

Jakub Kowalczyk^{1*}, Dariusz Ulbrich¹, Daria Stępak¹, Zbigniew Strumiński²

¹Politechnika Poznańska

²Volkswagen Września

Badania ultradźwiękowe połączeń adhezyjnych stosowanych w motoryzacji

Ultrasonic testing of adhesive joints used in the automotive industry

ABSTRACT

The publication presents the application, advantages and disadvantages of adhesive joints used in the construction of motor vehicles. Particular attention was focused on the study of connections with double-sided tapes, which are used in the construction of buses and rail vehicles (e.g. in door construction). The results of tests of 3M tape used for joining steel and aluminum sheets with thicknesses below 2 mm are presented. Various ultrasound measures were used to assess the connections. The research was carried out using the Krautkramer USM35XS ultrasonic flaw detector and a 20MHz ultrasonic transducer with the water delay line. The work confirmed that the ultrasound method allows the assessment of the quality of the adhesive joint tape - steel and aluminum sheet and can be used in real production conditions.

Keywords: ultrasonic testing; adhesive joints; acrylic tape

STRESZCZENIE

W publikacji przedstawiono zastosowanie, wady i zalety połączeń adhezyjnych, stosowanych w budowie pojazdów samochodowych. Szczególną uwagę skoncentrowano na badaniu połączeń wykorzystujących taśmy dwustronne, które są stosowane w budowie autobusów oraz pojazdów szynowych (np. w konstrukcji drzwi). Przedstawiono wyniki badań pilotażowych taśmy 3M wykorzystanej do łączenia blach stalowych i aluminiowych o grubościach poniżej 2 mm. Wykorzystano różne miary ultradźwiękowe umożliwiające ocenę połączeń oraz wyniki uzyskane podczas badań dla różnych miar. Badania prowadzono z wykorzystaniem klasycznego defektoskopu ultradźwiękowego Krautkramer USM35XS oraz głowicy ultradźwiękowej o częstotliwości 20MHz w wodną linię opóźniającą. Przeprowadzone prace potwierdziły, że metoda ultradźwiękowa umożliwia nieniszczącą lokalizację połączenia adhezyjnego taśma – blacha stalowa oraz aluminiowa i może być wykorzystywana w rzeczywistych warunkach produkcyjnych.

Słowa kluczowe: badania ultradźwiękowe; połączenia adhezyjne; taśma akrylowa

1. Wstęp

Trendy w produkcji pojazdów samochodowych obejmują nie tylko redukcję kosztów produkcji, ale również obniżenie masy pojazdu samochodowego, co wpływa na zmniejszenie zawartości substancji szkodliwych w spalinach. Jedną z metod obniżania kosztów związanych z produkcją pojazdów samochodowych jest zastępowanie cieplnych metod łączenia elementów karoserii (spawanie, zgrzewanie) klejeniem. Kleje to substancje chemiczne zdolne do trwałego łączenia materiałów jedno – i różnoimiennych, uszczelniające połączenie i dające równomierny rozkład naprężeń w całym jego obszarze. Łączenie odbywa się w wyniku oddziaływania sił adhezji właściwej, adhezji mechanicznej i sił spójności kleju – kohezji. Klejenie nie wymaga szczególnie zaawansowanych procesów obróbki mechanicznej, która jest najczęściej ograniczona do piaskowania lub śrutowania powierzchni przeznaczonych do łączenia [1].

Główne zalety połączeń klejowych to uszczelnienie konstrukcji, równomierny rozkład naprężeń, obniżenie kosztów produkcji, brak strefy wpływu ciepła oraz ochrona łączonych elementów przed korozją bimetaliczną. Główne ograniczenia, jakie wiążą się z wykorzystaniem połączeń klejowych to stosunkowo niska wytrzymałość mechaniczna w porównaniu do połączeń spawanych, niska odporność

na pracę połączeń w wysokich temperaturach oraz brak pełnej wytrzymałości połączenia zaraz po zakończeniu jego wykonywania. Producenci klejów próbują przyspieszyć ich wiązanie, coraz częściej spotyka się kleje hybrydowe, które umożliwiają uzyskanie relatywnie wysokiej wytrzymałości połączenia przy stosunkowo krótkim czasie wiązania. Praktyka przemysłowa pokazuje jednak, że w pewnych zastosowaniach zamiast wykorzystania klejów można wykorzystać taśmy dwustronnie pokryte klejem, np. 3M VHB TAPE RP45 Grey która była poddana badaniom własnym.

