

GABRIEL WRÓBEL*, JAROSŁAW KACZMARCZYK**,
MACIEJ ROJEK*, JÓZEF STABIK*

MODEL EWOLUCYJNY W DIAGNOSTYCE PROCESU ZMĘCZENIA KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH

EVOLUTIONARY MODEL IN DIANOSTIC OF POLYMERIC COMPOSITE FATIGUE PROCESS

Streszczenie

W pracy przedstawiono model ewolucyjny kompozytu polimerowego. Celem jest odwzorowanie procesów obserwowanych w warunkach eksploatacji materiału konstrukcyjnego, w szczególności postępującej utraty zdolności nośnej lub zmian innych charakterystyk użytkowych. W budowie modelu wykorzystano MES. Ewolucji modelu, prowadzonej sekwencyjnie, nadano charakter chaotyczny. Symulacja wybranych procesów diagnostycznych dostarcza podstaw oceny stopnia wyczerpania zdolności nośnych materiału. Podano przykład diagnostycznego wykorzystania własności akustycznych badanego materiału.

Słowa kluczowe: kompozyt, polimer, destrukcja zmęczeniowa, diagnostyka, model ewolucyjny

Abstract

In the paper an evolutionary model of polymeric composite fatigue degradation was described. The aim was in as much as possible faithful modeling of processes observed during constructional materials exploitation, particularly progressing of strength ability loss or other useful characteristics changes. The MES was chosen as a discretisation method. In the model evolution performed sequentially, chaotic system modification is preceded by actual state analysis. Evolution stage and material state characteristics evaluation give a bases of degradation extend nondestructive evaluation. The example was given of diagnostic application of searched material acoustic properties. It points the model diagnostic value.

Keywords: composite, polymer, fatigue destruction, diagnostic, evolutionary model

* Prof. dr hab. inż. Gabriel Wróbel, dr inż. Maciej Rojek, dr hab. inż. Józef Stabik, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska

** Dr inż. Jarosław Kaczmarczyk, Katedra Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska.

1. Wprowadzenie

Diagnostyka układów technicznych umożliwia racjonalną ekonomicznie i bezpieczną ich eksploatację. Jej rozwój wspierany jest rozwojem metodologii, w głównej mierze w obszarze badań nieniszczących. Badania te zmierzają do budowy relacji diagnostycznych wiążących w możliwie jednoznaczny sposób dostępne nieinwazyjnie charakterystyki układu, w szczególności charakterystyki materiałowe, z wielkościami, których określenie jest podstawą oceny stanu lub jakości badanego obiektu. Rozszerzenie zbioru klasycznych metod diagnostycznych o techniki symulacyjne w obszarze modeli wirtualnych to nowy kierunek badań diagnostycznych mogących mieć znaczenie zarówno na etapie eksploatacji jak też koncepcyjno-projektowym.

Do podstawowych kryteriów jakości materiałów konstrukcyjnych należą kryteria wytrzymałościowe. W Zakładzie Przetwórstwa Materiałów Metalowych i Polimerowych rozwijana jest metodyka nieniszczących badań diagnostycznych z wykorzystaniem techniki ultradźwiękowej oraz termowizyjnej [2, 3, 4]. Prowadzone badania wykazały możliwość budowy relacji diagnostycznych wiążących charakterystyki procesów akustycznych oraz cieplnych, stanowiących istotę stosowanych metod, z charakterystykami wytrzymałościowymi – przykładowo wytrzymałością doraźną czy resztkową wytrzymałością zmęczeniową. Budowa takich relacji w ujęciu ilościowym wymaga realizacji obszernego programu badań podstawowych testowanego materiału. Badania prowadzone są w warunkach laboratoryjnych, poddawane im są zatem próbki materiału w umownych warunkach obciążenia. Wyniki mają wartość porównawczą, lecz uogólnienie wniosków na elementy konstrukcyjne w warunkach eksploatacyjnych w ogólnym przypadku nie jest łatwe. Sposobem wspomagającym postępowanie diagnostyczne może stać się numeryczna symulacja procesu degradacji.

