



Jerzy Ranachowski\*, Przemysław Ranachowski\*

## **METODY AKUSTYCZNE W BADANIACH CERAMICZNYCH IZOLATORÓW ENERGETYCZNYCH**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wykorzystanie akustyki do badania ceramiki elektrotechnicznej. Opisano podstawy i zastosowanie defektoskopii ultradźwiękowej, elastometrii oraz ultradźwiękowych pomiarów porowatości. Na podstawie związku porowatości z wytrzymałością mechaniczną i dielektryczną przedstawiono możliwość nieniszczącej oceny tych parametrów. Wspomniano o metodzie emisji akustycznej umożliwiającej ocenę degradacji tworzywa po okresie eksploatacji izolatora.

**Słowa kluczowe:** izolatory, badania ultradźwiękowe, defektoskopia, elastometria, emisja akustyczna

### **1. Wstęp**

Materiały ceramiczne, a w szczególności porcelana elektrotechniczna, należą do tworzyw o trudnej technologii. Zachodzące podczas procesu wypalania mas ceramicznych przemiany do dzisiaj nie są w pełni rozeznane. Jakikolwiek błąd technologiczny, popełniony na dowolnym z etapów wytwarzania wpływa na ostateczną jakość i niezawodność wyrobu i nie da się już skorygować w kolejnych etapach procesu technologicznego. Tworzywo bowiem posiada pamięć przeprowadzonych procesów, a zwłaszcza takich czynników jak skład i uziarnienie zestawu masy, przepływy reologiczne w procesie formowania, parametry procesów suszenia i wypalania. Powyższe względy zdecydowały, iż metody akustyczne, jako nieniszczące, zostały wprowadzone stosunkowo wcześniej w przemyśle elektroceramicznym, w którym wyroby są szczególnie odpowiedzialne. Muszą one odznaczać się wysoką jakością i trwałością, a co za tym idzie,

---

\* Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa

wysoką niezawodnością w eksploatacji. Jest to w przypadku tworzyw kruchych warunk trudny, zwłaszcza z uwagi na ciężkie warunki eksploatacyjne jak duże gradienty temperatur pracy, wilgoć, oblodzenia, czynniki zabrudzeniowe, a zwłaszcza wysokie obciążenia mechaniczne, w tym szczególnie niebezpieczne dla tworzyw kruchych obciążenia dynamiczne. Wprowadzenie metod ultradźwiękowych w krajowym przemyśle elektroceramicznym nastąpiło na początku lat 50-tych [1]. Wprowadzono je w zastosowaniu do nieniszczących badań izolatorów wysokonapięciowych. Ich wykorzystanie umożliwiła prostota samej metody oraz niewysokie koszty aparatury defektoskopowej, nie wymagającej dodatkowej adaptacji do badań ceramicznych. Akustyczne metody zastosowane do badań ceramiki w ujęciu chronologicznym przedstawiono poniżej:

- Defektoskopia ultradźwiękowa dotycząca wykrywania nieciągłości ośrodka w skali makroskopowej, oparta na odbiciach impulsów od wad typu wtrąceń, rozwarstwień, pęcherzy. Stosowana jest głównie do badania izolatorów pełnopniowych.
- Badania cech struktury czerepu takich jak porowatość i jej parametry oraz uziarnienie na drodze pomiarów prędkości propagacji fal ultradźwiękowych.
- Elastometria, czyli wyznaczanie dynamicznych stałych sprężystych na podstawie prędkości propagacji podłużnych i poprzecznych fal ultradźwiękowych.
- Wyznaczanie wytrzymałości mechanicznej i dielektrycznej tworzyw na drodze korelacji tych wielkości z prędkością propagacji i tłumieniem fal ultradźwiękowych.
- Oznaczanie wilgotności suszonych mas ceramicznych w płódkach przed formowaniem.
- Badania procesów kruchego pęknięcia ceramiki metodą emisji akustycznej.
- Ocena stopnia degradacji tworzywa izolatorowego metodą badań termomechanicznych izolatorów pełnopniowych z wykorzystaniem emisji akustycznej.

W pracy, z uwagi na ograniczoną jej objętość, opisane zostaną jedynie te metody, które stosowane są obecnie w badaniach fabrycznych i eksploatacyjnych ceramicznych izolatorów pełnopniowych.

