

Zdzisław FILUS

Instytut Elektroniki  
Politechniki Śląska

## WPROWADZENIE DO ELEKTROMAGNETYCZNO-AKUSTYCZNEJ METODY WYTWARZANIA I ODBIORU FAŁ ULTRADŹWIĘKOWYCH

**Streszczenie.** W pracy omówiono przyczyny i kierunki poszukiwań bezstykowych metod wytwarzania i odbioru fał ultradźwiękowych. Podano zasady wytwarzania i odbioru fał ultradźwiękowych metoda elektromagnetyczno-akustyczną oraz własności tej metody. Przedstawiono kilka zastosowań praktycznych przetworników elektromagnetyczno-akustycznych.

### 1. Wprowadzenie

Prace nad możliwością wykorzystania fał ultradźwiękowych do nieniszczących badań materiałów rozpoczęte zostały w latach dwudziestych obecnego wieku. Olbrzymi rozwój elektroniki w przeciągu ostatnich trzydziestu lat doprowadził do skonstruowania tenich i lekkich przenośnych defektoskopów ultradźwiękowych, co umożliwiło znaczną poprawę jakości i wydajności produkcji wyrobów i półwyrobów hutniczych, wydane powiększenie bezpieczeństwa transportu lotniczego i kolejowego, ocenę stanu rurociągów i dużych zbiorników itp. Zasada wytwarzania i odbioru fał ultradźwiękowych, oparte na wykorzystaniu zjawiska piezoelektrycznego, pozostała w tym czasie praktycznie bez zmian, a rozwojowi podlegały głównie środki techniczne służące do badań oraz sposoby przetwarzania wyników.

Pośród wielu możliwych sposobów przeprowadzenia badania ultradźwiękowego poważeczne zastosowanie znalazły: metoda impulsowa echa oraz metoda przepuszczenia.

W pierwszej metodzie rejestrowane są natężenie wiązki ultradźwiękowej odbitej od wady lub dna badanego materiału oraz czas, po którym echo dochodzi do przetwornika, licząc od chwili wprowadzenia wiązki do materiału. Metoda ta umożliwia określenie odległości wady lub dna od powierzchni oraz wielkości wady.

W metodzie przepuszczenia rejestrowane jest natężenie wiązki ultradźwiękowej przechodzącej przez badany materiał; osłabienie odebranego sygnału może oznaczać obecność wady. Metoda ta wymaga zastosowania dwóch przetwor-

ników: nadawczego i odbiorczego oraz dostępności dna badanego materiału, podczas gdy w metodzie echa spełnienie tych warunków nie jest konieczne.

Impulsy odebrane przez przetwornik odbiorczy po wzmocnieniu podawane są na płytce lampy oscyloskopowej. Wysokość impulsu na ekranie jest miarą wielkości wady, natomiast jego położenie na ekranie odpowiada głębokości wady w przypadku zastosowania metody echa lub grubości badanego materiału w przypadku metody przepuszczania. Jeżeli zapewnione zostanie odpowiedniość pomiędzy położeniem przetwornika na powierzchni badanego materiału i położeniem plamki na ekranie lampy oscyloskopowej oraz plamka będzie rozświetlona jedynie w przypadku odebrania sygnału wady, to na ekranie otrzymamy się rzut wad wewnętrznych na powierzchnię materiału.

Fale sprężyste rozchodzące się w głąb badanego materiału, to jest fale podłużne i poprzeczna, stosowane są głównie do wykrywania wad wewnętrznych. Wykrycie wad powierzchniowych możliwe jest również dzięki wykorzystaniu fal powierzchniowych. Zastosowanie zatem odpowiedniego rodzaju drgań sprężystych, metody badania oraz sposobu przetwarzania wyników badania pozwala uzyskać pełne informacje o wadach badanego materiału.

Wykorzystanie zjawiska piezoelektrycznego do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych jest jednak źródłem zasadniczej wady rozpatrywanej metody badań defektoskopowych. Wynaga ono mianowicie zastosowania odpowiedniego ośrodka sprzęgającego pomiędzy przetwornikiem i powierzchnią badanego materiału; ze względu na znaczną różnicę oporności akustycznych przetwornika i powietrza oraz powietrza i badanego materiału sprawność przekazywania energii drgań sprężystych z przetwornika do obiektu badania i na odwrót, gdy występuje pomiędzy nimi warstwa powietrza, jest skrajnie mała. Jako ośrodki sprzęgające, zapewniające znacznie lepsze niż powietrze sprzężenie przetwornika z powierzchnią badanego materiału, stosowane są olej i woda. Zastosowanie ośrodków sprzęgających, zapewniając dostateczną sprawność przekazywania energii drgań, staje się jednak przyczyną trudności związanych z faktem, iż jakość sprzężenia - a tym samym amplituda odebranego sygnału - w znacznym stopniu zależy od grubości warstwy sprzęgającej oraz od stanu powierzchni materiału. W przypadku badania ręcznego, gdy konieczne jest przesuwania przetwornika po powierzchni badanego materiału, zasadniczym problemem staje się zapewnienie stałości sprzężenia. W przypadku badania automatycznego poruszających się obiektów, gdy ośrodkiem sprzęgającym jest strumień przepływającej wody, pogodzenia dużej szybkości badania z zapewnieniem stałości strumienia sprzęgającego - pozbawionego pęcherzyków powietrza - staje się bardzo problematyczne. Trudności te potęgują się, gdy powierzchnia materiału jest chropowata, pokryta zgorzeliwą lub nie jest płaska. Zapewnienie ciekłego sprzężenia jest praktycznie niemożliwe, gdy temperatura badanego obiektu sięga kilkuset stopni Celsjusza.

