

# ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKRYWANIA USZKODZEŃ KONSTRUKCJI ZA POMOCĄ TECHNIK ŚWIATŁOWODOWYCH

Piotr Kowalczyk  
Katarzyna Nowosielska  
Instytut Lotnictwa

## Streszczenie

*W pracy zostanie oceniona przydatność metod monitorowania obciążeń do wykrywania uszkodzeń konstrukcji. Analizie teoretycznej zostaną poddane metody pomiarowe oparte na siatkach Bragga oraz na światłowodowych czujnikach polarymetrycznych. W pracy zostanie również przeanalizowany wpływ uszkodzeń na zmianę częstości drgań własnych obiektu.*

## 1. WSTĘP

Podstawowym zadaniem monitorowania stanu konstrukcji jest wczesne wykrywanie uszkodzeń oraz zagrożeń wynikających z przenoszenia przez konstrukcje nadmiernych obciążeń. Metody dynamicznej diagnostyki są głównie skoncentrowane wokół dwóch problemów: ciągłego monitorowania obciążeń oraz wykrywania uszkodzeń w czasie pracy urządzeń. Do wykrywania uszkodzeń stosuje się obecnie metody oparte na zjawisku emisji akustycznej oraz ultradźwiękowej, ze szczególnym uwzględnieniem powierzchniowych fal Lamba w strukturach cienkościennych i płytowych. Do monitorowania obciążeń stosuje się czujniki światłowodowe, a w szczególności czujniki oparte na siatkach Bragga. Metody ultradźwiękowe nie sprawdzają się w innych strukturach niż cienkościenne. Pożądanym rozwiązaniem byłoby prowadzenie jednocześnie monitoringu obciążeń z możliwością wykrycia ewentualnych uszkodzeń.

## 2. SIATKI BRAGGA

Siatką Bragga nazywa się periodyczne zmiany współczynnika załamania w materiale światłowodu (Rys. 1). Jeśli kierunek propagacji wiązki światła jest prostopadły do siatki, wtedy następuje odbicie przez siatkę określonej długości fali z padającej na nią wiązki. Ta charakterystyczna długość fali określona jest równaniem [1,2]:

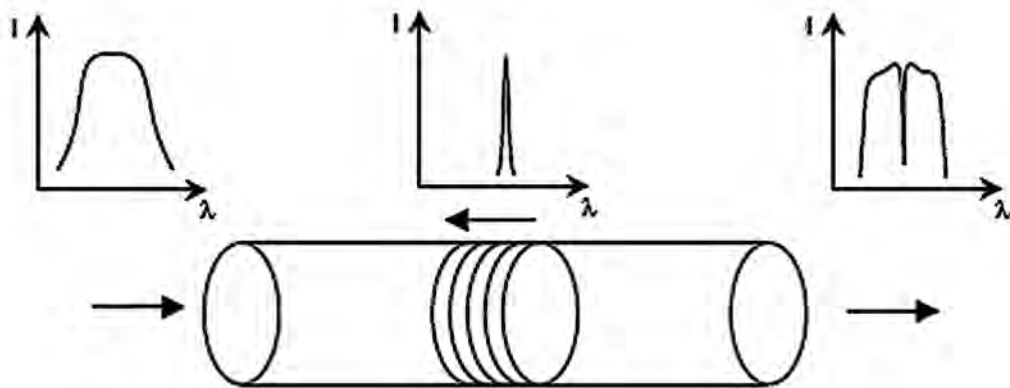
$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda,$$

gdzie:

$\lambda_B$  – długość odbitej fali Bragga,

$n_{eff}$  – efektywny współczynnik załamania światła,

$\Lambda$  – okres siatki Bragga.



**Rys. 1. Zasada działania siatki Bragga**

Siatka Bragga jest wytworzona bezpośrednio w światłowodzie przy użyciu światła UV o długości fali ok. 300 nm. Odpowiednio silne natężenie promieniowania o takiej długości fali powoduje lekką degradację światłowodu w postaci rozerwania części wiązań krzemowo – tlenowych w łańcuchach polimerów. W wyniku tego następuje lekki wzrost współczynnika załamania światła w naświetlonym obszarze. Periodyczną strukturę uzyskuje się poprzez naświetlenie światłowodu dwiema wiązkami ustawionymi względem siebie pod pewnym kątem, co powoduje ich interferencję, a więc sinusoidalną zmianę intensywności światła w obszarze nałożenia się wiązek. Periodyczne zmiany natężenia można również uzyskać poprzez odpowiednie maskowanie światłowodu.

Typowa długość obszaru z naniesioną siatką wynosi ok. 3 mm. Szerokość pasma odbijanej przez siatkę wiązki światła wynosi 0.5 nm. Długość fali odbitej wiązki zależy od okresu siatki wytworzonej w światłowodzie. Odkształcenie światłowodu wpływa więc bezpośrednio na okres siatki (dla danej temperatury), a w konsekwencji na długość odbitej fali światła. Zmiana długości odbitej fali  $\Delta\lambda$  jest w pewnym zakresie liniowo zależna od odkształcenia  $\varepsilon$ . Relacja ta może być wyrażona równaniem [2]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \gamma \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \gamma\varepsilon$$

gdzie:

$\Delta\Lambda$  – zmiana okresu siatki wywołana odkształceniem,

$\gamma$  – stała proporcjonalności.

