

WSPÓŁCZESNE METODY BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH W MECHANICE CIAŁA STAŁEGO

MAREK BIJAŁ-K-ŻOCHOWSKI

Politechnika Warszawska

JACEK KAPKOWSKI

Instytut Mechanizacji Budownictwa

Na początku lat siedemdziesiątych prognozowano, że w wyniku żywiołowego rozwoju techniki komputerowej badania doświadczalne sprowadzone zostaną na bardzo ograniczone pole działania. Okazało się, że metody komputerowe nie tylko nie wyeliminowały technik eksperymentalnych, ale same przyczyniły się do ich udoskonalenia i dalszego szybkiego rozkwitu. W wielu przypadkach połączenie aparatury doświadczalnej z systemem komputerowym stworzyło nowe narzędzie o prawie nieograniczonych możliwościach w zakresie doświadczalnej analizy naprężeń i odkształceń.

Nowoczesne metody eksperymentalne stosowane są nadal — jako ostatecznie weryfikujące obliczenia — do badania wielkich systemów konstrukcyjnych (statków, samolotów, tam, reaktorów atomowych itd.), zarówno w procesie montażu jak i kontroli eksploatacyjnej, czy kontroli jakości.

Szerokim obszarem zastosowania metod doświadczalnych jest badanie problemów podstawowych, szczególnie takich jak duże odkształcenia konstrukcji, propagacji fal naprężeń i odkształceń, zmęczenia i zniszczenia konstrukcji, czy zachowania się materiałów o nieliniowej charakterystyce lub z niejednorodnościami. Tych zagadnień i wielu innych problemów mechaniki ciała odkształcalnego nie można rozwiązać na obecnym poziomie wiedzy bez zastosowania analizy doświadczalnej.

W artykule tym przedstawiono przegląd najbardziej rozpowszechnionych nowoczesnych metod doświadczalnych, stosowanych w mechanice ciała stałego. Aby nie rozbudowywać zbyttno objętości opracowania dokonano pewnej selekcji. Szerzej opisano jedynie te, które zdaniem autorów rokują największe nadzieje jeśli chodzi o ich dalszy rozwój. Wyodrębniono kilka grup metod: bardziej uniwersalne bazujące na wykorzystaniu tych samych zjawisk fizycznych i dość wąsko wyspecjalizowane służące do rozwiązywania określonych problemów badawczych.

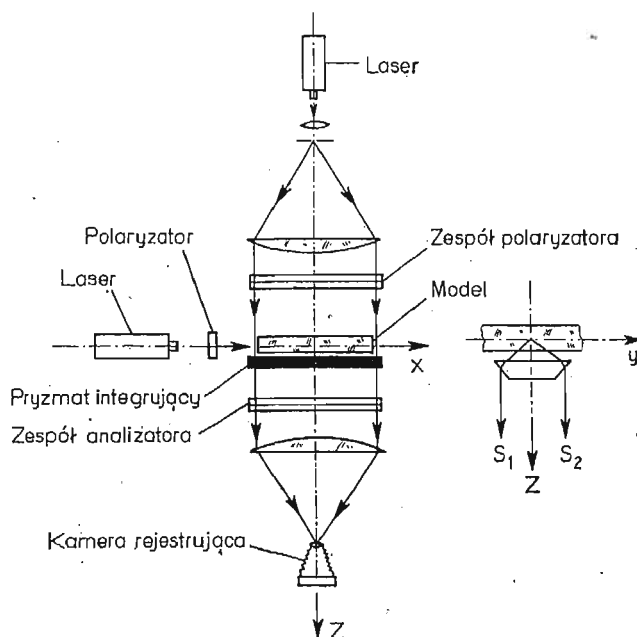
Autorzy mają świadomość tego, że na dokonany przez nich podział i wybór miały także wpływ ich własne preferencje i kompetencje.

Metody polaryzacyjno-optyczne

W obecnym stadium rozwoju metody polaryzacyjno-optyczne osiągnęły bardzo wysoki stopień użyteczności w badaniach stosowanych. Dotyczy to zarówno techniki transmisyjnej (klasyczna elastooptyka — badania modelowe) jak i refleksyjnej (metoda elastooptycznej warstwy powierzchniowej — badania na rzeczywistych konstrukcjach). Techniki te wykorzystywane są również do badań podstawowych poza tradycyjnymi dziedzinami zastosowań. Można tu przykładowo wymienić prace z zakresu modelowania materiałów kompozytowych przy pomocy tworzyw optycznie czynnych z odpowiednio dobranymi zbrojeniami [1]. Metoda warstwy optycznie czynnej znajduje zastosowanie w badaniach procesów obróbki plastycznej [2], czy też ostatnio coraz częściej w doświadczeniach z zakresu mechaniki pękania [3].

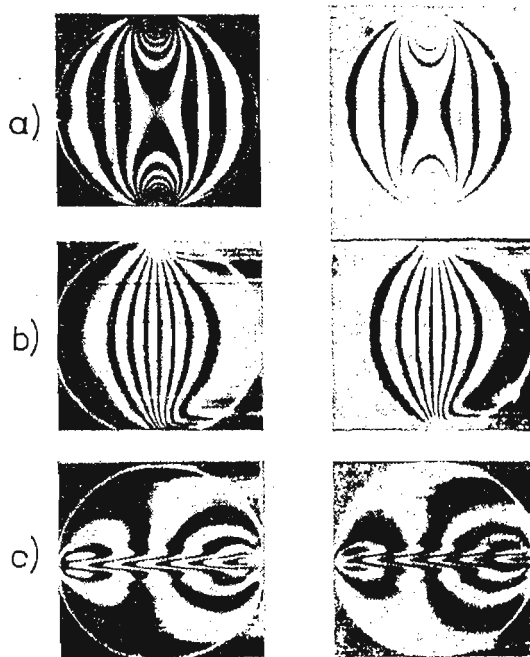
Nie należy jednak sądzić, że metody polaryzacyjno-optyczne stanowią zamknięty temat. Można wyróżnić dwa zasadnicze kierunki, w których prowadzone są obecnie badania mające na celu rozwijanie i udoskonalenie tych metod. Pierwszym jest opracowywanie nowych technik pomiarowych, polegających często na jednoczesnym wykorzystaniu innych zjawisk fizycznych. Oprócz tego zasadniczego kierunku rozwojowego obserwuje się dążenie do udoskonalenia tradycyjnych technik pomiarowych. Chodzi o zwiększenie dokładności pomiarów oraz o jak najdalej posuniętą ich automatyzację często z wykorzystaniem komputerów do analizy wyników.

Jeżeli chodzi o nowe techniki pomiarowe daje się zaobserwować dążność do wykorzystania takich zjawisk jak dwójłomność w polu elektrycznym (efekt Kerra), dwójłomność w polu magnetycznym, skręcenie płaszczyzny polaryzacji w polu magnetycznym (efekt Faradaya). Klasycznym przykładem wykorzystania tego rodzaju zjawisk są propozycje



Rys. 1. Schemat układu do analizy naprężeń metodą światła rozproszonego

Abena, w których wprowadzenie sztucznego obrotu głównych płaszczyzn polaryzacji pozwala badać trójwymiarowe stany naprężeń w polaryskopie transmisyjnym. Można tego dokonać przez stosowanie modeli o uprzednio zamrożonych polach naprężeń, albo też przez zastosowanie silnych pól magnetycznych. Tego rodzaju technikę pomiarową nazwano **elastoptyką całkową**. Uwzględnienie efektu Faradaya doprowadziło do opracowania podstaw **magnetoelastoptyki** i zbudowania magnetopolaryskopu [4]. Przy wykorzystaniu elastoptyki całkowej uzyskano szereg wartościowych wyników w badaniach płyt, powłok, ciał osiowo-symetrycznych [5], a także w badaniu kryształów [6].

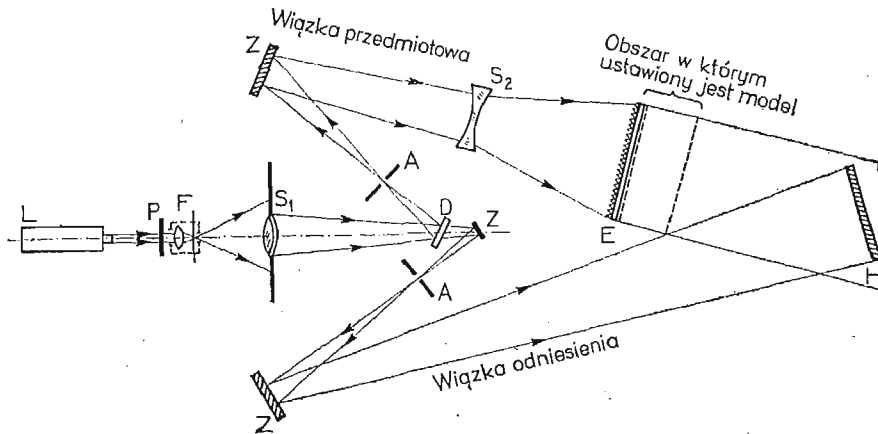


Rys. 2. Tarcza kołowa ściskana wzdłuż średnicy: a) izochromy m ; b) izodyny S_x , c) izodyny S_y

Jednym z etapów rozwoju metody elastoptycznej są badania modeli w świetle rozproszonym. Technika ta znana od 1938 roku nie doczekała się jednak szerszego zastosowania. Stało się tak z tego powodu, że nie był znany dokładny analityczny opis zjawiska rozproszenia światła, a ponadto koniecznym było stosowanie skomplikowanej i bardzo kosztownej aparatury. W ostatnich latach rozwinięto pewną szczególną odmianę badań elastoptycznych w świetle rozproszonym nazwaną **metodą izodyn**. W pracy opublikowanej w 1973 roku PINDERA i STRAKA [7] zaproponowali zastosowanie tzw. pryzmatu integrującego przykładanego do powierzchni modelu badanego w polaryskopie transmisyjnym (rys. 1). Pryzmat związany jest z dodatkowym źródłem światła spójnego. Analizując wiązki światła S_1 i S_2 otrzymuje się informacje o różnicy naprężeń $\sigma_y - \sigma_z$, a w przypadku płaskiego stanu naprężeń daje to możliwość bezpośredniego wyznaczenia naprężeń σ_y . Przesuwając pryzmat wraz z jego źródłem światła w kierunku osi y i dokonując ekspozycji na tym samym filmie otrzymuje się w ten sposób pełny obraz linii nazwanych izodynami. Nazwa ta pochodzi stąd, że jak udowodniono w pracy MAZURKIEWICZA i PINDERY [8] są to linie,

które w obszarze modelu wyznaczają stałą wartość obciążenia, prostopadłego do kierunku wiązki światła, zsumowanego na odcinku od brzegu modelu do rozpatrywanej izodyny.

Wykonując analogiczny jak poprzednio pomiar pryzmatem skierowanym wzdłuż osi y uzyskuje się informacje o wartości σ_x . Wraz z obrazem izochrom otrzymanych w zasadniczym układzie polaryskopu jest to pełny zestaw informacji potrzebnych do wyznaczenia rozkładu naprężeń w modelu. Na rysunku 2 zaczerpniętym z pracy [9] pokazano przykładowo komplet danych uzyskanych metodą izodyn dla tarczy kołowej ściskanej wzdłuż średnicy kołowej. Metoda izodyn nadaje się szczególnie do analizy pola kontaktu [8]. Ostatnio prowadzone są badania mające na celu zastosowanie metody izodyn do badań dynamicznych [9].

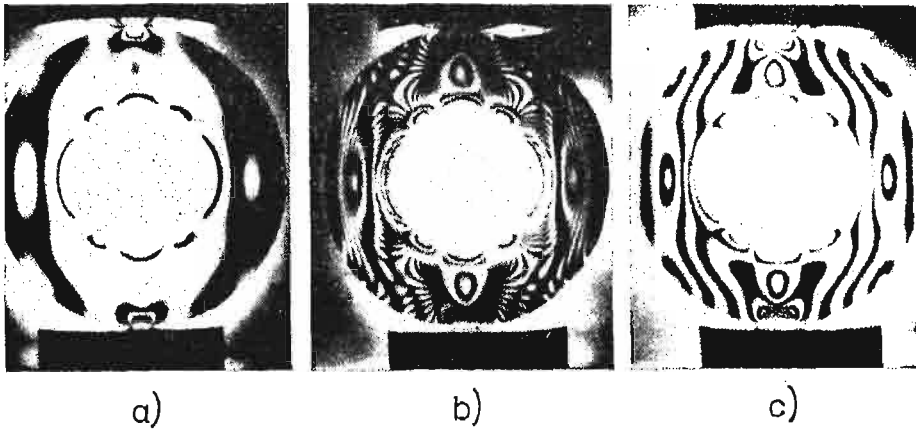


Rys. 3. Schemat polaryskopu holograficznego: L — laser, P — płytka fazowa, F — filtr przestrzenny, D — dzielnik wiązki, Z — zwierciadło, A — diafragma, S₁, S₂ — soczewki, E — ekran rozpraszający, H — płyta holograficzna

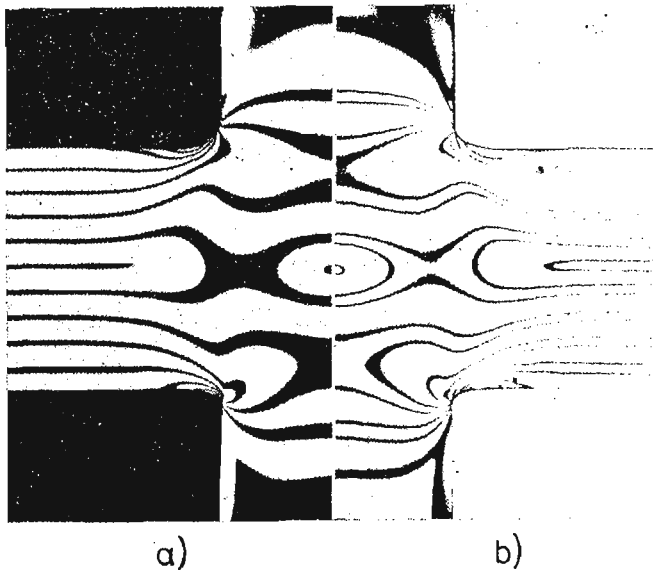
Osobnym zagadnieniem w metodzie światła rozproszonego jest dobór odpowiednich materiałów modelowych. Wykonywane są badania mające na celu opracowanie receptur materiałów wykazujących duży efekt rozproszenia przy wymaganym efekcie dwójłomności wymuszonej. Jak wykazują dotychczasowe wyniki najodpowiedniejszym dodatkiem do żywic epoksydowych podwyższających efekt rozproszenia są krzemionki koloidalne modyfikowane [10].