Wymienione trudności stały się przyczyną poszukiwań bezstykowych metod wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych.

## 2. Bezстыkowe metody wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych

Częściową eliminację wad związanych z zastosowaniem ciekłego ośrodka sprężającego uzyskano, przy niezmienionej zasadzie wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych, poprzez wprowadzenie stałego ośrodka sprężającego (materiały gumopochodne) lub zapewnienie silnego docisku przetwornika do powierzchni badanego przedmiotu [1, 2]. Szczególnie druga metoda znalazła zastosowanie w kilku zakładach metalurgicznych w USA, Wielkiej Brytanii i ZSRR [2] do badania materiałów o temperaturze rzędu kilkuset stopni Celsjusza. Przetworniki zanurzone są w oleju wewnątrz obracających się wałców, dociskanych do poruszających się między nimi badanych wyrobów. Siła docisku rzędu  $10^4$  N zapewnia dostateczne sprzężenie akustyczne. Wzrastające wymagania odnośnie do szybkości badania i temperatury badanych materiałów doprowadziły do odkrycia bezстыkowych metod wytwarzania i odbioru ultradźwięków. Spośród kilku znanych [1] metod bezстыkowych najbardziej perspektywiczne jest wykorzystanie lasera. Padający na powierzchnię materiału impuls światła laserowego o dużej gęstości energii, powodując nagłe silne nagrzanie małego obszaru, jest źródłem silnej fali ultradźwiękowej rozchodzącej się w głąb materiału. Odbiór fali ultradźwiękowej realizowany jest poprzez obserwację drgań powierzchni materiału przy użyciu interferometru. Metoda ta umożliwia wykrycie drgań o amplitudzie  $0,01 \mu\text{m}$  [2], przy czym cała aparatura może być umieszczona w odległości kilkudziesięciu metrów od badanego obiektu.

Szczególnie interesująca jest możliwość otrzymania hologramów badanego obiektu, z uwidocznieniem jego wad, potwierdzona już w warunkach laboratoryjnych [1]. Jednak duża ilość problemów technicznych nie rokuje szybkiego zastosowania tej metody w przemyśle.

Spośród metod elektromagnetycznych, opartych na bezpośrednim przetwarzaniu energii fali elektromagnetycznej na energię fali ultradźwiękowej, duże nadzieje na szybkie zastosowanie w praktyce rokuje metoda elektromagnetyczno-akustyczna (EMA), nad którą prace zapoczątkowano w latach sześćdziesiątych. Wytwarzanie drgań ultradźwiękowych polega w tej metodzie na elektrodynamicznym oddziaływaniu stałego pola magnetycznego na prądy wirowe, wzbudzone w badanym materiale przez cewkę nadawczą, umieszczoną w pobliżu powierzchni materiału. Odbiór fal ultradźwiękowych możliwy jest dzięki indukowaniu w cewce odbiorczej siły elektromotorycznej przez prądy wirowe, wywołane drganiami cząsteczek ośrodka w stałym polu magnetycznym. Z zasady wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych tą metoda wynika, że może ona znaleźć zastosowanie wyłącznie do materiałów przewodzących prąd, co nie jest jednak istotnym ograniczeniem, gdyż ultradźwiękowe badania defektoskopowe w zdecydowanej większości przypadków dotyczą wyrobów metalowych.

### 3. Wytwarzanie i odbiór fal ultradźwiękowych metodą EMA

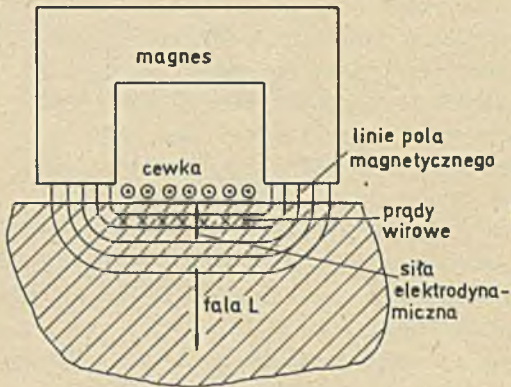
Podstawowymi elementami niezbędnymi do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metodą EMA są:

- źródło silnego stałego pola magnetycznego,
- cewka nadawcza, zasilana z generatora krótkich impulsów w.cz. o dużej mocy,
- cewka odbiorcza, dołączona do wejścia wzmacniacza o dużym wzmocnieniu.

