

Michał JUREK¹
 Katarzyna MAJEWSKA²
 Magdalena MIELOSZYK³
 Wiesław OSTACHOWICZ⁴
 Leonard ZIEMIAŃSKI⁵

ANALIZA POŁĄCZENIA PŁYTA GFRP – USZTYWNIENIE Z WYKORZYSTANIEM WIBROTERMOGRAFII

W związku z dynamicznym rozwojem metod projektowania i wytwarzania materiałów kompozytowych, zaobserwować można ich zwiększającą się powszechność w wielu gałęziach przemysłu. Materiały kompozytowe znaleźć można również, w takich zastosowaniach, gdzie kluczowe znaczenie ma bezpieczeństwo konstrukcji. Stąd też rozpowszechnieniu kompozytów jako materiałów konstrukcyjnych, towarzyszy ciągły rozwój nieniszczących metod wykrywania uszkodzeń i oceny stanu technicznego konstrukcji.

W pracy przedstawiono wstępne rezultaty badań laboratoryjnych, których celem była próba oceny przydatności metody termografii aktywnej w badaniu stanu połączenia klejowego płyty i profilu kompozytowego. Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z kompozytów włóknistych GFRP (ang. *Glass Fibre Reinforced Polimer*). Na podstawie zarejestrowanych sekwencji termogramów, przeprowadzona została analiza porównawcza, która pozwoliła na skuteczne zlokalizowanie defektu w postaci wady połączenia płyta – usztywnienie.

Słowa kluczowe: wibrotermografia, kompozyty włókniste, badania nieniszczące, połączenia klejone

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Michał Jurek, Politechnika Rzeszowska, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651622; mjurek@prz.edu.pl

² Katarzyna Majewska, Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego, Polska Akademia Nauk, ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk; k.majewska@imp.gda.pl

³ Magdalena Mieloszyk, Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego, Polska Akademia Nauk, ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk; mmieloszyk@imp.gda.pl

⁴ Wiesław Ostachowicz, Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego, Polska Akademia Nauk, ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk; Politechnika Warszawska, Narbutta 84, 02-524 Warszawa; wieslaw@imp.gda.pl

⁵ Leonard Ziemiański, Politechnika Rzeszowska, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; ziele@prz.edu.pl

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój nauk związanych z projektowaniem i wytwarzaniem materiałów kompozytowych wpłynął na ich powszechność w wielu obszarach aktywności człowieka. Z drugiej zaś strony, gwałtowny rozwój materiałów kompozytowych związany jest z rosnącym zapotrzebowaniem przemysłu lotniczego, kosmicznego czy motoryzacyjnego na lekkie i wytrzymałe materiały, którymi dałoby się zastąpić stal czy inne metale. Stąd też, materiały kompozytowe stosowane są również tam, gdzie priorytetowe znaczenie ma bezpieczeństwo użytkowników konstrukcji.

Zaistniała zatem potrzeba opracowania i doskonalenia systemów diagnozowania stanu technicznego konstrukcji i elementów kompozytowych, uwzględniających ich złożoność. Należy podkreślić, iż niejednorodność materiałów kompozytowych zwykle utrudnia skuteczną detekcję i identyfikację pojawiających się w nich uszkodzeń. Ponadto, opracowując metodę diagnozowania stanu technicznego konstrukcji kompozytowych, należy uwzględnić różnorodność uszkodzeń występujących w tego rodzaju strukturach. Obok typowych defektów jak delaminacja, rozwarstwienie, w bardziej złożonych strukturach pojawiają defekty w postaci rozklejenia, czy też odspojenia połączonych kompozytowych elementów konstrukcji, jak na przykład różnego rodzaju żeber, wręg i innych usztywnień.

