

MODEL NUMERYCZNY DO SYMULACJI DEGRADACJI KOMPOZYTU POLIMEROWEGO

GABRIEL WRÓBEL^{a,*}, JAROSŁAW KACZMARCZYK^b,
JÓZEF STABIK^a, MACIEJ ROJEK^a

^a Zakład Przetwórstwa Materiałów Metalowych I Polimerowych, Instytut Materiałów Inżynierskich I Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice

^b Katedra Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice

* e-mail: gabriel.wrobel@polsl.pl

Streszczenie. W pracy omówiono model numeryczny kompozytu polimerowego wzmocnionego włóknem szklanym zastosowany do symulacji złożonych procesów degradacji zmęczeniowej i degradacji starzeniowej. Podjęto zadanie budowy modelu badanego materiału kompozytowego oraz zaproponowano procedurę jego ewolucyjnej modyfikacji oddającej stwierdzone eksperymentalnie zmiany charakterystyk fizycznych. Celem wieloaspektowego odwzorowania strukturalnych procesów starzeniowo-zmęczeniowych jest hipotetyczna możliwość oszacowania na tej drodze zmian właściwości wytrzymałościowych.

1. WSTĘP

Rosnąca popularność materiałów kompozytowych to w znacznym stopniu wynik poszukiwania materiałów inżynierskich spełniających wszechstronne wymagania użytkowe. W szczególności w przypadku wielu kompozytów zachodzi możliwość niezależnej syntezy różnorodnych charakterystycznych fizycznych. Tę drogę w inżynierii materiałowej otworzyły technologie umożliwiające kontrolowane formowanie materiałów niejednorodnych. Charakterystyczną cechą materiałów tej klasy to struktura. W aspekcie geometrycznym charakteryzuje ona przestrzenną konfigurację obszarów materiału zajętych przez poszczególne fazy – składniki strukturalne. W aspekcie materiałowym stanowi opis budowy wewnętrznej i wynikających stąd właściwości konstytutywnych poszczególnych faz, a także sposobu ich współpracy. Złożoność budowy wewnętrznej w przypadku wielu materiałów kompozytowych dostarcza parametrów sterowania właściwościami kompozytu. Polimerowe materiały kompozytowe to budzący wyjątkowe zainteresowanie obszar poszukiwania materiałów konstrukcyjnych dzięki dostępności różnorodnych technologii formowania oraz łączenia osnowy polimerowej z fazą wzmocnienia, napelnacza czy dodatków funkcyjnych. Możliwość projektowania struktury kompozytu oraz kształtowania właściwości składników strukturalnych w połączeniu z konkurencyjną ceną, niską wytrzymałością właściwą wyznaczają wzrost udziału tej grupy materiałów w rynku materiałów konstrukcyjnych. Szczególnie duże znaczenie mają powłoki kompozytowe wykorzystywane w produkcji instalacji, zbiorników, w przemyśle

samochodowym czy budowlanym. W wielu przypadkach materiały kompozytowe zastępują stosowane tradycyjnie stal, beton czy drewno. Oprócz wymienionych i niewymienionych zalet materiały te charakteryzują się również specyficznymi słabościami. Do najistotniejszych należy spadek charakterystyk wytrzymałościowych w warunkach obciążenia zmęczeniowego – efekt analogiczny do obserwowanego w materiałach tradycyjnych oraz starzeniowe oddziaływanie czynników środowiskowych i ciepła.

Sposobem na bezpieczne użytkowanie urządzeń, instalacji czy konstrukcji, których elementy narażone są na taki sposób eksploatacyjnego osłabienia to badania diagnostyczne, umożliwiające ocenę aktualnego stanu materiału oraz stopnia utraty zdolności nośnej układu. Wynikom badań podstawowych nad możliwością adaptacji ultradźwiękowych i termowizyjnych technik diagnostycznych poświęcone były wcześniejsze prace [1-5].

