

KRZYSZTOF J. KURZYDŁOWSKI, ANNA BOCZKOWSKA<sup>\*)</sup>, JERZY SCHMIDT,  
KATARZYNA KONOPKA, WOJCIECH SPYCHALSKI

Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

## Monitorowanie uszkodzeń w kompozytach metodami nieniszczącymi

### MONITORING OF FAILURES IN THE COMPOSITES BY NON-DESTRUCTIVE METHODS

**Summary** — A review of selected methods of non-destructive evaluation (NDE) for the monitoring of failures in composites based on ceramic or polymer matrices. The reasons of failures and the fillers actions related to them were discussed (Figs. 1—4). Acoustic emission as a variant of NDE methods has been characterized in details. An effort to classify the acoustic signals to find the load ranges relating to particular types of failures (Fig. 5, 6) has been taken up. Advantages of use of falck transform to evaluation of failures' progress at real time were illustrated (Fig. 7). Intelligent materials use for *in situ* monitoring of polymeric composite condition during its curing and exploitation (Fig. 8) was described.

**Key words:** composites, failures, monitoring, non-destructive evaluation methods, acoustic emission, intelligent materials, sensors.

Kompozyty są grupą obejmującą wiele nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych o szczególnych, często skrajnych właściwościach. Powstają one w wyniku połączenia składników znacznie różniących się swą charakterystyką, dlatego też częściej niż inne materiały są narażone na powstawanie wad na etapie zarówno ich wytwarzania, jak i eksploatacji. Ważną rolę w omawianej grupie tworzyw odgrywają kompozyty polimerowe oraz ceramiczne.

O właściwościach kompozytów decyduje ich struktura, którą definiuje udział, kształt, wymiary i rozmieszczenie przestrzenne poszczególnych składników. Podobnie jak w większości materiałów o znaczeniu technicznym, oprócz wymienionych czynników na właściwości kompozytów wpływa ilość, kształt, wymiary oraz rozmieszczenie defektów pochodzenia technologicznego, a także defektów powstałych podczas eksploatacji. Na etapie otrzymywania kompozytów dochodzi zwłaszcza do tworzenia pęcherzy, pustek i rozwarstwień, jak również uszkodzeń włókien. Defekty te mogą pojawiać się między innymi na skutek odmiennej rozszerzalności termicznej składników i różnego ich skurczu w trakcie procesu otrzymywania kompozytów [1]. W trakcie eksploatacji na kompozyty działają duże naprężenia oraz specyficzne środowisko o określonej wil-

gotności, agresywności chemicznej (kwaśne deszcze) oraz fizycznej (promieniowanie ultrafioletowe). W tych warunkach struktura kompozytów może zmieniać się na skutek zarodkowania, rozwoju i kumulacji powstających uszkodzeń, przy czym intensywność tych procesów jest z reguły duża w kompozytach polimerowych [2].

Powstawanie i kumulacja wad w materiale podczas eksploatacji konstrukcji prowadzi do zmian jej stanu technicznego. Należy jednocześnie zwrócić uwagę, że „lokalne” uszkodzenie jednostkowe kompozytu nie zawsze skutkuje zniszczeniem całego elementu. Uzasadnia to konieczność monitorowania stanu materiału kompozytowego pod kątem określenia warunków bezpiecznej eksploatacji konstrukcji. Do tego celu można wykorzystywać metody kontroli nieniszczącej (*non-destructive examination* — NDE), które umożliwiają określenie stanu materiału okresowo lub w sposób ciągły w czasie rzeczywistym [3, 4].

Metody NDE stosowane są od wielu lat w odniesieniu do konstrukcji wykonanych z tworzyw metalicznych. Znaczenie nieniszczących badań kompozytów obecnie wzrasta ze względu na coraz szersze zastosowanie tych materiałów w konstrukcjach lotniczych oraz związanych z inżynierią budowlaną (mosty i wiadukty), a one muszą spełniać najwyższe standardy bezpieczeństwa.

W artykule przedstawiono przegląd wybranych metod NDE do monitorowania uszkodzeń powstałych

<sup>\*)</sup> Autor, do którego należy kierować korespondencje; e-mail: abocz@meil.pw.edu.pl

w kompozytach z matrycą ceramiczną i polimerową. Omówiono również możliwość monitorowania stanu materiału i konstrukcji za pomocą sensorów wykonanych z inteligentnych materiałów.

