

Metody optyczne pomiaru odkształceń i diagnostyki elementów maszyn

dr inż. Marek Szumski, mgr inż. Piotr Szczerba, dr inż. Wojciech Żyłka

W ostatnim okresie obserwowany jest stały i konsekwentny rozwój metod optycznych w miernictwie, diagnostyce i sterowaniu. Wzrost mocy obliczeniowych mikroprocesorów, stała poprawa parametrów przetworników obrazu, źródeł światła pozwala na zastosowanie technik wykorzystujących światło, jako medium pomiarowe i kontrolne. Niezaprzeczalnymi zaletami tej drogi zdobywania informacji pomiarowych są: odporność na zakłócenia zewnętrzne, szczególnie elektrostatyczne i elektromagnetyczne, duża rozdzielczość uzyskanych wyników widoczna szczególnie w przypadku zastosowania matrycowych przetworników obrazu, możliwość wykonywania pomiarów bezstykowych, niewprowadzających zmian w charakterystykach mechanicznych badanych struktur, mała wrażliwość na charakterystyki materiałowe badanych elementów.

Metody stykowe pomiarów deformacji

Stykowe metody optycznych pomiarów deformacji podobnie do metod klasycznych (np. tensometrycznej) wymagają bezpośredniego połączenia pomiędzy badanym elementem i przetwornikiem pomiarowym. Pomiaru wykonanego tymi sposobami wykorzystują wpływ czynników zewnętrznych (deformacji geometrycznej, zmiany temperatury, zmiany ciśnienia) na propagację światła w światłowodzie. Zmianie ulegać mogą: natężenie światła, długość fali, jej faza i polaryzacja.

Siatka Bragga

Siatka Bragga to element wykorzystujący periodyczną zmianę współczynnika załamania światła w materiale światłowodu – rys. 1. Jeśli kierunek propagacji wiązki światła jest prostopadły do siatki, wtedy

Rys. 1. Istota siatki Bragga [4]

następuje odbicie przez nią określonej długości fali z padającej na nią wiązki. Wielkość ta określona jest wzorem [3, 7]:

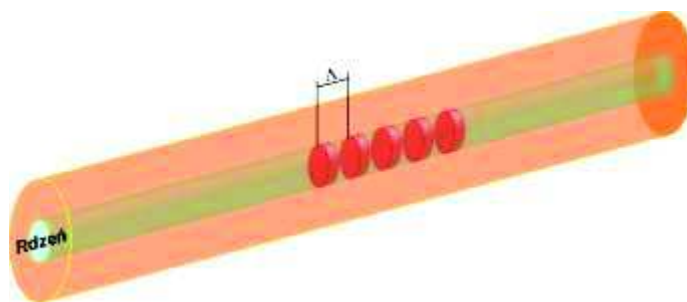
$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda$$

gdzie:

λ_B – długość odbitej fali Bragga,

n_{eff} – efektywny współczynnik załamania światła,

Λ – okres siatki Bragga.



Siatkę wytwarza się bezpośrednio w materiale światłowodu za pomocą promienia spójnego światła UV, które wywołuje lokalne zerwanie części wiązań tlenowo-krzemowych i lokalny wzrost współczynnika załamania w obszarze oddziaływania wiązki. Periodyczność obszarów naświetlania uzyskuje się wykorzystując dwie ustawione pod pewnym kątem względem siebie wiązki światła. Powstające w wyniku tego



prążki interferencyjne zapewniają sinusoidalnie zmienną intensywność światła w obszarze nałożenia wiązek. Siatkę wytworzyć można również poprzez odpowiednie maskowanie światłowodu. Otrzymane w ten sposób struktury mogą mieć długość od ułamków milimetra do metrów. W praktyce pomiarowej stosuje się jednak siatki o długości około 5 mm. Otrzymane w ten sposób przetworniki mają żywotność powyżej 25 lat i mogą pracować w temperaturach do około 300°C. Po odpowiedniej obróbce zakres temperatur użytkowych może ulec zwiększeniu do około 1100°C [2]. Typowa szerokość widma odbijanego przez siatkę Bragga wynosi około 1 nm. Siatka może być traktowana, jako selektywne pod względem długości fali zwierciadło (rys. 2). Oświetlając strukturę światłem o ciągłym widmie otrzymujemy odbicie części widma odpowiadającej długości fali Bragga i