W niniejszej pracy przedstawiono wstępne wyniki badań możliwości symulacyjnego wspomaganie procesu diagnostycznego. Omówiony przykład zadania oraz wyniki dotyczą przypadku powłoki laminowanej z zastosowaniem tkaniny z włókna szklanego poddanej obciążeniu zmęczeniowemu. Celem analizy jest odwzorowanie procesu zmęczeniowej degradacji materiału, wskazanie sposobu oceny stopnia wyczerpania zdolności nośnej lub aktualnej wytrzymałości doraźnej oraz symulacyjnej weryfikacji relacji diagnostycznej z udziałem prędkości fazowej fali akustycznej (ultradźwiękowej).

2. MODEL OŚRODKA

Metodyka modelowego odwzorowania procesów zmian zmęczeniowych omówiona zostanie na przykładzie kompozytu o osnowie polimerowej, wzmocnionego włóknem ciągłym (np. szklanym lub węglowym). Jest to popularny przypadek spotykany w płytach i powłokach laminowanych. Założono znajomość masowego lub objętościowego udziału włókien w materiale oraz cechy strukturalne jego ułożenia. W zamieszczonym przykładzie przyjęto równomierny rozkład włókien w objętości kompozytu (na grubości i powierzchni powłoki).

W celu modelowej symulacji procesu zmęczeniowej destrukcji wyodrębniono prostopadłościenny wycinek materiału o jednostkowej grubości, będący fragmentem powłoki kompozytowej. Pozostałe wymiary wycinka odpowiadają lokalnej grubości powłoki oraz arbitralnie ustalonej wielkości próbki, umożliwiającej efektywną symulację procesu destrukcji zmęczeniowej oraz diagnostyki akustycznej (Tablica.1).

Tablica 1. Wymiary geometryczne modelu fizycznego próbki kompozytu

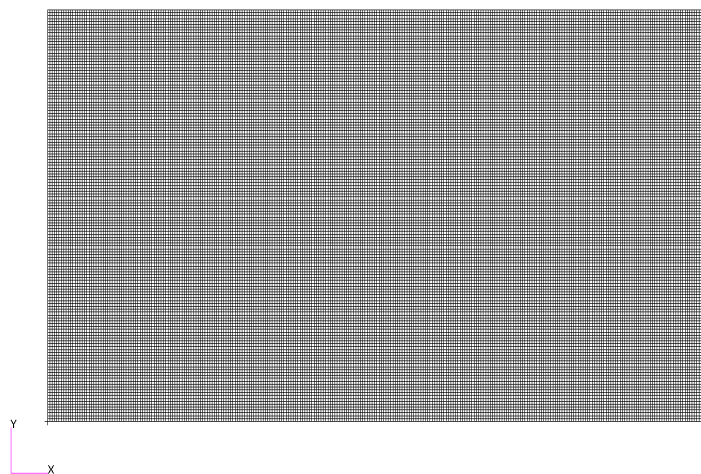
Lp.	Wymiary modelowanego wycinka kompozytu	Wartość [μm]
1.	Długość l	20000
2.	Wysokość h	10000
3.	Grubość g	1

Model numeryczny zbudowany został z elementów tarczowych o jednostkowej grubości. Analizowany obszar jest zatem prostokątem o wysokości odpowiadającej grubości powłoki. Podział obszaru na elementy skończone oraz rozkład właściwości materiałowych elementów pozwala na odwzorowanie cech strukturalnych materiału. W omawianym przykładzie dokonano homogenizacji ośrodka przyjmując zastępcze wartości gęstości oraz parametrów sprężystych (Tablica 2).

Tablica 2. Dane materiałowe

Składnik	Żywica polimerowa	Włókno szklane	
Moduł sprężystości podłużnej E [MPa]	20	77	
Współczynnik Poissona ν	0,35	0,23	
Gęstość ρ [kg/m ³]	1200	2450	
Udział masowy [%]	50	Osnowa 25	Wątek 25

Model kompozytu o wymiarach podanych podzielono na 40898 skończone prostokątne elementy tarczowe o dwóch stopniach swobody w węzle odpowiadające 41328 węzłom, co w konsekwencji doprowadziło do modelu o 82656 stopniach swobody. Sposób podziału pokazano na rys.1.