Taśmy takie są wykorzystywane na przykład do łączenia ścian bocznych z ramą autobusu, poszycia dachu autobusu z ramą, klejenia drzwi w szynowych pojazdach transportu masowego. Na wytrzymałość ukształtowanego połączenia adhezyjnego wpływa nie tylko prawidłowe przygotowanie powierzchni, ale również odpowiedni docisk połączenia. Ze względu na konieczność stosunkowo dużego oraz równomiernego docisku w warunkach produkcyjnych, taśmy są wykorzystywane do łączenia dużych i płaskich powierzchni.

Głównym celem prowadzonych badań jest sprawdzenie możliwości wykorzystania ultradźwiękowej metody echa do oceny jakości połączenia adhezyjnego blacha stalowa – taśma dwustronna oraz blacha aluminiowa – taśma dwustronna, rozumianej jako lokalizację tych obszarów, w których taśma została przyklejona.

*Autor korespondencyjny. E-mail: jakub.kowalczyk@put.poznan.pl

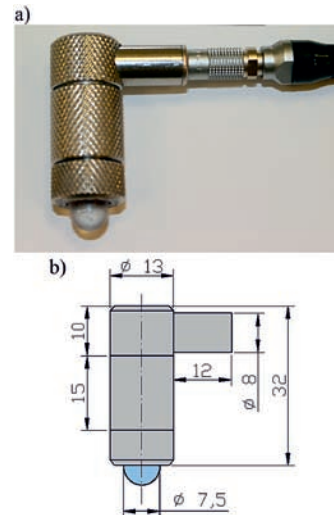
2. Badania ultradźwiękowe

Ponieważ połączenie adhezyjne wykorzystujące taśmy dwustronnie klejące różni się od typowego połączenia klejowego, w ramach prowadzonych prac postanowiono sprawdzić, czy ultradźwiękowa metoda echa umożliwi badanie połączenia blacha stalowa z taśmą oraz blachą aluminiową. W badaniach wykorzystano blachę stalową, na którą naklejono fragmenty taśmy. Użyto taśmy firmy 3M VHB TAPE RP45 Grey. Aby sprawdzić, czy ultradźwiękowa technika echa umożliwi ocenę jakości połączenia utworzonego przez taśmę 3M VHB TAPE RP45 Grey z blachą stalową, naklejono taśmę na stalową blachę, a następnie przykładano głowicę ultradźwiękową od strony blachy i rejestrowano układy impulsów ultradźwiękowych uzyskiwane na ekranie defektoskopu. Taśma została dociśnięta ręcznie rolką, powierzchnia blachy została oczyszczona i odtłuszczona. W badaniach wykorzystano defektoskop Krautkramer USM35XS wraz z głowicą ultradźwiękową G20MNX (rys. 1). Częstotliwość przetwornika wynosi 20MHz, a jego średnica 3,6 mm, długość fali w blasze stalowej 0,29mm, pole bliskie

Tab. 1. Wyniki pomiarów wykonanych na blasze stalowej w miejscu, w którym nie nałożono taśmy [4].

Tab. 1. The results of measurements made on a steel sheet in a place where tape was not applied [4].

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	n
1.	84	65	54	48	33	30	8
2.	82	66	55	46	39	30	9
3.	85	65	54	48	34	30	8
4.	84	67	53	49	39	31	8
5.	85	68	55	49	39	32	9
6.	81	64	53	47	38	29	8
7.	83	66	55	49	37	32	8
8.	88	66	57	49	44	32	8
9.	83	66	54	48	39	31	9
10.	80	63	52	45	37	30	8
11.	88	72	60	51	42	33	9
12.	82	62	52	46	37	29	8
13.	89	70	59	52	40	33	9
14.	84	65	52	48	38	31	8
15.	88	70	58	50	40	32	8
16.	87	66	56	49	39	32	9
17.	81	63	53	45	38	30	8
18.	90	67	59	50	41	33	9
19.	88	67	55	49	39	31	9
20.	83	66	55	45	39	31	8
21.	87	68	57	49	41	33	9
22.	83	65	53	46	38	30	8
23.	84	66	54	48	38	31	9
24.	80	61	52	46	35	29	8
25.	84	64	54	47	38	30	9
26.	89	68	57	49	39	32	8
27.	84	64	55	48	37	31	8
28.	88	72	60	51	42	33	9
29.	83	65	54	48	39	31	9
30.	88	69	58	48	41	32	9
H_{sr}	84,8	66,2	55,2	48,1	38,7	31,1	8,5
Błąd	4,8	4,4	4,0	3,0	3,8	2,1	0,8



Rys. 1. Głowica ultradźwiękowa wykorzystywana w badaniach: a) widok głowicy, b) podstawowe wymiary głowicy.

