

# TWORZYWA SZTUCZNE JAKO OŚRODKI SPRZĘGAJĄCE W ULTRADŹWIĘKOWYCH BADANIACH MATERIAŁÓW

Jacek Szelażek  
IPPT PAN Warszawa

## 1. WSTĘP

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.

Ideąłem 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 żelazem sprzęgającym. Konieczność ta spowodowana jest znaczną różnicą oporności akustycznych powietrza i stali i 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  $0,0004 \cdot 10^6$  [ $\text{kgm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]. 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].

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 rozwiązanie 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 niewytlumione. 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.

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

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.

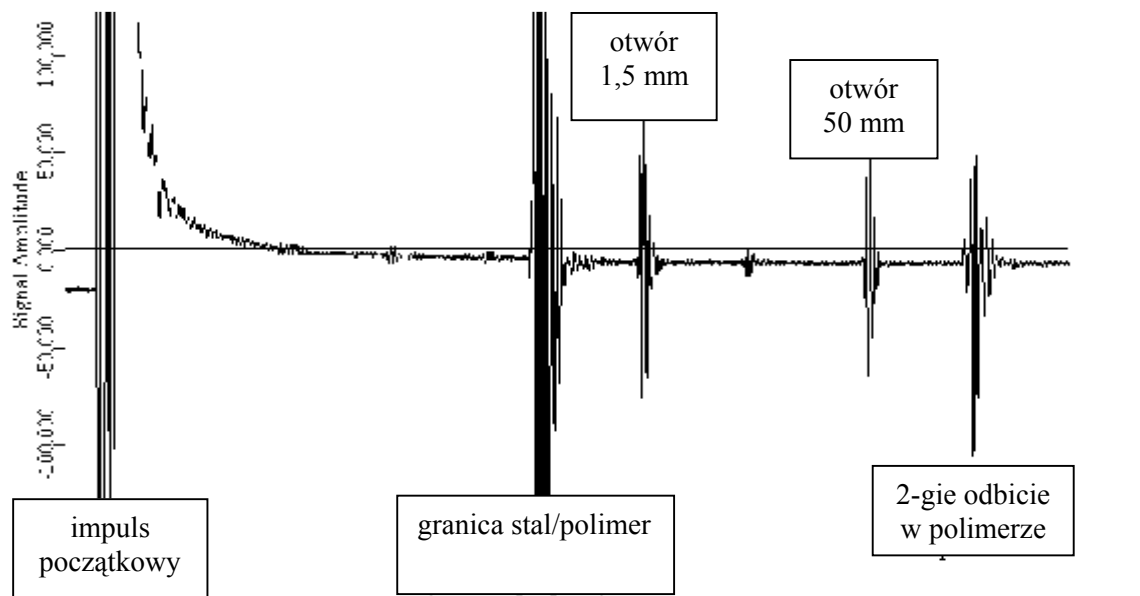
## 2. NOWE TWORZYWA SZTUCZNE ZASTĘPUJĄCE SPRZĘŻENIE CIECZOWE

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 200°C.

Rysunek 1 pokazuje schemat badania i obraz oscyloskopowy uzyskany głowicą na fale podłużne o częstotliwości 5 MHz postawioną na wzorcu W1. Pomiedzy głowicą a wzorcem umieszczona została warstwa polimeru o grubości 15.8 mm. Głowica sprzęgnięta była z

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



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

Fizyczne własności badanego polimeru są następujące:

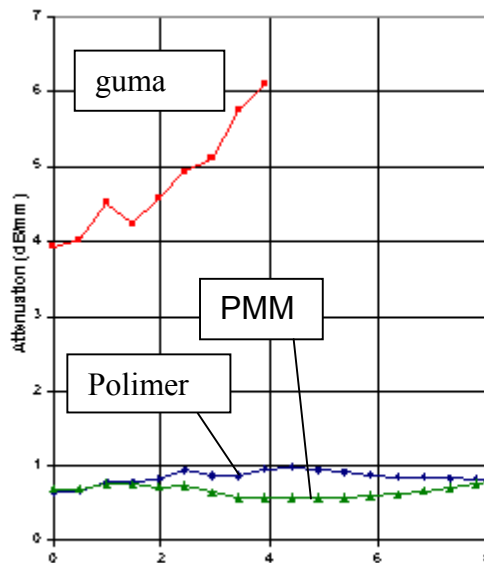
gęstość	- 0,92 kg.m <sup>3</sup>
prędkość fal podłużnych	- 1590 m/s
prędkość fal poprzecznych	- 800 m/s
tłumienie fal L (5 MHz)	- 0,28 dB/mm
kolor	- jasny niebieski
dwójłomność akustyczna	- brak (ośrodek izotropowy)
temperaturowa zależność prędkości fal podłużnych	- -2,5 m/s/°C.

