

Rozwój tworzyw sztucznych

■ JACEK SZELĄŻEK

Tworzywa sztuczne jako ośrodki sprzęgające w ultradźwiękowych badaniach materiałów

Jednym z problemów, z jakim mają do czynienia operatorzy w czasie ręcznych badań ultradźwiękowych jest konieczność zapewnienia stałego sprzężenia akustycznego. Jest to szczególnie trudne w badaniach elementów o nierównych, chropowatych powierzchniach czy badaniach prowadzonych na powierzchniach pionowych. Dodatkowym mankamentem badania chropowatych obiektów jest szybkie zużycie głowic ścierających się w czasie ich przesuwania.

Ideałem byłyby głowice ultradźwiękowe pracujące bezkontaktowo, bez potrzeby stosowania jakiegokolwiek medium sprzęgającego. Nowe ceramiki piezoelektryczne i postęp w budowie głowic umożliwiają dzisiaj wykorzystanie powietrza jako medium sprzęgającego w badaniach drewna i kompozytów, czyli materiałów i niskiej oporności akustycznej. W przypadku badania elementów stalowych i wykonanych ze stopów lekkich, czyli z materiałów przewodzących, jedynymi głowicami działającymi bezkontaktowo są głowice typu EMAT (elektromagneto-akustyczne). Ich wadą jest niestety niska skuteczność. Dla porównania, napięcie, jakie powstaje na okładkach przetwornika piezoelektrycznego przy odbiorze echa dużej wady, jest rzędu setek miliwoltów. W przypadku odbioru echa takiej wady głowicą EMAT, w jej cewce indukowane jest napięcie jedynie rzędu setek mikrowoltów, czyli tysiąc razy niższe. Obrazuje to dystans, jaki ciągle jeszcze dzieli znane głowice piezoelektryczne od wchodzących do użytku głowic EMAT.

Wysoka skuteczność przetworników piezoelektrycznych okupiona jest koniecznością stosowania ośrodków sprzęgających. Szczelina między czołem głowicy lub powierzchnią klina załamującego a powierzchnią badanego elementu musi być wypełniona nie powietrzem, a cieczą lub zelem sprzęgającym. Konieczność ta spowodowana jest znaczną różnicą oporności

akustycznych powietrza i stali oraz wynikającym z niej wysokim współczynnikiem odbicia fal ultradźwiękowych na granicy stal-powietrze. Oporność akustyczna stali wynosi około $46 \cdot 10^6$ [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$] a powietrza jedynie $0,0004 \cdot 10^6$ [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]. Stąd przez granicę powietrze-stal przechodzi jedynie 0,6% energii fal. Wypełnienie szczeliny cieczą sprzęgającą, na przykład wodą o oporności akustycznej około $1,5 \cdot 10^6$ [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$], poprawia sytuację 50-krotnie (do stali wnika 35%)!

W badaniach automatycznych problem sprzężenia i zużycia głowic rozwiązuje się zachowując pewną odległość między głowicą a powierzchnią i wypełniając szczelinę wodą. Wymaga to jednak stosowania specjalnych instalacji i ciągłego dostarczania znacznych ilości wody.

Ciekawym rozwiązaniem były próby wykorzystania do sprzęgania cieczy magnetycznych zamiast wody. Głowice obudowane były metalową ramką, w której umieszczone zostały stałe magnesy. W czasie ruchu głowicy ciecz magnetyczna utrzymywana była pod głowicą przez pole magnetyczne. Eliminowało to konieczność ciągłego dostarczania nowych porcji cieczy [1].