Odkształcenie światłowodu może być również powodowane rozszerzalnością cieplną materiału światłowodu. Wywołaną tym czynnikiem zmianę długości fali Bragga wyraża zależność [2]:

$$\Delta\lambda = \lambda_0 (\gamma\varepsilon_{xx} + \xi\Delta T)$$

przy czym:

$$\xi = \frac{\Delta n}{\Delta T} + \alpha$$

gdzie:

$\lambda_0$  – długość fali Bragga dla siatki nieodkształconej

$\varepsilon_{xx}$  – odkształcenie osiowe światłowodu

$\Delta n$  – zmiana współczynnika załamania wywołana zmianą temperatury o  $\Delta T$

$\alpha$  – współczynnik rozszerzalności termicznej światłowodu

Typowa czułość siatek Bragga dla odkształceń termicznych wynosi  $\sim \text{pm/K}$  oraz  $\sim 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$  dla odkształceń mechanicznych w obszarze długości fali ok  $1.5 \mu\text{m}$ [3].

Światłowód pomiarowy może zawierać szereg siatek Bragga o różnym okresie  $\Lambda$ . Jeśli różnica w długościach fal odbijanych przez poszczególne siatki jest na tyle znaczna, iż nawet przy znacznych odkształceniach długości fal nie nakładają się, to możliwe jest jednoznaczne określenie, w którym punkcie pomiarowym światłowodu zachodzi dane odkształcenie.

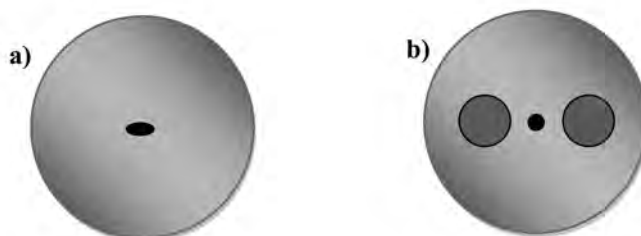
Typowy tor pomiarowy składa się ze źródła światła emitującego falę elektromagnetyczną o szerokim paśmie, włókna światłowodowego, fotodetektora zamieniającego sygnał optyczny na elektryczny oraz układu analizującego sygnał elektryczny. Fotodetektor rejestrując zmianę długości fali wywołaną odkształceniem siatki Bragga transformuje ją na zmianę sygnału napięciowego.

Podstawowymi zaletami siatek Bragga i czujników światłowodowych jest ich mały ciężar w porównaniu z typowym okablowaniem. Siatki Bragga jako czujniki stanowią całość z torem przesyłania danych jakim jest sam światłowód. Umożliwiają one pomiar punktowy. Szereg siatek Bragga daje informację o rozkładzie odkształceń tym dokładniejszą, im większa liczba czujników jest użyta.

## 2. CZUJNIKI POLARYMETRYCZNE

Polarymetryczne czujniki światłowodowe są typem sensorów wykorzystujących jednomodowe włókno o dużej dwójłomności optycznej. Dwójłomność światłowodów wynika z efektu elastooptycznego, który polega na zmianie symetrii optycznej ośrodka pod wpływem deformacji sprężystej. Stan polaryzacji na wyjściu zależy od różnicy faz między składowymi ortogonalnymi modu podstawowego. Różnica faz może być zmieniana przez takie czynniki zewnętrzne jak ciśnienie, temperatura czy naprężenie.

Jako czujniki polarymetryczne wykorzystuje się światłowody o dużej dwójłomności (ang. HB – highly birefringent). Są to światłowody o anizotropowym przekroju poprzecznym, posiadające parę wzajemnie prostopadłych osi symetrii, będącymi osiami dwójłomności.



**Rys. 2. Przekroje światłowodów o dużej dwójłomności: (a) z rdzeniem eliptycznym (b) Panda**

Jeżeli kierunek polaryzacji tworzy pewien kąt z osiami dwójłomności, wzbudzone zostaną obydwa ortogonalne składowe modu podstawowego. Składowe te mają różne stałe propagacji, więc wzdłuż światłowodu następuje proces ich zdudniania. W wyniku tego procesu wzdłuż światłowodu obserwowana jest periodyczna zmiana stanu polaryzacji fali świetlnej. Odcinek światłowodu, na którym następuje odtworzenie stanu polaryzacji, czyli zmiana fazy o  $2\pi$  nazywany jest drogą zdudnień  $L_B$  [4][5]:

$$L = \frac{2\pi}{\beta_x - \beta_y},$$

gdzie  $\beta_x, \beta_y$  są stałymi propagacji ortogonalnych modów.

Dla światłowodów telekomunikacyjnych o małej dwójłomności droga zdudnień wynosi od jednego do około stu metrów. Dla włókien o dużej dwójłomności jest to od jednego do około kilku milimetrów.

