

JERZY TADEUSZ PINDERA

BADANIA PEWNYCH REOLOGICZNYCH WŁASNOŚCI  
ELASTOOPTYCZNYCH KILKU ŻYWIC POLIESTROWYCH (III)

ROZPRAWY  
INŻYNIERSKIE  
CXXXV

## SPIS TREŚCI

### Część III. O metodach badań elastoptycznych w świetle doświadczeń

1. Zastosowanie wyników	523
1.1. Kryteria przydatności materiału na liniowo-sprężyste modele elastoptyczne	523
1.2. Dynamiczna metoda eliminowania pelzania optycznego	527
1.3. Dynamiczna metoda skrócenia czasu badania przy pelzaniu	527
1.4. Dynamiczna metoda badania pól naprężeń w okolicach ostrych zmian kształtu tarcz grubych	528
1.5. Charakterystyka materiałów elastoptycznych	529
1.6. Projekt uniwersalnego polaryskopu elastoptycznego typu JP-10	530
2. Wnioski ogólne	532
2.1. Konieczność rozwijania badań reologicznych własności materiałów elastoptycznych	532
2.2. Metoda i technika badań elastoptycznych własności materiałów	533
2.3. Charakterystyczne własności zbadanych materiałów	534
2.4. Wnioski dotyczące metody i techniki badań elastoptycznych	535
3. Dalsze badania	

### CZEŚĆ III. O METODACH BADAŃ ELASTOPTYCZNYCH W ŚWIETLE DOŚWIADCZEŃ

#### 1. Zastosowanie wyników

1.1. Kryteria przydatności materiału na liniowo-sprężyste modele elastopotyczne. Z przebiegu krzywych  $m = m(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$  wynika, że prędkość pełzania lub nawrotu optycznego wszystkich tych materiałów przyjmuje stosunkowo wysokie wartości bezpośrednio po obciążeniu lub odciążeniu.

Badania wykonywane były w temperaturze około  $22^{\circ}\text{C}$ , a więc w górnej granicy temperatury pomieszczenia laboratorium przy wykonywaniu badań. Ponieważ, jak wykazały wstępne obserwacje, prędkość pełzania wszystkich żywie poliestrowych wzrasta ze wzrostem temperatury, niżej sformułowane wnioski odnoszą się do najbardziej niekorzystnych warunków. Przy badaniach prowadzonych w chłodnych porach roku lub przy badaniach prowadzonych w pomieszczeniu, w którym można utrzymać w trakcie badania temperaturę w granicach  $18\text{--}20^{\circ}\text{C}$ , poniższe wnioski ulec muszą pewnej modyfikacji.

W badaniach elastooptycznych przyjmuje się na ogół  $\pm 5\%$  jako wartość przeciętnego błędu. Przeciętny błąd badania jest wynikiem szeregu błędów przypadkowych i systematycznych, zależnych głównie od przedmiotu badania i od zastosowanej metody i techniki badania. W przypadkach najprostszych, jak np. wyznaczenie naprężeń krawędziowych, błąd jest praktycznie tego samego rzędu co błąd wynikający z nieuwzględnienia nieliniowej, zależnej od czasu, charakterystyki materiału modelu. Z tego względu przyjmiemy jako dopuszczalny błąd w określeniu elastooptycznych własności materiału dla najprostszych badań elastooptycznych błąd równy  $\pm 5\%$ . Ponieważ przeciętny błąd pomiaru własnych badań można traktować jako możliwy do pominięcia ze względu na to, iż był mniejszy od  $1\%$ , jako dopuszczalną wartość błędu spowodowanego nieuwzględnieniem rzeczywistych własności materiału modelu przyjmiemy  $5\%$ . Błąd ten nazywamy błędem materiałowym.

Na podstawie analizy pól izochrom, przeprowadzonej w części 2, możemy traktować w pierwszym przybliżeniu wpływ pełzania elastooptycz-

nego w przypadku dwuwymiarowego pola naprężeń na pola izochrom jako możliwy do pominięcia dla wysoko usieciowanych badanych żywic poliestrowych, przy naprężeniach krawędziowych nie przekraczających podanych niżej wartości. Przy nisko usieciowanych polimerach, takich jak np. niewygrzana żywica P-6, powyższe założenie może być przyjęte jako słuszne w odpowiednio wąskim przedziale czasowym. Badania wstępne (przeprowadzone na okrągłych tarczach ściskanych wzdłuż średnicy dwiema skupionymi siłami), polegające na porównaniu teoretycznego i doświadczalnego pola izochrom, potwierdzają poprawność powyższego wniosku w granicach oczekiwanej dokładności. Przy nieliniowej charakterystyce materiału modelu wartość błędu materiałowego łączy się z czasem badania. Jako minimalny czas przeciętnego badania elastooptycznego przyjmijmy na podstawie doświadczenia jedną godzinę.

Analiza przydatności materiału na modele elastooptyczne oraz właściwej techniki pomiaru oparta jedynie na krzywych pełzania optycznego prowadziłaby do zbyt krańcowych wniosków. Tak na przykład charakterystyka pełzania optycznego żywicy CR-39 przy rozciąganiu jest wyraźnie niekorzystna. Z wykresów pełzania optycznego CR-39 (por. część 2) wynikałoby, że jest rzeczą celową rozpoczynanie pomiaru nie wcześniej niż po upływie 20 minut od chwili obciążenia lub od chwili zmiany obciążenia; pożądane byłoby, aby wartość naprężenia nie przekraczała  $2,7 \text{ kG/mm}^2$ . Dla tego naprężenia wartość materiałowej stałej elastooptycznej  $K^{\lambda=10}$  dla żółtej linii rtęci maleje w przeciągu jednej godziny licząc od 20 minut od chwili obciążenia, od wartości  $17,2 \text{ kG/cm}^2$  do wartości  $16,6 \text{ kG/cm}^2$ , czyli o 3,5%. W ciągu 30 minut od chwili obciążenia zmiana wartości elastooptycznej stałej materiałowej dla żółtej linii rtęci sięga 5% w zakresie naprężeń  $0-2,7 \text{ kG/mm}^2$ .