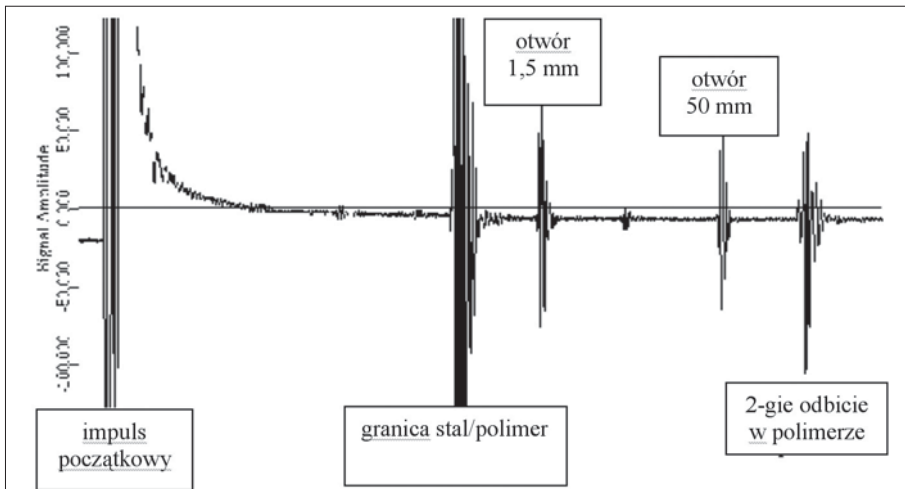
Tabela 1. Współczynniki tłumienia fal ultradźwiękowych w wybranych gumach i tworzywach sztucznych

Materiał	Wsp. tłumienia [dB/mm]	Częstotliwość [MHz]
Guma Durometer 45	2,34	4
Guma Durometer 75	3,37	4
Guma poliuretanowa	4,61	4
Guma uretanowa	3,20	4
PMM (Plexi)	0,64	5
PCV	1,12	5
Woda	0,0055	5
Stal drobnoziarnista	0,1	4

Dawniej, aby ochronić głowice przed uszkodzeniem i jednocześnie ułatwić ich dopasowanie do nierówności powierzchni, stosowano specjalne gumowe kapturki nakładane na głowice. Innym rozwiązaniem było nałożenie na powierzchnie badanego elementu arkusza miękkiej gumy lub płaskiej nakładki z tworzywa sztucznego i przesuwanie głowicy po gładkiej powierzchni takiej nakładki. Szczeliny między nakładką a badanym materiałem i nakładką a głowicą musiały być wypełnione cieczą sprzęgającą. Zaletami takich rozwiązań było to, że miękka guma pod naciskiem głowicy deformowała się i dopasowywała do nierówności powierzchni, a głowica nie stykała się bezpośrednio z chropowatą powierzchnią. Wadą takiego rozwiązania było to, że nakładki takie prowadziły do spadku czułości spowodowanego wysokim tłumieniem fal w gumie oraz odbiciami fal na poszczególnych granicach. Aby zachować wymaganą czułość badania, stosowano niskie częstotliwości (1–2 MHz) i głowice niewytłumione. To z kolei prowadziło do długiego czasu trwania impulsu i spadku rozdzielczości badania [2].

W Tabeli 1 podane są typowe współczynniki tłumienia dla różnych gum. Dla porównania w tabeli tej podano wartości dla PMM i PCV, czyli materiałów stosowanych na kliny załamujące głowic skośnych (dane z [3]) oraz dla wody i typowej stali konstrukcyjnej.

Z tabeli wynika, że tłumienie fal w gumie jest kilkukrotnie wyższe niż w PMM czy PCV i wielokrotnie wyższe niż w wodzie czy stali. To wysokie tłumienie i wspomniane wyżej problemy były powodem poszukiwania innych rozwiązań. Nowe sposoby sprzęgania głowic z badanym materiałem stały się możliwe dzięki opracowaniu nowych tworzyw sztucznych. Tworzywa takie w pewnym stopniu zastępują ciecz sprzęgającą i umożliwiają badania stalowych elementów głowicami piezoelektrycznymi bez konieczności stosowania cieczy sprzęgających.