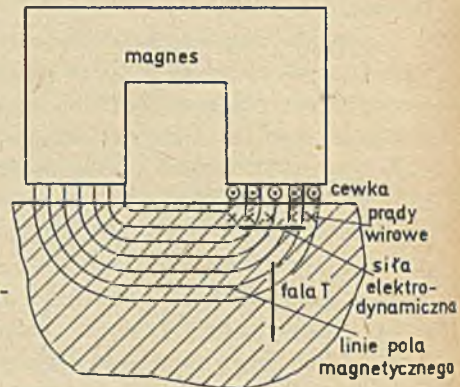
W zasadzie jedna cewka może pracować zarówno w charakterze nadajnika jak i odbiornika, jednak w praktyce - ze względu na odmienne wymagania stawiane cewce nadawczej i odbiorczej - stosowane są oddzielne cewki.

Konfigurację systemu do wytwarzania i odbioru różnego rodzaju fal ultradźwiękowych przedstawiono na rys. 1.

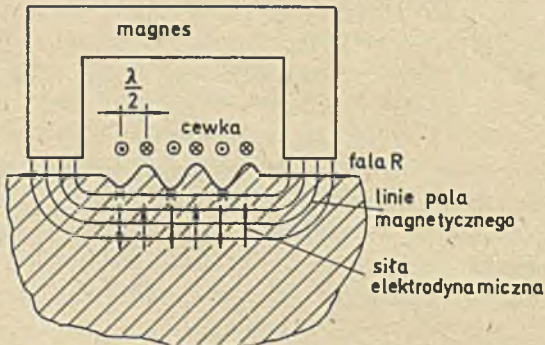
a)



b)



c)



Rys. 1. Wytwarzanie fal ultradźwiękowych:

a - podłużnych L, b - poprzecznych T, c - powierzchniowych R

Wytwarzanie fal ultradźwiękowych może odbywać się również bez udziału zewnętrznego pola magnetycznego - na skutek oddziaływania prądów wirowych z polem magnetycznym wytwarzanym przez prąd w.c.z. płynący w cewce nadawczej - jednak energia generowanej fali jest w tym przypadku znacznie mniejsza [3]. Zaletą takiego rozwiązania jest fakt, iż częstotliwość generowanego ultradźwięku jest dwukrotnie wyższa od częstotliwości prądu wzbudzającego, dzięki czemu istotnie zmniejsza się sprzężenie elektromagnetyczne między cewkami nadawczą i odbierczą, nastrojonymi w tym przypadku na różne częstotliwości rezonansowe.

W publikacjach zawierających analizę elektromagnetyczno-skustycznego wytwarzania fal ultradźwiękowych rozpatruje się przetworniki w postaci prostoliniowego przewodu, kołowego zwoju i płaskiej spiralnej cewki. Przetworniki bardziej złożone składają się z wymienionych przetworników elementarnych i ich własności można określić na drodze superpozycji wyników otrzymanych dla przetworników elementarnych.

Wyznaczenie rozkładu pola skustycznego wzbudzonego w metalu przebiega dla wymienionych przetworników w podobny sposób i dlatego pokazane zostanie na przykładzie przetwornika najprostszego - prostoliniowego przewodnika.

W przypadku prostoliniowego przewodu zakłada się [3], że jest on położony w odległości  $h$  od powierzchni sprężystej, jednorodnej, izotropowej, przewodzącej prąd półprzestrzeni o słabych własnościach magnetycznych ( $\mu$  bliskie 1), równoległe do osi  $X$ , wzdłuż linii  $y = 0$   $z = h$ . Półprzestrzeń 1 ( $z > 0$ , powietrze) charakteryzuje się konduktywnością  $\sigma_1 = 0$  przenikalnością magnetyczną  $\mu_1 = \mu_0$  i przenikalnością dielektryczną  $\epsilon_1 = \epsilon_0$ . Przenikalności magnetyczna i dielektryczna półprzestrzeni 2 ( $z \leq 0$ , metal) wynoszą odpowiednio  $\mu_2 = \mu$  i  $\epsilon_2 = \epsilon$ . Przez przewód płynie prąd  $I = I_m \sin \omega t$ .

Podstawę rozważań stanowią równania Maxwella:

$$\text{rot } \bar{E} = - \mu \mu_0 \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{j} + \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{div } \bar{H} = 0 \quad (3)$$

Po wprowadzeniu wektorowego potencjału  $\bar{A}$  pole magnetyczne według zależności [3]:

$$\bar{H} = \text{rot } \bar{A} \quad (4)$$

przy czym  $A_y = A_z = 0$ , gdyż prąd  $I$  płynie w kierunku osi  $X$ , otrzymuje się z równań (1) - (3) równanie Helmholtza:

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} + k^2 A_x = 0 \quad (5)$$

gdzie:

$$k^2 = \omega^2 \mu \mu_0 \varepsilon \varepsilon_0 - i \omega \mu \mu_0 \sigma; \quad i = \sqrt{-1}$$

Równanie jest jednorodne w całej przestrzeni, z wyjątkiem punktów przewodzących, dla których prawa strona równania (5) jest równa wziętej z minusem gęstości prądu w przewodzie  $-j_p$ .

