

Ryszard Mańczak*
Politechnika Poznańska

Własności akustyczne materiałów połączenia adhezyjnego powłoki szpachlówkowej z podłożem stalowym

Acoustic properties of materials used for the adhesive joint of the putty coating with the steel substrate

STRESZCZENIE

Szeroki obszar zastosowań połączeń powłok z podłożem w wielu dziedzinach techniki powoduje, że istnieje potrzeba nieniszczącej kontroli jakości tych połączeń na etapie ich wytwarzania i eksploatacji. Do oceny jakości połączeń wykorzystuje się często metodę związaną z propagacją fal ultradźwiękowych. Poza doraźną oceną stanu połączeń, istotne znaczenie przypisuje się możliwości przewidywania zmian stanu połączeń następujących wraz z upływem czasu eksploatacji obiektów zawierających połączenia powłok z podłożem. Pierwszy krok rozwoju zagadnień prognozowania zmian stanu sprowadza się do poznania przebiegu degradacji połączenia i podjęcia próby opracowania modelu takiego przebiegu. Wykonanie ultradźwiękowej oceny procesu degradacji połączenia wymaga wyznaczenia podstawowych własności akustycznych materiałów tworzących połączenie. W wyniku przeprowadzonych prac badawczych wyznaczono gęstość oraz prędkość propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej w materiale powłoki tj. szpachlówce Fiber Novol oraz w materiale podłoża, które stanowiła stal 50HS. Uzyskane rezultaty pozwoliły na wyznaczenie wartości modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia fali podłużnej od granicy połączenia powłoki szpachlówkowej z podłożem stalowym, która stanowi punkt odniesienia przy monitorowaniu degradacji połączenia tych materiałów.

Słowa kluczowe: połączenia adhezyjne, badania ultradźwiękowe, własności akustyczne

1. Wstęp

Połączenia adhezyjne znajdują w ostatnich latach szerokie zastosowanie w budowie maszyn i pojazdów. Należą do nich połączenia zgrzewane, skurczowe, wylwane, połączenia klejowe, połączenia powłok regeneracyjnych i prewencyjnych z podłożem itp. Wytrzymałość mechaniczna połączenia jest istotnym parametrem decydującym o jakości jego wykonania. Oceny wytrzymałości połączenia adhezyjnego można dokonać zarówno w sposób niszczący, jak i nieniszczący. Ze względu na liczne wady metod niszczących, związane przede wszystkim ze zniszczeniem badanego złącza, coraz większe znaczenie przypisuje się metodom nieniszczącym. W szczególności, wśród metod nieniszczących, wskazuje się na duże możliwości metody ultradźwiękowej, opartej na zjawiskach fizycznych związanych z propagacją fal sprężystych w ośrodkach materialnych.

*Autor korespondencyjny.

E-mail: ryszard.manczak@put.poznan.pl

ABSTRACT

The wide range of applications of coating-substrate joint in many fields of technology necessitates non-destructive quality control of these connections during their production and operation. Methods involving ultrasonic wave propagation are often used to assess the quality of joints. Besides the immediate assessment of the condition of bonds, the ability to predict changes in the condition of connections over time is considered crucial. The first step in developing the problem of predicting condition changes is to understand the course of joints degradation and attempt to develop a model of this process. Performing an ultrasonic assessment of the joint degradation process requires determining the basic acoustic properties of the materials forming the joint. As a result of the research, the density and propagation velocity of longitudinal ultrasonic waves were determined in the coating material, i.e., Fiber Novol filler, and in the substrate material, which was 50HS steel. The obtained results allowed us to determine the pressure modulus of the longitudinal wave reflection coefficient from the interface between the filler coating and the steel substrate, which serves as a reference point for monitoring the degradation of the joint between these materials.

Keywords: adhesive joints, ultrasonic testing, acoustic properties

Metoda ultradźwiękowa pozwala na dokonanie oszacowania doraźnej wytrzymałości połączenia adhezyjnego na podstawie wartości parametrów charakteryzujących fale sprężyste, propagujące wzdłuż granicy połączenia lub prostopadle do niej. Wytrzymałość połączeń, oszacowana po zakończeniu procesu wytwarzania połączeń ulega zmianie podczas eksploatacji obiektów zawierających połączenia adhezyjne.

