

WPLYW WARSTWY SPRZĘGAJĄCEJ NA CZUŁOŚĆ BADANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO

Tomasz Katz, Sławomir Mackiewicz, Grzegorz Starzyński
IPPT PAN
tkatz@ippt.pan.pl

1. WSTĘP

Rozwijanie jakości i dalszy postęp w badaniach ultradźwiękowych zależy w dużej mierze od modelowania komputerowego i symulacji wszystkich aspektów procesu badania ultradźwiękowego co pokazali między innymi HECKEL T., WACK Y., MOOK G. (2019) w pracy [1] na przykładzie badań szyn kolejowych. Jednym z tych aspektów jest jakość i stabilność sprzężenia akustycznego pomiędzy głowicą ultradźwiękową a powierzchnią szyny czy innego badanego elementu. Do chwili obecnej nie przeprowadzono szeroko zakrojonych badań na ten konkretny temat. Jedną z niewielu opublikowanych prac [2] bada wpływ rodzaju ośrodka sprzęgającego i chropowatości powierzchni na straty fali podczas transferu między głowicą a badanym materiałem. W prezentowanej poniżej pracy przedstawiamy rezultaty symulacji numerycznej wykonanej przy użyciu programu opartego na własnym modelu teoretycznym opisanym w [3] oraz wyniki doświadczalne dla głowic fal podłużnych i poprzecznych padających pod różnymi kątami β . Jak się będzie można przekonać grubość warstwy sprzęgającej jak i materiał klina załamującego ma duży wpływ na straty sygnału uzyskanego z głowicy po przejściu całej drogi i często może to mieć znaczący wpływ w ocenie badanego materiału.

2. MODEL TRANSMISJI FALI ULTRADŹWIĘKOWEJ PRZEZ WARSTWĘ SPRZĘGAJĄCĄ

Na początku chcielibyśmy krótko przedstawić zmodyfikowany model teoretyczny przenoszenia fali ultradźwiękowej przez jednorodną warstwę cieczy. Jest on bardziej ogólny niż powszechnie znane wzory prezentowane w podręcznikach ultradźwiękowych [4,5], które uwzględniają jedynie normalne padanie fali ultradźwiękowej na warstwę kontaktową. Teoretyczne podejście będzie zgodne z podejściem zastosowanym przez [6] w ich pracy na temat transmisji i odbicia fal ultradźwiękowych w ośrodkach warstwowych. W naszym modelu rozważamy transmisję fali podłużnej (typu L) z jednego półnieskończonego ośrodka stałego do innego półnieskończonego ośrodka stałego przez płasko-równoległą warstwę cieczy a także transmisję z transformacją fali podłużnej w poprzeczną, tak jak to faktycznie zachodzi w głowicach kątowych szeroko stosowanych w badaniach ultradźwiękowych.

W przypadku ultradźwiękowych głowic kątowych stosowanych do badań nieniszczących fala ultradźwiękowa jest przenoszona z litego klina wykonanego z PMMA

(polimetakrylanu metylu) lub Rexolitu (sieciowany polistyren) do litego materiału badanego (np. stali) poprzez ciecz sprzęgającą (wodę, glicerynę, żele).

W opracowywanym modelu [3] uwzględniono, że rzeczywisty spadek amplitudy impulsu ultradźwiękowego przechodzącego przez warstwę sprzęgającą od głowicy do badanego materiału i odwrotnie, jest pewną średnią współczynników podwójnej transmisji dla wszystkich częstotliwości reprezentowanych w widmie impulsu. Aby to uwzględnić przyjęto przybliżenie widma częstotliwości dla impulsu ultradźwiękowego padającego na granicę pomiędzy klinem głowicy a warstwą sprzęgającą za pomocą funkcji Gaussa z dwoma parametrami: f_0 - częstotliwość środkowa głowicy ultradźwiękowej i parametr $\sigma = WB/235$ gdzie WB jest szerokością widma głowicy a wartość 235 dopasowuje krzywą Gaussa do rzeczywistego rozkładu widma głowicy ultradźwiękowej. Oba parametry są zwykle podane w certyfikacie głowicy lub można je zmierzyć zgodnie z normą PN-EN ISO 22232-2:2021. Jak się okazało, uwzględnienie skończonej szerokości pasma nowoczesnych głowic ultradźwiękowych, znacząco zmieniło zależność strat transferowych od grubości warstwy sprzęgającej.

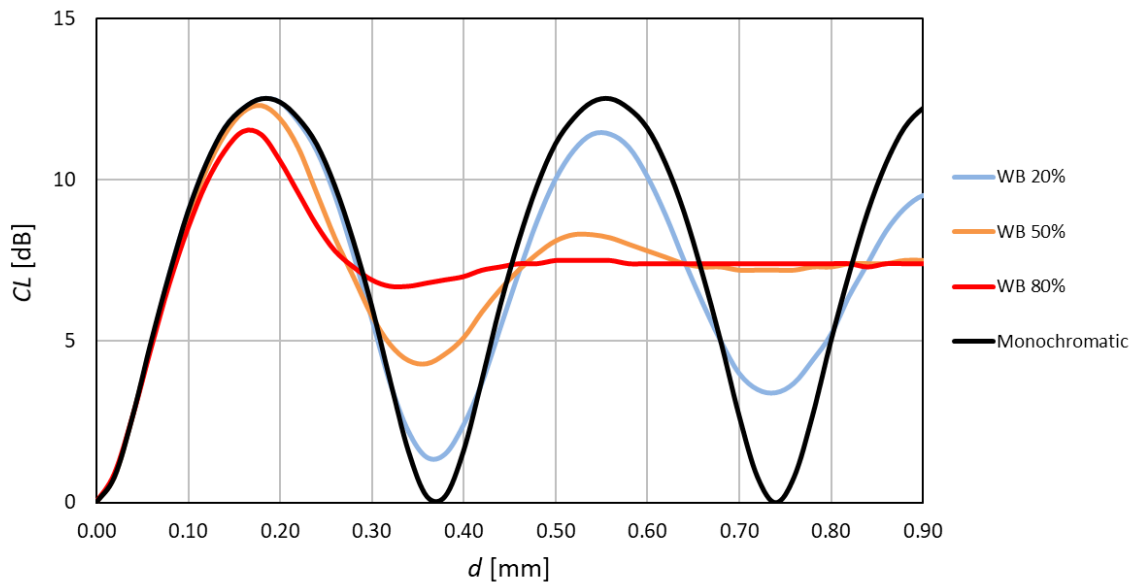
Aby skupić uwagę na tej zależności, można zdefiniować bardziej odpowiedni parametr zwany stratą sprzężenia CL :

$$CL(d)=TL(d)-TL(0)$$

gdzie d jest grubością warstwy sprzęgającej, a $TL(0)$ jest stratą przenoszenia obliczoną dla grubości d ustawionej na 0.