Odształcenie światłowodu może być również powodowane rozszerzalnością cieplną materiału światłowodu. Wywołaną tym czynnikiem zmianę długości fali Bragga wyraża zależność [7]:

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

przy czym:

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

gdzie:

ε_{xx} – odształcenie osiowe światłowodu,

Δn – zmiana współczynnika załamania wywołana zmianą temperatury o ΔT ,

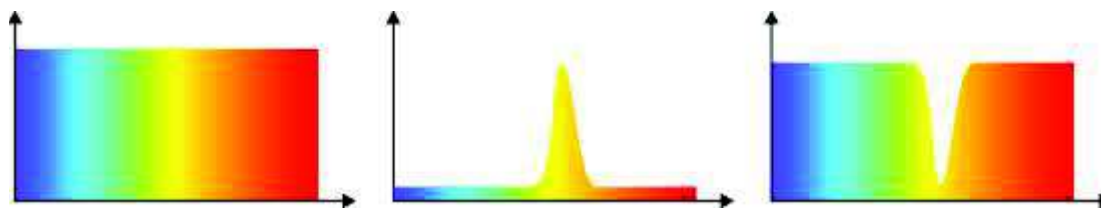
α – współczynnik rozszerzalności termicznej światłowodu.

Typowa czułość siatek Bragga dla odształceń termicznych wynosi \sim pm/K oraz \sim 1.2 pm/ $\mu\varepsilon$ dla odształceń me-

na zmiany rezystancji pomiędzy klasycznym tensometrem a powierzchnią, na której został on naklejony. Włókna światłowodowe mogą być również znacznie łatwiej instalowane we wnętrzu badanej struktury. Siatki Bragga, jako czujniki stanowią całość z torem przesyłania danych, jakim jest sam światłowód. Umożliwiają one pomiar punktowy. Szereg siatek Bragga pozwala uzyskać informację o rozkładzie odształceń, tym dokładniejszą, im większa liczba czujników jest użyta.

Czujniki polarymetryczne

Innym typem czujników światłowodowych są czujniki polarymetryczne wykorzystujące jednomodowe włókna o dużej dwójtomności. Wykorzystuje się przy tym efekt elastoptyczny wiążący ze sobą odształcenie sprężyste włókna i zmianę jego symetrii optycznej. W ele-



Rys. 2. Widmo (od lewej): oświetlenie siatki, odbite od siatki, przechodzące przez siatkę.

niezakłócone przejście pozostałej części widma. Poddanie elementu rozciąganiu lub ścisłaniu wpływa na okres siatki jak również na współczynniki załamania [4]. Odpowiedź siatki Bragga na odształcenie dana jest zależnością [6]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left[1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} - P_{12})] \right] \Delta\varepsilon$$

gdzie:

$\Delta\lambda_B$ – zmiana długości fali Bragga,

P_{11} i P_{12} – komponenty tensora optycznego,

ν – współczynnik Poisson'a,

$\Delta\varepsilon$ – składowa odształcenia równoległa do osi optycznej światłowodu.

Zmiana długości odbitej fali $\Delta\lambda_B$ jest w pewnym zakresie liniowo zależna od odształcenia ε . Relacja ta może być wyrażona równaniem [7]:

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

gdzie:

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

γ – stała proporcjonalności.

chanicznych w obszarze długości fali ok. 1.5 μ m.

Światłowód pomiarowy może zawierać szereg siatek Bragga o różnym okresie Λ (typowo, do 10 [2]). Jeśli różnica w długościach fal odbijanych przez poszczególne siatki jest na tyle duża, iż nawet przy znacznych odształceniach długości fal nie nakładają się, to możliwe jest jednoznaczne określenie, w którym punkcie pomiarowym światłowodu zachodzi dane odształcenie. 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 odształceniem siatki Bragga transformuje ją na zmianę sygnału napięciowego.