Istotnym parametrem czujników polarymetrycznych jest ich czułość definiowana jako [4]:

$$S = \frac{2\pi}{T_\varepsilon L}$$

gdzie:

$L$  jest długością pomiarowej części włókna, a wartość  $T_\varepsilon$  określa odkształcenie potrzebne do wywołania zmiany sygnału o  $2\pi$ . Wielkość  $T_\varepsilon$  pomnożona przez długość pomiarową światłowodu jest wielkością stałą dla danej długości fali  $\lambda$  [4]:

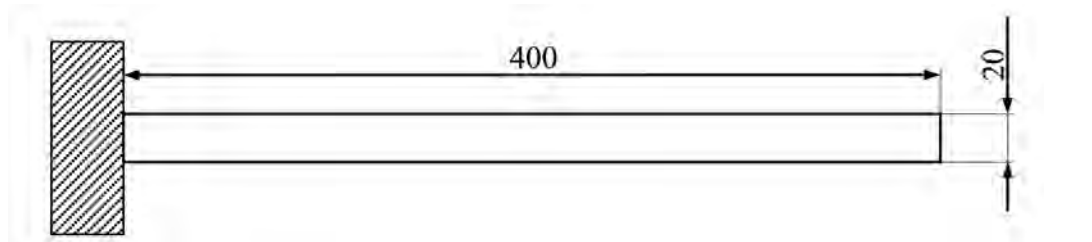
$$T_\varepsilon L = \text{const}(\lambda)$$

W przeciwieństwie do siatek Bragga cały obszar światłowodu polaryzacyjnego może stanowić obszar pomiarowy. Jednakże jego czułość nie jest ściśle ustalona i zależy od długości pomiarowej włókna. Im włókno pomiarowe jest dłuższe, tym większa jest jego czułość.

Czujniki te dają globalną informację o istniejących odkształceniach. Lokalna zmiana odkształceń jest zawarta w wartości całkowitej wskazywanej przez czujnik, więc nie jest możliwe określenie położenia tej lokalnej zmiany odkształcenia.

#### 4. MODEL BELKI

Model konstrukcji belkowej został stworzony w programie Abaqus. Wymiary belki oraz sposób utwierdzenia zostały przedstawione na rysunku.

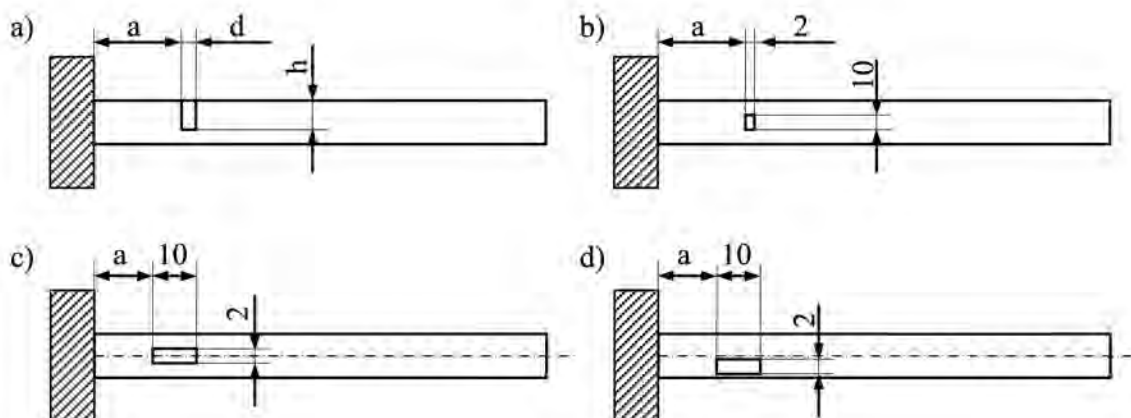


Rys. 3. Model belki nieuszkodzonej

Grubość belki wynosiła  $g = 100 \text{ mm}$

Materiałem belki jest polimetakrylan metylu (PMMA) – szkło akrylowe – posiadający następujące właściwości:

Moduł Younga:  $E = 3317 \text{ MPa}$   
 Współczynnik Poissona:  $\nu = 0.32$   
 Gęstość:  $\rho = 1187 \text{ kg/m}^3$

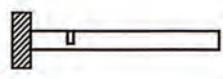

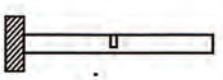














Rys. 4. Położenie szczeliny: pionowej na powierzchni (a), pionowej w osi belki (b), poziomej w osi (c) i poziomej poniżej osi belki (d)

Symulowane było zachowanie się konstrukcji z uszkodzeniem w postaci szczeliny. W kolejnych przypadkach była to szczelina pionowa znajdująca się na powierzchni i pod powierzchnią w osi belki, w różnej odległości od utwierdzenia, a następnie pozioma szczelina położona w osi i 5 mm poniżej osi belki, przesuwana wzdłuż osi. Położenie szczeliny ilustruje rysunek 4.

