

## AN INVESTIGATION OF DEGRADATION OF THE BOND BETWEEN COATING AND SUBSTRATE

### Summary

*The aim of this paper is to examine the possibility of application of the ultrasonic method for evaluation of the degradation of the bond between adhesive coating and substrate. The impulse gain of an ultrasonic wave was used as the basic rate of degradation of the examined bonds. A dependence of the impulse gain of an ultrasonic wave on the quantity of cycles of deforming the sample was obtained which shows the course of the degradation of adhesive bond between epoxy resin Epidian5 and steel 50HS.*

## BADANIE DEGRADACJI POŁĄCZENIA POWŁOKI Z PODŁOŻEM

### Streszczenie

*Niniejszy artykuł jest poświęcony zbadaniu możliwości zastosowania metody ultradźwiękowej do oceny degradacji połączenia adhezyjnego powłoka – podłoże. Jako podstawowy wskaźnik degradacji badanego połączenia wykorzystano wzmocnienie impulsu fali ultradźwiękowej. Otrzymano zależność wzmocnienia impulsu fali ultradźwiękowej od ilości cykli odkształcania próbki, które obrazuje przebieg degradacji połączenia adhezyjnego żywica epoksydowa Epidian 5 – stal 50HS.*

### 1. Wprowadzenie

Intensywna eksploatacja maszyn roboczych i pojazdów powoduje znaczne zapotrzebowanie na części zamienne. Zazwyczaj są to oryginalne, ale drogie części. W wielu przypadkach, w starszych maszynach i pojazdach o dużym przebiegu mogą być i są stosowane części regenerowane, zwłaszcza gdy odznaczają się satysfakcjonującą dla użytkownika ceną i jakością. Ponieważ technologie regeneracji stanowią w niewielkim tylko stopniu powtórzenie procesu wytwarzania części, to problem regeneracji jest nadal ważny i aktualny z ekonomicznego (oszczędność materiałów i energii) i ekologicznego punktu widzenia [2].

Technologie nakładania powłok prewencyjnych i regeneracyjnych zapewniają pożądane właściwości wymiarowo – kształtowe i użytkowe wielu elementów maszyn i pojazdów. Technologie kształtowania tych właściwości powłoki o adhezyjnym charakterze połączenia z podłożem są relatywnie tanie, proste i szybkie.

Cechą użytkową decydującą o trwałości takich części jest przyczepność powłoki do podłoża, która zależy od rodzaju i właściwości łączonych materiałów oraz od przestrzegania technologii nakładania powłok. Problem zapewnienia właściwej przyczepności powłoki i trwałości połączenia nie został do dziś definitywnie rozwiązany. Także kontrola połączenia adhezyjnego powłoki z podłożem, monitorowanie przebiegu jego degradacji i ocena stanu takiego połączenia wymaga odpowiednich technik badawczych i diagnostycznych, które do tej pory nie zostały opracowane [1]. W niniejszej pracy podjęto problem oceny możliwości zastosowania metody ultradźwiękowej do badania degradacji połączenia powłoki adhezyjnej z podłożem stalowym.

### 2. Cel badań

W czasie eksploatacji niektóre elementy maszyn zawierające połączenie adhezyjne powłoki z podłożem są poddawane obciążeniom o charakterze zmęczeniowym, powodującym degradację tego połączenia. Istnieje potrzeba

opracowania metod badawczych, które pozwolą na określenie przebiegu degradacji połączenia adhezyjnego, a także pozwolą prognozować jego trwałość, zwłaszcza w odpowiedzialnych i drogich częściach maszyn i pojazdów.

Celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości zastosowania ciągłego monitorowania ultradźwiękowego do badań degradacji połączenia powłoki z podłożem oraz próba wyznaczenia przebiegu degradacji tego połączenia na podstawie rejestracji zmiany poziomu wzmocnienia impulsu ultradźwiękowego, pochodzącego od wygenerowanej fali powierzchniowej.