Po uwzględnieniu warunków granicznych:

$$\mu_1 A_{1x} = \mu_2 A_{2x} \quad \frac{\partial A_{1x}}{\partial z} = \frac{\partial A_{2x}}{\partial z} \quad (6)$$

wynikających z ciągłości składowych normalnych indukcji pola magnetycznego i składowych stycznych natężenia pola elektrycznego na granicy ośrodków 1 i 2, otrzymuje się rozwiązanie równania (5) dla ośrodka 2 w postaci

$$A_{2x} = - \frac{I_m}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda h + uz}}{\lambda \mu + u} \cos \lambda y \, d\lambda \quad (7)$$

gdzie:

$$u^2 = \lambda^2 + ik^2,$$

$\lambda$  - zmienne całkowania.

Na podstawie rozwiązania (7) można wyznaczyć z równań (4), (1) rozkład natężenia pola magnetycznego  $\vec{H}$  i elektrycznego  $\vec{E}$  wewnątrz metalu, a następnie - zgodnie z zależnością  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$  - rozkład gęstości prądów wirowych  $\vec{j}$ :

$$\begin{aligned} j_x &= -ik^2 \frac{I_m}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda h + uz}}{\lambda \mu + u} \cos \lambda y \, d\lambda \\ j_y &= j_z = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Dokładne obliczenie całki (8) jest złożone i dlatego dalsze analizy prowadzone jest najczęściej po przyjęciu pewnych uproszczeń. Pomija się na przykład wpływ czynnika wykładniczego  $e^{-\lambda h}$  dla wartości  $\lambda > \frac{3}{h}$  ( $e^{-3} \approx 0,05$ ) [3]. Inny sposób uproszczenia polega na sprowadzeniu prądów wirowych rozłożonych w całej objętości metalu do równoważnego im prądu powierzchniowego [4,5].

Rozkład gęstości sił objętościowych działających na czasteczki metalu pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego o indukcji  $\vec{B}$  określa się wg zależności:

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (9)$$

Rozkładu przemieszczeń cząsteczek metalu poszukuje się [6] poprzez wprowadzenie skalarnego  $\phi$  i wektorowego  $\vec{\Psi}$  potencjałów wektora przemieszczeń  $\vec{u}$ :

$$\vec{u} = \text{grad } \phi + \text{rot } \vec{\Psi} \quad (10)$$

Potencjały te spełniają odpowiednie równania felowe:

$$\rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \rho c_l^2 \Delta \phi = \phi \quad \rho \frac{\partial^2 \vec{\Psi}}{\partial t^2} - \rho c_t^2 \Delta \vec{\Psi} = \vec{\Psi} \quad (11)$$

gdzie:

- $\rho$  - gęstość metalu,
- $c_l, c_t$  - prędkości fali podłużnych L i poprzecznych T,
- $\Delta$  - operator Laplace'a.

$\phi$  i  $\vec{\Psi}$  oznaczają potencjały skalarny i wektorowy sił objętościowych:

$$\vec{F} = \text{grad } \phi + \text{rot } \vec{\Psi} \quad (12)$$

$$\text{div } \vec{\Psi} = 0$$

Rozwiązanie równań (11), (10) mają postać złożonych funkcji trygonometrycznych, zawierających funkcje Bessela [6,7]. Wynika z nich, że amplituda drgań cząsteczek metalu jest proporcjonalna do amplitudy prądu wzbudzającego oraz indukcji zewnętrznego pola magnetycznego, natomiast jej zależność od odległości  $h$  przetwornika od powierzchni metalu określa czynnik  $e^{-\frac{2\pi}{\lambda}h}$ , gdzie  $\lambda$  oznacza długość wzbudzonej fali ultradźwiękowej (typowe wartości  $\lambda$  rzędu kilku milimetrów).

Założenie o sinusoidalnym przebiegu prądu wzbudzającego drgania ultradźwiękowe znacznie upraszcza analizę, sprowadzającą się w tej sytuacji do rozpatrywania stanów ustalonych; jednak w rzeczywistości pobudze się przetwornik nadszcwy impulsami sinusoidalnymi o szybko malejącej amplitudzie. Próby rozwiązania zagadnienia wytwarzania fali ultradźwiękowych przy pobudzeniu impulsowym polegają na analizie numerycznej konkretnych przetworników po dyskretyzacji widma sygnału wzbudzającego [5] lub na aproksymacji pobudzenia impulsem prostokątnym [8].

