

Ryszard Mańczak*
Politechnika Poznańska

Ultradźwiękowa ocena degradacji połączenia powłoki szpachlówkowej z podłożem stalowym

Ultrasonic evaluation of the degradation of the joint between the filler coating and the steel substrate

STRESZCZENIE

Połączenia adhezyjne powłoki szpachlówkowej z podłożem stalowym stosowane są w naprawach nadwozi pojazdów. Podczas eksploatacji pojazdu stan połączeń, zwłaszcza ich wytrzymałość, ulegają zmianom. Poznanie przebiegu degradacji połączeń, poprzez ciągłe monitorowanie ich stanu za pomocą metody ultradźwiękowej, umożliwiłoby określenie bieżącego ich stanu. W niniejszym artykule przedstawiono rezultaty przyspieszonych badań degradacji 16-stu połączeń adhezyjnych powłoki szpachlówkowej Fiber Novol z podłożem stalowym ze stali 50HS poddanych cyklicznym odkształceniom mechanicznym. Podczas badań monitorowano cztery parametry ultradźwiękowej fali powierzchniowej przepuszczanej wzdłuż granicy połączenia powłoki z podłożem (wzmocnienie, czas przejścia, częstotliwość i pasmo) oraz cztery parametry ultradźwiękowej fali podłużnej odbijającej się prostopadłe od granicy połączenia powłok z podłożem (wzmocnienie, moduł współczynnika odbicia, częstotliwość i pasmo). Uzyskane przebiegi pozwoliły na przelizowanie charakteru zmian zachodzących w połączeniach.

Słowa kluczowe: degradacja połączenia; badania ultradźwiękowe; monitorowanie stanu

1. Wstęp

W procesach naprawy nadwozi pojazdów stosowane są powszechnie masy szpachlówkowe, których połączenie z podłożem stalowym a charakter adhezyjny. W trakcie eksploatacji pojazdu, stan połączeń ulega zmianie, zwłaszcza ich wytrzymałość. Poznanie procesu degradacji takich połączeń pozwoliłoby na określenie ich bieżącego stanu. Zastosowanie ultradźwiękowej metody badań nieniszczących umożliwia monitorowanie stanu połączenia, poddawanego cyklicznym obciążeniom niszczącym.

W ramach niniejszej pracy wykonano badania degradacji połączenia powłoki szpachlówkowej z podłożem stalowym. Badania degradacji polegały na mechanicznym odkształcaniu określonej partii próbek przy jednoczesnym rejestrowaniu wartości wybranych parametrów fal ultradźwiękowych, propagujących w obszarze połączeń. Przedstawiono zarówno sposób przeprowadzenia tych badań, jak i uzyskane rezultaty w postaci przebiegów zmian wartości parametrów fal. Wszystkie badania wykonano dla połączenia powłoki ze szpachlówki Fiber Novol z podłożem ze stali 50HS.

*Autor korespondencyjny.

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

ABSTRACT

Adhesive joints between a filler coating and a steel substrate are used in vehicle body repairs. The condition of these joints, particularly their strength, changes during vehicle operation. Understanding the degradation process of these joints through continuous ultrasonic monitoring would allow for the determination of their current condition. This article presents the results of accelerated degradation tests of 16 adhesive joints between a Fiber Novol filler coating and a 50HS steel substrate subjected to cyclic mechanical deformation. During the tests, four parameters of an ultrasonic surface wave transmitted along the coating-substrate interface were monitored (gain, transit time, frequency, and bandwidth) and four parameters of an ultrasonic longitudinal wave reflected perpendicularly from the coating-substrate interface (gain, reflectivity modulus, frequency, and bandwidth). The obtained waveforms allowed for the analysis of the nature of changes occurring in the joints.

Keywords: joint degradation; ultrasonic testing; condition monitoring

2. Obiekt badań

Badaniom degradacji poddano połączenia szpachlówki Fiber Novol z podłożem ze stali 50HS. Szpachlówka typu Fiber powstaje w wyniku dodania do szpachlówki uniwersalnej dużej ilości włókien szklanych w celu zwiększenia jej wytrzymałości mechanicznej i jest przeznaczona do zastosowań na niewielkich powierzchniach. Decyzję o wyborze tej szpachlówki podjęto w wyniku analizy rezultatów badań zawartych w pracach [1, 2]. Autorzy tych prac w swoich badaniach zmęczeniowych wykorzystywali próbki ze szpachlówki uniwersalnej nałożonej na różne podłoża. Część wykonanych przez nich prób zakończyła się popękaniem powłok bez ich całkowitego odspojenia od podłoża. W celu uniknięcia popękania powłok w trakcie badań degradacji postanowiono zastosować szpachlówkę z dodatkiem włókien szklanych, które zwiększają wytrzymałość materiału powłoki. Ostateczną decyzję o wyborze szpachlówki Fiber Novol podjęto po wykonaniu próbnej serii badań rozpoznawczych o charakterze zmęczeniowym.