Nowoczesnym narzędziem doświadczalnej analizy naprężeń jest **elastoptyka holograficzna**. Oprócz danych uzyskiwanych w klasycznym polaryskopie, w układzie holograficznym, którego schemat [11] pokazano na rys. 3 otrzymuje się izopachy, które pozwalają określić sumę naprężeń głównych. Jest to więc pełny zestaw danych umożliwiający wyznaczenie pola naprężeń w badanym modelu. Wadą tego układu jest to, że hologram przedstawia nałożone na siebie izochromy i izopachy, które często trudne są do rozróżnienia. Dlatego też prowadzone są prace mające na celu zwiększenie kontrastu izochrom. Stosuje się dwukrotną ekspozycję hologramu przy równych co do wielkości, lecz różnoimiennych (np. rozciąganie i ściskanie) obciążeniach. Inny wariant to wprowadzenie wstępnego obciążenia modelu [12], co daje efekt pokazany na rys. 4. Lewa fotografia (a) przedstawia same izochromy przy obciążeniu wstępnym, prawa (c) izochromy przy obciążeniu trzykrotnie

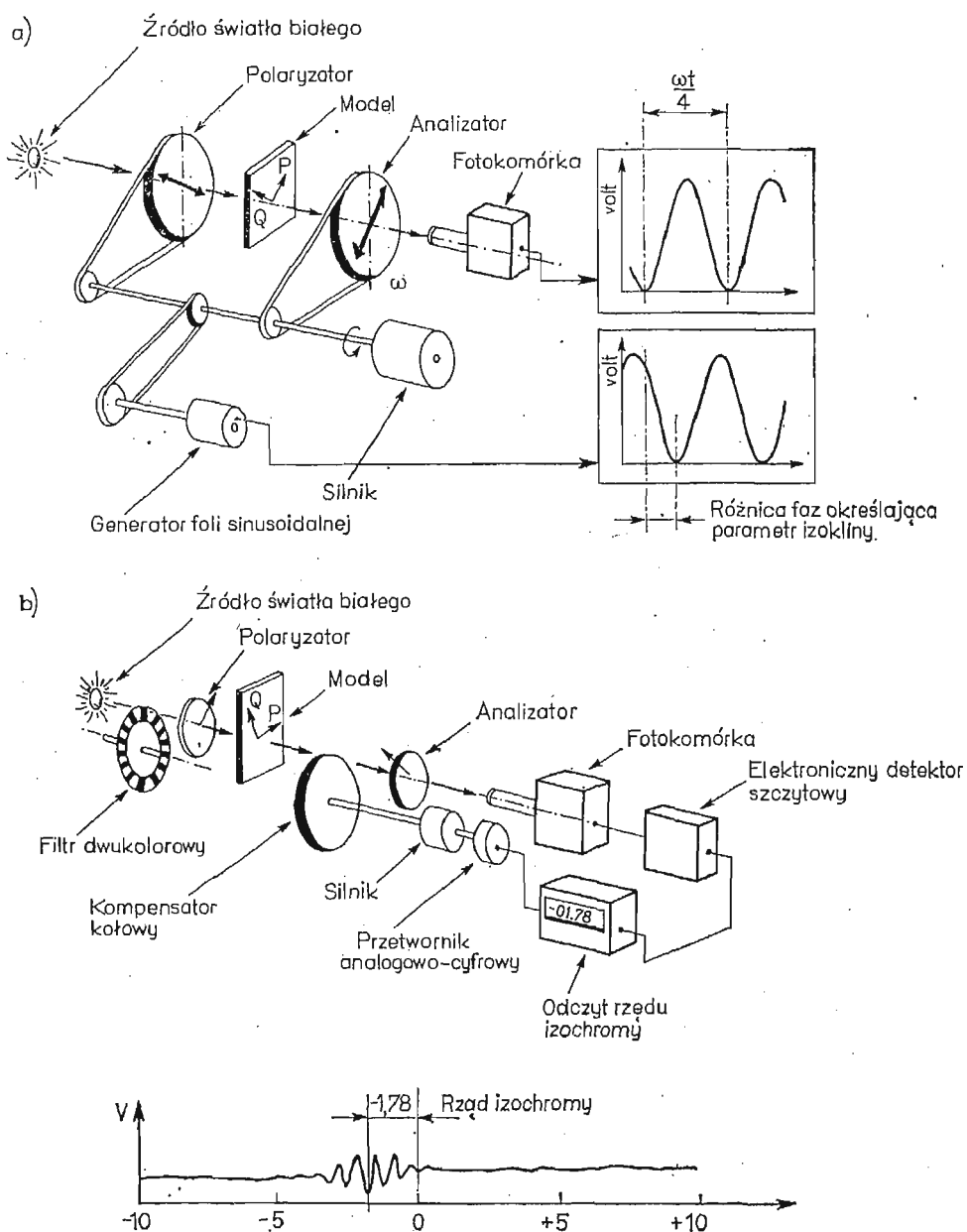
wyższym. Na środkowej fotografii (rys. 4b) widać zarówno izochromy (ciemniejsze) jak i izopachy. W 1974 roku zbudowano układ pozwalający dokonywać odczytu w czasie rzeczywistym [13]. Przyrząd ten nazwany **polaryskopem holograficznym** różni się od układu z rys. 3 ustawieniem za hologramem na drodze wiązki przedmiotowej dodatkowego układu analizatora, a zamiast płyty holograficznej używa się hologramu wykonanego dla modelu nieobciążonego. Interesującym rozwinięciem elastooptyki holograficznej jest warstwicowanie imersyjne [14], które może być zastosowane zarówno do badań płaskich modeli elastooptycznych jak i płytek z zamrożonymi odkształceniami wyciętych z modeli trójwymiarowych.



Rys. 4. Obrazy izochrom i izopach otrzymane przy zastosowaniu elastooptyki holograficznej



Rys. 5. Krzywe ekwidensytometryczne (b) otrzymane z obrazu izochrom (a)



Rys. 6. Układ polaryskopu z automatycznym odczytem wyników: a) pomiar parametru izokliny, b) pomiar rzędu izochromy

Niezależnie od opisanych wyżej nowych technik pomiarów polaryzacyjno-optycznych prowadzone są prace nad udoskonaleniem metod tradycyjnych. W pierwszej kolejności należy tu wymienić te, które mają na celu zwiększenie dokładności pomiarów. W celu „wyostżenia” obrazu izochrom stosuje się specjalną obróbkę chemiczną czarno-białych

negatywów nazwaną **ekwidensyometrią** (wyznaczenie linii stałego zaczerńnienia negatywu) [15]. Efekt tej operacji widać na rys. 5, zaczerpniętym z pracy [16], w której przeprowadzono także analizę błędów techniki ekwidensymetrycznej. Wyznaczenie ułamkowych rzędów izochrom, a więc zagęszczenie obrazu izochrom jest tematem pracy [17] gdzie autor wykorzystał analizę spektralną, oraz pracy [18], w której zastosowano specjalny przetwornik optyczno-elektroniczny do pomiaru natężenia światła wychodzącego z polaryskopu. W metodzie tej przeprowadza się pomiary punktowe analogiczne do pomiarów przy użyciu konwencjonalnego kompensatora.

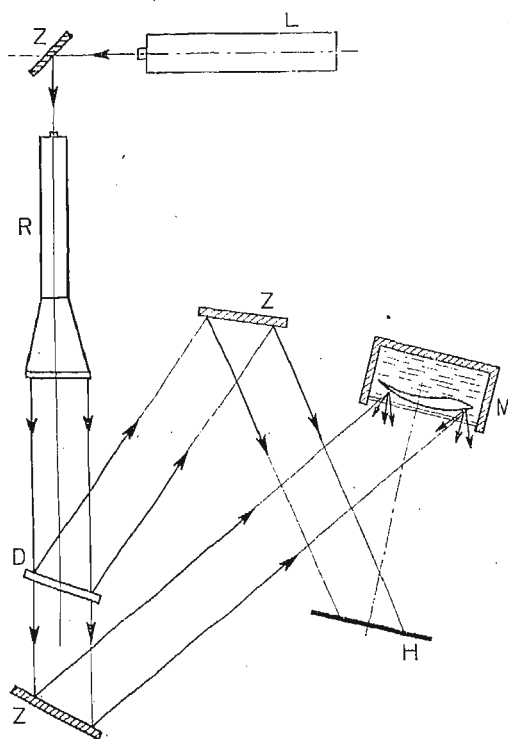
Automatyzacja badań polaryzacyjno-optycznych obejmuje z jednej strony budowę automatycznych systemów do analizy danych otrzymywanych z polaryskopów konwencjonalnych, a z drugiej opracowanie nowych polaryskopów z automatycznym odczytem danych. Połączenie tych dwóch rozwiązań daje w pełni zautomatyzowany proces badań. Automatyczna obróbka danych może być przeprowadzona przez analizowanie obrazów w czasie rzeczywistym za pomocą techniki telewizyjnej [19] albo metodą fotoelektryczną [20]. Techniki te można stosować także do analizy obrazów izoklin i izochrom zarejestrowanych fotograficznie. Otrzymane wyniki analizy są następnie wprowadzone do komputera, który dokonuje rozdzielania naprężeń przy użyciu jednej ze znanych metod [20] [21]. Często stosuje się tu dyskretyzację badanego obszaru trójkątnymi elementami skończonymi [22] [23]. Aby przystosować technikę pomiarową do automatycznej obróbki danych, realizowanych jest szereg prac peryferyjnych jak np. [24], w której podano uogólnienie techniki skośnego prześwietlenia w metodzie warstwy elastoptycznej, co pozwala uniknąć kłopotliwego ustawiania modelu w kierunkach głównych.

Przechodząc do omówienia idei budowy automatycznego polaryskopu należy w pierwszym rzędzie wymienić koncepcję podaną w pracy [25], która przewiduje osobne układy optyczno-mechaniczno-elektroniczne do pomiarów parametru izokliny (rys. 6a) i rzędu izochromy (rys. 6b). Autorzy podają, że dokładności wynoszą $\pm 0,2^\circ$ jeżeli chodzi o parametr izokliny, oraz $\pm 0,01$ przy pomiarze rzędu izochromy. Nieco inne koncepcje i rozwiązania konstrukcyjne polaryskopu z automatycznym odczytem danych podają prace m.in. [26] i [27]. W niektórych z nich wykorzystuje się dodatkowe efekty jak np. wprowadzenie pola magnetycznego podobnie jak w elastoptyce całkowej.

Inne optyczne metody badań

Wśród metod doświadczalnych, które w ostatniej dekadzie znalazły zastosowanie w mechanice ciała stałego **interferometria holograficzna** jest tą, która wykazuje największe tendencje rozwojowe. Stanowi ona niezwykle dokładne narzędzie badawcze wykorzystywane zarówno w elastoptyce holograficznej jak i do pomiaru przemieszczeń konstrukcji. Elastoptykę holograficzną opisano poprzednio, tak więc poniżej omówione zostaną ostatnie osiągnięcia interferometrii holograficznej w badaniach przemieszczeń, czy wprost kształtu konstrukcji.

Na początku należy wymienić prace, które mają na celu przystosowanie metody interferometrycznej do badania rzeczywistych konstrukcji. Okazuje się, że wysoka dokładność metody może być przeszkodą w badaniach przemieszczeń konstrukcji, zwłaszcza jeśli ba-

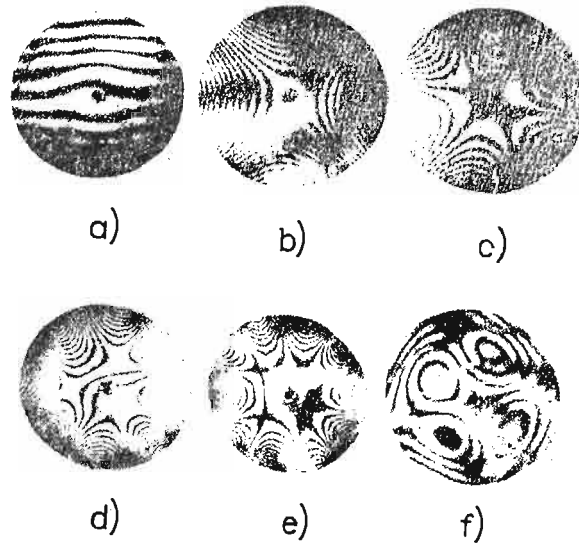


Rys. 7. Schemat układu do warstwicowania powierzchni rozpraszającej światło: L — laser, R — rozszerzacz wiązki, D — dzielnik wiązki, Z — zwierciadło, M — model w naczyniu z cieczą immersyjną, H — płyta holograficzna

dana powierzchnia rozprasza światło. Zastosowanie techniki immersyjnej pozwala wykonywać dwuwymiarowe mapy warstwicowe tego rodzaju powierzchni [28]. W badaniach tych użyto alkoholu etylowego oraz mieszaniny tego alkoholu z wodą jako cieczy immersyjnych. Odpowiedni dobór składu mieszaniny pozwala zmieniać odległość warstwic w granicach od ułamka milimetra do kilku milimetrów. Schemat układu holograficznego przedstawiono na rys. 7. Metoda immersyjna może być zastosowana zarówno do badania powierzchni rozpraszającej światło jak i do badania obiektów przezroczystych.

W ciągu kilku ostatnich lat interferometria holograficzna została z powodzeniem zastosowana do badania drgań tarcz wirujących o kształcie kołowym. Uzupełnienie układu interferometru o tzw. derotator, czyli urządzenie eliminujące na drodze optycznej obrót tarczy, pozwala otrzymać mapy warstwicowe powierzchni tarczy podczas drgań. Na rysunku 8 zaczerpniętym z pracy [24] przedstawiono hologramy obrazujące postacie drgań tarczy dla różnych prędkości obrotowych. W dalszym rozwinięciu [30] metoda ta pozwala przeprowadzić analizę drgań wirującej tarczy w czasie rzeczywistym przy użyciu lasera argonowego o działaniu ciągłym, zamiast jak poprzednio lasera impulsowego.

Niezależnie od rozwoju samej aparatury badawczej, obserwuje się dążność do uproszczenia procesu analizy wyników otrzymywanych metodą interferometryczną. Geometryczne podejście do analizy map warstwicowych przedstawia praca [31], natomiast w pracy [32]



Rys. 8. Hologramy przedstawiające postacie drgań tarczy dla różnych prędkości obrotowych: a) liczba obrotów $n = 4440$ obr/min., częstość drgań $f = 202$ Hz, b) $n = 2740$ obr/min., $f = 51$ Hz, c) $n = 2020$ obr/min., $f = 399$ Hz, d) $n = 7920$ obr/min., $f = 1155$ Hz, e) $n = 3910$ obr/min., $f = 1193$ Hz, f) $n = 4140$ obr/min., $f = 937$ Hz

zaproponowano metodę różniczkowania obrazów interferometrycznych w celu otrzymania wielkości występujących w mechanice konstrukcji. Prace tego rodzaju często prowadzą do opracowania nowych układów rekonstruujących hologram.

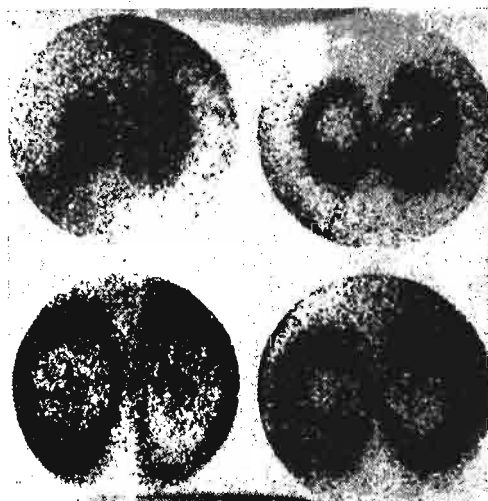
Próbie zbudowania dokładnego modelu matematycznego hologramu Fresnela podano w pracy [33]. Zastosowanie tego opisu może doprowadzić do optymalnego wykorzystania holografii jako metody badawczej.

Zastosowanie laserów jako źródła światła pozwoliło opracować jeszcze jedną metodę pomiarów odkształceń konstrukcji tzw. interferometrię plamkową. Wykorzystuje się w niej ziarnistą strukturę światła laserowego rozproszonego przez mikronierówności powierzchni badanego obiektu. Rejestracji obrazu dokonuje się drogą podwójnej ekspozycji na płytce o emulsji drobnoziarnistej. Tak zarejestrowany obraz interferencyjny podlega rekonstrukcji metodami polowymi lub punktowymi. Jeden z wariantów rekonstrukcji polowej umożliwiający pomiar składowych przemieszczenia liniowego lub kątownego punktów powierzchni badanego obiektu przedstawiono w pracy [34]. W pracy [35] podano teorię i praktykę rekonstrukcji punktowej obrazu plamkowego. Najważniejszą zaletą interferometrii plamkowej w stosunku do interferometrii holograficznej są zmniejszone wymagania w zakresie stabilności układu rejestrującego.

Możliwości interferometrii plamkowej są szerokie i jak się przewiduje [36] może ona znaleźć zastosowanie w następujących obszarach mechaniki doświadczalnej:

- analiza płaskiego stanu naprężeń
- badanie ugięć płyt
- analiza drgań
- analiza trójwymiarowego stanu naprężeń.

Na rysunku 9 przedstawiono dla ilustracji obrazy plamkowe propagacji linii stałych kątów ugięcia utwardzonej płyty kołowej poddanej obciążeniu udarowemu w środku. Rejestracji dokonano przy pomocy lasera impulsowego. Systematykę poszczególnych technik pomiarowych w interferometrii plamkowej wraz z przykładami zastosowań podano w opracowaniu PARKSA [37].



Rys. 9. Linie stałych kątów ugięcia płyty kołowej otrzymane metodą interferometrii plamkowej. [36]

Na zakończenie opisu współczesnych metod optycznych stosowanych w badaniach doświadczalnych należy wspomnieć o metodzie mory, w której co prawda nie obserwuje się nowości w sensie metodologicznym, ale dotychczasowe techniki są udoskonalane. W pierwszym rzędzie dotyczy to bardziej precyzyjnej analizy obrazów interferencyjnych w celu zwiększenia dokładności pomiarów i to zarówno obrazów zarejestrowanych fotograficznie jak i obserwowanych w czasie rzeczywistym. Podstawową jest technika filtracji przestrzennej [38], która pozwala podwyższyć wartość i jakość pomiarów.