#### PRZYCZYNY POWSTAWANIA USZKODZEŃ W KOMPOZYTACH

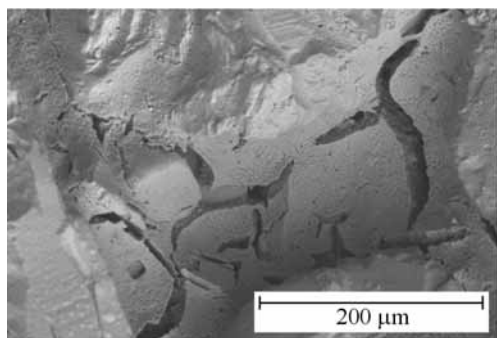
Powstawanie uszkodzeń w kompozytach ceramicznych jest uwarunkowane cechami tego tworzywa. Charakter wiązań chemicznych tworzyw ceramicznych nadaje im małą gęstość, dużą odporność na wysoką temperaturę, dużą twardość, odporność na ściskanie i działanie środowiska. Do wad materiałów ceramicznych zalicza się ich kruchość, co powoduje małą odporność na drgania mechaniczne, wrażliwość na udary cieplne i trudności wytwarzania. Wady te w znacznym stopniu ograniczają zastosowanie tworzyw ceramicznych jako materiałów konstrukcyjnych [5].

Jedną z metod poprawy odporności materiałów ceramicznych na kruche pękanie jest wprowadzenie do osnowy (matrycy) ceramicznej plastycznej fazy metalicznej lub elastomeru [6, 7]. Uzyskuje się w ten sposób kompozyty o znacznie lepszych właściwościach, w tym bardziej odporne na kruche pękanie.

W kompozytach o osnowie ceramicznej wzrost odporności na kruche pękanie może być wynikiem [8]:

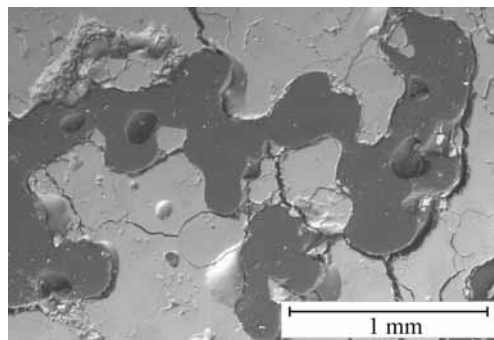
- mostkowania pęknięć wywołanego obecnością w osnowie ceramicznej włókien lub cząstek fazy plastycznej,
- odchylenia drogi pęknięcia na skutek ugięcia płaszczyzny pęknięcia,
- rozgałęzienia się pęknięć,
- ścinania wierzchołków pęknięć poprzez tworzenie się mikropęknięć i powstawanie stref odkształcenia plastycznego,
- przemiany fazowej.

Obecność fazy międzyziarnowej w materiale ceramicznym sprzyja rozgałęzianiu pęknięć (rys. 1) i w efekcie rozpraszaniu energii pęknięcia [9]. Rozgałęzianie się



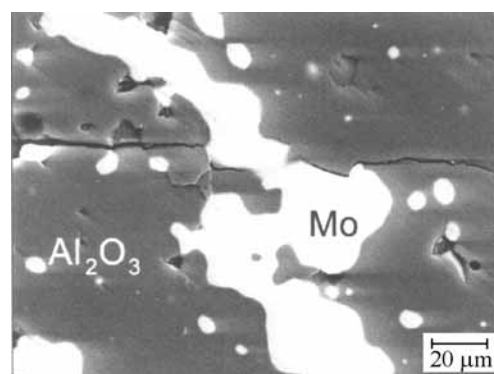
Rys. 1. Rozgałęzianie pęknięcia w fazie międzyziarnowej tworzywa ceramicznego (obraz SEM; niepublikowane prace własne)

Fig. 1. Crack branching in the intergranular phase of ceramic material (SEM image) (unpublished data of own research)



Rys. 2. Propagacja pęknięcia w osnowie ceramicznej kompozytu materiał ceramiczny/elastomer (obraz SEM) [7]

Fig. 2. Crack propagation in ceramic matrix of ceramic material/elastomer composite (SEM image) [7]



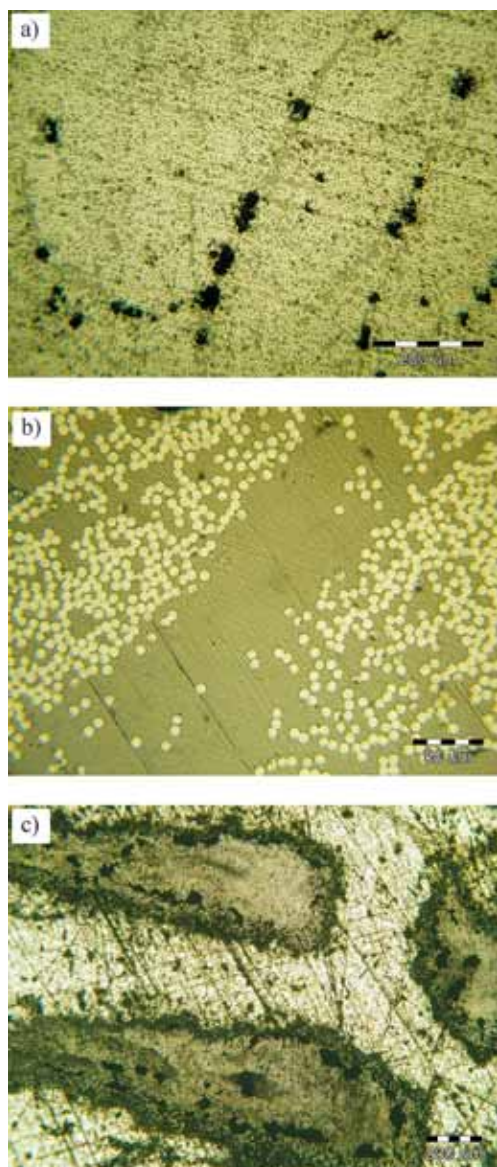
Rys. 3. Efekt mostkowania pęknięcia materiału ceramicznego ( $Al_2O_3$ ) przez cząstkę molibdenu (Mo) (obraz SEM; niepublikowane prace własne)