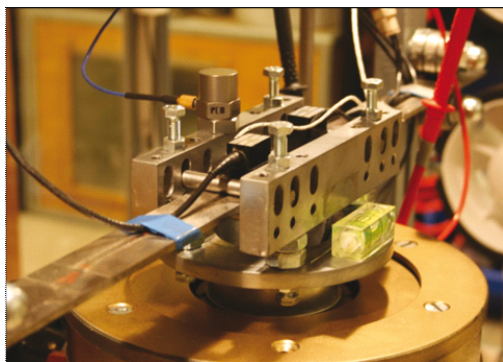
Stal 50HS wybrano kierując się zarówno analizą rezultatów prac [1–3] jak i wynikami badań własnych wykonanych

razem z wspomnianymi badaniami rozpoznawczymi szpachlówki. Autorzy wymienionych prac stosowali w swych badaniach na podłoża blachy karoseryjne, które często ulegały uszkodzeniom zmęczeniowym wcześniej niż powłoki. Z tego względu postanowiono wykorzystać w badaniach własnych stal 50HS, charakteryzującą się podwyższonymi właściwościami sprężystymi. Była ona już z powodzeniem wykorzystywana w badaniach degradacji powłok wykonanych z past regeneracyjnych [4].

Przed przystąpieniem do badań, oprócz wyboru rodzajów materiałów tworzących połączenie, określono wymiary geometryczne próbek. Wymiary były zdeterminowane przez wymiary stanowiska oraz wnioski wynikające z własnych doświadczeń badawczych i doświadczeń autorów cytowanych wyżej prac. Ostatecznie pojedyncza próbka składała się z listy ze stali 50HS o długości 520 mm, szerokości 27 mm i grubości 3 mm na którą w jej środkowej części naniesiono powłokę o długości 30 mm, szerokości 27 mm i grubości 2 mm.

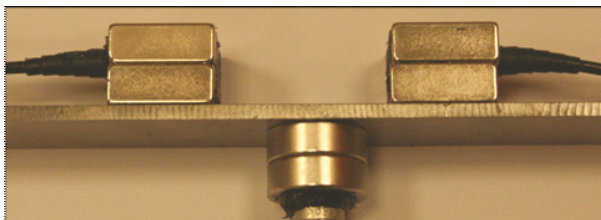
3. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy zastosowany w badaniach degradacji przedstawiono na Rys. 2. Składa się on z defektoskopu ultradźwiękowego, połączonego przewodami z dwiema głowicami fali powierzchniowej o częstotliwości 2 MHz, działającymi w technice przepuszczania oraz z jedną głowicą fali podłużnej o częstotliwości 10 MHz działającą w technice echa. Zachowanie stałego sprzężenia akustycznego zapewniono poprzez zastosowanie magnesów neodymowych



Rys. 1. Stanowisko do badań degradacji

Fig. 1. Degradation test stand



Rys. 2. Listwa stalowa z zamocowanymi głowicami (bez naniesionej powłoki)

Fig. 2. Steel strip with attached probes (without coating)

i żelę sprężającego (Rys. 2).

Wymuszenie drań odbywało się za pomocą wzbudnika elektrodynamicznego i odpowiedniego układu podporowego. Degradację połączeń prowadzono przy napięciu zasilającym wzbudnik o wartości $U_z=5$ V i częstotliwości $f_z=30$ Hz, co odpowiada amplitudzie przyspieszenia drgań około 25 m/s^2 . Wyniki oszacowania stopnia zintensyfikowania badań w stosunku do wartości wyznaczonych podczas badań poziomu drgań na nadwoziu pojazdu samochodowego [5] przedstawiono w Tab. 1.

Tab. 1. Warunki prowadzenia badań degradacji

Tab. 1. Conditions for conducting degradation tests

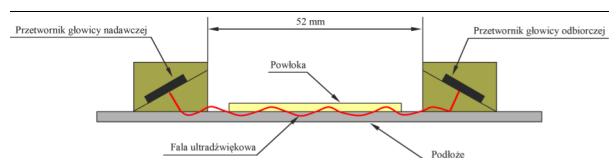
Parametry badań Parametry obciążenia	Nastawy urządzeń w trakcie badań degradacji	Wartości zmierzone w warunkach eksploatacyjnych	Stopień intensyfikacji badań laboratoryjnych*
Amplituda przyspieszenia drgań A [m/s^2]	26,4	0,03 – 0,04	660 – 880
Częstotliwość drgań f_z [Hz]	30	30 – 60	0,5 – 1,0
Amplituda odkształcenia X [mm]	0,81	0,0018	450

* Stopień intensyfikacji badań laboratoryjnych wyznaczono jako stosunek wartości nastaw urządzeń w trakcie badań degradacji do wartości zmierzonych w warunkach eksploatacyjnych

Trudno ocenić wartości wyznaczonych stopni intensyfikacji badań laboratoryjnych. W przeanalizowanej literaturze jedynie autorzy pracy [6] wartości stopni intensyfikacji przeprowadzonych przez nich badań (zwanymi współczynnikami przyspieszenia), które wynosiły od 50 do 500.

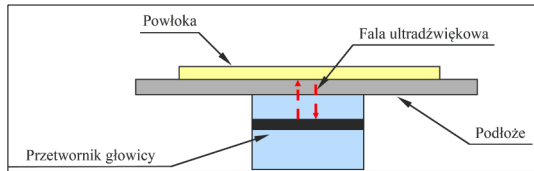
4. Metodyka badań

Badania degradacji pojedynczej próbki polegały na cyklicznym mechanicznym odkształcaniu połączenia, aż do chwili odspojenia powłoki od podłoża. Łącznie zbadano 16 próbek, które oznaczono liczbami od 01 do 16. Podczas degradacji monitorowano zmiany wartości parametrów fali powierzchniowej (Rys. 3) takie jak wzmocnienie W_R , czas przejścia fali T_R , częstotliwość rezonansową f_{rR} i pasmo przenoszenia b_R . W przypadku fali podłużnej (Rys. 4), monitorowaniu podlegały takie parametry jak wzmocnienie W_L , moduł ciśnieniowego współczynnika odbicia $|r|$, częstotliwość rezonansową f_{rL} i pasmo przenoszenia b_L . Wartości modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia podczas badań degradacji wyznaczono metodą odbić wielokrotnych od podłoża, którą opisano w pracach [7, 8].