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 własnościach 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 częstotliwościowej

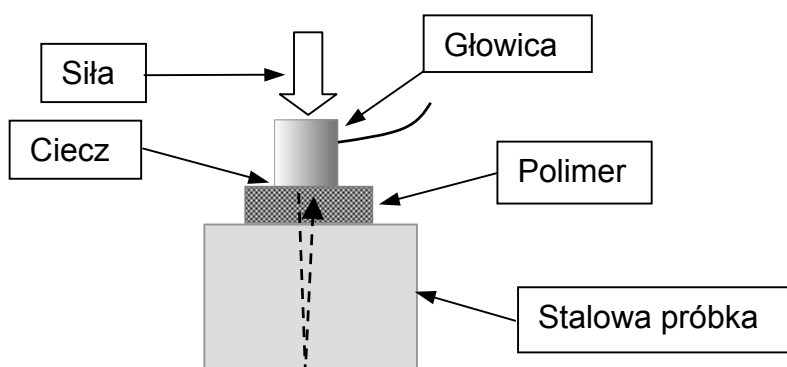
zależności tłumienia fal ultradźwiękowych. Rysunek 2 pokazuje wyniki. Dla porównania pokazano na nim zależność tłumienia dla PMM i dla gumy.



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

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

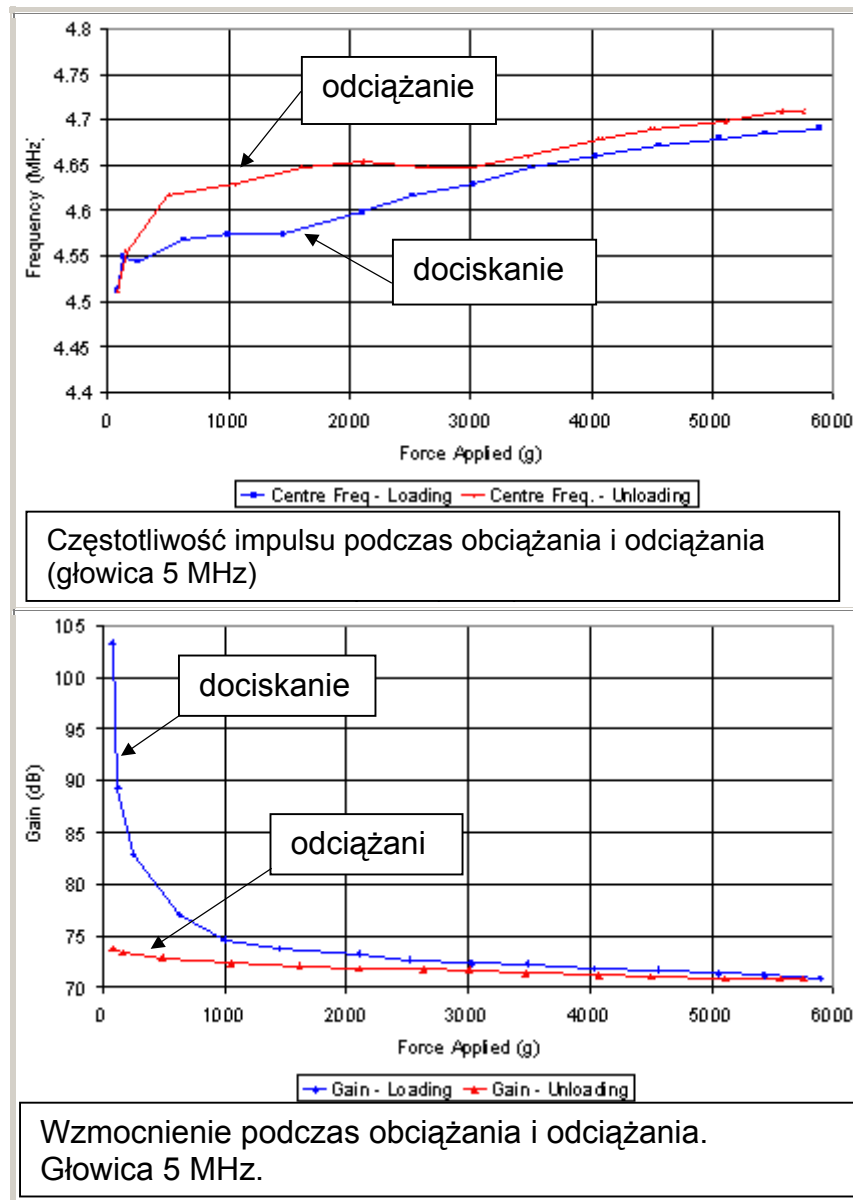
Następnym etapem badań było sprawdzenie efektywności działania polimerów jako ośrodków sprzęgających. Schemat badania pokazuje rysunek 3. Polegało ono na badaniu zmian widma częstotliwości echa dna i zmian jego amplitudy od siły nacisku na głowicę sprzęgniętą ze stalową próbką za pośrednictwem warstwy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