Oddzielnym zagadnieniem jest obróbka danych doświadczalnych, a w szczególności różniczkowanie warstwicznych map morowych w celu uzyskania odkształceń. Z reguły stosuje się tu technikę komputerową. Niektórzy autorzy [39] wykorzystują metodę różnic skończonych. W ostatnim czasie rozpowszechniła się metoda funkcji sklepanych służąca do aproksymacji danych dyskretnych wziętych z map warstwicznych [40]. Przeprowadza się także próby wprowadzenia techniki telewizyjnej do różniczkowania map warstwicznych [41] na drodze elektronicznej analizy i przetwarzania obrazu.

Wśród wielu zastosowań metody mory należy wymienić analizę obciążonych dynamicznie płyt szklanych za pomocą techniki odbiciowej [42]. Rejestracji obrazów dokonano przy użyciu lampy błyskowej.

Metody badania naprężeń własnych

Z wielu technicznych problemów doświadczalnej analizy odkształceń i naprężeń w sposób szczególny wyróżniają się te, które wymagają zastosowania specyficznych metod po-

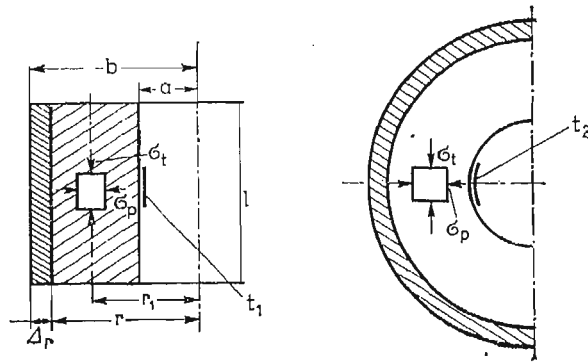
miaru, metod bazujących nieraz na sposobach mających bardziej uniwersalny charakter, ale również często stworzonych specjalnie do badania określonego zjawiska czy obiektu. Do problemów takich należy pomiar naprężeń własnych.

Zagadnienie pomiaru naprężeń własnych sprowadza się do określenia w dowolnym punkcie nieobciążonego ustroju wszystkich składowych tensora naprężeń. Zadanie to, rozwiązywane dla dowolnego materiału w sposób nieniszczący tylko na powierzchni, gdy konstrukcja jest obciążona znanym, zadaniem układem sił czy przemieszczeń, staje się wielokrotnie trudniejsze w sytuacji ustroju nieobciążonego, kiedy stany naprężeń są samorzównoważone w jego obszarze lub części jego obszaru. W ogólnym przypadku zadanie to jest do tej pory nierozwiązane.

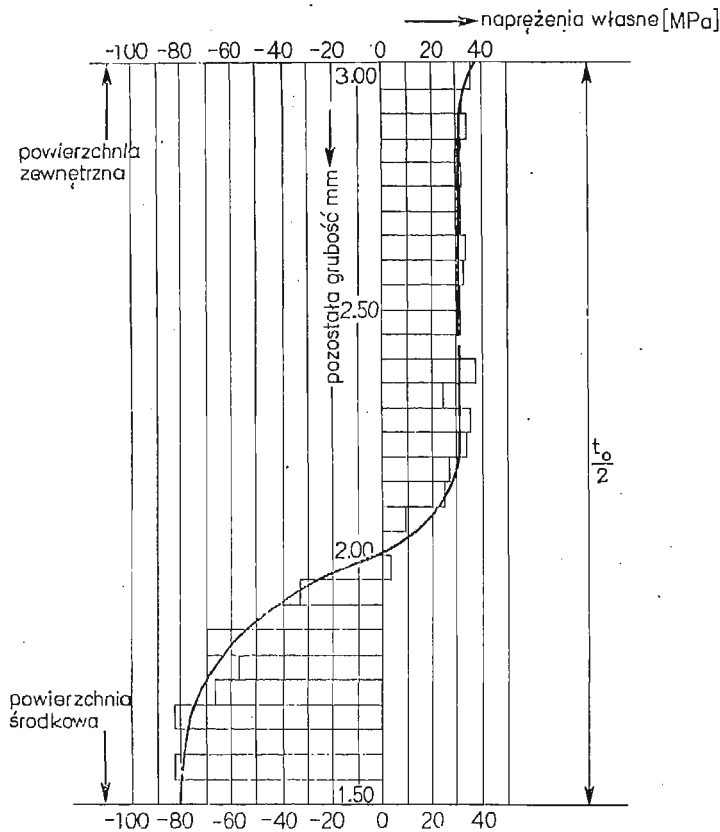
Istnieje bardzo wiele metod wyznaczania naprężeń własnych i różnie można je klasyfikować. Wspólną cechą niemal wszystkich jest fakt, że na ogół służą do oceny naprężeń własnych pierwszego rodzaju (makronaprężeń, które równoważą się w obszarach porównywalnych z wymiarami całego ciała). Tylko niektóre z nich (metody penetratora i promieni X) mogą być stosowane do pomiaru naprężeń drugiego rodzaju (mikronaprężeń równoważących się w objętościach o wymiarach rzędu kilku ziaren krystalicznych). Przyjmijemy tu klasyfikację najbardziej funkcjonalną z praktycznego punktu widzenia: ze względu na stopień zniszczenia ustroju, jaki wywołuje przeprowadzenie na nim badań naprężeń, wyróżniamy zatem:

- metody niszczące
- metody półniszczące
- metody nieniszczące.

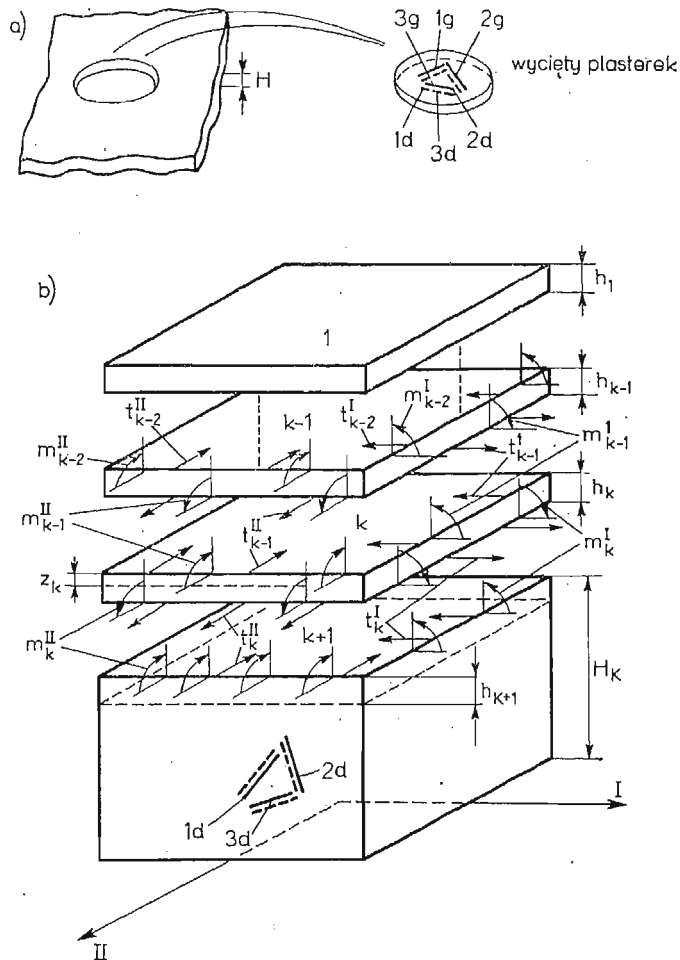
1. Metody niszczące. Są to takie metody, które zastosowane do określenia rozkładu naprężeń w danym obiekcie powodują jego całkowite zniszczenie. Metody te zawsze polegają na pomiarach odkształceń wywołanych odprężeniem badanego ustroju przez podzielenie go na elementy. Z odkształceń tych elementów określa się wielkość naprężeń własnych, które odkształcenia te spowodowały. Sytuacja ta jest źródłem pewnych ograniczeń i błędów przy ocenie ilościowej naprężeń, gdyż trzeba a priori założyć zależność między odkształceniami a naprężeniami. Zakładamy tu zwykle zależność liniową (prawo Hooke'a) dla ciał izotropowych lub ortotropowych. Gdy zmierzone odkształcenia są większe niż odpowiadające granicy plastyczności materiału, wtedy określenie rzeczywistych naprężeń w bardziej złożonych zagadnieniach, jest do tej pory praktycznie niemożliwe. Istotnym problemem jest także prawidłowość interpretacji mierzonych odkształceń, innymi słowy, droga obliczeniowa pozwalająca z pomiaru odkształceń uzyskać wartość naprężeń. Dlatego też zwykle, poszczególne metody niszczące stworzone zostały do badania obiektów o ściśle określonych kształtach i przy pewnych założeniach co do charakteru istniejącego w nich rozkładu naprężeń własnych. Pamiętać również należy, żeby otrzymać dostatecznie dokładne rozwiązanie musimy ciało dzielić na wystarczająco drobne elementy. Elementy te jednak powinny być na tyle duże, aby można było zmierzyć jakkolwiek bądź metodą ich odkształcenia i na tyle dostępne przed podziałem aby określić można było ich wymiary pierwotne jako bazę do pomiaru odkształceń. Ta sytuacja powoduje, że wielokrotnie (np. przy gwałtownych gradientach naprężeń własnych wywołanych obróbką powierzchniową) nie dzielimy obiektu badanego na elementy, lecz usuwamy cienkie (nieraz rzędu kilku setnych milimetra) warstwy materiału dokonując pomiaru odkształceń pozostałej części ustroju.



Rys. 10. Zasada pomiaru metodą Sachsa

Rys. 11. Rozkład naprężeń własnych w walcowanej blasze duraluminiowej uzyskany metodą Ståbleina
 $t_0/2 = 3 \text{ mm}$

Prawidłowe określenie rozkładu naprężeń własnych przy tej metodzie postępowania jest wielokrotnie trudniejsze. Zawsze natomiast, bardzo ważną sprawą jest takie prowadzenie obróbki odprężającej (podziału na elementy) by nie powodowała ona wprowadzenia dodatkowych stanów naprężeń własnych.



Rys. 12. Zasada metody miejscowej trepanacji: a) wycinanie plastra, b) oddziaływania między kolejno usuwanymi warstwami plastra

Niezależnie od wszystkich przytoczonych wad i ograniczeń, metody niszczące uważane są do tej pory za takie, dzięki którym można uzyskać najpełniejsze i najbardziej dokładne informacje — służą zatem częstokroć do weryfikacji innych metod pomiaru.

Wśród najważniejszych do tej pory rozwijanych metod niszczących wymienić należy:

a. Metoda SACHSA [43] pozwala ocenić jedynie osiowo-symetryczne, lub osiowo-anty-symetryczne rozkłady naprężeń w prętach okrągłych, grubościennych i cienkościennych rurach, drutach. Zasadę pomiaru pokazuje rys. 10. Tensometry elektryczne mierzą odkształcenia obwodowe i poosiowe spowodowane usuwaniem warstw zewnętrznych z powierzchni rury. Choć zasada metody powstała w 1927 r., rozwijana jest ona do dziś — wspomnieć tu można pracę z 1978 r. [44] dotyczącą pomiarów dla materiału ortotropowego.

b. Metoda STĄBLEINA [45] — określa się nią na ogół rozkłady jednoosiowych stanów naprężeń w elementach płaskich. Polega ona na usuwaniu warstw materiału z jednej strony

elementu i pomiarze odkształceń bądź zmiany krzywizny pozostałej części. Przebieg naprężeń w walcowanej blasze aluminiowej uzyskany tą metodą [46] pokazuje rys. 11.

c. Sposoby trepanacyjne — stosuje się do określenia dwu składowych głównych stanu naprężenia w ustrojach płaskich (płyty, tarcze spawane, cienkie odlewane ścianki) poprzez wycinanie z tych ustrojów niewielkich elementów (na ogół kołowych krążków) i pomiar ich odkształceń. Wspomnieć tu można o metodzie trepanacji miejscowej opracowanej w 1975 r. [47]. Polega ona (rys. 12a) na wycięciu kołowego plasterka z płaskiego elementu, pomiarze odkształceń na powierzchni górnej i dolnej spowodowanych tym zabiegiem, a następnie zdejmowaniu kolejnych warstw (rys. 12b) z wyciętego plasterka, mierząc przy pomocy 3 tensometrów odkształcenia pozostałej części ustroju. W rezultacie uzyskać można rozkład dwu składowych głównych naprężeń własnych wzdłuż grubości cienkich ścianek odlewów, płyt i innych ustrojów dwuwymiarowych w płaszczyznach równoległych do powierzchni. Trzecią składową główną (\perp do powierzchni) przyjmuje się za równą zeru.

2. Metody późniszczące. Za metody późniszczące uważać będziemy takie, które w trakcie pomiaru wywołują na tyle niewielkie uszkodzenie badanego ustroju, że po przeprowadzeniu naprawy, a niekiedy i bez niej, może on pracować nadal, zgodnie z jego pierwotnym przeznaczeniem. Metody późniszczące wykorzystują do oceny naprężeń własnych wielkość odkształceń w niewielkim obszarze elementu wywołanych przez taką, czy inną obróbkę odprężającą przeprowadzoną w tym obszarze.

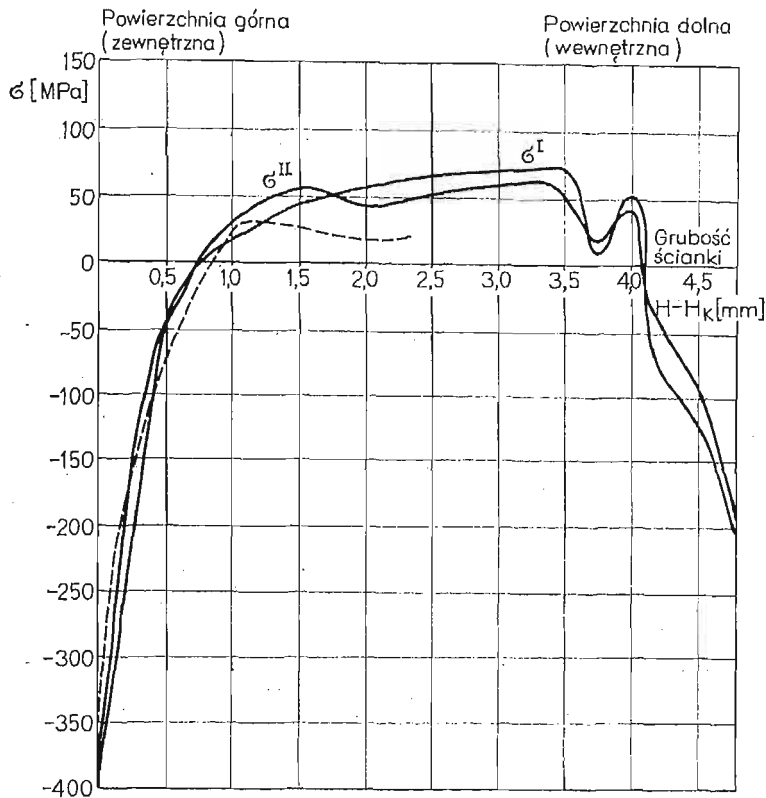
W zasadzie pomiarowej metod późniszczących występuje pewna teoretyczna nieścisłość. Otóż równania opisujące stan elementu czy konstrukcji w zakresie sprężystym są typu eliptycznego, rozkład naprężeń jest zatem określony przez warunki na całej powierzchni ustroju. Pomiar odkształceń wykonany w niewielkim obszarze w okolicy miejsca obróbki odprężającej nigdy nie może wystarczać do ścisłego określenia naprężeń nawet w tym obszarze. Jednak wg zasady de Saint-Venanta samorzównoważone stany naprężeń rozprzestrzeniają się w ciele sprężystym w bardzo ograniczony sposób i przy poprawnym zaprojektowaniu doświadczenia nieścisłość ta praktycznie nie ma większego wpływu na wyniki pomiaru. Istotniejszym problemem jest tu uzyskanie dokładnego pomiaru stosunkowo niewielkich zmian odkształceń i właściwa interpretacja uzyskanych rezultatów doświadczalnych, zważywszy iż czujniki pomiarowe umieszczone być mogą tylko na powierzchni obiektu. Wynikają stąd znaczne ograniczenia metod późniszczących. Służyć one mogą jedynie do określenia pewnych składowych stanu naprężenia na powierzchni ustroju bądź rozkładu na stosunkowo małej głębokości. Wymagają stosowania przyrządów bardzo czułych o geometrii ustalonej z wysoką dokładnością. Mają natomiast dwie niezaprzeczalne zalety:

— możliwość oceny naprężeń na małym obszarze — zatem zbliżenie się do punktowego pomiaru naprężeń,

— są na ogół metodami uniwersalnymi — możliwe jest przeprowadzenie satysfakcjonujących pomiarów na obiektach o dowolnych kształtach.