Również żywica VP-1527 bez obróbki cieplnej w takim stanie jak jest dostarczana z wytwórni może wykazywać znaczne pełzanie optyczne. Z wykresów pełzania optycznego żywicy VP-1527 (por. część 2) wynikałoby, że najkorzystniejszy czas badania zaczyna się dopiero po upływie 4 godzin od przyłożenia obciążenia; czas badania mógłby wynosić nawet 35 godzin przy wartościach naprężeń  $2,5 \text{ kG/mm}^2$ . Biorąc pod uwagę prędkość pełzania optycznego przy czasie badania równym jednej godzinie oraz przy naprężeniu równym  $2,5 \text{ kG/mm}^2$ , pomiar z żądaną dokładnością mógłby być rozpoczynany w 20 minut po obciążeniu. Ze względu natomiast na zmianę wartości  $K$  z upływem czasu (dla zakresu naprężeń  $0-2,5 \text{ kG/mm}^2$ ) pomiar powinien być zakończony przed upływem jednej godziny od chwili obciążenia.

Przebieg krzywych charakteryzujących własności elastooptyczne żywicy P-6 wskazuje, że modele elastooptyczne z tej żywicy można badać podobnie jak modele z żywicy VP-1527. Dla niewygrzewanej żywicy P-6,

opierając się na krzywych pełzania optycznego podanych w części 2, należałoby przyjąć, że pomiar rozpocząć można po upływie 20 minut od obciążenia, jeśli czas badania nie przekracza godziny. Przy czasach badania rzędu kilku lub kilkunastu godzin celowe byłoby rozpoczynać badanie dopiero po upływie trzech godzin przy naprężeniach nie przekraczających  $2,5 \text{ kG/mm}^2$ . Ze względu na zmianę wartości  $K$  z upływem czasu pomiar w przypadku niejednorodnego pola naprężeń należałoby zakończyć przed upływem 30 minut od czasu obciążenia przy  $\sigma_{max} = 2,5 \text{ kG/mm}^2$ , zaś przed upływem godziny przy  $\sigma_{max} = 2,0 \text{ kG/mm}^2$ .

Podobnie z przebiegu krzywych pełzania optycznego dla wygrzanych (silnie usieciowanych) żywic VP-1527 oraz P-6 wynikałoby, że znaczna stosunkowo prędkość pełzania optycznego bezpośrednio po przyłożeniu obciążenia prowadzić musi w tym przedziale czasowym również do zniekształcenia wyników z tym zastrzeżeniem, że w znacznie mniejszym stopniu niż w przypadku słabo usieciowanej żywicy VP-1527 oraz P-6.

W świetle uzyskanych wyników badań podanych w części 2 powyższy sposób analizy przydatności materiału do badań elastooptycznych nie może być uznany za poprawny. W badaniu elastooptycznym jest rzeczą istotną, aby charakter pola izochrom oraz izoklin w trakcie działania obciążenia nie uległ zmianie, natomiast nie jest konieczne, aby wartość stałej elastooptycznej materiału była w czasie obciążenia niezmienna. O przydatności materiału do badań elastooptycznych nie decyduje więc głównie charakter zależności  $m = m(\sigma)$  oraz  $m = m(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$ , ale wzajemny stosunek pomiędzy zależnościami  $m = m(\sigma)$  i  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$  lub  $m = m(\varepsilon)$  przy  $t = \text{const}$ , w określonym przedziale czasowym.

Błąd materiałowy nie powinien być określony wyłącznie jako pewna funkcja odchylenia od proporcjonalności pomiędzy stałą elastooptyczną i naprężeniem w danym przedziale czasowym, powinien natomiast być określony w sposób uwzględniający również zniekształcenie z upływem czasu pola naprężeń, wywołane pełzaniem oraz relaksacją naprężeń. Błąd materiałowy powinien być więc określony za pomocą zależności, która uwzględni związek między funkcjami  $m = m(\sigma)$  i  $m = m(\varepsilon)$  przy  $t = \text{const}$  lub między funkcjami  $m = m(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$  i  $m = m(t)$  przy  $\varepsilon = \text{const}$ .

Ogólne kryterium przydatności materiału na liniowo-sprężyste modele elastooptyczne sformułować można by w sposób następujący:

a)  $m = m(\sigma)$  oraz  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$  przy  $t = \text{const}$  są liniowe w określonym przedziale czasowym, a więc również zależność  $m = m(\varepsilon)$  przy  $t = \text{const}$  jest liniowa;

b) zależności  $m = m(\sigma)$  oraz  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$  przy  $t = \text{const}$  w określonym przedziale czasowym, a więc również zależność  $m = m$  przy  $t = \text{const}$  pole izochrom nie ulega deformacji.

Sformułowanie pierwsze uwzględnia najprostszy przypadek pełzania, w którym pole naprężeń nie ulega zmianie. Sformułowanie to pozostaje w granicach konwencjonalnych praw podobieństwa modelowego.

