

Michał KURPIŃSKI

INSTYTUT PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN,
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice

Identyfikacja wad technologicznych połączeń klejonych z zastosowaniem termografii aktywnej dla potrzeb przemysłu motoryzacyjnego

Mgr inż. Michał KURPIŃSKI

Absolwent Wydziału Mechanicznego Technologicznego, Politechniki Śląskiej (2013). Od 2013 pozostaje doktorantem Instytutu Podstaw Konstrukcji Maszyn na kierunku Budowa i Eksploatacja Maszyn. Aktualnie prowadzi prace projektowe związane z przetwarzaniem obrazu oraz badaniami termograficznymi do zastosowań przemysłowych.



e-mail: michal.kurpinski@polsl.pl

Streszczenie

W artykule skupiono się na termograficznej metodzie detekcji wad szkieletu kleju. Przeprowadzone zostały rozważania teoretyczne oraz doświadczalne (z zastosowaniem termografii aktywnej metodą impulsową) związane z przepływem ciepła w obszarach gdzie występuje ciągła warstwa kleju oraz tam gdzie występuje defekt. W rezultacie dokonano kalibracji parametrów pomiaru i potwierdzono założenia teoretyczne dla prostej próbki testowej posiadającej wyraźną nieciągłość.

Słowa kluczowe: termografia impulsowa, NDT, połączenia klejone.

Identification of technological defects of bonded joints for the automotive industry needs using active thermography

Abstract

A bonded joint is one of the most popular types of joints in the production process of modern cars [1, 2]. The main reason for that is its uncommonly good ownerships i.e. durability, visual and economical properties [2]. To keep this features, it is necessary to provide continuity of all joints. However, there commonly occur the defects like delamination, poor cure, cracks, porosity, voids, "kissing" bonds and discontinuity of application in the industry environment (Fig. 1). There are many NDT methods (non-destructive tests) to disallow appearing these defects in the final product. In this paper, the active thermography method of NDT is described (Fig. 2). Pulse thermography as well as the simplest active thermography method, whose main idea is shown in Fig. 3, are well-known. There were made many theoretical consideration about various configurations of layers, which could occur in bonded joints (Figs. 4 and 5, Tab. 1). To verify these considerations, there was constructed a test stand (Fig. 7) and there was prepared a sample with a broken path of glue shown in Fig. 8. The results of the experimental research confirmed that earlier calculations of differences in the velocity between sectors with and without defects (Fig. 9) were right. On the other hand, a couple of the results obtained for various heating times (Fig. 10) was helpful to choose the best time of thermal influence duration.

Keywords: pulse thermography, NDT, bonded joints.

1. Wstęp

W przemyśle motoryzacyjnym ciągle rozwija się technologie nierozłącznego spajania blach karoseryjnych oraz innych elementów wchodzących w skład podwozia i nadwozia samochodu. Wśród różnych metod łączenia elementów współczesnych samochodów znaczącą rolę odgrywiają połączenia klejone [1, 2]. Kleje pełnią różne funkcje przy budowie pojazdu. Poza podstawową zapewniającą utworzenie trwałego i wytrzymałego połączenia stosowane są również jako materiał uszczelniający lub tłumiący drgania. Za pomocą klejów łączy się stalowe elementy karoserii pojazdów. Ponadto połączenia klejone stosowane są do mocowania szyb, spojlerów, emblematów, listew ozdobnych, wewnętrznych wykładzin itp. [3].

Połączenia klejone posiadają liczne zalety wpływające na podniesienie trwałości karoserii i obniżenie kosztów produkcji [4, 2]. Obok zalet istnieją również wady, które mogą przyczynić się do pojawienia defektów złącza zarówno na etapie procesu produkcji jak również w trakcie eksploatacji [2, 3]. Ocena własności złącza klejonego na etapie procesu produkcji oraz w trakcie eksploatacji jest przedmiotem licznych badań prowadzonych przez różne jednostki naukowo badawcze [4, 5].

Z punktu widzenia wytwórców samochodów istnieje potrzeba skutecznej detekcji wad technologicznych połączeń klejonych. Aktualnie w większości przypadków wykrywanie wad technologicznych realizowane jest w ramach programu statystycznej kontroli procesu [6] poprzez stosowanie inwazyjnych i nieniszczących metod badawczych. Metody inwazyjne są dobrze scharakteryzowane w monografiach, normach europejskich, normach krajowych i zakładowych (np. PN-EN 15274:2009, PN-EN 15190:2009) [7, 8] i umożliwiają skuteczną ocenę stanu połączenia. Ich główną wadą są wysokie koszty m.in. wynikające z konieczności całkowitego zniszczenia podzespołu. Z tego powodu, by ograniczyć potrzebę częstego ich stosowania, połączenia klejone dodatkowo bada się metodami nieniszczącymi. Istnieje wiele nieniszczących metod badawczych dedykowanych do detekcji różnych wad materiałowych i nieciągłości strukturalnych [9]. Wśród nich do oceny stanu połączeń klejonych stosuje się metody wibroakustyczne [5], spektroskopowe [10], termograficzne [11, 12], holografii optycznej [13, 14], emisji akustycznej [15], radiograficzne [16] oraz ultradźwiękowe [17]. W praktyce przemysłowej jak dotąd najczęściej stosuje się metody ultradźwiękowe, które ze względu na specyfikę badań nie pozwalają na szybką inspekcję dużych fragmentów karoserii. Alternatywą do badań ultradźwiękowych są badania termograficzne, których istotę, wady i zalety oraz przykłady zastosowań do badania połączeń klejonych zaprezentowano w dalszej części artykułu.