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

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  $1123 \text{ kg/m}^3$  i o prędkości fal podłużnych  $1692 \text{ m/s}$ . 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.



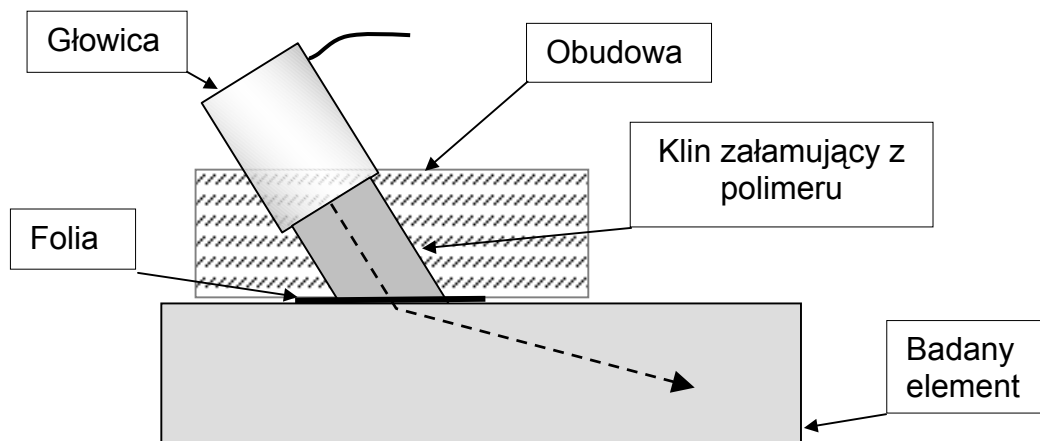
Rys. 4. Zmiany częstotliwości i amplitudy (wzmocnienia) podczas cyklu dociskania i odciążania głowicy sprzęgniętej ze stalową próbką za pośrednictwem warstwy polimeru hydrofilicznego, na sucho.

Uzyskane wyniki badań pozwoliły na wyznaczenie minimalnego ciśnienia, powyżej którego działanie polimeru jako ośrodka sprzęgającego nie poprawia się znacząco. Ciśnienie to wynosi od  $0,3$  do  $0,2 \text{ kg/cm}^2$  w zależności od typu polimeru.

Nowe tworzywa sztuczne pozwoliły na budowę nowych głowic. Poniżej opisano trzy przykłady zastosowań nowych tworzyw pracujących jako „suche” sprzęgacze akustyczne.

### 3. 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 sprzężenia cieczowego. Do badania wykorzystano głowicę skośną o częstotliwości 0,5 MHz pracującą bez potrzeby stosowania cieczy sprzęgającej. Schemat budowy głowicy pokazuje rysunek 5.



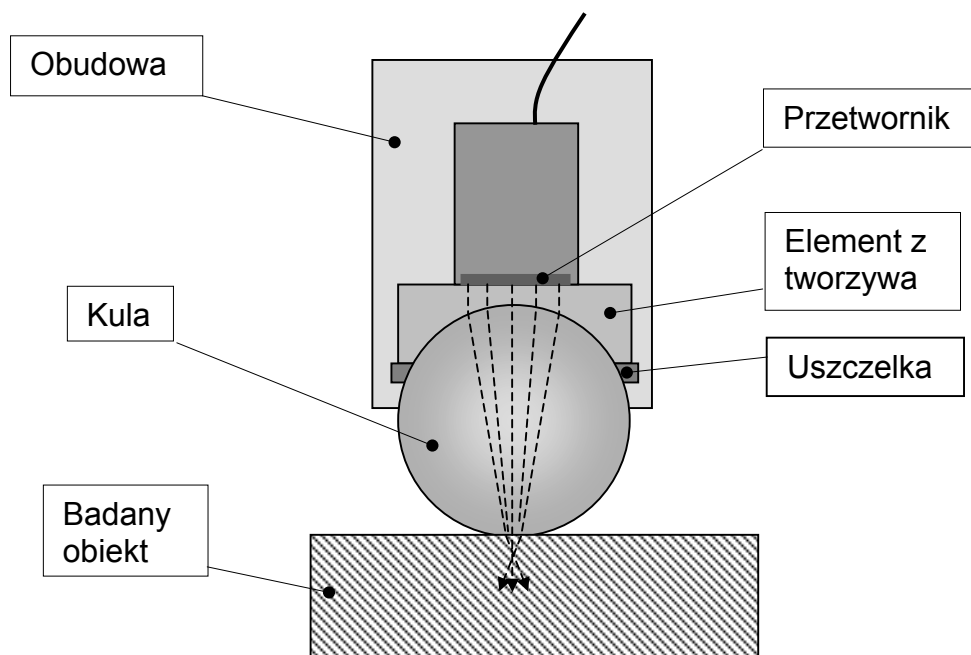
Rys. 5. Schemat budowy głowicy skośnej z klinem załamującym wykonanym w polimeru, działającej „na sucho”, bez sprzężenia cieczowego.