Podstawowymi zaletami siatek Bragga i czujników światłowodowych jest ich mały ciężar w porównaniu z typowym okablowaniem. Nie są one czułe również

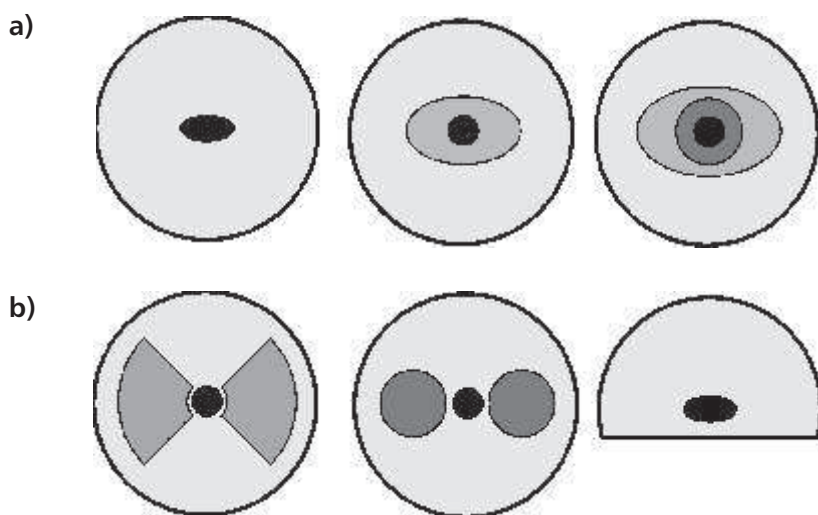
mentach tego typu używa się włókien o anizotropowym kształcie posiadające dwie wzajemnie prostopadłe płaszczyzny symetrii będące jednocześnie płaszczyznami dwójtomności [6]. Właściwości takie można uzyskać dwoma sposobami:

1. Poprzez deformację kołowego przekroju włókna (rys. 3a);
2. Poprzez wytworzenie w płaszczu zewnętrznym obszarów domieszkowanych (rys. 3b).

Miarą dwójtomności jest różnica współczynników załamania pomiędzy osiami: szybką i wolną (nazwy osi odnoszą się do prędkości propagacji światła wzdłuż odpowiednich osi):

$$B = n_s - n_f$$

Efektom tego jest zmiana stanu polaryzacji światła po przejściu przez światłowód poddany działaniu czynników zewnętrznych takich jak naprężenie, ciśnienie czy temperatura. Zmiana ta wynika z różnicy faz składowych ortogonalnych modu podstawowego.



Rys. 3. Światłowody o dużej dwójłomności: a) eliptyczne, b) domieszkowane

Jeżeli oświetlimy włókno światłem spolaryzowanym o płaszczyźnie polaryzacji nierównoległej do płaszczyzn dwójłomności to wzbudzone zostaną obydwie ortogonalne składowe modu podstawowego, a na skutek różnicy stałych propagacji pojawi się okresowa zmiana stanu polaryzacji wzdłuż włókna. Zmiana ta jest wynikiem zdudnienia obydwu składowych. Długość odcinka zdudnienia, czyli drogi, na której zostaje przywrócony początkowy stan pola-

we wzorze:

L – długość pomiarowej części włókna, T_ε – odkształcenie potrzebne do wywołania zmiany sygnału o 2π .

Wielkość T_ε pomnożona przez długość pomiarową światłowodu jest wielkością stałą dla danej długości fali λ : $T_\varepsilon = const(\lambda)$ [8].

W odróżnieniu do siatek Bragga cały odcinek światłowodu polaryzacyjnego może stanowić obszar pomiarowy.



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego w metodzie polarymetrycznej

ryzacji (tzn., że płaszczyzna polaryzacji zostaje obrócona o kąt 2π) wynosi [1, 8]:

$$L_B = \frac{\lambda}{n_s - n_f} = \frac{\lambda}{B}$$

Dla światłowodów telekomunikacyjnych o małej dwójłomności droga zdudnień wynosi od jednego do około stu metrów. Dla takich włókien nie obserwuje się znaczących zmian stanu polaryzacji na kilkunasto-centymetrowych odcinkach. Dla włókien o dużej dwójłomności L_B wynosi od jednego do około kilku milimetrów.