2. Defekty połączeń klejonych

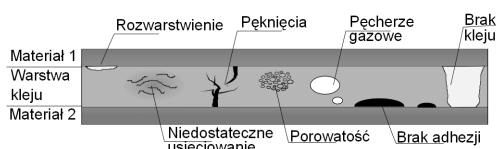
Złącze klejone powstaje w wyniku wprowadzenia substancji klejącej (kleju) najczęściej między dwa elementy łączone i zapewnienie warunków pozwalających na powstanie połączenia adhezyjnego między warstwą kleju a powierzchniami łączonych elementów. Prawidłowo wykonane złącze klejone ma wiele zalet takich jak np. [2]:

- możliwość wykorzystania pełnej wytrzymałości materiałów łączonych (warstwa kleju nie wywołuje naprężeń w materiale i nie osłabia części łączonych);
- możliwość uzyskania złącza bez konieczności wykonywania otworów lub innych dodatkowych operacji technologicznych;
- równomierne rozłożenie naprężeń na całej powierzchni złącza;
- zdolność tłumienia drgań;
- zdolności uszczelniające;
- możliwość łączenia dowolnych materiałów bez niebezpieczeństwa powstawania degradacji powierzchni styku np. korozji elektrochemicznej.

Zalety te powodują, że w przemyśle motoryzacyjnym kleje stosowane są bardzo chętnie do połączeń strukturalnych podzespołów karoserii, połączeń elastycznych w tym połączeń zawijanych (gdzie pełnią rolę uszczelniającą) i innych. Do tego celu stosuje się różne kleje epoksydowe (EP) oraz poliuretanowe (PUR) [2]. Aplikacja połączeń klejonych przekłada się m.in. na usprawnienie i uproszczenie a zatem i obniżenie kosztów procesu montażu, ograniczenie czynnności technologicznych wymagających obróbki skrawaniem, zmniejszenie hałasu na stanowisku pracy, podniesienie trwałości poprzez zwiększenie trwałości zmęczeniowej, wydłużenie czasu bezpiecznej eksploatacji, obniżenie kosztów pro-

dukcji np. poprzez zmniejszenie liczby spoin punktowych, obniżenie masy pojazdu poprzez optymalizację zużycia stali karoseyjnej i inne [3].

Poza licznymi zaletami połączeń klejonych, istnieją również czynniki mogące skutkować powstawaniem defektów i negatywnie wpływać na wytrzymałość oraz szczelność złącza klejonego. Można tutaj ogólnie wskazać czynniki technologiczne, powstałe w wyniku wystąpienia błędów produkcyjnych i eksploatacyjne, pojawiające się w trakcie użytkowania. Za typowe błędy technologiczne (produkcyjne) można uznać niewłaściwe przygotowanie powierzchni elementów klejonych, nierównomierne naniesienie warstwy kleju lub jego niewłaściwe zestalenie na skutek nieprawidłowych parametrów procesu. Czynniki eksploatacyjne to głównie zbyt długi czas eksploatacji, podczas którego zachodzi starzenie złącza i/lub negatywne oddziaływanie na połączenie klejone substancji chemicznych, wilgoci, zbyt wysokiej temperatury czy też długotrwałych przeciążeń [1].



Rys. 1. Najczęściej występujące defekty złączy klejonych (na podstawie [11])
Fig. 1. Most common defects of bonded joints (based on [11])

Typowymi defektami (rys. 1) mogącymi powstać w złączu klejonym w wyniku oddziaływania wyżej wymienionych czynników są [11]:

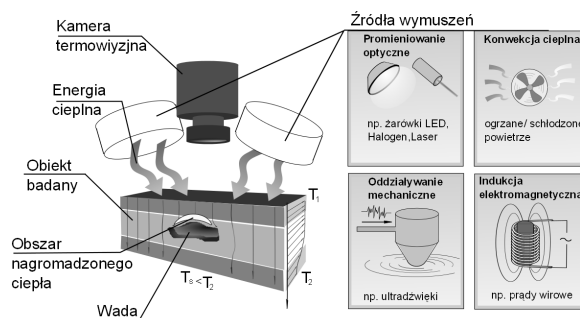
- rozwarstwienie – polegająca na utracie spójności warstw złącza. Do tego typu uszkodzeń najczęściej dochodzi podczas niekorzystnych oddziaływań temperaturowych i mechanicznych, szczególnie w miejscach gdzie powierzchnie nie zostały właściwie oczyszczone oraz w przypadku nadmiernego rozcieńczenia substancji wiążących. Defekty tego typu powstają głównie w trakcie eksploatacji złącza;
- niedostateczne usieciowanie – występuje w przypadku niedokładnego wymieszania składników kleju, powodującego niedostateczne usieciowanie polimeru, czego wynikiem jest niejednorodność struktury, a przez to jej lokalny spadek własności wytrzymałościowych;
- pęknięcia – powstają m.in. w wyniku wystawienia złącza na działanie sił udarowych lub pod wpływem długotrwałego oddziaływania sił zmęczeniowych. W rezultacie może dojść do skruszenia struktury kleju i utraty spójności. Postać pęknięć uzależniona jest od kierunku i rodzaju oddziaływania mechanicznego. Najczęściej pęknięcie powstaje wskutek niewłaściwej eksploatacji połączenia lub w miejscach innych wad zaburzających integralność strukturalną złącza;
- porowatość – podczas mieszania, na skutek spienienia kleju, może dojść do uwięzienia w nim dużej ilości niewielkich pęcherzy powietrza, które po zestaleniu warstwy kleju powodują spadek własności wytrzymałościowych złącza;
- pęcherze gazowe – podobnie jak w przypadku porowatości, na skutek niedbałości w przygotowaniu kleju, może dojść do uwięzienia w nim dużej ilości powietrza co jest o tyle groźne, że w miejscu jego występowania, na całym jego przekroju, złącze nie przenosi żadnych działających na nie sił;
- brak adhezji („kissing bond”) – z powodu niedbałości w oczyszczaniu powierzchni klejonych, mogą pozostać na nich plamy oleju lub innych cieczy z wcześniejszych procesów. Te płyny nie łączą się z klejem, natomiast zapewniają ciągłość strukturalną na skutek działania sił przypowierzchniowych. W przypadku niektórych metod badawczych wykrycie tego typu defektu może być problematyczne, gdyż bardzo wyraźnie obrazują one kontrast między klejem i powietrzem, a nie między klejem i cieczą;
- brak lub niewystarczająca ilość kleju – częstym błędem podczas wykonywania złącza klejonego jest jego niewłaściwa aplikacja

tj. nierównomierność w nałożonej warstwie kleju lub braki w jej ciągłości, co zmniejsza całkowitą, właściwą powierzchnię przenoszenia obciążeń, a także zwiększa wrażliwość złącza na uszkodzenie.

3. Termograficzne badania nieniszczące połączeń klejonych

Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat opracowano wiele różnorodnych metod badawczych pozwalających w sposób nieinwazyjny potwierdzić poprawność wykonanego produktu, zweryfikować nowo wdrażany proces itp. Metody te klasyfikuje się, jako metody nieniszczące (NDT – ang. Non Destructive Testing) a wśród nich można wymienić metody termografii aktywnej. Termografia aktywna stanowi stosunkowo nową metodę detekcji i identyfikacji uszkodzeń strukturalnych w tym połączeń klejonych [9, 14], stąd brak odpowiednich norm precyzujących procedury badawcze.

Istotą termografii aktywnej jest oddziaływanie cieplne na badany obiekt (o odpowiednio dobranym przebiegu) i termograficzna obserwacja odpowiedzi obiektu na to oddziaływanie (rys. 2). Odpowiedzią obiektu na wymuszenie cieplne są lokalne zmiany w rozkładzie wartości temperatury wywołane różnicami w propagacji fali cieplnej napotykejacej niejednorodności w strukturze wewnętrznej badanej struktury. Wszelkie niejednorodności strukturalne, np. pęknięcia, rozwarstwienia, pęcherze itp. charakteryzują się odmiennymi warunkami dyfuzji ciepła, co można wykryć obrazując rozkład temperatury na obrazie termograficznym.



Rys. 2. Idea termografii aktywnej (T_1 – temperatura wejściowa, T_2 – temperatura wyjściowa, a T_s – to temperatura wyjściowa w miejscu wystąpienia wady) (na podstawie [11])

Fig. 2. Concept of active thermography (T_1 – input temperature, T_2 – output temperature, T_s – output temperature at defect location) (based on [11])

Oddziaływanie cieplne na badany obiekt może być zrealizowane metodami optycznymi (np. lampami halogenowymi, błyskowymi, promiennikami podczerwieni, laserami), metodami mechanicznymi (np. wzbudnikami ultradźwiękowym), oraz metodami elektromagnetycznymi (prądy wirowe) (rys. 2).

W zależności od lokalizacji kamery termowizyjnej rozróżnia się metodę transmisyjną (zwaną również projekcją tylną), w której źródło stymulacji cieplnej oraz kamera termowizyjna znajdują się po przeciwnych stronach badanego obiektu i metodę refleksyjną (czyli inaczej projekcję przednią), polegającą na umieszczeniu źródła oddziaływania cieplnego i kamery termowizyjnej po tej samej stronie badanego obiektu.