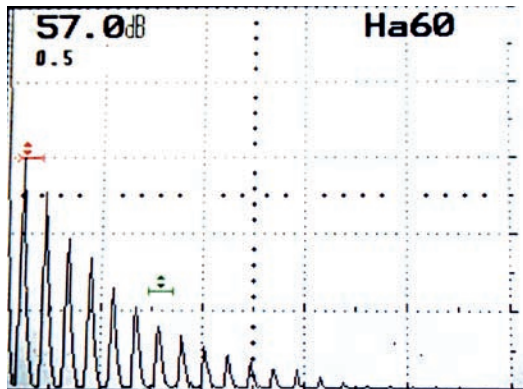
Fig. 1. Ultrasonic transducer used in research: a) view of the transducer, b) basic dimensions of the transducer.

Tab. 2. Wyniki pomiarów wykonanych na blasze stalowej w miejscu, w którym nałożono taśmę [4].

Tab. 2. The results of measurements made on a steel sheet in a place where tape was applied [4].

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	n
1.	78	54	42	34	25	19	5
2.	78	55	41	35	26	18	5
3.	79	56	44	34	26	16	5
4.	78	54	39	34	24	18	5
5.	74	53	41	33	24	19	5
6.	76	54	40	34	25	19	5
7.	74	54	41	32	25	19	5
8.	78	55	42	34	26	19	5
9.	76	53	41	33	24	19	5
10.	75	53	41	33	25	19	5
11.	74	53	41	32	24	19	5
12.	78	56	42	34	25	19	5
13.	76	54	39	33	24	18	5
14.	72	53	42	32	25	19	5
15.	76	54	41	33	24	19	5
16.	72	53	41	32	25	19	5
17.	74	53	42	32	24	18	5
18.	76	53	41	34	25	20	6
19.	70	51	39	33	24	19	5
20.	76	55	42	33	26	20	6
21.	74	52	39	32	23	17	5
22.	79	53	43	34	24	20	6
23.	79	55	43	35	25	20	6
24.	77	54	41	34	26	19	5
25.	75	53	40	33	24	19	5
26.	74	54	42	34	25	18	5
27.	76	54	40	34	26	19	5
28.	78	54	41	34	25	19	5
29.	73	51	38	32	23	17	5
30.	72	52	38	31	22	17	5
H_{sr}	75,6	53,6	40,9	33,2	24,6	18,7	5,1
Błąd	4,0	2,0	2,4	1,7	1,7	1,6	0,6

10,4 mm, a szerokość wiązki, dla współczynnika spadku $k = 0,87$ w odległości 15 mm od przetwornika ultradźwiękowego 2,2 mm.



Rys. 2. Przykładowy układ impulsów uzyskiwany w czasie badań na ekranie defektoskopu.

Fig. 2. An example of a pulse system obtained during tests on the ultrasonic flaw detector screen.

Tab. 3. Wyniki pomiarów wykonanych na blasze aluminiowej w miejscu, w którym nie nałożono taśmy [4].

Tab. 3. The results of measurements made on an aluminum sheet in a place where tape was not applied [4].

