

5.5I — doświadczalne metody
badawcze materiałów
i konstrukcji.
Pomiary odkształceń.

Zofia Mozga-Borowska

POMIARY MAŁYCH PRZEMIESZCZEŃ
ORAZ DETEKCYJA SZCZELIN
METODĄ FOTOGRAFII PLAMKOWEJ

11/1986

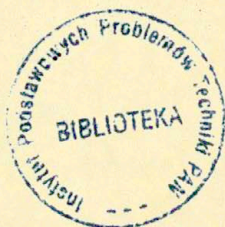
P. 269



WARSZAWA 1986

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 9 grudnia 1985 r.



56877



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 140 egz. Ark.wyd. 0,76 Ark.druk. 1,25
Oddano do drukarni w marcu 1986 r.
Nr zamówienia 172/86

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

Zofia Mozga-Borowska
Zakład Mechaniki
Ośrodków Ciągłych

POMIARY MAŁYCH PRZEMIESZCZEŃ ORAZ DETEKcja SZCZELIN METODĄ FOTOGRAFII PLAMKOWEJ

Streszczenie

W pracy przedstawiono nieniszczącą metodę optyczną zwaną fotografią plamkową. Omówiona została technika wykonywania i obróbki fotochemicznej plamkogramów /speklogramów/ wraz z podaniem składu chemicznego stosowanych kąpieli. Przedstawione zostały sposoby analizy optycznej otrzymywanych speklogramów oraz przytoczone przykłady zastosowania metody fotografii plamkowej do detekcji szczelin, badań stref plastycznych wokół szczytu szczeliny, badań procesu odspajania włókna stalowego w fibrobetonie oraz badań mechanizmu zniszczenia materiału kruchego.

1. Część ogólna

Fotografia plamkowa jest jedną z najprostszych, a zarazem najdokładniejszych metod pomiarów małych przemieszczeń na całej powierzchni obiektu wykonanego z dowolnego materiału, w dużym zakresie wymiarów gabarytowych i kształtów /od średnicy zewnętrznej opisanej ok. 1 mm do 300-500 mm/. Jest to nieniszcząca metoda optyczna z grupy technik laserowych opracowana w zakresie badań laboratoryjnych. Bazuje ona na zjawisku powstawania na dowolnej powierzchni rozpraszającej, oświetlonej światłem spójnym, obrazu plamkowego wywołanego interferencją pomiędzy falami świetlnymi rozpraszanymi na mikrostrukturze powierzchni. Fala świetlna formująca każdą indywidualną plamkę jest w pełni koherentna, o fazie, amplitudzie i polaryzacji

niezależnej od fali pochodzącej od sąsiedniej plamki. Rozmiar plamki, ze względu na losowy charakter obrazu plamkowego, opisuje się przy użyciu metod stochastycznych. Otrzymany na tej podstawie wzór określający wielkość plamki obrazowej przedstawia się następująco:

$$\delta = 1,2 (1 + M) \lambda F$$

gdzie: $M = \frac{\text{rozmiar obiektu}}{\text{rozmiar obrazu}}$, F - liczba otworowa w układzie

rejestrującym, λ - długość fali światła, δ - rozmiar plamki.