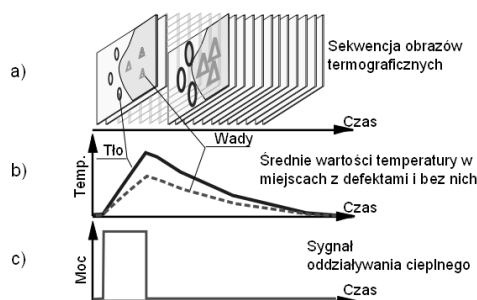
Bez względu na metodę oddziaływania cieplnego badania metodami termografii aktywnej wymagają odpowiedniego ukształtowania sygnału pobudzenia cieplnego. W praktyce badawczej najczęściej stosowane jest pobudzenie impulsowe i modulacyjne, stąd termografia aktywna dzieli się na termografię impulsową (ang. Pulsed thermography) i termografię synchroniczną (modulacyjną) (ang. Lock-in thermography). Inne znane metody termografii aktywnej są kombinacjami i/lub modyfikacjami metod wyżej wymienionych jak np. termografia impulsowo-fazowa (ang. pulsed-phase thermography). W artykule scharakteryzowano metodę impulsową. Szerszy opis innych metod można znaleźć w licznych publikacjach krajowych [9, 18] i zagranicznych [3, 11, 12].

3.1. Termografia impulsowa

Termografia impulsowa jest techniką badań nieniszczących, polegającą na wyznaczeniu i analizie rozkładu temperatury na powierzchni obiektu badanego pobudzonego impulsem cieplnym o określonym czasie trwania. Wymuszenie może stanowić również seria impulsów, a rejestracja obrazów termograficznych może mieć miejsce zarówno podczas nagrzewania jak i stygnięcia badanego obiektu.

Impuls wymuszenia cieplnego może trwać kilka milisekund dla materiałów o wysokiej przewodności cieplnej (np. metale) lub kilku sekund w przypadku materiałów o niskiej przewodności cieplnej. W czasie trwania impulsu cieplnego temperatura powierzchni obiektu badanego rośnie, natomiast po jego zakończeniu zaczyna spadać z powodu dyfuzji ciepła w głąb materiału. Obecność defektu zmienia szybkość dyfuzji.

W czasie pomiaru rejestrowana jest sekwencja obrazów termograficznych, na podstawie której wyznaczane są charakterystyki fazy stygnięcia lub fazy nagrzewania i stygnięcia dla różnych obszarów badanego obiektu. Defekt strukturalny lokalizowany jest dzięki istnieniu różnych wartości stałych czasowych nagrzewania (chłodzenia) dla materiału rodzimego i defektu (rys. 3) [19].



Rys. 3. Istota termografii impulsowej: a) sekwencja obrazów z zaznaczonymi punktami w obszarach zdefektowanym i wolnym od defektu, b) charakterystyki odpowiedzi cieplnej dla określonych obszarów c) postać impulsu oddziaływania cieplnego (na podstawie [12])

Fig. 3. Essence of pulse thermography: a) sequence of images with markers at the fields with defects and without them. b) thermal response characteristics of determined sectors c) thermal influence pulse appearance (based on [12])

Na potrzeby identyfikacji defektów na zarejestrowanych obrazach często stosowane są dodatkowe procedury przetwarzania obrazów polegające na wyznaczaniu parametrów wiążących wartości temperatury w miejscu defektu i w miejscu wolnym od defektu [20].

Głównym ograniczeniem termografii impulsowej jest trudność w określeniu rozmiaru i głębokości defektu. W zależności od wielkości wady pozwala ona wykrywać głównie wady przypowierzchniowe. Ograniczeniem jest również konieczność zapewnienia jednorodnej emisyjności powierzchni obiektu badanego.

3.2. Przykład zastosowania termografii impulsowej do identyfikacji nieciągłości w połączeniach klejonych

Niektóre defekty połączeń klejonych mogą być wykryte z zastosowaniem termografii impulsowej. W głównej mierze mogą to być defekty technologiczne jak np. miejscowy brak kleju.

Od strony fizycznej proces propagacji fali cieplnej wywołanej wymuszeniem impulsowym można prześledzić na przykładzie prostego, scharakteryzowanego w licznej literaturze [18,19,20], prostego modelu przedstawionego na rys. 4.

Dla każdej odseparowanej warstwy struktury można założyć, że jeżeli takie parametry fizyczne jak jej ciepło właściwe, przewodność cieplna i gęstość będą stałe w czasie to słuszne będzie przyjęcie jednowymiarowego modelu przepływu ciepła (rys. 4) reprezentowanego przez następujące równanie dyfuzji w ciele stałym [18]:

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

gdzie: $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ - współczynnik dyfuzyjności cieplnej materiału,

m^2/s ; λ - przewodność cieplna, $W/m \cdot K$; ρ - gęstość, kg/m^3 ; c_p - ciepło właściwe, $J/kg \cdot K$.