Rys. 1. Model kompozytu z podziałem na czworokątne skończone elementy tarczowe.

3. MODEL PROCESU DESTRUKCJI ZMĘCZENIOWEJ OŚRODKA

Mechanizm wytrzymałościowego osłabienia materiału w procesie zmęczenia polega na kumulacji nieodwracalnych zmian strukturalnych o charakterze mikronieciągłości. Przyczyną generowania lokalnej nieciągłości jest krytyczny poziom lokalnego wyężenia. Niejednorodność tego stanu wynika z warunków obciążenia roboczego, ale również z niejednorodności strukturalnej materiału, obecności różnego typu koncentratorów naprężeń. Mogą nimi być nieciągłości na granicy faz, w przypadku kompozytu, ale również wady i niejednorodności struktury w obszarze poszczególnych faz, głównie osnowy kompozytowej. W przedstawionym przykładzie założono niejednorodność materiałową jako przyczynę procesu zmęczenia.

Procedura modelowa ma charakter sekwencyjny. Kolejne sekwencje składają się z procedury modyfikacji strukturalnej oraz analizy stanu obciążenia w modelowym obszarze, której wyniki stanowią dane do kolejnej fazy modyfikacji itd. Modyfikacja strukturalna, odwzorowująca proces osłabienia zmęczeniowego, polega na czasowo-przestrzennej, losowej eliminacji elementów ośrodka. Eliminacja elementu oznacza zerowanie jego sztywności w połączeniu z redystrybucją jego masy na pozostałe elementy. Chaotyczny charakter tego procesu wynika z przyjętej losowej procedury generacji zbioru elementów eliminowanych

w kolejnych krokach czasowych. Prawdopodobieństwo eliminacji elementu jest zależne od lokalnych warunków obciążenia – przykładowa zależność oparta na krzywej Wöhlera materiału została przytoczona w pracy [6]:

$$p(\sigma_{red\ max}) = \frac{Re - Z_{rc}}{Re - \sigma_{red\ max}} \frac{\Delta n}{n_{kr}}, \quad \text{dla} \quad \Delta n < n_{kr},$$

$$p(\sigma_{red\ max}) = 1, \quad \text{dla} \quad \Delta n \geq n_{kr},$$
(1)

gdzie: Re – granica plastyczności,

Z_{rc} – granica wytrzymałości zmęczeniowej,

n_{kr} – krytyczna liczba cykli dla cyklu obciążenia z amplitudą $\sigma_{red,max}$,

Δn – liczba cykli odpowiadająca krokowi procedury.

Powyższa zależność zakłada, że $p(Re)=1$, $p(Z_{rc})=0$. Przyjęta zasada modyfikacji powoduje, że istniejące na każdym etapie osłabienia materiału nieciągłości stają się atraktorami kolejnych aktów eliminacji elementów. Proces eliminacji koncentruje się w ich otoczeniu dając zauważalne w eksperymentach skutki w propagacji nieciągłości, aby w ostatecznym efekcie doprowadzić do powstania makropęknięcia.

Model procesu osłabienia zmęczeniowego pozwala również na określenie stopnia wyczerpania nośności elementu w warunkach obciążenia statycznego. Miarą wytrzymałości doraźnej materiału może być obciążenie statyczne prowadzące do lokalnego przekroczenia wytrzymałości materiału w stanie zmęczeniowej degradacji. Umożliwia to jednocześnie weryfikację doświadczalną przyjętych parametrów procedury symulacyjnej.