Jedną z metod zyskujących w ostatnim czasie znaczenie w diagnostyce konstrukcji jest termografia. Technika ta bazuje na pomiarze promieniowania podczerwonego, najczęściej w zakresie długości fali od ok. 9 do 14 μm . Metody termografii można podzielić na pasywne i aktywne [1]. W metodach pasywnych wykorzystywany jest rozkład ciepła na badanym elemencie (np. budynku) powstały podczas jego normalnej eksploatacji, tzn. żadne dodatkowe źródło ciepła nie jest wykorzystywane. W przypadku termografii aktywnej, stosowane jest dodatkowe wymuszenie termiczne. W metodach nieniszczących badań konstrukcji, NDT (ang. *Non-Destructive Testing*) częściej stosuje się metody termografii aktywnej niż pasywnej. W metodzie aktywnej stosowane są różne wymuszenia termiczne, jak wzbudnik ultradźwiękowy [2], lampy halogenowe [3].

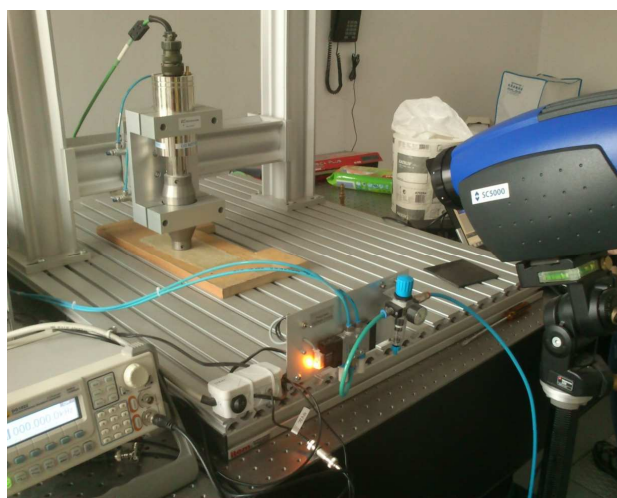
Metody termografii aktywnej są szeroko stosowane do detekcji uszkodzeń w metalowych elementach konstrukcyjnych [1], [4], jak również w częściach wykonywanych z kompozytów CFRP (ang. *Carbon Fibre Reinforced Polymer*) [5] lub GFRP (ang. *Glass Fibre Reinforced Polymer*) [6]. W przypadku materiałów kompozytowych aktywna termografia pozwala na detekcję delaminacji, pęknięć matrycy czy degradacji termicznej [7], a także stosowana jest do oceny jakości połączeń kompozytów [4].

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań, w których metodę termografii aktywnej, a dokładnie wibrotermografii, wykorzystano do oceny stanu połączenia płyta kompozytowa – usztywnienie. Celem analiz było wykrycie defektu połączenia w postaci rozklejenia.

2. Pomiary laboratoryjne

2.1. Stanowisko i przebieg pomiarów

W badaniach laboratoryjnych wykorzystano stanowisko badawcze (Rys. 1) składające się z kamery termowizyjnej, głowicy ultradźwiękowej, generatora sygnałów oraz stołu antywibracyjnego, na którym umieszczony został analizowany obiekt.



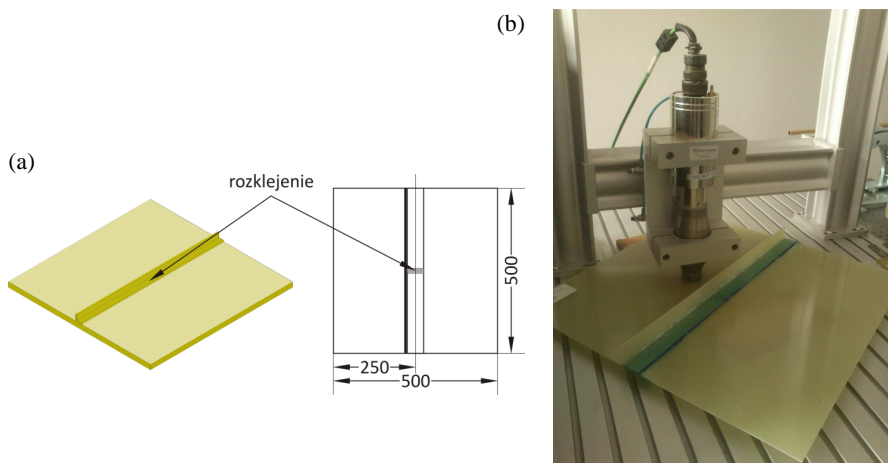
Rys. 1. Stanowisko badawcze

Fig. 1. Laboratory setup

Akwizycja i przetwarzanie zarejestrowanych sekwencji termogramów odbywało się za pomocą komputera przenośnego, wyposażonego w zaawansowane oprogramowanie przeznaczone do obsługi oraz sterowania kamerą