Dzięki takiej definicji straty sprzęgające w najlepszym przypadku (zerowa warstwa sprzęgająca) wyniosły zero i pozwalały na analizę zmian strat przesyłowych na skutek wahań grubości warstwy sprzęgającej. Jest to ważny aspekt każdej zmechanizowanej inspekcji ultradźwiękowej, ponieważ zmiany strat transferowych na skutek wahań grubości warstwy sprzęgającej powodują niekontrolowane zmiany czułości badania podczas skanowania ultradźwiękowego. Znając charakterystykę zmian czułości w funkcji grubości warstwy sprzęgającej, można zastosować pewne korekty wzmocnienia skanowania, aby skompensować przewidywane spadki czułości. Alternatywnie, kalibrację czułości testowej na reflektorach odniesienia można przeprowadzić w kontrolowanych warunkach przy grubości warstwy sprzęgającej ustawionej na wartość, przy której straty sprzęgania były największe. W ten sposób wahania grubości warstwy sprzęgającej podczas rzeczywistego badania mogą jedynie zwiększyć czułość badania, co jest sytuacją bezpieczniejszą niż niekontrolowane spadki czułości.

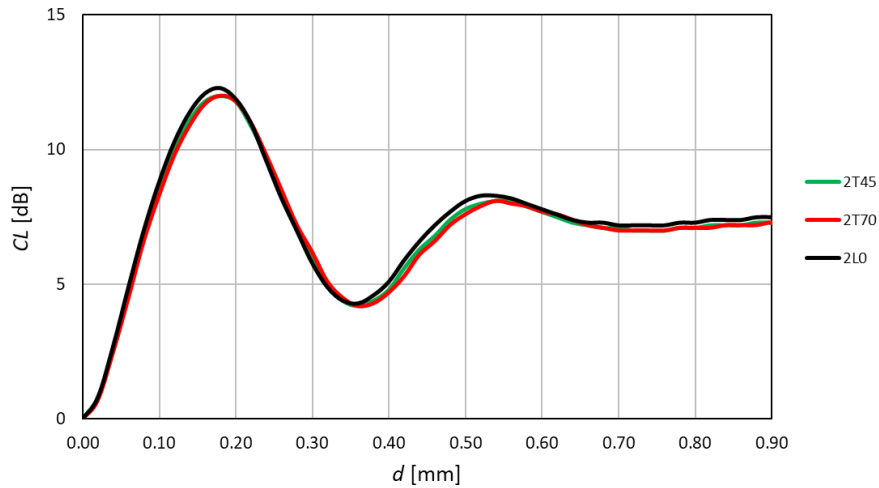
Znalezienie tej grubości warstwy sprzęgającej jest jednym z celów naszych badań. Na kolejnych rysunkach (rys.1-3) pokażemy wpływ niektórych parametrów na zmiany strat przesyłowych.



Rys. 1 Porównanie strat sprzężenia CL od grubości warstwy wody d dla różnych szerokości pasma WB komercyjnych głowic ultradźwiękowych.

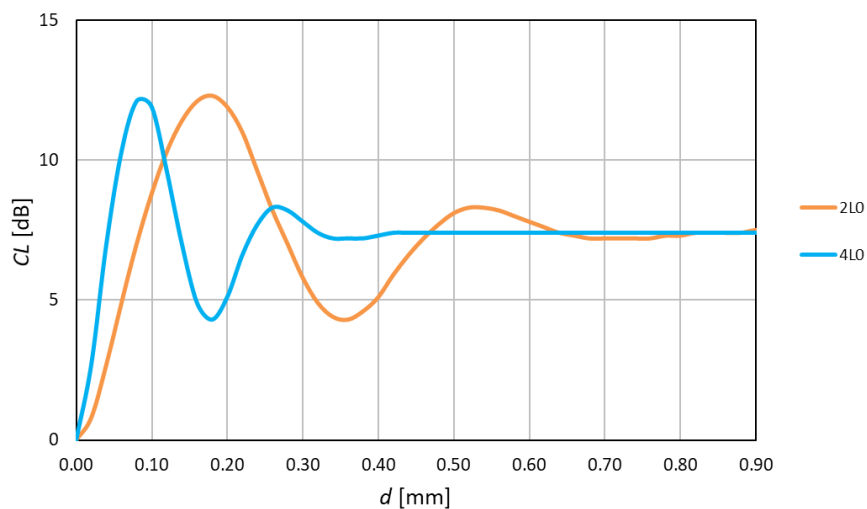
Zależność strat sprzężenia CL od grubości warstwy wody d dla różnych szerokości pasma WB wyliczona za pomocą naszego modelu przedstawiona jest na rys.1. Jest ona porównana z wynikiem obliczonym za pomocą znanego wzoru dla przebiegu monochromatycznego (linia czarna). W tym przybliżeniu minima strat sprzężenia występują okresowo przy wielokrotnościach połowy długości fali w warstwie sprzęgającej. Jest to teoretyczny wynik, którego nie obserwuje się w praktyce badań ultradźwiękowych. Przedstawione wyniki potwierdzają, że szerokość pasma głowic ultradźwiękowych ma istotny wpływ na straty sprzężenia podczas skanowania ultradźwiękowego i powinna być brana pod uwagę przy projektowaniu i kalibracji systemów kontroli ultradźwiękowej. Dla typowej głowicy typu L 2 MHz o średniej szerokości pasma (parametr WB = 50%) maksymalne straty sprzężenia wynoszące 12,3 dB występują przy grubości warstwy sprzęgającej 0,18 mm i gwałtownie spadają do zera wraz ze zmniejszeniem grubości warstwy. Odpowiada to wahaniom czułości badania o 12,3 dB między różnymi odcinkami badanego elementu w najgorszym przypadku. Aby uniknąć tak dużych zmian w czułości testowania, minimalna grubość warstwy sprzęgającej może być ograniczona do ok. 0,1 mm poprzez zamocowanie kołków dystansowych wykonanych z twardego materiału na powierzchni skanującej głowicy. W ten sposób można było zmniejszyć wahania czułości testowej z 12,3 dB do około 8 dB.