4. WERYFIKACJA DIAGNOSTYCZNA MODELU SYMULACYJNEGO

Oprócz wskazanej niszczącej metody weryfikacji poprawności modelu możliwa jest również sprawdzenie zgodności jego charakterystyk możliwych do wyznaczenia w sposób nieniszczący. Do takich należą charakterystyki propagacji fali akustycznej w ośrodku. W odniesieniu do rzeczywistego materiału sposób ich wyznaczania określa metodyka badań ultradźwiękowych. Tym sposobem można dokonać pomiaru prędkości propagacji fali (czasu przejścia przez materiał powłoki). Można również wyznaczyć korelację zmiany tej prędkości ze zmianami charakterystyk wytrzymałościowych materiału poddanego procesowi obciążeń w warunkach zmęczeniowych [1, 2].

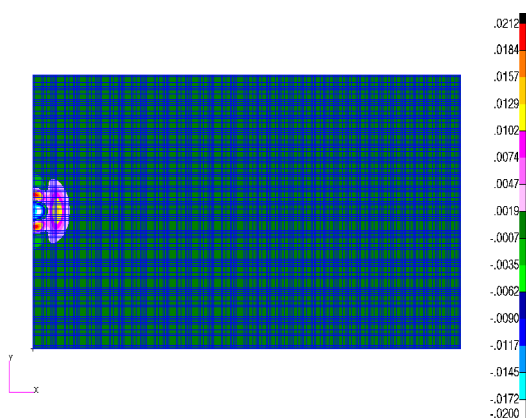
Jednocześnie zachodzi możliwość symulacji procesów diagnostycznych z wykorzystaniem opisanego modelu materiału. Wzbudzenie propagacji fali akustycznej w warunkach odpowiadających pomiarowym, z użyciem głowicy ultradźwiękowej, pozwala na symulacyjne wyznaczenie charakterystyk takiego pomiaru. Dobór parametrów modelu ośrodka oraz procedury symulującej proces degradacji zmęczeniowej powinny zapewnić zgodność wybranych charakterystyk kryterialnych procesów diagnostycznych i ich symulacji numerycznych. Daje to podstawę budowy relacji diagnostycznej opartej na modelu symulacyjnym procesu degradacji. Jednocześnie wskazuje metodologiczną drogę diagnostyki symulacyjnej, jako wspomagającej tradycyjne postępowanie diagnostyczne.

4.1. Symulacja propagacji fali akustycznej

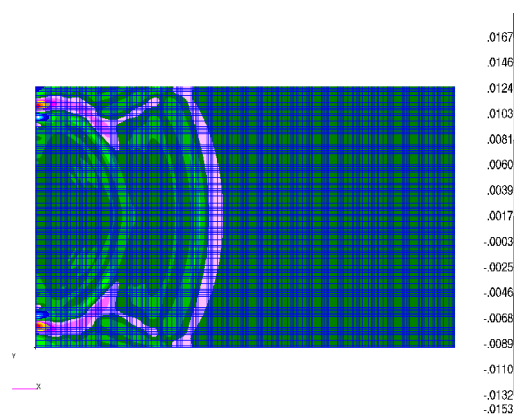
Poniżej przedstawione wyniki symulacji procesu diagnostyki akustycznej dotyczą modelu płaskiego reprezentującego wycięty fragment płyty z laminatu na bazie żywicy epoksydowej wzmocnionego włóknem szklanym. Początkową ciągłą strukturę materiału poddano modyfikacji odpowiadającej symulowanemu procesowi degradacji zmęczeniowej. W wyniku otrzymano ciąg modeli odpowiadających różnym stopniom zaawansowania procesu zmęczeniowej degradacji. Modele te wykorzystano następnie do analizy procesu propagacji sygnału akustycznego, odpowiadającego cechami fali ultradźwiękowej.

W celu opracowania modelu obliczeniowego kompozytu opracowano autorski program komputerowy o nazwie *Random* przy użyciu języka programowania obiektowego C++. Plikiem wejściowym do programu *Random* jest plik *Mesh1.bdf* wygenerowany przez system komputerowy *MSC.Patran* w celu wykonania obliczeń dynamicznych przy użyciu modułu obliczeniowego *MSC.Nastran*.

