

Dariusz WYSOCZAŃSKI, Janusz MROCZKA

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

KATEDRA METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ

Analiza położenia i koncentracji włókien za pomocą światła rozproszonego

Dr inż. Dariusz WYSOCZAŃSKI

Adiunkt w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej. W 1992r. ukończył Wydział Elektroniki w Politechnice Wrocławskiej. W 1996r. obronił z wyróżnieniem pracę doktorską na Université de Rouen we Francji (promotor prof. J. Mroczka). Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół modelowania numerycznego zjawisk rozpraszania światła w ośrodkach dyspersyjnych. W roku 1999 laureat stypendium dla młodych naukowców Funduszu na rzecz Nauki Polskiej.



Prof. dr hab. inż. Janusz MROCZKA

Kierownik Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Zajmuje się algorytmizacją problemu odwrotnego i jego aplikacją w pomiarach oraz analizą spektralną i polaryzacyjną promieniowania rozproszonego w układach dyspersyjnych gęstych.



Streszczenie

Przedstawiono nieinwazyjną, optyczną metodę określania położenia i koncentracji włókien w materiałach kompozytowych. Układ eksperymentalny umożliwia rejestrację map światła rozproszonego w materiale kompozytowym, na podstawie których wyznaczane są położenie i koncentracja włókien. Jako źródła światła użyty został laser He-Ne, natomiast składowe polaryzacyjne światła rozproszonego rejestrowane są przez odpowiedni układ optyczny i dwie kamery CCD.

Abstract

Non-invasive optical method for determination of arrangement and concentration of fibres in composite materials has been presented. The experimental system enables registration of dispersed light maps which serve for determination of fibre arrangement and concentration. A He-Ne laser has been used as a light source whereas the polarization components of dispersed light are recorded with the use of a suitable optical system and two CCD cameras.

Wprowadzenie

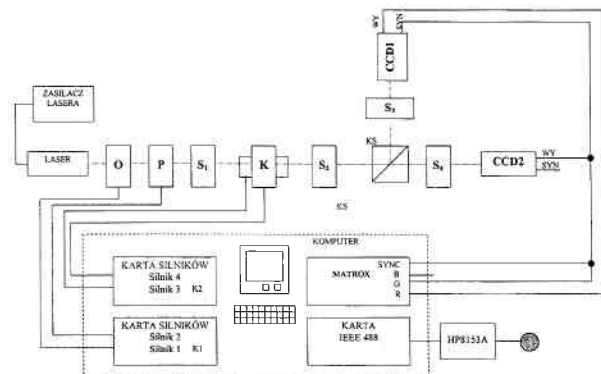
W wielu zastosowaniach przemysłowych i badaniach naukowych nierzadko spotykać się można z problemem określania koncentracji i położenia cząstek w pewnym ośrodku. Przykładem mogą być pomiary zanieczyszczenia powietrza i wody, jak również badania wytrzymałości materiałów jako produktu finalnego i podczas procesu produkcyjnego. Coraz większą popularnością, dzięki swoim właściwościom (niewielka masa, duża wytrzymałość, łatwość obróbki) cieszą się materiały kompozytowe. Konstrukcyjnie stanowią one połączenie co najmniej dwóch różnych materiałów (dwóch faz). Zazwyczaj mamy do czynienia z matrycą polimerową, w której znajdują się tzw. wzmocnienia. Wzmocnienia mogą przyjmować różne kształty (cząstki sferyczne, płytkowe, cylindryczne – włókna) i być wykonane z różnych materiałów (węgiel, szkło, polimery). Właściwości materiału kompozytowego zależą oczywiście od użytych materiałów, ale również od zastosowanej metody ich połączenia oraz koncentracji i położenia wzmocnień w matrycy. Techniki badań właściwości materiałów kompozytowych można podzielić na dwie główne grupy. Do pierwszej zaliczyć można metody inwazyjne, takie jak testy wytrzymałościowe, fale termiczne [2] czy badania mikroskopowe. Druga grupa obejmuje metody nieinwazyjne oparte na różnych zjawiskach fizycznych. Można zatem znaleźć metody wykorzystujące ultradźwięki czy mikrofały [1] do