Fig. 3. Ceramic material ( $Al_2O_3$ ) crack bridging with molybdenum (Mo) particle (SEM image) (unpublished data of own research)

na dwa lub więcej równoległych pęknięć matrycy ceramicznej oraz ich mostkowanie przez cząstki elastomeru widoczne jest na rys. 2. Podobną rolę co cząstki elastomeru może odgrywać metal (rys. 3) [10–13].

Niektóre rodzaje tworzyw ceramicznych są wrażliwe na działanie środowiska. Na przykład, działanie wody lub pary wodnej może zmniejszyć krytyczną długość szczeliny, powodując w warunkach występowania stałego poziomu naprężeń gwałtowne zniszczenie konstrukcji [5].

Defekty powstające w strukturze kompozytów o osnowie polimerowej z napełniaczem włóknistym można podzielić na powstałe w procesie technologicznym i powstałe podczas eksploatacji. Defekty technologiczne wynikają głównie z niedoskonałości procesu produkcyjnego i/lub wpływu tzw. „czynnika ludzkiego”. Zależą zatem od staranności wykonania, przestrzegania warunków prowadzenia procesu i doświadczenia osób wykonujących wyroby kompozytowe. Do tego typu defektów zalicza się m.in. niecałkowite zwilżenie włókien przez osnowę, co prowadzi do powstania „suchych styków”



Rys. 4. Defekty powstałe na etapie wytwarzania kompozytu włókna węglowe/żywica epoksydowa (obrazy SEM); a) pęcherze powietrza (czarne punkty), b) nierównomierne rozmieszczenie włókien węglowych, c) obszary nieprzesączonej żywicą włókien, tzw. suche styki (niepublikowane prace własne) Fig. 4. Failures occurred at the step of preparation of carbon fiber/epoxy resin composite (SEM images): a) air bubbles (black points), b) non-uniform arrangement of carbon fibers, c) regions of fibers not saturated with a resin (so called dry contact) [unpublished data of own research]

między włóknami, niewłaściwego utwardzenia osnowy żywicznej, słabej adhezji pomiędzy składnikami, tworzenia pęcherzy, pustek i rozwarstwień, a także uszkodzenia włókien (pokruszenia, pofalowania lub zerwania). Przykłady defektów powstałych na etapie wytwarzania kompozytu włókna węglowe/żywica epoksydowa przedstawia rys. 4.

Podczas wytwarzania kompozytów o osnowie ceramicznej z napełniaczem elastomerowym, na skutek

znacznych różnic rozszerzalności termicznej i różnego skurczu składników, generowane są naprężenia szcztkowe, które mogą powodować pęknięcie osnowy, niestabilność kształtu lub delaminację [1].

W trakcie eksploatacji struktura kompozytów może zmieniać się w wyniku zarodkowania, rozwoju bądź kumulacji defektów powstających pod wpływem obciążeń i warunków środowiska. Do najczęściej występujących uszkodzeń w kompozytach polimerowych, spowodowanych eksploatacją, zalicza się pęknięcia warstwy granicznej włókno-osnowa (tzw. *debonding*), pęknięcia osnowy, zerwanie włókien i delaminację. Uszkodzenia te mogą mieć charakter lokalny (występują w obszarach o wymiarach od kilku do kilkunastu  $\mu\text{m}$ ) i nie wywołują wówczas znacznego pogorszenia właściwości technicznych konstrukcji. Większy wpływ na właściwości kompozytów wywierają uszkodzenia zachodzące w odniesieniu do pojedynczej warstwy materiału (0,1–0,5 mm). Mogą mieć one charakter pęknięcia poprzecznego poszczególnych warstw, rozszczepienia pasm rovingu, pęknięcia podłużnego i śródwarstwowego (lokalne delaminacje) oraz zerwania pasm rovingu lub ścinania na skutek wybożenia [2]. Uszkodzenia te na ogół prowadzą do zniszczenia kompozytu, a ich badania mają szczególne znaczenie praktyczne.

