiarach porównawczych. Trzeba jednak podkreślić, że pomiary jakościowe polegające na ogólnej, raczej intuicyjnej ocenie charakterystyki aktywności EA, np. tempa zliczeń, są nadal stosowane z powodzeniem przez specjalistów, choć z drugiej strony niektórzy z nich [75] uważają, że w stosunku do EA metody typu *pattern recognition* nie mają większej przyszłości. Nowe perspektywy otwiera tu jednak zastosowanie obróbki elektronicznej sygnałów EA metodą komputerowych sieci neuronowych [76]. Pomiary ilościowe polegają więc na porównaniu badanych sygnałów EA z sygnałami wzorcowymi dawanymi przez źródła symulujące. Oznacza to względną kalibrację aparatury pomiarowej, co nie daje wprawdzie możliwości pomiarów bezwzględnych, ale pozwala na porównanie dwóch czy więcej obiektów i ekstrapolację badań przeprowadzonych na jednym z nich. Dzięki standaryzacji metod porównawczych w skali międzynarodowej możliwe jest dokładne

porównanie rezultatów badań przeprowadzonych w laboratoriach różnych krajów.

Najczęściej stosowanymi obecnie źródłami symulującymi są:

- złamanie kapilary lub grafitu ołówkowego
- wpływ strumienia gazu
- uderzenie spadającej kulki
- impuls laserowy
- porównanie wzorcowych przetworników metodą wzajemności

Nic dziwnego, że standaryzacja metod porównawczych, a głównie źródeł symulujących, jest i będzie zapewne przez dłuższy czas przedmiotem zainteresowań odpowiednich instytucji międzynarodowych. Praca na ten temat zainicjowana została przez Europejską Grupę Roboczą Emisji Akustycznej (EWGAE) [77]. Nie wystarczą tu jednak zalecenia organizacyjne, potrzebna jest dalsza wspólna praca laboratoriów zajmujących się tym zagadnieniem. Również pożądane wydaje się rozciągnięcie standaryzacji na cały układ pomiarowy, w szczególności na następujące elementy:

- rozmiary badanej próbki i parametry bloku porównawczego
- warstwa sprzęgająca
- charakterystyka transmisyjna przetwornika
- charakterystyka kanału elektronicznego

Standaryzacja w tym zakresie nie może mieć wprawdzie charakteru normatywnego, może jednak wskazywać na kierunki doskonalenia aparatury pomiarowej, co jest proponowane na przykład przez Amerykańskie Towarzystwo Badań Nieniszczących [77a].

Problemem przyszłościowym jest znalezienie alternatywnego rozwiązania dla przetwornika piezoelektrycznego. Przetwornik ten zastosowany w układach pomiarowych EA posiada bowiem kilka wad:

- (a) obciąża mechanicznie badany obiekt zmieniając w nim rozkład i amplitudy fal sprężystych,
- (b) uśrednia wyniki na całej swojej powierzchni, nie pozwalając na pomiar punktowy,

(c) charakterystykę szerokopasmową otrzymuje się kosztem zmniejszenia czułości w porównaniu z przetwornikiem rezonansowym.

Istnieją wprawdzie możliwości uniknięcia wad (a) i (b) przez zastosowanie układu laserowego, ma on jednak bardzo ograniczone zastosowanie ze względu na kłopotliwość manipulowania i wysokie koszty. Ocenia się, że obecny próg czułości przy pomiarze przesunięć powierzchni badanej próbki wynosi 10^{-14} m. Przyszłość pokaże, czy da się uzyskać jeszcze lepszą czułość.

3. OBECNE I PRZEWIDYWANE ZAKRESY ZASTOSOWAŃ

Z rozwojem zastosowań EA było podobnie, jak w początkowym okresie rozwoju zastosowań ultradźwięków, kiedy to w latach 1930-40 przewidywano [78] użytkowanie techniki ultradźwiękowej w kilku działach przemysłu. Wiele z tych zastosowań z różnych względów nie zdało egzaminu i zastało potem zarzuconych. Natomiast kilka innych rozwinęło się nadszpiewanie i stanowi dziś przedmiot powszechnego użytku, jak np. ultradźwiękowa diagnostyka medyczna.

Podobnie jest z metodą EA. Wydaje się, że obecnie znajduje się ona w przełomowym stadium rozwoju. Zakres możliwości zastosowań jest mniej więcej wiadomy i trudno spodziewać się nowych, rewelacyjnych pól zastosowań, pozostaje natomiast sprawa selekcji i skupienia prac na najbardziej obiecujących kierunkach. Biorąc za podstawę podział tematyki wedle branż przemysłowych można następująco określić przewidywane kierunki zastosowań EA:

Przemysły surowcowe

Górnictwo węgla. Zastosowanie metody EA do ostrzegania przed katastrofami górniczymi, przede wszystkim tąpnięciami, nie jest jeszcze w powszechnym użyciu, niemniej wydaje się, że ma szanse powodzenia. Będzie to zapewne jeden z równolegle stosowanych środków ostrzegających, który jednak stopniowo, w miarę sprawdzania i zyskania zaufania wśród górników, może mieć coraz większe znaczenie. Równie ważne może być użycie metody EA dla kontroli urządzeń górniczych.

W Polsce prace nad zastosowaniem EA w górnictwie węgla prowadzone są przez A. Opilskiego i F. Witosa. Są to przede wszystkim prace laboratoryjne nad próbkami różnych rodzajów węgla i pokładów towarzyszących [79] [80]. Autorzy ci stwierdzili związek między aktywnością akustyczną a stopniem akumulacji energii przez materiał, dzieląc materiały skalne na trzy grupy: (a) nie akumulujące energii

(np. węgiel błyszczący), (b) słabo akumulujące (np. węgiel matowy), (c) silnie akumulujące (np. piaskowiec).