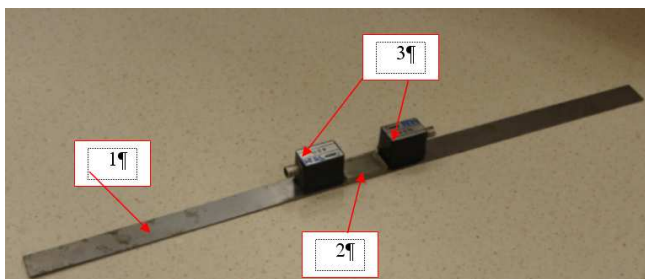
Ponadto, podjęto próby zaobserwowania inicjacji procesu odspajania się powłoki od podłoża. Rejestrowano metodą fotograficzną miejsca i rozwój odspojenia tych obszarów, w których zauważono początki niszczenia połączenia adhezyjnego. Rejestrację fotograficzną prowadzono przy świetle dziennym, ultrafioletowym, a także wykonywano zdjęcia w negatywie. Przezroczysta powłoka z żywicy epoksydowej umożliwiła tego rodzaju rejestrację i ocenę wzrokową.

### 3. Przebieg badań

W badaniach użyto próbek w kształcie listew, wyciętych z jednego arkusza blachy o wymiarach 600 x 25 x 1,5 mm i wykonanych ze stali sprężynowej 50HS. Zastosowano ten gatunek stali ze względów wytrzymałościowych. Chodziło o to, aby trwałość stalowej listwy, z której wykonano próbki, poddawane cyklicznym obciążeniom przewyższała trwałość połączenia adhezyjnego listwy z powłoką. W celu uzyskania powtarzalności wyników starano się zapewnić jednakowe warunki przygotowanie próbek i nakładania powłok. W próbkach zastosowano szlifowanie ręczne powierzchni podłoża listwy, a następnie jego od tłuszczenie za pomocą acetonu. Na tak przygotowaną listwę wylano do wcześniej przygotowanej formy żywicę epoksydową. Starano się zachować jednakowe wymiary powłoki (40 x 25 x 5 mm). Po wylaniu powłoki z Epidianu 5 próbkę pozostawiono na okres 6 dni, w celu całkowitego utwardzenia się powłoki.

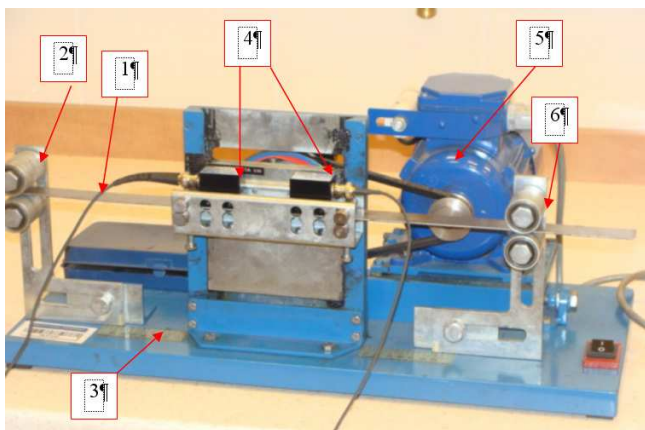
Wymiary nałożonej powłoki zostały tak dobrane, aby można było przykleić przetworniki ultradźwiękowe (rys. 1). Głowice zostały zamocowane do listwy stalowej za pomocą kleju silikonowego. W badaniach wykorzystano dwie głowice fal powierzchniowych firmy UNIPAN 4S15 o częstotliwości pracy 4 MHz. Głowice podłączono do cyfrowego defektoskopu ultradźwiękowego UMT-12.