Oprócz analizy działania głowicy typu L 2 MHz interesujące jest, jak grubość warstwy sprzęgającej wpływa na straty transferowe dla głowic kątowych fali poprzecznej powszechnie stosowanych w różnego typu inspekcjach.



Rys. 2. Zależności strat sprzężenia od grubości warstwy sprzęgającej dla głowicy typu L 2 MHz i głowicy typu T o tej samej szerokości pasma ($WB=50\%$), ale o różnych kątach załamania.

Jak widać na rys. 2, charakterystyka strat sprzężenia jest prawie taka sama dla głowicy typu L i głowic typu T o kątach załamania 45° and 70° przy założeniu, że mają one tę samą częstotliwość centralną i szerokość pasma. Jeśli jednak zmienimy częstotliwość środkową głowicy, charakterystyka strat sprzężenia znacznie się zmieni, co widać na rys. 3. Zwiększenie częstotliwości głowicy z 2 do 4 MHz powoduje zwężenie krzywej charakterystyki o współczynnik 2 na osi grubości warstwy. Oznacza to, że w przypadku głowic 4 MHz minimalna odległość między powierzchniami czołowymi głowicy a badaną powierzchnią może zostać zmniejszona do 0,05 mm bez negatywnych konsekwencji dla wahań czułości badania. Mimo to nawet zmniejszone wahania czułości rzędu 8 dB są dość wysokie i mogą powodować problemy podczas badania.



Rys. 3. Zależności strat sprzężenia od grubości warstwy sprzęgającej dla głowicy typu L 2 MHz i głowicy typu L 4 MHz o tej samej szerokości pasma ($WB=50\%$).

3. EKSPERYMENT

3.1 Stanowisko do pomiaru strat transferowych od grubości warstwy sprzęgającej

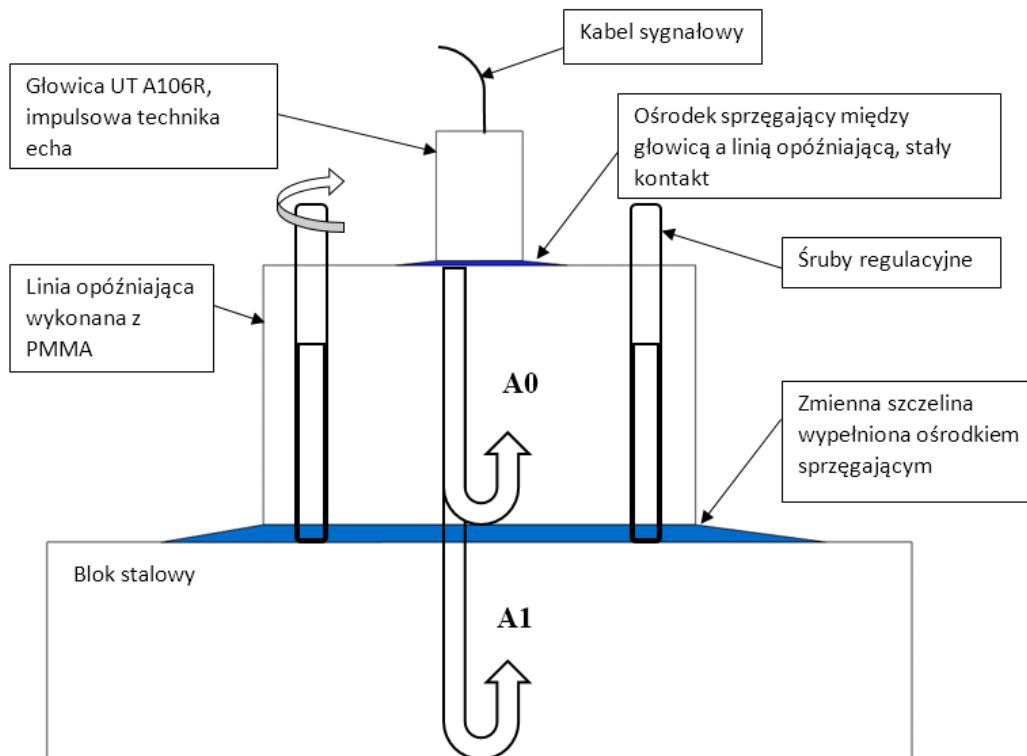
Badania eksperymentalne przeprowadzono przy użyciu komercyjnej głowicy ultradźwiękowej Panametrics A106 zintegrowanej z linią opóźniającą (klinem głowicy) wykonanym z PMMA. Jest to głowica o normalnej wiązce o częstotliwości nominalnej 2,25 MHz i średnicy przetwornika 12,5 mm. Charakterystykę widmową głowicy z linią opóźniającą PMMA wyznaczono wykorzystując nasze stanowisko laboratoryjne składające się z Pulsera/Odbiornika/Digitizera Panametrics Epoch 650, Bloku Kalibracyjnego nr 1 (wg ISO 2400) oraz autorskiego oprogramowania realizującego transformację Fouriera z wykorzystaniem algorytmu FFT (patrz rys. 5). Ze zmierzonej charakterystyki widmowej nadawczo-odbiorczej wyznaczono częstotliwość środkową - f_0 i szerokość pasma -6 dB - BW zgodnie z normą EN 12668-2:2010. Na podstawie dolnej ($f_l = 1,17$ MHz) i górnej ($f_u = 2,58$ MHz) częstotliwości pasma obliczono częstotliwość środkową i względną szerokość pasma głowicy wraz z linią opóźniającą, korzystając z następujących standardowych wzorów:

$$f_0 = \frac{(f_l + f_u)}{2} = \frac{1.17 + 2.58}{2} = 1.88 \text{ MHz} \quad (1)$$

$$WB = \frac{2(f_u - f_l)}{(f_u + f_l)} 100\% = \frac{1.41}{1.88} 100 = 75\% \quad (2)$$

Schemat koncepcyjny tego układu eksperymentalnego pokazano na rys. 4.