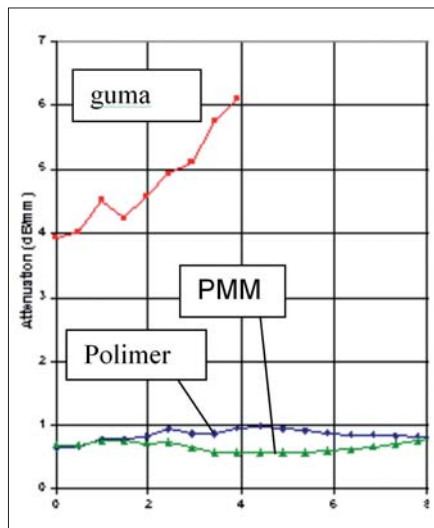
Rys. 1. Obraz oscyloskopowy uzyskany głowicą 5 MHz, sprzęgniętą z wzorcem W1 za pomocą polimeru, „na sucho” [4]

Nowe tworzywa sztuczne zastępujące sprzężenie cieczowe

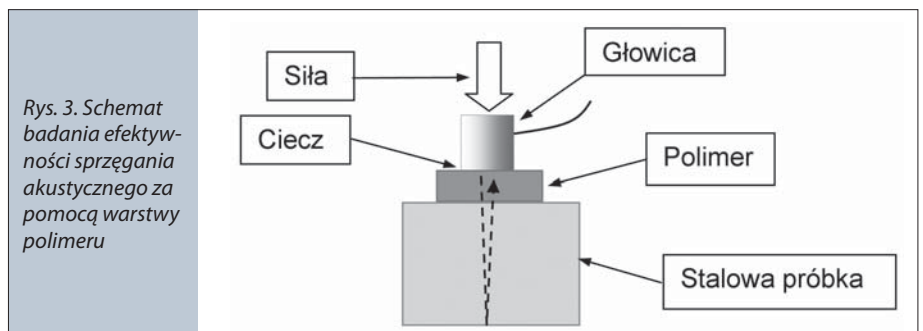
Główną wadą gumy, która była dawniej wykorzystywana jako jedna z warstw sprzęgających i jako warstwa chroniąca głowice przed uszkodzeniami, było wysokie tłumienie fal ultradźwiękowych. Ograniczało ono grubości stosowanych podkładek gumowych, a tym samym możliwości dopasowania się gumy do nierówności powierzchni. Inną wadą gumy była konieczność stosowania dwóch warstw cieczy sprzęgającej - pomiędzy gumą a głowicą i gumą a powierzchnią materiału.

W pracy [4] opisane są właściwości akustyczne nowego polimeru opracowanego jako materiał sprzęgający. Autorzy podają, że tworzywo to może być stosowane do transmisji podłużnych fal ultradźwiękowych o częstotliwościach do 25 MHz a fal poprzecznych do 2 MHz. Tworzywo to może pracować w temperaturach do 200oC.

Rysunek 1 pokazuje schemat badania i obraz oscyloskopowy uzyskany głowicą na fale podłużne o częstotliwości 5 MHz postawioną na wzorcu W1. Pomiędzy głowicą a wzorcem umieszczona została warstwa polimeru o grubości 15,8 mm. Głowica sprzęgnięta była z polimerem za pomocą



Rys. 2. Częstotliwościowa zależność tłumienia fal podłużnych w polimerze, w PMM i gumie [2] (fragment wykresu)



Rys. 3. Schemat badania efektywności sprzężenia akustycznego za pomocą warstwy polimeru

cieczy, a polimer kontaktował się z powierzchnią wzorca „na sucho”. Głowicę dociśnięto do wzorca siłą około 2 kG.