Stanowisko, które było wykorzystywane podczas badania degradacji połączenia powłoki z podłożem przedstawia rys. 2. Na stanowisku badawczym można ustalić dwie częstotliwości cyklicznego obciążenia próbek - 5,57 i 6,62 Hz. Podczas przeprowadzania badań stosowano wyższą częstotliwość. Mechanizm mimośrodowy napędzany przez silnik o mocy 0,18 kW, za pośrednictwem przekładni pasowej powoduje wymuszenia uginające próbkę. Urządzenie posiada możliwość regulowania amplitudy ugięć próbek od 5 do 35 mm, dzięki zastosowaniu śruby nastawczej, która jest umieszczona na kole mimośrodu. Na stanowisku jest możliwe zastosowanie różnego typu głowic ultradźwiękowych, które są mocowane do odkształczanych próbek listwowych. Głowice ultradźwiękowe wytwarzają fale, wykorzystywane do ultradźwiękowego monitorowania strefy połączenia adhezyjnego powłoki z listwą, stanowiącą podłoże.



Rys. 1. Widok próbki z naklejonymi głowicami ultradźwiękowymi: 1 – listwa, 2 – powłoka, 3 – głowice ultradźwiękowe

Fig. 1. A view of the test sample with ultrasonic transducers: 1 – slat, 2 – coating, 3 – ultrasonic transducers

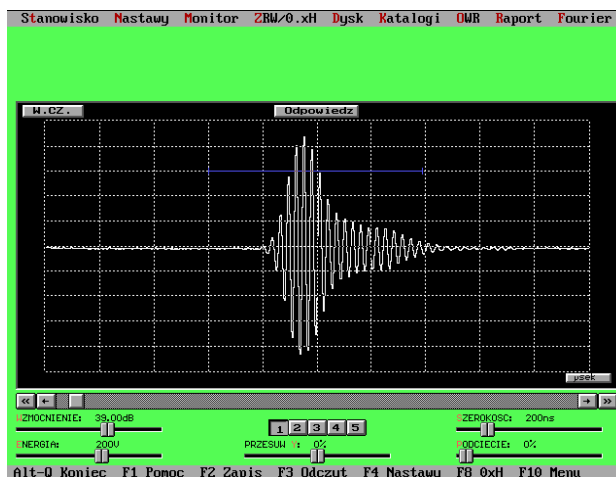


Rys. 2. Widok stanowiska: 1 – próbka, 2 – rolka mocująca, 3 – skala rozstawu podpór, 4 – głowice ultradźwiękowe, 5 – silnik, 6 – podpora

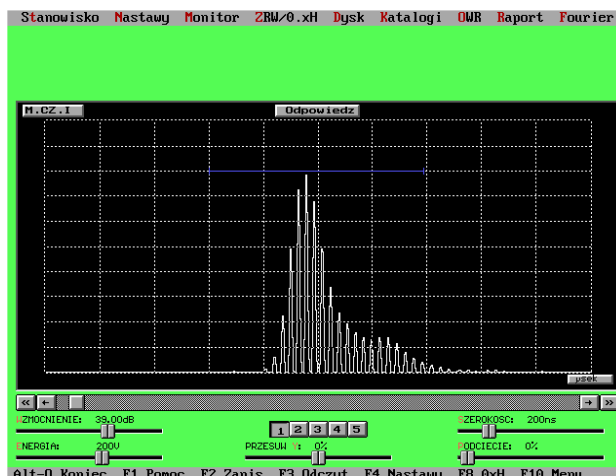
Fig. 2. A view of the stand: 1 – sample, 2 – fixing roll, 3 – scale of the gauge of supports, 4 – ultrasonic transducers, 5 – electric motor, 6 – support

Po przyklejeniu głowic ultradźwiękowych do listwy z powłoką adhezyjną, zamocowano ją na stanowisku badawczym (rys. 2). Następnie podłączano głowice ultradźwiękowe do defektoskopu UMT-12 i otrzymywano obrazy im-