Sformułowanie drugie jest ogólniejsze; uwzględnia ono ogólny przypadek pełzania i relaksacji naprężeń, w którym występuje zmiana pola naprężeń z upływem czasu. Sformułowanie to wykracza poza dotychczasowe ujęcie praw podobieństwa modelowego, przyjętych w badaniach elastooptycznych.

Jako badanie skalujące dla materiału elastooptycznego należałoby więc potraktować badanie pełzania w jednowymiarowym i dwuwymiarowym stanie naprężenia, mające na celu zarówno określenie narastających z upływem czasu odchyłeń rzędów izochrom od ich teoretycznych wartości, jak i określenie wartości stałej modelowej jako funkcji czasu. Stosowane przez nas tzw. elastooptyczne kompensatory pełzania, opisane w pracy [9]<sup>1</sup>, posiadają kształt okrągłej tarczy wyciętej z materiału modelu, ściskanej wzdłuż średnicy i obciążanej łącznie z badanym modelem; pozwalają one wyznaczać zarówno aktualną wartość stałej modelowej jak i określać ilościowo stopień deformacji pola izochrom.

Wyniki badań nie potwierdziły przypuszczeń, że zmiana dyspersji dwójłomności może być ogólną miarą odkształceń plastycznych materiału. Dla żywicy CR-39 powstawaniu trwałego efektu elastooptycznego nie towarzyszy zmiana dyspersji dwójłomności. Pola naprężeń wywołane miejscowymi odkształceniami plastycznymi można w modelach z żywicy CR-39 analizować stosując praktycznie jedynie metodę stopniowego usuwania obszaru odkształconego plastycznie. Przy tej metodzie pomocnym jest fakt, że izochroma zerowa niezależnie od sposobu jej powstawania w świetle białym zawsze jest czarna. Dla żywicy P-6 nisko usieciowanej występuje pewna zmiana dyspersji dwójłomności w miarę narastania odkształceń nieliniowo-sprężystych. Nie stwierdzono jednak bezpośredniego związku pomiędzy zmianą dyspersji dwójłomności a wartością odkształceń trwałych. Być może, że zależność ta istnieje w bardziej uwikłanej postaci. W przypadku żywicy P-6 dyspersja dwójłomności może być, jak dotąd, tylko pewną miarą odkształceń nieliniowo-sprężystych.

Na podstawie przebiegu krzywych nawrotu optycznego oraz krzywej wędrowki punktu inwersji żywicy P-6 można przyjąć w pierwszym przybliżeniu, że początek odkształceń plastycznych w tego typu materiałach sygnalizowany jest albo przez punkt inwersji, albo przez zerową wartość rzędnej na krzywej nawrotu optycznego po upływie dostatecznie długiego czasu.

Silnie usieciowana (po odpowiedniej obróbce cieplnej) żywica P-6 oraz żywica VP-1527 nie nadaje się już do badań w obszarach nieliniowo-sprężystych.

<sup>1</sup> Literatura jest podana w części drugiej na s. 517 i 518.

1.2. **Dynamiczna metoda eliminowania pełzania optycznego.** Z zależności dla pełzania optycznego przy zginaniu przemiennym z różną częstotliwością (podanych w części 2) wynika, że stosując obciążenie przemiennie można nie dopuścić do powstania efektu pełzania optycznego, obserwowanego przy typowych badaniach.

Z analizy wykresów dla pełzania optycznego oraz dla nawrotu optycznego przy zginaniu (por. część 2) wynika, że prędkość nawrotu optycznego można znacznie zwiększyć stosując przy obciążeniu statycznym obciążenie przemiennie. Jak wynika z badań, amplituda drgań obciążeń przemiennych może być stosunkowo niska. Jak wykazują zdjęcia izochrom naprężenia przemiennie eliminują w znacznym stopniu efekt naskórkowy.

Wyżej opisane zjawisko można wykorzystać w celu zapobiegania wystąpienia pełzania optycznego stosując obciążenie przemiennie badanego modelu; tę metodę badania nazywamy dynamiczną metodą eliminowania pełzania optycznego.

Metoda powyższa może znaleźć zastosowanie przy dokładnym wyznaczeniu wartości współczynników kształtu. Stosując ją będzie można prawdopodobnie wyjaśnić, przynajmniej częściowo, rozbieżności wyników elastooptycznych badań współczynników kształtu, wykonanych przez różnych badaczy. Można będzie również w znacznym stopniu uniezależnić się od charakteru pełzania optycznego materiału modelu, co umożliwi stosowanie materiałów, które pomimo szeregu dobrych cech fizycznych są obecnie niechętnie stosowane na modele elastooptyczne ze względu na niekorzystny przebieg krzywych pełzania optycznego.

Dynamiczna metoda eliminowania pełzania optycznego pozwoli prawdopodobnie na łatwiejsze i szybsze określenie obszarów odkształceń plastycznych na podstawie badań elastooptycznych, ponieważ umożliwi ona znaczne zwiększenie prędkości nawrotu efektu elastooptycznego, związanego z opóźnionym odkształceniem sprężystym. Nawrót ten jak to wynika z zależności podanych w części 2 przebiega w czasie od kilkuset do kilku tysięcy godzin, jeśli model pozostaje w spokoju przy zachowaniu tych samych warunków fizycznych jak w trakcie obciążenia. Wydaje się, że dynamiczna metoda eliminowania pełzania optycznego proponowana przez nas pozwoli na otrzymywanie bardziej jednoznacznych wyników od uzyskanych badanego modelu, zwłaszcza w odniesieniu do badań w obszarze plastycznym.