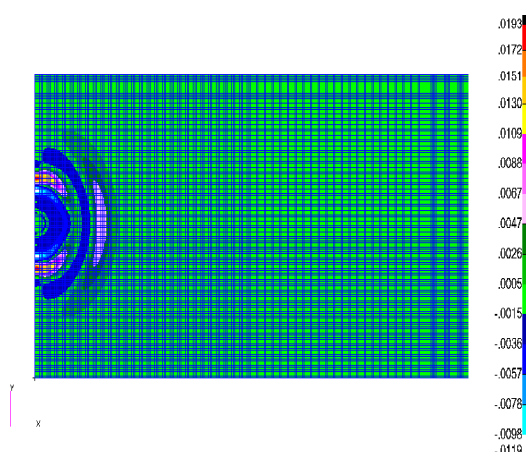
Poniżej na rys.2 do 5 ukazano wybrane obrazy chwilowej deformacji falą akustyczną modelu ośrodka.



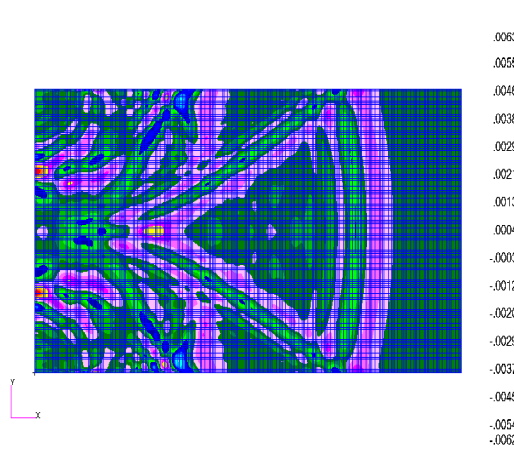
Rys. 2. Mapa przemieszczeń wzdłuż osi x modelowanego kompozytu po czasie $5,0 \cdot 10^{-4}$ ms



Rys. 4. Mapa przemieszczeń wzdłuż osi x modelowanego kompozytu po czasie $2,5 \cdot 10^{-3}$ ms

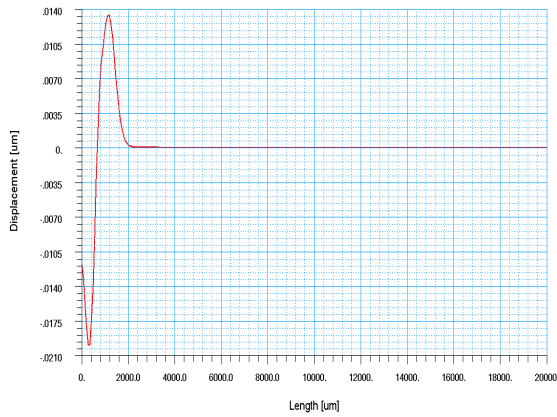


Rys. 3. Mapa przemieszczeń wzdłuż osi x modelowanego kompozytu po czasie $1,0 \cdot 10^{-3}$ ms

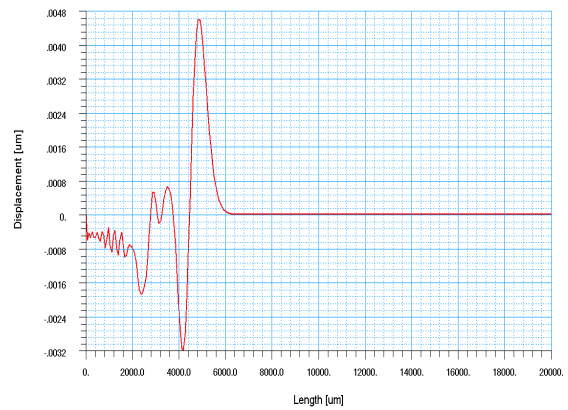


Rys. 5. Mapa przemieszczeń wzdłuż osi x modelowanego kompozytu po czasie $4,5 \cdot 10^{-3}$ ms