W dalszym ciągu artykułu opisano sposób symulacyjnego badania procesu zmęczenia materiału. Wykorzystany został przy tym model ewolucyjny materiału [5, 6], którego struktura i właściwości kształtowane są w procesie chaotycznym. Ilościowe sterowniki procesu określone są w drodze eksperymentu możliwego do przeprowadzenia w warunkach laboratoryjnych. Opisany model pozwala na śledzenie zmęczeniowego obniżenia zdolności nośnych materiału o złożonych cechach geometrycznych, poddanego niejednorodnemu i niestacjonarnemu procesowi obciążeń zmęczeniowych.

2. Model ośrodka

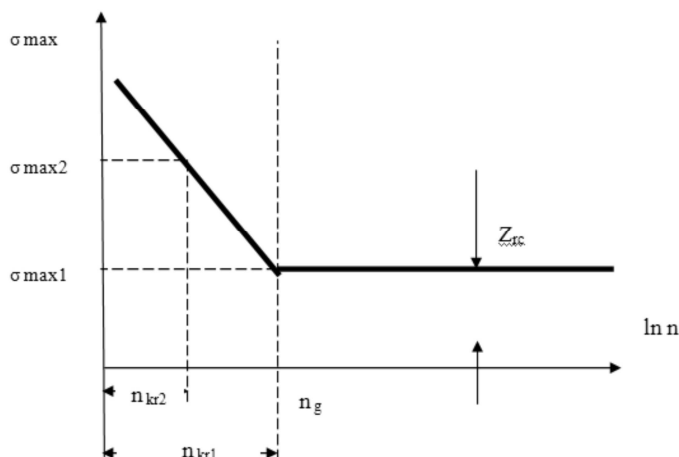
Model ewolucyjny procesu zmęczenia materiału ma za podstawę model ośrodka, którego ciąg modyfikacji składa się na obraz procesu zmęczeniowej destrukcji. Ze względu na lokalny charakter zmian ewolucyjnych wykorzystany zostanie model ośrodka z podziałem na małe elementy, zgodnie z metodyką MES. Model taki charakteryzuje struktura geometryczna wynikająca z cech geometrycznych obszaru ośrodka oraz przyjętego podziału na elementy skończone. Wynika z niej postać i liczba warunków równowagi i ciągłości opisujących model. Właściwości fizyczne ośrodka odwzorowują lokalne parametry fizyczne, np. sprężyste, określające konstytutywne równania ośrodka. Nie stanowi większego problemu uwzględnienie niejednorodności strukturalnej, w szczególności kompozytowej budowy wewnętrznej. Degradacja zmęczeniowa ośrodka przebiega w warunkach cyklicznych ob-

ciążeń. Ekstremalne stany obciążenia i odkształcenia w czasie odpowiadają maksymalnym obciążeniom w cyklu. W obszarze ośrodka obciążonego zmęczeniowo rozkład obciążeń wynika z układu obciążeń zewnętrznych czynnych i biernych oraz z rozkładu własności fizycznych – sztywności, gęstości masowej. Mechanizm osłabienia zmęczeniowego występuje w warunkach, gdy w strefach koncentracji obciążeń w ekstremalnej fazie obciążenia nie następuje inicjacja gwałtownie rozwijającej się nieciągłości – pęknięcia materiału, powstają jednak mikrouszkodzenia o charakterze nieodwracalnym. Wynika to z krytycznych stanów na poziomie mikro, a nawet nanostrukturalnym spowodowanych naturalną niejednorodnością materii ośrodka. W kolejnych cyklach obciążenia lokalne efekty uszkodzeń ulegają kumulacji mogą wreszcie doprowadzić do makropęknięcia po osiągnięciu krytycznej liczby cykli obciążenia. Miejsce inicjacji i sposób propagacji zmęczeniowych uszkodzeń w niejednorodnym stanie obciążeń wewnętrznych wynika z położenia strefy maksymalnego obciążenia, w której prawdopodobieństwo uruchomienia mechanizmu uszkodzeń struktury materiału jest największe. W przypadku gdy strefa występowania maksymalnych obciążeń jest rozległa, w warunkach jednorodnego stanu obciążenia może obejmować cały obszar ośrodka, lokalizacja ognisk inicjacji uszkodzeń będzie losowa. W modelu ewolucyjnym procesu przyjęto charakterystyczny dla materiału elementów modelu ośrodka rozkład prawdopodobieństwa jego modyfikacji odpowiadającej jego uszkodzeniu. Założono, że prawdopodobieństwo uszkodzenia zależy od wyężenia elementu. Dla różnych materiałów rozkłady te mogą być różne. Założona procedura ewolucji modelu przebiega w obszarze parametrów sprężystych.

