

PRZEMYSŁAW DANIEL PASTUSZAK*

BADANIA TERMOGRAFICZNE CYLINDRYCZNYCH PANELI KOMPOZYTOWYCH

THERMOGRAPHIC TESTING OF CYLINDRICAL COMPOSITE PANELS

Streszczenie

Artykuł poświęcony jest wykrywaniu i ocenie defektów w strukturach kompozytowych. W tym celu wykorzystano impulsową metodę termografii w podczerwieni. W pracy omówiono zagadnienia związane z promieniowaniem podczerwonym, technikami termografii i formami zniszczenia struktur kompozytowych. Zaprezentowano wyniki badań cylindrycznych paneli z delaminacją poddanych statycznym obciążeniom ściskającym.

Słowa kluczowe: IR NDT, kompozyty, termografia

Abstract

The following paper is devoted to detection and evaluation of defects in composite structures. The method of pulsed infrared thermography was used. Additionally, the topics connected with infrared radiation, thermal imaging techniques and forms of failure of composite structures are discussed. The results of investigation for cylindrical panels with delamination subjected to static loads are presented.

Keywords: IR NDT, composites, thermography

* Mgr inż. Przemysław Daniel Pastuszak, Instytut Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Dążenie do zwiększenia jakości produkcji towarzyszy nam od kilku dekad. Produkcja komponentów, które nie zawierają defektów, nie tylko zwiększa atrakcyjność rynkową produktu, ale pozwala na poprawę wydajności i pominięcie niepotrzebnych kosztów. Ponadto czynnikiem wartym uwagi jest bezpieczeństwo człowieka. Wdrożenie idei wytwarzania elementów wolnych od wad w dużej mierze polega na odpowiedniej kontroli na liniach produkcyjnych. Inspekcja dokonywana manualnie przez człowieka zawsze wiąże się z niedokładną oceną. Dlatego też czynności związane z automatyzacją tego procesu zwiększają powtarzalność i jednorodność ewaluacji, dodatkowo dają możliwość wykonywania go w środowisku pracy szkodliwym dla człowieka [1, 2].

W wielu wypadkach parametrem, który pozwala ocenić poprawność przebiegu procesu przemysłowego, jest temperatura. Tutaj znakomicie wpisuje się dziedzina wiedzy i techniki nazywana termografią w podczerwieni, gdyż za jej pomocą możliwy jest szybki i bezkontaktowy jej pomiar na powierzchni badanych obiektów. Do badań wykorzystywane są właściwości promieniowania podczerwonego, które jest przetwarzane za pomocą odpowiednich detektorów na sygnał elektryczny, zamieniany kolejno na obrazy termiczne (termogramy). Zaletą metod termografii w podczerwieni jest to, że nie ingerują w badany materiał, tym samym nie zmieniają jego właściwości użytkowych. Ze względu na omówione czynniki techniki te są zaliczane do grupy badań nieniszczących.

Rozwój w dziedzinie mikroelektroniki wpłynął na dostępność detektorów podczerwieni w przemyśle. Obecnie techniki termografii i termowizji nie tylko są wykorzystywane w wojsku, ale także znalazły zastosowanie w medycynie, elektroenergetyce, ciepłownictwie, ratownictwie, ekologii, hydrometeorologii i wielu innych dziedzinach. Należy tutaj zwrócić uwagę na jedno bardzo znaczące przeznaczenie omawianych urządzeń i metod do rejestracji promieniowania podczerwonego, mianowicie badania niszczące materiałów. W artykule na to właśnie zastosowanie położony został nacisk.

Rosnące wymagania do właściwości maszyn i urządzeń determinują postęp w zakresie struktury i budowy chemicznej materiałów z których są wytwarzane. Optymalne projektowanie to już nie tylko dobór odpowiedniego materiału, ale także jego zaprojektowanie o strukturze spełniającej założone parametry obciążenia, warunków eksploatacji i znikomej liczbie wad technologicznych. Tworzenie współczesnych materiałów polega na dobraniu składników o odmiennych właściwościach fizykochemicznych, które w połączeniu dają nowe, lepsze cechy. Sprostanie wymaganiom stawianym wobec nowoczesnych materiałów jest bardzo skomplikowane i trudne do osiągnięcia ze względu na złożoność zjawisk fizykochemicznych, przeprowadzenie skomplikowanych badań eksperymentalnych i opracowanie nowych procesów technologicznych [3, 4]. Dlatego też metody inspekcji odgrywają tutaj bardzo ważną rolę nie tylko podczas weryfikacji procesu produkcji, ale także okresowych kontroli gotowych już urządzeń.