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	n
1.	76	60	42	24	20	15	5
2.	84	64	46	33	23	16	5
3.	81	64	46	35	23	18	5
4.	81	60	43	31	21	16	5
5.	80	62	44	32	22	18	5
6.	79	62	43	31	21	17	5
7.	85	64	47	35	23	18	5
8.	80	63	44	33	23	18	5
9.	85	63	47	36	23	19	5
10.	84	66	47	35	24	20	6
11.	81	66	48	34	24	19	5
12.	81	60	44	32	21	16	5
13.	82	62	47	34	23	18	5
14.	81	64	45	32	23	19	5
15.	83	65	45	34	23	18	5
16.	79	63	47	32	23	18	5
17.	82	65	48	34	23	18	5
18.	79	62	45	33	23	29	6
19.	80	62	45	31	22	18	5
20.	81	62	46	33	24	20	6
21.	80	64	45	32	23	17	5
22.	80	61	43	31	21	27	5
23.	85	64	46	32	22	17	5
24.	75	58	43	32	22	18	5
25.	71	56	42	31	22	18	5
26.	78	61	45	32	22	18	5
27.	81	62	44	30	20	17	5
28.	80	62	44	32	22	17	5
29.	81	63	44	32	23	17	5
30.	80	64	45	34	24	20	6
H_{sr}	80,5	62,5	45,0	32,4	22,4	18,5	5,1
Błąd	4,9	3,7	2,8	3,6	1,8	4,8	0,6

W czasie pomiarów rejestrowano wysokość pierwszych sześciu impulsów uzyskanych na ekranie defektoskopu oraz liczbę impulsów, których wysokość była większa od 20 procent wysokości ekranu. Przykładowy układ impulsów uzyskiwany w czasie badań na ekranie defektoskopu przedstawiono na rys. 2. Zdecydowano się na wybór tych właśnie wartości ponieważ umożliwiają one wyznaczenie szeregu ultradźwiękowych miar jakości połączeń adhezyjnych.

Wyniki badań zostały przedstawione w Tab. 1 – 4. Procentową wysokość impulsu oznaczono H_x , gdzie x oznacza nr impulsu, natomiast liczbę impulsów, których wysokość była większa od 20 procent wysokości ekranu oznaczono jako n.

W ramach badań rozpoznawczych wykonano 30 pomiarów w tych samych obszarach i przy stałych nastawach defektoskopu, co pozwoliło na wyznaczenie błędów pomiarowych. Do oszacowania błędu średniej przyjęto 90% półprzedział ufności dla wyników uzyskanych podczas serii pomiarów, zgodnie z wyrażeniem opisanym równaniem (1) [4]:

Tab. 4. Wyniki pomiarów wykonanych na blasze aluminiowej w miejscu, w którym nie nałożono taśmy [4].

Tab. 4. The results of measurements made on an aluminum sheet in a place where tape was applied [4].

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	n
1.	63	40	23	12	8	5	3
2.	60	38	21	12	8	5	3
3.	58	35	21	12	7	5	3
4.	63	39	22	13	8	5	3
5.	59	37	21	12	7	5	3
6.	61	38	20	12	8	6	3
7.	62	38	22	13	7	6	3
8.	59	37	20	12	7	5	3
9.	61	35	19	11	7	5	3
10.	59	35	21	12	8	5	3
11.	61	38	22	13	8	5	3
12.	55	35	21	13	8	5	3
13.	58	34	19	11	7	6	3
14.	64	41	23	13	7	5	3
15.	58	35	20	12	7	5	3
16.	61	40	23	13	8	6	3
17.	60	36	20	11	6	5	3
18.	55	35	20	12	7	6	3
19.	62	39	22	13	8	6	3
20.	57	36	19	12	8	5	3
21.	62	37	22	12	8	5	3
22.	65	42	23	12	8	5	3
23.	65	40	23	14	9	6	3
24.	62	38	20	12	7	5	3
25.	68	42	23	13	8	5	3
26.	60	37	20	12	7	5	3
27.	63	40	22	13	8	6	3
28.	61	36	21	12	7	6	3
29.	61	40	21	13	8	5	3
30.	57	36	19	12	8	5	3
H_{sr}	60,7	37,6	21,1	12,3	7,6	5,3	3,0
Błąd	4,9	3,8	2,3	1,2	1,0	0,8	0,0

Tab. 5. Zbiorcze wyniki badań ultradźwiękowych.
Tab. 5. Collective results of ultrasonic tests.