Czułość S czujników polarymetrycznych definiowana jest jako [8]:

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

Jednakże jego czułość nie jest ściśle ustalona i jest związana z długością pomiarową włókna. Im odcinek ten jest dłuższy, tym większa jest jego czułość. Czujniki tego typu są czujnikami całkującymi i dają globalną informację o istniejących odkształceniach. Lokalna zmiana odkształceń jest zawarta w wartości całkowitej wskazywanej przez czujnik, więc nie jest możliwe określenie jej położenia (rys. 4) [8].

Pomimo niezaprzeczalnych zalet opisane powyżej metody pomiaru deformacji powtarzają niektóre z wad klasycznych metod tensometrycznych. Najważniejszą z nich jest lokalność (słaba rozdzielczość). Najważniejszą zaletą jest mała masa ułatwiająca spełnienie postulatu

o możliwie najmniejszej ingerencji przyrządu pomiarowego w badanym obiekcie. Znacznie większe możliwości w tym zakresie zapewniają metody bezstykowe.

Metody bezstykowe

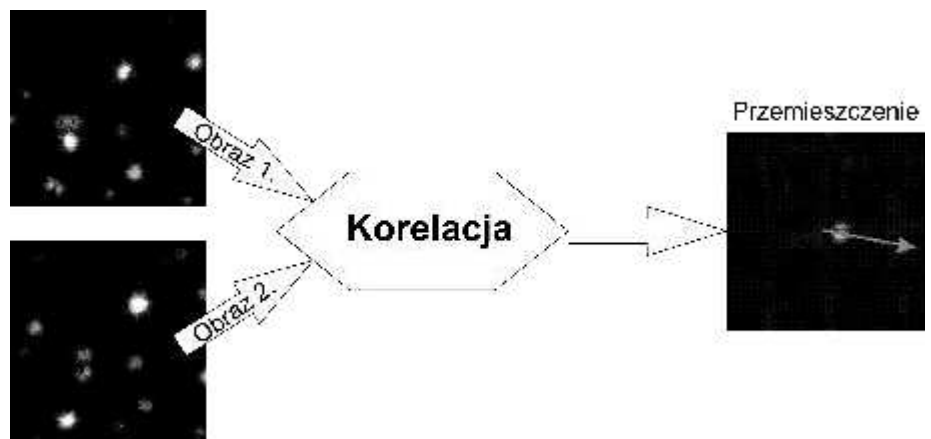
Opisana poniżej metoda rozwijana jest przez niemiecki DLR. Metoda IPCM (*Image Pattern Correlation Method*) [2] wykorzystuje informację o zmianach wyglądu zdeformowanej powierzchni badanego obiektu. Podstawy teoretyczne prezentowanej techniki oparte są na metodach porównywania obrazu – w tym przypadku porównaniu podlegają obraz referencyjny, przedstawiający nieobciążony fragment konstrukcji i element zdeformowany. Jedynymi wymaganiami stawianymi w tym przypadku badanej strukturze są jej widoczność (umożliwiająca rejestrację obrazu) i rozdzielność poszczególnych fragmentów powierzchni. To drugie wymaganie spełniane jest poprzez pokrycie badanej powierzchni unikalnym (stochastycznym) wzorem. W celu uzyskania finalnego rezultatu konieczne jest sprzęgnięcie metod i modeli znanych z fotogrametrii – pozwalających odtworzyć trójwymiarowy obraz badanej powierzchni i metod rozwijanych w ramach prac nad komputerowym porównywaniem obrazów dla celów anemometrii obrazowej PIV (*Particles Image Velocimetry*), dzięki którym możliwe jest automatyczne łączenie tych samych fragmentów powierzchni na jej dwóch lub więcej obrazach. Ze względu na duży koszt obliczeniowy obliczenia funkcji korelacji dla pełnych obrazów, dzielone są one na mniejsze podobszary (o rozmiarze np. 16×16 pikseli). Na podstawie rozkładu wartości funkcji korelacji wyznaczane jest pole przemieszczeń.

Zaprezentowany na rys. 5 wariant: jedna kamera i dwa obrazy, pozwala na określenie przemieszczenia w płaszczyźnie obrazowej kamery i może być z powodzeniem zastosowany w przypadku, gdy istotne przemieszczenia ograniczają się do jednej płaszczyzny. W przeciwnym przypadku konieczne jest zastosowanie co najmniej 2 kamer i dwóch par zdjęć.