Istnieje możliwość poznania przebiegów zmian wytrzymałości połączeń poprzez ciągłe lub okresowe monitorowanie zmian wartości parametrów fal ultradźwiękowych w trakcie eksploatacji obiektu. Poznanie takiego przebiegu stanowi punkt wyjścia do opracowania modelu degradacji, a w dalszej kolejności do prognozowania trwałości połączeń adhezyjnych. Podczas prowadzenia badań ultradźwiękowych, niezbędne jest posiadanie informacji o właściwościach akustycznych materiałów, z których wykonane są badane obiekty. Do podstawowych właściwości zalicza się – przede wszystkim – gęstość materiału

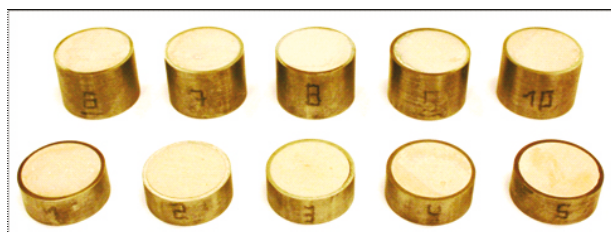
i prędkości propagacji w materiale fali określonego rodzaju (np. fali podłużnej, fali poprzecznej).

W ramach niniejszej pracy badaniom poddano połączenie adhezyjne utworzone przez powłokę ze szpachlówki samochodowej Fiber Novol nałożonej na podłoże ze stali 50HS. W literaturze, poza danymi ogólnymi dla stali i polistyrenu (spolimeryzowanej postaci styrenu, stanowiącego główny składnik szpachlówek), brakuje szczegółowych informacji o wartościach wielkości charakteryzujących właściwości akustyczne tych materiałów. Dane te są niezbędne zarówno do poszerzenia stanu wiedzy o wykorzystanych materiałach, jak i do wyznaczenia teoretycznej wartości modułu współczynnika odbicia fali podłużnej od granicy połączenia powłoki szpachlówkowej z podłożem stalowym. Stanowią one punkt wyjścia w rozważaniach dotyczących badań degradacji połączeń. Ze względu na brak niezbędnych danych w literaturze, wykonano badania, których celem było wyznaczenie wartości gęstości oraz prędkości propagacji fali podłużnej w szpachlówce Fiber Novol i stali 50HS.

2. Badanie właściwości akustycznych materiału powłoki

Wyznaczając wartości wielkości charakteryzujących podstawowe właściwości akustyczne szpachlówki Fiber Novol, zaplanowano badania w taki sposób, aby wykonać je w całości korzystając z jednego zestawu próbek. Ze względu na technologiczne ograniczenia przy wykonywaniu próbek, zaistniała konieczność zastosowania form do ich przygotowania.

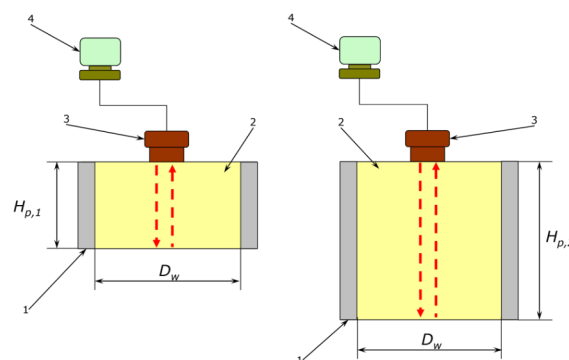
Funkcję form pełniły tulejki stalowe o jednakowej średnicy wewnętrznej i zróżnicowanej wysokości (Rys. 1). Tulejki odcięto z rury stalowej, poddano procesowi szlifowania oraz oczyszczania w myjce ultradźwiękowej. Następnie zmierzono masę, oraz średnicę wewnętrzną i wysokości każdej z tulejki. W kolejnym kroku tulejki wypełniono szpachlówką przygotowaną zgodnie z zaleceniami producenta i dokonano pomiaru masy wytworzonych w ten sposób próbek. Na podstawie różnicy zarejestrowanych mas oraz objętości zajmowanej przez szpachlówkę określono gęstość szpachlówki.