Głowica osadzona jest w obudowie z tworzywa sztucznego. Obudowa ta ustala kąt padania wiązki fal na powierzchnię elementu. W obudowie, w obszarze rozchodzenia się fal, wykonano został otwór, który wypełniono elastycznym, niskotłumiącym tworzywem sztucnym. Tworzywo to spełniało rolę klinu 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 sprzęgającej.

### 4. GŁOWICA KULKOWA

Ciekawe rozwiązanie głowicy pracującej na sucho i mogącej bez trudu przesuwać 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 sprzęgającego. 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.



Rys. 6. Schemat budowy głowicy kulkowej.

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

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

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

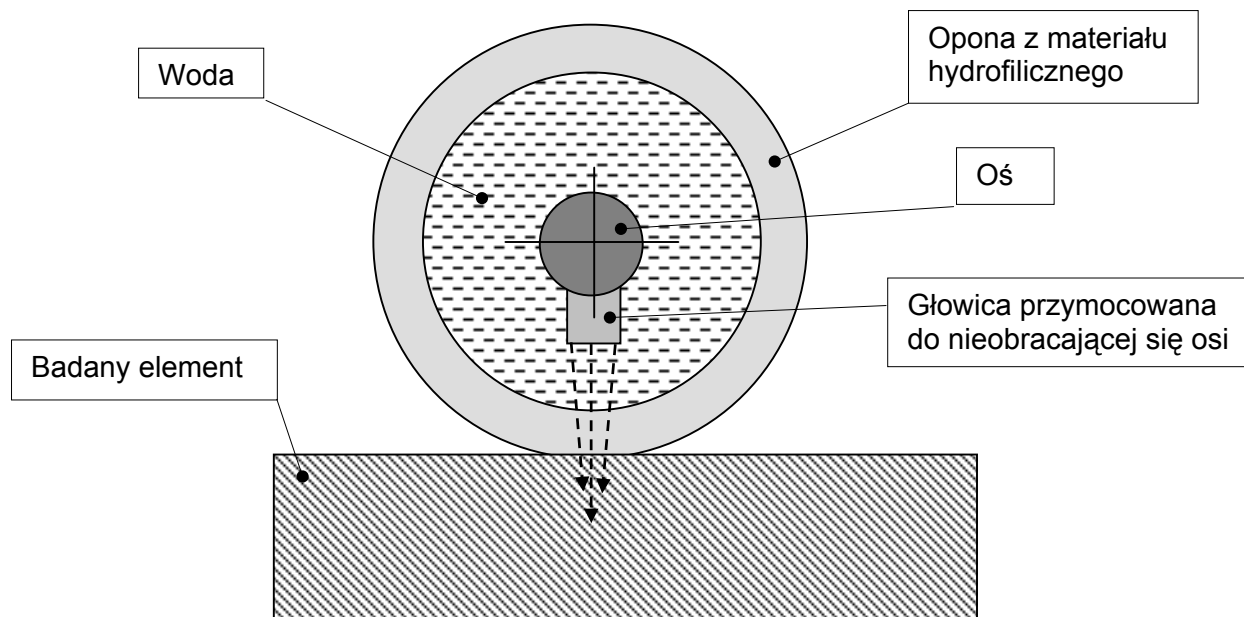
## 5. GŁOWICA TYPU OPONA

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 – odbić 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 powierzchnia blachy, z wynikami uzyskanymi metodą zanurzeniową, z wykorzystaniem tej samej głowicy skupiającej.