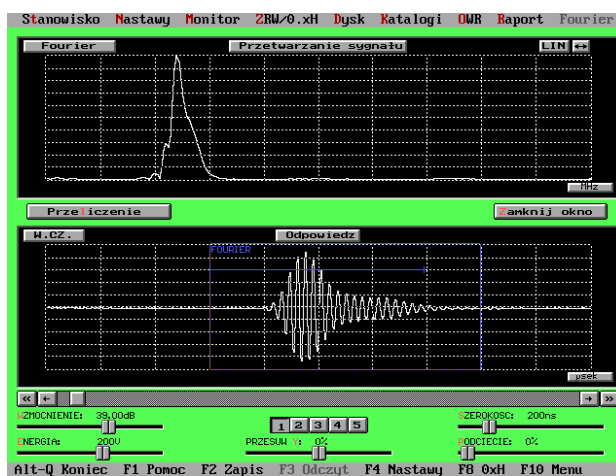
pulsów fali ultradźwiękowej przepuszczanej przez obszar połączenia adhezyjnego, które przedstawiają rys. 3-5.



Rys. 3. Impuls fali ultradźwiękowej wysokiej częstotliwości otrzymany dla wybranej próbki przed rozpoczęciem badań  
Fig. 3. Impulse of ultrasonic wave of the high frequency received for selected sample before examinations



Rys. 4. Impuls fali niskiej częstotliwości (połówkowy) otrzymany dla wybranej próbki przed rozpoczęciem badań  
Fig. 4. Impulse of wave of the low frequency received for selected sample before examinations



Rys. 5. Widok transformaty Fouriera (górną) z otrzymanego impulsu fali wysokiej częstotliwości (dół)  
Fig. 5. View of the Fourier transform (upper) from received impulse of the wave of the high frequency (bottom)

Dla uzyskanego na ekranie defektoskopu impulsu fali ultradźwiękowej ustalono poziom wzmocnienia, który był potrzebny do podniesienia amplitudy impulsu w dziedzinie czasu (niskiej częstotliwości) do wartości 80% wysokości ekranu. Zapisywano również wszystkie nastawy defektoskopu w odpowiednim katalogu tak, aby móc je przywoływać przy kolejnych pomiarach.

Pomiary ultradźwiękowe były dokonywane w różnych odstępach czasowych. Zmieniano liczbę cykli odkształceń próbki, między którymi dokonywano pomiarów. W ten sposób sprawdzano czy czas obciążania próbki ma wpływ na wartość uzyskanego impulsu fali ultradźwiękowej, a tym samym, czy zachodzą zmiany w połączeniu powłoka – podłoże. Stosowano przerwy w obciążaniu próbek. Przeprowadzano również dodatkowe pomiary ultradźwiękowe po każdej przerwie, przed kolejnym obciążaniem próbki, w celu sprawdzenia wpływu przerwy na poziom wzmocnienia impulsu fali ultradźwiękowej (ocena efektu relaksacji naprężeń w połączeniu).

Po zamocowaniu próbki, odczytaniu i zanotowaniu wszystkich parametrów ultradźwiękowych, przystępowano do cyklicznego odkształcania badanej próbki z powłoką. Na podstawie wyników badań przedstawionych w pracy [3] przyjęto następujące parametry degradowania połączenia adhezyjnego powłoka-podłoże:

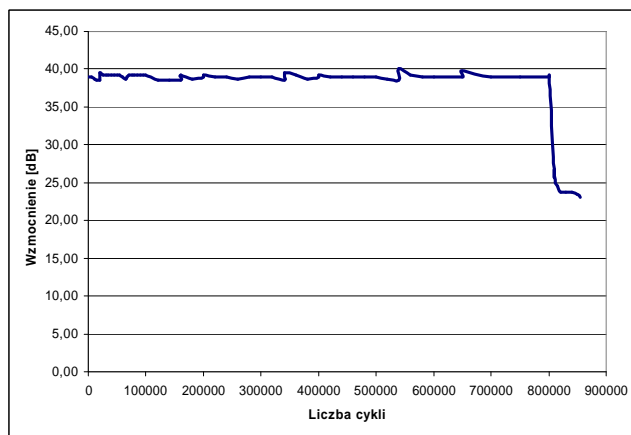
- częstotliwość odkształcenia - 6,62 Hz,
- amplituda odkształcenia w pierwszym etapie badań - 10 mm,
- amplituda odkształcenia w drugim etapie badań - 20 mm.