szacowania położenia i koncentracji zastosowanych wzmocnień. Wciąż jednak istnieje konieczność opracowania nowych metod pomiarowych umożliwiających szybkie, nieinwazyjne testowanie materiałów kompozytowych zarówno w fazie końcowej (badania jakości), jak i w trakcie procesu produkcyjnego. Przedstawiona tutaj metoda należy do metod optycznych, nieinwazyjnych i opiera się na analizie światła rozproszonego w materiale kompozytowym zawierającym włókna.

Rozpatrując materiał kompozytowy w aspekcie optycznym, jest on układem dyspersyjnym, w którym ośrodkiem jest matryca, a fazę rozproszoną (centra rozproszeniowe) stanowią użyte wzmocnienia (włókna). Opracowanie przedstawionego układu pomiarowego poprzedzone zostało badaniami numerycznymi symulującymi zjawisko rozproszenia światła w materiale kompozytowym [6] [7].

Tor pomiarowy

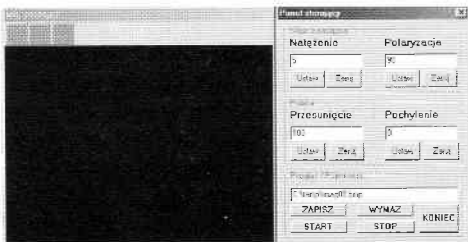
Optyczny tor pomiarowy zapewnia rejestrację dwóch składowych polaryzacyjnych natężenia światła rozproszonego w badanym materiale kompozytowym. Sposób rejestracji umożliwia cyfrową analizę uzyskanych wyników, jak również ich archiwizację. Tor zapewnia także monochromatyczność wiązki oświetlającej (w celu eliminacji dodatkowych zjawisk związanych z dyspersją światła w funkcji długości fali) oraz możliwość zmian położenia kompozytu względem wiązki. Budowa toru pomiarowego przedstawiona jest na rys. 1.



Rys. 1. Schemat toru pomiarowego do rejestracji charakterystyk polaryzacyjnych światła rozproszonego w materiałach kompozytowych

Monochromatyczna wiązka oświetlająca o długości emitowanej fali $\lambda=632,8\text{nm}$ i średnicy $0,5\text{mm}$ generowana jest przez laser