Stosując przekształcenie Laplace'a równanie dyfuzji (1) można przedstawić następująco [18]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{T}{L^2} = 0, \quad (2)$$

gdzie: $L = \sqrt{\frac{\alpha}{s}}$ - droga dyfuzji określająca jak głęboko wnika ciepło w materiał, m ; s - zmienna zespolona przekształcenia Laplace'a.

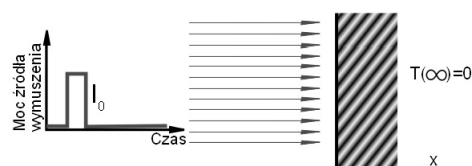
Rozwiązaniem równania (2) jest następujące wyrażenie [18]:

$$T(s) = A(s)e^{\frac{x}{L(s)}}, \quad (3)$$

Stałą całkowania $A(s)$ wyznacza się dla warunku brzegowego, zatem jeśli założymy, że obiekt będzie pobudzony strumieniem ciepła o dowolnym kształcie, równanie (3) można przedstawić w następującej postaci [18]:

$$T(s) = \frac{q_0(s)L(s)}{\lambda} e^{\frac{x}{L(s)}}, \quad (4)$$

gdzie: q_0 - strumień ciepła.



Rys. 4. Wnikanie impulsu cieplnego w głąb materiału nieskończenie grubego (na podstawie [18])

Fig. 4. Penetration of a thermal pulse into infinitely thick material (based on [18])

Jeżeli porcja energii dostarczona do materiału będzie miała charakter impulsu Diraca o amplitudzie I_0 , strumień cieplny na granicy ośrodka przyjmie postać $q_0(t) = I_0 \delta(t)$, W/m^2 a po przekształceniu Laplace'a $q_0(s) = I_0$, J/m^2 . Zatem równanie (4) można przedstawić następująco [18]:

$$T(s) = \frac{I_0 L(s)}{\lambda} e^{\frac{x}{L(s)}} = \frac{I_0}{\sqrt{\lambda \rho c_p} \sqrt{s}} e^{-x \sqrt{\frac{s}{\alpha}}} = \frac{I_0}{\varphi \sqrt{s}} e^{-x \sqrt{\frac{s}{\alpha}}}, \quad (5)$$

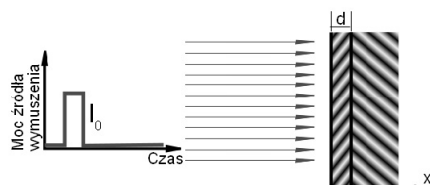
gdzie: $\varphi = \sqrt{\lambda \rho c_p}$ - efuzyjność cieplna materiału.

Stosując odwrotną transformatę Laplace'a można wyznaczyć odpowiedź termiczną materiału na impulsowe pobudzenie cieplne i przedstawić ją w następujący sposób [18]:

$$T(x, t) = \frac{I_0}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4at}} = \frac{I_0}{\sqrt{\pi \lambda \rho c_p} t} e^{-\frac{x^2}{4at}} = \frac{I_0}{\varphi \sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4at}}, \quad (6)$$

Z równania (6) wynika, że wartość temperatury na powierzchni materiału ($x=0$) zależy od odwrotności pierwiastka z czasu. Jednak w przypadku połączeń klejonych blach karoseryjnych warstwą przejmującą ciepło jest stal, której przewodność cieplna jest wysoka (tab. 1) stąd wartość maksymalna temperatury będzie mniejsza. Wynika z tego, że w celu zapewnienia optymalnych warunków badania struktury klejonej konieczne jest doprowadzenia do próbki większej ilości energii cieplnej w porównaniu np.

z materiałami kompozytowymi o osnowie polimerowej. Głębokość wnikania energii cieplnej do badanej próbki podczas wymuszenia impulsowego można określić na podstawie efektywnej drogi dyfuzji $L = 2\sqrt{\alpha t}$. Przedstawiona analiza pokazuje również, że na podstawie charakterystyki nagrzewania powierzchni badanej próbki w czasie (wyznaczonej w wyniku pomiaru z zastosowaniem kamery termowizyjnej), możliwe jest wyznaczenie dyfuzyjności cieplnej materiału. Należy jednak pamiętać, że rozważania będą prawdziwe dla powierzchni o emisyjności zbliżonej do jedności. W przypadku badania blach karoseryjnych, których emisyjność jest dużo mniejsza od jedności konieczne jest naniesienie odpowiedniej wysokoemisyjnej warstwy (np. czarnej farby).