Przyjęta częstotliwość odkształcania próbek listwowych z nałożonymi powłokami mieściła się w przedziale 5-60 Hz, czyli pochodziła z zakresu wyznaczonego w pracy [3]. Stanowisko nie posiadało możliwości płynnej regulacji częstotliwości odkształceń próbek, co nie pozwoliło określić wpływu zmiany częstotliwości odkształceń na połączenie powłoka – podłoże. Amplituda odkształcenia była zmieniana podczas badań. Początkowa jej wartość (I etap badań), wynosząca 10 mm, nie powodowała zauważalnych zmian w połączeniu, pomimo iż była ona wielokrotnie większa od amplitudy wyznaczonej na podstawie badań, przedstawionych w pracy [3]. Ponieważ przeprowadzone badania miały charakter badań przyspieszonych, zdecydowano się przyjąć w drugim ich etapie wartość amplitudy odkształcenia 20 mm, kierując się koniecznością zarejestrowania zmian w połączeniu adhezyjnym, kosztem znacznego odchylenia warunków przeprowadzonych badań od warunków rzeczywistych. Cykliczny (sinusoidalny) charakter odkształcenia próbek był także uproszczeniem rzeczywistych wymuszeń drgań, jakie występują w eksploatacji pojazdu samochodowego [3].

Odczytu wartości parametrów impulsu fali ultradźwiękowej dokonywano zawsze w tym samym położeniu kątowym mechanizmu mimośrodowego urządzenia.

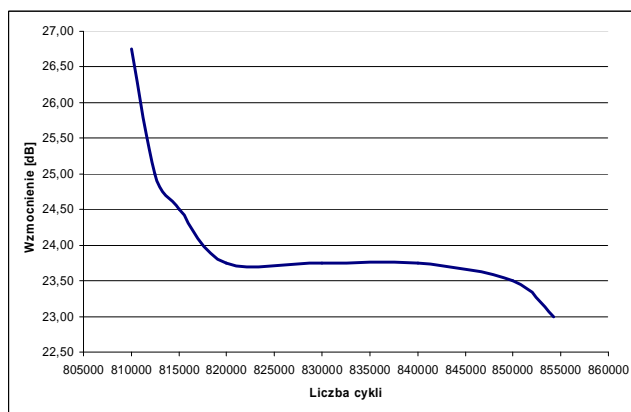
#### 4. Wyniki badań i ich analiza

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano zbiory wartości wybranych wielkości ultradźwiękowych, które w formie graficznej przedstawiono na rys. 6-9. Obrazują one przebieg i charakter zmian poszczególnych parametrów impulsu fali ultradźwiękowej w zależności od ilości cykli odkształceń próbki stalowej z nałożoną powłoką adhezyjną.



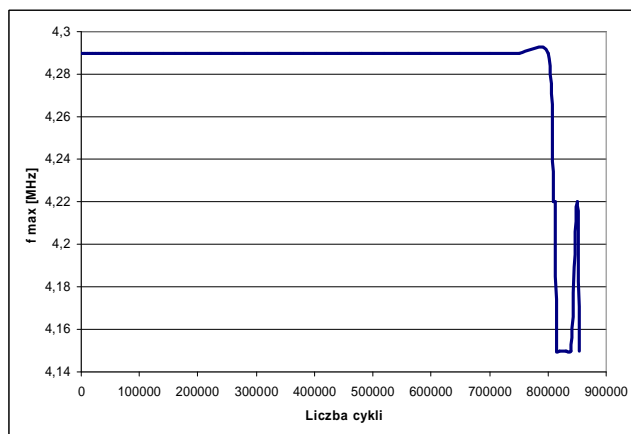
Rys. 6. Zależność wzmocnienia impulsu fali ultradźwiękowej od ilości cykli odkształcenia badanej próbki