Rys. 3. Schemat przebiegu fali powierzchniowej w trakcie degradacji połączenia

Fig. 3. Schematic diagram of the surface waveform during the degradation of the joint



Rys. 4. Schemat przebiegu fali podłużnej w trakcie degradacji połączenia

Fig. 4. Schematic diagram of the longitudinal waveform during the degradation of the connection

Na podstawie analizy opublikowanych wyników badań (np. [9–11]) możliwe było określenie przewidywanych kierunków zmian (podczas badań degradacji) początkowych wartości parametrów ultradźwiękowych. Wartości wzmocnienia zarówno fali powierzchniowej, jak i podłużnej powinny się zmniejszać w przeciwieństwie do modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia, którego wartości powinny ulegać zwiększeniu. Spodziewany zakres zmian wartości modułu powinien się zawierać (dla połączenia szpachlówki Fiber Novol z podłożem ze stali 50HS) między wartością teoretyczną wynoszącą 0,826 a 1,0, przy czym wartość jeden odpowiada sytuacji, w której dochodzi do całkowitego odspojenia powłoki od podłoża.

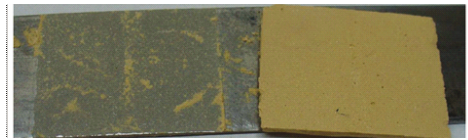
Zmiany wartości częstotliwości rezonansowych obydwu fal oraz pasm przenoszenia mogą charakteryzować się pewną niejednoznacznością, jednakże już fakt jakichkolwiek fluktuacji wartości tych wielkości jest informacją o zmianach zachodzących w połączeniach podczas degradacji.

Istnieje możliwość wykorzystania fali Stoneley'a, powstającej w wyniku transformacji fali powierzchniowej w obszarze połączenia. Fala Stoneley'a posiada nieznacznie większą wartość prędkości propagacji niż fala powierzchniowa. Stopniowe odspajanie powłoki powinno się przekładać na zanikanie zjawiska transformacji. Poprzez dokonywanie pomiaru czasu T_R po jakim impuls z głowicy nadawczej docierał do głowicy odbiorczej, możliwa była obserwacja zmian zjawiska transformacji fal. W wyniku utraty przyczepności spodziewano się zwiększania wartości czasu przejścia impulsu między głowicami fal ultradźwiękowych. Fali Stoneley'a towarzyszy dodatkowo powstawanie fali wyciekającej do powłoki [7]. W zależności układu pomiarowego sytuacja taka może zostać zobrazowana na ekranie defektoskopu w postaci wydłużonego impulsu odbiorczego lub wręcz pojawienia się impulsu dodatkowego. W trakcie badań degradacji rejestrowano dodatkowy impuls, który zanikał po odspojeniu się powłoki od podłoża.

5. Wyniki badań

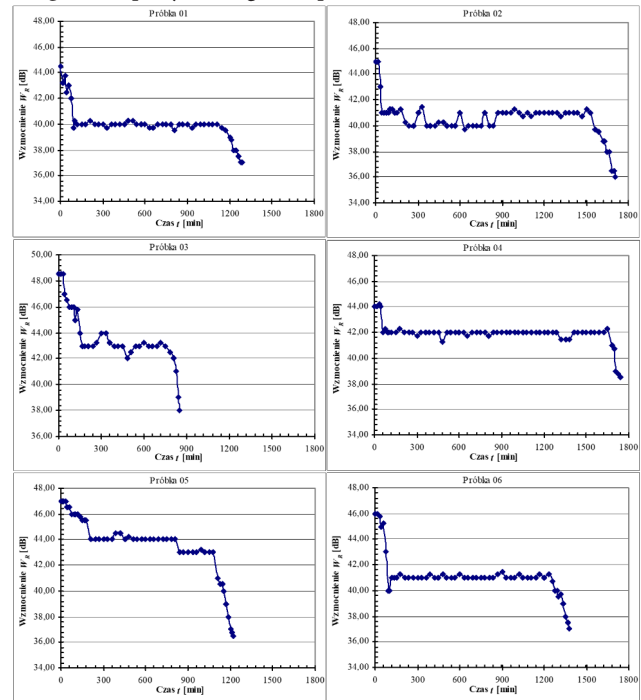
Badania degradacji pojedynczej prowadzono do chwili odspojenia się powłoki od podłoża. Przykład odspojonej powłoki przedstawiono na Rys. 5.

Na Rys. 6–13 przedstawiono przebiegi zmian wartości parametrów fal ultradźwiękowych przy czym, ze względu na objętość artykułu zamieszczono wyniki jedynie dla próbek o nr 01–06.