Motyacją przy wyborze kompozytów włóknistych jako obiektu badań było ich szerokie spektrum zastosowań w nowoczesnych maszynach i urządzeniach. Należy również zwrócić uwagę na geometrię badanych struktur ze względu na liczne występowanie zakrzywionych i okrągłych kształtów w przemyśle.

2. Promieniowanie podczerwone

Promieniowanie podczerwone (IR) jest promieniowaniem elektromagnetycznym powstającym w wyniku oscylacyjnych i rotacyjnych drgań atomów i cząsteczek. Jego zakres długości fal zawarty jest pomiędzy światłem widzialnym i radiowym (od 780 nm do 1mm). Ciała fizyczne o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego (tj. 0°K, czyli -273,15°C) emitują promieniowanie podczerwone. W praktyce oznacza to, że każde ciało w naszym otoczeniu jest emitorem IR.

Promieniowanie podczerwone rozchodzi się w próżni i w innych ośrodkach fizycznych (np. powietrze, gazy) po linii prostej. Należy podkreślić, że wykazuje ono jednocześnie pewne cechy wspólne zarówno dla światła widzialnego, jak i dla fal radiowych. Przykład stanowi możliwość skupienia optycznego lub rozszczepienia za pomocą pryzmatów, a także rozchodzenie się w materiałach, które nie są przezroczyste dla światła widzialnego.

Poszczególne zakresy widma elektromagnetycznego odpowiadają różnym rodzajom promieniowania i nie są ściśle określone (częściowo zachodzą nawet wzajemnie na siebie). W oparciu o własności detektorów podczerwonych i materiałów optycznych wprowadzono umowny podział promieniowania podczerwonego na następujące obszary:

- bliską podczerwień (od $\lambda = 0,7 \mu\text{m}$ do $\lambda = 5 \mu\text{m}$),
- średnią podczerwień (od $\lambda = 5 \mu\text{m}$ do $\lambda = 30 \mu\text{m}$),
- daleką podczerwień (od $\lambda = 30 \mu\text{m}$ do $\lambda = 1000 \mu\text{m}$).

Podstawą rozważań na temat promieniowania podczerwonego jest tzw. ciało doskonale czarne, które pochłania całość promieniowania padającego na nie, niezależnie od kąta padania, długości fali i mocy źródła promieniowania.

Podczas prowadzenia pomiarów termowizyjnych istotna jest tzw. emisyjność powierzchni mierzonego obiektu. Jest to wielkość wprowadzona w celu odniesienia promieniowania ciała rzeczywistego do wzorca, jakim jest ciało doskonale czarne. Współczynnik ten określa zdolność danego ciała do emitowania własnej energii z pominięciem energii odbitej i przepuszczonej. Należy zaznaczyć, że zawiera się on w przedziale od 0 do 1. Pomiar temperatury materiałów posiadających współczynnik emisyjności bliski 1 jest prostszy i daje dokładniejsze wyniki. Współczynnik ten jest zależny od rodzaju materiału, stanu, barwy oraz temperatury jego powierzchni, a także długości fali i kąta padania promieniowania. Emisyjność ma prostą interpretację fizyczną, natomiast praktyka dowodzi, że jest to parametr trudny do określenia.