Prowadzone są też badania *in situ* nad przydatnością metody EA do monitorowania stanu naprężeń w kopalniach [81]. Pozytywne wyniki uzyskano przy kontroli metodą EA transporterów taśmowych [82]. J. Karnowski prowadził badania zjawisk geodynamicznych w karguńskim górnictwie węgla połączone z rozwinięciem metody prognozowania, stojące na pograniczu metody sejsmicznej i metody EA.

Górnictwo niewęglowe. Metody diagnostyki ultradźwiękowej stosuje się od dawna z powodzeniem w górnictwie miedzi, np. do kontroli płaszcza mroźniowego szybów, nie jest to jednak związane z metodą EA. Natomiast sukcesem zakończyły się próby zastosowania metod EA do badania pokładów skalnych, na razie głównie w skali laboratoryjnej. Wydaje się, że metoda EA może dać w przyszłości cenne informacje o strukturze tych pokładów, np. o stopniu spękania skał.

W Polsce badania laboratoryjne aktywności akustycznej skał, głównie dolomitów i piaskowców, prowadzi W. Kołtoński [83][83a] i A. Jaroszewska [84] [84a]. Zebrany został już bogaty materiał doświadczalny. Stwierdzono między innymi efekt przesuwania się pasma częstotliwości o maksymalnej amplitudzie sygnałów przy wzroście obciążenia ściskającego.

Przemysły materiałowe

Hutnictwo. Metoda EA mogłaby mieć potencjalnie zastosowanie do monitorowania przemian fazowych w procesie obróbki termicznej, nastręcza to jednak duże trudności techniczne ze względu na wysoką temperaturę i intensywne tło szumów. Korzystniejsze są warunki wprowadzenia metody EA do kontroli laboratoryjnej wytrzymałości i mikrostruktury próbek materiałów stanowiących półprodukt lub produkt końcowy.

W Polsce badania EA w metalach, znajdujące także zastosowanie w hutnictwie, zainicjował Z. Pawłowski [85]. Metoda testowania szyn

przy pomocy EA opracowana przez S. Pileckiego może być również przydatna w hutnictwie [86][87].

Przemysł materiałów ceramicznych. Z uwagi na to, że w procesie pękania tych materiałów aktywność EA jest szczególnie silna, metoda EA znalazła tu już dawno zastosowanie, głównie do oceny mikrostruktury i stopnia zdefektowania. Bywa już wprowadzana rutynowa kontrola jakości wyrobów końcowych metodami EA. Dotyczy to zwłaszcza porcelany technicznej.

Kompleksowe badania zjawiska kruchego pękania prowadzi w Polsce od wielu lat zespół kierowany przez J. Ranachowskiego. Zbadano szereg wyrobów z porcelany elektrotechnicznej pod względem aktywności EA ustalając generalne zależności tempa zliczeń EA od współczynnika intensywności naprężeń oraz wpływ długotrwałej eksploatacji. Istotne było stwierdzenie przez zespół zależności między naprężeniem, przy którym pojawiają się pierwsze sygnały EA, a naprężeniem niszczącym. Zespół udoskonalił metody prognozowania "czasu życia" materiałów kruchych [88] [89] [90]. Obecnie zespół J. Ranachowskiego prowadzi badania wpływu szoku termicznego w tlenku glinu i betonach na aktywność EA [91] [92]. Tenże zespół bada zależność między emisją akustyczną a emisją elektryczną powstającą w procesie pękania.

Przemysł drzewny. Głównym zakresem możliwych zastosowań metody EA jest monitorowanie procesu termicznego nawilżania i suszenia drewna. Istnieją próby automatyzacji tej metody na skalę przemysłową, EA może być też z powodzeniem stosowana do obserwacji tego procesu, dając cenne informacje dla kontrolujących produkcję.

Prace prowadzone w Polsce przez J. Raczekowskiego i W. Molińskiego [93] [94] dotyczą dwóch zasadniczych procesów technologicznych: nawilżania i suszenia drewna oraz jego obróbki skrawaniem. Badacze stwierdzili anizotropię występowania EA, największa aktywność pojawia się przy ściskaniu wzdłuż włókien. Autorzy ci rozpoczęli prace nad automatycznym monitorowaniem metodą EA procesu termicznej obróbki drewna opierając się na fakcie, że

tempo zliczeń jest ściśle uzależnione od wstępnej i chwilowej wilgotności drewna. Okazało się także, że przy obróbce skrawaniem aktywność EA zależy od kąta natarcia noża i kierunku włókien.

Przemysł maszynowy

Większość obecnych zastosowań metody EA dotyczy badania laboratoryjnego materiałów używanych do budowy maszyn. Metoda EA pozwala na ocenę wytrzymałości krytycznej materiałów, stopnia zmęczenia i inicjacji procesów mikropęknięcia. Metoda EA jest więc stosowana równolegle z innymi metodami kontroli i często daje unikalne informacje służące poprawie jakości wyrobów. Metoda EA pozwala także na kontrolę jakości niektórych procesów technologicznych, zwłaszcza spawania. W tym zakresie metoda EA ma swoje zasłużone miejsce i zdobyła uznanie.