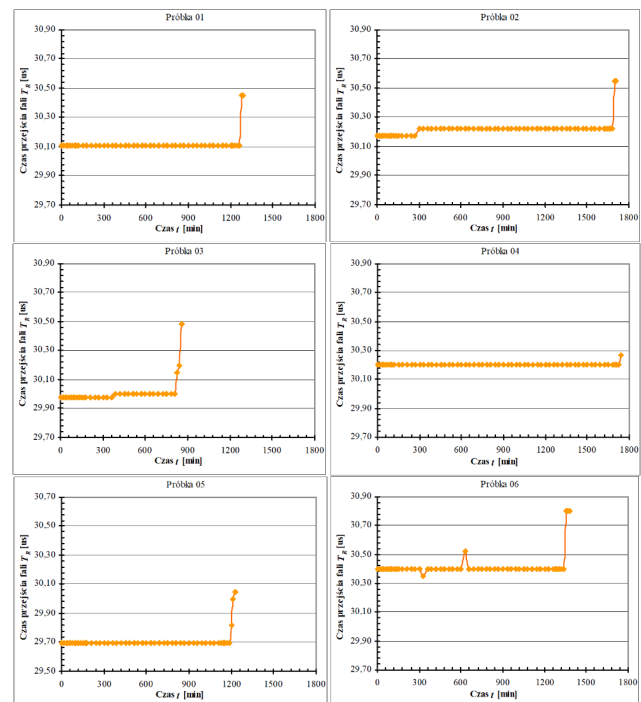
Rys. 5. Powłoka szpachlówkowa odspojona od metalowego podłoża

Fig. 5. The putty coating has separated from the metal substrate



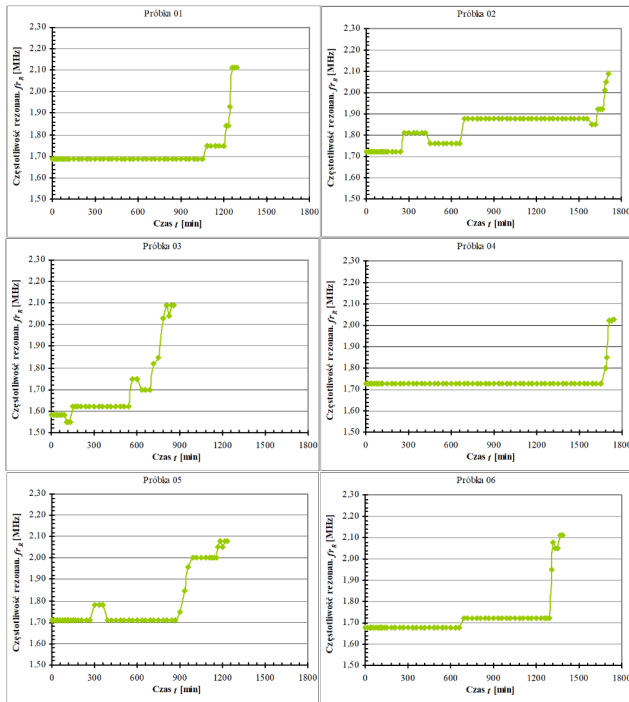
Rys. 6. Zmiany wzmocnienia fali W_R w próbkach o numerach 01–06

Fig. 6. Wave amplification changes W_R for samples numbered 01–06



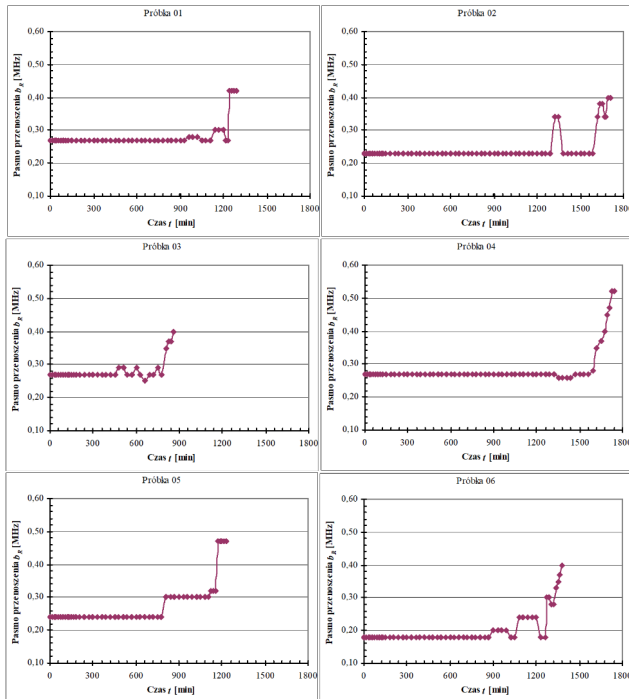
Rys. 7. Zmiany czasu przejścia fali T_R w próbkach o numerach 01–06

Fig. 7. Time course of wave transit time changes T_R for samples numbered 01–06



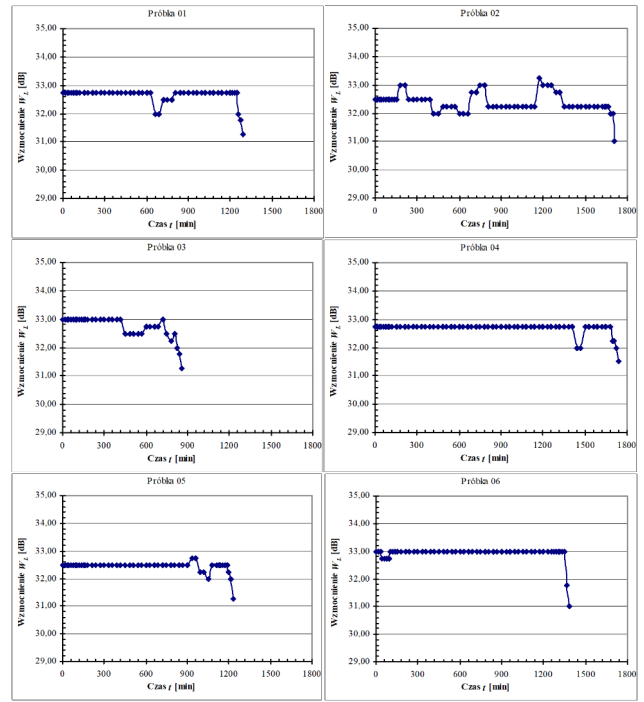
Rys. 8. Zmiany częstotliwości rezonansowej f_{rR} w próbkach o numerach 01–06