#### ZASTOSOWANIE METOD KONTROLI NIENISZCZĄCEJ DO MONITOROWANIA USZKODZEŃ W KOMPOZYTACH

Do podstawowych metod NDE stosowanych do wykrywania wad zarówno w procesie produkcji kompozytów, jak i podczas ich późniejszej eksploatacji można zaliczyć metody optyczne, elektromagnetyczne, ultradźwiękowe oraz radiograficzne.

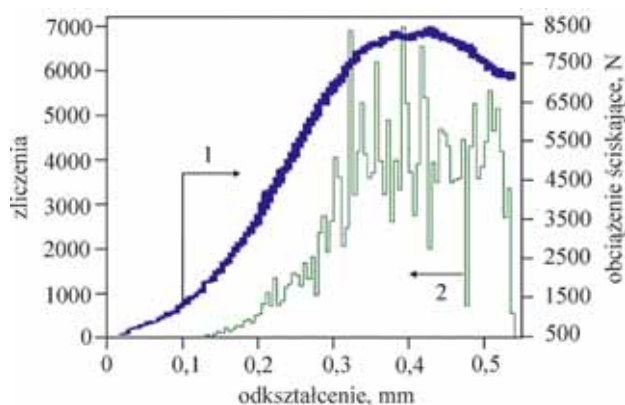
W ostatnich latach wśród badań optycznych coraz większe znaczenie ma jedna z metod laserowej interferometrii optycznej (*shearograph*). Stanowi ona połączenie techniki holograficznej z interferometrią plamkową i jest wykorzystywana do detekcji m.in. delaminacji i pęknięć osnowy. Wady tego typu można też wykrywać metodami ultradźwiękowymi oraz radiograficznymi. Obserwuje się rozwój metod ultradźwiękowych w kierunku nowych algorytmów obróbki oraz wizualizacji danych pomiarowych, a także zautomatyzowanych systemów zbierania i przetwarzania informacji. Wśród nowych technik ultradźwiękowych stosowanych do badania kompozytów warto również wymienić metodę *time-reversal mirror* (TRM)<sup>\*)</sup> oraz badania uszkodzeń dynamicznych falami Lamba. Do badań kompozytów wzmacnianych włóknami przewodzącymi prąd elektryczny, np. węglowymi, można stosować metodę prądów wirowych. Jej zaleta polega na wykrywaniu o ok. 30 % więcej defektów niż w metodzie ultradźwiękowej [14].

Do badania kompozytów zwłaszcza przydatna jest metoda emisji akustycznej. Charakteryzuje się ona dużą

<sup>\*)</sup> Brak polskiej nazwy metody.

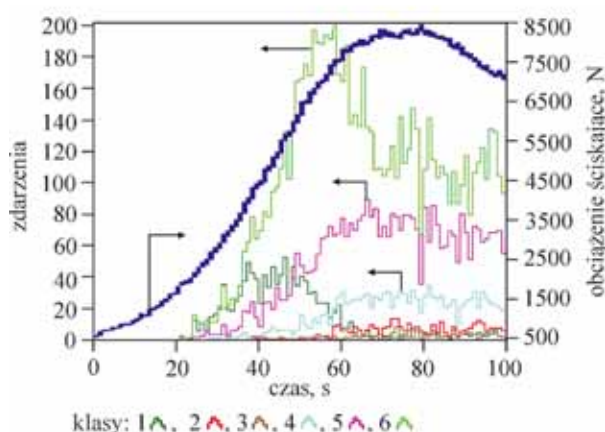
czułością detekcji i można ją zastosować jako metodę monitorującą stan struktury materiału w czasie rzeczywistym. Metoda ta pozwala na wykrycie i śledzenie rozwoju uszkodzeń zarówno wzmocnienia, jak i osnowy kompozytu z uwzględnieniem stanu warstwy granicznej pomiędzy jego składnikami. Charakterystyki emisji akustycznej umożliwiają ocenę kumulacji uszkodzeń i intensywności ich powstawania.

Podstawowym sposobem określania uszkodzeń za pomocą emisji akustycznej jest wizualizacja i analiza rejestrowanych parametrów fal zbieranych w warunkach stałych lub zmiennych obciążeń. Pomiar emisji akustycznej w przypadku stałych obciążeń służy do badań procesów degradacji chemicznej, m.in. utleniania. Przykładem badań przebiegających w warunkach zmienne-



