

TENDENCJE EKSPERYMENTALNEJ ANALIZY NAPRĘŻEŃ

Mirosław Dalak

*Katedra Inżynierii Produkcji
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy*

Streszczenie

W pracy odniesiono się do funkcjonujących na przestrzeni lat technik eksperymentalnej analizy naprężeń, ich rozwoju i stosowności. Sformułowano subiektywne oceny i prognozy odnośnie ich rozwoju i „naturalnej śmierci”.

1. WPROWADZENIE

Rozwój techniki obliczeń numerycznych korespondujący z rozwojem komputerów zmniejszył zainteresowanie eksperymentalną analizą naprężeń w końcowych latach ubiegłego wieku. Wydawało się wówczas, że jest ona w końcu swego rozwoju. Trend ten nie został potwierdzony jednak w ostatnich latach, kiedy to odrodziła się analiza eksperymentalna z zupełnie nowymi celami.

2. TRADYCYJNA ANALIZA NAPRĘŻEŃ

Tradycyjna analiza naprężeń osiągnęła swój punkt kulminacyjny około lat 1950-60. Podczas tego okresu metody klasyczne, znane od wielu dekad, były dokładne i rozwinięte [1, 2]. Technikami wiodącymi były elastoptyka i tensometria. Standardową techniką dla problemów mechanicznych i inżynierii budowlanej stała się po II wojnie światowej tensometria.

Tensometria zajmuje się metodami pomiarów odkształceń ciał stałych, a sygnałami informującymi o odkształceniach są zmiany długości odcinków linii prostych łączących punkty ciała oraz zmiany kątów między tymi odcinkami. Informacji tych dostarczają przyrządy nazywane tensometrami lub czujnikami tensometrycznymi. Wyróżnia się tensometry elektryczne (rezystancyjne, indukcyjne, elektrodynamiczne, piezoelektryczne, pojemnościowe) i mechaniczne (dźwigniowe, optyczno-mechaniczne, strunowe).

Elastoptyka jest metodą badania modeli z materiałów optycznie czułych, przeświecanych światłem spolaryzowanym. Modele rozpatrywanych elementów, a nawet całych konstrukcji, płaskie lub przestrzenne, wykonuje się z materiałów, które w wyniku poddania ich obciążeniom z równoczesnym przeświecaniem światłem spolaryzowanym wykazują efekty optyczne w postaci prążków interferencyjnych, bezpośrednio i jednoznacznie związane ze stanem odkształcenia. Analiza tych efektów prowadzi do określenia stanu naprężenia badanego modelu, i z kolei do oceny naprężeń w konstrukcji, która ten model reprezentuje.

Elastoptyka dwuwymiarowa (2D) rozszerzana była do bardziej skomplikowanych zagadnień, jak: lepkość sprężystość, plastyczność. Wiele jej wariantów było rozwijanych, jak: powłoki elastoptyczne, dynamika i, specjalnie, elastoptyka trójwymiarowa (3D).

Pojawiły się też nowe techniki – technologia półprzewodników pozwoliła wytworzyć bardzo czułe tensometry.

Geometryczna technika Moiré'a, opisana przez D. Tollenaara w 1945 r., zastosowana była po raz pierwszy do problemów praktycznych w 1952 r. Nałożenie na siebie pary lub więcej siatek składających się z linii, kropek lub innych geometrycznych elementów powoduje powstanie obszaru ciemnych i jasnych pasm. Zjawisko to, nazywane morą, wykorzystywane jest w wielu dziedzinach. Zmiany podziałki, kierunku i położenia pasm mory są znaczne w porównaniu z odpowiednimi zmianami nałożonych na siebie siatek. Obrazy mory powstające wskutek zmian siatki wywołanych odkształceniem elementu wykorzystywane są do pomiaru przemieszczeń, odkształceń i ugięć.

Teoretyczne podstawy holografii, opracowane przez D. Gabora w 1948 r., przyniosły pierwsze ich zastosowanie w 1960 r., z użyciem lasera.