Fig. 8. Resonance frequency changes f_{rR} for samples numbered 01–06



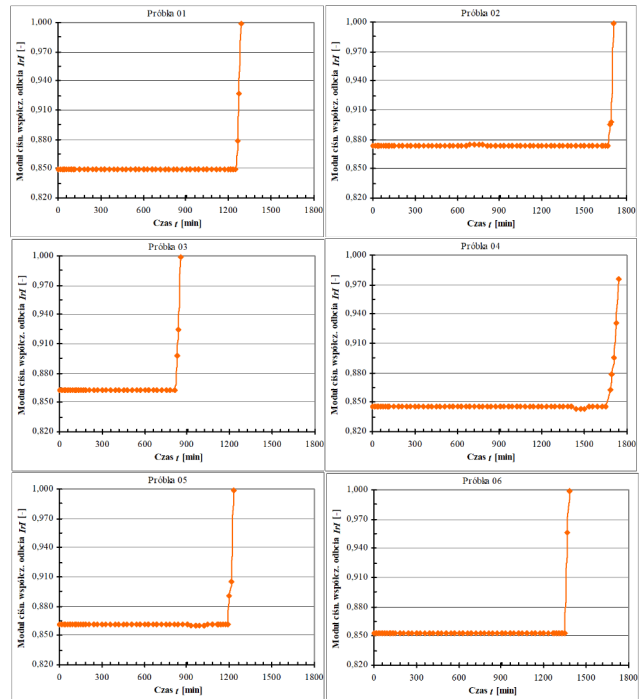
Rys. 9. Zmiany pasma przenoszenia b_R w próbkach o numerach 01–06

Fig. 9. Bandwidth changes b_R for samples numbered 01–06



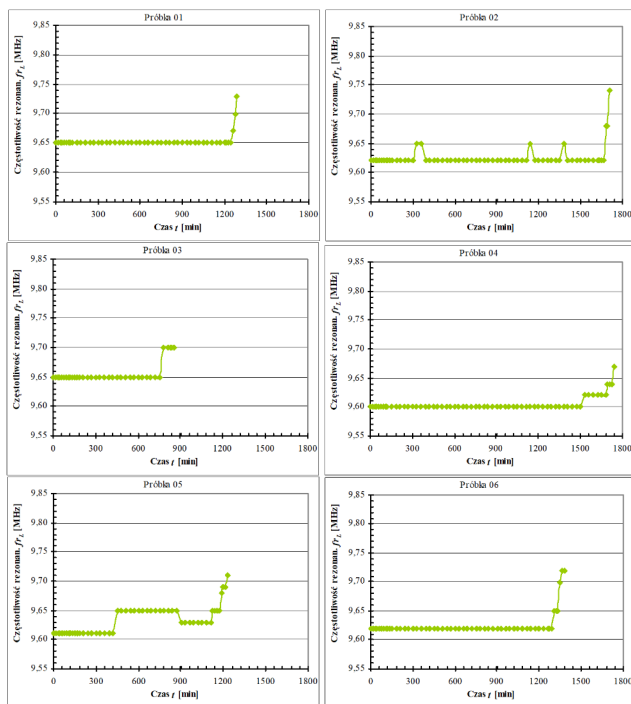
Rys. 10. Zmiany wzmocnienia fali W_L w próbkach o numerach 01–06

Fig. 10. Wave amplification changes W_L for samples numbered 01–06



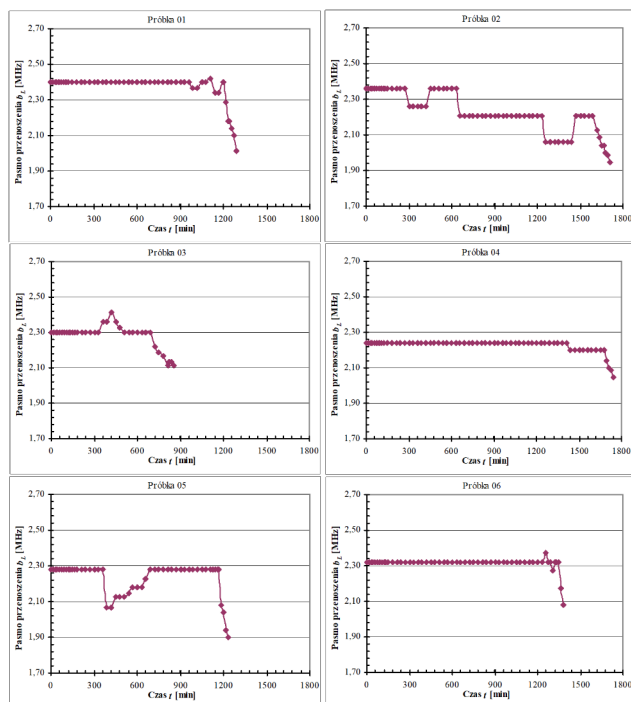
Rys. 11. Zmiany modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia $|r|$ w próbkach o numerach 01–06

Fig. 11. Changes in the pressure modulus of the reflectance coefficient $|r|$ for samples numbered 01–06