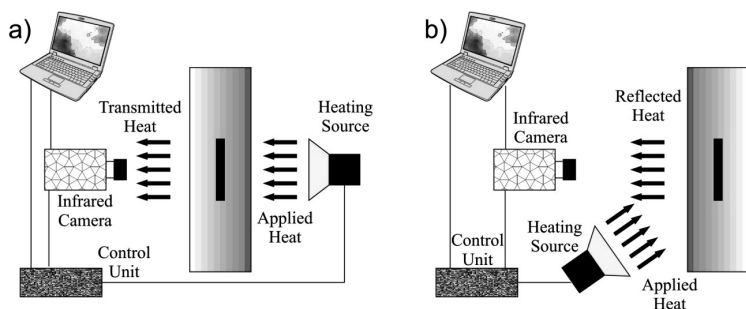
Kamery termowizyjne dostępne na rynku pracują w dwóch zakresach fal elektromagnetycznych: od 2 μm do 5 μm oraz od 8 μm do 14 μm . Ma to bezpośredni związek z przepuszczalnością dolnej warstwy atmosfery ziemskiej, w której występują tzw. „okna atmosferyczne” obejmujące powyższe zakresy. Poza wyznaczonymi granicami występuje bardzo silne pochłanianie promieniowania podczerwonego przez parę wodną, dwutlenek węgla i ozon, dlatego też wykonywanie pomiarów w innych przedziałach jest utrudnione.

3. Termografia w podczerwieni

Ogólnie rzecz biorąc, termografia w podczerwieni to dziedzina wiedzy i techniki zajmująca się detekcją, rejestracją i przetwarzaniem fal promieniowania podczerwonego. Dzięki właściwościom, które ono posiada, możliwy jest bezkontaktowy pomiar temperatury na po-

wierzchni badanych obiektów. Kamera termowizyjna wyposażona w odpowiedni detektor przetwarza energię padających fotonów promieniowania IR na sygnał elektryczny. Następnie uzyskany sygnał przetwarzany jest wizualizowany w postaci termogramów.

Można rozróżnić aktywne i pasywne procedury termografii w podczerwieni. Zasadnicza różnica polega na tym, że w badaniach metodą aktywną wykorzystuje się dodatkowe źródło stymulacji cieplnej obiektu. Natomiast techniki pasywne wykorzystują ciepło powstałe w wyniku jego funkcjonowania. Istnieje podział metod aktywnych według wzajemnego położenia urządzeń badawczych, rodzaju źródła cieplnej stymulacji czy też kształtu i wymiarów strefy stymulacji ciepła i rejestracji temperatury. Położenie źródła cieplnej stymulacji i urządzenia rejestrującego temperaturę możliwe jest w dwóch konfiguracjach: jednostronnej i dwustronnej. W pierwszym przypadku źródło stymulacji cieplnej i urządzenie rejestrujące temperaturę znajdują się po tej samej stronie badanego materiału, natomiast w drugiej konfiguracji są po przeciwnych stronach. Zostało to zobrazowane na rys. 1 [1, 5–9].



Rys. 1. Rozmieszczenie urządzeń badawczych w termografii aktywnej

Fig. 1. Arrangement of test equipment in active thermography

Termografia aktywna opiera się na tworzeniu fali cieplnej na powierzchni badanego obiektu. W zależności od zastosowanej metody może to być impuls prostokątny lub sinusoidalny. Fala cieplna jest różnie absorbowana przez poszczególne materiały. Zależy to przede wszystkim od częstotliwości wzbudzenia, ale także od właściwości termofizycznych, przewodnictwa cieplnego, pojemności cieplnej i gęstości testowanych materiałów. Zakres głębokości jest wyraźnie większy w metalach niż w tworzywach sztucznych. Jeżeli fala cieplna dotrze do obszarów, gdzie właściwości termofizyczne różnią się (delaminacja, wtrącenia, porowatość), jest częściowo odbijana, co widać na powierzchni stygnącej próbki w postaci zaburzonego rozkładu temperatur. Oceniając amplitudę lokalnej temperatury powierzchni, można otrzymać informację o wewnętrznej strukturze (głębokości defektu). Zastosowanie to ma sens wtedy, gdy grubość materiału odpowiada w przybliżeniu długości fali cieplnej oraz w przypadku, gdy występują różnice we właściwościach termofizycznych badanego materiału i defektu. Źródłem stymulacji cieplnej badanych obiektów mogą być: promieniowanie optyczne, prądy wirowe, prąd elektryczny, drgania mechaniczne i inne. Niewątpliwą zaletą badań termograficznych jest możliwość badania elementów termicznie wrażliwych. Aby osiągnąć optymalne wyniki dla obiektów o nieznanych lub nieokreślonych charakterystykach cieplnych, należy wykonać różne pomiary dla różnych częstotliwości. Fale cieplne rozchodzące się w materiale są silnie tłumione, dlatego też głębokość pomiarów

jest limitowana. Zakres ten silnie zależy od częstotliwości wzbudzenia – im niższa częstotliwość, tym większa głębokość penetracji. Przez zmianę częstotliwości można analizować strukturę materiału na różnych głębokościach [5–9].