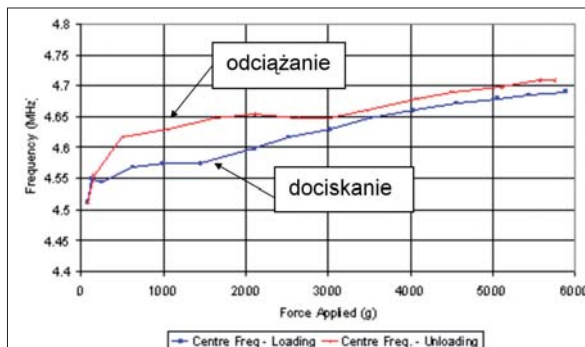
Fizyczne własności badanego polimeru są następujące:

- gęstość - 0,92 kg/m³
- prędkość fal podłużnych - 1590 m/s
- prędkość fal poprzecznych - 800 m/s
- tłumienie fal L (5 MHz) - 0,28 dB/mm
- kolor – jasny niebieski
- dwojłomność akustyczna – brak (ośrodek izotropowy)
- temperaturowa zależność prędkości fal podłużnych – -2,5 m/s/°C.

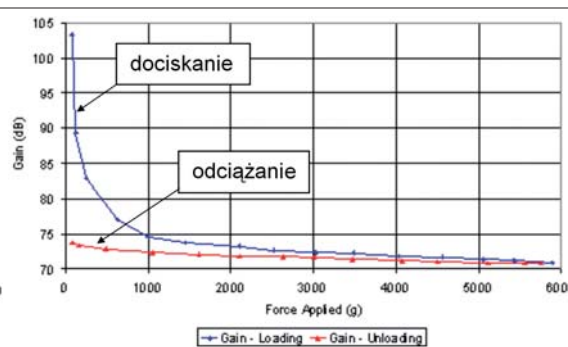
Jak widać gęstość i prędkość fal ultradźwiękowych w polimerze są bardzo bliskie wartościom dla wody. Dodatkowymi zaletami tego tworzywa są jego elastyczność oraz odporność na większość rozpuszczalników.

W pracy [2] opisane są polimery hydrofiliczne. Są to tworzywa nierozpuszczalne w wodzie, ale posiadające zdolności wchłaniania znacznych jej ilości (do stopnia, w którym 95% wagi to waga wody). Polimery te opracowane zostały dla różnych potrzeb medycznych i do produkcji soczewek kontaktowych. Tworzywa takie rozszerzają się w czasie nasiąkania i stają się elastyczne. Można powiedzieć, że jest to elastyczne ciało stałe o akustycznych właściwościach zbliżonych do własności wody. Te własności spowodowały, że znalazły one zastosowania w ultradźwiękowych badaniach materiałów jako ośrodki sprzęgające.

Praca [5] opisuje badania czterech różnych polimerów o końcowej zawartości wody od 38 do 75%. Jednym z wyników badań tych tworzyw było wyznaczenie czę-



Częstotliwość impulsu podczas obciążania i odciążania (głowica 5 MHz)



Wzmocnienie podczas obciążania i odciążania. Głowica 5 MHz

Rys. 4. Zmiany częstotliwości i amplitudy (wzmocnienia) podczas cyklu dociskania i odciążania głowicy sprzęgniętej ze stalową próbką za pośrednictwem warstwy polimeru hydrofilicznego, na sucho

stotliwościowej zależności tłumienia fal ultradźwiękowych. Rysunek 2 pokazuje wyniki. Dla porównania pokazano na nim zależność tłumienia dla PMM i dla gumy.

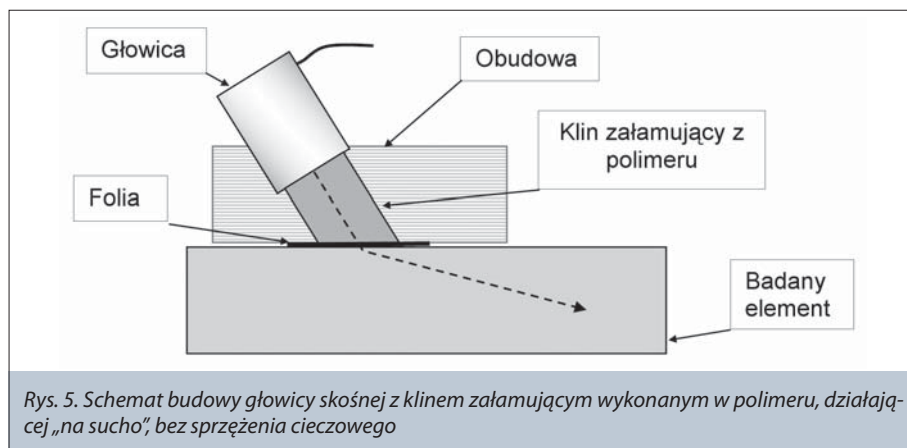
Widoczne jest, że tłumienie fal w nowym polimerze jest zbliżone do tłumienia w PMM i wielokrotnie niższe niż tłumienie w gumie.