Rys. 12. Zmiany częstotliwości rezonansowej f_L w próbkach o numerach 01–06

Fig. 12. Resonance frequency changes f_L for samples numbered 01–06



Rys. 13. Zmiany pasma przenoszenia b_L w próbkach o numerach 01–06

Fig. 13. Bandwidth changes b_L for samples numbered 01–06

6. Analiza wyników badań

Analiza wyników badań przedstawiona w niniejszym rozdziale będzie odnosić się do wyników badań wszystkich 16. próbek. Wyniki te wskazują na ich zróżnicowaną trwałość. Rozpiętość czasu badań wynosiła od 750 do 1800 minut (od 12,5 do 30 godzin). Ze względu na długi czas trwania badań degradacji, prowadzenie badań odbywało się w etapach trwających od 8 do 12 godzin. Odstępy czasu między etapami nie przekraczały 12 godzin. Nie stwierdzono zmian w wartościach parametrów fal ultradźwiękowych zarejestrowanych na końcu każdego z etapów oraz na początku kolejnego.

6.1 Analiza wyników badań falą powierzchniową

Przebiegi zmian wartości parametru wzmocnienia fali powierzchniowej W_R , zarejestrowane w trakcie badań wszystkich próbek charakteryzują się ogólnym trendem polegającym na zmniejszaniu się wartości tego parametru wraz z upływem czasu trwania procesu degradacji. Zmiany wartości wzmocnienia w relacji odwrotnie proporcjonalnej obrazują zmiany ciśnienia akustycznego impulsu fali na drodze między głowicą nadawczą a odbiorczą. Wywołane są one obecnością powłoki przywierającej do podłoża, która stanowi przeszkodę dla propagującej fali.

Zakres zmian wartości W_R wynosi od 4 dB (próbka nr 11) do 12 dB (próbka nr 16). Spadek wzmocnienia o 4 dB odpowiada 1,56-krotnemu wzrostowi ciśnienia akustycznego, a spadek wzmocnienia o 12 dB wzrostowi 4-krotnemu. Przy pominięciu niewielkich oscylacji wartości w trakcie prób degradacji oraz wpływu ewentualnych błędów pomiarowych należy stwierdzić, że w każdym z przebiegów można wyróżnić trzy charakterystyczne okresy. W pierwszym okresie następuje gwałtowny spadek wartości wzmocnienia od wartości początkowej do określonego poziomu, który stanowi początek okresu drugiego. Wartości parametru w tym okresie nie ulegają większym zmianom. W trzecim okresie zauważalny jest spadek wartości do poziomu odpowiadającego odspojeniu powłoki.

Przebiegi zmian wartości czasu przejścia fali powierzchniowej między głowicami T_R charakteryzuje ogólny trend wzrostu wartości parametru wraz z upływem czasu degradacji połączeń. Zakres zmienności wartości początkowych wynosi od 29,70 μs (próbka 05) do 30,48 μs (próbka 07), a wartości końcowych tego parametru od 30,05 μs (próbka 05) do 30,80 μs (próbka 06). Rozstęp wartości wynosi odpowiednio 0,78 μs i 0,75 μs i wynika z niewielkich różnic w rozstawach głowic na poszczególnych próbkach. W zarejestrowanych przebiegach zmian wartości parametru T_R można wyróżnić dwa okresy. W pierwszym okresie, trwającym przez przeważającą część czasu degradacji, wartości nie ulegają zmianie lub zakres ich zmian jest niewielki. Okres drugi charakteryzuje szybki wzrost wartości parametru T_R aż do wartości końcowej w krótkim przedziale czasu, nie przekraczającym 7 % całego czasu degradacji.

Przebiegi zmian częstotliwości rezonansowej fali powierzchniowej charakteryzuje, podobny jak w przypadku parametru T_R , ogólny trend polegający na zwiększaniu

wartości wraz z upływem czasu degradacji połączeń. Wartości początkowe parametru wynoszą od 1,55 MHz (próbka 03) do 1,79 MHz (próbka 08), a wartości końcowe mieszczą się w przedziale od 2,00 MHz (próbka 07) do 2,12 MHz (próbka 16). Zakres zmian wartości częstotliwości rezonansowej dla pojedynczej próbki zawiera się w przedziale od 0,26 MHz (próbka 07) do 0,54 MHz (próbka 03). W wyniku porównania ze sobą zarejestrowanych przebiegów można wskazać występowanie dwóch charakterystycznych okresów zmian wartości parametru f_{rR} . W pierwszym okresie wartości częstotliwości rezonansowej fali pozostają na względnie stałym poziomie lub występują niewielkie wahania ich wartości.

Zarejestrowane w trakcie badań wszystkich próbek przebiegi zmian wartości pasma przenoszenia fali powierzchniowej b_R posiadają wiele cech wspólnych z przebiegami zmian wartości częstotliwości rezonansowej f_{rR} . Występuje podobna ogólna tendencja wzrostu wartości wraz z upływem czasu degradacji. Zawiera się ona przedziale od 0,08 MHz (próbka 07) do 0,35 MHz (próbka 14). Wyróżnić można także dwa okresy zmian wartości tego parametru. Szybkie przyrost wartości parametru w stosunkowo krótkich przedziałach czasu degradacji występują w drugim okresie. Zmiany wartości w pierwszym okresie rozpoczynają się zwykle w zbliżonych chwilach w porównaniu ze zmianami wartości częstotliwości rezonansowej lub je wyprzedzają.