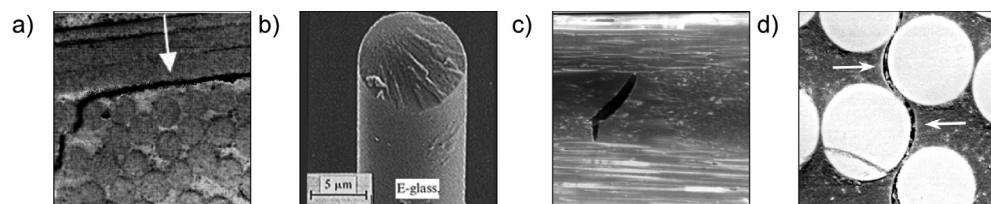
Podczas badań termograficznych wymagana jest specjalistyczna wiedza uwzględniająca cechy charakterystyczne badanych obiektów oraz umiejętności związane z obsługą urządzeń rejestrujących, odczytu i interpretacji termogramów [11, 12]. W trakcie przeprowadzania pomiarów należy uwzględnić kilka czynników zewnętrznych, które mają istotny wpływ na wyniki (poziom sygnału generowanego przez kamerę termowizyjną). Do kamery termowizyjnej dociera nie tylko promieniowanie podczerwone pochodzące od badanego obiektu, ale także te z otoczenia i odbite od powierzchni obiektu. Ponadto promieniowanie podczerwone jest tłumione (pochłaniane) przez atmosferę i wszelkiego rodzaju czynniki znajdujące się pomiędzy detektorem a badanym obiektem (np. gazy, dymy, pyły).

4. Formy zniszczenia struktur kompozytowych

Ogólną cechą charakterystyczną dla materiałów kompozytowych (zarówno dla obciążeń statycznych, jak i zmęczeniowych) jest stopniowy rozwój zniszczenia od lokalnych mikro-defektów do finalnego globalnego zniszczenia konstrukcji (obiekt nie spełnia swoich funkcjonalnych zadań). Aby opisać lokalne i globalne formy zniszczenia konstrukcji wykonanych z materiałów kompozytowych, wprowadzono różne warianty podejść:

- model mikroskopowy – zbrojenie i osnowę traktuje się jako materiał niezależny,
- model pośredni – każda warstwa indywidualna tworząca laminat traktowana jest jako ośrodek jednorodny,
- model makroskopowy – cała struktura traktowana jest jako ośrodek jednorodny [3].

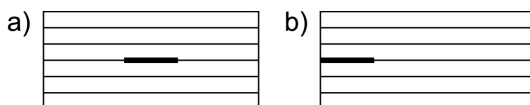
Nie jest do końca znana kolejność występowania form zniszczenia mikroskopowego. Można jednak wprowadzić generalny podział na zniszczenia występujące wewnątrz warstwy indywidualnej laminatu (pękanie osnowy, włókien, oddzielenie włókien od osnowy) i zniszczenia występujące na granicy warstw (delaminacje). Materiały kompozytowe, w których wystąpiły przedstawione formy zniszczenia, charakteryzują się obniżoną sztywnością i wytrzymałością, zwłaszcza w miejscach koncentracji naprężeń. Na rys. 2 zaprezentowano przekroje laminatów, gdzie wystąpiły omawiane rodzaje zniszczenia materiałów kompozytowych.



Rys. 2. Formy zniszczenia materiałów kompozytowych: a) delaminacje, b) pękanie włókien, c) pękanie osnowy, d) oddzielenie włókien od osnowy

Fig. 2. Forms of failure of composite structures: a) delaminations, b) fibre breakage, c) matrix cracking, d) fiber debonding

Proces delaminacji (czyli rozwarstwianie warstw indywidualnych) spowodowany jest przez powtarzające się obciążenia dynamiczne, błędy technologiczne w procesie produkcji, brak preparacji włókien szklanych powodujący złe przyleganie żywicy, nieodpowiednie warunki termiczne w trakcie utwardzania lub powstaje w wyniku uderzenia. Należy podkreślić, że delaminacja samodzielnie nie prowadzi do wyczerpania nośności konstrukcji, dopiero w połączeniu z innymi formami zniszczenia [3].