Obecnie, praktycznie stosuje się tylko jedną metodę późniszczącą: wiercenia małego otworu.

Jest to metoda (obok metody promieni X), której poświęcono i poświęca się aktualnie najwięcej prac i w praktyce stosowana jest najczęściej. Metoda wiercenia otworu ma bardzo długą historię. Zapoczątkowały ją badania Mathara [48] z r. 1934. Prace [49], [50], [51], [52] i inne dały podstawy do rozszerzenia możliwości pomiarowych metody. Jednakże



Rys. 13. Rozkład naprężeń własnych wzdłuż grubości ścianki karтеру silnika spalinowego odlanego z żeliwa określony metodami trepanacji miejscowej i wiercenia małego otworu: ——— metoda trepanacji miejscowej — — — — metoda wiercenia małego otworu

w swojej dotychczasowej formie metoda wiercenia otworu obarczona była bardzo znaczącym błędem. Błąd ten jest szczególnie duży przy ostrych gradientach naprężeń, a wtedy, gdy w zakresie pomiarowym naprężenia zmieniają swój znak może osiągać kilkaset procent. W pracach [53], [54], [55] przedstawiono metodę postępowania, pozwalającą uniknąć tego błędu i przeprowadzać badania bez żmudnych pomiarów kalibrujących dla dowolnego materiału i dowolnej geometrii otwór — czujniki pomiarowe. Na rysunku 13 pokazany jest rozkład naprężeń własnych w ściance korpusu silnika spalinowego uzyskany metodą wiercenia otworu [55] i metodą trepanacji miejscowej [47]. [Metoda jest szczególnie czuła na dokładność wykonania otworu i delikatność obróbki.] Najnowsze prace [56] wskazują, że obydwie wymagania najlepiej spełnia wiercenie wysokoobrotowym (do 40000 obr/min) frezem. Ten sposób obróbki wprowadza minimalne zgnioty oraz gwarantuje wysoką dokładność kształtu i wymiarów otworu.

3. Metody niéniszczące. Metody niéniszczące praktycznie nie naruszają struktury materiału badanego obiektu. Wśród nich są takie, które do określenia naprężeń wykorzystują pomiar odkształceń (np. metoda promieni X, czy pomiaru twardości) i takie, które wykorzystują zmianę pewnych fizycznych własności materiału na skutek istnienia w nim naprężeń (np. ultradźwiękowa i magnetyczna).

a. Metoda promieni X jest najstarszą i najszerzej stosowaną. Nie wdając się w dokładniejszy opis zasady badania, krótko tylko przypominamy, że głównym zadaniem metody jest skorelowanie odkształceń sieci krystalicznej z odkształceniami i naprężeniami ε , σ określonymi w teorii sprężystości ciała izotropowego. Tutaj też leży podstawowy błąd metody. Wynika on ze sprzeczności w samej zasadzie badania. Z jednej strony uważa się, że ciało jest opisane modelem continuum — jednorodne, izotropowe i podlegające prawu Hooke'a — z drugiej przeprowadza pomiar odkształceń sieci przestrzennej kryształu, który wykazuje bardzo znaczną anizotropię. W niektórych przypadkach wpływu tej anizotropii nie można wyeliminować dodatkowymi pomiarami pozwalającymi na określenie wielkości nowych stałych sprężystych materiału specjalnie dla potrzeb analizy rentgenowskiej. Stałe te zmieniają się silnie w procesie plastycznej deformacji, zmęczenia, obróbki chemicznej itp. Dodatkowym ograniczeniem metody jest bardzo niewielki zasięg jej penetracji w głąb materiału (rzędu mikronów).

Rekapitulując stwierdzić należy, że w szeregu wypadkach wyniki ilościowe badania metodą promieni X są bardzo wątpliwe, a niekiedy (np. utwardzania zgniotem) w ogóle nie daje ona rezultatów możliwych do interpretowania ilościowego. Niektóre prace np. [57] i [58] oceniają uzyskiwaną dokładność na ± 30 MPa w najbardziej sprzyjających okolicznościach pomiaru, na ± 240 MPa w najgorszych, przyjmując średnio ± 60 MPa.

b. Metoda magnetyczna

Najogólniej mówiąc wykorzystuje ona zjawisko magnetostrykcji, tzn. silnej zależności magnetycznych własności materiału (np. przenikliwość magnetycznej ferromagnetyków) od naprężeń wprowadzonych w ciało. W dotychczasowych pracach np. [59] udało się metodą tą przeprowadzić badania prętów kołowych o zmiennym rozkładzie naprężeń własnych wzdłuż promienia i stałym w kierunku osi pręta. Wykorzystywano tu osiowe pola magnetyczne o zmiennej częstotliwości i ekranizujące działanie powstających prądów wirowych w badanej próbce. Uzyskane wyniki mają bardziej charakter jakościowy niż ilościowy (tab. 1). Zwraca uwagę ogromna rozbieżność wyników metody promieni X i metody niszczącej.

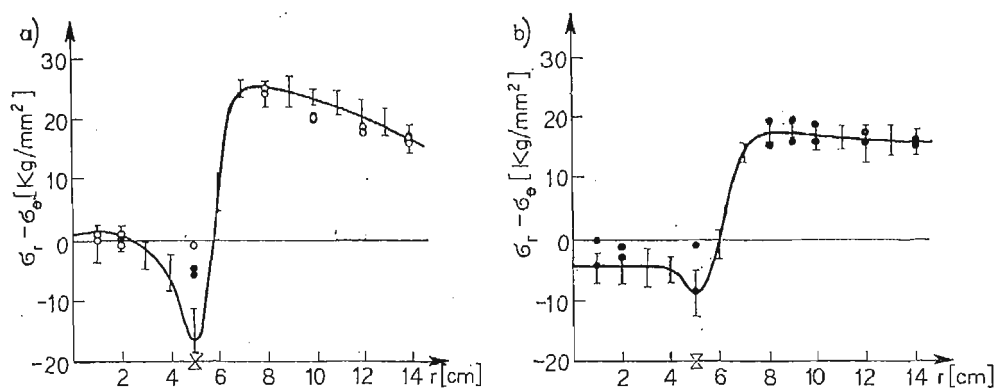
Tabela 1

Rodzaj materiału i obróbki	Naprężenia na powierzchni [MPa] określone metodą:		
	magnetyczną	promieniami X	mechaniczną niszczącą (przecinanie wzdłuż tworzącej)
nikiel ciągniony	12	45	250
nikiel hartowany	-48	-81	-220
stal po obróbce skrawaniem	9	-160	2
stal hartowana	-108	-130	-360

Najnowsze prace badaczy radzieckich np. [60] stwierdzają, że na efekt „magnetosprężysty” bardzo znaczny wpływ ma struktura metalu, a uzyskiwane rezultaty pomiarów naprężeń własnych porównywalne są jedynie dla obiektów poddanych takiej samej, bądź bardzo podobnej obróbce cieplnej, chemicznej itp. Autor cytowanej pracy mierzy dwie

składowe płaskiego stanu naprężenia na powierzchni elementów maszyn oraz — łącząc metodą magnetyczną z metodami niszczącymi — określa rozkłady naprężeń w wałach poprzez pomiary na powierzchni płaskich dysków wyciętych z tych wałów.

Duże możliwości badawcze daje wykorzystanie magnetycznego efektu Barkhausena. Skonstruowane urządzenia pomiarowe [61] pozwalają na określenie składowych płaskiego stanu naprężenia na powierzchni i pod powierzchnią metalu na niewielkich obszarach (o wymiarach kilku mm). Wyniki ilościowe można uzyskać jednakże tylko wtedy, gdy przyrząd przed każdym pomiarem cechowany jest przy pomocy próbki wykonanej z metalu o tej samej strukturze, tzn. poddanej tej samej obróbce cieplnej, chemicznej i powierzchniowej co badany obiekt. Brak odpowiednich danych w literaturze nie pozwala na ocenę dokładności tej metody badawczej.



Rys. 14. Rozkład naprężeń własnych w spawanych tarczach uzyskany metodą ultradźwiękową: a) tarcza wykonana z materiału walcowanego, b) tarcza wykonana z materiału wyżarzanego po walcowaniu
Znak: I — pomiary metodą ultradźwiękową, o — pomiary metodą niszczącą, ∇ — spoina

c. Metoda ultradźwiękowa — jest metodą bardzo młodą opierającą się na zjawisku, że prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych (w szczególności fali poprzecznej) w izotropowym materiale jest zależna od naprężeń w to ciało wprowadzonych. Prawo łączące prędkość rozchodzenia się drgań akustycznych z wielkością naprężeń jest tu podobne do prawa elastooptyki i uzależnia tę prędkość od różnicy naprężeń głównych w kierunkach prostopadłych do kierunku rozchodzenia się fali.

Wynika stąd szereg wad metody:

- trudności rozdzielenia naprężeń głównych,
- trudności badania płaskich hydrostatycznych stanów naprężeń gdzie oba naprężenia główne są sobie równe,
- badac można tylko równomierne rozkłady naprężeń własnych wzdłuż grubości próbki — zatem nie można określić rozkładu naprężeń w głąb materiału.

Jako przykład praktycznego zastosowania metody można podać rezultaty pracy [62].

Określono tam rozkład naprężeń własnych w płycie kołowej powstałej na skutek koncentrycznego wspawania w nią kołowego krążka. Na rys. 14 podana jest zmienność różnicy naprężeń promieniowych i obwodowych w funkcji promienia.

d. Metody wykorzystujące pomiar twardości:

Najogólniej mówiąc bazują na związku między twardością materiału a stanem naprężeń własnych w nim istniejących. Pozwalają określić raczej jakościowo niż ilościowo naprężenia własne na powierzchni obiektu, przy czym trudno jest tu ocenić głębokość penetracji, tzn. uściślić co właściwie praktycznie znaczy „na powierzchni”.

Znane są tu takie metody pomiaru jak:

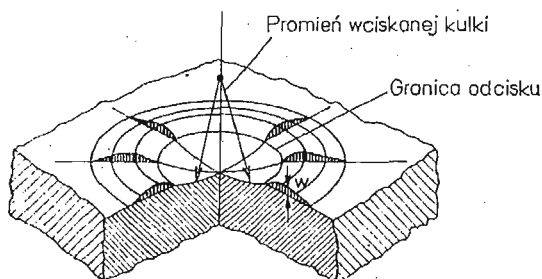
— badanie momentu pojawienia się pierwszych plastycznych odkształceń w procesie wciskania kulki. Nacisk odpowiadający pojawieniu się tych odkształceń okazuje się być liniową funkcją naprężeń własnych,

— metoda Oppla [63] polegająca na wciskaniu ostrosłupa Knoopa (przekrój w postaci bardzo wąskiego rombu). Mierząc długości 3 odcisków w 3 kierunkach można określić wielkości i kierunki naprężeń własnych głównych na powierzchni,

— metoda ZARKI i FRELATA [64] polegająca na wciskaniu kulek o różnych średnicach i pomiarze siły nacisków koniecznych do pojawienia się pierwszych odkształceń plastycznych. Według autorów metodą tą można pokusić się o określenie rozkładu naprężeń w głąb materiału.

Wspólną wadą wszystkich tych metod jest ich bardzo niska dokładność, którą ocenić można na ± 150 MPa, bądź nawet jeszcze gorzej.

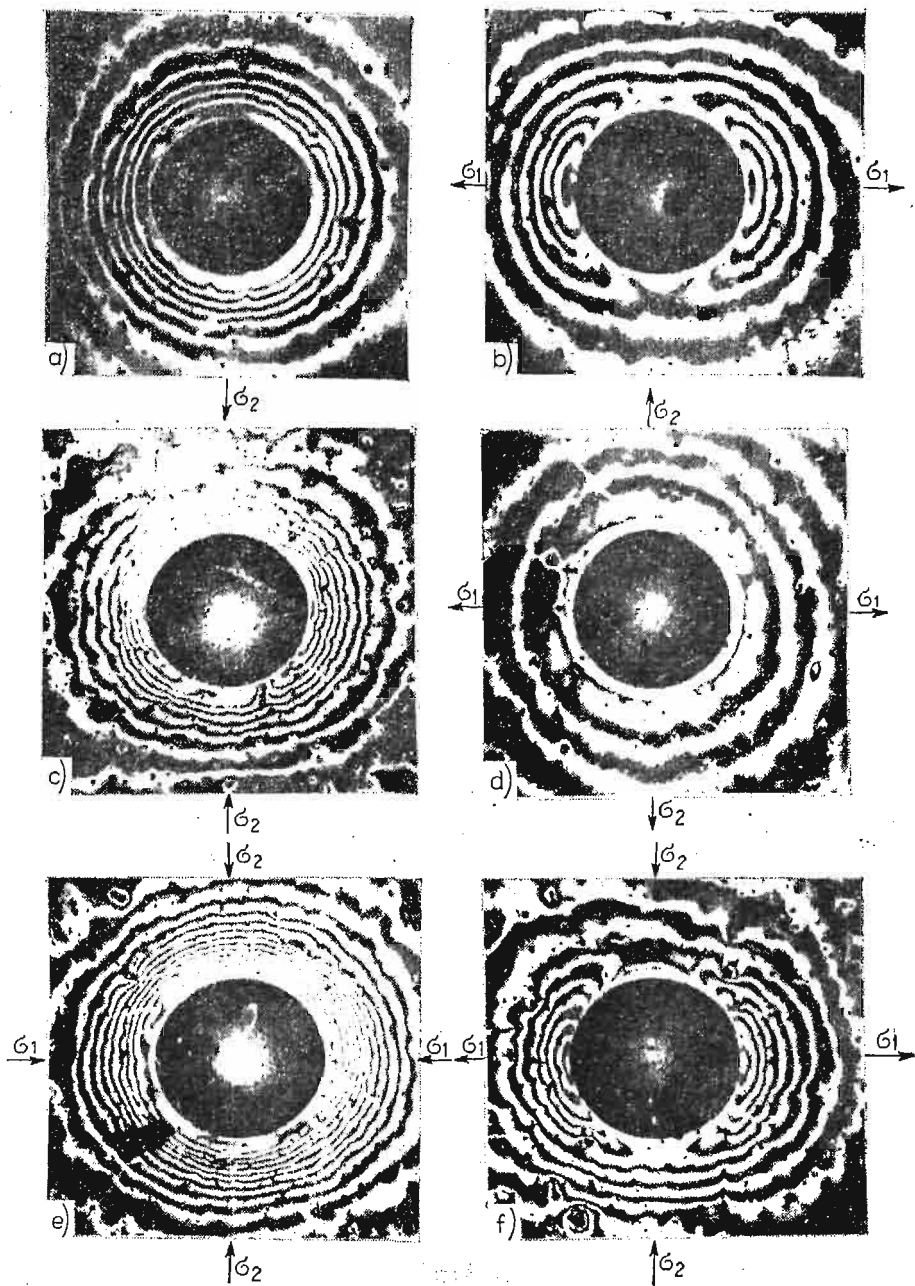
Na tym tle budzącą bardzo duże nadzieje wydaje się metoda penetratora, której pierwszy pomysł podał Underwood w r. 1973 [65], a szeroko została rozwinięta i doprowadzona do stanu przydatności technicznej w 1978 i 1979 r. w pracach [66], [67]. Punktem wyjścia tej metody jest zaobserwowany doświadczalnie fakt, że kształt powierzchni wokół plastycznego odcisku osiowo-symetrycznego stempla ulega zmianie jeżeli w badanym elemencie istnieją naprężenia. Gdy stemplem tym jest kulka, to jakościowy obraz przemieszczeń w otoczeniu odcisniętej przez nią czaszy pokazuje rys. 15. Obraz przemieszczeń określać można przy pomocy interferencji optycznej.



Rys. 15. Obraz przemieszczeń materiału w okolicy wciskanej kulki

Jak wykazały szerokie badania różnych materiałów z obrazu jednego odcisku uzyskać można 3 niezależne informacje wystarczające do określenia wielkości i kierunku naprężeń głównych na powierzchni obiektu.