Badania laboratoryjne przeprowadzono na próbce kompozytowej GFRP w postaci płyty o wymiarach 500 mm x 500 mm x 3 mm z usztywnieniem typu L (Rys. 2). Płyta wykonana została z prepregu szklanego o symbolu VV 192T 202 g/m² IMP503 oraz żywicy epoksydowej. Do produkcji próbki laboratoryjnej zastosowanych zostało 12 warstw tkaniny w symetrycznym układzie [0/90/0/90/0/90/90/0/90/0/90/0].

Jako usztywnienie płyty użyty został profil w formie kątownika wykonany z tego samego materiału, o wymiarach 30 mm x 30 mm x 3 mm. Płyta oraz usztywnienie połączone zostały klejem epoksydowym, przy czym, w celu zasympulowania defektu połączenia wprowadzono rozklejenie o szerokości równej całkowitej szerokości usztywnienia i długości 10 mm. Lokalizacje defektu pokazano na Rys. 2a.



Rys. 2. (a) Schemat kompozytowej płyty z usztywnieniem typu L i miejscem rozklejenia, (b) obiekt rzeczywisty

Fig. 2. (a) GFRP plate with L-shaped stiffening rib scheme and joint defect localization, (b) specimen real photo

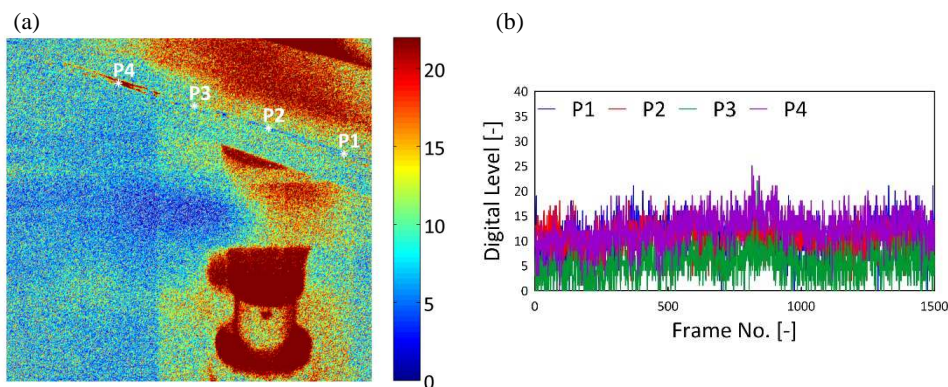
Eksperyment laboratoryjny polegał na rejestracji procesu „ogrzewania”, rozumianego jako wprowadzanie do analizowanego obiektu wymuszenia realizowanego przez głowicę ultradźwiękową. Zastosowano sinusoidalny sygnał wymuszenia o częstotliwości 6 kHz i amplitudzie międzyszczytowej 12 V. Każdy z pomiarów rejestrowany był w postaci 1500-klatkowego filmu, przy częstotliwości próbkowania kamery wynoszącej 100 Hz.

2.2. Rezultaty pomiarów

Na Rys. 3a przedstawiono wybraną klatkę filmu (termogram), na której wskazano obszary poddane dalszej analizie. Punkty P1 do P4 wybrano w miejscu krawędzi połączenia usztywnienia i płyty, przy czym punkt P3 – zlokalizowany został w miejscu, w którym znajduje się wada połączenia. Zarejestrowane w punktach P1-P4 sygnały czasowe przedstawiono na Rys. 3b.