## 2. Wykorzystanie fal akustycznych w badaniach ceramiki

Propagacja fal ultradźwiękowych dotyczy mechanicznych zjawisk falowych o częstotliwościach większych niż górna granica słyszalności ucha ludzkiego (ponad 16 kHz). Warunki propagacji fal akustycznych zależą od własności ośrodka w którym się one rozchodzą. W przypadku ciał stałych uzależnione są od ich własności sprężystych oraz budowy strukturalnej. Wynika stąd możliwość badania parametrów ośrodka, co jest szczególnie cenne w przypadku obiektów w których niemożliwe są badania metodami optycznymi. Fala ultradźwiękowa określana jest jako zjawisko przenoszenia ruchu drgającego. Cząstki ośrodka które zostają pod działaniem siły zewnętrznej wychylone z położenia równowagi wracają następnie z powrotem na skutek działania sił sprężystych. Bezwładność cząstek powoduje, że wychylają się one w drugą stronę dołąd, aż ich energia kinetyczna nie zamieni się w energię sprężystą (potencjalną). Część energii cząstek drgających przekazana zostaje cząstkom sąsiednim, a te zaczynają

drgać przekazując energię dalej. Ponieważ każda cząstka zaczyna drgania z opóźnieniem względem poprzedniej, stąd zaburzenie przesuwa się z określoną prędkością. To zjawisko przenoszenia się drgań nazywamy ruchem falowym, a prędkość przenoszenia — prędkością fali. Ogólnie można powiedzieć, iż wszystkie metody ultradźwiękowe w zastosowaniu do badania ceramiki opierają się głównie na dokładnych pomiarach czasu przejścia impulsu ultradźwiękowego przez badaną próbkę lub obiekt. Badanymi parametrami mogą być prędkość różnego rodzaju fal ultradźwiękowych (podłużnych, poprzecznych, powierzchniowych, giętnych) oraz tłumienie fal. W stałym ośrodku ciągłym jednorodnym bez strat rozchodzą się niezależnie dwie fale płaskie — podłużna o prędkości  $c_L$  i poprzeczna  $c_T \approx 0,6c_L$ . Fala podłużna jest szczególnym przypadkiem fali dylatacyjnej bezwirowej polegającej na lokalnych zmianach gęstości ośrodka. Fala poprzeczna odpowiada fali ścinającej polegającej na tworzeniu się wirów bez zmiany gęstości ośrodka. W opisie trzeba brać za punkt wyjścia podstawowe równanie rozchodzenia się fali w ośrodku w następującej postaci:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left( K + \frac{1}{3}\mu \right) \text{grad div } u + \mu \nabla^2 u \quad (1)$$

gdzie:  $u$  oznacza przesunięcie ośrodka, stałe Lamé;  $K$  – moduł sprężystości objętościowej oraz  $\mu$  – moduł ścinania.

Dla ośrodków izotropowych, w których propaguje się ultradźwiękowa fala sprężysta w kierunku osi  $x$  otrzymuje się dwa proste równania propagacji:

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \left( K + \frac{4}{3}\mu \right) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad \text{dla fali podłużnej} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \quad \text{dla fali poprzecznej} \quad (3)$$

gdzie:  $\rho$  oznacza gęstość ośrodka,  $(K + 4/3\mu)$  — moduł przestrzenny.

W zastosowaniach technicznych własności sprężyste materiałów opisywane są przez moduł sprężystości wzdłużnej Young’a  $E$  oraz liczbę (ułamek) Poissona  $\nu$ . Przy rozpatrywaniu sprężystości w zakresie cząsteczkowym parę modułów sprężystości nazywa się stałymi lub współczynnikami Lamé. Współczynniki Lamé wyprowadzane są bezpośrednio z równań falowych.

Zależności pomiędzy współczynnikami technicznymi, a stałymi Lamé przedstawiają wzory:

$$\begin{aligned} K &= E/3(1 - 2\nu); \\ \mu &= E/2(1 + \nu). \end{aligned}$$

Z zależności (2) i (3) można bezpośrednio wyprowadzić prędkości fal podłużnych i poprzecznych dla ośrodków izotropowych, do których należą rozpatrywane materiały ceramiczne. Zależności te wyrażone są w stałych Lamé i stałych technicznych:

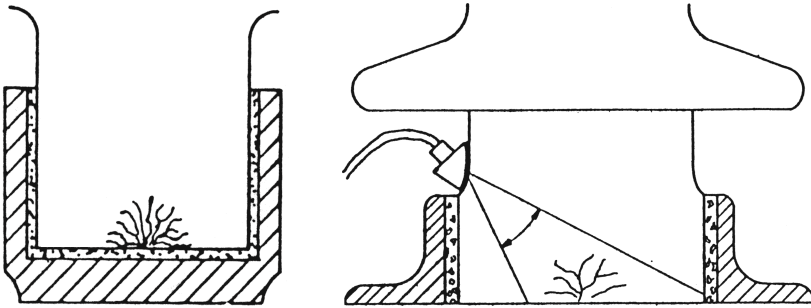
$$c_L = \sqrt{\frac{3K + 4\mu}{3\rho}} = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (4)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1 + \nu)}} \quad (5)$$