Holografia jest interferencyjną metodą polegającą na rejestracji i odtworzeniu spójnych fal rozproszonych od obiektu lub ugiętych na nim, w szczególności fal elektromagnetycznych. W przypadku, gdy ma się do czynienia z falami elektromagnetycznymi w zakresie widzialnym, metoda ta nosi nazwę holografii optycznej. Charakterystyczna dla holografii właściwość, polegająca na możliwości „zamrożenia” amplitudowo-fazowego rozkładu fali świetlnej i jego odtworzenia w dowolnym czasie, umożliwia jednocześnie porównywanie fal, tworzących się w dowolnie odległych od siebie chwilach.

Technika obliczeń numerycznych była intensywnie rozwijana od lat 40. ub. wieku. Jej rozwój umożliwiło wdrożenie techniki komputerowej. Wprowadzono techniki badań parametrycznych i rozwinięto metodykę elementów skończonych.

Metoda elementów skończonych jest procesem, w wyniku którego continuum o nieskończonej liczbie stopni swobody może być aproksymowane poprzez zbiór podobszarów (elementów), z których wyodrębnia się określoną, skończoną liczbę stopni swobody. Następnie każdy z tych elementów łączony jest z sąsiednimi w sposób stosowany przy badaniu dyskretnych układów, czy to konstrukcyjnych, czy elektrycznych. Ta zasadnicza prostota fizycznej interpretacji i postaci matematycznej wpłynęła niewątpliwie na popularność metody w takim samym stopniu, jak istnienie maszyn cyfrowych, pozwalających dziś na realne rozwiązywanie najbardziej złożonych zadań inżynierskich. W większości biur projektów metodę elementów skończonych stosuje się dziś jako zwykłe postępowanie inżynierskie.

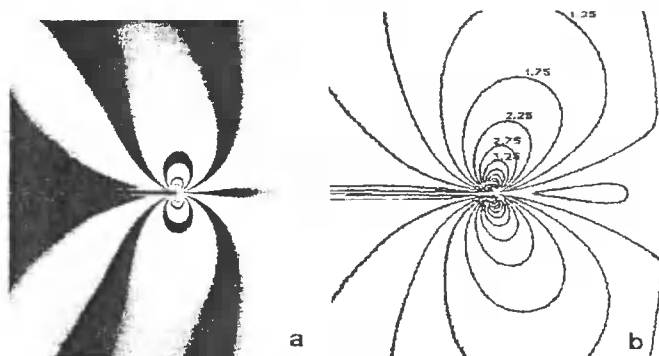
Rachunek macierzowy nie jest istotą metody elementów skończonych, jak to niekiedy błędnie się sądzi. Metoda elementów skończonych jest w pewnym sensie daleko idącym uogólnieniem znanego **rachunku różnic skończonych**. Można w niej stosować w jednym obszarze różne, w różnych jego miejscach, gęstości podziału na elementy, co daje możliwość dokładnego śledzenia efektów lokalnych zaburzeń. Metoda ta umożliwia analizę wszelkich układów kontynualnych o różnych własnościach fizycznych, o dowolnych kształtach, dowolnie obciążonych, znajdujących się w stanie sprężystym lub plastycznym.

3. ROZWÓJ ISTNIEJĄCYCH TECHNIK

Wraz z nadejściem metod numerycznych pojawiło się ostatecznie wiele nowych technik, które rozszerzyły możliwości eksperymentalnej analizy naprężeń.

Klasyczne metody optyczne analizy naprężeń mają wielkie znaczenie i mogą być metodami ogólnymi, w przeciwieństwie do np. pomiarów tensometrycznych, które dają tylko informacje punktowe. Ta fundamentalna charakterystyka ma takie zakończenie, że możliwa dostępna informacja jest bardzo szeroka, ale trudna do zastosowania.