Można stwierdzić, iż wartości średnie DL (ang. *Digital Level*) zarejestrowanych sygnałów, do jakich nagrzewa się próbka, różnią się dla punktów poza uszkodzeniem i w miejscu uszkodzenia. W punktach P1, P2, i P4 wartość ta wynosi ok. 10, natomiast dla punktu P3 - ok. 5. Zatem można wnioskować, że w miejscu uszkodzonego połączenia, próbka nagrzewa się do niższego poziomu.

Przetworzono zarejestrowane sygnały wyznaczając, w każdym przypadku, średnią kroczącą oraz liniową funkcję aproksymującą. Wynik przetwarzania pokazano na Rys. 4. Obliczone wartości współczynników liniowej funkcji aproksymującej zestawiono w Tab. 1.



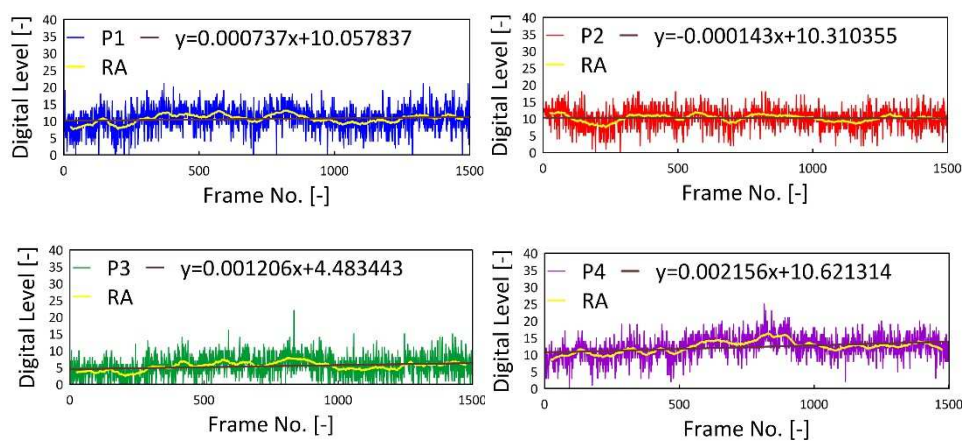
Rys. 3. (a) Wybrana klatka filmu z zaznaczeniem położenia analizowanych punktów (P1–P4), (b) przebiegi czasowe zarejestrowane w punktach P1–P4

Fig. 3. (a) Selected movie frame with localization of analyzed points (P1–P4), (b) time signals recorded in points P1–P4

Tabela 1. Współczynniki liniowej funkcji aproksymującej

Table 1. Linear approximation coefficients

Punkt pomiarowy	$a_1 \times 10^{-3}$	a_0
P1	0.737	10.057837
P2	0.143	10.310355
P3	1.206	4.483443
P4	2.156	10.621314



Rys. 4. Przebieg czasowy, średnia krocząca (RA) oraz aproksymacja liniowa (y) sygnałów zarejestrowanych w punktach P1–P4

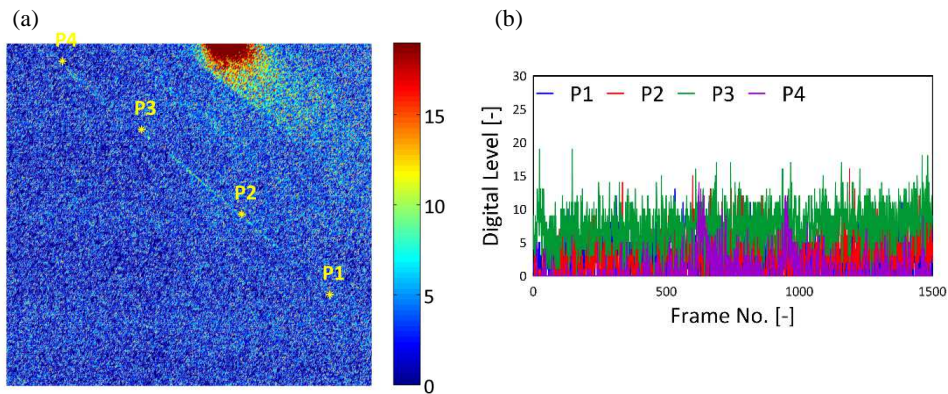
Fig. 4. Time signals, running average (RA) and linear approximation (y) of signals recorded in points P1–P4