Rys. 1. Widok próbek do pomiaru gęstości szpachlówki i prędkości propagacji fali w szpachlówce

Fig. 1. View of samples for measuring the density of the putty and the wave propagation speed in the putty

Prędkość propagacji fali podłużnej w materiale szpachlówki określono poprzez pomiar czasu przejścia impulsu fali podłużnej, wysyłanego przez głowicę przyłożoną do czołowej powierzchni próbki (Rys. 2). Ze względu na duże tłumienie fali w szpachlówce konieczne było wykonanie pomiarów czasu przejścia na odcinkach drogi o zróżnicowanej długości, którą uzyskano dzięki próbkom o różnych wysokościach. Wielkość tłumienia spowodowała także konieczność wykorzystania głowicy o niskiej częstotliwości. Po wykonaniu serii badań rozpoznawczych określono wartość częstotliwości fali na poziomie 1 MHz. Dzięki zastosowaniu ultradźwiękowej techniki echa wyeliminowano konieczność uwzględnienia w pomiarach dodatkowego czasu przejścia impulsu przez strefę dobiegową. Po zmierzeniu czasu przejścia fali ultradźwiękowej wyznaczono wartości prędkości, przy znanych wartościach wysokości próbek, korzystając z zależności (1). Szczegółowy opis zastosowanego sposobu pomiaru znajduje się w pracy [1].



Rys. 2. Sposób pomiaru czasu przejścia fali ultradźwiękowej w materiale szpachlówki: 1 – tulejka stalowa, 2 – szpachlówka, 3 – głowica ultradźwiękowa, 4 – defektoskop ultradźwiękowy

Fig. 2. Method of measuring the transit time of an ultrasonic wave in the putty material: 1 – steel sleeve, 2 – putty, 3 – ultrasonic head, 4 – ultrasonic flaw detector

$$C_{Lsz} = \frac{2 \cdot (H_{p,2} - H_{p,1})}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

gdzie:

C_{Lsz} – prędkość fali w materiale szpachlówki [m/s],

$H_{p,1}, H_{p,2}$ – wysokość próbki (zgodnie z Rys. 2) [m],

T_1, T_2 – czas przejścia fali na drodze równej dwóm wysokościami próbek (odpowiednio $H_{p,1}$ i $H_{p,2}$) [s].

Wykonanie pomiarów wymagało zastosowania podstawowych laboratoryjnych przyrządów pomiarowych takich jak waga, mikromierz, defektoskop ultradźwiękowy oraz głowice ultradźwiękowe. Wyniki pomiarów mas M_2 i M_1 , wymiarów D_w i H_p oraz czasów przejścia fali T_1 i T_2 pozwoliły na wyznaczenie wartości gęstości szpachlówki (Tab. 1) i prędkości fali podłużnej w materiale szpachlówki (Tab. 2). Przy oszacowaniu średniej prędkości fali wzięto pod uwagę wyniki uzyskane dla każdej pary utworzonej przez próbkę o mniejszej (próbki nr 1–5) i większej (próbki nr 6–10) wysokości tworzącej tulejki.

Tab. 1 Wyniki wyznaczenia gęstości szpachlówki**Tab. 1** Results of determining the density of the putty

Nr próbki	Gęstość	
	wynik	błąd
1	1634	3
2	1632	10
3	1649	5
4	1646	4
5	1654	3
6	1661	9
7	1616	6
8	1646	2
9	1640	3
10	1653	5
średnia	1643	
błąd	4	

Tab. 2 Wyniki wyznaczenia prędkości propagacji ultradźwiękowej fali podłużnej w materiale szpachlówki**Tab. 2** Results of determining the propagation velocity of the ultrasonic longitudinal wave in the putty material