W Polsce prace nad zastosowaniem EA jako nieniszczącej metody badania metali prowadził najpierw Z. Pawłowski [95]. Obecnie badaniem EA w metalach zajmuje się S. Pilecki [96], który zbadał aktywność EA różnych metali przy wzrastającym obciążeniu i mechanizm generacji EA przez dyslokację. Autor ten poświęcił szczególną uwagę wpływowi zmęczenia materiału na aktywność EA [96] i wpływowi korozji naprężeniowej [98].

Kontrolą procesów spawania rur wysokociśnieniowych dla energetyki za pomocą metody EA zajmuje się w Polsce J. Skubis [99]. Określił on dla tego przypadku zależność aktywności EA od przebiegu obróbki cieplnej spoin. Metoda EA pozwala na ocenę prawidłowości samego procesu spawania [100].

Na granicy metod EA i analizy słyszalnych hałasów maszyn leżą badania emisji akustycznej w zakresie wysokich częstotliwości, generowanej na przykład przy pracy łożysk tocznych. W Polsce badania tego typu prowadzą C. Cempel [101] i J. Adamczyk [102], były one także przedmiotem pracy Z. Ranachowskiego.

Przemysł elektroniczny

Metody EA w tym przemyśle zaczynają się rozpowszechniać do badania mikroelektronicznych zespołów, na przykład do oceny usterek w układach scalonych. W Polsce próbowano z pozytywnym wynikiem zastosować (M. Aleksiejuk, J. Raabe, J. Ranachowski) metodę EA do kontroli elementów elektronicznych [103].

Transport

Określenie stopnia wadliwości i zmęczenia części samolotów i pojazdów kosmicznych metodą EA jest przedmiotem intensywnych badań w wielu laboratoriach. Wydaje się, że w przyszłości będzie to jednym z ważniejszych pól zastosowań tej metody. Zwłaszcza, że metoda EA pozwala na prawidłową ocenę stopnia zaawansowania korozji naprężeniowej, na którą narażona jest większość urządzeń transportowych. Innym przykładem wdrażanym do praktyki jest kontrola stopnia zmęczenia szyn kolejowych oraz kontrola szczelności kadłubów okrętowych i części samolotów.

Prowadzone w Polsce wyżej wspomniane prace S. Pileckiego, dotyczące kontroli stopnia zmęczenia materiału, znajdują zastosowanie w kontroli zużycia szyn kolejowych. Prace nad korozją naprężeniową elementów samolotów prowadzi W. Szachnowski.

Przemysł energetyczny

Zastosowania EA spotyka się wielokrotnie przy budowie i eksploatacji urządzeń energetycznych. I tutaj kontrola prawidłowości spoin oddaje cenne usługi. Stale działającą aparaturę EA używa się do kontroli szczelności zbiorników wysokociśnieniowych, przewodów wysokociśnieniowych i osłon reaktorów atomowych, co jest już tradycyjnym zakresem zastosowań. Metoda EA wkracza także do kontroli ruchu urządzeń wysokiego napięcia. Zastosowania są tu różnorodne. Należy do nich kontrola stanu izolatorów liniowych WN na podstawie

pobranej próbek oraz stałe monitorowanie stacji transformatorowych i rozdzielczych dla wczesnego wykrycia wyłączeń niezupełnych i usterek w pracy transformatorów.

W Polsce badania metodą EA związane z przemysłem energetycznym idą w paru kierunkach. J. Skubis bada EA powstającą przy niezupełnych wyłączeniach w podstacjach wysokiego napięcia [104]. Okazało się, że metoda EA może służyć do stałego monitorowania prawidłowości funkcjonowania tych stacji. Prace nad zastosowaniem metody EA do badania wyłączeń niezupełnych prowadzi też K. Łabuz-Nawrot. Dla praktyki ważna jest obserwacja stopnia zużycia poszczególnych ogniw systemu elektroenergetycznego. Znaczącym osiągnięciem było opracowanie przez zespół J. Ranachowskiego metody EA oceny przydatności izolatorów wysokiego napięcia do dalszej eksploatacji [92]. Ciekawy jest też fakt (J. Skubis [105]) zmian aktywności EA przy długotrwałej eksploatacji transformatorów WN.

Przemysł budowlany

Zakres zastosowań EA w tym przemyśle stale się rozszerza, co jest związane z dosyć dobrą korelacją między aktywnością EA a naprężeniem inicjującym w betonie. Celem kontroli jest między innymi ustalenie jakości betonów otrzymanych technologią temperaturową, które są na ogół gorsze od produkowanych w normalnej temperaturze. Konstrukcje spawane są także przedmiotem testowania.

Najważniejszym zastosowaniem metody EA w budownictwie jest w Polsce badanie krótko- i długotrwałego obciążenia próbek i konstrukcji betonowych. Badania Z. Ranachowskiego [106] [107] [108] pozwoliły na wyznaczenie naprężenia inicjującego i naprężenia niszczącego na podstawie sumy zliczeń EA. J. Hoła i Moczko [109] prowadzą badania dotyczące zależności aktywności EA od granulacji betonu i jego obróbki cieplnej, a J. Hoła i J. Pysznik zajmowali się oceną wpływu wilgotności betonu na aktywność EA [110].

Obiekty inżynierskie

Ich przykładem są zapory wodne, najbardziej narażone na zniszczenia. Rysy i przecieki powstające w zaporze mogą być wykrywane metodą EA, która jest w tych wypadkach coraz częściej stosowana. Pewne nadzieje wiąże się z oceną stabilności gruntów pod fundamenty metodami EA. Nad tym ostatnim zagadnieniem pracuje w Polsce J. Skrynicki [111], który badał wpływ stabilności i obciążenia gruntu na aktywność EA. Stwierdził on pewne prawidłowości mogące być podstawą do praktycznego zastosowania monitorowania stanu stabilności gruntów metodą EA.