Punktem wyjścia analizy odbioru fali ultradźwiękowych metodą EMA jest rozkład drgań cząsteczek ośrodka sprężystego. Pozwala on na wyznaczenie rozkładu prądów wirowych wywołanych drganiami cząsteczek ośrodka w stałym polu magnetycznym wg zależności:

$$\vec{j} = G (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (13)$$

gdzie:

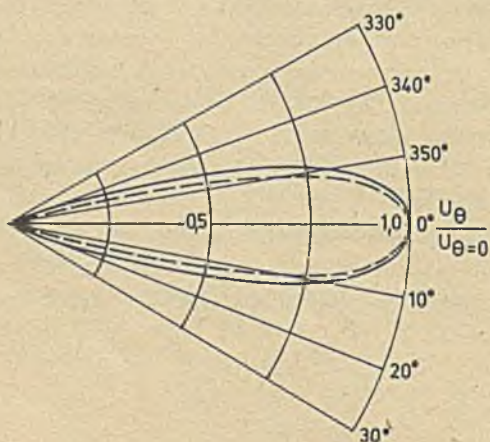
- $\vec{v}$  - prędkość drgań cząsteczek.

Dałsza analiza odbioru przebiega podobnie jak w przypadku wytwarzania fal ultradźwiękowych. Wprowadza się potencjał wektorowy  $\vec{A}$  pola magnetycznego wzbudzonego przez prądy wirowe. Potencjał ten spełnia równanie Helmholtza - jednorodne w powietrzu, natomiast w metalu po prawej stronie równania występuje  $-j$  (13). Rozwiązanie tego równania dla ośrodka 1 (powietrze) pozwala na podstawie (4) i (1) określić rozkład natężenia  $\vec{E}$  pola elektrycznego w powietrzu. Ostatnim etapem analizy jest sześkowanie wektora  $\vec{E}$  po konturze cewki odbiorczej.

Końcowe wyrażenie określające SEM indukowaną w najprostszycy przetwornikach odbiorczych [9, 10] wskazuje na liniową zależność amplitudy odebranego sygnału od indukcji pola magnetycznego oraz jej wykładnicze zmniejszanie się przy wzroście odległości przetwornika od powierzchni badanego metalu.

#### 4. Własności przetworników elektromagnetyczno-akustycznych

Zasadniczymi parametrami przetworników EMA, decydującymi o możliwości ich zastosowania do badań nieniszczących, są: współczynnik przetwarzania, określony jako stosunek amplitudy sygnału (napięcie lub prąd) na zaciskach cewki odbiorczej do amplitudy sygnału na zaciskach cewki nadawczej oraz charakterystyka kierunkowa, czyli zależność amplitudy wytworzonej fali ultradźwiękowej (napięcie) lub prądu na zaciskach cewki odbiorczej od kąta  $\theta$ , zawartego między rozpatrywanym kierunkiem a kierunkiem w którym odpowiednio wielkość przyjmuje wartość maksymalną. Wyniki badań tych parametrów są szeroko rozpowszechnione w literaturze [3,4,5,7,9,10,11].

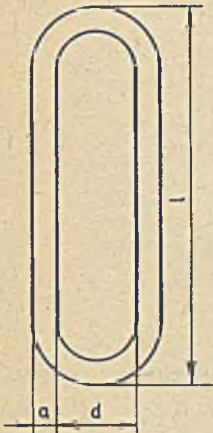


Rys. 2. Charakterystyki kierunkowe przetwornika elektromagnetyczno-akustycznego (—) i piezoelektrycznego (- - -)

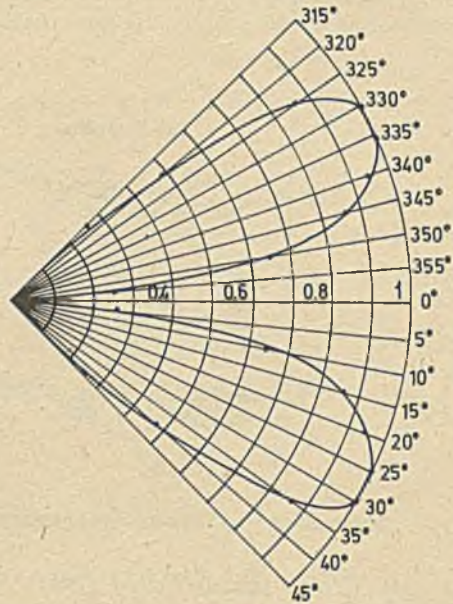
Przykładowo, w pracy [11] wyznaczono współczynnik przetwarzania przetwornika w postaci płaskiej spiralnej cewki, pracującej jednocześnie jako nadajnik i odbiornik fal poprzecznych o częstotliwości 2,5 MHz w próbkach stalowych i 3,5 MHz - w aluminiowych. Przy amplitudzie prądu wzbudzającego sięgającej kilkudziesięciu amperów uzyskano na wejściu wzmacniacza o rezystancji wejściowej  $15\Omega$  sygnał o amplitudzie  $60\mu A$ , co odpowiada współczynnikowi przetwarzania rzędu  $10^{-6}$ .



Doświadczalną charakterystykę kierunkową przetwornika nadawczego fal podłużnych w postaci płaskiej spirali o średnicy  $2R = 13$  mm pokazano na rys. 2 [3]; na tym samym rysunku pokazano dla porównania charakterystykę kierunkową nadajnika piezoelektrycznego.