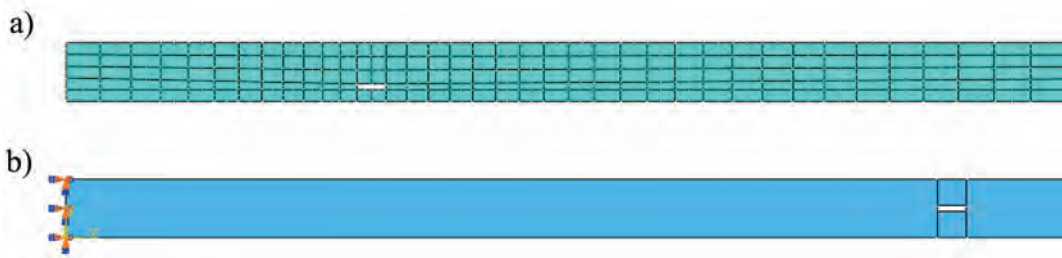
Odległość oznaczona jako  $a$  wynosiła kolejno 100, 200 i 300 mm. Poszczególne przypadki zestawiono w tabeli i nadano im odpowiednią numerację.

Tab. 1.

Ozn.	Rysunek	Wymiary szczeliny [mm]	Ozn.	Rysunek	Wymiary szczeliny [mm]
1a		5 x 10	4a		10 x 2
1b			4b		
1c			4c		
2a		2 x 5	5a		10 x 2
2b			5b		
2c			5c		
3a		2 x 10			
3b					
3c					

Następnie przeprowadzono sieciowanie modelu. Użyte zostały dwuwymiarowe 8-węzłowe elementy drugiego rzędu. Wprowadzono utwierdzenie na lewym końcu belki. Analizę podzielono na dwa kroki. W pierwszym kroku belka nie była obciążona i na podstawie obliczeń otrzymywano jej częstości drgań własnych. W drugim natomiast zdefiniowano obciążenie w postaci siły skupionej o wartości 10 N przyłożonej do końca belki, zwróconej w dół.

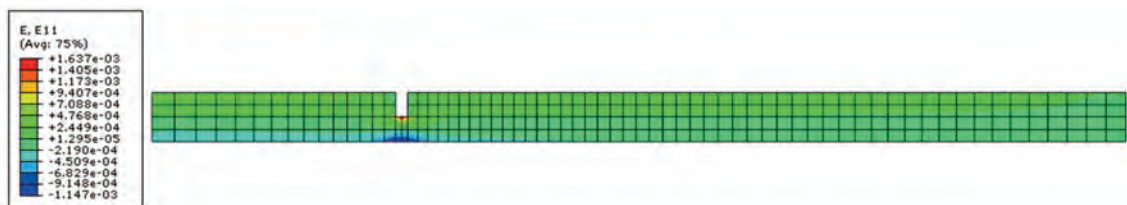
W tym przypadku badano odkształcenie w kierunku osi belki, jako że wielkość ta byłaby możliwa do zmierzenia przy użyciu światłowodowych metod pomiarowych.



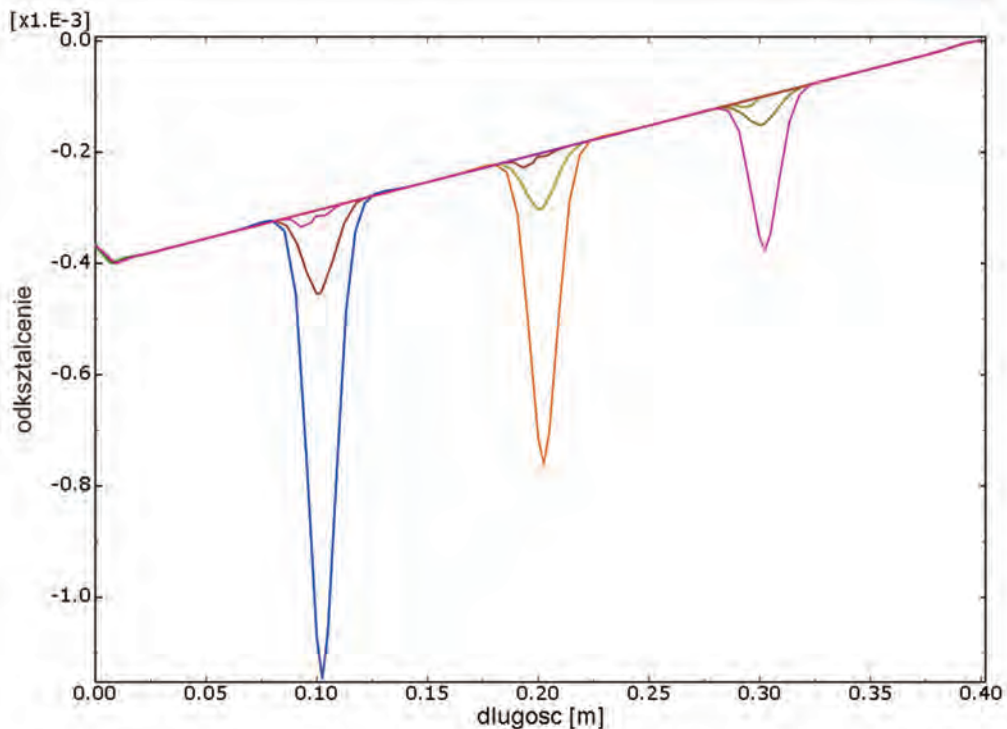
Rys. 5. Przykładowa siatka (a) i obciążenie (b)