Rys. 5. Wnikanie impulsu cieplnego w głąb materiału nieskończenie grubego, dwuwarstwowego (na podstawie [18])

Fig. 5. Penetration of a thermal pulse into infinitely thick double layered material (based on [18])

Przedstawiona analiza dotyczyła tylko jednej warstwy materiału poddanej wymuszeniu impulsowemu. Warto jednak przeanalizować jak będzie przebiegał proces wnikania ciepła w strukturę wielowarstwową, którą jest połączenie klejone. Strukturę taką można uprościć do modelu dwuwarstwowego [18] przedstawionego na rys. 5. Dla każdej z obu warstw struktury o efuzyjnościach φ_1 i φ_2 słuszne będą wcześniejsze rozważania dotyczące jednowymiarowego przepływu ciepła w ciele stałym. Rozwiązując równania i przyjmując odpowiednie warunki brzegowe możliwe jest wyznaczenie odpowiedzi termicznej struktury na wymuszenie impulsowe na jej powierzchni ($x=0$) i przedstawienie w postaci następującego wyrażenia [18]:

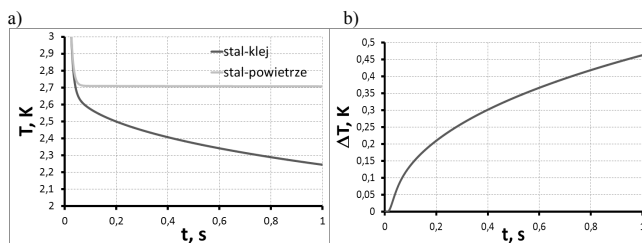
$$T(x=0, t) = \frac{I_0}{\varphi_1 \sqrt{\pi}} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2} \right)^i e^{-\frac{i^2 d^2}{\alpha t}} \right] = \frac{I_0}{\varphi_1 \sqrt{\pi}} + K_{\delta}, \quad (7)$$

gdzie: φ_1 , φ_2 - efuzyjności materiałów struktury; α - dyfuzyjność warstwy pierwszej; d - grubość warstwy pierwszej; K_{δ} - kontrast termiczny.

Tab. 1. Parametry fizyczne rozpatrywanych warstw połączenia klejonego
Tab. 1. Physical parameters of the considered bond structure layers

	stal	powietrze	żywica epoksydowa
λ , W/m*K.	43,00	0,02	0,20
ρ , kg/m ³	7800,00	1,20	1300,00
c_p , J/kg*K.	473,00	700,00	1700,00
φ	12595,40	4,10	664,83

Korzystając z zależności (7) i zakładając, że pierwsza warstwa struktury jest blachą stalową o grubości $d=1$ mm i parametrach fizycznych zestawionych w tabeli 1, można przeanalizować dwa przypadki istotne dla potrzeb detekcji defektów połączenia klejonego. W pierwszym przypadku można przyjąć, że warstwa druga struktury będzie klejem epoksydowym a w drugim przypadku warstwa druga może być powietrzem jeśli nastąpi nieciągłość warstwy kleju. Na rysunku 6 przedstawiono porównanie odpowiedzi termicznej struktur stal – klej i stal – powietrze w czasie dla wymuszenia termicznego 10 kJ/m^2 odpowiadającego wymuszeniu lampą błyskową o czasie błysku ok. 50 ms [19]. Uwzględniając parametry fizyczne analizowanych materiałów a w szczególności ich efuzyjności należało się spodziewać, że w przypadku braku kleju temperatura na powierzchni struktury będzie spadała wolniej niż w przypadku gdy klej jest obecny.



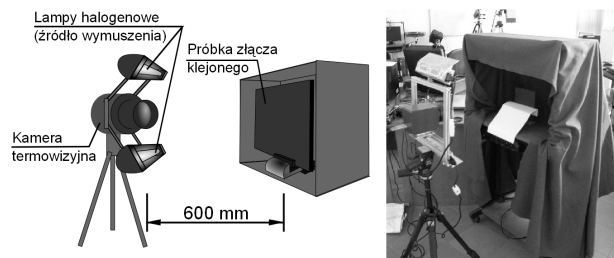
Rys. 6. Porównanie odpowiedzi termicznych dla struktur stal-klej (a), różnica temperatur dla wyznaczonych odpowiedzi termicznych (b). Energia wymuszenia termicznego $I_0=10 \text{ kJ/m}^2$

Fig. 6. Comparison of the thermal responses for steel-glue and steel-air structures (a), temperature difference for the determined thermal responses (b). Thermal influence energy $I_0=10 \text{ kJ/m}^2$

Analizując wykres różnic temperatury łatwo zauważyć, że znaczące różnice temperatury zaczną być dostrzegalne dopiero po około 1s od chwili wymuszenia cieplnego.