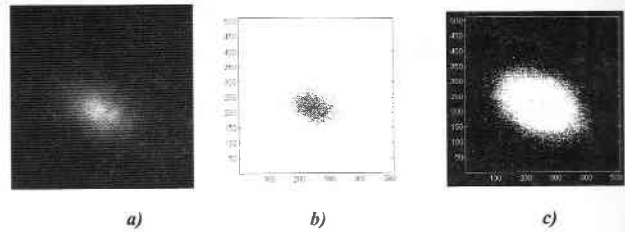
He-Ne o mocy ok. 1,5mW. Zasilacz lasera umożliwia stabilizację wiązki pod względem częstotliwości i natężenia. W omawianej metodzie większe znaczenie ma stabilizacja natężenia. Ponieważ zasilacz nie umożliwia regulacji natężenia emitowanej wiązki zastosowany został zestaw płytek osłabiających (O) o sześciu różnych współczynnikach osłabienia umieszczonych na stoliku przesuwym sterowanym silnikiem krokowym. Regulacja natężenia lasera umożliwia uniknięcie efektu nasycenia zastosowanych przetworników CCD przy efektywnym wykorzystaniu dynamiki sygnału. Następnie wiązka przechodzi przez polaryzator liniowy (P) sterowany automatycznie umożliwiającą zmianę kąta polaryzacji wiązki oświetlającej. Wiązka jest następnie ogniskowana przez soczewkę S_1 i pada na próbkę materiału kompozytowego umieszczonego w specjalnym uchwycie (K). Proces ogniskowania zwiększa efekty rozproszeniowe, które można rejestrować w obszarze o mniejszej powierzchni. Uchwyt umożliwia zmianę położenia próbki względem wiązki. Możliwe jest przesuwanie próbki pionowo (śruba mikrometryczna – rozdzielczość 0,01mm) i poziomo (silnik krokowy – rozdzielczość 2,5 μ m) w płaszczyźnie prostopadłej do padającej wiązki, obrót próbki względem osi optycznej układu pomiarowego (regulacja ręczna – rozdzielczość 1°) oraz obrót próbki względem osi prostopadłej do osi optycznej toru pomiarowego (silnik krokowy – rozdzielczość 1°). Światło rozproszone w próbce zbierane jest przez kolimator (S_2). Parametry kolimatora wraz z soczewkami ogniskującymi S_3 i S_4 decydują o powiększeniu rejestrowanego obrazu co wpływa na rozdzielczość przestrzenną analizy materiału. Światło kierowane jest następnie na kostkę światłodzielącą (KS) rozdzielającą dwie składowe polaryzacyjne. Składowe te rejestrowane są przez dwie monochromatyczne kamery CCD (CCD1, CCD2) w postaci map rozkładu natężenia światła rozproszonego. Zastosowano dwie monochromatyczne kamery CCD o rozdzielczości 768 x 576 punktów - wykorzystywana: 512 x 512, 256 poziomów natężenia (odstęp sygnał/szum - ponad 56dB). Kamery połączone są z kartą przechwytyjącą (Matrox) poprzez wejście RGB. Kamerę rejestrującą składową polaryzacyjną równoległą (TM) podłączono do wejścia R, zaś kamerę rejestrującą składową polaryzacyjną prostopadłą (TE) podłączono do wejścia G. Kamery są ponadto zewnętrznie zsynchronizowane ze sobą, co gwarantuje jednoczesną rejestrację obu składowych polaryzacyjnych. Tor pomiarowy umieszczony został na płycie granitowej leżącej na stole optycznym o zawieszaniu pneumatycznym. Takie rozwiązanie zapewniło ograniczenie zakłóceń wywołanych niepożądanymi drganiami podłoża. Zastosowana karta IEEE-488.2 i miernik natężenia umożliwiają kontrolę natężenia wiązki w różnych punktach toru pomiarowego.



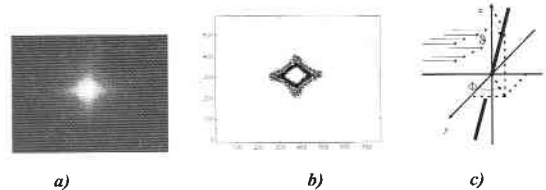
Rys. 2. Widok panelu sterującego programu System.exe.

Całością zarządza komputer klasy PC wraz z odpowiednim oprogramowaniem sterującym poszczególnymi elementami toru, jak również umożliwiającym rejestrację i analizę uzyskanych wyników. W skład oprogramowania wchodzi program *System.exe* (rys. 2) zapewniający sterowanie poszczególnymi elementami toru pomiarowego (natężenie wiązki, polaryzacja, położenie próbki, rejestracja map rozkładu natężenia światła rozproszonego) oraz zestaw skryptów przeznaczonych do wykonania w środowisku programowym MATLAB (obróbka i wizualizacja wyników pomiarów). Przykładowy, rzeczywisty obraz zarejestrowany przez obie kamery

dla próbki jednowarstwowej (tzn. włókna są w niej ułożone w jednym kierunku i są wzajemnie równoległe) przedstawiony został na rys. 3a, natomiast rys. 3b przedstawia rozkład natężenia światła dla jednej ze składowych polaryzacyjnych.



Rys. 3. Przykłady rejestracji dla próbki jednowarstwowej: a) zarejestrowany obraz rozproszenia dla obu składowych polaryzacyjnych b) mapa rozkładu natężenia światła rozproszonego - składowa TM c) użyteczne punkty pomiarowe.