## 5. WYNIKI SYMULACJI

Symulacjom numerycznym poddano belkę z kilkoma rodzajami uszkodzeń. Aby możliwe było wykrycie uszkodzenia przez pomiar odkształceń, belkę należy poddać obciążeniu. Jednym z podejść pozwalających na określenie wystąpienia uszkodzenia jest pomiar odkształcenia wywołanego wystąpieniem nieciągłości. Uszkodzenie wywoła lokalną zmianę odkształcenia, które będzie świadczyć o położeniu oraz wielkości uszkodzenia. Na rysunku 7 widoczny jest wykres odkształceń obciążonej belki z uszkodzeniami pionowymi różnej wielkości oraz w różnych położeniach.

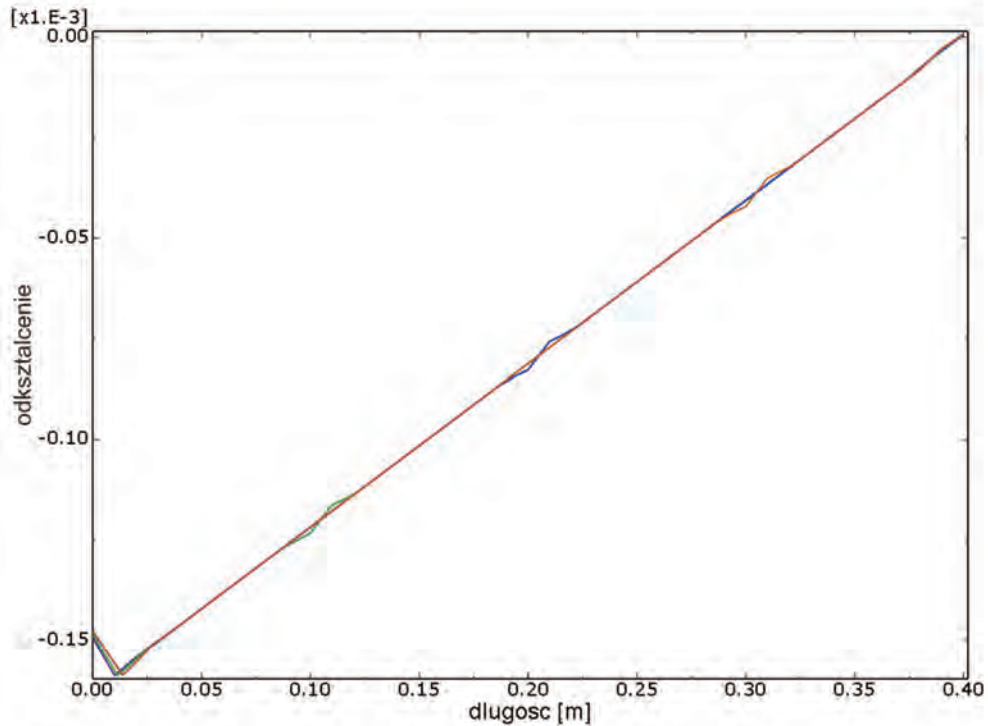


Rys. 6. Wartości odkształceń dla obciążonej belki, wyraźnie widoczna zmiana odkształceń w bliskim sąsiedztwie uszkodzenia