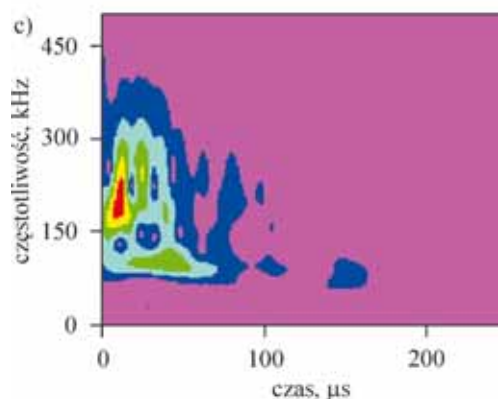
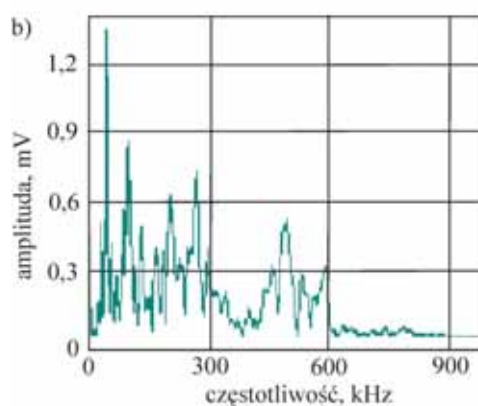
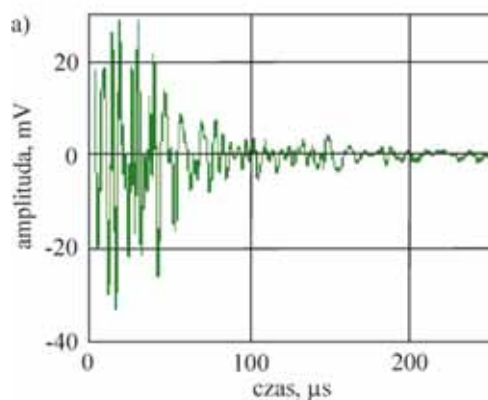
Rys. 5. Wykres intensywności emisji akustycznej podczas ściskania kompozytu materiał ceramiczny/elastomer [15]

Fig. 5. Diagram of acoustic emission intensity during compression of ceramic material/elastomer composite [15]



Rys. 6. Wykres ściskania kompozytu materiał ceramiczny/elastomer w funkcji czasu z wyróżnionymi klasami sygnałów emisji akustycznej wyrażonej ilością zdarzeń w klasach od 1 do 6 [15]

Fig. 6. Diagram of ceramic material/elastomer composite compression versus time with distinguished classes of signals of acoustic emission expressed as number of events in 1 to 6 classes [15]



Rys. 7. Sygnały mikropekania polimerowej osnowy kompozytu z włóknem węglowym podczas delaminacji (a) oraz odpowiadające temu sygnałowi widmo częstotliwości (b) i transformata falkowa (c) [16]

Fig. 7. Signals of microcracking of polymer matrix of a composite with carbon fiber during delamination (a) and spectrum of frequency (b) and falck transform (c) related to the signals [16]

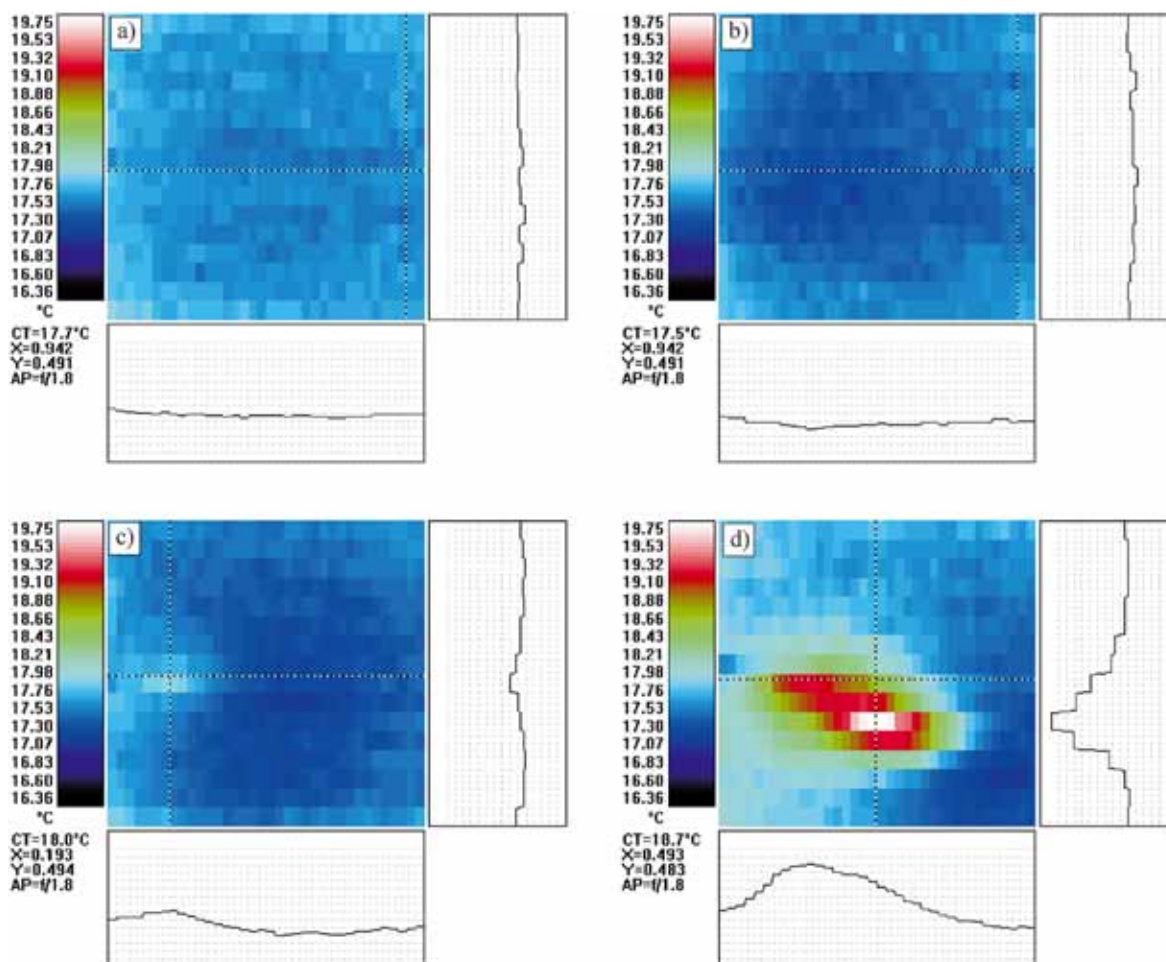
go obciążenia, pozwalających na wykrycie aktywnych pęknięć, jest charakterystyka otrzymana podczas ściskania kompozytu materiał ceramiczny/elastomer z zarejestrowanym w trakcie odkształcania zapisem intensywności emisji akustycznej (rys. 5). Rozwój w ostatnich latach metod analizy sygnałów akustycznych umożliwił opracowanie modeli przyporządkowujących takie zapisane sygnały poszczególnym mechanizmom niszczenia kompozytów.