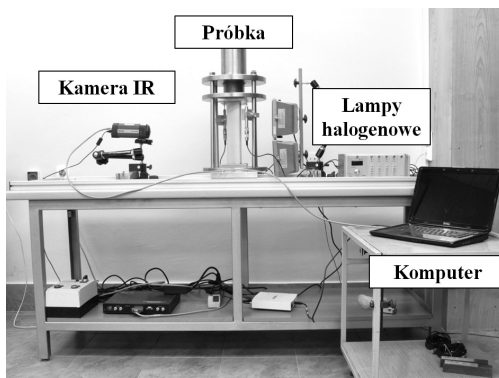
Rys. 3. Rodzaje delaminacji: a) zamknięta wewnątrz laminatu, b) na brzegu swobodnym

Fig. 3. Types of delamination: a) enclosed inside the laminate, b) on the edge

Ogólny podział wyniku procesu delaminacji rozróżnia dwa typy tego zjawiska: zawarty wewnątrz oraz na brzegu swobodnym laminatu (rys. 3). Ponadto każdy z wymienionych przypadków występowania delaminacji może być pojedynczy lub wielokrotny, symetryczny bądź niesymetryczny względem powierzchni środkowej laminatu [3, 10].

5. Badania eksperymentalne

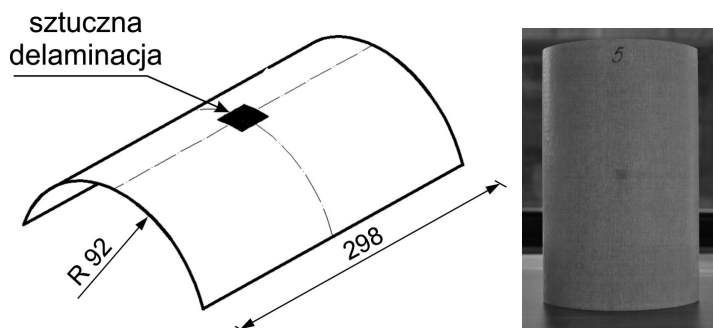
Badania doświadczalne wykonano za pomocą kamery termowizyjnej typu Flir A325 z oprogramowaniem IR-NDT. Kamera termowizyjna Flir A325 jest wyposażona w połączenie RJ-45 Gigabit Ethernet, dzięki któremu możliwe jest uzyskanie 16-bitowych obrazów o rozdzielczości 320×240 przy częstotliwości 60 Hz i liniowych danych o temperaturze. Ponadto wyposażona jest w dwa zewnętrzne obiektywy: 10mm i 18mm, może wykonywać pomiary w zakresie temperatur od -20°C do 350°C z dokładnością do $0,07^{\circ}\text{C}$. Działa w zakresie spektralnym od $7,5$ do $13,5 \mu\text{m}$.



Rys. 4. Stanowisko do badań termograficznych

Fig. 4. Experimental set-up for thermography tests

W badaniach wykorzystano panel cylindryczny (GFRP) wykonany z ośmiu warstw tkaniny szklanej i żywicy epoksydowej o wymiarach: długość $L = 298$ mm, promień $R = 92$ mm i grubość $T = 1,8$ mm – rys. 5. W celu wytworzenie sztucznej delaminacji pomiędzy czwartą i piątą warstwą w środkowej części umieszczono kwadratowe (10×10 mm) paseki teflonu o różnych grubościach: 0,2 mm, 0,7 mm i 1,2 mm.