3. Model procesu destrukcji zmęczeniowej ośrodka

Zgodnie z ogólnym opisem modelu ośrodka przedstawionym w poprzednim rozdziale, kluczowym dla symulacji ewolucyjnego procesu destrukcji zmęczeniowej jest postać charakterystycznego dla materiału elementów modelu ośrodka rozkładu prawdopodobieństwa przebiegających zmian odpowiadających jego uszkodzeniu. Założono, że prawdopodobieństwo uszkodzenia zależy od wyężenia elementu. Przyjęto roboczą hipotezę, że kształt tej zależności odpowiada przebiegowi wykresu Wohlera odpowiedniego dla materiału i parametrów obciążenia [1].

Wykres ten dostarcza informacji o zależności krytycznej liczby cykli n_{kr} do zniszczenia materiału od maksymalnej wartości naprężeń w cyklu obciążenia $\sigma_{red,max}$. Dokonując na jego podstawie odwzorowania n_{kr} w prawdopodobieństwo lokalnego uszkodzenia, przy założeniu, że $p(Re)=1$, $p(Z_{rc})=0$, dla określenia wartości prawdopodobieństwa uszkodzenia elementu odpowiadających wartościom pośrednim amplitudy obciążenia zaproponowano formułę (1).



Rys. 1. Uproszczony wykres Wohlera dla rozciągania i ściskania; Z_{re} - granica wytrzymałości zmęczeniowej na rozciąganie i ściskanie, n_g - graniczna liczba cykli

Fig. 1. Simplified Wohler's diagram for extension and compression; Z_{re} - fatigue strength limit for extension and compression, n_g - terminal number of cycles

$$p(\sigma_{red\ max}) = \frac{Re - Z_{rc}}{Re - \sigma_{red\ max}} \frac{\Delta n}{n_{kr}}, \quad \text{dla} \quad \Delta n < n_{kr}, \quad (1)$$

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

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.

Zależność ta dla wartości naprężeń $\sigma_{red\ max} \leq Z_{rc}$, wobec $n_{kr} \rightarrow \infty$, wyklucza możliwość zniszczenia elementu. Dla wartości $\sigma_{red\ max}$, dla których $\Delta n \geq n_{kr}$ oznacza pewność zniszczenia elementu w analizowanym kroku.

Każdy krok modyfikacji modelu poprzedzony jest analizą stanu obciążenia. Następnie określany jest zbiór uszkodzeń składających się na dany krok. Lokalne uszkodzenie odwzorowano poprzez usunięcie wybranego elementu modelu. Zastosowany algorytm selekcji usuwanych elementów wykorzystuje zasadę ruletki o liczbie pól odpowiadającej liczbie elementów skończonych. Wielkości tych pól są zgodne z obliczonymi wartościami energii sprężystej dla poszczególnych elementów skończonych. Ruletkę skonstruowano w sposób opisany poniżej obliczając:

- wartości energii sprężystej $f(e_i)$ dla każdego elementu skończonego e_i ($i=1, 2, \dots, n$),
- energię sprężystą całego układu:

$$F = \sum_{i=1}^{i=n} f(e_i), \quad (2)$$

- prawdopodobieństwo usunięcia p_i elementu skończonego e_i ($i=1, 2, \dots, n$):

$$p_i = \frac{f(e_i)}{F}, \quad (3)$$

- dystrybuantę q_i dla każdego elementu skończonego e_i ($i=1, 2, \dots, n$):

$$q_i = \sum_{j=1}^{j=i} p_j. \quad (4)$$

Proces selekcji oparto na obrocie ruletką liczbę razy odpowiadającą zakładanej liczbie usuwanych elementów skończonych z rozpatrywanego modelu fizycznego i wyborze za każdym razem jednego elementu skończonego do usunięcia w następujący sposób:

- generowano zmiennoprzecinkową liczbę przypadkową r z zakresu $[0, 1]$,
- jeżeli istnieje i , dla którego $r = q_i$, to wybierano element e_i do usunięcia; w przeciwnym przypadku wybierano element e_i ($2 \leq i \leq n$), dla którego spełniony był warunek:

$$q_{i-1} < r < q_i. \quad (5)$$

Do wspomagania obliczeń dotyczących wyznaczenia miary stopnia degradacji materiału kompozytowego opracowano autorski program komputerowy przy użyciu języka programowania obiektowego C++.

Ewolucyjny model M_e procesu zmęczenia materiału to ciąg modeli $\{M_i\}$ $i = 1, 2, \dots, s$ stanowiących łańcuch Markowa. Modele M_i to kolejne fazy modelu ewolucyjnego. Model M_{i+1} jest wynikiem losowej modyfikacji modelu M_i .

Określone w kolejnych sekwencjach analizy i modyfikacji fazy ewolucji modelu tworzą ciąg odwzorowujący proces zmęczeniowej destrukcji analizowanego ośrodka.

4. Przykład modelu kompozytu o osnowie polimerowej

Metodyka modelowego odwzorowania procesów zmian zmęczeniowych omówiona zostanie na przykładzie kompozytu o osnowie polimerowej, wzmocnionego włóknem ciągłym (np. szklanym lub węglowym) [5]. 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).

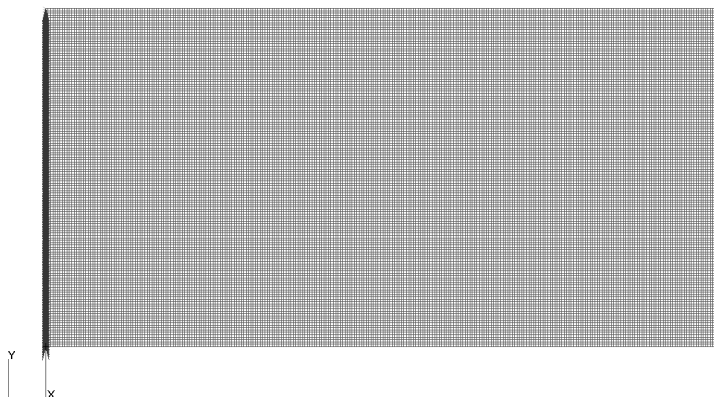
W celu modelowej symulacji procesu zmęczeniowej destrukcji wyodrębniono prostopadłościenny wycinek materiału o jednostkowej grubości, będący fragmentem powłoki kompozytowej. Pozostałe wymiary wycinka odpowiadają lokalnej grubości powłoki oraz arbitralnie ustalonej wielkości próbki, umożliwiającej efektywną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

kładzie dokonano homogenizacji ośrodka przyjmując zastępcze wartości gęstości oraz parametrów sprężystych (tabela 2).

Model kompozytu o wymiarach podanych podzielono na 40898 skończonych prostokątnych elementów tarczowych, o dwóch stopniach swobody w węzle, odpowiadającym 41328 węzłom, co w konsekwencji doprowadziło do modelu o 82656 stopniach swobody.