Przetwornik piezoelektryczny głowicy ultradźwiękowej wysyła do linii opóźniającej PMMA krótki impuls fali podłużnej, który przemieszcza się do warstwy sprzęgającej o grubości d na granicy linii opóźniającej z blokiem stalowym. Część energii ultradźwiękowej odbija się od warstwy granicznej, dając na ekranie aparatu ultradźwiękowego pierwsze echo ultradźwiękowe (tzw. echo interfejsu o amplitudzie A_0), które zwykle nie jest interesujące w badaniach ultradźwiękowych. Pozostała część energii ultradźwiękowej przechodzi przez warstwę sprzęgającą do bloku stalowego i odbija się od jego dna dając tzw. echo tylnej ściany o amplitudzie A_1 . Amplituda tego echa zależy od podwójnego współczynnika transmisji przez warstwę sprzęgającą, ale także od wszystkich innych czynników wpływających na impuls na drodze od przetwornika wysyłającego do tylnej powierzchni stalowego bloku i po odbiciu z powrotem do (tego samego) przetwornika odbiorczego.



Rys.4. Schemat układu doświadczalnego służącego do weryfikacji modeli teoretycznych do obliczeń strat sprzęgających CL wprowadzanych przez warstwę sprzęgającą pomiędzy linią opóźniającą PMMA (A_0) i blok stalowy (A_1).

Współczynnik podwójnej transmisji, a w konsekwencji amplituda echa tylnej ściany A_1 , zależy od grubości warstwy sprzęgającej d . Dla zastosowań praktycznych zależność tę najwygodniej wyraża się w postaci strat na sprzężeniu CL określonych przez

$$CL(d) = TL(d) - TL(0) \text{ i } TL = -20 \log_{10} \left(T_{3-1-3}^{L-T(L)-L} \right) \quad (3)$$

gdzie d jest grubością warstwy sprzęgającej, a $TL(d)$ jest stratą przenoszenia obliczoną dla grubości d .

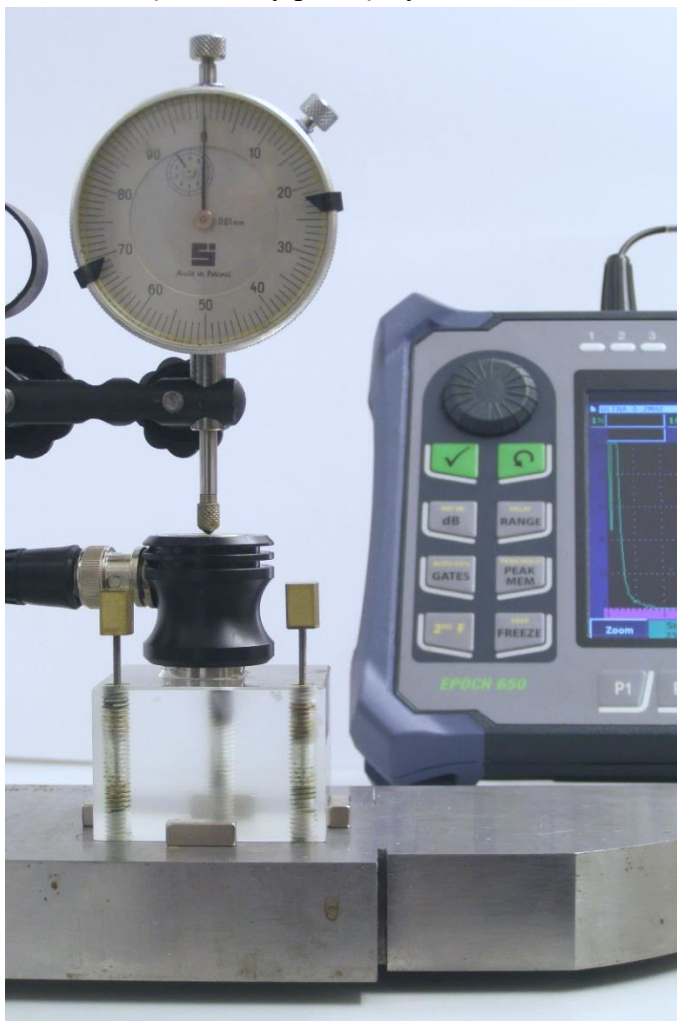
W naszym eksperymencie straty sprzęgające wyznaczane są poprzez stosunek amplitud echa tylnej ściany otrzymanych dla warstwy sprzęgającej o grubości d do amplitudy echa tylnej ściany dla warstwy sprzęgającej o grubości równej zero. Wyraża się to w decybelach za pomocą wzoru.

$$CL(d) = -20 \log_{10} \left(\frac{A_1(d)}{A_1(0)} \right) \quad (4)$$

Należy zauważyć, że w takim podejściu eksperymentalnym można wyznaczyć straty sprzężenia bez uwzględnienia tłumienia ultradźwiękowego i rozbieżności wiązki w linii opóźniającej PMMA i bloku stalowym, a także współczynnika odbicia impulsu ultradźwiękowego od spodu bloku stalowego. Wszystkie te czynniki oczywiście wpływają na mierzone amplitudy echa tylnej ściany, ale są niezależne od grubości warstwy sprzęgającej i są uproszczone w wyrażeniu ułamkowym w równaniu (4).