Dynamiczna metoda pozwoli również na szybsze i dokładniejsze wykonywanie kontrolnych badań stopnia niejednorodności materiału, z którego ma zostać wykonany model do badania elastooptycznego.

1.3. **Dynamiczna metoda skrócenia czasu badania przy pełzaniu.** Jak wynika z analizy zależności opisanych w punkcie 1.2 oraz ze wstępnych badań przeprowadzonych przez nas można znacznie skrócić czas badania przy

pełzaniu przez zwiększenie prędkości pełzania, nakładając na dane obciążenie statyczne obciążenie przemienne.

Ze względu na technikę badania najkorzystniej jest, aby częstość obciążeń zmiennych równa była częstości drgań własnych układu. Amplituda dodatkowych obciążeń powinna być dobrana na podstawie prób skalujących. Dotychczasowe wstępne obserwacje nasze wydają się wskazywać na to, iż prace w tym kierunku mogą być bardzo owocne zarówno jeśli chodzi o lepsze poznanie własności materiałów na modele, jak i ze względu na rozwój metody i techniki badań elastooptycznych.

**1.4. Dynamiczna metoda badania pól naprężeń w okolicach ostrych zmian kształtu tarcz grubych.** Dynamiczna metoda eliminowania pełzania optycznego może umożliwić doświadczalne badanie pól naprężeń w tarczach grubych w okolicy karbów. Rozkład naprężeń w okolicach karbów tarcz grubych, odmienny od rozkładu naprężeń w geometrycznie podobnych tarczach cienkich, może być badany znanymi metodami jedynie w sposób niedoskonały, np. metodą punktową przy użyciu tensometrów i to tylko na powierzchniach okolicy karbu. Typowe badania elastooptyczne naprężeń w okolicach karbów tarcz grubych obarczone są podwójnym błędem: po pierwsze — ogólny efekt elastooptyczny dostarcza informacji o średniej wartości naprężenia, po drugie — wartość błędu pomiarowego jest trudna do oszacowania ze względu na to, że w różnych płaszczyznach równoległych do płaszczyzny środkowej tarczy panują różne wartości naprężeń, w wyniku czego pełzanie optyczne materiału różne w różnych płaszczyznach zmienia ogólny efekt elastooptyczny w sposób trudny do określenia.

Zastosowana przez M. M. Frochta metoda zamrażania naprężeń do wyznaczania rozkładu naprężeń w karbach tarcz grubych wymaga dobrej znajomości reologicznej charakterystyki materiału w całym zakresie temperatur.

Możliwość dokładnego wyznaczenia rozkładu i wartości naprężeń w kierunku grubości tarczy (w karbach tarcz grubych oraz w szczególnych przypadkach karbów, jakie stanowią nadcięcia i pęknięcia w tarczach) posiada duże znaczenie przy ustalaniu dokładniejszej zależności dla warunków powstawania odkształceń plastycznych w karbach tarcz grubych przy badaniach procesu rozprzestrzeniania się rys w tarczach w oparciu o bardziej precyzyjne niż dotąd ustalenie kryteriów utraty spójności na dnie rys w tarczach grubych oraz przy analizowaniu wyników badań zmęczenia dla karbów tarcz grubych. Znaczenie naukowe i techniczne rozwiązania powyższego zagadnienia jest znaczne.

Proponujemy dwie wzajemnie uzupełniające się metody badania oparte na dynamicznej metodzie eliminowania pełzania optycznego:

- a) metodę badań modeli jednolitych o różnej grubości,



b) metodę badań modeli sklejanych z tego samego materiału, podzielonych warstwą odblaskową.

Metodę pierwszą można samodzielnie zastosować dopiero wówczas, gdy będziemy dysponowali rozwiązaniami ścisłymi dla kilku przynajmniej różnych przypadków tarcz grubych, co umożliwi określenie dokładności pomiaru oraz dokładności wykresów, wyprowadzonych dla przeliczenia wyników pomiaru.

Metoda druga wymaga budowy modelu jak na rys. 1. Model zbudowany jest z płyt tego samego materiału o tych samych własnościach fizycznych, zwłaszcza w odniesieniu do modułów  $E, \nu$  oraz  $K$ . Grubość warstwy czynnej  $\delta'$  jest stała. Grubość warstwy nośnej  $\delta$  jest zmienna od zera. Warstwa odblaskowa powinna być tak naniesiona, aby sklejenie obu warstw modelu było całkowite. Jest rzeczą celową użycie jako kleju żywicy płynnej, z której wykonano obie warstwy modelu. Technika pomiaru elastooptycznego jest taka sama, jak przy znanej metodzie odbicia promieni świetlnych, stosowanej przy badaniu zamkniętych powłok.

Dla kontroli dokładności pomiaru oraz w celu uzyskania danych uzupełniających należy w warstwie odblaskowej pozostawić prześwity.

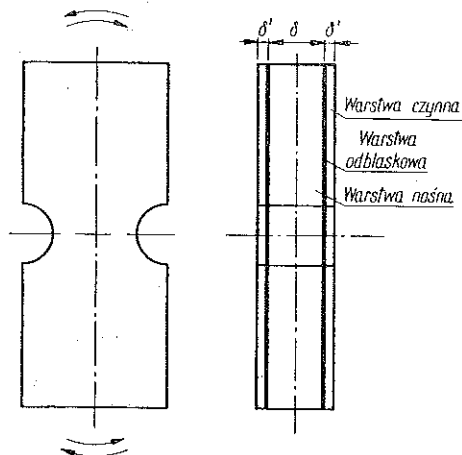
Odpowiednio rozmieszczone prześwity mogą uczynić zbędnymi oddzielne uzupełniające badanie metodą pierwszą.