W praktyce przemysłowej do oceny defektów wykrywanych na podstawie pomiaru intensywności emisji akustycznej coraz powszechniej stosuje się metody wykorzystujące klasyfikację zapisanych sygnałów. Przyjmuje się odpowiednie klasy zapisywania sygnałów akustycznych, aby wyznaczyć zakresy obciążeniowe odpowiadające działaniu poszczególnych procesów zniszczenia. Ilustruje to rys. 6 na przykładzie ściskania kompozytu materiał ceramiczny/elastomer. Identyfikacja tych procesów wymaga dalszych badań.

Innym dodatkowym źródłem informacji o emisji akustycznej jest transformata falkowa. Porównanie przedstawionych na rys. 7 [16] sygnałów wskazuje, że zastosowanie transformaty falkowej pozwala na skuteczniejsze wykorzystanie wizualnej oceny badanego zjawiska mikropęknięcia. Stosowanie tak zaawansowa-

nych sposobów analizy sygnałów jak metody klasyfikacji lub transformata falkowa jest jednak trudne do bezpośredniego wykorzystania w diagnostyce obiektów i urządzeń.

Do metod NDE umożliwiających ujawnienie uszkodzeń w czasie rzeczywistym zalicza się także termografię w podczerwieni. Ze względu na obserwowane tu zmiany temperatury mierzonej na powierzchni badanych elementów metodę tę stosuje się zwłaszcza do badania konstrukcji powłokowych. Wykorzystuje się w niej zjawisko zaburzenia przewodzenia ciepła w miejscu uszkodzenia struktury lub zjawisko sprzężenia termomechanicznego w warunkach działającego pola naprężenia. Zastosowanie techniki termografii w podczerwieni z wykorzystaniem detektorów wysokiej czułości pozwala na wykrycie inicjacji pęknięcia oraz wyznaczenie



Rys. 8. Profilogramy procesu inicjacji i rozwoju pęknięcia na wierzchołku szczeliny kompozytu polimer/krótkie włókno szklane w zależności od kolejnych poziomów jednoosiowego obciążenia: (a) — 50 N, (b) — 130 N, (c) — 1110 N, (d) — 1150 N. Rejestracja temperatury wzdłuż linii opisanych współrzędnymi umieszczonymi na obrazie termograficznym. Pola ciemniejsze w stosunku do obrazu stanu wyjściowego (a) wskazują strefy wzrostu odkształceń odwracalnych [17]. U dołu i po prawej stronie profilogramów znajdują się profile temperatury, odpowiednio wzdłuż osi  $x$  i  $y$