W układach z dwiema kamerami, dzięki różnicom w rejestrowanych obrazach związanych z różnym umiejscowieniem kamer, możliwe jest bezpośrednie wy-



znaczenie geometrii badanej powierzchni, bez konieczności zakładania modelu deformacji, jak to ma miejsce w układach z jedną kamerą (w których wymagana jest znajomość geometrii powierzchni i kąta pomiędzy płaszczyzną obrazową kamery i kierunkiem deformacji). W przypadku odkształceń dynamicznych konieczna jest synchronizacja obydwu kamer. Algorytm metody stereoskopowej przedstawiono schematycznie na rys. 6. W pierwszym kroku badana powierzchnia z naniesionym stochastycznym wzorem jest fotografowana przez dwie kamery (rys. 7). Obie one skierowane są na ten sam wycinek powierzchni jednak pod różnymi kątami. Następnie, w procesie prostowania usuwany jest efekt perspektywy. Algorytm korelacji wyszukuje obszary o identycznym układzie wzoru dla kamery 1 (x_1, y_1) i kamery 2 (x_2, y_2). Po uwzględnieniu parametrów wewnętrznych (ogniskowej, dystorsji, itp.) i zewnętrznych (lokalizacji i orientacji) obydwu kamer, wyznaczane jest położenie przestrzenne obszarów o identycznych wzorach przy uwzględnieniu modelu projekcji centralnej i zasad triangulacji. Systematyczne powtarzanie algorytmu dla pozostałych podobszarów pozwala na wyznaczenie funkcji $z = f(x, y)$ opisującej z dużą dokładnością geometrię badanej po-



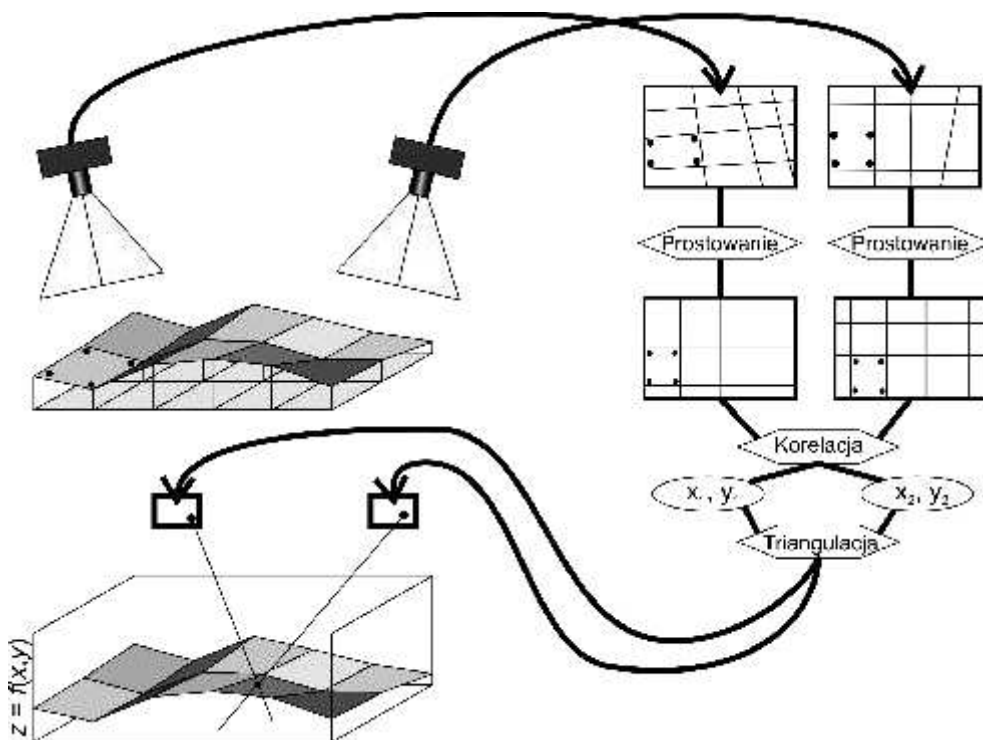
Rys. 5. PIV – zasada działania

wierzchni. Obliczenie deformacji wykonywane jest, jako porównanie dwóch następujących po sobie kroków dla stanów przed i po deformacji.