Przemysł chemiczny

Metoda EA może być stosowana do kontroli urządzeń technologicznych używanych w tym przemyśle, podobnie jak to ma miejsce w przemyśle energetycznym. Zarysowują się jednak także możliwości monitorowania niektórych procesów chemicznych, a nawet automatyzacji ich kontroli przy użyciu metody EA. Przewody i zbiorniki z kompozytów stosowane często w przemyśle chemicznym nadają się szczególnie do badań metodą EA, gdyż pozwala ona na obserwację kolejnych stadiów pęknięcia kompozytu.

Prace nad możliwością zastosowania metody EA do kontroli przewodów wykonanych z kompozytów używanych w przemyśle chemicznym prowadzi L. Gołaski. Stwierdził on [113], że metoda EA pozwala na obserwację poszczególnych stadiów pęknięcia elementów kompozytowych pod obciążeniem i występowania efektu Kaisera w kompozytach [114]. Ten sam autor badał wpływ korozji naprężeniowej na EA stwierdzając [115] nagły wzrost aktywności EA przy długotrwałym działaniu ośrodka agresywnego chemicznie.

Dla przemysłu chemicznego bardzo istotna jest kontrola szczelności zbiorników i przewodów wysokociśnieniowych. Metoda EA ma pod tym względem duże zalety i jest coraz szerzej stosowana. W Polsce prace w tym zakresie prowadzi Z. Witczak [116], który obok badań

laboratoryjnych wpływu wysokiego ciśnienia na aktywność EA przeprowadził *in situ* pomiary tej aktywności w zbiornikach wysokociśnieniowych.

Medycyna

Obserwacja wtórnej emisji oto-akustycznej umożliwi zapewne w przyszłości obiektywną, niezależną od pacjenta diagnostykę patologii organu słuchu, co może być szczególnie cenne przy leczeniu noworodków i małych dzieci.

Badania te zostały w Polsce podjęte przed kilku laty przez W. Bochenek i jej współpracowników [117] i są nadal prowadzone od strony doskonalenia aparatury i zbierania materiałów klinicznych. Rezultaty są zachęcające [118]. Wydaje się, że w przyszłości metoda EA może znaleźć również inne zastosowania w biologii i medycynie.

Nową dziedziną, w której badania będą wkrótce rozpoczęte w Polsce, jest zastosowanie metody EA do kontroli spójności kości łącznie z diagnostyką złamań.

Badania z dziedziny fizyki i chemii

W miarę zwiększania czułości i precyzji, metoda EA znajduje coraz szersze zastosowanie w fizycznych laboratoriach badawczych. Wydaje się, że szczególnie ciekawymi obiektami badań tą metodą będą:

- tworzenie się i ruchy grup dyslokacji, a w przyszłości może również pojedynczych dyslokacji,
- procesy zachodzące w nadprzewodnikach w pobliżu temperatury krytycznej,
- mechanizm przemian fazowych zachodzących w procesach chemicznych i termicznych,
- procesy elektromechaniczne towarzyszące mikropękaniu.

W każdej z wymienionych dziedzin można odnotować badania prowadzone w Polsce.

Ruchami dyslokacji w metalach i związkiem tego zjawiska z aktywnością EA i zmianą tłumienia ultradźwięków zajmuje się od strony teoretycznej i doświadczalnej S. Pilecki [119] [120]. Badaniu mechanizmu generacji EA przez ruchy dyslokacji w monokryształach poświęcone są prace A. Pawełka [121].

Nad badaniem generacji EA w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych pracują dwa zespoły: A. Opilski - F. Witos i L. Woźny - B. Mazurek. Wynikiem tych badań było stwierdzenie występowania lokalnych grup sygnałów EA w funkcji zmian temperatury. W nadprzewodnikach Y-Ba-Cu-O w zakresie 80-210 K i wyżej występowały trzy maksima, przy czym aktywność EA rosła ze spadkiem temperatury [122] [123]. Bliższe zbadanie procesów zachodzących w pobliżu temperatury krytycznej [124] pozwoliło ustalić zależność aktywności EA od przepływającego prądu. Sygnały EA występowały także w stanie bezprądowym. Wykryto również, że przy zmianach temperatury w elektromagnesie Nb Ti występował wyraźnie efekt Kaisera w zakresie nadprzewodnictwa [125].

Obserwowane efekty wskazują na to, że metoda EA może stanowić narzędzie badania zjawisk zachodzących w stanie nadprzewodnictwa, jeszcze nie całkiem wyjaśnionych.

Metoda EA nadaje się także do obserwacji procesów chemicznych, gdyż może to dać unikalne informacje o mechanizmie tych procesów.

W Polsce zastosowaniem metody EA do monitorowania procesów chemicznych zajmuje się dr J. Rzeszotarska. Pierwsza seria badań przeprowadzonych przez nią dotyczyła reakcji oscylacyjnych [112]. Autorka stwierdziła wyraźną zależność uśrednionej wartości tempa zdarzeń od przebiegu tego typu reakcji. Następnym obiektem badań był proces topienia siarki, przy którym autorka wykryła wpływ czasu trwania procesu na aktywność EA i jego asymetrię przy topieniu i studzeniu [91].

Charakter poznawczy mają również badania procesów uwalniania się ładunków elektrycznych przy propagacji pęknięć prowadzone przez zespół J. Ranachowskiego. Okazuje się, że miarą tego zjawiska może

być aktywność EA. Jest to unikalna, bezkontaktowa metoda oceny stopnia degradacji materiału [90] [126].