Na model kompozytu nałożono warunki brzegowe w przemieszczeniach na węzły należące do prawego krańca (rys. 2). Odebrano w tych węzłach po dwa stopnie swobody, odpowiednio wzdłuż osi: x i y . Na węzły należące do lewego krańca modelu nałożono warunki brzegowe odpowiednio: w obciążeniach i przemieszczeniach. Obciążono je rozłożoną równomiernie wypadkową siłą o wartości 1 mN wzdłuż pionowej osi y , a przemieszczenia odebrano wzdłuż poziomej osi x .



Rys. 2. Model kompozytu z nałożonymi warunkami brzegowymi

Fig. 2. Model of composite with fixed boundary conditions

Tabela 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

Dane materiałowe

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

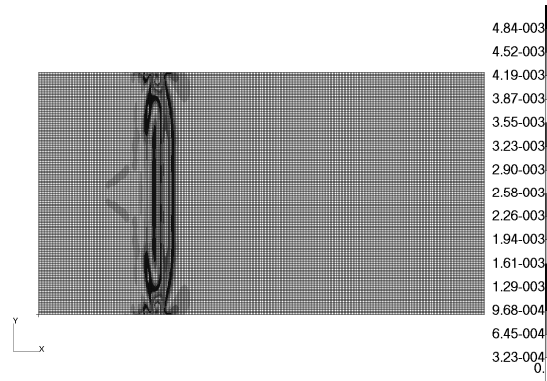
Poniżej przedstawione wyniki symulacji procesu diagnostyki akustycznej dotyczą modelu płaskiego reprezentującego wycięty fragment płyty z laminatu na bazie żywicy epoksydowej wzmocnionej włóknem szklanym. Początkową ciągłą strukturę materiału poddano modyfikacji odpowiadającej symulowanemu procesowi 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 propagowanej 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.3 do 5 ukazano wybrane obrazy chwilowej deformacji falą akustyczną modelu ośrodka przed modyfikacją zmęczeniową.

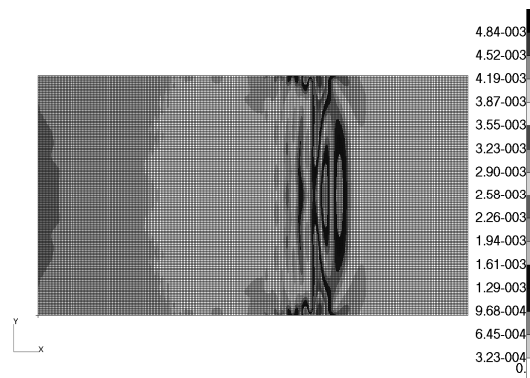
Na rys. 6 pokazano model fizyczny kompozytu z dwuprocentowym stopniem degradacji - odpowiada 2% usuniętych elementów. Na kolejnych rys. 7 do 12 ukazano wybrane obrazy chwilowej deformacji falą akustyczną zmodyfikowanego modelu ośrodka w ujęciu płaskiego oraz przekroju na kierunku osi wzdłużnej.

Rys. 3. Mapa propagacji fali przemieszczeń wypadkowych po czasie 1 μ s [μ m]Fig. 3. The map of resultant displacements of wave propagation after 1 μ s [μ m] time



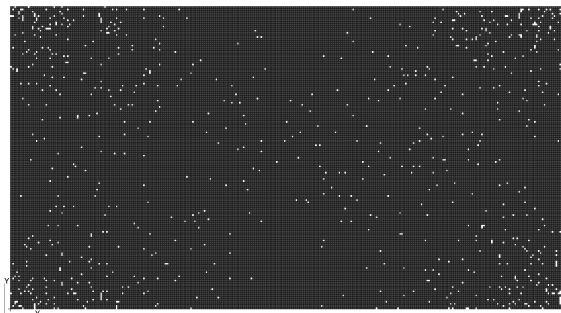
Rys. 4. Mapa propagacji fali przemieszczeń wypadkowych po czasie 3 μs [μm]

Fig. 4. The map of resultant displacements of wave propagation after 3 μs [μm] time