Rys. 5. Obiekt badań: a) schemat cylindrycznej próbki z umiejscowioną sztuczną delaminacją, b) rzeczywisty widok panelu kompozytowego

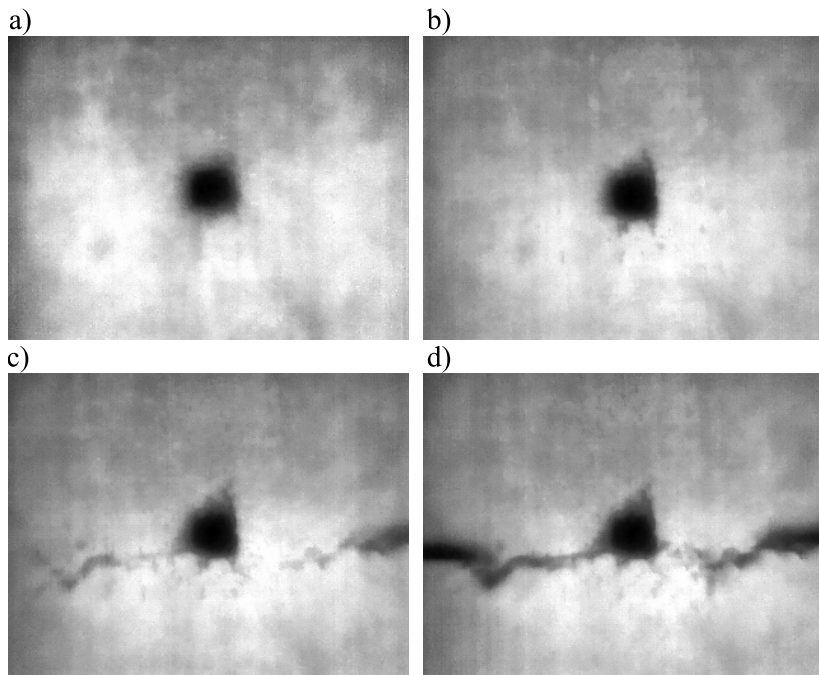
Fig. 5. Investigated object: a) scheme of cylindrical specimen with artificial delamination, b) real view of the composite panel

Analizy termograficzne przeprowadzono w temperaturze pokojowej i wilgotności powietrza nie przekraczającej 20%. Analizowana próbka były ogrzewana przez lampę halogenową o mocy 500 W. Budując stanowisko, zastosowano metodę dwustronną (transmisyjną), co znaczy, że próbka znajduje się pomiędzy kamerą a źródłem ciepła (rys. 4).

6. Wyniki badań

Pierwszym celem niniejszego artykułu było zaprezentowanie możliwości impulsowej termografii w podczerwieni w wykrywaniu i lokalizacji defektów występujących w materiałach kompozytowych. W 80% przypadków wynik jakościowy pozwala stwierdzić czy badany obiekt zostanie dopuszczony do dalszej eksploatacji lub opuści linię produkcyjną. Wyniki pierwszych testów jasno pokazują, że identyfikacja sztucznej nieciągłości materiału jest prosta i szybka do wykonania.

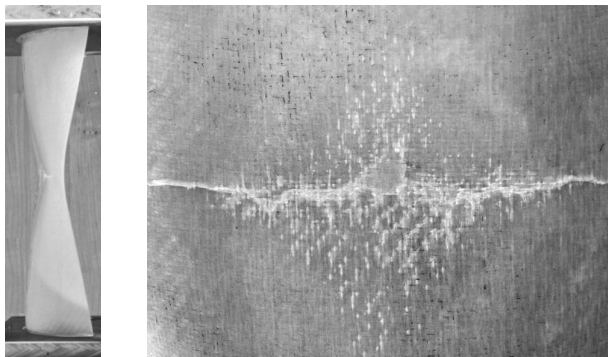
Kolejny etap badań jest związany z możliwością obserwacji rozwoju defektów podczas zmieniających się warunków obciążenia. Na rys. 6 zaprezentowano termogramy obrazujące propagację zniszczenia poprzecznie do badanej próbki podczas zmieniających się warunków obciążenia.