Fig. 8. Profiles of the processes of initiation and propagation of cracking at the top of a crack of polymer/short glass fiber composite depending on uniaxial loading levels: (a) — 50 N, (b) — 130 N, (c) — 1110 N, (d) — 1150 N. Registration along the lines denotes with coordinates placed on thermogram. The areas darker than the image of initial state (a) show the zones of reversible deformations' growth [17]. The profiles of temperature along  $x$ - or  $y$ -axes are at the bottom and right side of the graphs, respectively

drogi i intensywności jego rozwoju. Odpowiednio czuła rejestracja zmian pola temperatury na powierzchni wyrobu lub konstrukcji umożliwi ujawnienie miejscowego wzrostu odkształceń nieodwracalnych bądź tarcia w strefie uszkodzenia na podstawie zaobserwowanej dysypacji ciepła. Przykład praktycznego wykorzystania sprzężenia termomechanicznego przedstawia rys. 8. W odniesieniu do kolejnych poziomów jednoosiowego obciążania materiału ze szczeliną obserwujemy zmiany pola temperatury powierzchni, będące wynikiem wzrostu odkształceń odwracalnych, które są widoczne w postaci strefy obniżania się temperatury (o ok. 0,1 deg). Obserwuje się także efekty związane z miejscową dysypacją ciepła występującą w wyniku rozwoju odkształceń nieodwracalnych i procesu tarcia podczas rozwoju procesu pęknięcia (wzrost o ok. 2,4 deg) [17].

#### WYKORZYSTANIE MATERIAŁÓW INTELIGENTNYCH DO MONITOROWANIA

Literatura przedmiotu podaje liczne przykłady wykorzystania materiałów inteligentnych do monitorowania stanu kompozytów polimerowych [4, 18, 19]. Zastosowanie sensorów wykonanych z takich materiałów po-

rzystywanych w kosmonautyce. Charakteryzują się one specyficznymi właściwościami, np. odpornością na zmiany pola elektromagnetycznego lub zmiany temperatury.

Istotną kwestią związaną z zastosowaniem materiałów inteligentnych jako sensorów jest zapewnienie prawidłowej interpretacji przekazywanych sygnałów. Do tego celu niezbędne jest opracowanie modeli wyjaśniających reakcję takich materiałów na różnego typu defekty. Pewnym ograniczeniem stosowania metod monitorowania stanu konstrukcji za pomocą materiałów inteligentnych jest właśnie niewystarczająca możliwość detekcji niektórych uszkodzeń.

Monitorowanie stanu konstrukcji za pomocą materiałów inteligentnych polega na wykorzystaniu włókien światłowodowych, materiałów piezoelektrycznych i magnetostrykcyjnych, a także na pomiarze rezystancji [4]. W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę wymienionych metod monitorowania *in situ*.

Współczesna technika dysponuje różnymi rozwiązaniami sensorów montowanych zarówno wewnątrz kompozytu, jak i na jego powierzchni [20]. W większości przypadków możliwe jest monitorowanie stanu całej konstrukcji. Najczęściej monitoruje się drgania kons-

T a b e l a 1. Metody monitorowania *in situ* stanu konstrukcji kompozytowych [4]

T a b l e 1. Methods of *in situ* monitoring of composites' conditions [4]

Metoda monitorowania	Sposób rozmieszczenia sensorów	Monitorowane rodzaje zjawisk	Obszar pomiaru	Koszt	Transmisja danych
Sensory światłowodowe	wbudowane w konstrukcję	pęknięcie, odkształcenia, drgania, temperatura	wokół włókna pomiarowego	duży	zależnie od metody
Sensory piezoelektryczne	wbudowane w konstrukcję	odkształcenia dynamiczne, impedancja	średni do dużego	średni	łatwa
Znaczniki magnetostrykcyjne	brak sensorów (znaczniki)	uszkodzenia, odkształcenia statyczne	duży	brak danych	brak danych
Pomiar rezystancji	brak sensorów (znaczniki)	uszkodzenia, odkształcenia statyczne	duży	brak danych	brak danych

zwala na monitorowanie stanu wyrobów i konstrukcji zarówno w trakcie ich eksploatacji, jak i na etapie wytwarzania. Stosowanie materiałów inteligentnych jako sensorów do oceny degradacji materiałów stanowi podstawę monitorowania stanu konstrukcji w sposób ciągły w czasie rzeczywistym. Dane jakie odbierają sensory mogą być przekazywane na znaczne odległości, na przykład za pomocą telefonii komórkowej lub internetu.

Badania dające dokładne informacje o stanie wykonanych z kompozytów polimerowych konstrukcji lotniczych lub budowlanych w ciągu założonego czasu ich eksploatacji (>40 lat) mają istotne znaczenie ze względów bezpieczeństwa. Dlatego też do tego celu używane są materiały inteligentne.

Sensory z materiałów inteligentnych stosuje się także do monitorowania struktur materiałów wyko-

trukcji oraz uszkodzenia i ich propagację na etapie wytwarzania bądź eksploatacji materiału. Zebrane informacje mogą posłużyć do oceny stopnia uszkodzenia i degradacji konstrukcji.