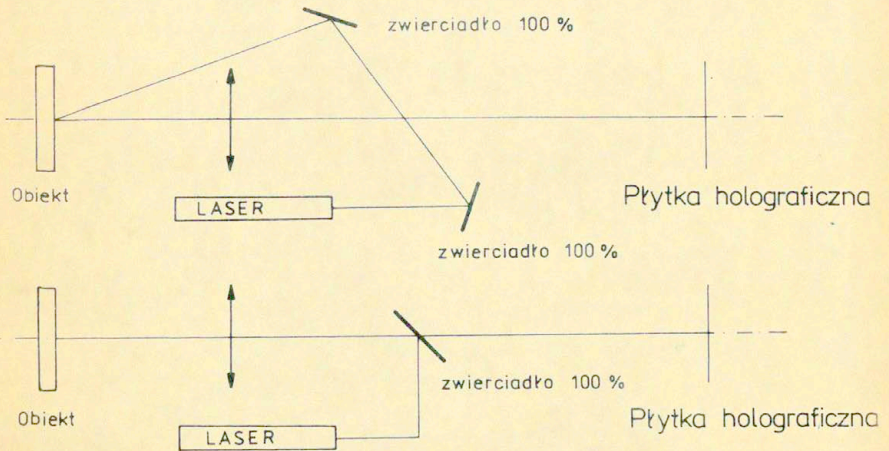
Fotografia plamkowa jest metodą polegającą na rejestrowaniu na jednym negatywie dwóch fotografii badanego obiektu - w stanie początkowym, a następnie po jego przemieszczeniu bądź deformacji /podwójna ekspozycja/ - oświetlonego wiązką światła laserowego, a następnie poddaniu otrzymanego negatywu /speklogramu/ analizie, która może być przeprowadzona dwoma metodami, punktową i polową, omówionymi później. Czułość metody fotografii plamkowej zależy w dużej mierze od długości fali światła używanego w procesie rejestracji oraz powiększenia stosowanego w układzie optycznym. Wynosi ona od ok. $0.6 \mu\text{m}$ do $4 \mu\text{m}$ i jest równa średnicy plamki /rozmiarowi plamki/. Wielkość ta ogranicza dolny zakres pomiarowy, z tym zastrzeżeniem, że dokładność pomiaru jest wtedy bardzo niska /błąd ok. 25%/. Z tego względu, praktyczny, dolny zakres pomiarowy ustala się na ok. 3 średnice plamki, kiedy to dokładność pomiarowa znacząco wzrasta i wynosi w wartości bezwzględnej ok. $0.5 \mu\text{m}$. Górny zakres pomiarowy metody wynosi około $100 \mu\text{m}$.

2. Technika rejestracji speklogramu

Speklogramy rejestrowane są przy pomocy układu optycznego zestawionego z typowych elementów wchodzących w skład zestawu ZHL. Dwa układy rejestracji przedstawia rys. 1.

Układ rejestracji może być zmieniany w zależności od potrzeb, a w szczególności od kształtu i wielkości badanego obiektu. Niezmiennym wymogiem takiego układu jest dążenie do minimali-

zacji kąta odchylenia wiązki oświetlającej od kierunku normalnej do powierzchni, pokrywającego się z kierunkiem rejestracji. Wielkość tego kąta wpływa na dokładność pomiaru. Przypadkiem



Rys. 1a. Układ rejestracji specklogramu z oświetleniem ukośnym
1b. Układ rejestracji specklogramu z oświetleniem przez obiektyw.

optymalnym jest oświetlenie badanego przedmiotu przez obiektyw rejestrujący, prostopadłe do badanej powierzchni /rys.1b/, pogarsza się jednak wtedy kontrast obrazu.

Zapisu obrazu dokonuje się na płytkach lub filmach holograficznych charakteryzujących się bardzo dużą zdolnością rozdzielczą /ok. 2000 linii/mm/. W przypadku płytek emulsja foto-czuła naniesiona jest na podłoże szklane. Z tej grupy można stosować płytki produkcji NRD: LP-1, LP-2, LP-3; produkcji firmy Agfa-Ggeavert /RFN/, Kodak /GB,USA/. Przy wyborze płytek należy zwracać uwagę na jaką długość fali świetlnej są one uczulone. Dobór zależy od rodzaju lasera stosowanego przy re-

jeźtracji. Najczęściej spotykane są płytki uczulone na falę o długości 630 nm /czerwoną, laser He-Ne/ lub 488-514 nm /zieloną, laser argonowy/. W przypadku filmów holograficznych emulsja naniesiona jest na podłożu elastycznym. Zasady doboru filmów są identyczne jak w przypadku płytek.

Bardzo istotnym parametrem rejestracji jest czas naświetlania. Należy go szczegółowo określać dla każdego rodzaju badań, zależy on bowiem od parametrów zestawionego układu, rodzaju i wymiarów badanej powierzchni oraz mocy stosowanego lasera. Na przykład: dla 1 cm² powierzchni metalicznej /miedzianej/ lekko polerowanej, przy powiększeniu w układzie x8 dla lasera LG 600 /He-Ne/ o mocy wykorzystywanej ok. 5 mW, czas naświetlania na płytkach LP2 wynosi około 8 min. /ze względu na podwójną ekspozycję 2x4 min/., natomiast dla lasera argonowego Spectra Physics o mocy wykorzystywanej 600 mW i dla płytek Agfa-Cevaert 8E56-Scientia wynosi ok. 1 sek./2x0.5 sek/. Kontrolę poprawności doboru czasu naświetlania należy prowadzić na bieżąco ze szczególną uwagą w momencie zmiany serii płytek bądź filmów /paczki lub rolki/. Z tego też względu, jeżeli tylko pozwalają na to warunki eksperymentu należy stosować krótkie serie naświetleń lub wywoływać speklogramy pojedynczo.