3. LITERATURA

- [1] Reed J., *Prelude to Chemistry*, Bell, London, 75, (1939).
- [1a] Holmyard E.J., *The Works of Geber.*, ed. J.M. Dent, New York, (1928)
- [2] Obert L., *Use of Sub-audible Noises for Prediction of Rock Burst*, US Bur. Mines Rep. Invest. R1-3555, (1941).
- [3] Obert L., Duvall W., *Use of Sub-audible Noises for Prediction of Rock Burst, Part 2*, US Bur. Mines Rep. Invest. R1-3654, (1942).
- [4] Hodgson E.A., *The Seismicity in Deep Mines*, Bull. Seismol. Soc. Am., 32, 249, (1942).
- [5] Shamin O.G., *Uprugije impulsy pri rozruszenii gornych porod*, Izd. Ak. Nauk SSSR ser. geolog. No. 5, 513, (1956).
- [6] Vinogradov S.D., *Akusticzeskie nabludenia procesov rozrushenia gornych porod*, Moskva, Izd. Nauka, (1964).
- [7] Kaiser J., *Untersuchungen über Auftreten von Geräuschen bei Zugversuch*, Das T.H., München, (1950).
- [7a] Czochralski J., *Fortschritte der Metallographie: Einfluß der Formänderung*, Stahl u. Eisen, 37, 502, (1917).
- [8] Kaiser J., *Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen*, Arch. f. Eisenhüttenwesen, 25, 43, (1953).
- [9] Tatro G.A., Liptai R.G., *Acoustic Emission from Crystalline Materials*, Proc. Symp. Phys. Non-destr. Testing, San Antonio, Texas, (1962).
- [10] Schofield B.H., *Acoustic Emission from Metals*, Proc. Symp. Phys. Non-destr. Testing, San Antonio, Texas, (1963).
- [11] James D.R., Carpenter S.H., *Acoustic Emission due to Dislocation Movements*, J. Appl. Phys., 42, 4685, (1971).
- [12] Nacik W.D., *Zliczenie zvuka dislokacije vychodiaszczych na powierchnost krystalu* Pisma Jour. Eksp. Teor. Fiz., 8, 324, (1968).

- [13] Lord A.E., Acoustical Emission, Physical Acoustics, W.P. Mason ed., Acad. Press N. York, 11, 289, (1975).
- [14] Hartbower C.E., Gerberich W.W., Crimmins P.P., Characterization of Fatigue Crack Growth by Stress Wave Emission, Inst. J. Fract. Mech, 3, 185, (1967).
- [15] Hill R., Stephens R.W.E., Sonic Emission during Deformation of Solids, Archiwum Akustyki, 6, 45, (1971).
- [16] Finkel W.M., Serebriakov S.W., Izłuczenije zvukowych i ultrazvukowych impulsow pri rostie treszczin w stali, Fizika Metelłov, 25, 543, (1968).
- [17] Reymond M.C., Patron J., Etude des sources d'emmission lors de l'utilisation de la pétite sismique, Anaes des Travaux Public de Belgique, No. 2, 123, (1986).
- [18] Mogi K., Some Discussions on Aftershocks, Forshocks, and Earthquake Swarms, Bull. Earthquake Res. Inst., 41, 615, (1963).
- [19] Dunegan H.L., Harris D.O., Tatro C., Fracture Analysis by Use of Acoustic Emission, Eng. Fracture Mech., 1, 105, (1968).
- [20] Dunegan H.K., Harris D.O., Acoustic Emission - a New Non-destructive Tool, Ultrasonic, 7, 160, (1969).
- [21] Hutton P.H., Parry D.L., Assessment of Structural Integrity by Acoustic Emission, Materials. Res. Stand., 11, 25, (1971)
- [22] Pollack A.A., Acoustic Emission from Solids Undergoing Deformation, Ultrasonic, 6, 88, (1968).
- [23] Frederick J.R., Felbeck D.K., Acoustic Emission, ASTM STP, 505-129, Baltimore, (1972).
- [24] Agarwal A.B.L., Frederick J.R., Felbeck D.K., Detection of Plastic Micro-strain in Aluminium by Acoustic Emission, Metal Transact., 1, 1069, (1970).
- [25] Engle R.B., Dunegan M.L., The Acoustic Emission Use in NDT, Inter. Non-destr. Test., 1, 109, (1969).
- [26] Armstrong B.M., Microcracks in Rocks, Bull. Seismol. Soc. Amer., 59, 385, (1966).
- [27] Eshelby J.D., Proc. Roy. Soc. A., 197, 396, (1949).