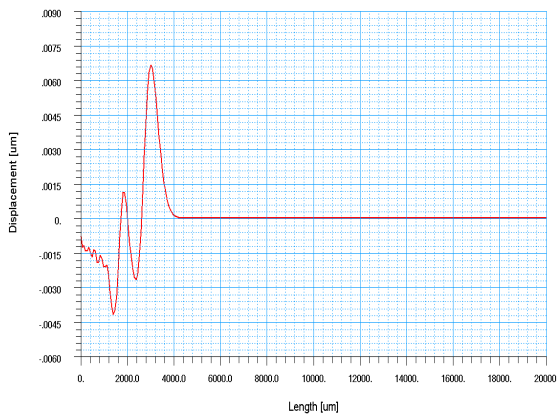
Na kolejnych wykresach przedstawionych na rys.6 do 10 pokazano rozkłady chwilowych przemieszczeń w kierunku propagacji sygnału – osi x.



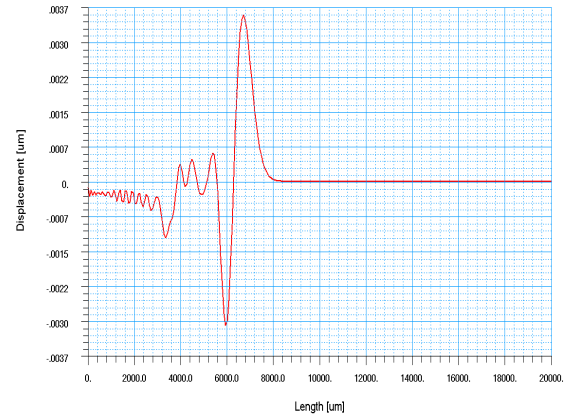
Rys. 6. Wykres propagacji fali po czasie $5,0 \cdot 10^{-4} \text{ ms}$



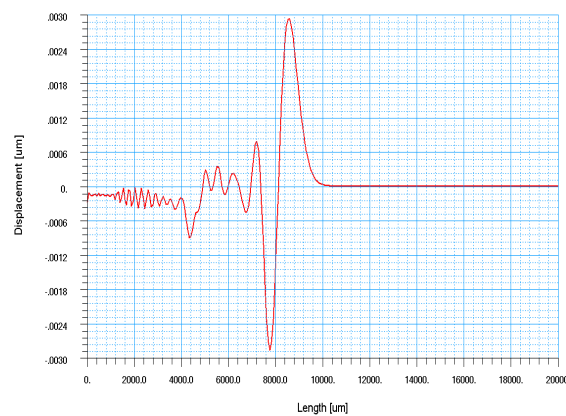
Rys. 8. Wykres propagacji fali po czasie $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ ms}$



Rys. 7. Wykres propagacji fali po czasie $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ ms}$

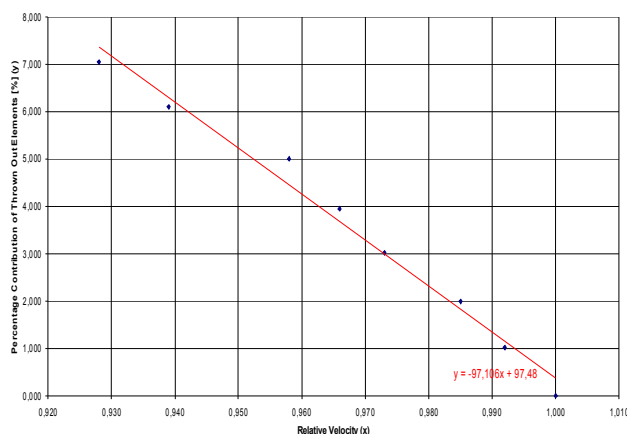


Rys. 9. Wykres propagacji fali po czasie $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ ms}$



Rys.10. Wykres propagacji fali po czasie $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ ms}$

Na podstawie wybranych wariantów analizy określono dla poszczególnych przypadków prędkości fazowe - propagacji czoła fali ultradźwiękowej wzdłużnej w modelowanym ośrodku. Zestawienie wartości wyliczonych prędkości w postaci wykresu dla zakresu degradacji od 1% do 7% pokazano na rys. 11.