Typowe obrazy warstwic dla różnych stanów naprężeń pokazuje rys. 16. Metodą tą można badać naprężenia własne na powierzchni materiałów o twardości w granicach $100\text{--}320 H_B$ z dokładnością ± 10 MPa. Dalsze prace trwają nad rozszerzeniem zakresu działania metody na materiały o wyższych twardościach, możliwości jej zastosowania do



Rys. 16. Warstwiczne obrazy przemieszczeń wokół odcisków kulki wykonanych w stali 30 HGSA ($H_B = 320$) dla różnych stanów naprężeń: a) stan bez naprężeń, b) jednoosiowe rozciąganie: $\sigma_1 = 304$ MPa, $\sigma_2 = 0$, c) jednoosiowe ściskanie: $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = -304$ MPa, d) płaskie hydrostatyczne rozciąganie: $\sigma_1 = 304$ MPa, $\sigma_2 = 304$ MPa, e) płaskie hydrostatyczne ściskanie: $\sigma_1 = -304$ MPa, $\sigma_2 = -304$ MPa, f) czyste ścinanie, $\sigma_1 = 260$ MPa, $\sigma_2 = -260$ MPa

badania gradientu naprężeń w głąb materiału. Istotną sprawą jest również ocena grubości warstwy materiału pod powierzchnią, w której działanie naprężeń określa kształt odczytu powierzchniowego.

Na zakończenie tego bardzo niepełnego i skrótowego omówienia podstawowych, stosowanych współcześnie metod badania naprężeń własnych wspomnieć należy o zasadnych i potrzebnych kierunkach dalszych eksploracji w tej dziedzinie. Wydaje się, że prace winny tu iść w kilku kierunkach:

— Stworzenia prostej i uniwersalnej metody nieniszczącej określania wielkości naprężeń własnych w warstwie powierzchniowej obiektu. Często stwierdzenie, że na powierzchni istnieją dostatecznie duże naprężenia ściskające daje gwarancję znacznie bezpieczniejszej pracy zmęczeniowej ustroju. Ogromne nadzieje rokuje tu bardzo już zaawansowana metoda penetratora.

— Opracowanie skutecznej metody badania naprężeń drugiego rodzaju w mikro-objętościach o wymiarze kilku ziaren krystalicznych. Możliwość przeprowadzenia takich badań dawałaby szansę bardziej głębokiego wnikięcia w zachowanie się materiałów w trakcie stałych — a co jest szczególnie istotne — zmiennych w czasie obciążeń.

— Udoskonalenia metod niszczących i półniszczących do badania rozkładu makro-naprężeń I-go rodzaju, a szczególnie najbardziej uniwersalnej z nich metody wiercenia małego otworu. Chodzi tu o to, by można było oceniać stany naprężenia również wtedy, gdy wielkość mierzonych odkształceń przekracza wartość odpowiadającą granicy plastyczności materiału.

— Stworzenia efektywnej nieniszczącej, chociażby tylko jakościowej, połowej metody oceny wielkości naprężeń własnych I-go rodzaju na powierzchni ustroju. Chodzi tu głównie o zlokalizowanie miejsc koncentracji, obszarów występowania naprężeń rozciągających itp. Dokładniejsze dalsze badania przeprowadzać można wtedy metodami punktowymi. Metody takiej do tej pory brak jest zupełnie.

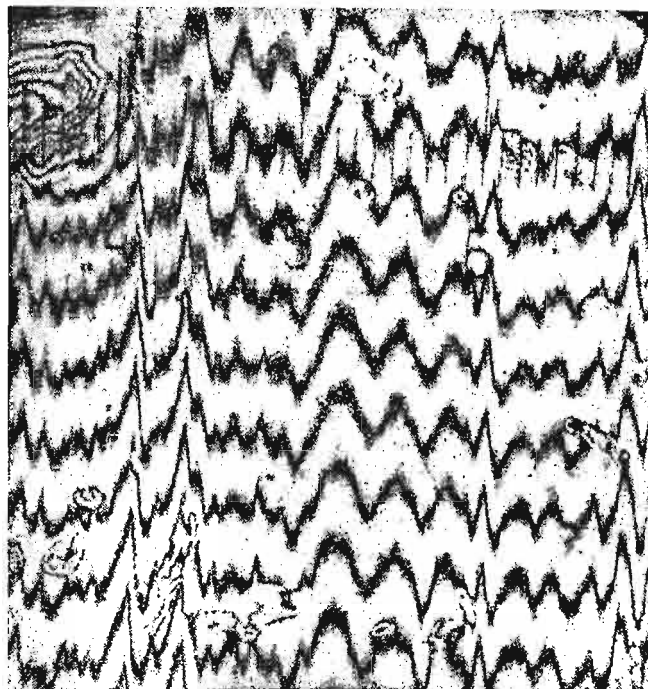
Metody badań w mechanice kontaktu

Problemy badawcze występujące w mechanice kontaktu podzielić można na kilka zasadniczych typów zagadnień, z których każdy wymaga innej techniki, bądź technik eksperymentalnych. Wykorzystywane są tutaj oczywiście możliwie szeroko metody doświadczalne stosowane generalnie w analizie naprężeń i odkształceń mechaniki ciała stałego, jednakże w wielu przypadkach muszą być one odpowiednio dostosowane i przebudowywane, by zmierzyć istotne, a specyficzne dla omawianej grupy problemów, zjawiska fizyczne.

1. Pomiar geometrii powierzchni. Kształt i mikrotopografia stykających się powierzchni ma zasadniczy wpływ na ich współpracę i pozwala wyznaczyć szereg parametrów trybologicznych bezpośrednio charakteryzujących „jakość” tej współpracy. Od dawna znanymi i szeroko stosowanymi w laboratoriach badawczych i przemysłowych metodami określania nierówności powierzchni są metody czujnikowo-kopiujące, które pozwalają uzyskiwać w dużych powiększeniach profilogramy powierzchni w wybranych przekrojach. Chociaż suma takich profilogramów wykonana z dostateczną gęstością może pozwolić na ocenę geometrii całej badanej powierzchni, nie można ich jednakże dokładnie złożyć w jedną

zwartą mapę topograficzną i trudno jest kontrolować zniszczenie czy zużycie określonych elementów powierzchni po pewnym czasie pracy.

Wad tych nie mają optyczne metody badania geometrii powierzchni, chociaż np. równie długo stosowana metoda interferencji optycznej daje obraz warstwic tylko na powierzchni odbijającej, bardzo zagęszczony i trudno czytelny (przy przypadkowym rozkładzie nierówności ocena gdzie jest „wzniesienie” a gdzie „zagłębienie” nie jest prosta do przeprowadzenia). Na tym tle niewątpliwą przewagę ma metoda immersyjna interferometrii holograficznej przedstawiona w pracy [68] z 1982 r. Uzyskiwane przy jej pomocy mapy warstwicowe



Rys. 17. Obraz topograficzny powierzchni szlifowanej (9 klasa gładkości) uzyskany metodą immersyjną interferometrii holograficznej

mogą być niejako trójwymiarowe znakomicie poprawiając czytelność obrazu, możliwa do regulowania jest gęstość warstwic (różnica wysokości między dwoma kolejnymi warstwicami). Pomiar przeprowadzony jest nie bezpośrednio na badanym obiekcie, lecz na przezroczystej replice wykonanej z gumy silikonowej, co pozwala na testowanie elementów powierzchni ustrojów o dowolnych wymiarach i kształtach. Typowy obraz topograficzny powierzchni uzyskany tą metodą pokazuje rys. 17.

2. **Obserwacja obszaru kontaktu przy obciążeniu roboczym.** Szereg metod, głównie optycznych, pozwala na bezpośrednie badanie obszaru kontaktu i zmian geometrii tego obszaru przy obciążeniach roboczych. Główną wadą (szczególnie metod optycznych) jest to, że jedna, bądź obie współpracujące powierzchnie muszą być przezroczyste. Pomiar ilościowy są tu obarczone dość znacznym błędem (30—40%) wynikającym z faktu, że obserwowana

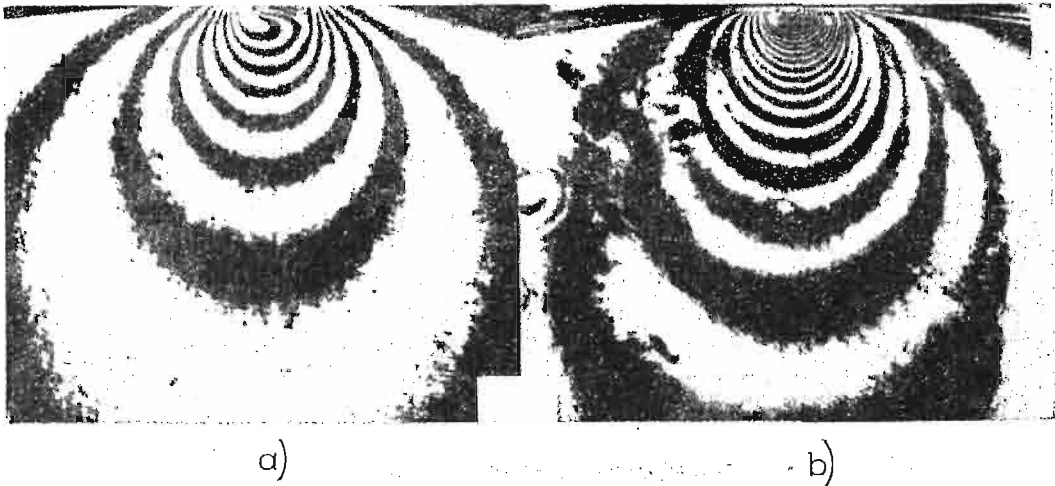
powierzchnia „optycznego” kontaktu może znacznie się różnić od rzeczywistej powierzchni kontaktu mechanicznego. Z ciekawszych metod wymienić tu należy:

— Metoda Mechau bazuje na zjawisku zniszczenia całkowitego wewnętrznego odbicia. Badana niegładka powierzchnia zostaje wprowadzona w kontakt z trójkątną szklaną pryzmą; równoległą wiązkę światła kieruje się na powierzchnię styku pryzmy pod takim kątem, by następowało całkowite wewnętrzne odbicie. W miejscach kontaktu całkowite odbicie zostaje „zniszczone” i obszary kontaktu stają się widoczne w odbitym świetle.

— Metoda interferencji w kontrastowym oświetleniu [69] polega na ujawnieniu konturów nierówności powierzchni (o równym kącie nachylenia) w świetle o różnych barwach. Po odkształceniu badanej niegładkiej powierzchni, na powierzchni płaskiej wszystkie obszary kontaktu leżące w jednej płaszczyźnie określone zostaną prążkami tej samej barwy. Wykonując kolorowe zdjęcia przez mikroskop określić można liczbę i wielkość uzyskanych pól kontaktu. Dokładność pomiaru głębokości nierówności oceniana jest tu na 15 \AA .

— Metoda wiązki neutronów [70] ma tę zaletę, że badanie kontaktu nie wymaga przezroczystości jednego lub obu stykających się ciał. Idea metody polega na przepuszczeniu równoległej wiązki neutronów prostopadle do współpracujących powierzchni. Wolna przestrzeń między powierzchniami wypełniona jest kompozycją pochłaniającą neutrony, tak że staje się dla nich nieprzepuszczalną poza obszarami rzeczywistego kontaktu. Wiązka neutronów po przejściu przez ciała stykające się pada na metalową płytę, która ją absorbuje emitując z kolei promieniowanie γ i β . Promieniowanie to naświetla odpowiednio błonę fotograficzną. Nie trzeba tu dodawać, że omówiona metoda może być zastosowana przy bardzo zaawansowanych możliwościach technicznych.

Niektórzy badacze określają nie tylko geometrię kontaktu przy obciążeniu roboczym lecz starają się znaleźć rozkład obciążeń wynikający z nierówności powierzchni wchodzących w kontakt. Angażuje się w tym celu różne metody; przykładem połączenia elastooptyki i holografii jest praca [71]. Pokazane na rys. 18 obrazy izochrom (różnica naprężeń,

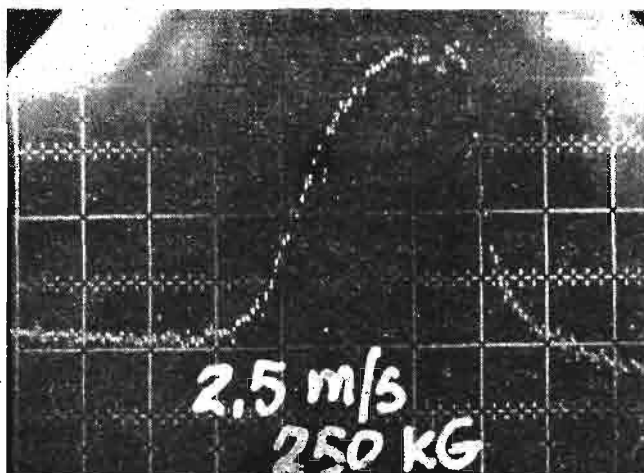


Rys. 18. Obrazy izochrom (a) i izopach (b) w okolicy styku chropowatej powierzchni walca i półprzestrzeni sprężystej. Walec wykonany jest z materiału przezroczystego wykazującego efekt dwójłomności wymuszonej

głównych) i izopach (suma naprężeń głównych) w okolicy styku chropowatych powierzchni walca i półprzestrzeni sprężystej pozwalają na ocenę rozkładu naprężeń i określenie stąd zaburzeń Hertzowskiej dystrybucji obciążenia między dwoma ciałami.

3. Dynamiczne i hydrodynamiczne problemy kontaktu. Badania dynamicznego, a szczególnie hydrodynamicznego kontaktu (gdy stykające się ciała podzielone są warstewką oleju smarującego) muszą uwzględniać szereg dodatkowych zjawisk, które wykraczają znacznie poza — szeroko nawet przyjętą — dziedzinę mechaniki ciała stałego. Pomiary takich wielkości jak temperatura oleju i kontaktujących się powierzchni, grubość warstwy filmu olejowego między poruszającymi się ciałami, ciśnienie w warstwie oleju, wymagają konstruowania bardzo specjalnych przyrządów, zważywszy dodatkowo, że wprowadzone one być muszą w niewielkie obszary kontaktów w taki sposób, by nie zaburzać kształtu powierzchni i warunków przepływu oleju. Badacze mają tu zatem do wyboru dwie drogi: albo miniaturyzacji ustrojów pomiarowych, albo wykorzystywania samych poruszających się względem siebie ciał jako nadajników odpowiednich informacji.

Przykładem pierwszego podejścia może być praca [72], gdzie zastosowano mikrodedektor podający sygnał do pomiaru temperatury o wymiarach elementu wprowadzanego w obszar kontaktu rzędu $38 \mu\text{m}$ bądź praca [73], w której do pomiaru ciśnienia w warstwie oleju użyto czujnika o szerokości rzędu $0,01 \text{ mm}$ i grubości kilkunastu \AA . Rozkład ciśnienia w obszarze styku dwóch walców uzyskany na ekranie oscyloskopu przy pomocy tego czujnika pokazuje rys. 19.



Rys. 19. Oscylogram rozkładu ciśnienia oleju w obszarze dynamicznego kontaktu dwóch walców metalowych uzyskany przy pomocy zminiaturyzowanego czujnika rezystancyjnego. Prędkość obwodowa walców $v = 2,5 \text{ m/sek.}$, nacisk $P = 250 \text{ kG}$

Drugie podejście najpełniej wykorzystane zostało w pracach [74], [75], gdzie jedno z wchodzących w kontakt dynamiczny ciał (płaski walec) wykonane zostało z materiału przezroczystego wykazującego efekt dwójłomności wymuszonej, a pomiar ciśnienia w warstwie oleju uzyskiwano określając rozkłady izochrom w spolaryzowanej kołowo wiązce światła przechodzącego przez ten walec.