Dynamiczne badania elastooptyczne z wymuszeniem kinematycznym, periodycznym przemiennym lub z przemieszczeniem wstępnym wykonywać można przy zastosowaniu aparatury opracowanej przez nas i opisanej w części pierwszej. Aparatura

ta zdała pomyślnie egzamin praktyczny i dostosowana jest do zmontowania na uniwersalnym polaryskopie elastooptycznym, którego opis podany jest dalej.

**15. Charakterystyka materiałów elastooptycznych.** Wyniki pracy wskazują, że dotychczasowy sposób charakteryzowania własności materiałów elastooptycznych nie jest wystarczający, gdyż za mało uwzględnia (lub wcale nie uwzględnia) nieliniową charakterystykę materiału jako funkcji czasu.

Wydaje się rzeczą celową i konieczną, aby dla materiałów służących do dokładnych badań elastooptycznych wyznaczone zostały doświadczal-



Rys. 1. Schemat modelu do badań tarcz grubych

nie następujące wykresy:  $m = m(\sigma)$  dla  $t = 0$  oraz dla około 10 wartości  $t$ ;  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$  dla  $t = 0$  oraz dla około 10 wartości  $t$ ;  $m = m(t)$ ,  $R = R(t)$ ,  $K_\sigma = K_\sigma(t)$ ,  $m = m(\varepsilon)$ ,  $K_\varepsilon = K_\varepsilon(t)$  dla kilku wartości  $t$ .

Wykresy powyższe powinny być otrzymane dla rozciąganych i ścispanych próbek pryzmatycznych lub pseudopryzmatycznych oraz dla próbek pryzmatycznych obciążonych czystym momentem. Znajomość tych zależności stanowi podstawę do poprawnej oceny dokładności wyników badania elastooptycznego oraz do poprawnej oceny zakresu stosowalności praw podobieństwa modelowego.

**1.6. Projekt uniwersalnego polaryskopu elastooptycznego typu JP-10.** Na podstawie wymagań stawianych nowoczesnej aparaturze, wynikających ze współczesnej problematyki badań elastooptycznych, oraz na podstawie doświadczeń zebranych w trakcie wykonywania niniejszej pracy autor zaprojektował polaryskop elastooptyczny, który umożliwi — między innymi — wykonywanie z odpowiednią dokładnością badań, stanowiących w pewnym sensie kontynuację badań opisanych w niniejszej pracy.

Zaprojektowany polaryskop nazywać będziemy uniwersalnym polaryskopem elastooptycznym oznaczając go (dla odróżnienia od poprzednio zaprojektowanych przez autora i pracujących w kilkunastu krajowych laboratoriach polaryskopów) symbolem JP-10.

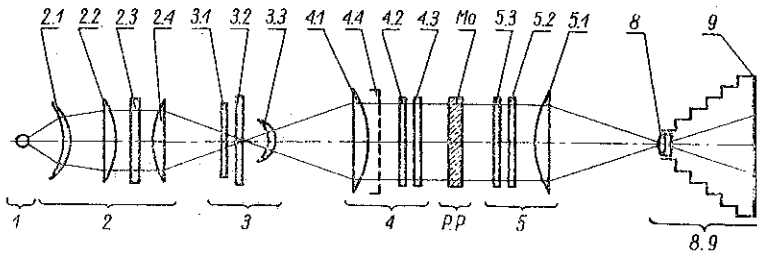
Uniwersalny polaryskop elastooptyczny typu JP-10 służy do wykonywania dokładnych i bardzo dokładnych badań elastooptycznych. Jest on przystosowany do wszelkiego rodzaju elastooptycznych badań naukowych i technicznych w równoległej oraz rozproszonej wiązce światła, jak np. badań konwencjonalnych płaskich pól naprężeń, płyt zginanych w obszarze niesprężystym, przy powstawaniu odkształceń plastycznych (w tym badań przy wykorzystaniu zjawisk «schlieren»), przy obciążeniach długotrwałych (pełzanie i relaksacja), dyspersji dwójkomności, trójwymiarowych pól naprężeń dynamicznych przy obciążeniach periodycznych oraz nieperiodycznych zmiennych, modeli zbrojonych itd. Przyrząd przystosowany jest do domontowania interferometru elastooptycznego oraz urządzenia interferencyjnego do zdjęć izopach.

Oś optyczna układu umieszczona jest na wysokości 1500 m.

Elementy układu optycznego pokryte są warstwą przeciwodblaskową.

Średnica pola widzenia wynosi 260 mm. Największe wymiary modeli wynoszą  $600 \times 700$  mm. Model umieszczony jest w układzie obciążającym na przesuwnej podstawie o przesuwie poziomym  $\pm 300$  mm i pionowym  $\pm 350$  mm; napęd przesuwów jest elektryczny. Polaryzator i analizator są sprzężone mechanicznie. Przewidziane jest wbudowanie sprzężenia elektrycznego. Analizator wykonany jest w układzie kompensatora Tardy z odczytem do 0,01 izochromy.

Uniwersalny układ obciążający umocowany na przesuwnej podstawie posiada podstawowe uniwersalne wyposażenie do realizacji płaskiego pola naprężeń (rozciąganie i ściskanie, zginanie) oraz do badań płyt zginanych.