- [28] Gilman J.J., Dislocations by Plastic Strain, Proc. of 5-th US Congress Appl. Mech., 385, (1966).
- [29] Geberich W.W., Hartbower C.E., Some Observation on Stress Wave Emission as a Measure of Crack Growth, Int. J. Fracture Mech., 3, 187, (1967).
- [30] Pao Y.H., Gajewski R., Cerenoglu A.N., Acoustic Emission on Transient Waves in Elastic Plate, J. Acoust. Soc. Amer., 65, 96, (1979).
- [31] Pao Y.H., Gajewski R., The Generalized Ray Theory and Transient Waves in an Elastic Solid, Physical Acoustic, W.P. Mason ed., Academic Press, N. York, 16, 183, (1977).
- [32] Ceronaglu A.N., Pao Y.H., Propagation of Elastic Pulses and Acoustic Emission in Plates, J. Appl. Mech., 48, 125, (1981).
- [33] Ono K., Amplitude Distribution Analysis of Acoustic Emission Signals, Mat. Evaluation, 34, 177, (1976).
- [34] Mogi K., The Fracture of a Semi-infinite Body Caused by the Inner Stress Origin and Its Relation to the Earthquake Phenomena, Bull. Earthquake Res. Inst., 40, 815, (1962).
- [35] Scholz C.H., Acoustic Emission in Rocks, J. Geography Res., 73, 3295, (1968).
- [36] Evans A.G., Residual Stress Measurement Using Acoustic Emission, J. Amer. Ceramic Soc., 58, 239, (1975).
- [37] Lord A.E., Acoustic Emission - an Update, Physical Acoustics, W.P. Masen ed., Acad. Press, N. York, 15, 295, (1981).
- [38] Mechan R.L., Mullin J.V., Analysis of Composite Failure Mechanisms Using Acoustic Emission, J. Composite Mater., 5, 266, (1971).
- [39] Hsu T.C., Mathematical Analysis of Shrinkage Stress in a Model of Hardened Concrete, Jour. Am. Concr. Inst., 60, 469, (1963).
- [40] Weigler H., Feincis N., Anwendung der Schallemissionanalyse bei Beton, Material Prüfung, 3, 70, (1983).
- [41] Noguchi M., Acoustic Emission from Wood and Wood-based Materials, J. Soc. Mater. Science of Japan, 34, 896, (1985).

- [42] Nomura H., Takahira K., Sakai T., Acoustic Emission from Superconducting Magnets, *Cryogenics*, 17, 471, (1977).
- [43] Nomura H., Sinclair M.N.L., Iwasa Y., Acoustic Emission in Composite Copper NbTi Superconductor, *Cryogenics*, 20, 283, (1980).
- [44] Pasztor G., Schmidt C., Acoustic Emission from NbTi Superconductors during Flux Jump, *Cryogenics*, 11, 227, (1973).
- [45] Palmer I.G., RE Measurement on Reactor Pressure Vessel, *Mat. Sc. Eng.*, 11, 227, (1973).
- [46] Nakamura J., Acoustic Emission Monitoring System from Detection of Cracks in a Complex Structure, *Materials Evaluation*, 29, 8, (1971).
- [47] Novikov N.V., Lichackij S.J., Metodika akusticzeskoj indikacii processa rozruszania metal'ov, *Stroitielna Technika Korablia*, No. 173, (1972).
- [48] Waite E.W., Parry D.L., Field Evaluation of Heavy-walled Pressure Vessels Using Acoustic Emission, *Mater. Evaluation*, 39, 9, (1971).
- [49] Notvest K., Welding Testing with Acoustic Emission, *Welding J.*, N. York, 45, 173, (1966).
- [50] Carpenter J.H., Kresge J.S., Music C.B., Ultrasonic Corona Detection in Transformers, *IEEE Trans. PAS*, 84, 647, (1965).
- [51] Harrold R.T., The Relationship between Ultrasonic and Electrical Measurements of Under Oil Corona Sources, *IEEE Trans. EJ*, 11, 8, (1976).
- [52] Garnier J.E., Repal A.S., Bates J.L., Application of Acoustic Emission to Evaluation of Dielectric Breakdown in Insulator Materials, *Bull. Amer. Ceramic Soc.*, 55, 533, (1976).
- [53] Kusanagi H., Kimura H., Sasaki H., Stress Effect of the Magnitude of Acoustic Emission during Magnetization of Ferromagnetic Materials, *J. Appl. Physics*, 50, 661, (1979).
- [54] Ono K., Shibata M., Magnetomechanical Acoustic Emission in Iron and Steels, *Mat. Evaluation*, 38, 55, (1980).

- [55] Wade A.P., Soulsbury K.A., Chow P.Y.T., Brock T.M., Strategies for Characterization of Chemical Acoustic Emission Signals Near the Conventional Detection Limit, *Analitic Chemica Acta*, 246, 23, (1991).
- [56] Kemp D.T., Simulated Acoustic Emission from the Human Auditory System, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1386, (1978).
- [57] Milburn J.A., Johnson R.P.C., Acoustic Emission of Plants, *Plant*, 69, 43, (1966).
- [58] Honeycutt R.M., Skaar C., Simpson W.T., Acoustic Emission of Trees, *Forest Prod. J.*, 35, 48, (1985).
- [59] Fuji Y., Noguchi M., Imamura Y., Tokaro M., Using Acoustic Emission Monitoring to Detect Termite Activity in Wood, *Forest Prod. J.*, 40, 34, (1990).
- [60] Mason W.P., *Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics*, van Nostrand Princeton, (1950).
- [61] Borchers H., Tensi H.M., Piezoelektrische Impulsmessung während der mechanischen Beanspruchung, *Z.f. Metallkunde*, 53, 692, (1962).
- [62] Scruby C.B., Wadley H.N.G., A Calibrated Capacitance Transducer for the Detection of Acoustic Emission, *J. Phys. D.*, 11, 2359, (1978).
- [63] Palmer H.C., Green R.E., Materials Evaluation by Optical Detection of Acoustic Emission Signals, *Mat. Evaluation*, 35, 107, (1977).
- [64] Dunegan H.L., Green A.T., Factors Effecting Acoustic Emission Response from Materials, *Mat. Res. Stand.*, 11, 21, (1972).
- [65] Kline R.A., Green R.E., Comparison of Optically and Piezoelectrically Sensed AE Signals, *J. Acoust. Soc. Am.*, 64, 1633, (1978).
- [66] Graham L.J., Multiparameter Analysis for Acoustic Emission Sources Identification, *Proc. 25 Inter. Instrum. Symp.*, Anaheim CA, (1979).