Fotografię układu doświadczalnego służącego do wyznaczania strat sprzęgających CL w funkcji grubości warstwy sprzęgającej d przedstawiono na rys. 5. Odległość d pomiędzy linią

opóźniającą PMMA a blokiem stalowym regulowano za pomocą trzech śrub drobnozwojowych i kontrolowano za pomocą mikrometru zegarowego z dokładnością do 0,001 mm. Podczas pomiarów cały blok stalowy oraz dolną część bloku PMMA zanurzano w wodzie, aby zapewnić całkowite wypełnienie wodą szczeliny pomiędzy nimi.



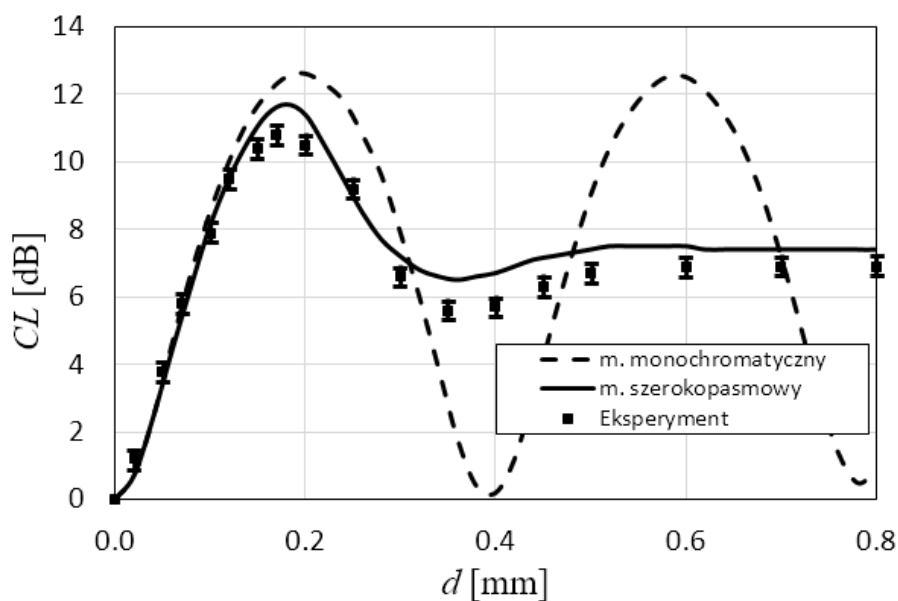
Rys. 5. Zdjęcie stanowiska doświadczenia do pomiaru strat CL wprowadzanych przez warstwę sprzęgającą pomiędzy linią opóźniającą PMMA a blokiem stalowym.

Pierwszym krokiem w pomiarach doświadczalnych było wyznaczenie amplitudy echa tylnej ściany dla zerowej warstwy sprzęgającej – $A1(0)$. Na tym etapie odkręcono śruby dystansowe i lekko dociśnięto płytkę PMMA do stalowego bloku, aby usunąć pozostałą pomiędzy nimi wodę. Następnie stopniowo zwiększano odległość między nimi (uzyskując grubość warstwy sprzęgającej d) i mierzono amplitudy echa tylnej ściany $A1(d)$. Na koniec zmierzone amplitudy echa podstawiono do wzoru (4) i wyznaczono straty sprzężenia CL w zależności od d . Pomiarów wykonano dla grubości warstwy wody w zakresie od 0,0 do 0,8 mm, co uwzględnia wahania grubości warstwy sprzęgającej, jakich można się spodziewać w rzeczywistych badaniach.

3.2 Wyniki weryfikacji eksperymentalnej modelu teoretycznego

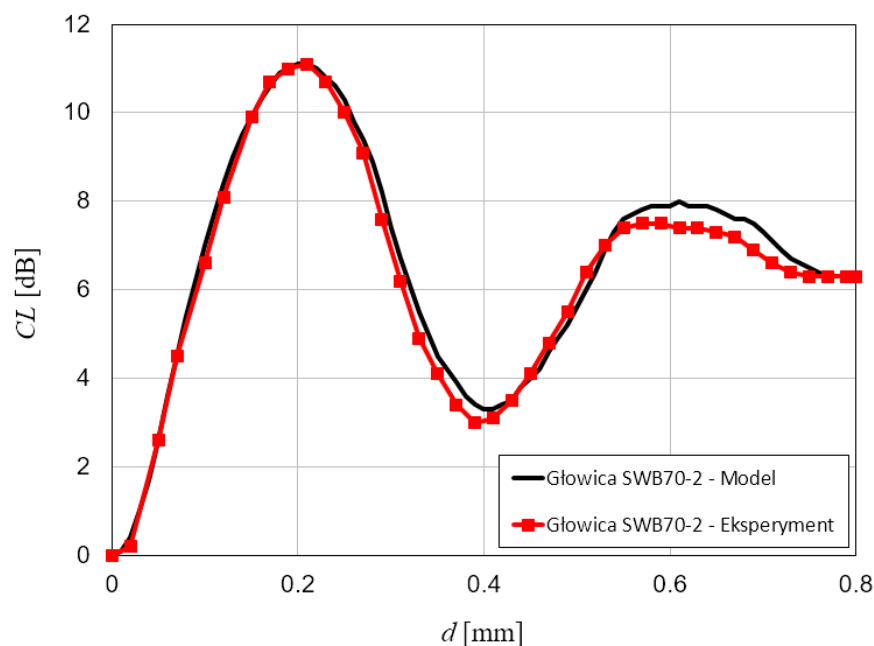
Wyniki pomiarów doświadczalnych $CL(d)$ przedstawiono na rys. 6 z dyskretnymi punktami. Zakres błędów pomiarowych został określony na podstawie rozkładu wielu pomiarów dla każdego punktu. Linia ciągła przedstawia krzywą teoretyczną obliczoną dla