Rys. 3. Przetwornik w postaci płaskiej ramki:  $l = 30$  mm,  $d = 3,5$  mm,  $a = 1$  mm

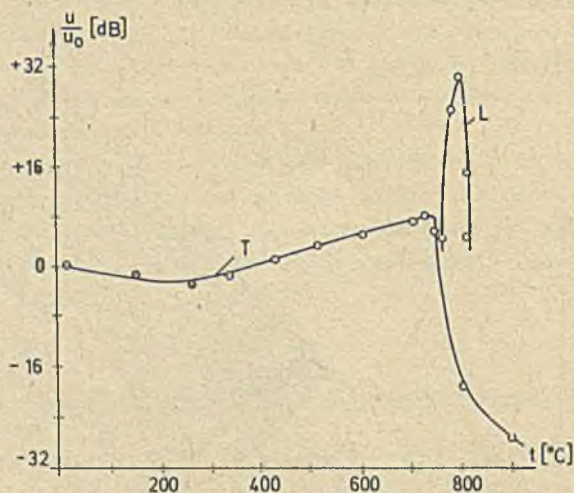


Rys. 4. Charakterystyki kierunkowe przetwornika w postaci płaskiej ramki:  
 . - nedawanie, o - odbiór

Charakterystyki kierunkowe przetwornika w postaci płaskiej wielozwojowej ramki o kształcie jak na rys. 3, wytwarzającego i odbierającego fale poprzeczne, pokazano na rys. 4 [9].

Przetworniki EMA wykazują zatem znaczne własności kierunkowe, co czyni je w pełni przydatnymi do zastosowania w defektoskopii ultradźwiękowej, mimo że odbierane sygnały są o kilka rzędów wielkości słabsze niż w przypadku przetworników piezoelektrycznych. Wynika to z faktu, iż stosunek mocy sygnału do mocy szumów, bardziej istotny niż poziom sygnału, jest w przypadku przetworników EMA tego samego rzędu jak w przetwornikach konwencjonalnych [12].

Interesujące są również wyniki badań wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metodą EMA w wysokich temperaturach i w materiałach o nieobrobionej powierzchni. Badając próbki ferromagnetyczne (stal) stwierdzono znaczne zwiększenie amplitudy generowanych fal podłużnych, gdy temperatura



Rys. 5. Zależność amplitudy odebranego sygnału od temperatury próbki

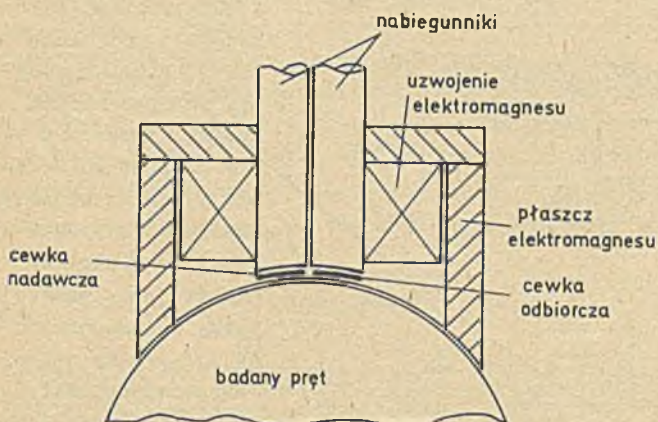
próbki była bliska punktu Curie (rys. 5) [2,12,13]. Zjawisko to tłumaczy się zachowaniem własności ferromagnetycznych przez powierzchniową (chłodniejszą) warstwę próbki oraz ich utraceniem przez wnętrze próbki wskutek temperatury przekraczającej punkt Curie, dzięki czemu następuje koncentracja linii sił pola magnetycznego w warstwie powierzchniowej. Stwierdzono [12], że z punktu widzenia wielkości odebranego sygnału stosowanie fal poprzecznych jest korzystniejsze w przypadku badania materiałów ferromagnetycznych o temperaturze niższej od punktu Curie lub materiałów nieferromagnetycznych o dowolnej temperaturze.

Wyniki badań próbek pokrytych zgorzeliną wykazały niemonotoniczną zależność amplitudy odebranego sygnału od indukcji pola magnetycznego i grubości zgorzeliny [12, 14]. W przypadku zgorzeliny składającej się głównie z magnetytu i mocno przylegającej do powierzchni metalu występuje zwiększenie amplitudy odebranego sygnału o ok. 30 dB, o ile indukcja stałego pola magnetycznego zawiera się w granicach 0,3 - 0,5 T, a grubość zgorzeliny jest rzędu 0,2 mm.

Opisane zjawiska stanowią znaczną zaletę elektromagnetyczno-akustycznej metody defektoskopii ultradźwiękowej, szczególnie w takich warunkach (wysoka temperatura, nieobrobiona powierzchnia), w jakich wykorzystanie przetworników piezoelektrycznych natrafia na olbrzymie problemy.

## 5. Przykłady konstrukcji przetworników EMA i ich zastosowań

Przetworniki elektromagnetyczno-akustyczne fal ultradźwiękowych nie są do tej pory szeroko rozpowszechnione i spotykane w literaturze opisy konstrukcji dotyczą głównie pojedynczych modeli przeznaczonych do specyficznych zastosowań, w których użycie przetworników piezoelektrycznych wiązałoby się z koniecznością przezwyciężenia dużych problemów technicznych.