- [67] Breckenridge F.R., Tschiegg C.E., Greenspan M., Acoustic Emission: Some Applications of Lambs Problem, *J. Acoust. Soc. Am.*, 57, 626, (1975).
- [68] Hsu N.N., Simmons J.A., Hardy S.C., An Approach to Acoustic Emission Signal Analysis, *Mater. Evaluation*, 35, 100, (1977).
- [69] Hsu N.N., Breckenridge F.R., Characterization and Calibration of Acoustic Emission Sensors, *Mat. Evaluation*, 39, 60, (1981).
- [70] Mc Bride S.L., Hutchison T.S., Absolute Calibration of the Helium Gas Jet Noise Source, *Canadian J. of Phys.*, 56, 504, (1978).
- [71] Scruby C.B., Laser Generation and Reception of Ultrasound, *Ultrasonic International*, 25, 128, (1987).
- [72] Hatano H., Mori E., Acoustic Emission Transducer and Its Absolute Calibration, *J. Acoust. Soc. Am.*, 59, 344, (1976).
- [73] Akustyka w technice i medycynie, koordynator Ranachowski J., IPPT, Warszawa, (1985).
- [74] Zagadnienia akustyki w technice, medycynie i kulturze oraz ich wykorzystanie do projektowania urządzeń i procesów, koordynator Ranachowski J., IPPT, Warszawa, (1990).
- [75] Hill R., Acoustic Emission. 20 Years of Development and Future Prospects, *Proc. 14th ICA Congress, Beijing, Paper L1-5*, (1992).
- [76] Grabec J., Sachse W., Application of an Intelligent Signal Processing System to Acoustic Emission Analysis, *J. Acoust. Soc. Am.*, 85, 1226, (1989).
- [77] European Working Group on AE Codes, *Non-destructive Testing International*, 18, 185-193, (1985).
- [77a] *Non-destructive Testing Handbook, vol. 5, Acoustic Emission Testing*, ed. R.K. Miller, P. Mc Intrire, Amer. Soc. NDT, New York, (1987).
- [78] Bergmann L., *Der Ultraschall*, Hirzel, Stuttgart, (1954).
- [79] Opilski A., Witos F., Ranachowski J., Ranachowski Z., Applications of AE for Investigations of Stress in Geological Materials, *Acoust. Letters*, 8, 109, (1985).

- [80] Opilski A., Witos F., Applications of Acoustic Emission in Mining, Proc. 14 ICA Congress, Beijing, Paper L1-6, (1992).
- [81] Chudek M., Zakrzewski T., Zastosowania EA w badaniach stanów deformacyjno-naprężeniowych w górotworze i otoczeniu wyrobisk górniczych, Przegląd Górniczy, 5, (1985).
- [82] Witos F., Opilski A., Lutyński A., Investigations of AE Pulses in Horizontal Transport Belts Used in Mining, Ultrasonisc, 27, 182, (1989).
- [83] Malecki I., Kołtoński W., Ultrasonic Method for the Exploration of the Properties and Structure of Minerals, Acustica, 8, 307, (1958).
- [83a] Kołtoński W., Propagacja fal ultradźwiękowych w skałach i jej praktyczne zastosowania, PWN, Warszawa, (1969).
- [84] Jaroszewska A.M., Dependence of the AE Maximum Burst Amplitude on the Deformation Mechanism in Some Rocks, Arch. Acoust., 15, 3, (1990).
- [84a] Reymond M.C., Jaroszewska A.M., Study of AE in Rock Specimens from Copper Mines in Poland, Journ. d'Acoustique, 4, 525, (1991).
- [85] Karpiniuk P., Pawłowski Z., Acoustic Emission during Deformation and Fracture Processes, Proc. 7th Intern. Conf. NDT Warszawa, 2, 211, (1973).
- [86] Pilecki S., Siedlaczek J., Badanie inicjacji pęknięć w stali szynowej metodą emisji akustycznej, Hutnik, 65, 27, (1987).
- [87] Pilecki S., Siedlaczek J., Acoustic Activity of Some Metals Determined by Acoustic Emission Method, Arch. Acoust., 14, 261, (1989).
- [88] Ranachowski J., Rejmund F., Selected Acoustical Methods in the Investigation of Materials and Polish Apparata, Scientific Instrumentation, 5, 167, (1990).
- [89] Ranachowski J., Rejmund F., Librant Z., Emisja akustyczna w zastosowaniu do materiałów kruchych, Problemy i Metody Współczesnej Akustyki, red. J. Ranachowski, PWN, Warszawa, 105, (1989).