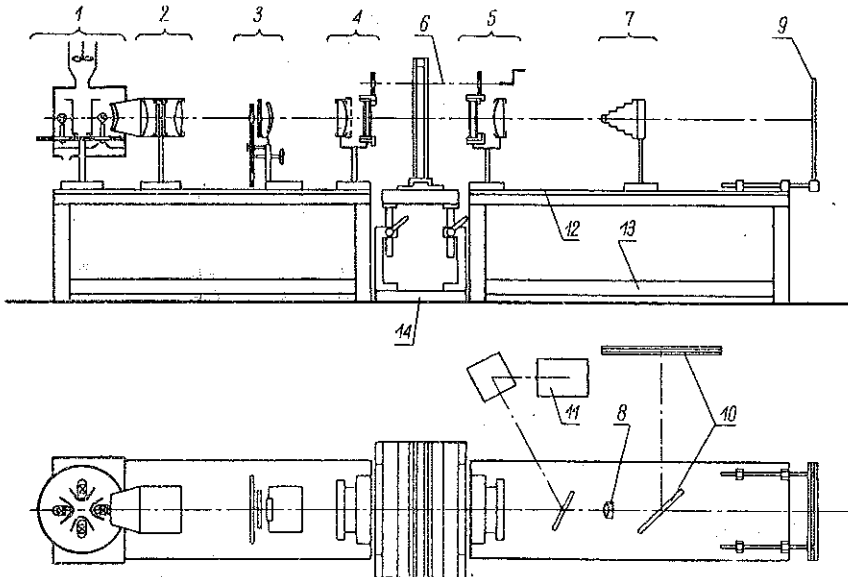


Rys. 2. Schemat układu optycznego uniwersalnego polaryskopu elastooptycznego, typ. JP-10

Układ został obliczony przez J. Matysiaka

Obciążenie mechaniczne realizowane jest przez układy dźwigni i bloczków.

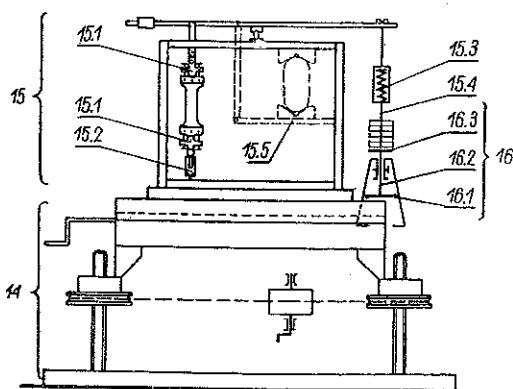
Schemat układu optycznego polaryskopu podany jest na rys. 2. Szkic polaryskopu podany jest na rys. 3 i 4.



Rys. 3. Szkic uniwersalnego polaryskopu elastooptycznego typu JP-10

Na cechy układu składają się następujące elementy: Wymienne źródła światła (lampa żarowa-wolframowa, lampa rtęciowa, lampa sodowa oraz lampa dowolna; przewidziana lampa stroboskopowa). Trójsoczewkowy kondensator zapewniający maksymalne wykorzystanie strumienia świetl-

nego. Wysoka korekcja biegu promieni w przestrzeni pomiarowej: nierównoległość wiązki świetlnej mniejsza od  $0,5^\circ$ . Mała dystorsja obrazu (mniejsza od  $1,5\%$ ). Możliwość dokonywania zdjęć fotograficznych w formatach  $24 \times 36$  mm,  $9 \times 12$  cm oraz  $13 \times 18$  cm. Możliwość rzucenia obrazu na ekran w powiększeniu do 4:1.



Rys. 4. Szkic zespołu obciążającego polaryskopu typu JP-10

Możliwość dokonywania pomiarów w świetle rozproszonym przez włączenie matówki. Aparat umożliwia dokonywanie badań w świetle jednobarwnym przez włączenie odpowiedniego filtra o następujących typowych długościach fal: fioletowy, niebieski, zielony i żółty prążek rtęci, żółty prążek sodu oraz dowolnych trzech innych. Istnieje możliwość regulacji jasności obrazu za pomocą przesłony.

## 2. Wnioski ogólne

Na podstawie przeprowadzonej analizy zagadnienia oraz na podstawie wyników badań własnych omówionych powyżej można sformułować pewne wnioski, które przedstawiamy poniżej.

**2.1. Konieczność rozwijania badań reologicznych własności materiałów elastooptycznych.** W obecnym stanie rozwoju metod elastooptyki dalszy ich rozwój uwarunkowany jest postępowaniem w dziedzinie badań elastooptycznych własności materiałów w możliwie szerokim zakresie. Wartość jednego z błędów pomiarowych, nazwanego przez nas błędem materiałowym, przy wielu badaniach osiąga i przewyższa wartość sumy wszystkich innych przypadkowych i systematycznych błędów pomiarowych. Zwiększenie dokładności pomiaru przy zastosowaniu opracowanych już metod oraz rozwijanie nowych metod lub doskonalenie istniejących wymaga dokładnego poznania własności stosowanych materiałów, występujących w badaniu parametrów w pełnym zakresie zmienności. Podkreślić należy, że nie tylko ekstrapolacja otrzymanych zależności nie jest w ogólnym przypadku dopuszczalna, ale również interpolacja może prowadzić do dużych błędów (punkty pomiarowe powinny więc być dostatecznie zagęszczone).

Jednym z podstawowych badań w tym zakresie jest badanie przy obciążeniach statycznych długotrwałych, trwających nie krócej na ogół niż 300-500 godzin; badania kilku lub kilkunastu godzinne dają niezupełny lub nawet zupełnie fałszywy obraz badanego zjawiska.