Prędkość fali podłużnej C_{lsz} [m/s]					
Próbka	6	7	8	9	10
1	2676	2717	2595	2683	2646
2	2620	2660	2541	2626	2591
3	2645	2685	2566	2651	2615
4	2601	2641	2524	2607	2572
5	2674	2715	2593	2681	2644
średnia	2631				
błąd	10				

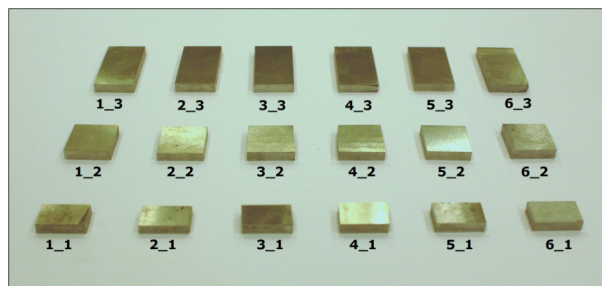
3. Badanie właściwości akustycznych materiału podłoża

W badaniach degradacji połączeń przewidziano wykorzystanie listew stalowych, wykonane ze stali 50HS (skład chemiczny tej stali przedstawiono w tab. 3). Wybór stali wynikał z doświadczeń związanych z wieloma wcześniejszymi próbami [2–4].

Tab. 3. Skład chemiczny stali 50HS [3]**Tab. 3.** Chemical composition of 50HS steel [3]

Skład chemiczny [%]								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	As	Cu
0,45-0,55	0,3-0,6	0,8-1,2	max 0,03	max 0,03	0,9-1,2	max 0,4	max 0,08	max 0,25

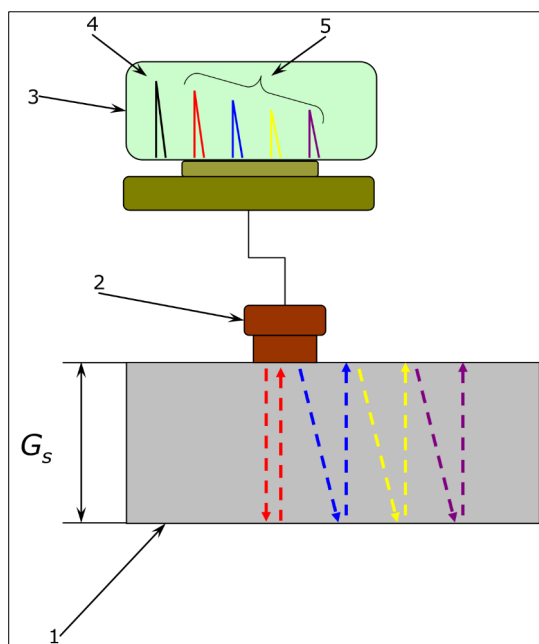
Z każdej listwy odcięto trzy próbki w kształcie prostopadłościanów o różnych wymiarach, które posłużyły do wyznaczenia właściwości akustycznych materiału listew stalowych. Listwy oznaczono numerami od 1 do 6, a próbkom przyporządkowano numery dwucyfrowe, przy czym pierwsza część numeru oznaczała numer listwy stalowej, z której pochodziła próbka (Rys. 3).

**Rys 3.** Próbkę ze stali 50HS i ich oznaczenia**Fig. 3.** Samples of 50HS steel and their markings

Po dokonaniu pomiaru mas próbek i wymiarów zewnętrznych (długości, szerokości i grubości) wyznaczono gęstość stali. Uzyskane rezultaty przedstawiono w Tab. 4. Współczynnik tłumienia fal ultradźwiękowych w stali charakteryzuje się znacznie mniejszą wartością niż w szpachlówce samochodowej, co przekłada się na możliwość uzyskania wielokrotnych odbić fali ultradźwiękowej od powierzchni granicznych próbek. Tym samym pomiary prędkości fali można było wykonać wykorzystując ciąg ech wielokrotnych (Rys. 4).