Fig. 6. Dependence of the gain of ultrasonic impulse on the number of deformation cycles of the examined sample



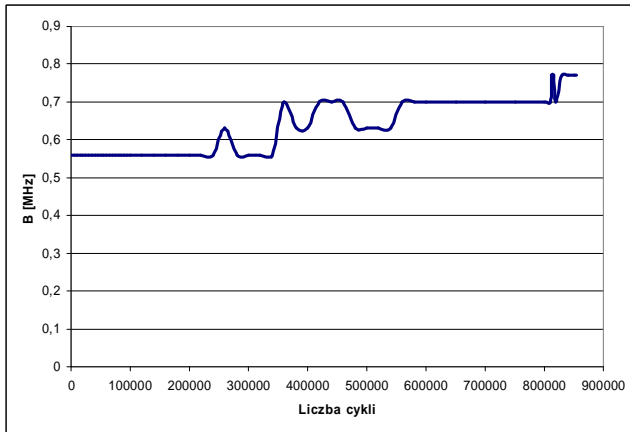
Rys. 7. Zależność wzmocnienia impulsu fali ultradźwiękowej od ilości cykli obciążenia badanej próbki po zmianie amplitudy odkształcenia na 10 mm

Fig. 7. Dependence of the gain of ultrasonic impulse on the quantity of loading cycles of the examined sample after change of the deformation amplitude on 10 mm



Rys. 8. Zależność częstotliwości maksymalnej amplitudy  $f_{max}$  widma impulsu ultradźwiękowego od ilości cykli obciążenia powłoki z podłożem

Fig. 8. Dependence of the frequency of the maximum peak (resonant) amplitude ( $f_{max}$ ) of ultrasonic impulse on the number of deforming cycles



Rys. 9. Zmiany wartości parametru B (szerokość pasma przenoszenia widma impulsu ultradźwiękowego) przy odkształcaniu próbki

*Fig. 9. Changes of the value of the parameter B (bandwidth of the signal spectrum)*

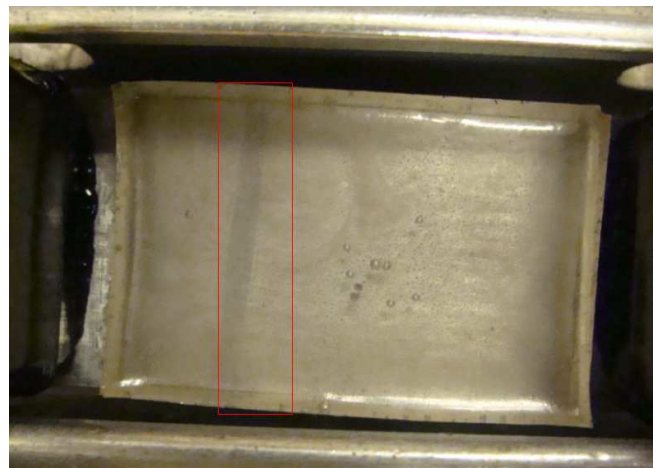
Charakterystyczne dla przebiegu wartości wzmocnienia impulsu fali ultradźwiękowej, przechodzącej przez badane połączenie adhezyjne, jest utrzymywanie się tej wartości na stałym poziomie 39dB do około 800 tysięcy cykli odkształceń próbek z amplitudą 10mm. Po zwiększeniu amplitudy do 20 mm, wzmocnienie impulsu fali ultradźwiękowej zaczęło się zmniejszać, aż do całkowitego odspojenia powłoki i osiągnęło wartość końcową 23 dB (rys. 7). Charakter tych zmian był zgodny z oczekiwaniami, ponieważ wraz z utratą przyczepności powłoki mniej energii fali ultradźwiękowej przedostaje się do powłoki i wzmocnienie impulsu tej fali przechodzącej przez połączenie jest mniejsze.