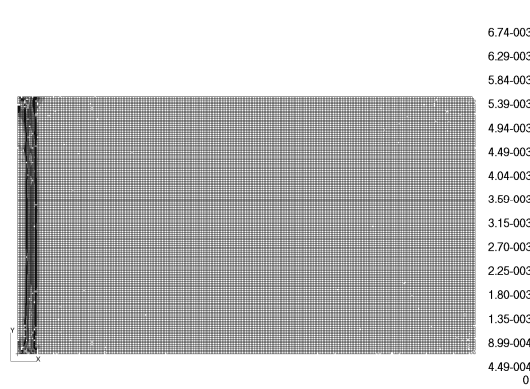
Rys. 5. Mapa propagacji fali przemieszczeń wypadkowych po czasie 7 μs [μm]

Fig. 5. The map of resultant displacements of wave propagation after 7 μs [μm] time



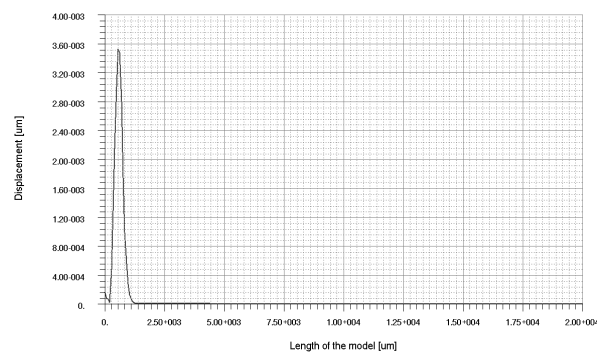
Rys. 6. Model fizyczny kompozytu z 2% stopniem degradacji

Fig. 6. Physical model of composite with 2% degradation degree



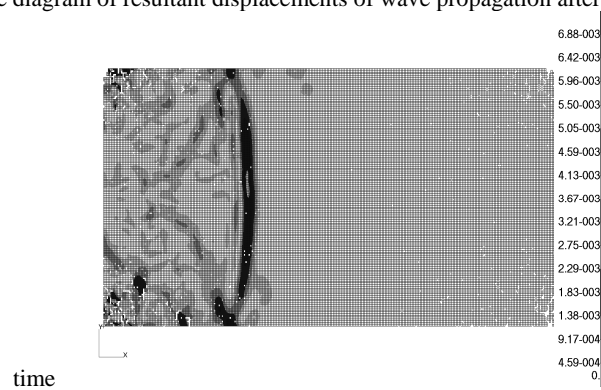
Rys. 7. Mapa propagacji przemieszczeń wypadkowych po czasie 0,5 μ s

Fig. 7. The map of resultant displacements of wave propagation after 0,5 μ s [μ m] time



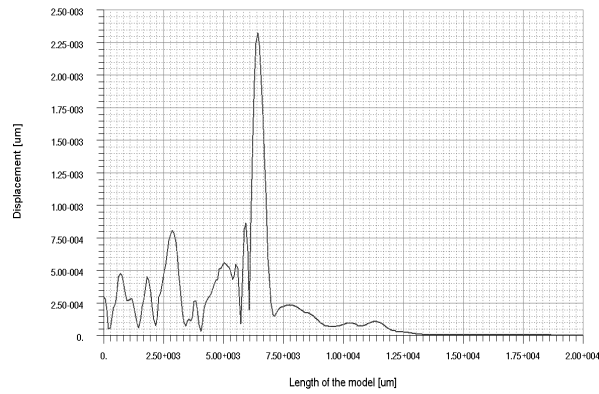
Rys. 8. Wykres propagacji wypadkowych przemieszczeń po czasie 0,5 μ s

Fig. 8. The diagram of resultant displacements of wave propagation after 0,5 μ s [μ m]



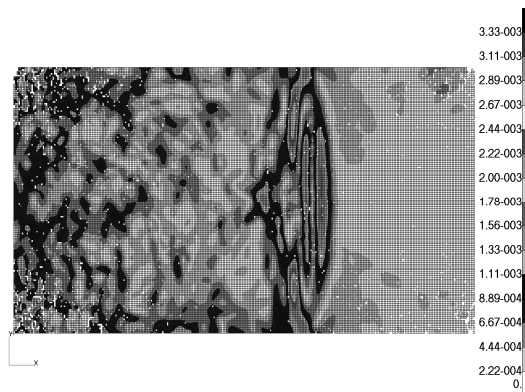
Rys. 9. Mapa propagacji przemieszczeń wypadkowych po czasie 3,5 [μ m]