Następnym etapem badań było sprawdzenie efektywności działania polimerów jako ośrodków sprzegających. Schemat badania pokazuje rysunek 3. Polegało ono na badaniu zmian widma częstotliwości echa dna i zmian jego amplitudy od siły nacisku na głowicę sprężniętą ze stalową próbką za pośrednictwem warstwy polimeru. Głowica sprężnięta została z polimerem małą ilością cieczy natomiast granica polimer – stal pozostawała sucha. W badaniach zastosowano głowicę normalną, na fale podłużne o częstotliwości 5 MHz.

Rysunek 4 pokazuje w górnej części przykładowe wyniki zależności częstotliwości impulsu od siły nacisku a w dolnej – zależność amplitudy impulsu od siły nacisku (na osi pionowej podano wzmocnienie, przy którym echo dna osiągało określony poziom). Wyniki uzyskano badając polimer o gęstości 1123 kg/m³ i o prędkości fal podłużnych 1692 m/s. Zgodnie z oczekiwaniem amplituda impulsu jest tym większa, im silniej dociskana jest głowica do próbki. Fakt, że po zmniejszeniu nacisku amplituda pozostawała wysoka (niskie wzmocnienie), autorzy tłumaczą tym, że raz dociśnięty polimer pozostaje „przyklejony” do powierzchni próbki.

Uzyskane wyniki badań pozwoliły na wyznaczenie minimalnego ciśnienia, powyżej którego działanie polimeru jako ośrodka sprzegającego nie poprawia się znacząco. Ciśnienie to wynosi od 0,3 do 0,2 kg/cm² w zależności od typu polimeru.

Nowe tworzywa sztuczne pozwoliły na budowę nowych głowic. Poniżej opisano trzy przykłady zastosowań nowych tworzyw



Rys. 5. Schemat budowy głowicy skośnej z klinem załamującym wykonanym w polimerze, działającej „na sucho”, bez sprężenia cieczowego

pracujących jako „suche” sprzegacze akustyczne.

Głowica skośna z klinem wykonanych z elastomeru

W Southwest Research Institute opracowano głowice skośne na fale podłużne do badania jakości połączenia klejonego rury wykonanej z tworzywa sztucznego [5]. Materiał rury był hydroskopowy, co wykluczało możliwość stosowania sprężenia cieczowego. Do badania wykorzystano głowicę skośną o częstotliwości 0,5 MHz, pracującą bez potrzeby stosowania cieczy sprzegającej. Schemat budowy głowicy pokazuje rysunek 5.

Głowica osadzona jest w obudowie z tworzywa sztucznego. Obudowa ta ustala kąt padania wiązki fal na powierzchni elementu. W obudowie, w obszarze rozchodzenia się fal, wykonany został otwór, który wypełniono elastycznym, niskotłumiącym tworzywem sztucznym. Tworzywo to spełniało rolę klina załamującego, który dzięki swej elastyczności mógł dopasowywać się do nierówności powierzchni elementu. Aby zmniejszyć tarcie między miękkim klinem a elementem, dolną powierzchnię klina pokryto cienką i elastyczną folią.

Opisaną głowicą prowadzono badania jakości połączenia klejonego, bez stosowania cieczy sprzegającej.