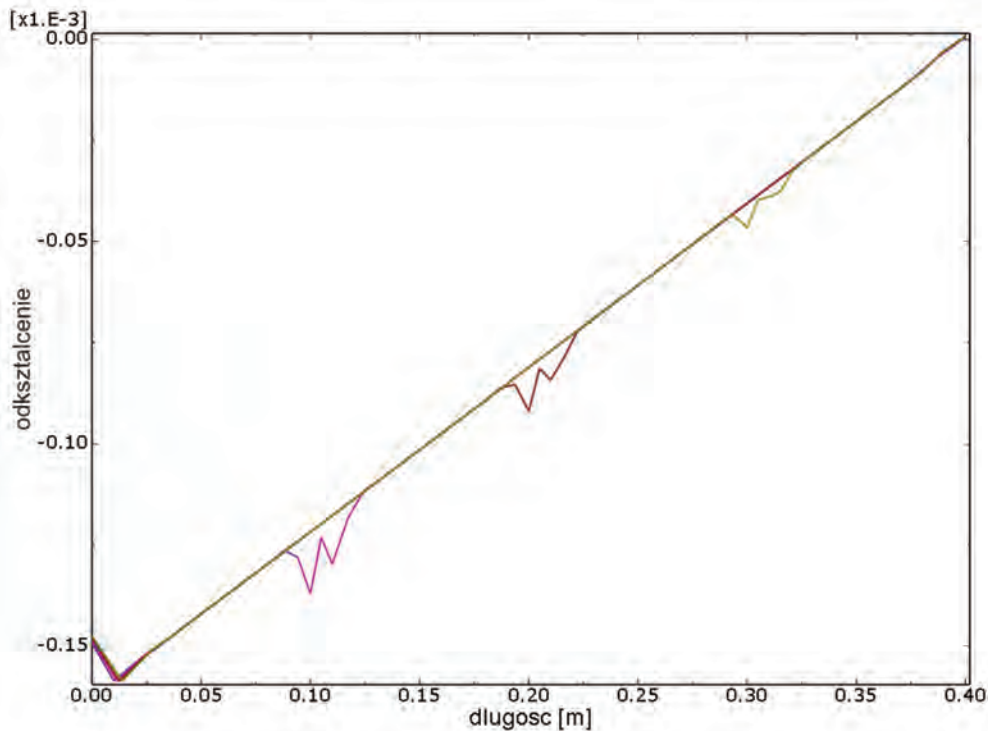


Rys. 7. Odkształcenia w kierunku osi belki wywołane ugięciem w belkach z dla różnych typów uszkodzeń pionowych

W przypadku uszkodzeń poziomych (rys. 8 i 9) wartości odkształceń są znacznie mniejsze. Możliwe jest jednak określenie miejsca uszkodzenia – zwłaszcza dla szczeliny znajdującej się poniżej osi belki widoczne są zmiany odkształcenia w miejscach występowania uszkodzeń (0.1m, 0.2 m i 0.3 m od utwierdzenia). Widoczny jest też wpływ odległości uszkodzenia od osi obojętnej – odsunięcie szczeliny od osi obojętnej wywołuje zmianę wielkości odkształceń mierzonych na powierzchni.



**Rys. 8. Odkształcenie w kierunku osi belki wywołane ugięciem dla różnych przypadków położenia szczeliny poziomej w osi belki**



**Rys. 9. Odkształcenie belki wywołane ugięciem dla różnych przypadków położenia szczeliny poziomej poniżej osi belki**

Zmiana odkształceń związana z istnieniem uszkodzenia jest zjawiskiem lokalnym, którego wielkość zależy od wartości siły istniejącej w strukturze. Im uszkodzenie jest umieszczone bliżej utwierdzenia, tym odkształcenia są większe i łatwiejsze do wykrycia. Zastosowanie siatek Bragga do pomiaru odkształceń pozwoliłoby na wykrycie lokalnych zmian odkształceń, ale tylko w przypadku, gdy czujnik Bragga byłby umieszczony w miejscu uszkodzenia. Jednakże jeśli uszkodzenie będzie zlokalizowane pomiędzy siatkami, nie wykażą one zmiany odkształcenia. Aby zapewnić skuteczny pomiar, musiałyby być użyta duża liczba czujników Bragga (duże koszty), bądź dłuższe siatki Bragga (zmniejszenie dokładności pomiaru).

Praktyczne próby wykrywania uszkodzeń przy użyciu czujników Bragga zostały opisane w pracy [7]. Autorzy wykazali, że czujnik mierzący lokalne odkształcenie, jakim jest siatka Bragga, jest niewystarczający do wykrycia uszkodzeń, które mogą znajdować się w dowolnym położeniu. Do wykrywania uszkodzeń w strukturach mogą być również użyte czujniki polarymetryczne. Obszar pomiarowy może w tym przypadku stanowić całą długość światłowodu. Próby takie zostały opisane w pracy [8], gdzie światłowód został umieszczony w strukturze kompozytu, w którym wprowadzono modelowe uszkodzenie. Po przyłożeniu obciążenia z powodzeniem można było zauważyć różnicę w natężeniu światła wychodzącego ze światłowodu dla struktury uszkodzonej i nieuszkodzonej. Wadą tego rozwiązania jest brak możliwości określenia miejsca wystąpienia uszkodzenia. Możliwe jest stwierdzenie istnienia nieciągłości oraz ewentualne określenie jej wielkości.

Metody pomiarowe oparte na czujnikach światłowodowych dają możliwość pomiaru odkształceń zarówno lokalnych (siatki Bragga) jak i globalnych (czujniki polarymetryczne). Skuteczność wykrycia uszkodzenia za pomocą czujników Bragga jest związane wzajemnym położeniem czujnika i uszkodzenia. Jeśli miejsce uszkodzenia jest znacznie oddalone od czujnika, może nie dojść do wykrycia uszkodzenia. Jeśli natomiast czujnik wykryje odkształcenie wywołane uszkodzeniem, możliwe jest wtedy określenie miejsca jego wystąpienia.

W przypadku czujników polarymetrycznych zmiana odkształcenia wywołana uszkodzeniem zostanie zawarta w sygnale pomiarowym odpowiadającym całkowitemu odkształceniu. Uszkodzenie jest więc możliwe do wykrycia, jednak nie jest znane miejsce jego wystąpienia. Czujnik ten jednakże mierzy odkształcenia wzdłuż długości światłowodu, więc lokalne zmiany odkształceń, które wystąpią obok czujnika mogą nie być wykryte.