Rys.11. Zależność prędkości fali od stopnia modelowej degradacji zmęczeniowej materiału.

Możliwa do określenia na drodze symulacyjnej prędkość fazowa fali ultradźwiękowej ma wartość diagnostyczną. Zestawiona z wynikiem pomiaru prędkości w modelowanym obiekcie rzeczywistym dostarcza informacji o stanie obiektu.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiony w pracy model numeryczny kompozytu polimerowego ukazuje sposób reprezentacji procesu degradacji materiału np. o charakterze zmęczeniowym lub starzeniowym za pomocą procedury strukturalnej i parametrycznej adaptacji modelu. Ilościowe parametry procedury adaptacyjnej należy określić eksperymentalnie – podstaw dostarczają wyniki badań nieniszczących i niszczących próbek materiału oraz nieniszczących badań konstrukcji. Wykorzystanie opisanej metody w symulacyjnej diagnostyce szczególnego układu nośnego wymaga opracowania modelu układu oraz procesu degradacji – historii obciążeń lub czynników starzeniowych. Badania symulacyjne modelu pozwolą na ocenę zmian charakterystyk wytrzymałościowych i stopnia wyczerpania zdolności nośnych elementu konstrukcyjnego w złożonych i zmiennych warunkach eksploatacji. Jednym z narzędzi może być przytoczona przykładowo zależność pokazana na rys.11. Jej diagnostyczna wartość może mieć sens lokalny lub globalny. Szczegółowa dyskusja sposobu korzystania z przedstawionego modelu symulacyjnego wykracza poza ramy niniejszej publikacji. Autorzy prowadzą prace nad zastosowaniem opisanej metody do badań laminatowych powłok rurowych.

LITERATURA

1. Wróbel G.: Metoda nieniszczącej diagnozy stanu degradacji wytrzymałościowej wybranych materiałów kompozytowych. Numer projektu 7 T08E 007 19. Gliwice 2003.
2. Wróbel G.: Nondestructive Testing Techniques of the Engineering Polymers. Monograph. Publishing House of the Silesian Polytechnical University (in Polish) Gliwice, 2008.
3. Wróbel G., Kaczmarczyk J.: Numerical simulation of fatigue degradation process of polymer materials using diagnostic acoustic characteristics. AMME 2009 (w druku).

4. Kudela P., Ostachowicz W.: Modelowanie propagacji fal w płytach kompozytowych. „Modelowanie Inżynierskie” 2006, nr 32, t.1, s. 323÷330.
5. Ostachowicz W., Wandowski T., Malinowski P.: Elastic wave phased array for damage localisation. “Journal of Theoretical and Applied Mechanics” 2008, Vol. 46, No. 4, p. 917 – 931.
6. Wróbel G.: Symulacja komputerowa procesu destrukcji zmęczeniowej kompozytu polimerowego. „Tworzywa Sztuczne i Chemia” 2009, nr 4, s. 40 – 44.

NUMERICAL MODEL TO SIMULATE DEGRADATION PROCESSES OF POLYMERIC COMPOSITE

Summary. The paper presents numerical model of polymeric composite reinforced with glass fibres applied to simulate complex fatigue and ageing degradation processes. The task to develop model of tested composite material was undertaken and a procedure to its evolutionary modification was proposed to describe experimentally observed changes of physical characteristics. The purpose of multi-aspect imaging of structural processes taking place in ageing and fatigue processes is hypothetical possibility of evaluation of strength properties changes.