3. Obróbka chemiczna speklogramu

Po zarejestrowaniu speklogram należy poddać procesowi wywołania i utrwalenia. W celu wywołania speklogramu najwygodniej jest użyć holograficznych wywoływaczy firmowych takich jak Atomal, A-71, Kodak HRP, Agfa-Gevaert G282C. Możliwe jest także stosowanie uniwersalnych wywoływaczy fotograficznych jednakże do mniej dokładnych pomiarów /skurcz emulsji, gorszy kontrast prążków/. Należy wtedy stosować słabszy roztwór wywoływacza /o ok. 25%/ co spowalnia jego działanie, a więc jednocześnie należy wydłużyć czas wywoływania do około 15 min. W przypadku stosowania wywoływaczy firmowych czas wywołania wynosi ok. 4-10 min. w temperaturze 18°C. Bardzo dobre wyniki ze względu na mały skurcz emulsji oraz wydajność

dyfrakcyjną speklogramu daje stosowanie wywoływacza drobnoziarnistego i kontrastowego. Skład tych wywoływaczy przedstawia się następująco:

Wywoływacz drobnoziarnisty		Wywoływacz kontrastowy /nieutrwały/	
woda	1000 g	woda	1000 g
metylofenidon	0.007 g	hydrochinon	10 g
hydrochinon	0.188 g	siarczan sodowy	60 g
siarczan sodu bezw.	3.75	bromek potasowy	2 g
jodek potasu	0.188 g	+	
rodanek amonu	0.45 g	woda	1000 g
		węglan potasowy	100 g
czas 12 min. temp. 20°C		czas 6 min. temperatura 18°C	

Po wywołaniu należy speklogram płukać w bieżącej wodzie, a następnie zanurzyć w kąpieli przerywającej: 3% wodnym roztworze kwasu octowego. Następnym etapem obróbki fotochemicznej jest utrwalenie. Można tutaj stosować utrwalaćce firmowe holograficzne np. Agfa-Geavert G334 lub utrwalaćce uniwersalne fotograficzne przy wydłużeniu czasu utrwalania z ok. 6 do 10-15 min. Można również stosować utrwalaćce holograficzne o składzie:

woda	1000 g
tiosiarczan sodowy	200 g
kwaśny siarczan sodowy	50 g
chlerek amonowy	80 g

Po utrwaleniu należy speklogram dokładnie wypłukać a następnie zanurzyć w kąpieli alkoholowej /np. spirytus rektyfikowany/ i wysuszyć w strumieniu powietrza.

Na uzyskanym w ten sposób speklogramie widoczny jest zapis amplitudowy zarejestrowanego obrazu. Rozkład natężenia światła rozproszonego przez obiekt jest odwzorowany poprzez zaczerzenie emulsji. Dużo większą zdolność dyfrakcyjną, a więc dużo jaśniejsze obrazy w wiązce ugiętej otrzymuje się ze speklogramów fazowych. Są one przejrzyste bez widocznych zarysów obiektu zarejestrowanego.

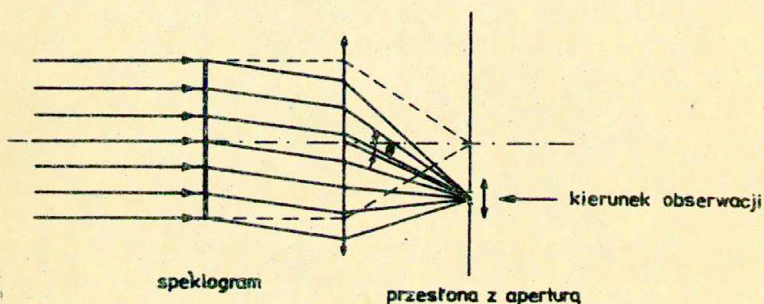
Proces obróbki chemicznej w celu przejścia z zapisu amplitudowego do fazowego nazywa się odbielaniem.

ustawiając za aperturą matówkę i obserwując na niej obraz prążków lub wykorzystując w tym celu aparat fotograficzny co pozwala na ich jednoczesną rejestrację fotograficzną. Nie należy prowadzić bezpośredniej obserwacji poprzez aperturę ze względu na bezpieczeństwo pracy.