Analizując wartości współczynnika kierunkowego (a_1), można stwierdzić, iż próbka w analizowanych punktach nagrzewa się bardzo wolno, przy czym wartość wyznaczona dla punktu P2 odbiega od pozostałych. Biorąc pod uwagę współczynnik a_0 można zauważyć, że w punkt P3, zlokalizowanym w miejscu defektu połączenia, charakteryzuje się wyraźnie mniejszą wartością.

Podczas przeprowadzania doświadczenia obserwowano na powierzchni próbki odbicia pracującej głowicy ultradźwiękowej. Utrudniało to analizę i interpretację otrzymanych wyników. Jednakże, jak przedstawiono powyżej możliwe było zlokalizowanie defektu połączenia.

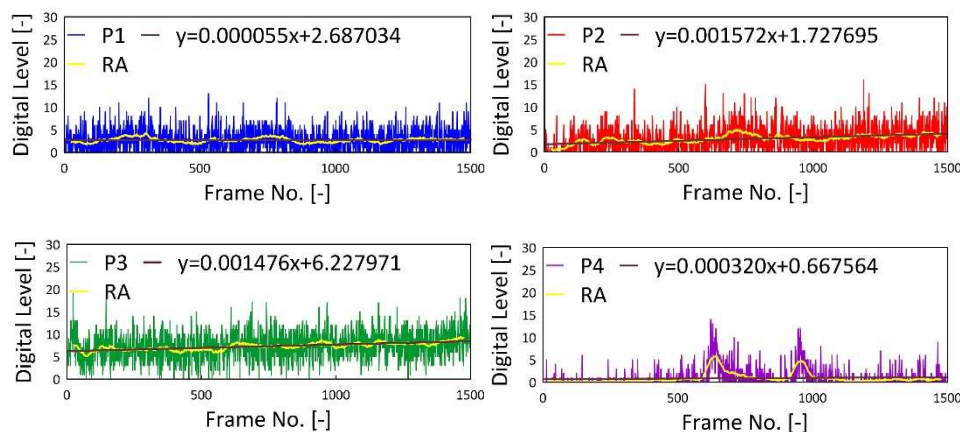
W celu wyeliminowania problemów związanych z odbiciami głowicy ultradźwiękowej na powierzchni na próbki oraz wpływu otoczenia zaproponowano rozwiązanie techniczne – przebudowa stanowiska. Wykonana została komora – całe stanowisko przedstawione na Rys. 1b wraz z kamerą termowizyjną przykryto czarnym, matowym materiałem, który ograniczał zewnętrzne promieniowanie. Dodatkowo, materiałem przykryto również głowicę ultradźwiękową. Dla tak przygotowanego stanowiska przeprowadzono ponowne pomiary (doświadczenie 2) oraz analizę analogiczną jak opisana powyżej.

Na Rys. 5a przedstawiono wybraną klatkę filmu (Nr 720), na której zaznaczono obszary poddane dalszej analizie. Zauważyć można, że zastosowanie prostego rozwiązania w postaci zasłon tworzących komorę pomiarową skutecznie wyeliminowało wpływ otoczenia, w tym refleksy pochodzące od głowicy ultradźwiękowej. Zarejestrowane w punktach P1-P4 przebiegi czasowe przedstawia Rys. 5b.