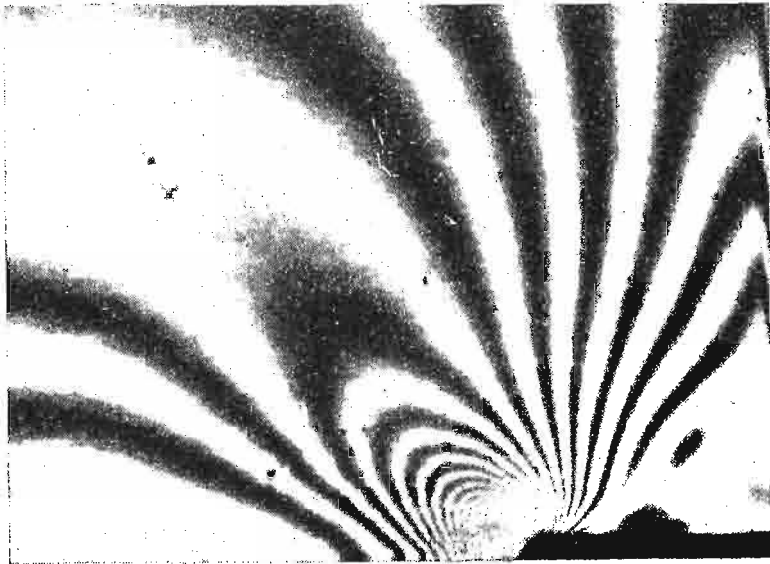
Inne drogi badawcze hydrodynamicznych zagadnień kontaktu polegają na określaniu użycia powierzchni współpracujących elementów. Badania takie przeprowadza się bądź poprzez analizę ilości i wielkości ubytków materiału zawartych w kolejno pobieranych próbkach oleju smarującego (stosuje się tu techniki ferrograficzne w polu magnetycznym i spektrograficzne np. [76]), bądź bezpośrednio obserwując pod mikroskopem stan powierzchni pozostających w kontakcie po kolejnych etapach pracy.

Metody badań zagadnień plastyczności

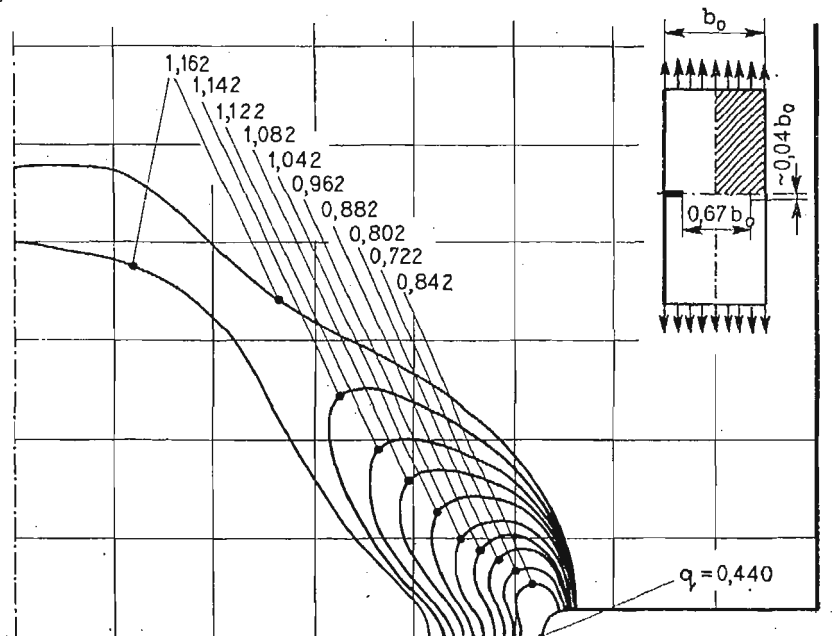
Badania doświadczalne dotyczące zachowania się materiału i elementów konstrukcyjnych po przekroczeniu (choćby miejscowym) granicy plastyczności nabierają w ostatnim okresie coraz większego znaczenia. Jest to wywołane tendencją do rewizji dotychczasowych zasad nie dopuszczających występowania odkształceń plastycznych w żadnym punkcie konstrukcji. Obecnie uważa się, że odkształcenia plastyczne w elementach konstrukcji mogą się pojawić pod warunkiem, że zasięg ich jest ograniczony i ściśle określony. Problemy pracy konstrukcji w zakresie sprężysto-plastycznym nie są jak dotychczas opracowane teoretycznie, a proponowane modele matematyczne dalekie są od ideału. Również metody projektowania oparte na teorii nośności granicznej operując pewnym końcowym stanem pracy konstrukcji nie uwzględniają stadiów pośrednich. Wydaje się, że badania doświadczalne mogą tu dać nie tylko informacje potrzebne do zbudowania modelu matematycznego, ale także mają za zadanie weryfikację rozwiązań teoretycznych. Tego rodzaju podejście proponowane jest w pracy [77], w której autor podaje tzw. **hybrydową metodę analizy konstrukcji** na przykładzie płyty kołowej obciążonej siłą skupioną i opartej na podłożu plastycznym, lub pręta obciążonego siłą i leżącego na podłożu nieskończenie sztywnym. Taka **filozofia modelowania** może dać wyniki pod warunkiem istnienia efektywnych metod doświadczalnych, przy pomocy których można analizować problemy plastyczności nie tylko w zakresie badań materiałowych, ale także badań konkretnych elementów konstrukcji.

W badaniach procesu uplastycznienia elementów konstrukcyjnych można wyróżnić dwa zasadnicze kierunki. Pierwszym z nich jest badanie rzeczywistych elementów konstrukcyjnych metodami tradycyjnymi. Wykorzystywane tu metody ograniczają zakres badań do elementów płaskich, lub na zewnętrznych powierzchniach elementów przestrzennych. Znajduje tu przede wszystkim zastosowanie metoda elastooptycznej warstwy powierzchniowej [78], która pozwala wyznaczyć zasięg obszarów uplastycznionych, a także umożliwia analizę rozwoju tych obszarów przy kolejnych cyklach obciążenia powtarzalnego (tzw. przystosowanie się konstrukcji). Istotną trudność stanowi tu rozdzielenie odkształceń w obszarze uplastycznionym. Na rys. 20 przedstawiono przykładowo obraz izochrom i rozwój stref plastycznych w rozciągającym paśmie z karbem szczelinowym.

Wykonane zostały próby zastosowania termowizji do badania stref plastycznych [79]. W technice tej, wykorzystującej promieniowanie podczerwone dokonuje się pomiaru zmiany rozkładu temperatury w badanym obszarze. Większy przyrost temperatury odpowiada większym wartościom odkształcenia plastycznego. Wydaje się, że efektywną metodą pomiarów odkształceń plastycznych jest metoda mory, ponieważ jest metodą bezstykową i nie powoduje zmiany sztywności badanego elementu jak to ma miejsce w metodzie elasto-

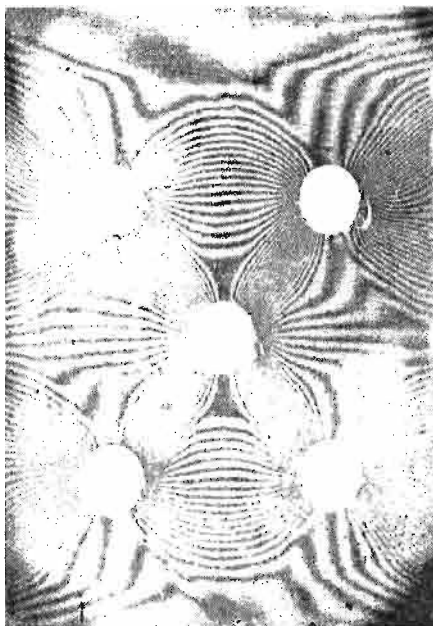


a)



Rys. 20. Analiza sprężysto-plastyczna rozciąganego pasma z karbem szczelinowym: a) obraz izochrom dla poziomego obciążenia $q = 1,102$, b) propagacja granicy obszaru plastycznego

optycznej warstwy powierzchniowej. Przy użyciu metody mory przeprowadzo analizę stref plastycznych w rozciąganych pasmach z otworami [80]. Na rys. 21 pokazano otrzymane tą metodą obrazy prążków mory. Okazuje się, że metodę mory można zastosować również do analizy płynięcia materiału w procesach obróbki plastycznej. Pomiaru dokonuje się na wewnętrznych powierzchniach badanych próbek [81].



Rys. 21. Strefy dużych odkształceń plastycznych otrzymane przy pomocy badań metodą mory

Do badania zagadnień sprężysto-plastycznych wykorzystywane są również tensometry elektryczne. Pewną trudność nastręcza tu obliczanie naprężeń z pomiarów tensometrycznych. W pracy [82] podano metodę rozwiązania tego zagadnienia na podstawie znajomości krzywej naprężenie — odkształcenie dla badanego materiału otrzymanej w próbie jednoosiowego rozciągania.

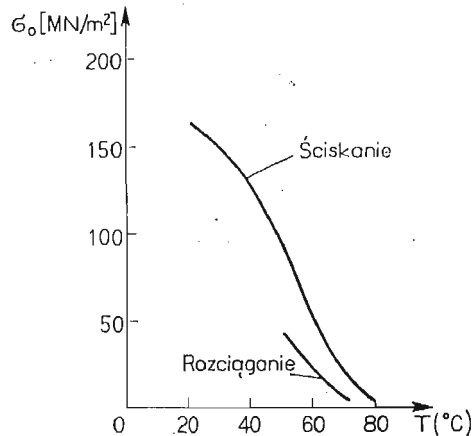
Interesującą próbę zastosowania kolejnych rozwiązań sprężystych do badania ośrodka plastycznego metodą elastooptyczną przedstawiono w pracy [83].

Opisane dotychczas metody stosowane są do badań konstrukcji. Od dłuższego czasu prowadzi się prace zmierzające do modelowania zagadnień plastyczności przez dobór odpowiednich optycznie czynnych materiałów na modele. Ta dziedzina badań nosi nazwę **fotoplastyczności**. Materiał modelowy musi zachowywać się podobnie jak materiał rzeczywistej konstrukcji, a w szczególności powinien spełniać następujące kryteria:

- podobny charakter przebiegu krzywej $\sigma - \varepsilon$ dla materiału modelowego i materiału konstrukcji,
- identyczne kryteria płynięcia,
- jednakowe współczynniki Poissona zarówno w zakresie sprężystym jak i plastycznym,

Spełnienie wszystkich tych warunków jest bardzo trudne. Tak się składa, że stosowane materiały spełniają tylko niektóre kryteria w mniejszym lub większym stopniu. Materiałem, który stosunkowo dobrze odpowiada zachowaniu się metali jest poliwęglan. W badaniach nad tym materiałem [84] [85] wykazano, że poliwęglan spełnia dość dobrze kryteria podobieństwa krzywych rozciągania, liczby Poissona ($\nu = 0,32$) oraz z dużą dokładnością kryterium płynięcia Hubera-Misesa. Jednakże, jak podano [86] zależność efektu optycznego od odkształceń jest nieliniowa, co stwarza trudności w interpretacji wyników.

Jeden z twórców fotoplastyczności — Javornicky uważa jednak, że materiały polikrystaliczne w zakresie dużych odkształceń mogą okazać się nieprzydatne [87]. Preferuje on jako materiał modelowy celuloid.



Rys. 22. Zmiana granicy plastyczności w funkcji temperatury dla twardej żywicy poliestrowej

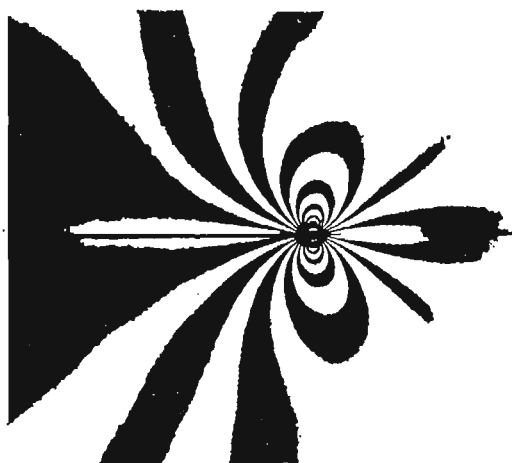
Interesujące wyniki dotyczące spełnienia kryterium płynięcia dla materiałów modelowych stosowanych w fotoplastyczności zamieszczono w pracy [88]. Ważnym wnioskiem jest to, że dla materiałów typu poliestrów zachowanie się w zakresie plastycznym zmienne jest z temperaturą w dużych granicach, co przykładowo przedstawiono na rys. 22.

Jak wynika z powyższych uwag problem znalezienia materiałów do badań fotoplastyczności nie jest jeszcze całkowicie rozwiązany. Pomimo to uzyskano już szereg wartościowych wyników [89], które można podzielić na trzy grupy:

- badania koncentracji naprężeń
- badanie procesów obróbki plastycznej
- badanie podstaw mechaniki zniszczenia.

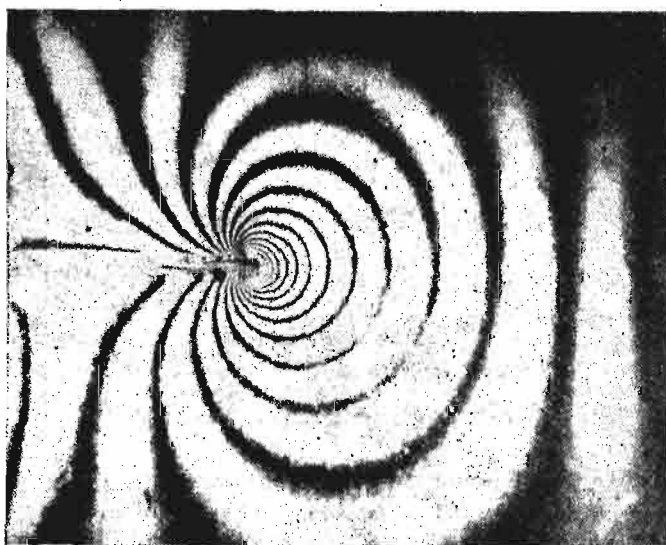
Metody badań w mechanice pękania

Gwałtowny rozwój badań teoretycznych z zakresu mechaniki pękania w ostatnim dziesięcioleciu wywołał pilną potrzebę znalezienia odpowiednich metod doświadczalnych, które pozwoliłyby z jednej strony weryfikować wyniki teorii, z drugiej — ujawniać nowe fakty fizyczne tak o charakterze bardziej generalnym jak i wynikającym z własności poszczególnych materiałów.



Rys. 23. Typowy rozkład izochrom wokół szczeliny rozprzestrzeniającej się w materiale przezroczystym

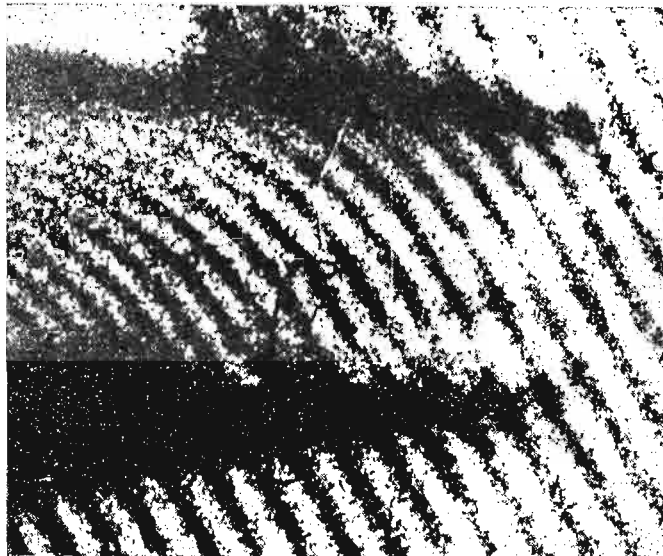
Rozważane w mechanice pękania zadanie określenia warunków i sposobu dynamicznej propagacji szczeliny, bądź układu kilku szczelin w pewnym zadanym polu naprężeń jest trudne do eksperymentalnej eksploracji: badany obszar jest stosunkowo niewielki, a najbardziej interesująca, mała jego część — w okolicy czoła szczeliny — jest polem bardzo wysokiej koncentracji naprężeń, która wywołuje plastyczne poślizgi. Dodatkowym oczywiście utrudnieniem jest dynamiczny charakter procesu inicjacji i rozbudowywania się szczeliny. Mimo tych specyficznych wymagań jednakże, mechanika pękania nie stworzyła nowych metod badawczych, lecz do przeprowadzenia eksperymentu głównie zaangażowała metody ogólnie stosowane w mechanice ciała stałego adoptując je co najwyżej do swoich



Rys. 24. Typowy rozkład izopach wokół szczeliny rozprzestrzeniającej się w materiale przezroczystym uzyskany metodą interferometrii holograficznej

potrzeb. Są one bądź od dawna znane, bądź zostały szerzej omówione w pierwszych częściach tego opracowania; w tym miejscu zatem ograniczymy się do krótkiego ich wyliczenia.