- [90] Ranachowski J., Rejmund F., Librant Z., Badanie ośrodków kruchych metodą emisji akustycznej, Prace IPPT nr 28, (1992).
- [91] Malecki I., Ranachowski J., Rejmund F., Rzeszotarska J., Acoustic Emission Generated by Thermo-Mechanical Processes, *Acustica*, (w druku).
- [92] Bertrand J., Ranachowski J., Rejmund F., Zastosowanie metody EA do termomechanicznego testowania izolatorów, Prace IPPT, (1993).
- [93] Moliński W., Raczkowski J., Poliszko S., Ranachowski J., Mechanism of AE in Wood Soaked in Water, *Holzforschung*, 45, 13, (1991).
- [94] Raczkowski J., Moliński W., Ranachowski Z., Emisja akustyczna w drzewnictwie, Prace IPPT nr 27, (1992).
- [95] Pawłowski Z., Fatigue Time Prediction Using AE Analysis, Proc. 12th World Conference NDT Elsevier, s. 1490, (1989).
- [96] Pilecki S., Wykorzystanie emisji akustycznej w badaniach własności mechanicznych i pęknięcia ciał stałych, *Arch. Akust.*, 21, 109, (1986).
- [97] Pilecki S., Siedlaczek J., Dusek F., AE of Structural Steel at Low-Cycle Fatigue, *Arch. Acoust.*, 16, (1991).
- [98] Pilecki S., Metody akustyczne w badaniach metali, *Problemy współczesnej akustyki*, IPPT, 2, 71, (1991).
- [99] Skubis J., Pomiary charakterystyk materiałowych i emisji akustycznej złącza spawanego ze stali, *Prace Nauk-Bad. WSJ Opole Nr 1*, (1991).
- [100] Skubis J., Matlachowski W., Achtelik H., Jeziorski G., Pomiary materiałowe i EA złącza spawanego ze stali, 13 HMF, 4 *Konf. spawanie w energetyce*, Opole, 113, (1991).
- [101] Cempel C., Majewski M., *Proc. Noise Control 88*, Cracow, 1, 5, (1988).
- [102] Adamczyk J., Zadania wibroakustycznej diagnostyki w systemie eksploatacji maszyn i urządzeń, *Mechanika*, Kraków, 2, 20, (1989).

- [103] Aleksiejuk M., Raabe J., Ranachowski J., Technology and Acoustic Properties of the Ceramic High-Temperature Superconductor, Arch. Acoust., 16, 387, (1991).
- [104] Skubis J., Ocena wyładowań niezupełnych w izolacji urządzeń elektroenergetycznych metodą EA, Zesz. Nauk. WSJ, Opole, Nr 107, (1986).
- [105] Skubis J., Ranachowski J., Gronowski B., Detection of PD in Power Transformers Using AE Method, Journ. Acoust. Emission, 5, 25, (1986).
- [106] Ranachowski Z., Wyznaczanie naprężeń krytycznych w betonie przy pomocy zautomatyzowanych pomiarów EA, Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, (1990).
- [107] Ranachowski Z., Application of AE Method to Determine the Limit of Proportionality and Static Strength of Concrete, Brittle Composite Matrix, Elsevier, London, 3, 234, (1991).
- [108] Hoła J., Ranachowski Z., Wykorzystanie metody EA w ocenie wpływu czynników technologicznych i eksploatacyjnych na proces niszczenia betonu, Prace IPPT nr 37, (1992).
- [109] Hoła J., Moczko A., Evaluation of the Aggregate Granuling on the Behavior of Concrete, Brittle Matrix Composites, Elsevier, London, 527, (1986).
- [110] Pyszniak J., Hoła J., Application of Acoustic Methods to Assessment of Concrete Humidity Influence, Arch. Acoust., 16, 2, (1991).
- [111] Skrynicki J., Zjawisko EA w glebach rolniczych i gruntach, Prace nauk. Politechniki Lubelskiej, 229, (1991).
- [112] Mikiel W., Ranachowski J., Rejmund F., Rzeszotarska J., Information Contens of Exemplified by Physical-Chemical Processes, Arch. Acoust., 15, 185, (1990).
- [113] Gołaski L., Kumosa M., Hull D., AE Testing of Filament Wound Pipes under Repeated Loading, J. AE, 2, 95, (1989).
- [114] Gołaski L., Ranachowski J., Service Life Prediction of Glass Reinforced Plastics by AE, Conf. ASNT, Paris, 101, (1989).

- [115] Gołaski L., Fracture of Glass Reinforced Pipes under Inert and Corrosive Environment Conditions, Proc. 8th Conf. on Offshore Mech. and Arct. Eng., Haga, 263, (1989).
- [116] Witczak Z., Szczepok J., Jemieliński R., The Apparatus for Mechanical Testing of Materials under High Hydrostatic Pressure with the in-situ AE Analyser, High Pressure Res., (w druku).
- [117] Bochenek W., Kiciak J., Audiometrie des hautes frequences par electrostimulation, Comp. R. 87e Congr. Oto-Rhino-Laryngologie, Paris, L'Arnette, 137, (1991).
- [118] Bochenek W., Ranachowski Z., Kiciak J., Skubis K., Usznej emisje, Problemy Współczesnej Akustyki, PWN, Warszawa, 439, (1991).
- [119] Pilecki S., Wstęp do dyfuzyjnej teorii zmęczenia metali, Prace IPPT Nr 8, (1970).
- [120] Pilecki S., Ranachowski J., Rejmund F., Emisja akustyczna generowana przez dyslokacje ruchome, OSA 27, 1, 106, (1989).
- [121] Pawełek A., Dybiec H., Bochniak W., Stryjewski W., AE in Monocrystals, Arch. Metalurgy, 33, 645, (1988).
- [122] Witos F., Opilski A., Investigation of Deformational Processes in Y-Ba-Cu-O Superconducted Samples by Means of AE Signals, Proc. 14th ICA Congr., Beijing, Paper L1-4.
- [123] Witos F., Opilski A., Lutyński A., AE in Superconductors, Ultrasonics, 27, 182, (1989).
- [124] Woźny L., Mazurek B., Ranachowski J., AE of Superconducting Materials, Bull. Pol. Ac. Sc., Techn. Sc., 39, Nr 2 1, (1991).
- [125] Woźny L., Technologiczne uwarunkowania prądów krytycznych w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych, Praca doktorska, Wrocław, (1992).
- [126] Ranachowski J., Rejmund F., Raabe J., Petrowski W., Acoustic and Electric Methods of Brittle Material Testing, Acoustic Letters, (w druku) (1993).