Na podstawie powyższej analizy wyników można podjąć próbę oceny charakteru procesu degradacji badanych połączeń. Brak zauważalnych śladów występowania tzw. przełomu „muszlowego”, charakterystycznego dla procesu zmęczenia na powierzchni odspojonych powłok sugeruje, że odspojenie powłok nastąpiło stosunkowo szybko w krótkim okresie czasu. Takie przypuszczenie znajduje odzwierciedlenie w przebiegach zmian wartości parametrów ultradźwiękowych. Przebiegi zmian zarówno wzmocnienia fali W_R , czasu przejścia fali T_R , częstotliwości rezonansowej f_{rR} , jak i pasma przenoszenia b_R charakteryzuje występowanie szybkich zmian wartości po okresie względnej stabilizacji. Szybkie zmiany wartości wskazują na osłabienie w krótkim czasie sił wiążących powłoki z podłożami, co ostatecznie prowadziło do odspojenia powłok. Wahania wartości parametrów w okresie ich względnej stabilizacji, zwłaszcza wzmocnienia W_R , częstotliwości rezonansowej f_{rR} oraz pasma przenoszenia b_R mogą dodatkowo oznaczać, że zmiany w połączeniach zaczęły się już w okresach względnej stabilizacji wartości parametrów.

6.2 Analiza wyników badań falą podłużną

Różnice początkowych i końcowych wartości parametru wzmocnienia ultradźwiękowej fali podłużnej W_L wskazują na występowanie ogólnego trendu zmniejszania jego wartości wraz z upływem czasu degradacji. Przywieranie powłok do podłoża powoduje, że fala ultradźwiękowa docierając do granicy połączenia powłoki z podłożem ulega częściowemu odbiciu, a pozostała część przenika do powłoki. Po odspojeniu powłoki można przyjąć się, że fala w całości odbija się od granicy stal-powietrze [12]. Zakres zmienności wartości

początkowych parametru W_L wynosi od 32,50 dB (próbka 08) do 34,50 dB (próbka 13), a wartości końcowych od 31,00 dB (próbka 02) do 32,00 dB (próbki 07, 12 i 13). W trakcie degradacji przedział zmian wartości parametru wynosił od 1,25 dB (próbka 08) do 2,50 dB (próbka 13). W przebiegach zmian wartości parametru wzmocnienia można wyróżnić dwa zasadnicze okresy. Pierwszy charakteryzuje względna stabilność wartości parametru z ewentualnymi niewielkimi wahaniami wartości (np. próbki 02, 03, 09). W drugim okresie występuje gwałtowny spadek wartości parametrów w przedziale czasu, którego długość nie przekracza 16% całego czasu degradacji.

Moduł ciśnieniowego współczynnika odbicia jest miarą ciśnienia akustycznego fali odbitej od granicy połączenia powłoki z podłożem w stosunku do ciśnienia fali docierającej do połączenia. Uogólniając można przyjąć, że stanowi on miarę identyczną jak wzmocnienie impulsu odbitego od granicy połączenia. Należałoby się zatem spodziewać podobnych charakterów przebiegów zmian wartości obydwu parametrów, ale o przeciwnych kierunkach. Zarejestrowane przebiegi zmian modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia $|r|$ charakteryzuje trend wzrostu jego wartości końcowych w stosunku do wartości początkowych. Wartości początkowe modułu we wszystkich przebiegach są wyższe od wartości teoretycznej wynoszącej 0,826 i wynoszą od 0,837 (próbka 13) do 0,873 (próbka 02). Oznacza to, że żadna z próbek nie posiadała najwyższej możliwej dla osiągnięcia przyczepności powłoki do podłoża. W przebiegach zmian wartości $|r|$, podobnie jak w przebiegach W_L wyróżnić można występowanie okresu, w którym wartości parametru utrzymują się na stałym poziomie oraz okresu szybkich ich wzrostów wartości aż do wartości końcowych. Czasy trwania okresów wzrostów wartości nie przekraczają 8% czasów trwania procesów degradacji. Należy zauważyć, że przebiegi zmian wartości modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia fali podłużnej charakteryzują się mniejszymi wahaniami wartości w okresie stabilizacji wartości w porównaniu z przebiegami zmian wzmocnienia.

Zmiany wartości częstotliwości rezonansowej fali podłużnej f_{rL} , zarejestrowane w trakcie badań degradacji mają podobny przebieg, jak w przypadku przebiegów dla fali powierzchniowej. Charakteryzują się wzrostem wartości częstotliwości wraz z upływem czasu degradacji. Jednak rozstęp ich wartości jest mniejszy i wynosi od 0,05 MHz (próbka 03) do 0,20 MHz (próbka 15). Wartości początkowe częstotliwości zawierają się w przedziale od 9,57 MHz (próbka 07) do 9,65 MHz (próbki 01, 03, 09, 11), a wartości końcowe w przedziale od 9,66 MHz (próbka 12) do 9,80 MHz (próbka 15). W przebiegach zmian wartości częstotliwości rezonansowej można ponadto wyróżnić początkowy okres względnej stabilizacji wartości parametru oraz końcowy okres szybkich zmian wartości, którego długość nie przekracza 20 % całego czasu degradacji. Oscylacje wartości parametru f_{rL} w okresie stabilizacji pokrywają się w przypadku większości próbek (np. 02, 05, 13, 15) z oscylacjami wartości parametru W_L . Ponadto wahania wartości częstotliwości rezonansowej fali podłużnej f_{rL} są

mniejsze lub porównywalne z wahaniami wartości częstotliwości rezonansowej fali powierzchniowej f_{rR} .