**Defektoskopia ultradźwiękowa** opiera się na wprowadzeniu do materiału ceramicznego wiązki fal i stwierdzeniu odbicia całości lub części tej wiązki od granicy niejednorodności. Z punktu widzenia propagacji fal nieciągłość ta jest funkcją impedancji falowej. Impedancja  $Z_f$  zależy od stałych sprężystych ośrodka i wyrażona może być zależnością  $Z_f = \rho c$ , gdzie  $c$  oznacza prędkość fal ultradźwiękowych w ośrodku. Współczynnik odbicia  $k$  fali płaskiej biegnącej i padającej prostopadłe na wadę w formie półprzestrzeni wyraża się wzorem:

$$k = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (6)$$

gdzie:  $Z_1$  — impedancja falowa ośrodka nośnego,  $Z_2$  — impedancja falowa wtrącenia.



**Rys. 1.** Mikropęknięcia przy podstawie okutej stopy izolatora wsporcze oraz technika ultradźwiękowej detekcji wad tego typu

W przypadku gdy nieciągłością jest pęcherz wypełniony gazem lub szczelina, wartość bezwzględna współczynnika odbicia jest dla fali płaskiej zbliżona do jedności, co zapewnia dużą czułość defektoskopii ultradźwiękowej przy wykrywaniu tego typu wad w ceramice. Stąd metoda ultradźwiękowa stosowana jest jako podstawowa próba wyrobu we wszystkich wytwórniach izolatorów ceramicznych. Analiza wzoru (6) prowadzi do wniosku, że współczynnik odbicia  $k$  może być jednak bardzo mały dla ośrodków o zbliżonych impedancjach akustycznych, co ma miejsce na przykład dla porcelany i ołowiu. Stąd wynikają trudności w badaniach okutej części izolatorów, gdzie jako spoiw używa się stopu Pb/Sb. Metody defektoskopowe mają pewne ograniczenia. Wynikają one z charakteru wad, współczynnika sprężenia i położenia wady w stosunku do głowicy nadawczej. Izolatory pełnopniowe, jako posiadające dwie równoległe płaszczyzny, po obciążeniu bomz dobrze nadają się do wykrywania wad wewnątrz pnia. Pewne trudności stwarzać mogą małe wtrącenia w bezpośredniej bliskości szkliwa. Prawdziwy problem jednak stanowi badanie izolatorów wsporczych, w których wady umiejscowione są w okutej stopie. W czasie eksploatacji wady te,

zapoczątkowane błędami technologicznymi — najczęściej w procesie wypalania, powiększają się do wymiarów krytycznych, powodując awarie. Detekcja defektów tego typu wymaga użycia zestawu specjalnych, kątowych głowic, opracowanych dla danego typu izolatorów wsporczych. Głowice takie umożliwiają wprowadzenie ugiętej wiązki fal ultradźwiękowych do pnia izolatora bezpośrednio poniżej pierwszego klosza. Taką ugiętą wiązką ultradźwiękową możliwe jest osiągnięcie odbicia od płaszczyzny podstawy izolatora. Badania tego rodzaju opisane i stosowane są zagranicą w przypadku izolatorów po dłuższym okresie eksploatacji [2]. Wstępne badania tego typu zostały wykonane w IPPT PAN dla izolatorów wsporczych typu C4-550-II [3].

**Pomiary porowatości** tworzyw ceramicznych są możliwe dzięki temu, iż prędkość propagacji fal podłużnych jest silnie uzależniona od inkluzji wewnątrz materiału, a zwłaszcza porów. Zagadnieniami tymi zajmowali się w kraju Malecki i Ranachowski [4] i [5]. Dla ośrodków ceramicznych wykorzystano statyczną metodę polegającą na zastąpieniu ośrodka z inkluzjami, hipotetycznym ośrodkiem ciągłym o zastępczych modułach sprężystości podanych przez Mac Kenziego [6]. Do wzoru (4) podstawiono za stałe  $K$  i  $\mu$  dla ośrodka bez porów stałe sprężyste ośrodka porowatego obliczone przez Mac Kenziego:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_0} + \frac{3}{4\mu_0} \left( \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \right) (1 + Qq^2)$$

$$\mu = \mu_0 \left( 1 - Q \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \right)$$

gdzie:  $Q = \frac{5(3K_0 + 4\mu_0)}{9K_0 + 8\mu_0}$ ,  $q^2 = \frac{1}{r_0^6} \int_0^\infty a^6 f(a) da - p^2$ ,  $K_0 = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$ ,

$p$  — porowatość,  $f$  — znormalizowany rozkład promieni porów  $a$ ,  $r_0$  — promień kuli ośrodka porowatego przypadającego na jeden pora.