Fig. 9. The map of resultant displacements of wave propagation after 3,5 μ s [μ m] time



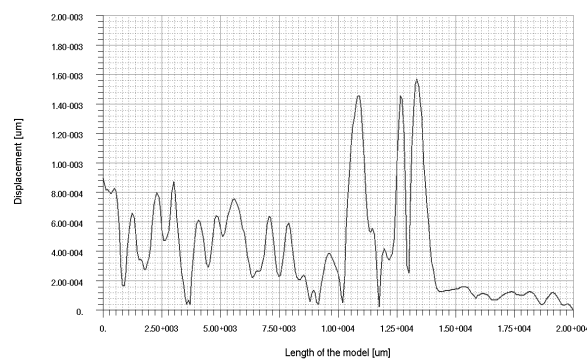
Rys. 10. Wykres propagacji wypadkowych przemieszczeń po czasie 3,5 μs

Fig. 10. The diagram of resultant displacements of wave propagation after 3,5 μs [μm] time



Rys. 11. Mapa propagacji przemieszczeń wypadkowych po czasie 7 μs [μm]

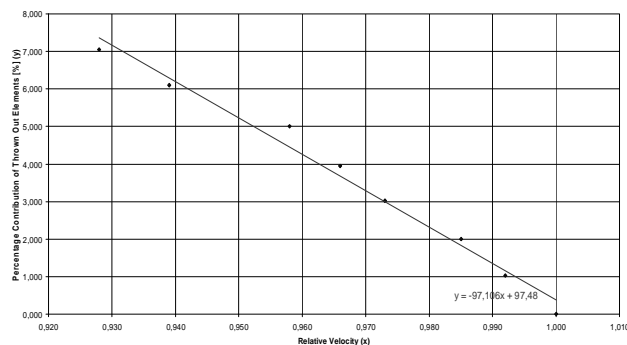
Fig. 11. The map of resultant displacements of wave propagation after 7 μs [μm] time



Rys. 12. Wykres propagacji wypadkowych przemieszczeń po czasie 7 μs

Fig. 12. The diagram of resultant displacements of wave propagation after 7 μs [μm] time

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. 13.



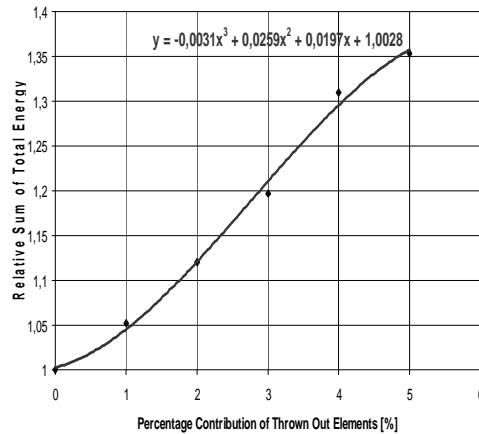
Rys. 13. Zależność prędkości fali od stopnia modelowej degradacji zmęczeniowej badanego materiału.

Fig. 13. The dependence of the wave velocity on the model fatigue degradation degree of the investigated material

Zestawienie wyliczonej prędkości propagacji fali ze stopniem wyczerpania zmęczeniowych zdolności nośnych, którego miarą jest stosunek symulowanej liczby cykli obciążenia do liczby cykli granicznej, stanowi podstawę oceny stanu materiału na podstawie diagnostycznego pomiaru prędkości głowicą ultradźwiękową. Wynik takiej oceny nie zależy od rzeczywistej historii obciążeń badanego materiału.