Istnieje związek pomiędzy przebiegiem zjawiska pełzania i nawrotu optycznego przy obciążeniach długotrwałych a zmianą efektu elastooptycznego jako funkcji temperatury przy stosowaniu metody zamrażania naprężeń. Pożądane jest uzupełnianie badań statycznych badaniami przy obciążeniach przemiennych.

Na pełzanie elastooptyczne wywiera zasadniczy wpływ charakter pola naprężeń, np. dla żywicy P-6 pełzanie elastooptyczne przebiega znacznie szybciej w dwuwymiarowym stanie naprężenia niż w jednowymiarowym.

W dalszym ciągu wykazaliśmy, że obciążenie przemiennie nałożone na obciążenie statyczne wywiera zasadniczy wpływ na prędkość nawrotu optycznego oraz na wartość trwałego efektu elastooptycznego. Na podstawie otrzymanych wyników wnosić można, że prawdopodobne jest skrócenie typowych statycznych badań pełzania i nawrotu optycznego przez zastosowanie tzw. wibropełzania. Otrzymane wyniki doprowadziły do wniosku, że badania elastooptycznych własności materiałów przy obciążeniach zmiennych, w tym badania wibropełzania, dostarczą bardzo istotnych informacji o strukturze i własnościach materiału i pozwolą na pogłębienie interpretacji zależności elastooptycznych otrzymywanych przy obciążeniach statycznych.

Otrzymane wyniki wskazują, iż dla uzupełnienia oraz zweryfikowania strukturalnej interpretacji otrzymywanych zależności elastooptycznych niezbędne są badania relaksacji optycznej oraz nawrotu po relaksacji; badania te są również niezbędne dla uzasadnienia fizycznej interpretacji opracowywanych zależności reologicznych.

## 2.2. Metoda i technika badań elastooptycznych własności materiałów.

Stosowana przez wielu badaczy metoda oraz technika badań własności materiałów na próbkach pryzmatycznych zginanych czystym momentem dostarcza danych, które są na ogół nieporównywalne, nawet jeśli się uwzględni zmianę pola naprężeń, wywołaną skończoną krzywizną obciążonej pryzmatycznej próbki. Podstawowym badaniem elastooptycznych własności materiałów jest badanie na próbkach, w których panuje w przybliżeniu jednoosiowe, jednorodne pole naprężeń.

Opracowana metoda badania podstawowych zależności elastooptycznych na rozciąganych próbkach posiadających kształt smukłego klina, przechodzącego w część pryzmatyczną umożliwia bezpośrednie wyznaczanie zależności elastooptycznych w dowolnej chwili.

Badania przy użyciu próbek zginanych stanowią uzupełnienie badań przy rozciąganiu lub przy ściskaniu oraz pozwalają ocenić wzajemny wpływ pełzania mechanicznego oraz pełzania optycznego na pole izochrom. Przy dokładnych badaniach elastooptycznych nie można zaniedbywać zmian w czasie pól naprężeń wywołanych pełzaniem mechanicznym.

Pełzanie optyczne można eliminować stosując obciążenia przemiennie przy zachowaniu warunków pomiaru zwłaszcza odnośnie temperatury modelu. Położenie początkowych punktów na krzywych pełzania optycznego można wyznaczyć z dużą dokładnością stosując przemiennie obciążenie próbki (tzw. dynamiczna metoda eliminowania pełzania optycznego).

Powstawaniu trwałego efektu elastooptycznego nie towarzyszy w ogólnym przypadku zmiana dyspersji dwójłomności, tak że nie można wtedy traktować zmiany dyspersji dwójłomności jako miary odkształceń plastycznych.

Wyniki badań wskazują, iż opracowana i zastosowana metoda i technika badań własności elastooptycznych materiałów (tak przy obciążeniach statycznych jak i przemiennych), dostarcza wyniki powtarzalne, przy czym rozrzut punktów pomiarowych nie przekracza w ogólnym przypadku od 0,3% do 0,5%. Powyższe wyniki wskazują również, że opracowana i wykonana aparatura spełnia stawiane jej wymagania.

W pracy wykazano, że program oraz interpretacja wyników badań elastooptycznych własności materiałów opierać się musi na wynikach badań struktury tworzywa i jego własności fizyko-chemicznych.

**2.5. Charakterystyczne własności zbadanych materiałów.** Wpływ pełzania optycznego CR-39 na dokładność wyników jest znacznie mniejszy niż by to wynikało z samych krzywych pełzania optycznego, jeśli uwzględnić charakter pełzania mechanicznego; tym niemniej w przypadku karbów ostrych zniekształcenie wyników może być znaczne.

Zywica P-6 oraz żywica VP-1527 posiadają charakterystykę własności elastooptycznych zmienną w bardzo szerokich granicach zależnie od stopnia usieciowania (od charakterystyki podobnej do charakterystyki polistyrenu aż do charakterystyki podobnej, w sensie znaku przyrostu efektu elastooptycznego, do charakterystyki CR-39).

Opierając się na cechach strukturalnych oraz własnościach fizyko-chemicznych żywicy CR-39, polistyrenu oraz żywicy P-6 podano w pracy strukturalną interpretację charakteru pełzania elastooptycznego dla żywic typu P-6, zwłaszcza dla zjawiska inwersji efektu elastooptycznego.

Zmieniając stosunek ilościowy różnych grup anizotropowych w tworzywie oraz zmieniając ich ruchliwość, zależną — w myśl interpretacji — od stopnia usieciowania, można otrzymać materiały o charakterystyce pełzania optycznego zmiennej w bardzo szerokich granicach.

Interpretacja powyższa została potwierdzona wynikami badań o różnym stopniu usieciowania żywicy P-6.