Wielkość przemieszczenia D w poszczególnych punktach obiektu oblicza się z prostego wzoru:

$$D = Md = \frac{Mn \lambda}{2 \sin \phi}$$

- λ - długość fali światła użytego w analizie polowej
- m - rząd prążka
- d - wielkość przemieszczenia zarejestrowana na speklogramie



Rys 2. Układ optyczny do analizy polowej

Aby oznaczyć rząd prążka należy określić prążek zerowy. Najprostszym sposobem wykonania tego jest ustawienie apertury w dowolnym położeniu poza osią optyczną i obserwacja prążków podczas przesuwania apertury wzdłuż osi optycznej poza płaszczyznę ogniskową. Tylko prążek zerowy pozostanie w niezmięnionej pozycji.

4.2. Metoda punktowa

W metodzie punktowej wiązka robocza jest prostopadła do powierzchni spektrogramu i możliwie największa ze względu na dokładność pomiaru. Można tutaj wykorzystywać wiązkę generowaną przez laser. Jeżeli jej średnica przekracza 1 mm, lub potrzebny jest dokładniejszy pomiar, należy zastosować aperturę wycinając część wiązki poprzez zmniejszenie średnicy. Każda z plamek znajdujących się w oświetlonym obszarze ugina światło wewnątrz stożka, którego kąt rozwarcia zależy od liczby otworowej F stosowanej podczas rejestracji. Dwuekspozycyjna rejestracja powodująca utrwalenie dwóch, przesuniętych względem siebie obrazów plamkowych, prowadzi do interferencji fal świetlnych ugiętych wewnątrz dwóch stożków w wyniku czego tworzy się układ prostoliniowych prążków Younga. Wielkość przemieszczenia w badanym rejonie /punkcie/ określa się według wzoru:

$$D = Md = \frac{n M \lambda_2}{\sin \alpha}$$

λ_2 - długość fali światła użytego w analizie punktowej

n - rząd prążka

α - kąt widzenia położenia n -tego prążka liczony od osi optycznej

Prążek zerowy /jasny/ znajduje się w centrum widma. Dalej odległym prążkom jasnym przypisuje się kolejne numery 1, 2 itd. Kierunek przemieszczenia jest zawsze prostopadły do kierunku prążków.

5. Przykłady zastosowania fotografii plamkowej.

5a. Detekcja szczelin.

W celu detekcji szczeliny wykonano spektrogram badanego obiektu w naturalnej wielkości. Następnie przeanalizowano całe pole stosując w celu usystematyzowania badania, omiatanie spektrogramu wzdłuż linii pionowych, prostopadłych do przewidy-



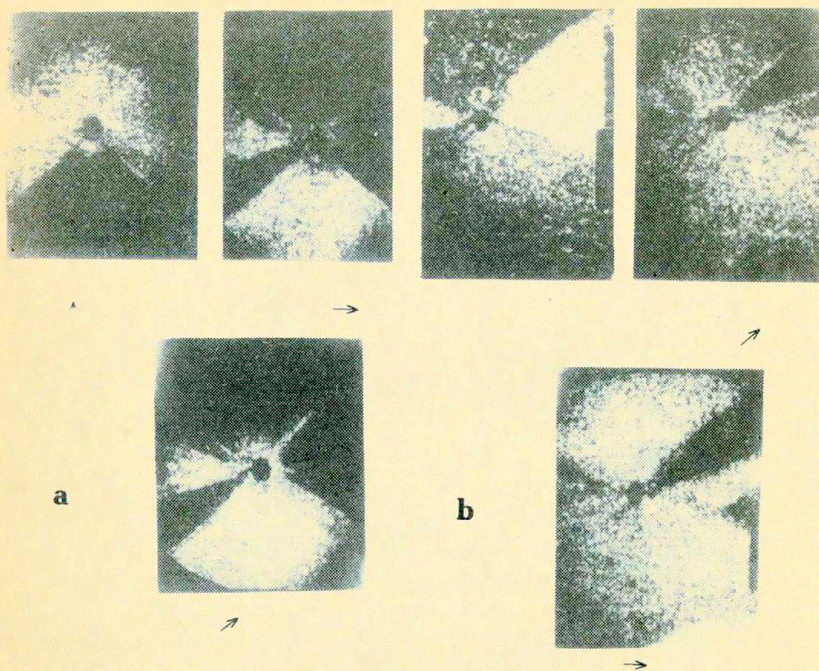
Rys. 5. Zdjęcie centralnego fragmentu przykładowego specklogramu.