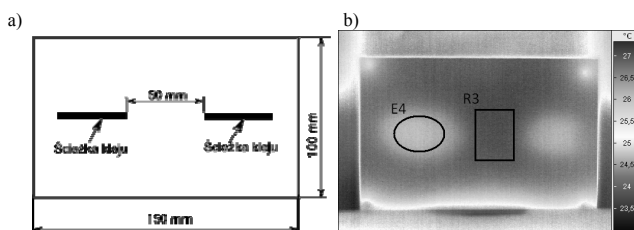
4. Badania eksperymentalne

W celu weryfikacji rozważań analitycznych przeprowadzono badania eksperymentalne mające na celu wyznaczenie charakterystyk temperaturowych połączenia klejonego w trakcie impulsowego wymuszenia cieplnego. W tym celu przygotowano stanowisko badawcze (rys. 7) składające się z kamery termograficznej Vario-Cam Hr (Infratec) z matrycą bolometryczną o rozdzielczości 640×480 pikseli i rozdzielczości temperaturowej około $0,08 \text{ K}$, źródła wymuszenia cieplnego, którym były dwie lampy halogenowe o mocy 1000 W każda, modułu synchronizującego i komputera wraz z oprogramowaniem do rejestracji i analizy sekwencji obrazów termograficznych.



Rys. 7. Stanowisko do badania próbek złączy klejonych metodą termografii impulsowej
Fig. 7. The stand for testing bonded joint samples with the pulsed thermography method

Badaniom poddano próbkę składającą się z dwóch blach karoseryjnych o grubości 1 mm , połączonych klejem poliuretanowym. Przy czym dla potrzeb symulacji defektu połączenia klejonego ścieżka kleju była przerwana (rys. 8a). Jedną z powierzchni blach, poddawanej obserwacji termograficznej, pokryto warstwą czarnej farby w celu zwiększenia emisyjności.



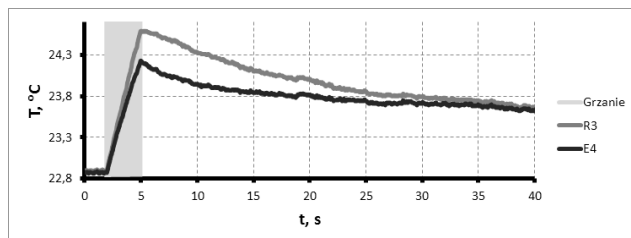
Rys. 8. Cechy geometryczne badanej próbki wraz z położeniem ścieżek kleju (a); obraz termograficzny zarejestrowany w trakcie nagrzewania i zdefiniowane obszary pomiarowe (b).

Fig. 8. Geometrical features of the test sample with glue paths location (a), thermographic image observed during heating and measuring sectors (b)

W trakcie badań przeprowadzono szereg eksperymentów mających na celu wyznaczenie efektywnego czasu oddziaływania cieplnego, zapewniającego najlepszy kontrast obszaru symulowa-

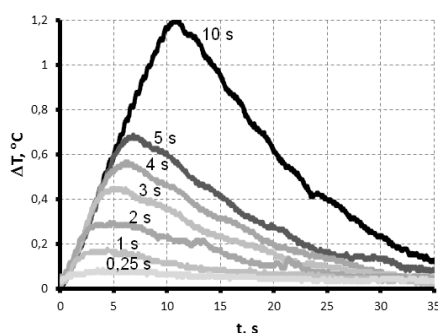
nego defektu na obrazie termograficznym. Przyjęto następujące czasy pobudzenia cieplnego próbek: 0,25; 1; 2; 3; 4; 5; 10 s. Na rysunku przedstawiono przykładowy obraz termograficzny dla chwili czasu gdy kontrast między powierzchnia klejoną a powierzchnią nie sklejoną był największy. Na obrazie zdefiniowano obszary pomiarowe w obrębie których wyznaczano średnie wartości temperatury, które po uszeregowaniu w funkcji czasu utworzyły przebiegi temperaturowe poddane dalszej analizie.

Na rysunku 9 zaprezentowano przykładowy przebieg wartości średnich temperatury w obszarze gdzie występuje warstwa kleju (E4) i obszarze bez warstwy kleju (R3), dla czasu wymuszenia cieplnego 3 s. Dostrzegalne są wyraźne różnice w charakterystykach zarówno dla fazy nagrzewania i chłodzenia.



Rys. 9. Porównanie przebiegów średnich wartości temperatury w obszarach R3 i E4 dla wymuszenia cieplnego o czasie trwania 3s
Fig. 9. Comparison of the average temperature in R3 and E4 sectors for thermal influence duration of 3s

W celu oceny wpływu czasu nagrzewania a zatem ilości dostarczonej energii cieplnej na wykrywalność defektu na rysunku 10 porównano przebiegi różnic średniej temperatury w obszarach wolnym od defektu E4 i obszarze defektu R3. Jak należało się spodziewać różnice temperatury są proporcjonalne do ilości dostarczonej energii. Łatwo zauważyć, że dla czasu wymuszenia cieplnego poniżej 1 s różnice są bardzo niewielkie. Przy czasie nagrzewania 0,25 s nie była możliwa lokalizacja obszaru defektu na obrazie termograficznym ze względu na zbyt mały kontrast temperaturowy.