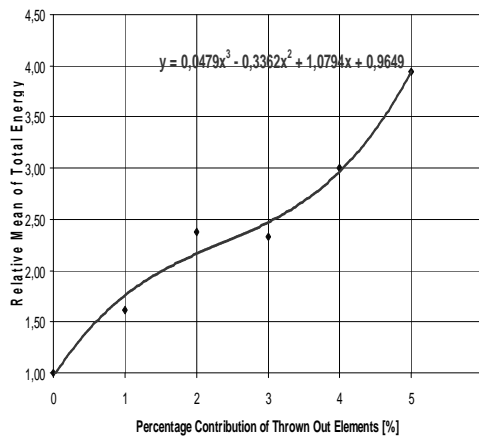
Na rys. 14 pokazano względną zmianę całkowitej energii odkształcenia elementu kompozytowego związaną z procesem jego zmęczeniowej destrukcji.

Na rys. 15 pokazano względną zmianę całkowitej energii odkształcenia wybranych 10-ciu elementów o największej energii odkształcenia związaną z procesem destrukcji kompozytu.



Rys. 14. Względna zmiana energii odkształcenia w funkcji stopnia degradacji materiału

Fig. 14. Relative change of the total deformation energy as a function of material degradation degree



Rys. 15. Względna zmiana sumy energii odkształcenia wybranych 10-ciu elementów w funkcji stopnia degradacji materiału

Fig. 15. Relative change of the sum of chosen 10 elements' total deformation energy as a function of material degradation degree

Porównanie zależności z rys. 14 i 15 wskazuje na lokalny charakter procesów utraty stateczności strukturalnej materiału. Możliwość uchwycenia tego efektu w modelu analizowanym omawianą metodą pozwala na sformułowanie kryteriów wystąpienia zniszczenia (pęknięcia zmęczeniowego) w badanym układzie. Podstaw dostarczają niszczące badania zmęczeniowe materiału oraz nieniszczące badania charakterystyk diagnostycznych, np. akustycznych, wyznaczonych techniką ultradźwiękową.

5. Podsumowanie

Przedstawiony w pracy model ewolucyjny procesu zmęczeniowego osłabienia materiału obejmuje ogólnością zarówno materiały jednorodne jak i kompozyty. Opracowana metoda wykorzystuje MES. Ewolucja modelu prowadzona jest sekwencyjnie - chaotyczna modyfikacja układu poprzedzana jest analizą aktualnego jego stanu, której wyniki wykorzystywane są do parametryzacji następującego przekształcenia. W warunkach dyskretnej przestrzeni modyfikowanych parametrów fizycznych ewolucyjny ciąg modeli jest łańcuchem Markowa. Ocena faz ewolucji oraz charakterystyk stanu materiału dostarcza podstaw nieniszczącej oceny stopnia wyczerpania zdolności nośnych materiału

Literatura

- [1] Żółtowski W., Łubiński M., Filipowicz A., *Konstrukcje metalowe Cz.1*, Wydawnictwo Arkady, 2005.
- [2] Wróbel G., *Metoda nieniszczącej diagnozy stanu degradacji wytrzymałościowej wybranych materiałów kompozytowych*, Numer projektu 7 T08E 007 19. Gliwice 2003.
- [3] Wróbel G., *Nondestructive Testing Techniques of the Engineering Polymers*. Monograph. Publishing House of the Silesian Politechnical University (in Polish), Gliwice 2008.
- [4] Wróbel G., Kaczmarczyk J., *Numerical simulation of fatigue degradation process of polymer materials using diagnostic acoustic characteristics*, Journal of AMME, (w druku).
- [5] Wróbel G., Kaczmarczyk J., Stabik J., Rojek M., *Model numeryczny do symulacji degradacji kompozytu polimerowego*. *Modelowanie Inżynierskie*, Gliwice 2009 (w druku).
- [6] Wróbel G., Kaczmarczyk J., Stabik J., Rojek M., *Numerical models of polymeric composite to simulate fatigue and ageing processes*. Journal of AMME, Vol.34, ISSUE 1, May 2009, 31- 38.