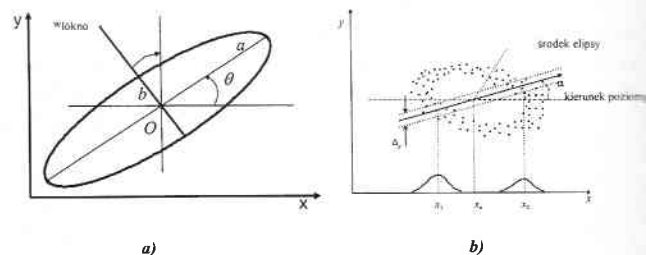


Rys. 4. Przykłady rejestracji dla próbki dwuwarstwowej: a) zarejestrowany obraz rozproszenia dla obu składowych polaryzacyjnych b) mapa rozkładu natężenia światła rozproszonego - składowa TM c) definicje kątów określających położenie włókien w próbce.

Rysunek 4 prezentuje rzeczywisty obraz (a) oraz mapę rozkładu natężenia światła rozproszonego (b) dla próbki dwuwarstwowej, w której w jednej z warstw włókna ułożone są wzajemnie równoległe w kierunku $\vartheta=0^\circ$, $\Phi=0^\circ$, natomiast w drugiej $\vartheta=90^\circ$, $\Phi=0^\circ$ (patrz rys. 4c). Stosunek grubości warstw wynosi 1.

Metoda analizy

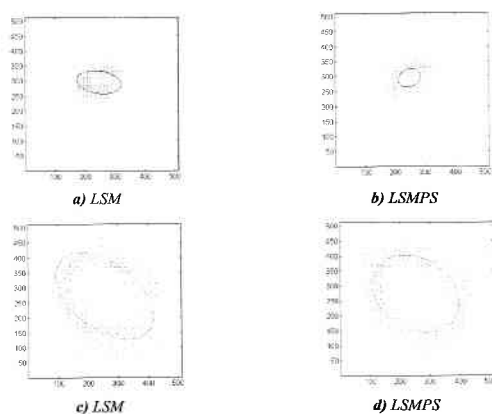
Metoda opiera się na analizie kształtu map rozkładu natężenia światła rozproszonego. Badając zmiany tego rozkładu w funkcji położenia włókien (badania symulacyjne) przyjęto, że rozkład światła rozproszonego zarejestrowanego przez detektor można przybliżyć elipsą, której parametry są skorelowane z położeniem i koncentracją włókien w materiale kompozytowym. Takie podejście umożliwia zrezygnowanie z pomiarów bezwzględnych (np. natężenia) na rzecz pomiarów względnych (eliptyczność) często łatwiejszych do przeprowadzenia i obarczonych zwykle mniejszym błędem pomiarowym. Parametry poszukiwanej elipsy przedstawione są na rysunku 5a. Należą do nich: środek elipsy (O), połowa osi wielkiej (a), połowa osi małej (b), położenie elipsy, czyli kąt θ zawarty między osią odciętych układu współrzędnych i osią wielką elipsy, eliptyczność elipsy czyli stosunek długości osi wielkiej do małej $e=a/b$, przy czym $e \geq 1$.



Rys. 5. a) elipsa aproksymująca rozkład natężenia światła rozproszonego i jej główne parametry b) Ilustracja idei selekcji punktów pomiarowych według kryterium rozkładu normalnego.