Rys. 7. Schemat budowy głowicy oponowej.

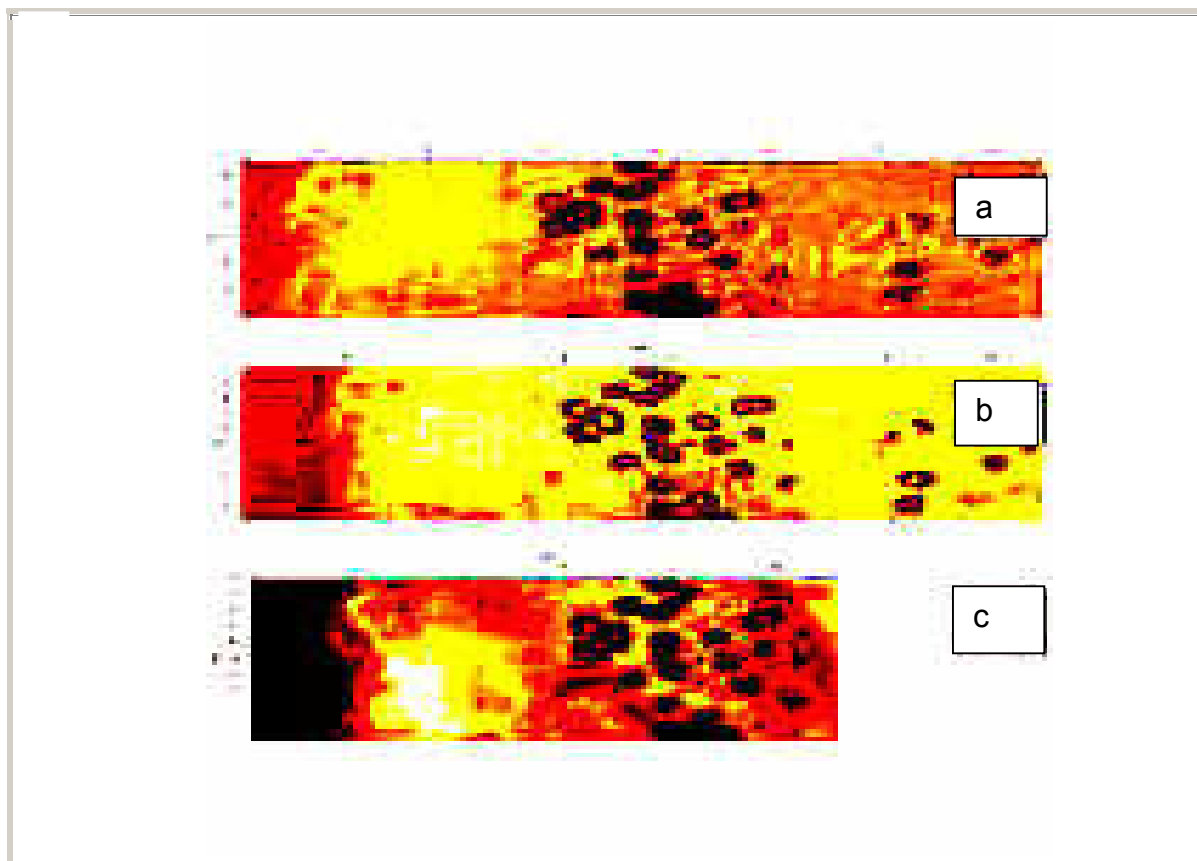
Rezultaty pokazuje rysunek 8. Górna część to wyniki badania zanurzeniowego, środkowa – głowicą oponową zwilżoną dwiema kroplami wody, dolna – głowicą oponową kontaktującą się na sucho.

## 6. PODSUMOWANIE

Rozwój tworzyw sztucznych stosowanych w medycynie i różnych gałęziach techniki stwarza nowe możliwości w budowie głowic ultradźwiękowej do badań nieniszczących. Własności akustyczne takich tworzyw, zbliżone do własności wody, pozwalają nimi niejako zastępować sprężenie 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 sprężenie cieczowe, mozolnie nanosząc na powierzchnię powszechnie stosowane kleje, oleje, smary stałe, żele do włosów czy polewając je obficie wodą.

## 7. 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](http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn406/idn406.htm))



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

- [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](http://www.ndt.net/article/ginzel/ginzel.htm)).
- [5]. informacja z: [www.nde.swri.edu/ultrasonics/drycpld/drycpld.html](http://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](http://www.ndt.net/article/ginzel/ginzel2/ginzel2.htm)