W trakcie przeprowadzania badań doprowadzono do całkowitego odspojenia powłok od podłoża. Należy podkreślić, że przy amplitudzie odkształcenia 10 mm, zmiany parametrów impulsu fali ultradźwiękowej są niewielkie. Dopiero podwojenie wartości amplitudy odkształcenia próbki z badanym połączeniem powodowało wyraźny spadek wzmocnienia o 16 dB. Wartość ta mieści się w zakresie 6-30 dB, którą uzyskiwał autor pracy [1] podczas całkowitego odspojenia się powłoki od podłoża.

W wykonanych badaniach degradacji połączenia adhezyjnego powłoka – podłoże, oprócz analizy amplitudowo – czasowej, zastosowano również analizę widmową impulsu fali ultradźwiękowej. Obserwowano zmiany dwóch podstawowych parametrów widma impulsu, a mianowicie  $f_{max}$  (częstotliwość podstawowa – maksymalna) i B (szerokość pasma przenoszenia). Wartości ich były wyznaczane automatycznie w programie przekształcania impulsu ultradźwiękowego w dziedzinie czasu w rozkład modułu transformaty Fouriera za pomocą FFT. Odnotowano zmiany kształtu widma oraz wartości podstawowych jego parametrów. Gwałtowne zmiany  $f_{max}$  są zauważalne w końcowej fazie odspajania powłoki (rys. 8), co świadczy o wrażliwości tego parametru na zmiany degradacyjne w połączeniu tylko w końcowym etapie istnienia połączenia adhezyjnego. Rejestrowany parametr B odzwierciedla zmiany w połączeniu adhezyjnym w czasie całego przedziału odkształcania próbek (degradowania połączenia) – rys. 9. Użyteczne zastosowanie obydwu parametrów widma impulsu fali ultradźwiękowej jako dodatkowych wskaźników degradacji będzie wymagać jeszcze dodatkowych badań, ustalających ilościowy związek tych parametrów ze zmianami degradacyjnymi w połączeniu adhezyjnym.

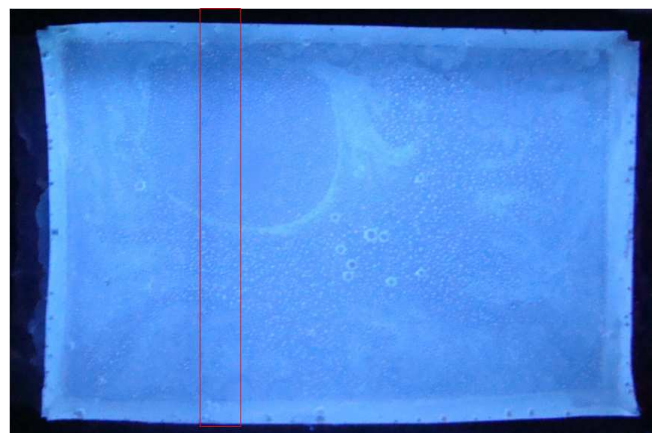
Oprócz zmian parametrów ultradźwiękowych w trakcie degradacji połączenia starano się również zbadać sposób odspajania się powłoki od podłoża. Dlatego przy każdym zapisie wzmocnienia impulsu fali i dodatkowych parametrów ultradźwiękowych prowadzono analizę wzrokową stanu połączenia i dokumentowano ją fotograficznie w świetle dziennym (widzialnym), ultrafioletowym i jako negatyw (rys. 10-12). Przedstawione rysunki nie dają jednoznacznego obrazu miejsc odspajania się powłoki od podłoża. Na zdjęciach jest zauważalny i potwierdzony analizą wzrokową brzegowy efekt odspojenia się powłoki od podłoża. Jedynie zdjęcie w świetle widzialnym i fotografia negatywowa (rys. 10 i 12) uwidaczniają obszary, które mogą być interpretowane jako miejsca odspojenia. Nie potwierdza tego fotografia w świetle ultrafioletowym (rys. 11).