Poszukiwanie elipsy poprzedzone jest odpowiednim przetwarzaniem obrazu wejściowego. Odrzucane są punkty pomiarowe, któ-

rych natężenie ma wartość poniżej poziomu szumów i powyżej poziomu nasycenia kamer (rys.3c). Następnie, metodą środka ciężkości znajdowany jest środek elipsy. Ponieważ elipsa znaleziona metodą najmniejszych kwadratów (LSM) nie odzwierciedla charakteru kształtu przestrzennego rozkładu natężenia światła rozproszonego (rys.6a,c), zastosowano metodę LSMPS. Metoda ta stanowi rozszerzenie metody LSM o specjalną procedurę selekcji punktów. Idea metody LSMPS opiera się na zastosowaniu w procesie selekcji punktów kryterium rozkładu normalnego (rys.5b). Po wybraniu punktów pomiarowych o odpowiednim natężeniu i znalezieniu środka elipsy określany jest kierunek α i wybrane są punkty leżące na tym kierunku (kryterium Δy). Histogramy wyznaczone dla wybranych w ten sposób punktów umożliwiają wyznaczenie parametrów rozkładu normalnego z wartościami średnimi x_1 i x_2 i odchyleniami standardowymi σ_1 i σ_2 . Spośród znalezionych w ten sposób punktów wybierane są te spełniające warunki $x_1 - \sigma_1 \leq x \leq x_1 + \sigma_1$ oraz $x_2 - \sigma_2 \leq x \leq x_2 + \sigma_2$. Kierunek α zmienia się od 0 do π . Przykładowe elipsy znalezione w ten sposób przedstawione są na rys.6b,d. Metoda LSMPS okazała się tak efektywna, że można ją było zastosować z powodzeniem jednocześnie do wszystkich punktów rozkładu.



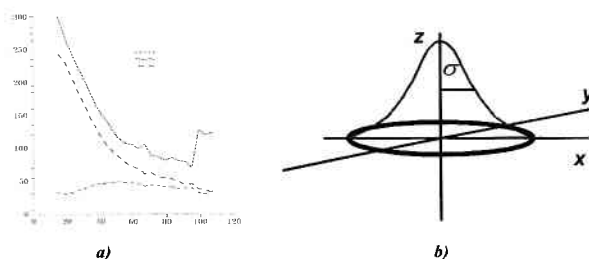
Rys.6. Elipsy reprezentujące kształt rozkładu natężenia światła rozproszonego uzyskane jednocześnie dla wszystkich punktów rozkładu: a), b) oraz dla punktów z danego przedziału natężenia: c), d) za pomocą metod LSM i LSMPS.

Rysunek 7a przedstawia zależność długości osi (a i b) oraz odległości (d_{\max} – odległość maksymalna, d_{sr} – odległość średnia) znalezionej elipsy od punktów pomiarowych (kryterium LSM) w funkcji poziomu natężenia punktów pomiarowych. Z zależności tej wyznaczyć można wartość natężenia powyżej którego wyznaczanie elipsy traci sens (b \rightarrow d_{sr}).

Dodatkowy parametr σ zwiększający efektywność analizy (gdy zależność eliptyczności w funkcji koncentracji ma niekorzystny charakter wykładniczy – rys. 10a) można uzyskać za pomocą metody LSMPSG. Opiera się ona na analizie wartości względnego natężenia światła rozproszonego i wykorzystuje LSMPS, ale poszukuje się w niej najlepiej dopasowanej gaussoidy dla natężenia punktów pomiarowych leżących na osi wielkiej znalezionej elipsy. Idea LSMPSG zilustrowana została na rys.7b. Dzięki wzbogaceniu metody o procedurę LSMPSG uzyskano korzystniejszą zależność parametru gaussoidy σ od koncentracji włókien w materiale kompozytowym (rys. 11a).

Metodę określania położenia i koncentracji włókien w materiale kompozytowym można również zastosować do próbek wielowarstwowych o znanych głównych kierunkach ułożenia włókien w danej warstwie. Stosuje się w takim przypadku wstępną selekcję punktów wybierając punkty które tworzą elipsę w danym kierunku. Przykładowo dla próbki dwuwarstwowej zawierającej włókna ułożone w warstwie pierwszej „pionowo”, a w warstwie drugiej „poziomo” (grubości warstw mogą być różne) poszukujemy dwóch

elips tworzonych przez dwie grupy punktów dzieląc badaną płaszczyznę na cztery obszary i uwzględniając punkty z przeciwległych obszarów. Analizowanym parametrem jest w tym wypadku stosunek eliptyczności znalezionej elipsy pionowej e_v (rozproszenie od włókien „poziomych”) do eliptyczności znalezionej elipsy pionowej e_h (rozproszenie od włókien „pionowych”).