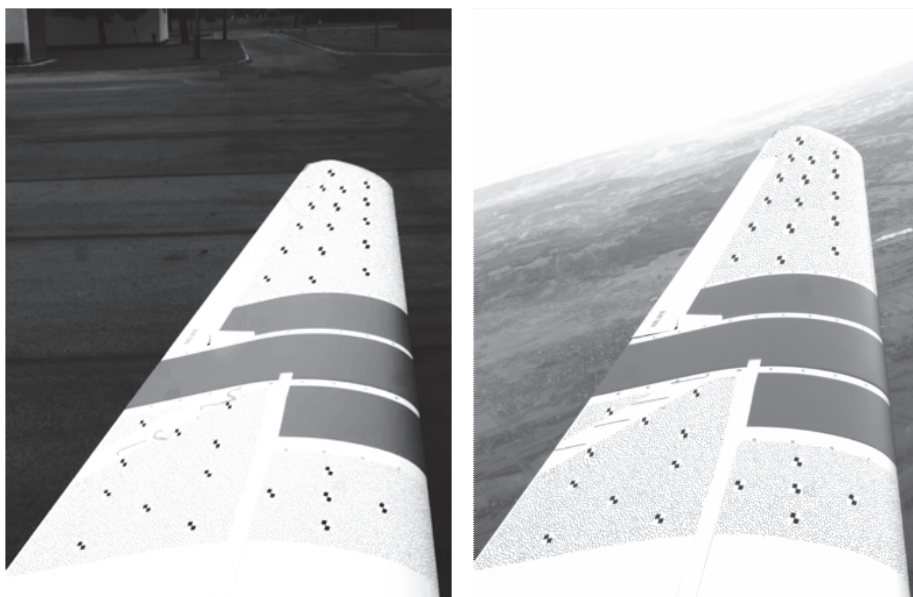
Parametrami krytycznymi dla opisywanej metody są parametry kamery (rozdzielczość, właściwości obiektywów itp.), wykorzystany wzór (jego kształt, kolor i gęstość) i warunki oświetlenia zewnętrznego. Dokładność metody sięga dziesiątych części milimetra na dystansie kilku metrów i zależy przede wszystkim od rozdzielczości kamer.

Przykładem tego typu badań mogą być testy deformacji skrzydła szybowca PW-6A

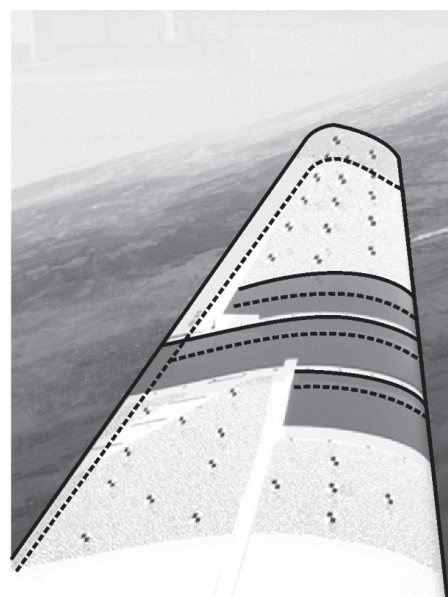
przeprowadzone w Ośrodku Kształcenia Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej. Przykładowe zdjęcia pokazano na rys. 7 (stan przed deformacją – zdjęcie wykonane na płycie lotniskowej, stan zdeformowany – zakręt z przeciążeniem). Na zdjęciu stanu zdeformowanego wyraźnie widać wzór niezbędny do poprawnego działania metody (ziarniste obszary ze znacznikami w kształcie czteropolowej szachownicy). W celu ukazania różnic w obrazie skrzydła w dwóch powyższych stanach na rys. 8. obydwie zdjęcia z rys. 7 nałożono na siebie. Linia kreskową obwiedziono elementu obrazu dla stanu przed deformacją, linią ciągłą –