Rys. 6. Termogramy obrazujące rozwój zniszczenia cylindrycznej próbki kompozytowej podczas statycznej próby ściskania

Fig. 6. Thermograms presenting the development of the failure within the cylindrical composite samples during static compression tests

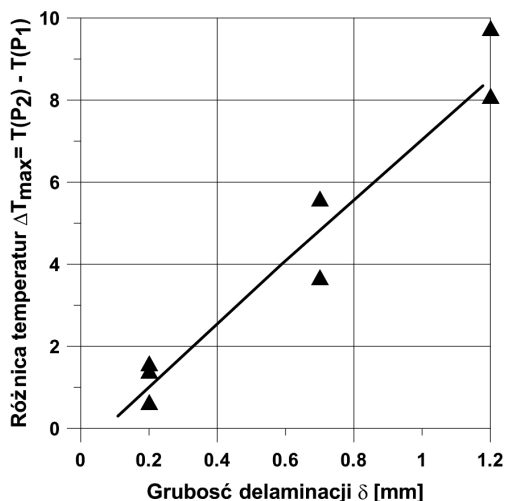
Sposób wyboczenia i forma zniszczenia zostały zaprezentowane na rys. 7. Warto zauważyć, że sztucznie wprowadzona deleminacja nie wpływa na sposób wyboczenia, jednak oddziałuje na ostateczne zniszczenie próbki.



Rys. 7. Sposób wyboczenia i finalnego zniszczenie badanej próbki

Fig. 7. Buckling mode and final failure of tested panels

Ponadto przeprowadzono analizę zależności grubości wprowadzonej sztucznie delaminacji (oznaczonej jako T_i) w stosunku do zmian temperatury na powierzchni badanej próbki. Wyniki zaprezentowano na rys. 8.



Rys. 8. Różnice zmian temperatury dla różnych próbek

Fig. 8. Differences of temperature measured for various specimens

7. Wnioski

W artykule omówiono zagadnienia związane z technikami termografii w podczerwieni, promieniowaniem podczerwonym i formami zniszczenia struktur kompozytowych.

Zaprezentowane wyniki badań potwierdzają tezę, że badania nieniszczące wykorzystujące termografię w podczerwieni są bardzo efektywnym i skutecznym narzędziem w wykrywaniu i lokalizacji defektów podpowierzchniowych występujących w strukturach kompozytowych. Testy przeprowadzono na cylindrycznych panelach kompozytowych ze sztucznie wprowadzoną delaminacją w postaci kwadratowej folii Teflonowej o różnej grubości. Należy również zauważyć, że nie tylko geometria poszukiwanych defektów może być obserwowana, ale także ich rozwój. Ponadto zaobserwowano, że wprowadzona delaminacja nie rozwija się aż do finalnego zniszczenia, jednak ma wpływ na ostateczne uszkodzenie próbek. Kwestia oceny charakteru nieciągłości materiałowych pozostaje nadal otwarta i może być obiektem dalszych badań w tym kierunku.

Literatura

- [1] Maldague X.P.V., *Theory and practise of infrared technology for nondestructive testing*, John Wiley, Interscience, New York 2001.
- [2] Krishnapillai M., Jones R., Marshall I.H., Bannister M., Rajic N., *Thermography as a tool for damage assessment*, Composite Structures 67, 2005, 149-155.
- [3] Muc A., Pastuszak P., *Zastosowanie materiałów kompozytowych w konstrukcjach i urządzeniach, Konstrukcje maszyn. Historia i perspektywy rozwoju*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.
- [4] Muc A., *Mechanika kompozytów włóknistych*, Księgarnia Akademicka, Kraków 2003.
- [5] Ibarra-Castanedo C., *Quantitative subsurface defect evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth retrieval with the phase*, University Laval, 2005.
- [6] IR-NDT – Software Manual – Automotion Technology GmbH.
- [7] Świdorski W., *Metody i techniki termografii w podczerwieni w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych*, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Biuletyn naukowy 112, 2009.
- [8] Breitenstein O., Warta W., Langenkamp M., *Lock-in Thermography. Basics and use for evaluating electronic devices and materials*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- [9] Oliferuk W., *Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń*, Biuro Gamma, Warszawa 2008.
- [10] Doliński Ł., *Porównanie wybranych modeli delaminacji w kompozytach warstwowych*, Modelowanie Inżynierskie 32, Gliwice 2006, 113-118.
- [11] Pastuszak P.D., Muc A., *Methods of infrared non-destructive techniques: review and experimental studies*, Key Engineering Materials, 2012 (w druku).
- [12] Muc A., Pastuszak P.D., *Prediction of subsurface defects through a pulse thermography: experiments vs. numerical modelling*, Proceedings of 15th European Conference on Composite Materials, Venice – Italy 2012.