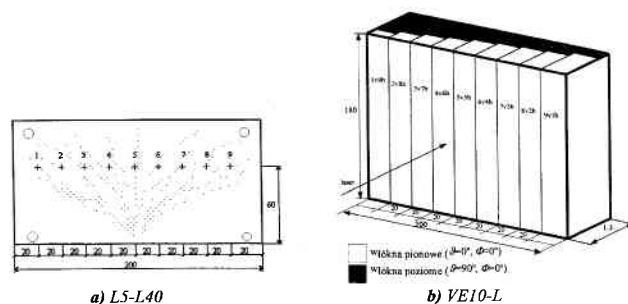


Rys.7. a) Zależność długości osi oraz odległości znalezionej elipsy od punktów pomiarowych (kryterium LSM) w funkcji poziomu natężenia światła rozproszonego, b) Ilustracja procedury LSMPSG. Poszukiwanie najlepiej dopasowanej gaussoidy dla natężenia światła rozproszonego punktów leżących na osi wielkiej znalezionej elipsy

Wyniki pomiarów

Przedmiotem badań były próbki jednowarstwowe o różnej koncentracji objętościowej (od 5 do 40%) i orientacji włókien oraz dwuwarstwowe o różnym stosunku grubości warstw zawierających włókna ułożone w różnych kierunkach. Przykładową próbkę jednowarstwową przedstawia rys. 8a, natomiast rys. 8b przedstawia próbkę dziesięciowarstwową. W próbce wielowarstwowej (rys. 8b) wyróżnić można obszary o różnym stosunku ilości (grubości) warstw zawierających włókna ułożone w danym kierunku. I tak strefa 1v9h oznacza jedną warstwę włókien ułożonych „pionowo” ($\vartheta=0^\circ$, $\Phi=0^\circ$) i 9 warstw włókien ułożonych „poziomo” ($\vartheta=90^\circ$, $\Phi=0^\circ$) – patrz też rys. 4c. Próbkę taką możemy też rozpatrywać jako dwuwarstwową o różnym stosunku grubości warstw. Koncentracja objętościowa włókien w próbce wynosiła 30%.

Zamieszczone wykresy przedstawiają wyniki badań przeprowadzonych z wykorzystaniem opisanej metody określania położenia i koncentracji włókien w materiale kompozytowym. Wyniki pomiarów (jak i wcześniejsze badania symulacyjne) wykazały zależność położenia poszukiwanej elipsy od położenia włókien w bada-

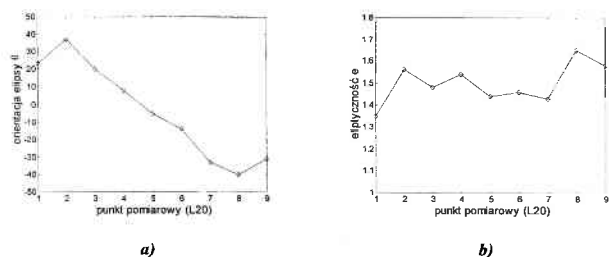


Rys.8. Przykłady próbek materiałów kompozytowych: a) próbki L5-L40 jednowarstwowa z zaznaczonym kierunkiem ułożenia włókien w punktach pomiarowych. b) próbka wielowarstwowa VE-10L o koncentracji włókien 30% i różnym stosunku ilości warstw zawierających włókna wzajemnie równoległe.

nym materiale. Kierunek wielkiej osi był prostopadły do głównego kierunku ułożenia włókien. Kształt elipsy skorelowany był natomiast z położeniem włókien i ich koncentracją. W przypadku niewielkich koncentracji eliptyczność przyjmowała większe wartości i malała wraz ze wzrostem koncentracji, co wynikało z nasilenia się zjawiska rozproszenia wielokrotnego.