Tab. 4 Wyniki wyznaczenia prędkości propagacji ultradźwiękowej fali podłużnej w materiale szpachlówki**Tab. 4** Results of determining the propagation velocity of the ultrasonic longitudinal wave in the putty material

Nr próbki	Gęstość stali ρ_{st} [kg/m ³]		Śred. gęst. stali $\rho_{st,śr}$ [kg/m ³]	
	wartość	błąd	wartość	błąd
1_1	7512,1	10,0	7573	46
1_2	7571,6	12,4		
1_3	7635,6	22,9		
2_1	7512,4	11,4	7578	53
2_2	7568,1	8,2		
2_3	7653,5	16,9		
3_1	7562,8	12,8	7604	46
3_2	7574,6	29,6		
3_3	7675,3	10,4		
4_1	7451,5	11,0	7533	68
4_2	7516,4	17,4		
4_3	7631,4	16,3		
5_1	7563,6	9,4	7566	29
5_2	7528,2	19,4		
5_3	7605,8	29,2		
6_1	7548,2	12,7	7602	57
6_2	7689,0	26,0		
6_3	7569,8	25,6		
średnia			7576	
błąd			13	



Rys. 4. Zasada pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej w materiale metodą echa wielokrotnych: 1 – próbka stalowa, G_s – odległość między powierzchniami odbić fali (grubość próbki), 2 – głowica ultradźwiękowa nadawczo-odbiorcza 3 – defektoskop ultradźwiękowy, 4 – impuls nadawczy, 5 – echa wielokrotne

Uwzględnienie większej ilości echa zwiększyło dokładność wyznaczenia czasu przejścia fali. Sposób ten, podobnie jak w przypadku wyznaczania prędkości fali w materiale szpachlówki, pozwolił na wyeliminowanie wpływu czasu przejścia impulsu fali przez strefę dobiegową. Prędkość fali wyznaczono korzystając z zależności (2).

$$C_{Lst} = \frac{2 \cdot n \cdot G_s}{T_n - T_0} \quad (2)$$

gdzie:

C_{Lst} – prędkość fali w materiale [m/s],

G_s – odległość między powierzchniami odbić fali (grubość próbek) [m],

n – ilość odbić wielokrotnych fali między powierzchniami granicznymi [-],

T_n – czas pojawienia się n-tego odbitego impulsu (echa) na ekranie defektoskopu ultradźwiękowego [s],

T_0 – czas pojawienia się pierwszego odbitego impulsu (echa) na ekranie defektoskopu ultradźwiękowego [s].

Pomiary prędkości propagacji fali podłużnej w stali 50HS wykonano w sposób przedstawiony na Rys. 4. Ze względu na wymiary próbek, przyłożenie głowicy do próbek było możliwe tylko od strony powierzchni odległych między sobą

o wartość zmierzonej grubości próbek. Tym samym długość drogi pokonywanej przez falę w wyniku kolejnych odbić od powierzchni granicznych stanowiła wielokrotność grubości próbek. Niewielka długość drogi pokonywanej przez fale zdeterminowała konieczność zastosowania głowicy o wysokiej częstotliwości. Po wykonaniu próbnej serii pomiarów wartość częstotliwości określono na 10 MHz i postanowiono wykorzystać w pomiarach głowice 10L06C.

Czas przejścia fali określano między drugim i piątym echem. Długość drogi fali rozpatrywana w obliczeniach stanowiła zatem sześciokrotną wielokrotność grubości próbek. Wybór echa był spowodowany zarówno wpływem strefy martwej, jak i maksymalną ilością echa możliwą do uzyskania na ekranie defektoskopu przy największej rozdzielczości pomiarów. Wykorzystany w badaniach defektoskop ultradźwiękowy posiadał funkcję określania czasu między wskazanymi impulsami z dokładnością większą niż w przypadku oddzielnego pomiaru czasu każdego z impulsów. Funkcje tą zastosowano w przeprowadzonych pomiarach, określając każdorazowo różnicę czasu między drugim a piątym echem. Rezultaty wyznaczenia wartości prędkości fali przedstawiono w Tab. 5.