w wyniku analizy polowej i punktowej specklogramów otoczenia szczeliny, wykonywanych w trakcie jej propagacji, otrzymano możliwość wyznaczenia wielkości przemieszczeń na całym badanym obszarze próbki oraz uwidocznienia charakterystycznych dla badanego materiału pasm poślizgu plastycznego wraz z kierunkiem ich rozwoju i kolejnością powstawania. Przykłady obrazów otrzymanych w wyniku analizy polowej z widocznymi pasmami poślizgów przedstawiają rysunki 6ab, 7.

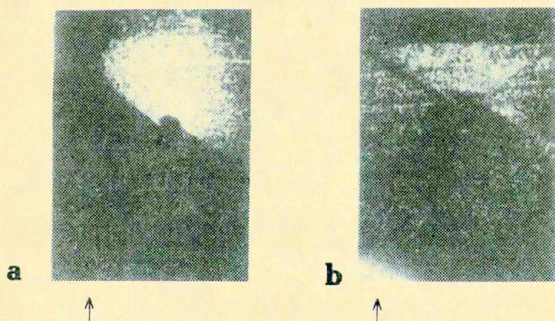
5c. Badanie procesu odspajania włókna stalowego w fibrobetonie ^x

Obiektem badań były próbki betonowe z zalanyymi włóknami stalowymi o zróżnicowanych kształtach. w celu umożliwienia badań przemieszczeń włókna próbka była zeszlifowana, aż do uwidocznienia materiału włókna /rys. 8/.

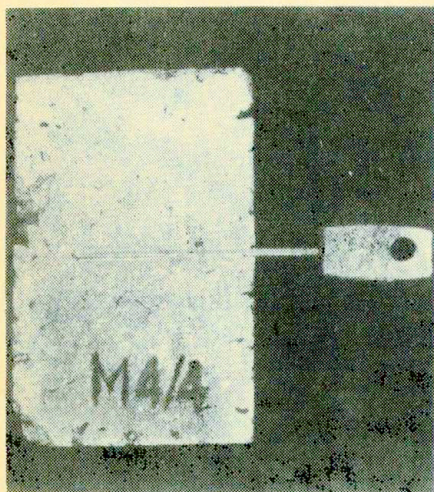
x/Badania przeprowadzone wraz z mgr inż. Januszem Potrzebowskim i opracowywane przez kol. Potrzebowskiego



Rys. 6 ab. Wyniki analizy polowej specklogramów próbki mosiężnej /M63 wyżarzony dla trzech wybranych kierunków przesunięcia apertury z osi optycznej.



Rys. 7. Wyniki analizy polowej specklogramów próbki brązowej/B7 sprężysto-twardy/. a/ Etap początkowy rozwoju pasm poślizgów, b/ Etap późniejszy rozwoju pasm poślizgów.



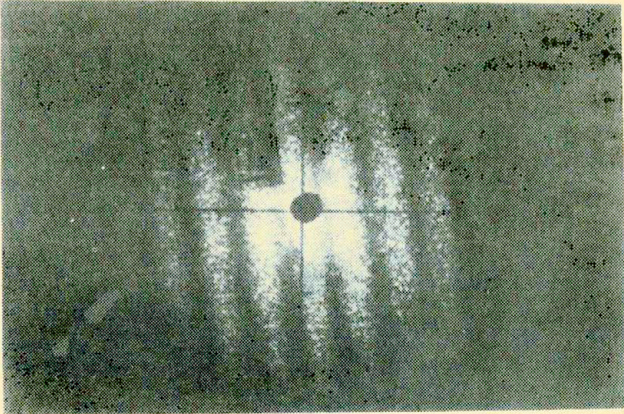
Rys. 8. a/ próbka fibrobetonowa z uwidocznionym włóknem.
b/ specklogram próbki.