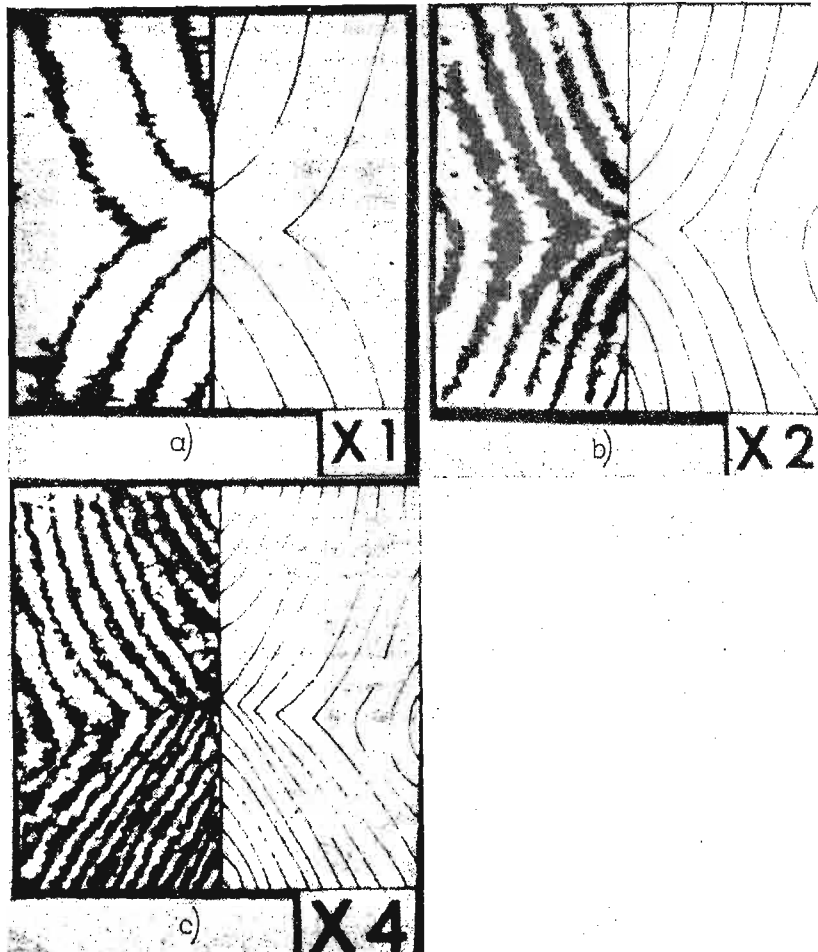
Metodę elastoptyczną do badania zadań płaskich zastosowano tu najwcześniej bo już w 1953 r. [90]. Szereg badaczy (np. [91]) stosuje ją z powodzeniem do dnia dzisiejszego przy statycznych i dynamicznych problemach pęknięcia, określając koncentrację naprężeń w okolicy czoła szczeliny zarówno w modelach przezroczystych przy świetle przechodzącym jak i w ustrojach rzeczywistych przy użyciu pokryć optycznie czynnych. Wadą pierwszego wariantu jest modelowy charakter eksperymentu, drugiego wszystkie znane i szeroko w literaturze dyskutowane błędy wynikające ze skończonej grubości pokrycia (szczególnie duże przy eksploracji małych pól o dużych gradientach naprężeń), wadą obydwóch — mała dokładność pomiaru w obszarze czoła szczeliny. Typowy rozkład izochrom wokół szczeliny pokazany jest na rys. 23.



Rys. 25. Układ prążków interferencyjnych wokół mikropęknięcia w ceramicznej łopatkce turbiny uzyskany metodą holograficznej mikroskopii

Metody holograficzne stosowane również do zagadnień płaskich prowadzą do określenia rozkładu izopach (sumy naprężeń głównych) wokół szczeliny w modelu przezroczystym, bądź przemieszczeń normalnych do powierzchni ustroju rzeczywistego. Użycie zamiast zwykłego systemu holograficznego metod holograficznej mikroskopii [92] pozwala na badanie mikropęknięć. Typowy rozkład izopach pokazany jest na rys. 24, układ prążków interferencyjnych uzyskany za pomocą mikroskopu holograficznego w okolicy pęknięcia ceramicznej łopatki turbiny (łopatka poddana zginaniu we własnej płaszczyźnie) na rys. 25.

Znaczne zwiększenie dokładności odczytu w bliskości czoła szczeliny uzyskać można przez multiplikację prążków holograficznych [93] uzyskując „zagęszczony” obraz przemieszczeń zarówno w płaszczyźnie, jak i w kierunku normalnym do płaszczyzny badanego obiektu. Rezultat takiej multiplikacji pokazany jest na rys. 26.



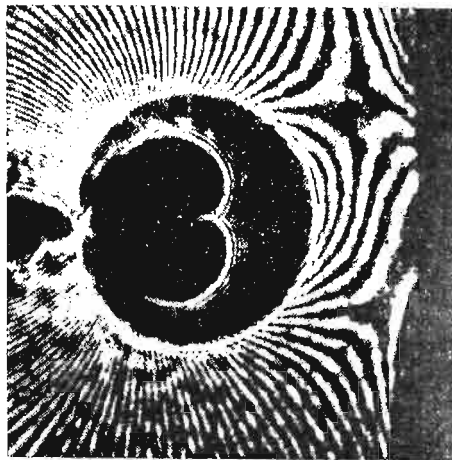
Rys. 26. Obrazy uzyskane na drodze kolejnych multiplikacji prążków holograficznych. Przesunięcia mierzone w płaszczyźnie obiektu: a) bez multiplikacji, b) dwukrotna multiplikacja, c) czterokrotna multiplikacja

Metoda mory — używana jest rzadko [94] ze względu na stosunkowo małą dokładność i słabą czytelność w małych obszarach jedynie jako uzupełnienie innych metod np. elastooptycznej.

Metoda fotografii plamkowej zastosowana została po raz pierwszy do badań w mechanice pękania w pracach autorów polskich [95], [96]. Pomiar połowy uzyskany tą metodą tzw. spektogramy, będące obrazem prążków o stałych normalnych (do obserwowanej powierzchni) składowych przemieszczeń (izotety) jest mało precyzyjny, źle czytelny i służyć może do orientacyjnego określenia np. pasm poślizgu w okolicy szczeliny. Znacznie lepsze rezultaty uzyskać można metodą punktową, która pozwala na rejestrację przemieszczeń od rzędu ułamków mikrometra do kilkuset mikrometrów, w zależności od sposobu ustawienia układu optycznego. Uchwycenie punktów o największych przemieszczeniach, jak również

uzyskanie pełnej mapy przemieszczeń nie jest jednakże operacją prostą i dającą się uwieńczyć w pełni satysfakcjonującym rezultatem.

Metoda kaustyk zaproponowana po raz pierwszy przez Manogga w 1966 [97], rozwinięta i szeroko rozpropagowana przez Theocarisa w wielu jego pracach (np. [98]), jest niewątpliwie jedną z najprostszych w realizacji, a jednocześnie najbardziej eleganckich i efektywnych optycznych metod określania współczynników intensywności naprężeń w mechanice pękania, jak również uzyskiwania rozwiązań szeregu płaskich zagadnień w obszarze gwałtownych koncentracji naprężeń. Niewątpliwym ograniczeniem metody jest fakt, że stosować ją można jedynie do badań modelowych na przezroczystych, mechanicznie i optycznie izotropowych (w zakresie sprężystym) materiałach. Co do dokładności metody zdania są podzielone. Główny jej twórca (P. S. Theocaris) uważa ją za wyraźnie lepszą, efektywniejszą i dokładniejszą od wszystkich pozostałych optycznych metod pomiaru, inni natomiast badacze np. [99] określają ją jako — w zagadnieniach mechaniki pękania — stosunkowo mało dokładną. Autorzy niniejszego opracowania nie czują się uprawnieni do pełnienia roli arbitrów w tym sporze.



Rys. 27. Kaustyka wokół czoła szczeliny rozprzestrzeniającej się w próbce plexiglasowej

Typowa efektowna kaustyka w okolicy czoła szczeliny uformowanej w próbce plexiglasowej pokazana jest na rys. 27.

Metoda emisji akustycznej wykorzystuje zjawisko szumów indukowanych w materiałach przez fale naprężeń powstające w efekcie propagacji pęknięcia. Szумы te, których częstotliwość zależy od prędkości propagacji dadzą się zarejestrować przy pomocy specjalnych detektorów (np. piezoelektrycznych). Metodę tą, używaną do badania poślizgów plastycznych zastosowano w ostatnich latach (np. [100], [101]), ze znacznie lepszym efektem w mechanice pękania do określania całki Reissa; amplituda szumów wywołanych propagacją szczeliny jest — jak twierdzą autorzy wspomnianych prac — trzykrotnie większa niż rejestrowana podczas poślizgów.

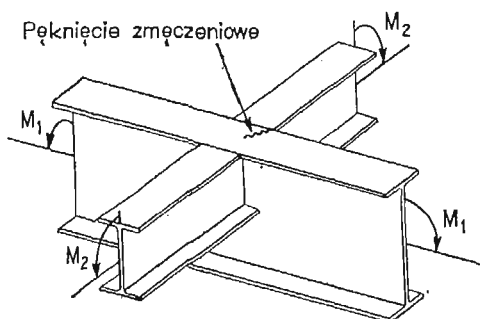
Metody termowizji stosowane są w mechanice pękania tak jak i w innych działach analizy naprężeń i odkształceń raczej sporadycznie i bardziej w sensie jakościowym niż ilościowym. Badać nimi można głównie procesy zachodzące w materiale w trakcie szybkich

deformacji lub przy obciążeniach cyklicznych. Pewne, uzyskane eksperymentalnie zależności między deformacją a temperaturą w trakcie rozprzestrzeniania się szczeliny przytacza praca [102].

Metody badań zmęczeniowych

Badania zjawisk zmęczeniowych przeprowadzone w ostatnich latach przechodzą pewną ewolucję. Polega ona głównie na powiązaniu badań konwencjonalnych z analizą procesu propagacji pęknięć zmęczeniowych. W związku z tym koniecznym staje się wprowadzenie takich technik pomiarowych, które pozwolą obserwować i rejestrować proces pęknięcia. Znalazły tu jak dotychczas zastosowanie metody interferometryczne, tensometria oporowa, rentgenograficzne, metoda mory i inne.

Ciekawą propozycją obserwacji pęknięć zmęczeniowych jest metoda stereoskopowa [103]. Opiera się ona na analizie w układzie stereoskopowym dwóch fotografii szczeliny wykonanych przy różnych poziomach obciążenia. Dane uzyskane tą drogą są wprowadzone do komputera, którego programy pozwalają wyznaczyć odkształcenia w badanym obszarze, a także zasięg strefy uplastycznionej.



Rys. 28. Model węzła, na którym badano wpływ dwuwymiarowego stanu naprężeń na proces pęknięcia zmęczeniowego

Osobną dziedziną badań zmęczeniowych, w której ostatnio dokonuje się znaczący postęp są badania elementów konstrukcji. Badania materiałowe są niewystarczające do określenia trwałości zaprojektowanego rozwiązania konstrukcyjnego. Przeprowadza się więc badanie węzłów lub elementów konstrukcji. Z natury rzeczy stanowiska badawcze i technika pomiaru jest do każdego przypadku dostosowywana indywidualnie. Z prac tego rodzaju przykładowo można wymienić pracę dotyczącą badania zmęczeniowego łopatek turbin [104]. W badaniach tych wykorzystano zjawisko rezonansu mechanicznego do wywołania giętych drgań łopatek. Inny rodzaj maszyny rezonansowej do badania elementów konstrukcyjnych opisany jest w pracy [105]. Układ obciążający posiada napęd pneumatyczno-elektryczny.

Interesująca praca [106] dotyczy wpływu dwuosiowego stanu naprężenia na propagację pęknięcia zmęczeniowego. Badaniu podlegały węzły ram o przekroju dwuteowym (rys. 28). Stwierdzono, że dwuosiowy stan naprężeń obniża prędkość pęknięcia zmęczeniowego, lecz

wpływ ten jest niewielki. Wyniki podobnych badań węzłów pojazdów szynowych przedstawiono w pracy [107]. We wnioskach z tych badań stwierdza się, że badania zmęczeniowe węzłów konstrukcyjnych powinny być przeprowadzone przy takim widmie obciążenia, jakie występuje w rzeczywistości. Tylko takie badania mogą dać wiarygodną informację o trwałości zmęczeniowej.

Jeśli chodzi o zmęczeniowe badania materiałowe to obserwuje się w tej dziedzinie rozwój badań przy małej liczbie cykli. Wyniki w tym zakresie odbiegają od wyników przy zmęczeniu wysokocyklowym, głównie ze względu na występowanie większych odkształceń plastycznych. Prace z tego zakresu [108] [109] mają na celu ustalenie takich wymagań dotyczących obróbki plastycznej, cieplnej czy powierzchniowej, aby podwyższyć trwałość przy zmęczeniu niskocyklowym.

* * *

Przedstawione opracowanie pokazało — w sposób na pewno niepełny i skrótowy — główne kierunki rozwoju metod doświadczalnych w mechanice ciała stałego. Ciągły wzrost liczby stosowanych metod, podnoszenie jakości i techniki eksperymentu jest wynikiem istniejącego i chyba ciągle zwiększającego się zapotrzebowania przemysłu na ten typ badań.

Literatura cytowana w tekście

1. T. FEKETE, *Optical Stress Analysis of the Surrounding of Reinforcing Fibres embeded in Flexible Medium*, 7th Congress on Material Testing, Budapest 1978.
2. W. CUDNY, S. DONIMIRSKI, Z. DYLAŁ, *Technika badań pewnych przypadków obróbki plastycznej metodą optycznie czulej warstwy powierzchniowej*, VII Sympozjum Badań Doświadczalnych w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1976.
3. C. W. SMITH, *Photoelasticity in Fracture Mechanics*, *Experimental Mechanics* vol. 20, November 1980.
4. H. K. ABEN, *Additional Physics Fields in Photoelasticity*, IUTAM Symposium on the Photoelastic Effect and its Applications, Brüssel, September 1973.
5. H. K. ABEN, *Integrated Photoelasticity*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała stałego, Warszawa 1978.
6. H. K. ABEN, E. BROSMAN, *Integrated Photoelasticity of Cubic Single Crystals*, 7 th Congress on Material Testing, Budapest 1978.
7. J. T. PINDERA, P. STRAKA, *Response of the Integrated Polariscope*, *Journal of Strain Anal.* vol. 8, No 1/1973.
8. S. B. MAZURKIEWICZ, J. T. PINDERA, *Integrated-plane Photoelastic Method-Application of Photoelastic Isodynes*, *Exp. Mechanics* vol. 19, July 1979.
9. J. T. PINDERA, S. B. MAZURKIEWICZ, T. Y. KEPICH, *Photoelastic Isodynes in Static and Dynamic Stress Analysis*, 7th Congres of Material Testing, Budapest 1978.
10. I. SŁOWIKOWSKA, A. KOZŁOWSKI, *Kompozycje do badań elastooptycznych metodą rozproszenia światła*. IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
11. R. J. SANFORD, *Photoelastic Holography — A Modern Tool for Stress Analysis*, *Experimental Mechanics* vol. 20, Dec. 1980.
12. R. J. SANFORD, *Differential Stress — Holo — Interferrometry*, *Experimental Mechanics*, vol. 13, Aug. 1973.