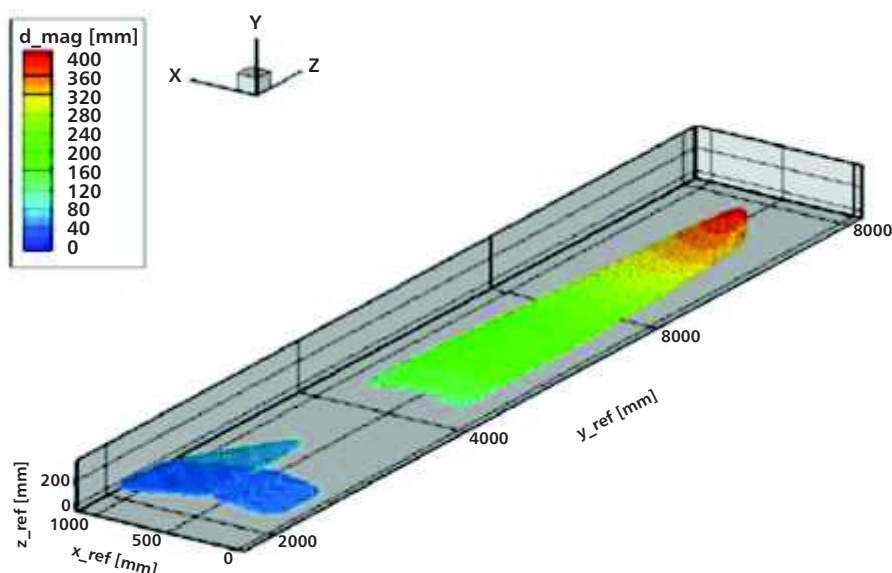
Rys. 6. Podstawy stereoskopowej korelacji obrazu



Rys. 7. Przykład zdjęć z kamery 1. dla stanu przed (lewa strona) i po deformacji (prawa strona)



Rys. 8. Porównanie stanu przed i po deformacji



Rys. 9. Przykładowe wyniki obliczeń

dla stanu po deformacji. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 9. Obszar bez wyznaczonej deformacji w czasie testów wykorzystywany był do pomiarów opływu skrzydła (na rys. 7, 8 – fragment skrzydła z ciemnoszarym pokryciem).

Podsumowanie

Rozwijane współcześnie optyczne metody pomiarowe są efektywnymi narzędziami kontrolno-pomiarowymi. Umożliwiają one szybki i efektywny pomiar deformacji, a w przypadku metody IPCM również bezinwazyjność. Metoda korela-

cji obrazu nie wymaga również mechanicznej ingerencji w badaną strukturę. Znakomicie sprawdza się w przypadku rozległych konstrukcji, dla których klasyczne metody mogą okazać się bardzo kosztowne i czasochłonne, ze względu na duże wymiary geometryczne (duża długość okablowania, a co się z tym wiąże – podatność na zakłócenia; duża liczba potrzebnych punktów pomiarowych). Przykładem tego typu badań mogą być testy deformacji skrzydła szybowca PW-6A przeprowadzone w Ośrodku Kształcenia Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej.

Literatura

1. Bock W.J., Woliński T.R., Barwicz A.: Development of a Polarimetric Optical Fiber Sensor for Electronic Measurement of High Pressure, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 39, No. 5, 1990.
2. Boden F. (edit.): AIM² Advanced Flight Testing Workshop: Handbook of Advanced In-Flight Measurement Techniques. BoD Norderstedt 2013.
3. Grattan K.T.V., Sun T.: Fiber Optic Sensor Technology: an Overview. Sensors and Actuators 82, 2000, pp. 40–61.
4. Kashyap R.: Fiber Bragg Gratings. Academic Press, Londyn 1999.
5. Kowalczyk P., Nowosielska K.: Analiza możliwości wykrywania uszkodzeń konstrukcji za pomocą technik światłowodowych. Prace Instytutu Lotnictwa nr 201, Warszawa 2009.
6. Othonos A., Kalli K.: Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. Artech House, 1999.
7. Staszewski W., Boller Ch., Tomlinson G.: Health Monitoring of Aerospace Structures. John Willey & Sons, Ltd, 2004.
8. Woliński T.R., Lesiak P., Domański A.W.: 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. ■