Na wszystkich zarejestrowanych przebiegach zmian wartości pasma przenoszenia fali podłużnej b_L dominuje tendencja polegająca na zmniejszaniu wartości parametru wraz z upływem czasu degradacji. Rozstęp jego wartości wynosi od 0,12 MHz (próbka 16) do 0,43 MHz (próbka 13). Zakres zmian początkowych wartości zawiera się w przedziale od 1,90 MHz (próbka 05) do 2,11 MHz (próbka 03 i 09), a wartości końcowych od 2,15 MHz (próbka 16) do 2,42 MHz (próbka 01). Podobnie jak w przypadku innych przebiegów, można wyróżnić dwa charakterystyczne okresy w każdym przebiegu. Okres pierwszy charakteryzuje się względną stabilnością wartości parametrów, a w okresie drugim występują szybkie zmiany wartości aż do poziomów odpowiadających odspojeniu powłok. Oscylacje wartości w pierwszym okresie w przypadku niektórych próbek (np. 02, 05, 13, 15) są duże i dlatego czasami trudno jest jednoznacznie ustalić początek okresu drugiego. W większości próbek wahania wartości parametru b_L pokrywają się wahaniami wartości parametru f_{rL} .

Zakresy zmian wartości wszystkich analizowanych parametrów fali podłużnej nie przekraczają zwykle 30% ich wartości początkowych. Żaden z parametrów fali podłużnej nie cechuje się tak dużą rozpiętością wartości, jak to ma miejsce w przypadku, wspomnianego w rozdziale poprzednim, parametru wzmocnienia fali powierzchniowej W_R .

6.3 Wnioski z badań

Na podstawie analizy rezultatów badań z wykorzystaniem ultradźwiękowej fali powierzchniowej i podłużnej, sformułowano następujące wnioski końcowe:

- Przebiegi zmian wartości parametrów: W_R , T_R , f_{rR} , b_R , W_L , $|r|$, f_{rL} i b_L charakteryzuje stały trend zmian wartości podczas procesów degradacji.
- Przebiegi zmian parametru wzmocnienia fali powierzchniowej W_R cechuje duża stabilność ogólnego trendu oraz satysfakcjonująca wrażliwość na zmiany zachodzące w połączeniach.
- Procesy degradacji połączeń powłoki z szpachłówki Fiber Novol z podłożem ze stali 50HS charakteryzuje etapowość zachodzących zmian, przy czym długość poszczególnych etapów jest zróżnicowana.
- Początki szybkich zmian wartości parametrów fali powierzchniowej i podłużnej w końcowych etapach degradacji wskazują krytyczny moment, po przekroczeniu którego dalsze odkształcanie połączeń prowadzi do odspojenia powłok.
- Wahania wartości parametrów (zwłaszcza częstotliwości rezonansowej i pasma przenoszenia obydwu typów fal) mogą stanowić źródło dodatkowej informacji o zmianach zachodzących w połączeniach.

Wszystkie powyższe spostrzeżenia oraz wnioski i ogólne stanowią podstawę do podjęcia próby opracowania modelu procesu degradacji.

7. Literatura

- [1] M. Jósko M. „Ultradźwiękowe monitorowanie połączenia adhezyjnego” 21. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk, pp. 43–48, 2002.
- [2] M. Jósko „Ocena przyczepności powłok adhezyjnych metodą ultradźwiękową” Seminarium Naukowo-Techniczne nt. Zastosowania defektoskopów i metod badań nieniszczących w rozwiązywaniu problemów technicznych, Poznań, 2005.
- [3] R. Mańczak, M. Jósko “Evaluation of the Degradation of Adhesive Bond Type Metal-Polymer in Hybrid Element” II International Interdisciplinary Conference of Young Scientists, Poznań, pp. 99–101, 2009.
- [4] M. Jósko „Ocena stanu połączenia powłoki z podłożem metodą ultradźwiękową” 22. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Chorzów, pp. 161–166, 1999.
- [5] R. Mańczak „Badania degradacji połączenia powłoki szpachławkowej z podłożem stalowym metodą ultradźwiękową”, praca doktorska, Politechnika Poznańska, maszynopis zdeponowany w Bibliotece Politechnik Poznańskiej, Poznań, 2012.
- [6] O. Czeczot O. i in. „Przyspieszone badania maszyn rolniczych” Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa, 1977.
- [7] A. Pilarski „Ocena wytrzymałości adhezyjnej połączeń warstwowych”, praca doktorska, IPPT-PAN, Warszawa, maszynopis w Bibliotece IPPT-PAN w Warszawie, 1983
- [8] M. Jósko „Metodologiczne aspekty oceny przyczepności powłok regeneracyjnych metodą ultradźwiękową” Rozprawa habilitacyjna nr 372, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2002.
- [9] J.L. Borgerson, H. Reis “Monitoring the setting times and strength gain of mortar using ultrasonic guided waves” Insight, vol. 18, no. 11, pp. 670–675, 2006.
- [10] B. Drinkwater, P. Cawley “Measurement of the frequency dependence of the ultrasonic reflection coefficient from thin layers and partially contacting interfaces” Ultrasonics, no. 35, s. 479–488, 1997.
- [11] Moidu A.K., Sinclair A.N., Spelt J.K.: Nondestructive characterization of adhesive joint durability using ultrasonic reflection measurements. Research in Nondestructive Evaluation, 1999, nr 11, s. 81–95.
- [12] P. Puthillath, J.L. Rose “Ultrasonic guided wave inspection of a titanium repair patch bonded to an aluminum aircraft skin” International Journal of Adhesion & Adhesive, vol. 30, pp. 566–573, 2010.



Dr inż. Ryszard Mańczak pracuje na Politechnice Poznańskiej.