Sensory używane podczas utwardzania żywicy umożliwiają monitorowanie *in situ* zmiany jej składu chemicznego, lepkości, sprężystości i przewodnictwa elektrycznego, zatem także ocenę stopnia jej usieciowania. Sensory temperatury pozwalają na kontrolowanie rozkładu temperatury wewnątrz wyrobów, których skomplikowane kształty powodują niejednorodność rozkładu temperatury podczas utwardzania. Monitorowanie stanu materiału w trakcie procesu chłodzenia po etapie formowania utwardzonych wyrobów pozwala na śledzenie rozkładu i wartości powstających naprężeń szczątkowych oraz wad struktury.

## PODSUMOWANIE

Kompozyty — ze względu na odmienny charakter tworzących je składników — są bardziej niż inne materiały narażone na powstawanie wad zarówno na etapie ich otrzymywania, jak i podczas eksploatacji. Defekty te nie zawsze prowadzą do zniszczenia materiału i często wyroby, w których występują np. lokalne pęknięcia i/lub delaminacje mogą być z powodzeniem eksploatowane w ciągu wielu lat. Istnieje jednak niebezpieczeństwo rozwoju uszkodzeń lub powstawania nowych w warunkach eksploatacji, a w konsekwencji zniszczenia wyrobu. Monitorowanie stanu materiału w konstrukcjach inżynierskich pozwala na uniknięcie takiego zjawiska. Współczesna technika oferuje w tym zakresie szereg nowych możliwości, w szczególności wykorzystujących nieniszczące metody badań.

Należy podkreślić, że gdy stosuje się metody NDE sprawą podstawową jest zapewnienie prawidłowej interpretacji uzyskanych informacji. Wymaga to analizy zachowania się monitorowanej konstrukcji bądź materiału w warunkach działania pola naprężeń i środowiska w kontekście możliwych procesów zniszczenia.

## LITERATURA

1. Degamber B., Fernando G. F.: *MRS BULL.* 2002, nr 5, 370.
2. Bełzowski A.: „Degradacja mechaniczna kompozytów polimerowych. Metody oceny wytrzymałości długotrwałej i stopnia uszkodzenia”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
3. Ochelski S.: „Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych”, WNT, Warszawa 2004.
4. „Encyclopedia of Smart Materials”, tom 1. (red. Schwartz M.), Wiley, Nowy Jork 2002, str. 291—318.
5. Jurczyk M., Jakubowicz J.: „Nanomateriały ceramiczne”, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004, str. 18, 56.
6. *Pol. zgłosz. pat.* P 353 130 (2002).
7. Boczkowska A., Konopka K., Kurzydłowski K. J.: „Effect of elastomer structure on ceramic-elastomer composite properties”, 12th Achievements in Mechanical & Materials Engineering, AMME 2003, Zakopane, 7—10 grudnia 2003 r., materiały, str. 111.
8. Wachtman J. B.: „Mechanical Properties of Ceramics”, Wiley and Sons, Nowy Jork 1996.
9. Konopka K., Mizera J.: *Arch. Nauk. Mater.* 2000, **21**, 155.
10. Konopka K., Oziębło A., Kurzydłowski K. J.: 8<sup>th</sup> European Congress for Stereology and Image Analysis, Bordeaux, Francja, materiały, 20, (Suppl. 1): 487—491 (2001).
11. Konopka K., Oziębło A.: *Mater. Charact.* 2001, **46**, 125.
12. Konopka K., Olszówka-Myalska A.: *Rev. Metal.* 2000, SF2M, nr artykułu 4.7, str. 139.
13. Konopka K., Matysiak H., Mizera J., Olszówka-Myalska A., Olszyna A.: *Arch. Nauk. Mater.* 2000, **21**, 81.
14. Gros X. E.: *Ann. Chim. Sci. Mater.* 2000, **25**, 539.
15. Boczkowska A., Konopka K., Schmidt J., Kurzydłowski K. J.: *Kompozyty* 2004, nr 9, 41.
16. Kaczmarek K.: „Efekt brzegowy w przestrzennych elementach wykonanych z laminatów kompozytowych”, praca doktorska, Politechnika Wroclawska 2003.
17. Schmidt J., Baran I.: „On the application of the Acoustic Emission and Infrared Thermography to failure process evaluation in short fibre reinforced plastics”, materiały, Second International Conference on Composite Science and Technology, 9—11 czerwca 1998 r., Durban, Południowa Afryka.
18. „Encyclopedia of Smart Materials”, tom 2. (red. Schwartz M.), Wiley, Nowy Jork 2002, str. 715—760.
19. Garg D. P., Zikry M. A., Anderson G. L.: *Smart Mater. Struct.* 2001, **10**, 610.
20. Boczkowska A., Wojciechowski S.: *Inż. Mater.* 2004, nr 2, 81.