Na podstawie powyższego uzyskano wzór na prędkość podłużnych fal ultradźwiękowych w ośrodkach porowatych:

$$c_L = \left( \frac{2E}{3(1 + \nu)\rho} \left[ \frac{1 + \nu}{2(1 - 2\nu) + p(1 + \nu)(1 + Qq^2)} + \frac{1 - Qp}{1 - p} \right] \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Zakłada się następujące warunki pomiarowe w porcelanie:

- Częstotliwość pomiarowa wynosi 3÷6MHz, co odpowiada fali o długości (około 2 mm, podczas gdy wielkość średniego poru jest rzędu  $1 \cdot 10^{-2}$  mm).
- Przy stosowanych w praktyce częstotliwościach do pomiaru porowatości porcelany rzędu pojedynczych MHz, tłumienie tworzywa można pominąć.
- Porowatość w tworzywach konstrukcyjnych nie przekracza 12%, a zatem pory rozłożone są rzadko i wzajemnie nie oddziałują na propagację fali.
- Pory mają kształt zbliżony do kulistego.

Wówczas zależność (7) daje dobrą zgodność z wynikami pomiarów. W zakresie porowatości około  $1 \div 12\%$  ma charakter liniowy i w przypadku tworzyw porcelanowych o różnym składzie proste są w przybliżeniu równoległe, przesunięte w stosunku do siebie. Wykorzystując korelację wytrzymałości mechanicznej i dielektrycznej z porowatością istnieje możliwość oceny tych parametrów na drodze ultradźwiękowej [7, 8]. W przybliżeniu wzrost porowatości o 1% powoduje spadek prędkości rozchodzenia się fal również o 1%. Umożliwia to ocenę wytrzymałości dielektrycznej ceramiki na podstawie parametrów ultradźwiękowych, biorąc pod uwagę że znana jest korelacja pomiędzy porowatością a wytrzymałością dielektryczną tworzywa [8]. Również zależność modułu sprężystości Young'a od porowatości pozwala na ocenę parametrów mechanicznych tworzywa. Jak wiadomo, wzrost porowatości z 4 do 10% może spowodować spadek doraźnej wytrzymałości mechanicznej nawet o połowę. Dysponując danymi o składzie masy na podstawie badań ultradźwiękowych można określić rozkład porowatości, a zatem i stopień niejednorodności występujących na długości pnia izolatora. Badania tego typu prowadzone są od lat w warunkach eksploatacyjnych na podstacjach.

Tłumienie fal ultradźwiękowych nie jest czynnikiem tak czułym na parametry budowy strukturalnej jak prędkość propagacji. Zakres pomiarowy częstotliwości fal ultradźwiękowych stosowanych przy pomiarach tłumienia wynosi dla ceramiki  $15 \div 30$  MHz. Badania takie stosowane były do wykrywania wad teksturalnych w izolatorach pełnopniowych. Metoda polega na wzroście tłumienia fal ultradźwiękowych w obszarze niejednorodności teksturalnych. Wzrost ten wynika z faktu, iż wada teksturalna powoduje miejscowe naprężenia w materiale i związane z tym obszary mikropeknięć. Obszary takie powodują wzrost tłumienia wynikający z naprężeń wewnętrznych materiału oraz strat energii fali podłużnej związanej z jej częściową transformacją na fale poprzeczną [9]. Innym wykorzystaniem pomiarów prędkości propagacji fal ultradźwiękowych były badania surowych mas ceramicznych, w których porowatość pojawia się i wzrasta w miarę odparowywania wody zarobowej z płoski. Proces ten można śledzić przez pomiar prędkości  $c_L$  w schnącej masie [10].