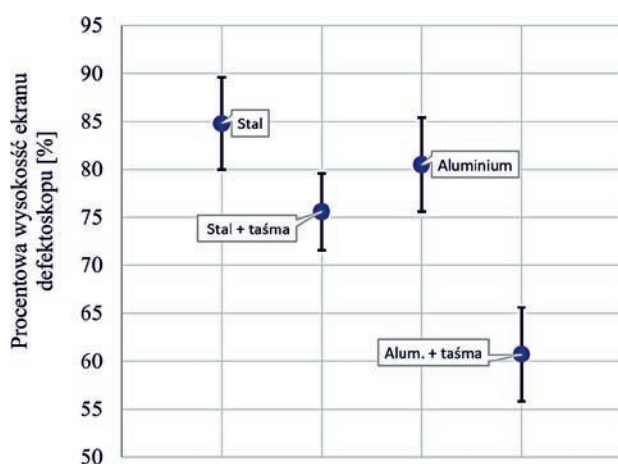
Nr impulsu	Stal		Stal + taśma		Aluminium		Aluminium + taśma	
	Wysokość [%]	Błąd [%]	Wysokość [%]	Błąd [%]	Wysokość [%]	Błąd [%]	Wysokość [%]	Błąd [%]
H1	84,8	4,8	75,6	4	80,5	4,9	60,7	4,9
H2	66,2	4,4	53,6	2	62,5	3,7	37,6	3,8
H3	55,2	4	40,9	2,4	45	2,8	21,1	2,3
H4	48,1	3	33,2	1,7	32,4	3,6	12,3	1,2
H5	38,7	3,8	24,6	1,7	22,4	1,8	7,6	1
H6	31,1	2,1	18,7	1,6	18,5	4,8	5,3	0,8
n (liczba impulsów)	8,5 [-]	0,8 [-]	5,1[-]	0,6 [-]	5,1 [-]	0,6 [-]	3 [-]	0 [-]

$$\frac{1}{2} \cdot L_{0,95} = t_{0,95} \cdot \sigma \quad (1)$$

gdzie: $\frac{1}{2} \cdot L_{0,95}$ - 95% półprzedział ufności; $t_{0,95}$ - współczynnik t Studenta dla 30 pomiarów, na poziomie istotności 0,10; σ - odchylenie standardowe dla pomiarów.

Zbiorcze wyniki badań przedstawiano w tab. 5.

Analizie poddane wysokości pierwszych sześciu impulsów ultradźwiękowych, ponieważ umożliwiają one wykorzystanie szeregu ultradźwiękowych miar jakości połączeń adhezyjnych (np. moduł ciśnieniowego współczynnika odbicia, decybelowego spadku amplitudy między wybranymi impulsami).



Rys. 3. Graficzne przedstawienie wysokości pierwszego impulsu uzyskanego na ekranie defektoskopu w badanych obszarach.

Fig. 3. Graphical representation of the height of the first pulse obtained on the defectoscope screen in the studied areas.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że obrazy uzyskane na ekranie defektoskopu w czasie badań w obszarach, w których nałożono taśmę oraz w których taśmy

nie nałożono różnią się od siebie istotnie. Graficznego przedstawienia wyników dokonano dla pierwszego impulsu z obszaru badanego – Rys. 3.

3. Podsumowanie

Przeprowadzone prace potwierdziły, że metoda ultradźwiękowa umożliwia nieniszcząco lokalizację połączenia adhezyjnego taśma – blacha stalowa oraz aluminium i może być wykorzystywana w rzeczywistych warunkach produkcyjnych. Uzyskano szereg zróżnicowanych sygnałów, na podstawie których zidentyfikowano obszary z taśmą i bez taśmy. Wyższą podatnością defektoskopową cechują się połączenia taśma – blacha aluminium, gdzie po wykonaniu połączenia obserwuje się wyraźne spadki wysokości impulsów uzyskiwanych na ekranie defektoskopu ultradźwiękowego. Dalsze badania obejmą stworzenie mapy jakości połączenia adhezyjnego wraz z oszacowaniem wytrzymałości mechanicznej połączenia.

The article was financed from the funds of the project no. 05/51/DS-PB/3520

4. Literatura

- [1] J. Kowalczyk „Ocena połączeń klejonych metodą ultradźwiękową”, Rozprawa doktorska, Biblioteka Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2008.
- [2] Broszura 3M™ VHB™ Tapes, 3M Industrial Adhesives and Tapes, 3M, 2016.
- [3] W. Oktaba „Metody statystyki matematycznej w doświadczałnictwie”, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1972.
- [4] Wyniki pomiarów uzyskane w czasie realizacji pracy dyplomowej magisterskiej, M. Korzel (praca w realizacji), Poznań, 2018r.