Rys. 5. (a) Wybrana klatka filmu z analizowanymi punktami (P1–P4), (b) przebiegi czasowe sygnałów zarejestrowanych w punktach P1–P4 – doświadczenie 2

Fig. 5. (a) Selected movie frame with localization of analysed points (P1–P4), (b) time signals recorded in points P1–P4 – experiment 2



Rys. 6. Przebieg czasowy, średnia krocząca (RA) oraz aproksymacja liniowa (y) sygnałów zarejestrowanych w punktach P1–P4 – doświadczenie 2

Fig. 6. Time signals, running average (RA) and linear approximation (y) of signals recorded in points P1–P4 – experiment 2

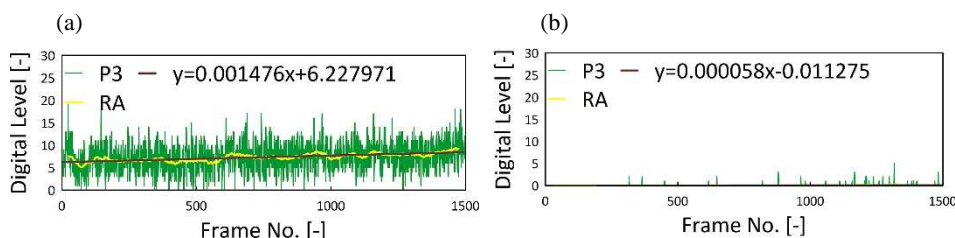
Analizując przebiegi przedstawione na Rys. 6 zauważyć można, że wartość średnia do jakiej „nagrzewa” się próbka w punktach P1, P2, i P4 wynosi ok. 2,5 DL, natomiast dla punktu P3 wartość ta oscyluje ok. 7,5 DL. Porównując współczynniki liniowej funkcji aproksymującej (Tab. 2), wyraźnie wyższą wartością współczynnika a_0 charakteryzuje się punkt P3 zlokalizowany w miejscu defektu.

Tabela 2. Współczynniki liniowej funkcji aproksymującej – doświadczenie 2

Table 2. Linear approximation coefficients – experiment 2

Punkt pomiarowy	$a_1 \times 10^{-3}$	a_0
P1	0.055	2.687034
P2	1.572	1.727695
P3	1.476	6.227971
P4	0.320	0.667564

Dodatkowo, dla sekwencji sygnałów zarejestrowanych w doświadczeniu 2 wykonano analizy dla zmodyfikowanego położenia punktu P3. Położenie punktów P1, P2, P4 pozostało niezmienione natomiast punkt P3 został przesunięty wzdłuż krawędzi usztywnienia o około 3 mm, jednakże nadal znajdował się w miejscu defektu połączenia. Sygnały zarejestrowane dla dwóch różnych położenia punktu P3 zestawiono na Rys. 7. Charakter sygnału odpowiadający zmodyfikowanemu położeniu punktu P3 sugeruje, że w tym punkcie próbka prawie nie nagrzewa się – nie dociera do tego punktu fala cieplna.



Rys. 7. Przebieg czasowy, średnia krocząca (RA) oraz aproksymacja liniowa (y) sygnału zarejestrowanego w punkcie P3; (a) lokalizacja wyjściowa; (b) lokalizacja zmodyfikowana

Fig. 7. Time signals, running average (RA) and linear approximation (y) for signals recorded in points P3: (a) original localization; (b) shifted localization

Należy zwrócić uwagę na bardzo wyraźne różnice w obu sygnałach zarejestrowanych dla punktu P3. Teoretycznie zarówno jego pierwotne położenie, jak i zmodyfikowane, znajdują się w strefie, w której brak jest połączenia pomiędzy płytą a usztywnieniem. Jednak różnice w analizowanych sygnałach sugerują, iż wprowadzone uszkodzenie jest niejednorodne. W wyniku dokładnej analizy wizualnej zaobserwowano, że mniej więcej w połowie strefy uszkodzenia znajduje się klej, który najprawdopodobniej wypłynął podczas procesu wykonywania próbki. Fakt ten może stanowić uzasadnienie dla otrzymanych wyników.