**Elastometria** — wyznaczanie dynamicznych modułów sprężystości metodą ultradźwiękową jest stosunkowo proste. Nie wymaga wykonywania skomplikowanych i starannie obrobionych kształtek lub wykorzystywania urządzeń typu pręta Hopkinsa. Do wyznaczania modułów sprężystości stosuje się następujące zależności [11]:

$$\nu = \frac{c_L^2 - 2c_T^2}{2(c_L^2 - c_T^2)} \quad (8)$$

oraz

$$E = \frac{\rho c_T^2 (3c_L^2 - 4c_T^2)}{c_L^2 - c_T^2}. \quad (9)$$

Wyznaczenie modułów sprężystości ma istotne znaczenie, umożliwia bowiem ocenę wytrzymałości mechanicznej różnych tworzyw ceramicznych w sposób nieniszczący oraz porównanie ich ze sobą. Należy jednak zauważyć, że moduły sprężystości zmierzone metodami dynamicznymi w warunkach adiabatycznych różnią się nieco wielkością od

wartości modułów zmierzonych mechanicznymi metodami statycznymi w warunkach izotermicznych. Różnice pomiędzy modułami sprężystości statycznymi a dynamicznymi wzrastają w miarę rosnącej niejednorodności tworzywa. Wynika stąd, że dla porównania własności sprężystych różnych materiałów ceramicznych konieczne jest uwzględnienie warunku, aby pomiary ultradźwiękowe były wykonywane albo dla tworzywa nieporowatych, albo o jednakowej porowatości.

Inna metoda badań akustycznych — emisja akustyczna (EA) została wykorzystana w pomiarach termomechanicznych izolatorów długopniowych. Jej wyniki mogą pozwolić na ocenę stopnia degradacji tworzywa po dłuższym okresie eksploatacji [12].

Praca wykonana została w ramach projektu badawczego Nr 7 T07B 03413.

## Literatura

- [1] **Ranachowski J., Wehr J.:** *Zastosowanie defektoskopii ultradźwiękowej do prób ceramicznych izolatorów wysokonapięciowych.* Przegląd elektrotechniczny Nr 10/11, 1955
- [2] **Persson L.:** *Failure of switchgear insulators after long service,* Report for Swedish State Power Board 34.86, Vattenfall 1986
- [3] **Gutkiewicz P., Pęski Z., Rejmund F.:** *Ultradźwiękowa nieniszcząca kontrola stopnia degradacji obszaru „stopy” ceramicznych izolatorów wsporczych typu C4-550-II w okresie eksploatacji.* Materiały 28 Kraj. Konf. Badań Nieniszczących, Zakopane '99, w druku; <http://www.ippt.gov.pl/freymund>
- [4] **Malecki I.:** *Methods of „space sources” for investigation of the propagation of ultrasonic waves in granular media.* Arch. Elektrotech. 1955, 645–679
- [5] **Ranachowski J.:** *Propagation of waves in porous ceramics.* Ultrasonics, 15 (1975) 203–206
- [6] **Mac Kenzie L. J.:** *The elastic constants of a solid containing spherical holes.* Proc. Phys. Soc., B 63 (1950) 2–7
- [7] **Ryll-Nardzewska E.:** *Ultradźwiękowe badania własności sprężystych tworzyw ceramicznych;* Praca zbiorowa pod red. J. Ranachowskiego: Elektroceramika, własności i badania. Tom II PWN, Warszawa–Poznań, 1981, 33–48
- [8] **Ranachowski J.:** *Wytrzymałość dielektryczna tworzyw ceramicznych.* Praca zbiorowa pod red. J. Ranachowskiego: Elektroceramika, własności i badania. Tom I PWN, Warszawa–Poznań, 1981, 133–155
- [9] **Ranachowski J.:** *Zastosowanie prób ultradźwiękowych do badań jednorodności tekstury izolatorów pniowych.* Szkło i Ceramika Nr 6, 1967
- [10] **Filipczyński i inni:** *Ultradźwiękowe metody badań materiałów.* PWT, Warszawa, 1959
- [11] **Ranachowski J., Malecki I.:** *Wyznaczanie metodami akustycznymi dynamicznych modułów sprężystości.* Prace IPPT PAN 7/1999, Warszawa, 1999
- [12] **Ranachowski J. i inni:** *Emisja akustyczna w próbach termomechanicznych izolatorów liniowych.* Praca zbiorowa pod red. J. Ranachowskiego: Nowe kierunki technologii i badań materiałowych. Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa, 1999

ACOUSTIC METHODS IN TESTING OF HIGH VOLTAGE INSULATORS

The paper describes an application of acoustics to testing of electrical porcelain. The grounds, an application of defectoscopy, and ultrasonic measurements of porosity have been described. On the basis of relation between porosity and mechanical and dielectric strengths, the possibility of non-destructive evaluation of these parameters has been presented. The method of acoustic emission, which enables an assessment of degradation of material during its operation, has been mentioned.