rozważanej konfiguracji przy użyciu naszego modelu szerokopasmowego oraz krzywą teoretyczną (linia przerywana) obliczoną na podstawie podstawowego modelu monochromatycznego. Widać, że w początkowym zakresie grubości warstwy (do ok. 0,15 mm) zgodność wyników eksperymentalnych z obiema krzywymi teoretycznymi jest doskonała. Następnie wyniki zaczynają się różnicować, przy czym krzywa obliczona z modelu monochromatycznego wykazuje znacznie większe odchylenia od danych eksperymentalnych niż krzywa obliczona z naszego modelu. Jest to szczególnie widoczne dla warstw o grubości powyżej 0,2 mm, gdzie nasz model nadal daje rozsądne przybliżenie punktu doświadczalnego, ale podstawowy model monochromatyczny całkowicie zawodzi, pokazując nieistniejące minima i maksima strat sprzężenia. Podobne wyniki otrzymano w Niemczech w przypadku systemów kontroli szyn dla kolei dużych prędkości, przy zastosowaniu głowic ultradźwiękowych wyposażonych w dystanse odporne na ścieranie, aby ustawić szczelinę pomiędzy czołem głowicy a powierzchnią szyny na 0,2 mm [7]. Ogólnie rzecz biorąc, nasz model szerokopasmowy przewiduje nieco wyższe wartości strat sprzężenia niż dane eksperymentalne, jednak różnica nie przekracza 1,0 dB w żadnym punkcie pomiarowym. Jest to w zupełności wystarczająca dokładność modelowania z punktu widzenia praktycznych zastosowań w zautomatyzowanych badaniach ultradźwiękowych. Zastosowanie zweryfikowanego modelu pozwala szybko ocenić jakie grubości a także rodzaje warstw użyć przy posiadanym rodzaju przetwornika i rodzaju testu.



Rys. 6. Porównanie eksperymentalnie wyznaczonych strat sprzężenia CL w warstwie sprzężenia wodnego z obliczeniami teoretycznymi dla modelu szerokopasmowego i monochromatycznego – głowica A106, fala podłużna.

Podobną weryfikację przeprowadzono dla głowicy kątowej. Badania eksperymentalne przeprowadzono przy użyciu komercyjnej głowicy ultradźwiękowej Krautkrämer SWB70-2 o częstotliwości nominalnej 2 MHz i wymiarze przetwornika 14x14 mm. Na podstawie wyznaczonej z charakterystyki widmowej dolnej ($f_l = 1,55$ MHz) i górnej ($f_u = 2,39$ MHz) częstotliwości pasma obliczono częstotliwość środkową $f_0 = 1,97$ MHz i względną szerokość pasma $WB = 43\%$ głowicy wraz z linią opóźniającą.



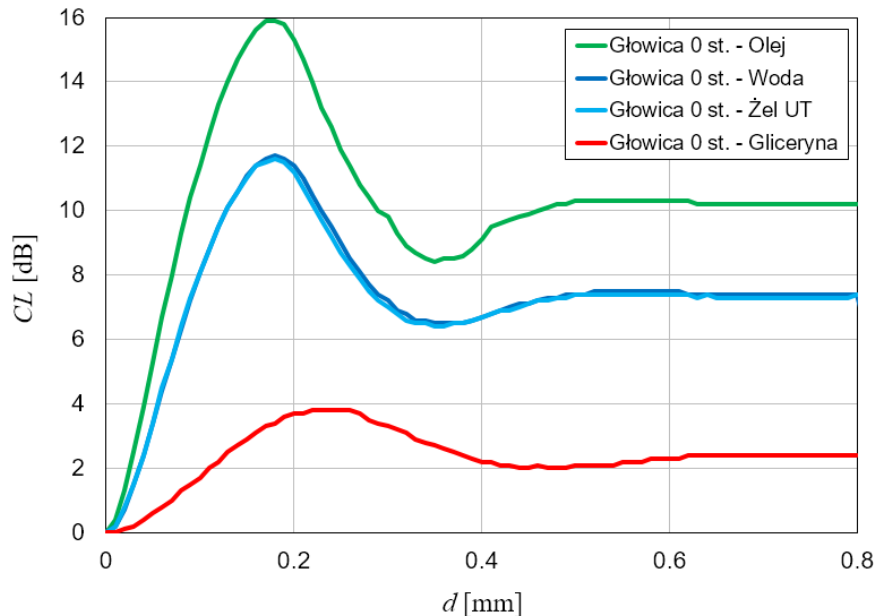
Rys. 7. Porównanie eksperymentalnie wyznaczonych strat sprzężenia CL w warstwie sprzężenia wodnego z obliczeniami teoretycznymi dla modelu szerokopasmowego – fala poprzeczna, głowica kątowa.

Wyniki pomiarów doświadczalnych $CL(d)$ przedstawiono na rys. 7 z dyskretnymi punktami. Zakres błędów pomiarowych został określony na podstawie rozkładu wielu pomiarów dla każdego punktu i widać, że powtarzalność pomiarów jest bardzo dobra. Linia ciągła przedstawia krzywą teoretyczną obliczoną dla rozważanej konfiguracji przy użyciu naszego modelu szerokopasmowego. Jak widać zgodność pomiarów eksperymentalnych z wynikami symulacji do około 0,21 mm jest bardzo dobra, nawet lepsza niż w przypadku fali podłużnej. Następnie wyniki zaczynają się delikatnie różnicować, przy czym wartość różnicy nie przekracza 1,0 dB w żadnym punkcie pomiarowym. Pozwala to spokojnie korzystać z modelu dla sprawdzenia wpływu różnych parametrów na straty związane z warstwą sprzęgającą, zarówno jej z grubością jak i użytym ośrodkiem.