13. R. J. SANFORD, *Multi-Purpose Real-Time Holographic Polariscopes*, U. S. Patent No. 3831436 (Aug. 1974).
14. M. LECH, I. MRUK, J. STUPNICKI, *Multiple — Refracting — Index Holographic Interferometry for Determining Isopachics*, IUTAM Symposium „Optical Methods in Mechanics of Solids”, — Poitiers. Sep. 1979.
15. C. L. MEHROTRA, M. L. MEYER, *Equidensitometry Applied to Photoelasticity*, Experimental Mechanics, vol. 16, Oct. 1976.
16. G. FIEDRICH, *Error Assessment Using Equidensity Fringes in Photoelasticity*, Experimental Mechanics vol. 19, Aug. 1979.
17. T. FEKETE, *Bestimmung der Funktionskurven von Isochromatenwerten entlang beliebigen Geraden mit Hilfe der Spektralanalyse*, Technoplat 69, Budapest 1969.
18. V. REIMANN, *Asi Method for Punctual Measurement of Optical Phase Differences regarding the Dispersion of Birefringence*, IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
19. R. K. MILLER, L. R. SAACKEL, *Complete Automatic Analysis of Photoelastic Fringes*, Experimental Mechanics vol. 19, Jul. 1979.
20. H. D. GERLACH, *Electronic Devices for Automation of Photoelastic Data Acquisition*, Int. Symp. „Methodology and Technique of Testing Structures”, RILEM, Bucuresti 1969.
21. S. IDNURM, J. JOSEFSON, H. ABEN, *Automation of Photoelastic Data Acquisition*, 7th Congress on Material Testing, Budapest 1978.
22. Y. SEGUCHI, Y. TOMITA, M. WATANABE, *Computer — aided Fringe — pattern Analyzer — A case of Photoelastic Fringe*, Experimental Mechanics, vol. 19, Oct. 1979.
23. J. KAPKOWSKI, B. KOZŁOWSKA, *Komputeryzacja procesu analizy wyników otrzymanych metodami polaryzacyjno-optycznymi*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
24. Y. Y. HUNG, M. G. POTTINGER, *An Improved Obligue — incidence Technique for Principal — strain Separation in Photoelastic Coatings*, Experimental Mechanics, vol. 20, May 1980.
25. P. NURSE, M. I. ALLISON, *Automatic Acquisition of Photoelastic Data*. I.B.C.S.A. Conference 1972.
26. S. REDNER, *New Automatic Polariscopes System*, Experimental Mechanics, vol. 14, Dec. 1974.
27. A. I. PENKOWSKI, R. T. ADAGAMOWA, *Automaticzeskij probot dla polarizacjonno-opticzeskich issledowanij*, Prace VI Wszeczhwiązkowej Konferencji Metod Polaryzacyjno-Optycznych w Analizie Naprężeń, Tallin 1971.
28. J. STUPNICKI, *Immersion Method of Holographic Interferometry a Link in the Chain of Experimental Methods*, IX Sympozjum Badań doświadczalnych w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
29. J. G. MAC BAIN, J. E. HORNER, W. A. STANGE, J. S. OGG, *Vibration Analysis of a Spinning Disk Using Image — derotated Holographic Interferometry*, Experimental Mechanics vol. 19, Jan. 1979.
30. J. C. MAC BAIN, W. A. STANGE, H. G. HARDING, *Real — time Response of a Rotating Disk Using Image — derotated Holographic Interferometry*, Experimental Mechanics vol. 21, Jan. 1981.
31. W. J. BERANEK, A. J. A. BRUINSMA, *A Geometrical Approach to Holographic Interferometry*, Experimental Mechanics, vol. 20, Sept. 1980.
32. A. BEZŁOWSKI, M. ZAKRZEWSKI, *Badanie pochodnych funkcji ugięcia płyt zginanych z zastosowaniem metod interferometrii holograficznej*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
33. W. BACHMACZ, J. PISAREK, *Model matematyczny hologramu Fresnela rejestrowanego i rekonstruowanego w układzie optycznym z rozbieżną wiązką odniesienia*, VIII Sympozjum Doświadczalnych badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
34. A. BEŁZOWSKI, H. KASPRZAK, *Zastosowanie interferometrii plamkowej z rekonstrukcją połową w badaniach nieniszczących*, IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
35. J. HOLOUBEK, *A Strain Analysis by Scattered — Light Speckle Interferometry*, 7th Congress of Material Testing, Budapest 1978.

36. F. P. CHIANG, *A New Family of 2D and 3D Experimental Stress Analysis Techniques Using Laser Speckles*, IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
37. V. J. PARKS, *The Range of Speckle Interferometry*, Experimental Mechanics vol. 20, June 1980.
38. G. J. CLOUD, *Simple Optical Processing of Moiré — grating Photographs*, Experimental Mechanics vol. 20, Aug. 1980.
39. P. JASTRZĘBOWSKI, S. WICHNIEWICZ, S. LUTOMIRSKI, A. GLINICKA, *Zastosowanie ETO do analizy pól odkształceń metodą mory*, IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
40. D. J. SEGELMAN, D. B. WOYAK, R. E. ROWLANDS, *Smooth Spline Finite-element Differentiation of Full-field Experimental Data over Arbitrary Geometry*, Experimental Mechanics vol. 19, Dec. 1979.
41. K. STRACHALSKI, J. J. WĄSOWSKI, *Wykorzystanie techniki telewizyjnej do różniczkowania obrazów izolinii metodą mory*, IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
42. H. SCHWEGER, R. STREUBEL, *The Deformation Analysis of Transversely Strick Glass Plates by means of Dynamic Moiré Methods*, 7th Congres of Material Testing, Budapest 1978.
43. G. SACHS, *Der Nachweis inner Spannungen in Stangen und Rohren*, Zeitschrift für Metallkunde, t. 19, Nr 9, 1927.
44. J. KOO, *Sur la détermination des contraintes résiduelles dans les cylindres creux non-homogenes*, VDI-Berichte, Nr 313, 1978.
45. E. STÄBLEIN, *Stress Measurements on Billets Quenched from one Side*, Stahl und Eisen Nr 52, 1932.
46. E. HOSPERS und L. B. VOGELANG, *Determination of Residual Stresses in Aluminium — alloy Sheet Material*, Experimental Mechanics, March 1975.
47. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *Badanie rozkładu naprężeń własnych metodą miejscowej trepanacji*, ABM Nr 4, 1976.
48. J. MATHAR, *Determination of Initial Stress by Measuring the Deformation Around Holes*, Transaction ASME Nr 56, 1934.
49. W. SOETE, R. VANEROMBRUGGE, *An Industrial Method for the Determination of Residual Stress*, Proc. SESA, VIII (1), June 1950.
50. R. A. KELSEY, *Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method*, Proc. SESA, XIV, Nr 1, 1956.
51. N. J. RENDLER and J. VIGNESS, *Hole-drilling, Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses*, Experimental Mechanics, Dec. 1966.
52. P. GUPTA, BHAGWATI, *Hole-drilling Technique: Modifications in the analysis of Residual Stress*, Experimental Mechanics Jan. 1973.
53. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *Pólniszcząca metoda wiercenia nalego otworu do pomiaru rozkładu naprężeń własnych w głębi materiału. Osowo-symetryczny stan naprężenia*, ABM, 3, 1977.
54. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *Pólniszcząca metoda wiercenia małego otworu do pomiaru rozkładu naprężeń własnych w głębi materiału. Dowolny stan naprężenia*, ABM 2, 1978.
55. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *A Semidestructive Method of Measuring the Residual Stresses*, VDI-Berichte Nr 313, 1978.
56. T. M. FLAMAN, *Brief Investigation of Induced Drilling Stresses in the Center — Hole Method of Residual — stress Measurement*, Experimental Mechanics, Jan. 1982.
57. K. W. ANDREWS, J. C. GREGORY and BROOKSBANK, *Stress Measurement by X-ray Diffraction Using Film Techniques*, Strain Jul. 1974.
58. A. DIAMENT, *La methode radiocristallographique d'analyse des contraintes. Ses possibilites et ses limites*, Revue Francaise de Mecanique Nr 45, 1973.
59. S. ABUKU and B. D. CULLITY, *A Magnetic Method for the Determination of Residual Stress*, Experimental Mechanics Nr 5, 1971.
60. G. T. ORIECHOW, *Magnetoelastic method for Measuring of Internal-stresses*, Wissenschaftliche Beitrage, III Kolloquium Eigenspannungen und Oberflächenverfestigung, Zwickau, (DDR), 1982.
61. W. M. WASSILIEW, *Some peculiarities in Measurement of inner Stress by Barkhausen effect*, III Kolloquium Eigenspannungen und Oberflächenverfestigung, Zwickau (DDR), 1982.

62. H. FUKUOKA, H. TODA, and T. YAMANE, *Acoustoelastic Stress Analysis of Residual Stress in a Patch-welded disk*, Experimental Mechanics, July 1978.
63. G. U. OPPEL, *Biaxial Elastic-plastic Analysis of Load and Residual Stress*, Experimental Mechanics Nr 5, 1964.
64. J. FRELAT, J. ZARCA, *A New Non Destructive Method to Measure Residual Stresses*, VDI-Berichte, Nr 313, 1978.
65. J. H. UNDERWOOD, *Residual-stress Measurement Using Surface Displacements Around an Indentation*, Experimental Mechanics Nr 9, 1973.
66. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *Nieniszczące metody badania naprężeń własnych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Mechanika, z. 54, 1978.
67. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *Zerstörungsfreie Untersuchung von Eigen-spannungen mit Hilfe Eindringkörpers*, VDI, Nr 71, 1980.
68. M. LECH, J. MRUK, J. STUPNICKI, *Badania chropowatości powierzchni metodą immersyjną interferometrii holograficznej*, X Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa, 1982.
69. A. H. UPPAL, S. D. PROBERT, T. R. THOMAS, *Wear* 22, 1972.
70. P. JOHANNET, *Proceedings Conference on Electric Contact Phenomena*, I. I. T. 1972.
71. W. MIRSKI, *Effect of Surface Roughness on the Load Distribution in Contact*, Proceedings of the Euromechcolloquim No 110, Contact Problems and Load Transfer, Rimborsa, Sveden, 1978.
72. H. S. NAGARAJ, D. M. SAUBORN, W. O. WINER, *The effect of surface roughness on surface temperature fluctuations in EHD contacts*, Proceedings of the 4th Leeds—Lyon Symposium on Tribology, Lyon, France, 1977.
73. Z. FELIKSIK, M. SZCZEREK, *Metoda badania rozkładu ciśnienia w elastohydrodynamicznej warstwie smarnej*. Praca doktorska obroniona na Wydziale MEiL, PW, 1981.
74. J. STUPNICKI, *Photoelastic Study of the Influence of Oil on Contact Stresses*, Int. J. Mech. Sci., Pergamon Press, 1971, vol. 13.
75. J. STUPNICKI, E. KWAŚNIAK, W. MIRSKI, *Photoelastic Study of Elasto-hydrodynamic Lubrication*, Proceedings of the IUTAM Symposium on Photoelastic Effect and its Applications, Brussels, Belgium, Sept. 1973.
76. M. H. JONES, V. R. K. SASTRY, G. YODAN, *A study of the running -in wear of a diesel engine by ferrographic and spectrographic techniques*, Proceedings of the 4th Leeds—Lyon Symposium on Tribology, Lyon, France, 1977.
77. K. H. LAERMANN, *Recent Developments and Further Aspects of Experimental Stress Analysis in the Federal Republik of Germany and Western Europe*, Experimental Mechanics vol. 21, Feb. 1981.
78. J. KAPKOWSKI, J. STUPNICKI, *Techniczne zastosowania analizy propagacji obszarów plastycznych*, II Sympozjum Mechaniki Stosowanej, Moskwa 1978.
79. Z. HANDZEL-POWIERZA, J. CHOROŚ, *Próba zastosowania termowizji do badania strefy plastycznej na wierzchołku karbu*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa, 1978.
80. C. AJDUKIEWICZ, P. JASTRZĘBSKI, *Zastosowanie metody mory do badania kinematycznych mechanizmów zniszczenia na przykładzie płaskich pasm stalowych z otworami kolistymi*. X Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1982.
81. J. NAUMANN, *Messung plastischer Deformationen mit Hilfe des Moire-verfahrenes*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
82. S. KEIL, O. BENNING, *On the Evaluation of Elasto-plastic Strains Measured with Strain Gages*, Experimental Mechanics, vol. 19, Aug. 1979.
83. J. LIETZ, R. WOJNAR, B. MICHAŁSKI, *Elastoptyczne badanie ośrodka plastycznego z otworem walcowym metodą kolejnych rozwiązań plastycznych*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
84. W. A. BRILL, *Basic Studies in Photoplasticity*, Ph. D. Dissertation Stanford University 1976.
85. J. K. WHINFIELD, C. W. SMITH, *Characterization Studies of a Potential Photoelastoplastic Material*, Experimental Mechanics, vol. 12, Feb. 1972.

86. G. A. GURTMAN, W. C. JENKINS, T. K. TUNG, *Characterization of a Birefringent Material for Use in Photoelastoplasticity*, Douglas Report SM-47796, (1965).
87. J. JAVORNICKY, *Photoplastic Methods, the State of the Art*, VII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
88. L. J. F. FREIRE, W. F. RILEY, *Yield Behaviour of Photoplastic Materials*, Experimental Mechanics, vol. 20, Apr. 1980.
89. Ch. P. BURGER, *Nonlinear Photomechanics*, Experimental Mechanics, vol. 20, Nov. 1980.
90. D. POST, *Photoelastic Stress Analysis for an Edge Crack in a Tensile Field*, Proc. of SESA, vol. 12, no 1, 1954.
91. J. W. DALLY, *Developments in Photoelastic Analysis of Dynamic Fracture*, Proc. of the IUTAM Symposium on Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers, France, Sijthoff and Noordhoff, 1981.
92. C. A. SCIAMMARELLA, R. NARAYANAN, *A Holographic Non-Destructive Technique for the Detection of Cracks of 100 um Length or Less in Ceramic Materials*, Proc. of the IUTAM Symposium on Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers, France, Sijthoff and Noordhoff, 1981.
93. C. A. SCIAMMARELLA, S. K. CHAWLA, *Multiplication of Holographic Fringes, its Applications to Crack Detection*, VDI-Berichte, No 313, 1978.
94. M. PAVLIK, *Die Ausnützung der Kombination des Moirè-Verfahrens mit der Spannungsoptik für die Untersuchung von Platten mit Rippen*, VDI-Berichte, No 313, 1978.
95. R. WÓJCIK, *Analiza odkształceń i naprężeń w obszarze czola pęknięcia w strefie kontaktu ciał odkształcalnych*. Rozprawa doktorska. Wyd. MEiL PW, 1981.
96. Z. MIAZGA, *Badanie pola przemieszczeń w obszarze otaczającym szczelinę metodą fotografii plankowej*, X Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1982.
97. P. MANNOC, *Die Lichtablenkung durch eine elastisch beanspruchte Platte und die Schattenfiguren von Kreis- und Risskerbe*, Glastechnische Berichte 39, 1966.
98. P. S. THEOCARIS, *Caustics for the Determination of Singularities in Cracked Plates*, Proc. of the IUTAM Symposium on Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers, France, Sijthoff and Noordhoff, 1981.
99. J. F. KALTHOFF, J. BEINERT, S. WINKLER, *Analysis of Fault Running and Arresting Crack by the Shadow Optical Method of Caustics*, Proc. of the IUTAM Symposium on Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers, France, Sijthoff and Noordhoff, 1981.
100. J. CRHA, J. ADAMEK, K. MAZENEC, *Application of the Acoustic Emission Technique in Checks on Engineering Production Processes*, Proc. of the 7th Congress of Material Testing, Budapest, 1978.
101. D. RACKO, *Monitoring Crack Initiation and Growth by Means of Acoustic Emission*, Proc. of the 7th Congress of Material Testing, Budapest 1978.
102. R. H. BLANC, E. GIACOMETTI, *Thermomechanical Behaviour of Materials and Structures Studied by Infrared Telethermography*, Proc. of the IUTAM Symposium on Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers, France, Sijthoff and Noordhoff, 1981.
103. D. R. WILLIAMS, P. R. DAWIDSON, J. LANKFORD, *Fatigue — crack tip Plastic Stains by Stereoeimaging Technique*, Experimental Mechanics, vol. 20, Apr. 1980.
104. R. H. MARLOFF, *Resonant Fatigue Testing of Riveted Joints*, Experimental Mechanics, vol. 20 Feb. 1980.
105. J. DUFEK, HUJEČEK, *The Facility for High-cycle-fatigue Tests of the Resonance — oscillating Machine Elements*, 7th Congress on Material Testing, Budapest, 1978.
106. G. G. GARRET, P. E. G. ANDERSON, I. M. H. CHARVAT, *The Influence of Biaxial Stresses of High — cycle — Fatigue — crack Propagation*, Experimental Mechanics, vol. 20, Feb. 1980.
107. M. RATIU, C. HALCHINI, T. SCHULTZ, *On Random-fatigue-life Evaluation of Welded Railway-bogie Structures Based on Experimental Stress Analysis*, 7th Congress on Material Testing, Budapest, 1978.
108. S. KOCAŃDA, *Low Cycle Fatigue of Hardened Tool Steels*, 7th Congress on Material Testing, Budapest 1978.
109. S. KOCAŃDA, *Badanie nisko-cyklicznego zmęczenia stali NC*, VII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1976.