Rys. 10. Porównanie przebiegów średnich wartości różnic temperatury w obszarach R3 i R4 dla różnych czasów trwania wymuszeń cieplnych
Fig. 10. Comparison of the average temperature differences in R3 and E4 sectors for various thermal influence duration

5. Wnioski

Przedstawione badania miały charakter badań wstępnych mających na celu ocenienie możliwości zastosowania najprostszej metody termografii aktywnej – termografii impulsowej do detekcji nieciągłości połączeń klejonych stosowanych do łączenia blach karoseryjnych w przemyśle motoryzacyjnym. Wyniki potwierdzają przydatność termografii impulsowej do detekcji nieciągłości w połączeniu klejonym wykonanym z zastosowaniem kleju poliuretanowego. W trakcie badań zaobserwowano, że defekt najlepiej ujawnia się na obrazie termograficznym w fazie nagrzewania, co pozwala również na pozbycie się zakłóceń na jakie narażone są długotrwałe pomiary podczas chłodzenia. Na tym etapie możliwe jest pozyskanie obrazu o jak najlepszym kontraście temperaturowym między defektem a obszarem wolnym od defektu. Zaobser-

wowano, że dla zastosowanego źródła wymuszenia cieplnego i kamery termowizyjnej optymalnym czasem wymuszenia cieplnego pod kątem detekcji obszaru defektu zarówno w fazie nagrzewania jak i chłodzenia jest czas 3 s. Dla tego czasu nagrzewania, zarówno krzywa chłodzenia jak i grzania są wolne od zakłóceń, które występują dla krótszych czasów wymuszeń. Również czas naświetlania dłuższy niż 3 s był niepotrzebny gdyż wzrastała jedynie różnica wartości temperatury między obszarami z defektami i bez nich, co nie wnosi żadnej dodatkowej informacji odnośnie rozmieszczeniu kleju w badanym złączu. Zagadnienie detekcji obszaru zawierającego defekt, jest kluczowym elementem badań tego typu, ponieważ w warunkach przemysłowych wielkość i położenie nieciągłości nie jest tak oczywiste. W trakcie badań wykrywano nieciągłość ścieżki kleju o znacznych rozmiarach. W rzeczywistości tego typu nieciągłości występują bardzo rzadko, z tego powodu kolejnym etapem badań będzie ocena granicznych rozmiarów defektów jakie można wykrywać metodami termografii aktywnej. W tym celu konieczne będzie zastosowanie różnych metod przetwarzania i analizy termogramów.

6. Literatura

- [1] Kowalczyk J.: Nieniszczące metody oceny połączeń klejonych. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, 2008, nr 63, s. 45-50.
- [2] Vedula S., Infrared thermography and ultrasonic inspection of adhesive bonded structures, Overview and validity. Clemson University, 2010.
- [3] Adams R. D.: Adhesive bonding: science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited, England 2005.
- [4] Rams B.: Zastosowanie klejenia w połączeniach zgrzewanych metodą FSW. Przegląd Spawalnictwa, 2009, nr 3, s. 33-38.
- [5] Maeva E. Yu., Seviaryna I., Chapman G. B., Severin F. M.: Monitoring of adhesive cure process and following evaluation of adhesive joint structure by acoustic techniques. University of Windsor, Windsor, Canada 2006.
- [6] Salaciński T.: SPC statystyczne sterowanie procesami produkcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [7] PN-EN 15274:2009 kleje ogólne przeznaczenia do połączeń konstrukcyjnych, wymagania i metody badań.
- [8] PN-EN 15190:2009 metody badań do oceny długookresowej trwałości klejowych połączeń konstrukcyjnych metali.
- [9] Onoszko K.: Metody stosowane w badaniach nieniszczących. Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 2012, nr 41, s. 11-14.
- [10] Allin J. M.: Disbond detection in adhesive joints using low-frequency ultrasound. University of London, 2002.
- [11] Srajbr C., Dillenz A.: Active thermography – NDT method for structural adhesive and mechanical joints. Automotive Circle International, 2012.
- [12] Shin P. H.: Non-destructive inspection in adhesively bonded joints using pulsed phase thermography. Raleigh, North Carolina 2013.
- [13] Huke P., Focke O., Falldorf C., Von Kopylow C., Bergmann R.: Contactless defect detection using optical methods for non destructive testing. BIAS Bremen Institute of Applied Beam Technology, Bremen, Germany 2011.
- [14] Heida J.H., Platenkamp D. J.: Evaluation of in-service non-destructive inspection methods for composite aerospace structures. National Aerospace Laboratory NLR, 2011.
- [15] Multimode adhesive bond testing application guide. Olympus, http://www.olympus-ims.com/pl/downloads/download/?file=285213057&fl=en_US (stan na dzień: 14.10.2014).
- [16] Vontobel P., Lehmann E., Frei G.: Neutrons for the study of adhesive connections. Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland 2004.
- [17] Stachurski M.: Nowoczesne metody ultradźwiękowego badania materiałów oraz nowoczesne przetworniki ultradźwiękowe. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2007, nr 4, s. 45-51.
- [18] Więcek B., May G. D.: Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania. Wydawnictwo PAK, 2011.
- [19] Minkina W.: Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [20] Maldague X. P. V.: Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. John Wiley & Sons, INC., 2001.