Głowica kulkowa

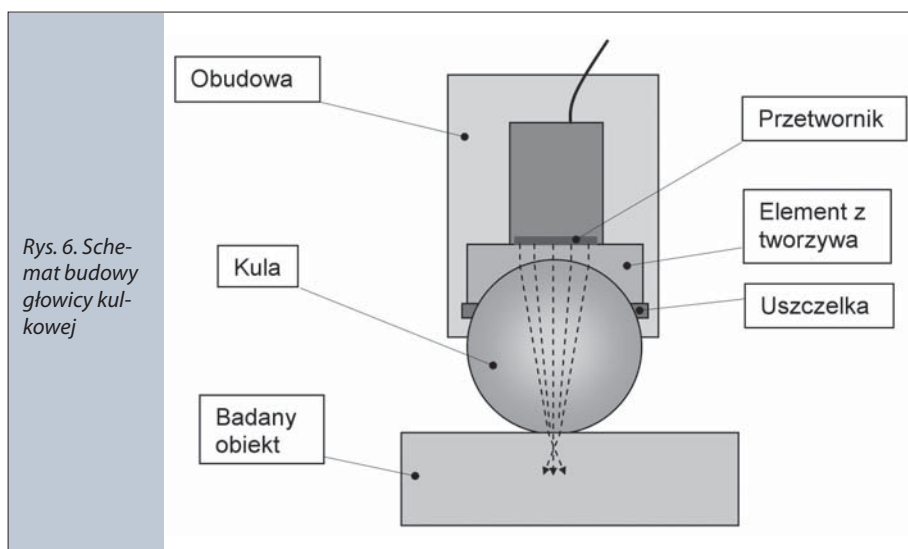
Ciekawe rozwiązanie głowicy pracującej na sucho i mogącej bez trudu przesuwac się w dowolnym kierunku nawet po chropowatych powierzchniach opisane jest w pracy [6]. Schemat działania i budowę głowicy kulkowej wyjaśnia rysunek 6. Głowica składa się z płaskiego przetwornika piezoelektrycznego na fale podłużne umieszczonego na górnej, płaskiej powierzchni elementu wykonanego z tworzywa sztucznego. W dolnej części element ten posiada sferyczne zagłębienie, dopasowane do stykającej się z nim kulki wykonanej z elastomeru. Między kulką a elementem z tworzywa nałożona jest mała ilość żelu sprzegającego. Uszczelka otaczająca kulkę zabezpiecza przed wypływaniem żelu. Całość umieszczona jest w obudowie umożliwiającej łatwe operowanie głowicą.

Impulsy fal generowanych przez przetwornik docierają do powierzchni kulki. Wielkości kulki i przetwornika oraz prędkości propagacji fal w elementach głowicy dobrane są tak, że po załamaniu fal na powierzchni kulki fale tworzą ognisko na dolnej powierzchni kulki, czyli w punkcie, w którym kulka styka się z powierzchnią badanego elementu.

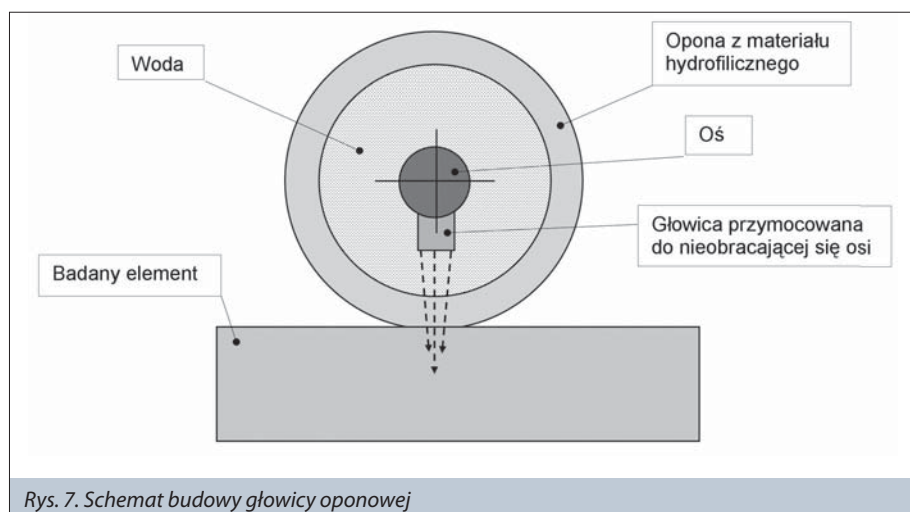
W czasie badania głowicę dociska się do powierzchni, co powoduje częściową deformację kulki i dopasowanie się jej powierzchni do nierówności powierzchni materiału.