Za pomocą **techniki skanowania** istnieje możliwość digitalizowania globalnej informacji i rysowania przez komputer. Technika ta była stosunkowo wolna i wymagała dużej pamięci komputerów. W latach 80. XX wieku zastosowano **technikę obróbki obrazów** z kamerami elektronicznymi i stacjami roboczymi. Przykład takiej ewolucji przedstawiono na rysunku 1, gdzie zamieszczono wyniki fotoelastyczne (a), a następnie obrobiony ich obraz (b) z testów mechaniki pęknięć.



Rys. 1. Test mechaniki pęknięć: a) wyniki fotoelastyczne, b) obrobiony obraz [2]

Pomimo tego, metody optyczne, a fotoelastyka w szczególności, są jeszcze niedopracowane. Budowa modeli i ich testowanie, z ich nieodłącznymi ograniczeniami (np. własności materiału, warunki graniczne), są wrażliwe, długie i kosztowne.

Technika tensometryczna jest aktualnie technologią dopracowaną. Tensometry są prostymi, niezawodnymi, uniwersalnymi narzędziami pomiarowymi, nie tylko używanymi do pomiaru naprężeń, ale obecnie także jako elementy wielu czujników sił, ciśnienia i przetworników przyspieszenia.

Obecnie rozwija się technologię szybkich czujników i przetworników półprzewodników.

Aktualnie dostępne są wielokanałowe systemy pozyskiwania danych i „on-line” komputerowa obróbka danych pomiaru naprężeń w czasie rzeczywistym. Umożliwiają one rozwiązywanie problemów dynamicznych, jak wybuchy i obciążenia udarowe. Inne przetworniki, takie jak przemieszczeń i ciśnienia, mogą być zintegrowane w system pomiarowy.

Telemetria, stanowiąca dział telemekhaniki zajmujący się przekształcaniem (zwykle na sygnał elektryczny) i przekazywaniem na odległość wyników pomiarów (zwykle kodowanych), która wydawała się bardzo atrakcyjna w latach 60. XX wieku, obecnie znajduje ograniczone zastosowania do specyficznych problemów (np. biomechanika, sport). Przeszkodę w jej upowszechnieniu stanowią mała niezawodność i duże koszty.

4. INNE ZASTOSOWANIA

Wymagania przemysłu wytrzymałszych i lżejszych materiałów stanowią ogromny impuls rozwoju materiałów kompozytowych, różniących się fundamentalnie w zachowaniu i pracy od klasycznych materiałów konstrukcyjnych, jak stal i lekkie stopy. Nie tylko problemy materiałowe kompozytów są intensywnie badane, ale także opór struktury. Kwantyfikacja właściwości mechanicznych, wytrzymałość i zmęczenie są dziedziną wymagającą pomocy eksperymentalnej analizy naprężeń.

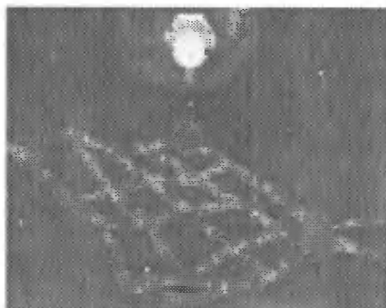
Analiza modalna, która jest szczegółowym badaniem charakterystyk wibracyjnych struktur mechanicznych, nie jest bezpośrednio związana z eksperymentalną analizą naprężeń, ale ostateczny jej cel jest taki sam, a mianowicie określenie mechanicznego zachowania struktury. Analiza modalna jest szeroko stosowana przez NASA Johnson Space Center, gdzie każda struktura (np. satelita) przeznaczona do wysłania w przestrzeń kosmiczną z wahadłowca orbitalnego posiada formę opartą o elementy skończone i analizę modalną. Wszelkie wyniki porównywane są ze strukturalno-dynamicznym zachowaniem wahadłowca orbitalnego w celu wyeliminowania możliwości awarii spowodowanej oddziaływaniem sił.

Przykład analizy strukturalnej promu kosmicznego z zastosowaniem czujników Piezo-BEAM przedstawiono na rysunku 2.

Parametry modalne standardowych struktur przemysłowych są ogólnie znane i udokumentowane. Na rysunku 3 przedstawiono przykład kształtu mody drganiowej powłoki samolotu.