3. Wnioski

Na podstawie wykonanych doświadczeń laboratoryjnych i przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że możliwa jest diagnostyka połączenia płyta kompozytowa – usztywnienie wykorzystująca metodę wibrotermografii. Jednakże postawienie jednoznacznej diagnozy w zakresie stanu połączenia, wymaga znacznego doświadczenia i dogłębnych analiz uzyskanych wyników.

Spowodowane to jest faktem, iż zastosowana technika pomiarowa wrażliwa jest na wpływ środowiska zewnętrznego (odbicia od różnego rodzaju zewnętrznych źródeł promieniowania podczerwonego), a także w sposób bardzo zróżnicowany reaguje na niejednorodności występujące w analizowanej strukturze. Efektem tego może być ograniczona skuteczność w wykrywaniu wad, jak również występowanie fałszywych alarmów.

Należy stwierdzić, że o ile, w warunkach laboratoryjnych, możliwe jest w stosunkowo prosty sposób, wyeliminowanie wpływu zewnętrznych źródeł promieniowania, w przypadku badań *in-situ* rzeczywistych struktur zapewnienie korzystnych warunków pomiarów może być bardzo utrudnione.

Ponadto, przy zróżnicowanych parametrach i miejscu wymuszenia termicznego, występujące w materiale nieciągłości czy też defekty reagować mogą w zróżnicowany sposób, tzn. „nagrzewać się” w mniejszym lub większym zakresie w porównaniu do stref bez zaburzeń (defektów). Stąd też, wydaje się iż

niezwykle istotne jest posiadanie dużego doświadczenia w analizie i interpretacji wyników pomiarów termowizyjnych.

Podziękowania

Praca powstała przy częściowym wsparciu finansowym Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu (MARTECII/RAMMS/1/2016): Reliable and Autonomous Monitoring System for Maritime Structures.

Literatura

- [1] Vollmer M., Möllman K.-P.: Infrared Thermal Imaging, Wiley-Vch, 2010.
- [2] Zweschper T., Dillenz A., and Busse G.: Ultrasound Lockin Thermography – a NDT Method for the Inspection of Aerospace Structures, 15th World Conference on Non-destructive Testing 2000, Roma (Italy).
- [3] Meola C., Carlomagno G. M., Valentino M. and Bonavolontà C.: Non destructive evaluation of impact damage in CFRP with infrared thermography and squid, 2nd International Conference on Buckling and Postbuckling Behaviour of Composite Laminated Shell Structures, 2008, Germany.
- [4] Rajic N., Rowlands D. and Tsoi K.A. An Australian Perspective on the Application of Infrared Thermography to the Inspection of Military Aircraft, 2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010 - Tu.1.B.1, 2010, Germany.
- [5] Susa M., Castanedo C.I., Maldague X. and Bendada A.: Pulse thermography applied on a complex structure sample: comparison and analysis of numerical and experimental results, IV Conferencia Panamericana de END, 2007, Buenos Aires.
- [6] Shepard S.M.: Flash Thermography of Aerospace Composites, IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires, 2007.
- [7] Chobaut N., Bockenheimer C., Boller C., Valeske B., Ehrhart B.: Heat Damage Detection and Assessment in CFRP by Means of Extended-NDT, 2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010 - Poster 10.

ANALYSIS OF GFRP PLATE – STIFFENING RIB JOINT WITH USE OF VIBROTHERMOGRAPHY

S u m m a r y

Due to the dynamic development of designing and manufacturing methods composite materials are becoming increasingly common in many industries branches. Composite materials can also be found in applications where construction safety is critical. Hence, the widespread use of composites as construction materials is accompanied by the continuous development of non-destructive methods for detecting defects and assessing the technical condition of structures.

The paper presents the preliminary results of laboratory tests aimed at evaluating the usefulness of the active thermography method in the study of adhesive bonding of the panel and the composite profile. The tests were performed on samples made of GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer). Based on the recorded thermogram sequences, a comparative analysis was carried out which enabled the defect to be effectively located.

Keywords: GFRP composites, non-destructive testing, vibrothermography

Przesłano do redakcji: 01.04.2017 r.

Przyjęto do druku: 28.04.2017 r.