Głowicę można przesuwac w dowolnym kierunku, a mechanizm jej ruchu jest taki sam jak mechanizm pisania wielkim długopisem kulkowym. Żel sprzegający między kulką a elementem, na którym osadzony jest przetwornik, służy również jako smar dla obracającej się kulki.

W opisaney w pracy [6] głowicy zastosowano kulkę o średnicy 25 mm i przetwornik ultradźwiękowy o średnicy 9 mm i częstotliwości 5 MHz. Badania wykazały, że



Rys. 6. Schemat budowy głowicy kulkowej



Rys. 7. Schemat budowy głowicy oponowej

opisana głowica może być z powodzeniem wykorzystana do pomiarów grubości elementów metalowych o grubościach powyżej 2 mm i do wykrywania wad. Siła, z jaką należy głowicę dociskać do powierzchni elementu wynosi mniej niż 1 kG.

Głowica typu opona

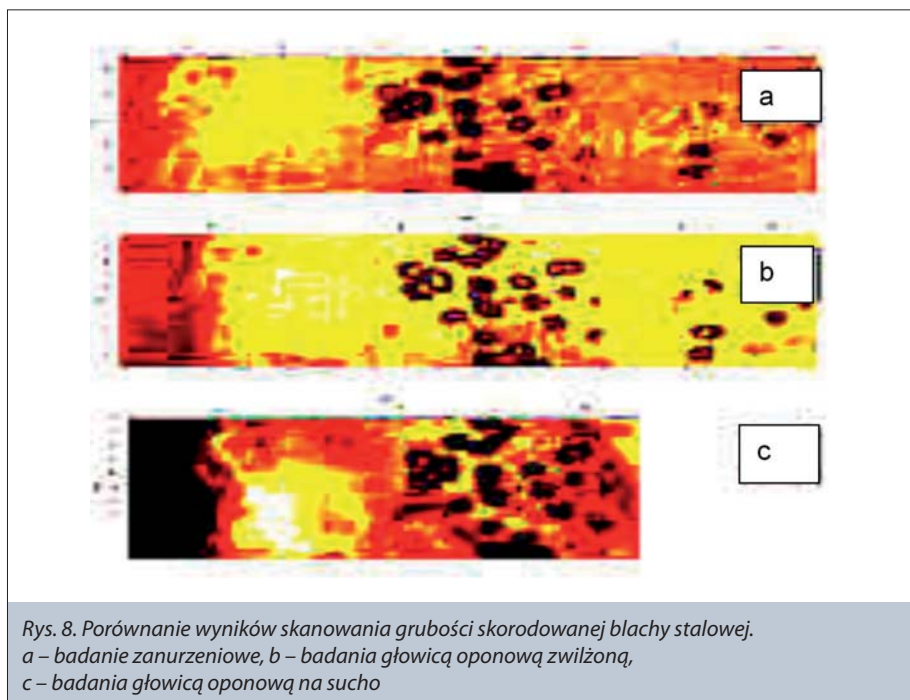
Głowice tego typu (koło Sperry) znane są od wielu lat. Ich „opony” wykonywane były z różnego rodzaju gum a ich wnętrza wypełniano wodą lub olejem. Tworzywa hydrofiliczne, o oporności akustycznej zbliżonej do oporności wody, pozwoliły na budowę takich głowic pozbawionych jednej z ich wad – odbici fal na granicy cieczy i wewnętrznej powierzchni „opony”. Dodatkowo umożliwiły operowanie takimi głowicami „na sucho”, bez potrzeby stosowania sprzężenia cieczowego między głowicą a badanym obiektem.