3.3 Wyniki symulacji numerycznej

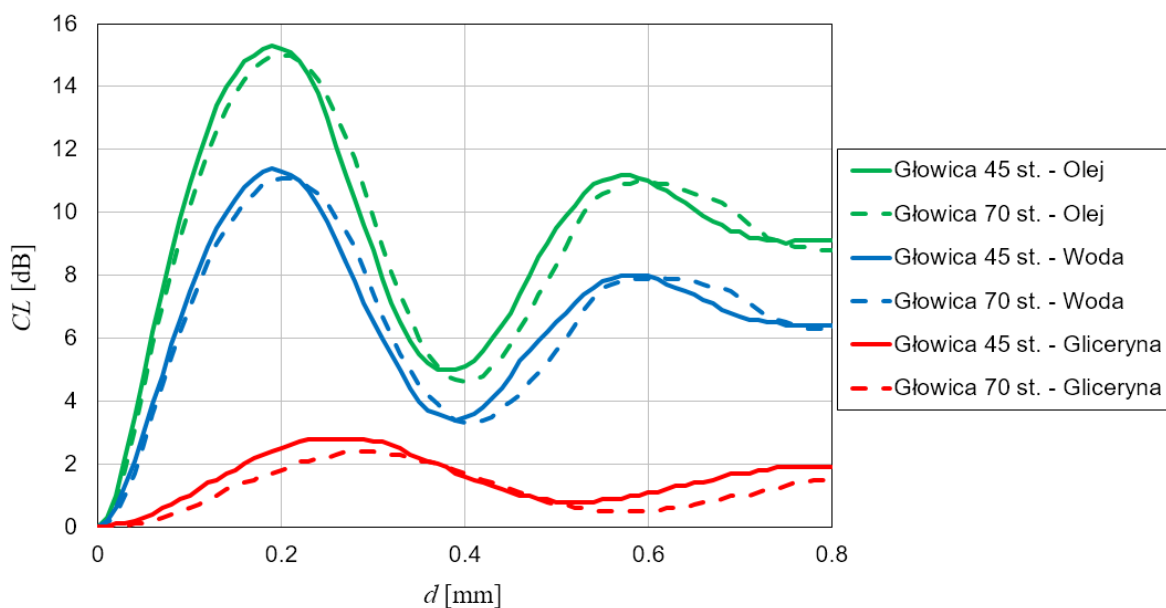
Poniżej omawiane symulacje numeryczne przeprowadzono dla 2 typów głowic powszechnie stosowanych w badaniach ultradźwiękowych oraz różnych ośrodków sprzęgających. Model głowicy normalnej na fale podłużne bazował na głowicy Panametrics A106, której parametry opisano w pkt. 3.1. Bazą modelową głowicy kątowej fal poprzecznych był Krautkrämer SWB70-2 o parametrach opisanych w poprzednim dziale oraz Krautkrämer SWB45-2 o parametrach $f_0 = 1,95$ MHz, $WB = 44$ %. W modelowaniu dla każdego typu głowicy zastosowano ośrodki sprzęgające najczęściej stosowane przy badaniach oraz pomiarach ultradźwiękowych takie jak: woda, żel ultradźwiękowy, olej maszynowy, gliceryna (rys. 8-9). Ponadto, pokazany został znaczący wpływ materiału, z którego utworzono klin opóźniający – PMMA i Rexolite (rys. 10-11).

Jak widać z rys. 8 i 9 wpływ ośrodka sprzęgającego jest znaczący i wynosi co najmniej 4,0 dB (w maksimum strat CL) i jest podobny dla wszystkich głowic, zarówno normalnej (0°) jak i kątowych (45° i 70°). Jedyne zależności strat w przypadku wody i żelu UT jest praktycznie taka sama, co wynika głównie z tego, że żel składa się przede wszystkim z wody i z fizycznego punktu widzenia są to ośrodki bardzo do siebie zbliżone (rys. 8).



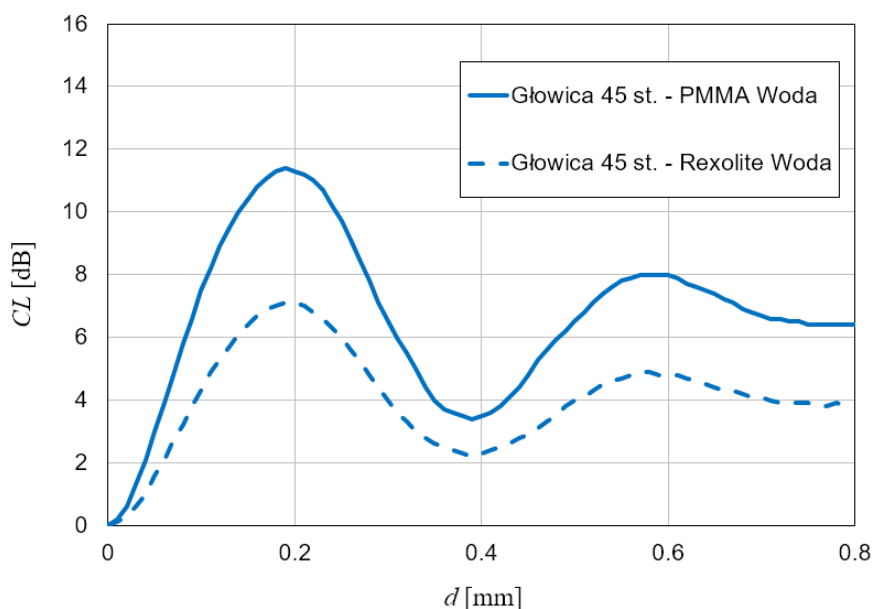
Rys. 8. Porównanie wyników modelowania strat sprzężenia CL dla różnych ośrodków sprzęgających – głowica normalna, $f_0 = 1,88$ MHz, $WB = 75$ %, fala podłużna.

Największe różnice widać dla oleju maszynowego i gliceryny dochodzące do 12,5 dB w maksimum strat dla wszystkich badanych głowic. Widać również, że najlepszym ośrodkiem sprzęgającym jest gliceryna, gdzie maksymalna strata nie przekracza 4 dB dla głowicy normalnej i 3 dB dla głowic kątowych. Symulacje potwierdzają również, że optymalną grubością warstwy sprzęgającej jest wartość ok. 0,19 mm (dla głowic o częstotliwości 2 MHz, ośrodek sprzęgający: woda, olej) co było zaobserwowane we wcześniejszych badaniach weryfikujących. Jest to istotny aspekt w dziedzinie badań ultradźwiękowych gdzie wykorzystuje się wysokie prędkości skanowania, które mogą powodować mimowolne podskakiwanie głowicy ultradźwiękowej bądź ścieranie się dystansów podtrzymujących głowicę tuż nad badaną powierzchnią materiału.