Istnieje silna zależność eliptyczności znalezionej elipsy od koncen-

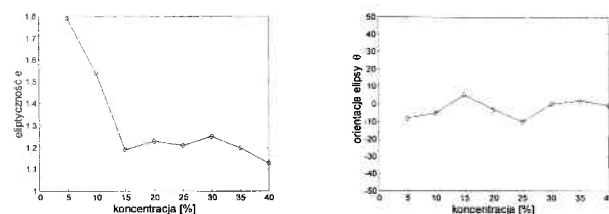
tracji, która jednak nie może być wykorzystana w przypadku dużych wartości koncentracji, ze względu na jej wykładniczy charakter (rys.10a). Wykorzystując jednak procedurę LSMPSG można znaleźć korzystną zależność wyznaczonego parametru σ od koncentracji (rys.11a), przy czym parametr σ nie zależy od położenia włókien, a jedynie od ich koncentracji (rys.11b).



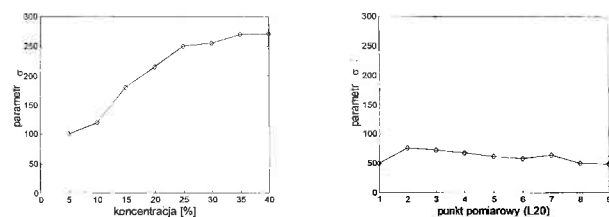
Rys.9. Wyniki analizy z wykorzystaniem LSMPS dla wszystkich punktów pomiarowych:

- a) kąt położenia znalezionej elipsy w funkcji kąta ułożenia włókien
b) eliptyczność znalezionej elipsy w funkcji kąta ułożenia włókien.

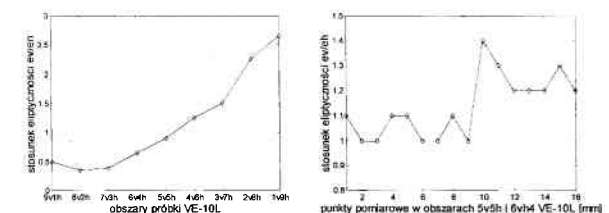
Położenie znalezionej elipsy praktycznie nie zależy od koncentracji (widoczne odchylenia są wynikiem lokalnych zaburzeń położenia włókien) – rys. 10b. Położenie włókien silnie wpływa na położenie znalezionej elipsy – rys. 9a, natomiast eliptyczność znalezionej elipsy nie zależy od położenia włókien (gdy są one wzajemnie równoległe), a widoczne odchylenia wynikają z lokalnych zmian koncentracji włókien – rys.9b.



Rys.10. Wyniki analizy z wykorzystaniem LSMPS dla wszystkich punktów pomiarowych: a) eliptyczność znalezionej elipsy w funkcji koncentracji objętościowej włókien b) kąt położenia znalezionej elipsy w funkcji koncentracji objętościowej włókien.



Rys.11. Wyniki analizy z wykorzystaniem LSMPSG dla wszystkich punktów pomiarowych: a) parametr σ znalezionej gaussoidy w funkcji koncentracji objętościowej włókien b) parametr σ znalezionej gaussoidy w funkcji kąta ułożenia włókien.



Rys.12. Wyniki analizy z wykorzystaniem LSMPS dla próbki dwuwarstwowej o różnym stosunku grubości warstw: a) stosunek eliptyczności znalezionej elipsy w funkcji stosunku grubości warstwy włókien ($\delta=0^\circ$, $\Phi=0^\circ$) do warstwy włókien ($\delta=90^\circ$, $\Phi=0^\circ$) b) stosunek eliptyczności znalezionych elips dla punktów pomiarowych rozmieszczonych przy przejściu ze strefy 5v5h do strefy 6v4h próbki VE-10L.