Rys. 2. Analiza strukturalna promu kosmicznego [4]



Rys. 3. Kształt mody drganiowej powłoki samolotu [5]

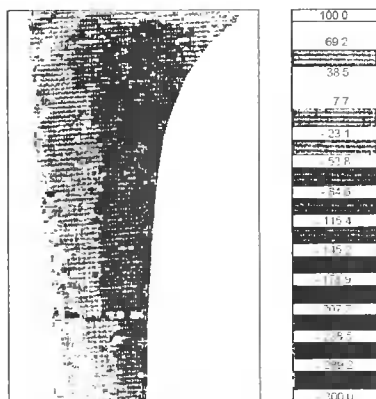
5. NOWE TECHNIKI

Wśród nielicznych nowych technik można wyróżnić termoelastykę:

- optyczną metodę cienia kaustyków (shadow optical method of caustics),
- laserową holografie plamkową (speckle holography),
- czujnik optyczno-włóknowy (optical-fiber sensor).

Efekt termoelastyczny, dyskutowany już przez Lorda Kelvina w 1878 roku, został wykorzystany do eksperymentalnego określania naprężeń z wprowadzeniem bardzo czułych kamer na podczerwień. Technika ta była rozwijana w Wielkiej Brytanii i jest skomercjalizowana jako **SPATE** (*Stress Pattern Analysis by Thermal Emission*). Za pomocą tego wyposażenia i użyciu komputera oraz programu do obróbki obrazu, suma naprężeń na nie przygotowanej powierzchni może być wizualizowana, umożliwiając bezpośrednią analizę naprężeń na przedmiocie rzeczywistym (rys. 4).

Powszechne stosowanie tej metody ograniczają wysokie koszty wyposażenia. Jest ona obecnie stosowana głównie w przemyśle samochodowym i kosmicznym.



Rys. 4. Pomiar naprężeń na kości techniką SPATE [3]

W rzeczywistości większość problemów musi być rozwiązywana przez kombinację różnych metod: analitycznych, numerycznych i eksperymentalnych. Metody analityczne i numeryczne bazują na wartościach stałych materiałowych i narzuconych warunkach granicznych. Z tego m.in. powodu zostały wprowadzane techniki hybrydowe, które dopasowują metody numeryczne i eksperymentalne, oraz używają doświadczalnie określonych warunków wstępnych i granicznych.

6. UWAGI KOŃCOWE

- Zmierzch analizy eksperymentalnej, krytykowanej wielokrotnie pod koniec ubiegłego wieku, okazał się przedwczesny, gdyż lata ostatnie nie potwierdziły tego. Można zatem oczekiwać jej rozwoju.
- Techniki hybrydowe, ale także nowe techniki, posiadają duży potencjał; wymagają jednak jeszcze wielu badań.
- Określenie naprężeń resztkowych, badanie materiałów kompozytowych i analiza modalna będą miały wzrastający udział w zainteresowaniu stosownie do przyszłego rozwoju technicznego.
- Dobre techniki dla naprężeń stykowych nie istnieją, ale wraz z metodami bezkontaktowymi do pomiarów naprężeń stanowią konieczny obszar badań w nadchodzących latach.

LITERATURA

- [1] Hetenyi M., 1950. Handbook of Experimental Stress Analysis. J. Wiley & Sons.
- [2] Kobayashi A.S., 1987. Handbook on Experimental Mechanics. Prentice Hall Inc.
- [3] Bourgois R., 1992. New Trends in Experimental Stress Analysis. European Journal of Mechanical Engineering 37(1), 32-33.
- [4] Piezo-Beam – the ultralight sensor for Modal Analysis, 1992. Kistler Information 48, 3,
- [5] Measure with crystals, Kistler Piezo-Instrumentation, Brochure 2.002e, 11.

TRENDS IN EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS

Summary

Paper deals with experimental stress analysis review since its scientific application beginning. It was pointed that experimental stress analysis was on the rocks in late past century. It was determined its further developments also.