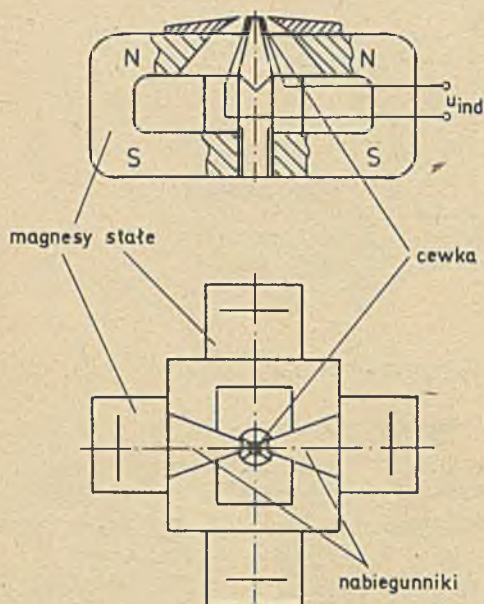
Rys. 6. Przetwornik EMA do badania gorących prętów

Jednym z przykładów takiej konstrukcji jest przetwornik do wykrywania wad wewnętrznych w gorących prętach stalowych [2, 12, 13], pracujący od 1977 r. w jednym z zakładów metalurgicznych w Wielkiej Brytanii. Konstrukcję tego przetwornika pokazano w uproszczeniu na rys. 6. Stałe pole magnetyczne o indukcji 0,5 T wytwarzane jest za pomocą elektromagnesu. Wytwarzanie fali ultradźwiękowej realizuje się drogą rozładowania kondensatora, naładowanego do napięcia 9 kV, przez cewkę nadawczą - szczytowa wartość prądu w cewce sięga 600 A. Cewki nadawcza i odbiorcza dostrojone są do częstotliwości 2 MHz. Sygnał z cewki odbiorczej wzmacniany jest we wzmacniaczu o wzmacnieniu 90 dB. Urządzenie umożliwiło wykrycie wad wewnętrznych o średnicy 1,6 mm w prętach o średnicy 160 mm. Temperatura badanych prętów dochodzi do 700°C, ich powierzchnia pokryta jest zgorzeliną. Urządzenie do wykrywania wad w blachach o grubości sięgającej kilkudziesięciu milimetrów skonstruowano w RPN [15]. Dużym osiągnięciem było opracowanie dla tego urządzenia tzw. wykresu OWR (Odległość - Wzmocnienie - Rozmiar), czyli zależności wielkości wady od głębokości jej zależenia i poziomu odebranego sygnału. Wykres OWR stanowi podstawę do określania wielkości wady

przy stosowaniu konwencjonalnych przetworników piezoelektrycznych. Na podstawie otrzymanego wykresu możliwe stało się szybkie wyznaczenie wielkości wad o średnicy powyżej 2 mm, zalegających na głębokości do 50 mm.

W ZSRR badano możliwość wykorzystania metody EMA do badania szyn kolejowych [16]. Stwierdzono możliwość wykrywania pęknięć w szynach przy szybkości badania dochodzącej do 70 km na godzinę.

W zachodniemieckiej firmie Wazou opracowano małegoformatowe przetworniki odbiorcze do wyznaczenia charakterystyk kierunkowych głowic piezoelektrycznych. Na rys. 7 po-



Rys. 7. Przetwornik odbiorczy (tzw. elektrodynamiczny) fal poprzecznych

ultradźwiękowych wskazują na następujące zalety tej metody defektoskopii ultradźwiękowej:

- brak materialnego ośrodka sprzęgającego między przetwornikiem i badanym obiektem,
- małe wymagania dotyczące obróbki powierzchni badanego materiału,
- możliwość pracy w wysokich temperaturach,
- duża szybkość badania,
- możliwość wykorzystania konwencjonalnej aparatury defektoskopowej do rejestracji wyników.

pokazano konstrukcję przetwornika fal poprzecznych; przetwornik fal podłużnych różni się jedynie kształtem nabiegunników i sposobem nawinięcia cewki. Sygnał z wyjścia cewki, o amplitudzie rzędu kilkudziesięciu mikrowoltów, po wzmocnieniu przez wzmacniacz selektywny o wzmocnieniu 60 dB może być podany na wejście konwencjonalnego defektoskopu. Przetwornik umożliwia pomiary głowic piezoelektrycznych o częstotliwościach leżących w zakresie 2-6 MHz.

## 6. Uwagi końcowe

Opublikowane wyniki badań elektromagnetyczno-akustycznego wytwarzania i odbioru fal

Do wad metody EMA zaliczyć należy:

- małą sprawność przetwarzania ( $10^{-7}$  -  $10^{-6}$ ),
- dużą moc doprowadzoną do przetwornika nadawczego (co najmniej kilkadziesiąt kilowatów w impulsach mikrosekundowych),
- szybkie zmniejszenie się sprawności przetwarzania ze wzrostem odległości między przetwornikiem i powierzchnią badanego materiału, (praktycznie odległość ta nie przekracza 1-2 mm),
- konieczność wytwarzania silnych pól magnetycznych (0,1 - 1,0 T).