Siatki Bragga są czujnikami punktowymi, czujniki polarymetryczne natomiast dają informację o zmianach wielkości mierzonej wzdłuż danej linii. Obie te metody nie pozwalają na wykonanie pomiaru polowego bez użycia dużej liczby czujników.

## 6. ANALIZA DRGAŃ WŁASNYCH BELEK Z USZKODZENIAMI

Kolejnym podejściem służącym wykryciu uszkodzenia jest pomiar częstości drgań własnych struktury. Wystąpienie nieciągłości materiału powoduje lokalną zmianę sztywności, co bezpośrednio wpływa na częstość drgań własnych według znanej zależności:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

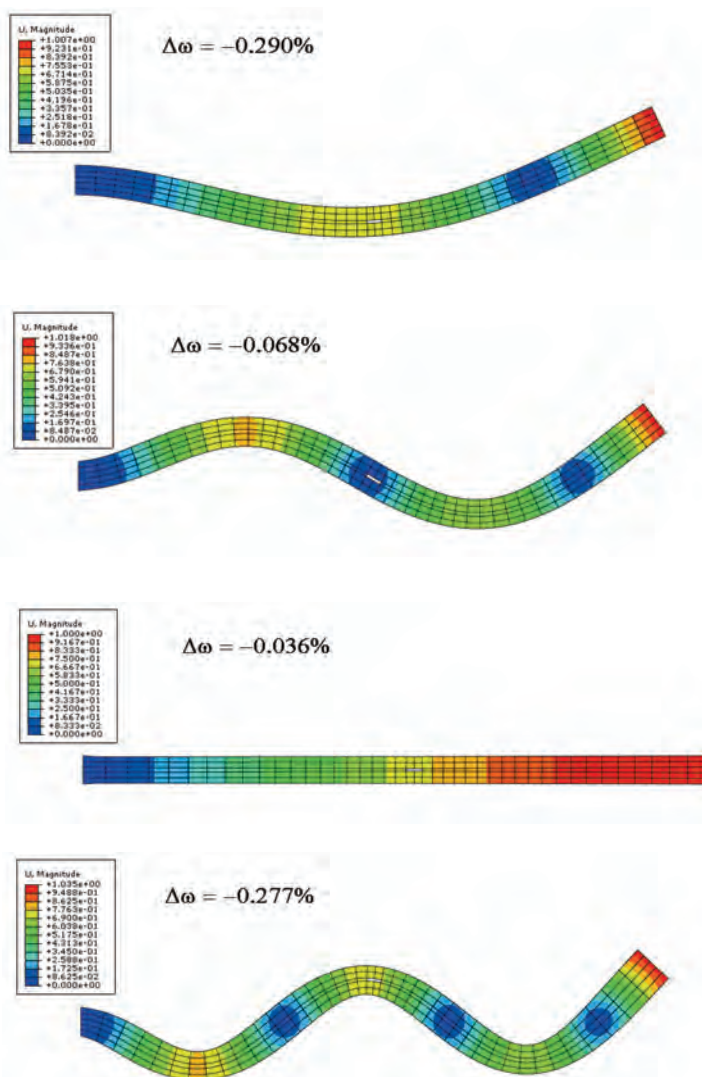
gdzie:

$K$  – sztywność

$m$  – masa

Na drodze symulacji sprawdzono, czy przy wykrywaniu uszkodzeń może mieć zastosowanie badanie częstości drgań własnych konstrukcji. Dla każdego przypadku uszkodzenia wyznaczono 5 pierwszych częstości. Różnice procentowe dla kolejnych częstości zostały zestawione w tabeli nr 2.





**Rys. 10. Kolejne postaci drgań belki z uszkodzeniem w osi w odległości 200 mm od utwierdzenia**



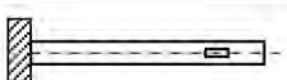
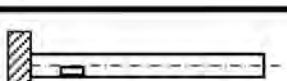
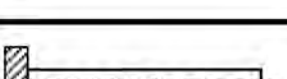

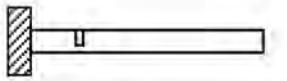
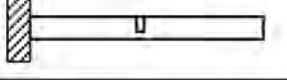
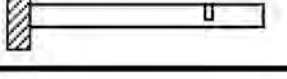
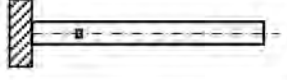

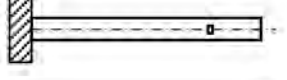
Z analiz wyraźnie wynika, że wprowadzenie uszkodzenia zmienia w różnym stopniu częstość drgań własnych różnych postaci. Aby móc skutecznie wykrywać uszkodzenia, konieczne jest wyznaczenie częstości drgań co najmniej kilku lub kilkunastu pierwszych postaci drgań. Analiza procentowych zmian częstości własnych dla szeregu różnych postaci może dać również informację o miejscu powstania uszkodzenia.