Tab. 5. Wyniki wyznaczenia prędkości propagacji fali w stali 50HS

Tab. 5. Results of determining the wave propagation velocity in 50HS steel

Nr próbki	Prędkość fali C_{Lst} [m/s]		Średnia prędkość fali $C_{Lst,śr}$ [m/s]	
	wartość	błąd	wartość	błąd
1_1	6163,477	0,003	6030	87
1_2	5975,579	0,003		
1_3	5950,303	0,006		
2_1	5969,455	0,004	5949	13
2_2	5938,909	0,003		
2_3	5939,375	0,004		
3_1	6130,392	0,003	6011	78
3_2	5958,673	0,002		
3_3	5943,164	0,003		
4_1	6149,854	0,003	6030	78
4_2	5981,215	0,003		
4_3	5960,154	0,006		
5_1	6144,016	0,003	6023	79
5_2	5962,430	0,003		
5_3	5962,251	0,008		
6_1	5922,981	0,002	5901	94
6_2	5765,880	0,004		
6_3	6013,262	0,007		
średnia			5991	
błąd			26	

Jednorodność akustyczną materiałów poszczególnych listew stalowych oceniono poprzez porównanie ze sobą wartości średnich gęstości i wartości prędkości propagacji fali. Zgodnie z wytycznymi zawartymi w pracy [4], przyjęto hipotezę zerową o równości wartości porównywanych wielkości oraz hipotezę alternatywną, zakładającą sytuację przeciwną. Obliczenia przeprowadzono, przyjmując poziom ufności wynoszący 0,95. Rezultaty wykonanych obliczeń zawarto w Tab. 6 i 7, w których symbolem R_w (równość) oznaczono przyjęcie hipotezy zerowej, a symbolem N_w (nierówność) przyjęcie hipotezy alternatywnej. Wykonując obliczenia statystyczne, wykorzystano test umożliwiający porównanie dwóch wartości średnich przy znanych wariancjach i ilościach pomiarów.

Tab. 6. Rezultaty weryfikacji hipotez statystycznych o równości (R_w) lub nierówności (N_w) wartości średniej gęstości materiału sześciu listew ze stali 50HS

Tab. 6. Results of verification of statistical hypotheses about equality (R_w) or inequality (N_w) of the average material density values of six 50HS steel strips

Nr listwy	1	2	3	4	5	6
1	-	R_w	R_w	R_w	R_w	R_w
2	-	-	R_w	R_w	R_w	R_w
3	-	-	-	R_w	R_w	R_w
4	-	-	-	-	R_w	R_w
5	-	-	-	-	-	R_w
6	-	-	-	-	-	-

Tab. 7. Rezultaty weryfikacji hipotez statystycznych o równości (R_w) lub nierówności (N_w) wartości średniej prędkości propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej w materiale sześciu listew ze stali 50HS

Tab. 7. Results of verification of statistical hypotheses about equality (R_w) or inequality (N_w) of the average propagation velocity of the longitudinal ultrasonic wave in the material of six 50HS steel strips

Nr listwy	1	2	3	4	5	6
1	-	R_w	R_w	R_w	R_w	R_w
2	-	-	R_w	R_w	R_w	R_w
3	-	-	-	R_w	R_w	R_w
4	-	-	-	-	R_w	R_w
5	-	-	-	-	-	R_w
6	-	-	-	-	-	-

Na podstawie wyników pomiarów właściwości akustycznych materiału zarówno szpachłówki, jak i stali wyznaczono, korzystając z zależności (3), teoretyczną wartość modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia, stosowaną w ocenie połączeń adhezyjnych przez innych autorów m.in. w pracach [7–9]. Przy wprowadzeniu fali od strony stali wyliczona wartość modułu $|r|$ wynosi $0,826 \pm 0,001$.

$$|r| = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3)$$

gdzie:

r – moduł ciśnieniowego współczynnika odbicia fali od granicy ośrodków [-],

z – akustyczna oporność falowa [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$],

ρ – gęstość ośrodka [kg/m^3],

c – prędkość danego typu fali w ośrodku [m/s]

1 – materiał listwy stalowej,

2 – materiał szpachłówki.