Wady te są istotne i, sądząc na podstawie literatury, stwarzają poważne problemy przy projektowaniu i konstruowaniu aparatury defektoskopowej, wykorzystującej przetwarzanie elektromagnetyczno-skustyczne.

Niewątpliwe jednak zalety metody EMA stały się przyczyną zapoczątkowania przez autora prac związanych z wytwarzaniem i odbiorem fal ultradźwiękowych tą metodą i idących w kierunku jej zastosowania do szybkiej automatycznej kontroli nieniszczącej. Początkowym etapem prac były studia laboratoryjne, których skrótowym rezultatem jest prezentowana publikacja.

#### LITERATURA

- [1] Krautkrämer J.: Unconventional Methods of Generating, Receiving and Coupling of Ultrasonic Waves for Testing Materials, British Journal of Non-Destructive Testing, May 1973.
- [2] Whittington K.R.: Ultrasonic Inspection of Hot Steel, British Journal of Non-Destructive Testing, September 1978.
- [3] Sazonov Ju.I., Škarlet Ju.M.: Issledovanie bezkontaktnych metodov vozbuždenija i registraciji ultrazvukovyh kolebanij. Diefektoskopija, 1969, nr 5.
- [4] Budienkov G.A., Kviatkovskij V.N., Pietrov Ju. V.: Issledovanie diagramy napravlennosti elektromagnitnoakustičeskogo izlučatelja. Diefektoskopija, 1971, nr 4.
- [5] Budienkov G.A., Kviatkovskij V.N., Pietrov Ju.V.: Naklonnoje izlučenie ultrazvuka elektromagnitno-akustičeskim spsobom. Diefektoskopija, 1973 nr 1.
- [6] Šubajev S.N.: Vozbuždenije uprugich vołn v metalličeskom połuprostranstvie elektromagnitnym metodom. Diefektoskopija, 1974, nr 2.
- [7] Šubajev S.N.: Analiz akustičeskogo polja, vozbuždaemogo elektromagnitnym metodom, Diefektoskopija, 1974, nr 3.
- [8] Butienko A.I., Russkievič Ju.N., Škarlet Ju.N.: Issledovanie akustičeskogo polja v metalličeskom połuprostranstvie pri impulsnoj elektromagnitnoj vozbuždenii. Diefektoskopija, 1971, nr 2.
- [9] Budienkov G.A., Gołovačeva Z.D., Pietrov Ju.V.: Registracija naklonnych ultrazvukovyh vołn elektromagnitno-akustičeskim spsobom. Diefektoskopija, 1974, nr 2.
- [10] Budienkov G.A., Gołovačeva Z.D., Pietrov Ju.V.: Elektromagnitno-akustičeskij spsob prijoma ultrazvukovyh vołn. Diefektoskopija, 1974, nr 4.
- [11] Głuchov N.A.: Niekotoryje parametry elektromagnitnogo datčika sdvigovyh ultrazvukovyh kolebanij v tokoprovodjaščich materialach. Diefektoskopija, 1971, nr 4.

- [12] Parkinson G.J., Wilson D.M.: Non-Contact Ultrasonics, British Journal of Non-Destructive Testing, July 1977.
- [13] Whittington K.R.: Electrodynmic Probes - Principles, Performance and Applications, British Journal of Non-Destructive Testing, May 1981.
- [14] Budjenkov G.A., Maskeev A.F.: Vozmožnost kontrola stalnych izdelij elektromagnitno-akustičeskim metodom bez udslenija okaliny. Diefiektoskopija, 1972, nr 5.
- [15] Böttcher W., Kopineck H.J., Künne G.: Zur elektrodynamischen Ultraschallerzeugung, Materialprüfung, 1978, nr 2.
- [16] Vlesov V.V., Lonček V.A., Gluchov N.A., Ivanov I.V., Runov I.N.: Ul'trazvukovyj kontrol železnodoroznyh želsov, uložennyh v put', s ispolzovaniem elektromagnitno-akustičeskich priobrazovatelej. Diefiektoskopija, 1971, nr 3.

Recenzent: Doc. A. Stryk

Wpłynęło do Redakcji 1.VII.1982 r.

ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД  
ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПРИЁМА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

Р е з ю м е

В работе обсуждены причины и направления поиска бесконтактных методов возбуждения и приёма ультразвуковых волн. Представлено принципы возбуждения и приёма ультразвуковых волн электромагнитно-акустическим методом и свойства этого метода. Описано несколько практических применений электромагнитно-акустических преобразователей.

INTRODUCTION TO ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC METHOD  
OF GENERATING AND RECEIVING ULTRASONIC WAVES

S u m m a r y

The paper discusses the reasons and directions of research works in the field of the contactless generating and receiving of ultrasonic waves. Principles of electromagneto-acoustic generating and receiving ultrasonic waves and detailed properties of this method are presented together with several practical applications of the electromagneto-acoustic transducers.