W przypadku powstania rzeczywistego pęknięcia występuje lokalne zmniejszenie sztywności belki, co powinno powodować zmniejszenie częstości drgań własnych. Modele zawierają jednak szczeliny powstałe w wyniku lokalnego ubytku masy. Wynikiem tego są przyrosty częstości drgań własnych w przypadku niektórych postaci drgań w analizie numerycznej.

## 7. WNIOSKI

Wykrywanie uszkodzeń za pomocą badania odkształceń elementu obciążonego wiąże się z wydobyciem informacji o lokalnych zmianach odkształceń. Obecnie dostępne czujniki światłowodowe oparte na siatkach Bragga dają możliwość pomiaru punktowego, jednakże z drugiej strony nie pozwalają na objęcie pomiarem pewnego pola bez użycia ich dużej liczby. Czujniki polarymetryczne natomiast pozwalają na pomiar odkształcenia na danej linii, co pozwala wykryć zmianę odkształcenia, jednakże nie ma możliwości określenia miejsca jego wystąpienia. Aby możliwe było wykrycie miejsca uszkodzenia, konieczne jest stosowanie rozwiązań łączących obie techniki monitoringu oraz użycie dużej liczby czujników.

Tab. 2.

Położenie szczeliny		Częstość drgań własnych				
		1	2	3	4	5
<b>Belka nieuszkodzona</b>		<b>35.627</b>	<b>220.51</b>	<b>605.67</b>	<b>1104.6</b>	<b>1155.9</b>
4a		-0.115	0.059	0.274	-0.263	0.156
4b		-0.025	0.290	-0.068	-0.036	0.277
4c		0.146	0.027	0.172	0.181	0.225
5a		-0.342	0.063	0.086	-0.281	0.026
5b		-0.098	-0.009	-0.041	-0.054	0.026
5c		0.140	-0.050	-0.084	0.172	-0.035
2a		-2.867	-0.077	-2.016	-1.910	-1.289
2b		-0.752	-3.189	-0.007	-1.494	-2.016
2c		0.062	-1.157	-3.260	-0.426	-2.380
3a		-0.183	0.041	0.117	-2.191	0.087
3b		0.014	0.045	-0.092	-1.222	0.061
3c		0.233	-0.068	-0.043	-0.190	-0.017

Największe procentowe różnice występują dla postaci drgań, w których uszkodzenie wypada w strzałce ugięcia. Jednak nie przekraczają one setnych części procenta. Uszkodzenie znajdujące się w węzle danej postaci daje zmianę procentową częstości o rząd wielkości mniejszą. Jako ilustrację tej zależności zamieszczono poniżej rysunki pierwszych pięciu postaci drgań belki ze szczeliną poziomą położoną w osi belki 200 mm od utwierdzenia (w środku belki).

Globalną wielkością dającą informację o lokalnej utracie ciągłości struktury jest częstość drgań własnych. Analiza odpowiednio dużej liczby postaci drgań może pozwolić na wykrycie istniejącego uszkodzenia, a przy użyciu odpowiedniego algorytmu porównującego zmiany częstości drgań własnych dla różnych postaci możliwe byłoby przybliżone określenie miejsca wystąpienia uszkodzenia.

## 8. LITERATURA

- [1] **K.T.V. Grattan, T. Sun:** Fiber optic sensor technology: an overview, Sensors and Actuators 82\_2000.40–61
- [2] **W. Staszewski, Ch. Boller, G. Tomlinson:** Health monitoring of aerospace structures, John Willey & Sons, Ltd, 2004
- [3] **D.C. Betz, G. Thursby, B. Culshaw, W.J. Staszewski:** Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg gratings, Smart Mater. Struct. 12 (2003) 122–128
- [4] **T.R. Woliński, P. Lesiak, A.W. Domański:** Polarimetric optical fiber sensors of a new generation for industrial applications, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences Vol. 56, No. 2, 2008
- [5] **W.J. Bock, T.R. Woliński, A. Barwicz:** Development of a polarimetric optical fiber sensor for electronic measurement of high pressure, IEEE Transactions on Instrumentation and measurement. vol. 39. no. 5 . October 1990
- [6] **M. Rucka, K. Wilde:** Application of wavelet analysis in damage detection and localization, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2007
- [7] **H.J. Park, K.Y. Koo, Ch.B. Yun:** Modal flexibility-based damage detection technique of steel beam by dynamic strain measurements using FBG sensors, Steel Structures 7 (2007) 11-18.
- [8] **A. Asundi:** Detecting damage in composites, Mechanical Engineering; Jun 1998; 120,

**Piotr Kowalczyk**  
**Katarzyna Nowosielska**

### *Summary*

*The usefulness of methods for the loads monitoring for structure failure detection will be assessed in the article. The measurement methods based on grids and fiber-optic Bragg polarimetric sensors will be the subject of theoretical analysis. The study also examined The impact of damages on the change of object natural frequencies will be also presented in the article.*