4. Analiza wyników badań i wnioski

Badania wartości wielkości charakteryzujących właściwości akustyczne szpachłówki samochodowej oraz stali 50HS przeprowadzono zgodnie z przyjętym założeniami dotyczącymi przygotowania próbek i metodyki badań. W trakcie prac napotkano utrudnienia przy pomiarach czasu przejścia fali ultradźwiękowej przez materiał szpachłówki Fiber Novol, ze względu na jej silne właściwości tłumiące. Wyznaczone ostatecznie średnie wartości wielkości akustycznych szpachłówki charakteryzują się niewielkimi błędami, których wartości nie przekraczają 0,2% wartości średnich. W przypadku stali 50HS wartości błędów nie przekraczają 2% wartości średnich. Na podstawie uzyskanych rezultatów należy stwierdzić, że:

- Wyznaczona wartość średniej gęstości szpachłówki Fiber Novol wynosi $\rho_{sz, sr} = 1643 \pm 4 \text{ kg/m}^3$, a ultradźwiękowa fala podłużna propaguje w tym materiale ze średnią prędkością $C_{Lsz, sr} = 2631 \pm 10 \text{ m/s}$.
- Wyznaczona wartość średniej gęstości stali 50HS dla poszczególnych listew zawiera się w przedziale $7533\text{--}7689 \text{ kg/m}^3$, a ultradźwiękowa fala podłużna propaguje w tym materiale z prędkością zawierającą się w przedziale od 5901 do 6030 m/s.
- Statystyczna ocena porównawcza wartości gęstości stali 50HS oraz prędkości propagacji fali podłużnej wskazuje na brak podstaw do odrzucenia hipotez o równości gęstości materiału listew stalowych oraz równości prędkości propagacji fali w tym materiale.
- Teoretyczna wartość współczynnika modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia fali podłużnej od granicy stal – szpachłówka wynosi $|r| = 0,826 \pm 0,001$. Powyższe wnioski wskazują na jednorodność akustyczną materiałów listew stalowych. Uzasadnione jest zatem przyjęcie założenia o identyczności materiału listew, co stwarza możliwość ich zastosowania w badaniach degradacji połączeń adhezyjnych powłoki szpachławkowej z podłożem stalowym.

5. Literatura

- [1] J. Wehr „Pomiary prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych” Warszawa, PWN, 1972.
- [2] M. Jósko M. „Badanie degradacji połączenia adhezyjnego metodą ultradźwiękową” Zeszyty Problemowe 25. KKBN, Szczyrk, pp. 201–204, 1996.
- [3] M. Jósko, R. Mańczak „Badanie połączeń adhezyjnych powłok z podłożem falami ultradźwiękowymi” 36. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Piechowice, pp. 168–171, 2007.
- [4] M. Jósko “An analysis of methods of adherence evaluation of adhesive coatings” Journal of Research and Applications in

Agricultural Engineering, vol. 47, no. 3, pp. 5–9, 2002.

- [5] www.akrosta.pl
- [6] K. Maćkowiak-Łybacka, D. Bobrowski D. „Wybrane metody wnioskowania statystycznego” Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2001.
- [7] M.A.Drewry, R.A. Smith, A.P. Phang, D. Yan, P. Wilcox, D.P. Roach “Ultrasonic techniques for detection of weak adhesion” Materials Evaluation, no. 9, pp. 1048–1058, 2009.
- [8] B. Drinkwater, P. Cawley P. “Measurement of the frequency dependence of the ultrasonic reflection coefficient from thin layers and partially contacting interfaces. Ultrasonics, no. 35, pp. 479–488, 1997.
- [9] A.K. Moidu, A.N. Sinclair, J.K. Spelt “Nondestructive characterization of adhesive joint durability using ultrasonic reflection measurements” Research in Nondestructive Evaluation, no. 11, pp. 81–95, 1999.



Dr inż. Ryszard Mańczak pracuje na Politechnice Poznańskiej.