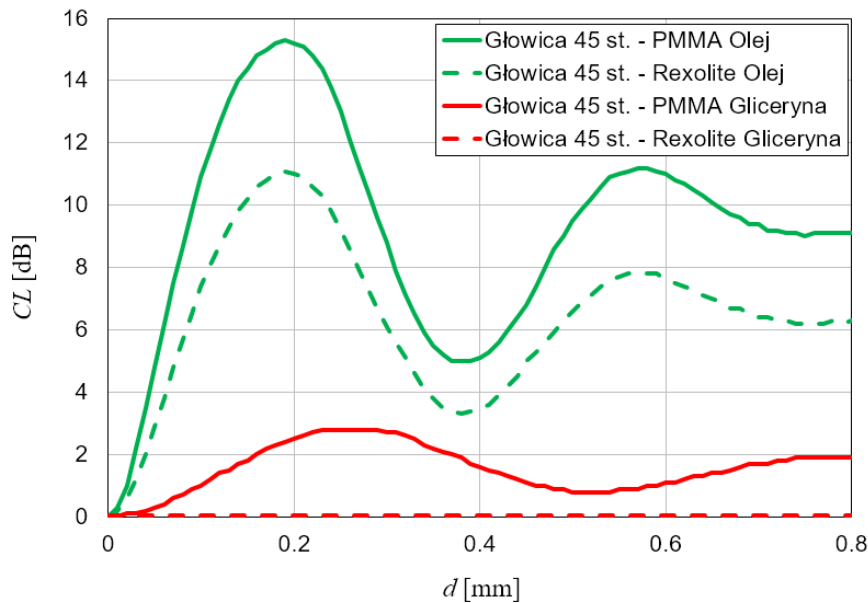


Rys. 9. Porównanie wyników modelowania strat sprzężenia CL dla różnych ośrodków sprzęgających – głowice kątowe 45° ($f_0 = 1,95$ MHz, $WB = 44\%$) i 70° ($f_0 = 1,97$ MHz, $WB = 43\%$), fala poprzeczna.

Ciekawy wynik zaobserwowano dla różnych materiałów klina załamującego. Porównano klasyczny PMMA i Rexolite dla różnych ośrodków sprzęgających: wody (rys.10) i oleju oraz gliceryny (rys.11). Różnice w stratach sygnału są zawsze na korzyść Rexolitu i dochodzą do 4 dB w maximum strat. Najlepszy układ badawczy uzyskuje się dla klina z Rexolitu i ośrodka sprzęgającego w postaci gliceryny gdzie strata sygnału CL oscyluje w okolicy zera (rys. 11).



Rys. 10. Porównanie wyników modelowania strat sprzężenia CL dla różnych materiałów klina – głowica kąтова 45° ($f_0 = 1,95$ MHz, $WB = 44\%$), fala poprzeczna, ośrodek sprzęgający - woda.



Rys. 11. Porównanie wyników modelowania strat sprzężenia CL dla różnych materiałów klina – głowica kątowa 45° ($f_0 = 1,95$ MHz, $WB = 44$ %), fala poprzeczna, ośrodek sprzęgający – gliceryna i olej maszynowy.

4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie modelowania komputerowego umożliwiło przeprowadzenie szczegółowych badań nad wpływem warstwy ośrodka sprzęgającego na czułość badania ultradźwiękowego. W pierwszej kolejności badania porównawcze modelu komputerowego z eksperymentem potwierdziły poprawność obliczeń oprogramowania dla głowic normalnych oraz kątowych. Oznacza to, że korzystając ze znajomości parametrów głowic ultradźwiękowych i właściwości badanych materiałów można przeprowadzić analizę jak będzie wyglądać charakterystyka zmiany czułości badania. Przedstawione wyniki modelowania jednoznacznie wykazują wpływ grubości szczeliny, typu ośrodka sprzęgającego oraz zastosowanego materiału klina załamującego na czułość badania. Należy pamiętać, że optymalna grubość warstwy sprzęgającej jest istotna przy stosowaniu zautomatyzowanych badań ultradźwiękowych, ze szczególnym uwzględnieniem systemów badawczych skanujących z dużą prędkością posuwu. Ustawienie czułości badania w maksimum strat sprzężenia będzie w rzeczywistości powodować wzrost czułości badania w przypadku zmniejszenia grubości lub pogrubienia warstwy ośrodka sprzęgającego.

LITERATURA

[1] Heckel T., Wack Y., Mook G. (2019), Simulation of an Instrumented Ultrasonic Test Run with a Rail Inspection Train, [in:] Proceedings of 46th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation., QNDE2019 Portland, OR, USA

- [2] Zulian D. (2022), Effect of ultrasonic coupling media and surface roughness on contact transfer loss., *Cogent Engineering* (2022), 9: 2009092
<https://doi.org/10.1080/23311916.2021.2009092>
- [3] Mackiewicz S., Ranachowski Z., Katz T., Dębowski T., Starzyński G., Ranachowski P., Modeling of Acoustic Coupling of Ultrasonic Probes for High-Speed Rail Track Inspection, *ARCHIVES OF ACOUSTICS*, ISSN: 0137-5075,
- [4] Krautkrämer J., Krautkrämer H. (1990), *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th ed., Springer, Berlin Heidelberg GmbH.
- [5] Obraz J. (1983), *Ultradźwięki w technice pomiarowej*], WN PWN Warszawa.
- [6] Folds D.L. and Loggins C.D.(1977), Transmission and reflection of ultrasonic waves in layered media, *Journal of the Acoustical Society of America*, 62 (5): 1102-1109. DOI: 10.24425/aoa.2024.148787, pp.1-12, (2024)
- [7] Heckel T., Thomas H., M. Kreutzbruck M., Ruhe S. (2009), High Speed Non-Destructive Rail Testing with Advanced Ultrasound and Eddy-Current Testing Techniques, *Research Gate*, <https://www.researchgate.net/publication/228901588>. (access: 28.07.2023)).