Po zeszlifowaniu cała powierzchnia próbki pokryta została lakierem odblaskowym firmy Vishay zapewniającym dyfuzyjne rozpraszanie światła dzięki zawieszonym w nim drobinom pyłu aluminiowego. Celem tego pokrycia było polepszenie kontrastu obrazu plamkowego, a co z tym idzie, jakości specklogramu dzięki czemu uzyskano dobry kontrast prążków interferencyjnych otrzymywanych w analizie punktowej /rys. 9/.

Specklogramy wykonywane były w trakcie wyciągania utwardzonego w betonie włókna w podobnych seriach, jak w przypadku badania strefy wokół szczytu szczeliny.

W wyniku tych badań otrzymano informację o przemieszczeniach na powierzchni wyciąganego drutu oraz jego bezpośredniego

otoczenia.



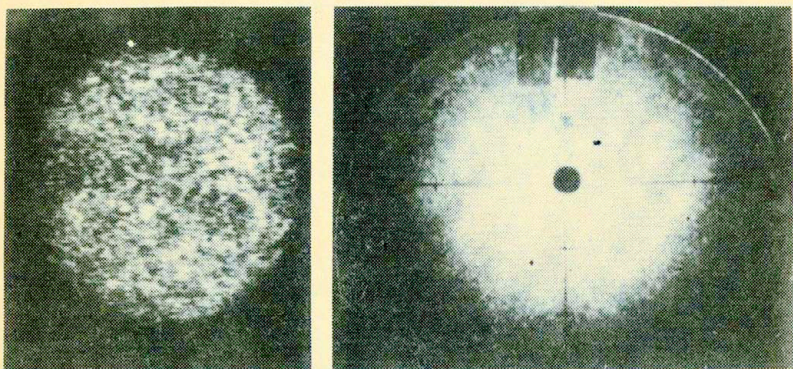
Rys. 9. Prążki interferencyjne otrzymane w wyniku analizy punktowej specklogramu próbki fibrobetonowej.

5d. Badanie mechanizmu zniszczenia materiału kruchego x/

Obiektem badań były jednoosiowo ściskane pastylki wykonane ze sprasowanego proszku. Podobnie jak w przypadku fibrobetonu pastylki pokrywane były bardzo cienką warstwą lakieru odblaszkowego firmy Vishay. Sekwencje specklogramów wykonywane były w trakcie ściskania pastylki wzdłuż średnicy. Jakość otrzymanych specklogramów niestety nie była dobra. Spowodowało to znaczne utrudnienia w analizie punktowej gdyż kontrast otrzymywanych prążków był bardzo słaby /rys. 10/

Powodem złej jakości specklogramu była nadmierna chropowatość badanych pastylek, czego należałoby unikać w innych badaniach tego typu materiałów.

x/ Badania przeprowadzone wraz z mgr inż. Z.Dziankowskim i opracowywane przez kol. Dziankowskiego.



Rys. 10. a/Speklogram kruchej pastylki
b/Prażki otrzymane z analizy punktowej

W wyniku badań otrzymano możliwość wyznaczenia miejsca inicjacji pęknięcia, a następnie śledzenia jego rozwoju.

SPIS LITERATURY

- 1.R.K. Erf "Speckle Metrology" Academic Press 1978
- 2.J.C. Dainty "Laser Speckle and Related Phenomena" Topics
in Applied Physics Vol.9 Springer Verlag 1979
- 3.E. Archbold, E.A. Ennos "Displacement Measurement From
Double Exposure Laser Photographs"
"Optica Acta" Vol.19 No4
- 4.N.I. Kiriłow, W.A. Baraczewski "Registrujuszczije srjedy
dla gołografii" wyd. "Nauka" Leningrad 1975
- 5.J.Baters "Gołografia i jej primienienie" tłum z ang.
wyd. "Energia" Moskwa 1977