W pracy [2] opisana jest budowa i działanie takiej głowicy. Opona głowicy ma 13

mm grubości i średnicę zewnętrzną równą 67 mm. Miniaturowa głowica normalna do badań zanurzeniowych (wodoszczelna, dopasowana akustycznie do wody) została umocowana wewnątrz wypełnionej wodą opony. Wykorzystana w badaniach głowica to głowica ogniskująca o częstotliwości 5 MHz. Schemat budowy głowicy pokazuje rysunek 7.

Intencją autorów nowej głowicy było uzyskanie wykrywalności wad i rozdzielczości badania zbliżonej do uzyskiwanych w badaniach zanurzeniowych. Dlatego testując ją, porównali wyniki badania grubości skorodowanej blachy otrzymane nową głowicą pracującą „na sucho” i z małą ilością wody między oponą a powierzchnią blachy, z wynikami uzyskanymi metodą zanurzeniową, z wykorzystaniem tej samej głowicy skupiającej.

Rezultaty pokazuje rysunek 8. Część a) to wyniki badania zanurzeniowego, b) – głowicą oponową zwilżoną dwiema kroplami wody, c) – głowicą oponową kontaktującą się na sucho.



Rys. 8. Porównanie wyników skanowania grubości skorodowanej blachy stalowej. a – badanie zanurzeniowe, b – badania głowicą oponową zwilżoną, c – badania głowicą oponową na sucho

Podsumowanie

Rzeczony rozwój tworzyw sztucznych stosowanych w medycynie i różnych gałęziach techniki stwarza nowe możliwości w budowie głowic ultradźwiękowych do badań nieniszczących. Własności akustyczne takich tworzyw, zbliżone do własności wody, pozwalają nimi niejako zastępować sprzężenie wodne. Dalsze prace prowadzone nad tworzywami hydrofilicznymi mają doprowadzić do zwiększenia ich wytrzymałości. Elastyczność nowych materiałów i ich zdolność dopasowywania się do nierówności powierzchni badanego elementu umożliwiają prowadzenie badań „na sucho”. Taki sposób badania jest wymagany przy kontroli materiałów nasiąkliwych lub takich, które nie mogą być zanieczyszczone cieczą. Wykorzystanie nowych tworzyw może również znacznie ułatwić badania metalowych elementów różnych konstrukcji, które dzisiaj bada się wykorzystując sprzężenie cieczowe, moźolnie nanosząc na powierzchnię powszechnie stosowane kleje, oleje, smary stałe, żele do włosów czy polewając je obficie wodą.

Literatura

- [1]. Niepublikowane informacje o budowie rosyjskiego, automatycznego układu do ultradźwiękowych badań spoin.
- [2]. S. BOURNE, M. NEWBOROUGH, D. HIGHGATE, *Novel Solid Contact Ultrasonic couplant based on hydrophilic Polymers*, proc. 15yh WCNDT, Roma 2000, (www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn406/idn406.htm)
- [3]. A.R. SELFRIDGE, *IEEE Transactions on Sonic and Ultrasonics*, Vol. 32, No. 3, May 1985, pp.381-387.
- [4]. E.A. GINZEL, R.K. GINZEL, *Ultrasonic properties of a new low attenuation dry couplant elastomer*, NDTnet – February 1996, Vol.1, No.02, www.ndt.net/article/ginzel/ginzel.htm.
- [5]. informacja z: www.nde.swri.edu/ultrasonics/drycpld/drycpld.html
- [6]. E.A. GINZEL, R.K. GINZEL, *The Ballprobe*, NDTnet – February 1996, Vol. 1, No. 02, www.ndt.net/article/ginzel/ginzel2/ginzel2.htm

Jacek Szelażek
IPPT PAN Warszawa