Trzeba stwierdzić, że wskazania analizowanych parametrów ultradźwiękowych były w badaniach degradacji połączenia adhezyjnego w przyjętych warunkach badań, bardziej miarodajne niż ocena wizualna (wzrokowa i fotograficzna).



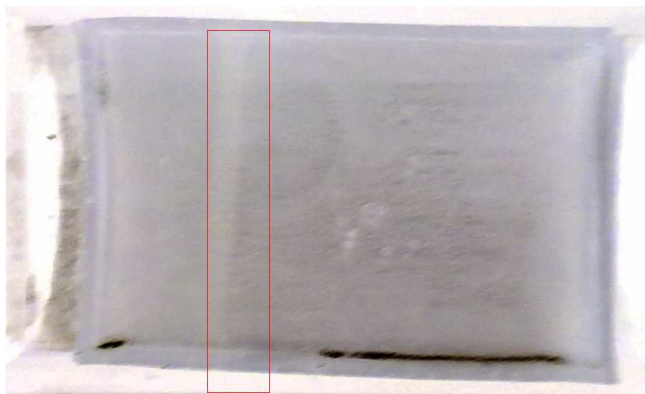
Rys. 10. Widok powłoki w świetle widzialnym; czerwona ramką zaznaczono miejsce odspojenia się powłoki

*Fig. 10. View of the coating in the visible lighting; a place of presumable adhesion loosening of the coating is shown in red frame*



Rys. 11. Widok powłoki w świetle ultrafioletowym; czerwona ramką zaznaczono miejsce przypuszczalnego odspojenia się powłoki

*Fig. 11. View of the coating in the ultraviolet light; in red frame a place of presumable adhesion loosening of the coating is shown*



Rys. 12. Widok powłoki – zdjęcie w negatywie; czerwoną ramką zaznaczono miejsce przypuszczalnego odspojenia się powłoki

*Fig. 11. View of the coating in the ultraviolet light; in red frame a place of presumable adhesion loosening of the coating is shown*

## 5. Wnioski z badań

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy ich wyników sformułowano następujące wnioski:

- Metoda ultradźwiękowa pozwala na prowadzenie ciągłego monitorowania degradacji połączenia adhezyjnego powłoka – podłoże i na ustalenie kinetyki zmian degrado-

wanego połączenia za pomocą fali powierzchniowej przepuszczanej przez obszar połączenia.

- Wzmocnienie impulsu fali ultradźwiękowej może być miarą degradacji połączenia adhezyjnego, ponieważ zależy od ilości energii fali ultradźwiękowej przenikającej przez połączenie i zmienia się w procesie degradacji, osiągając najmniejszą wartość po odspojeniu powłoki od podłoża.
- W badaniach degradacji połączenia adhezyjnego powłoka – podłoże, analiza widmowa impulsu fali ultradźwiękowej może być źródłem dodatkowych informacji o przebiegu degradacji takiego połączenia, w stosunku do analizy amplitudowo-czasowej.
- Ocena wzrokowa połączenia powłoka – podłoże na podstawie rejestracji fotograficznej obszaru strefy połączenia adhezyjnego w świetle widzialnym, ultrafioletowym i analiza negatywowa nie daje jednoznacznej informacji o jego stanie i o sposobie odspajania się powłoki od podłoża.

## Literatura

- [1] Jóska M.: Metodologiczne aspekty oceny przyczepności powłok regeneracyjnych metodą ultradźwiękową. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2002.
- [2] Kostrzewa S., Nowak B.: Podstawy regeneracji części pojazdów samochodowych. WKiŁ, Warszawa, 1986.
- [3] Mańczak R., Jóska M., Ulbrich D.: Analysis of car body vibrations in exploitation conditions. Proc. of the Conference Intertech – 2010, Poznań, p. 87-90.