Możliwa jest również analiza próbek dwuwarstwowych o predefiniowanych kierunkach ułożenia włókien w danej warstwie w celu wyznaczenia stosunku grubości warstw. Analizuje się w tym celu stosunek eliptyczności elips znalezionych na podstawie rozkładu natężenia światła rozproszonego przez poszczególne warstwy – rys. 12a. Przy użyciu przedstawionej metody możliwa jest również detekcja granicy obszarów o różnym stosunku grubości warstw włókien (rys. 12b).

Podsumowanie

Opracowana metoda określania położenia i koncentracji włókien w materiale kompozytowym oparta jest na analizie kształtu przeszerzonego rozkładu natężenia światła rozproszonego rejestrowanego przez detektor umieszczony za próbką. Badania symulacyjne wykazały że rozkład światła rozproszonego przez kompozyt przyjmuje kształt owalny zbliżony do elipsy, której parametry takie jak położenie i eliptyczność zależą od położenia i koncentracji włókien. Znalazło to potwierdzenie w praktycznych pomiarach.

Poszukiwanie elipsy, która najpełniej odzwierciedlałaby kształt rozkładu prostymi metodami algebraicznymi (metoda najmniejszych kwadratów) nie dało oczekiwanych rezultatów, dlatego opracowano specjalne procedury selekcji punktów pomiarowych z wykorzystaniem rozkładu normalnego. Uzyskano w ten sposób bardziej stabilne wyniki, a tym samym silniejszą korelację z badanymi parametrami. Ponadto opracowano procedury aproksymacji rozkładu natężenia na osi wielkiej znalezionej elipsy rozkładem normalnym (parametr σ) w celu poprawy niekorzystnej, silnie wykładniczej zależności eliptyczności od koncentracji włókien. Opracowana metoda, dzięki stworzonym procedurom podziału punktów pomiarowych, nadaje się również do określania stosunku grubości dwóch warstw kompozytu zawierających włókna ułożone wzajemnie prostopadle (w płaszczyźnie próbki).

Literatura

- [1] M.J. Bevis, P.S. Allan, A. Holden, G. Busse, and L. Diener, Monitoring the multiple live feed moulding process with microwave orientation imaging, translated from *Kunststoffe German Plastics*, 82(2): 135-138, 1992.
- [2] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, Thermal-wave imaging with phase sensitive modulated thermography. *J. Appl. Phys.*, 71(8): 3962-3965, 1992.
- [3] T. Girasole and J.N. Le Toulouzan, J. Mroczka and D. Wysoczański „Fiber orientation and concentration analysis by light scattering: Experimental setup and diagnosis”, *Rev. Sci. Instrum.* 68 (7), July 1997, pp. 2805-2811.
- [4] Girasole, T.; Bultynck, H.; Gouesbet, G.; Grehan, G.; Le Meur, F.; Le Toulouzan, J.N.; Mroczka, J.; Ren, K.F.; Rose, C.; Wysoczański, D. Cylindrical Fibre Orientation Analysis by Light Scattering. Part 1: Numerical Aspects, *Part. Part. Syst. Charact.* 14 (1997), pp. 163-174.
- [5] T. Girasole, G. Gouesbet, G. Grehan, J. N. Le Toulouzan, J. Mroczka, K. F. Ren, D. Wysoczański, Cylindrical Fibre Orientation Analysis by Light Scattering. Part 2: Experimental Aspects., *Part. Part. Syst. Charact.*, Vol. 14, pp. 211-218, 1997.
- [6] J. Mroczka, D. Wysoczański, „Plane-wave and Gaussian-beam scattering on an infinite cylinder.”, *Optical Engineering*, March 2000, Vol.39 No.3, pp. 763-770, SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- [7] D. Wysoczański, J. Mroczka, M. Czerwiński, „Multiple Light Scattering Method in Composite Materials Properties Determination.”, *10th International Workshop on Multiple Scattering Lidar Experiments MUSCLE 10*, Italy, Florence, April 19-22 1999, Proceedings of MUSCLE 10, pp. 264-272, University of Florence 1999.