Najczęściej stosowany model reologiczny tworzyw sztucznych (w postaci szeregowo połączonych liniowych modeli *Maxwella* i *Kelvina*) opisuje wprawdzie z pewną dokładnością własności mechaniczne badanych żywic, ale całkowicie zawodzi przy opisie własności elastooptycznych.

Ze znalezionych dla żywicy CR-39 prawdziwości, które powinien spełniać model reologiczny, wynika, że model reologiczny własności elastooptycznych żywicy CR-39 powinien być nieliniowy.

Poszukiwanie poprawnego modelu reologicznego własności elastooptycznych, posiadającego określony sens fizyczny, powinno być poprzedzane badaniami struktury oraz własności fizyko-chemicznych materiału. Dotyczy to zwłaszcza żywic o bardziej złożonej budowie, jak żywice typu P-6 lub VP-1527.

Wreszcie wykazano, iż istnieje możliwość syntezy materiału do badań elastooptycznych na podstawie żywicy poliestrowej nie wykazującej pełzania optycznego w szerokim zakresie naprężeń oraz czasu.

**2.4. Wnioski dotyczące metody i techniki badań elastooptycznych.** Opracowano tzw. dynamiczną metodę eliminowania pełzania optycznego do wyznaczania współczynników kształtu przy badaniach bardzo dokładnych.

Zaproponowano dynamiczną metodę badania pól naprężeń w tarczach grubych, pozwalającą na dokładne wyznaczenie rozkładu naprężeń w okolicy karbów tarcz grubych.

Na podstawie otrzymanych wyników opracowano założenia funkcjonalne i konstrukcyjne dla aparatury elastooptycznej umożliwiającej wykonywanie współczesnych badań elastooptycznych, w tym również badań własności materiałów z niezbędną dokładnością. Na podstawie tych założeń skonstruowano uniwersalny polaryskop elastooptyczny (typ JP-10) oraz urządzenie do dynamicznych badań elastooptycznych przy obciążeniach periodycznie zmiennych.

Ustalono założenia dla prac nad nowymi niezbędnymi w kraju materiałami do badań elastooptycznych.

Sformułowano minimalne wymagania znajomości elastooptycznych własności materiałów z punktu widzenia dokładności pomiaru oraz poprawności stosowania prawdopodobieństwa modelowego.

### 3. Dalsze badania

Jako kontynuację i rozwinięcie niniejszej pracy oraz w oparciu o jej wyniki przewidujemy (poza typowymi badaniami własności materiałów) badania w dwóch głównych kierunkach: badania stanów sprężystych i niesprężystych w tarczach grubych oraz badania szczególnego przypadku pełzania przy obciążeniach zmiennych, mianowicie przy obciążeniu statycznym z nałożonym na niego obciążeniem przemiennym, czyli badania wibroppełzania.

Celowość przeprowadzenia badań w pierwszym kierunku nie wymaga dalszego uzasadnienia poza uzasadnieniem podanym poprzednio.

Badania wibropelzania, poza ogólnym aspektem naukowym i praktycznym, posiadają duże znaczenie dla dalszych badań pelzania optycznego, które muszą być wykonane ze względu na konieczność naukowego uzasadnienia przydatności materiałów modelowych w tym sztucznych żywicy do badań elastooptycznych a przede wszystkim do badań metodą zamrażania; w szczególności opracowane przez J. Słowikowską materiały do badań elastooptycznych o zmiennych w szerokich granicach właściwościach reologicznych, które będą wkrótce oddane do dyspozycji krajowych laboratoriów elastooptyki, muszą być dokładnie zbadane co do ich przydatności również do badań trójwymiarowych stanów naprężenia. Ponieważ badania tego typu są z reguły długotrwałe, ewentualna możliwość skrócenia ich przez zastąpienie, chociażby częściowe, statycznych badań pelzania badaniami wibropelzania posiada duże znaczenie nie tylko dla ośrodka prowadzącego te badania, ale i dla ośrodków zainteresowanych wynikami badań, ponieważ stanowiąc będą dla nich podstawę badań pól naprężeń metodą zamrażania oraz metodą światła rozproszonego.

Dalsze badania pelzania będą miały również na celu wyprowadzenie dla związku pomiędzy dwójłomnością a naprężeniem, czasem, temperaturą i stopniem polimeryzacji, zależności reologicznych posiadających prawidłową interpretację fizykalną.

Istotną rzeczą będzie ustalenie, jaki związek istnieje pomiędzy wartością wydłużenia i czasem działania obciążenia a dwójłomnością orientacyjną, wywołaną w żywicach poliestrowych prawdopodobnie głównie porządkowaniem się grup anizotropowych a przede wszystkim pierścieni benzenowych. Wyjaśnienie tego zjawiska pozwoli prawdopodobnie na ustalenie bezpośrednich zależności pomiędzy pelzaniem mechanicznym a pelzaniem optycznym oraz pomiędzy odkształceniem plastycznym a trwałym efektem elastooptycznym oraz zmianą dyspersji dwójłomności.

Kontynuację i uzupełnienie badań pelzania przy jednoosiowym stanie naprężenia stanowią badania przy dwuwymiarowym stanie naprężeń. Przeprowadzenie tych badań jest niezbędne, gdyż dopiero ich wyniki uzupełnione skalującymi badaniami pelzania przy niejednorodnych polach naprężeń pozwolą na dokładne ustalenie wartości błędu materiałowego, spowodowanego pelzaniem mechanicznym i optycznym materiału modelu.

Reasumując uważamy, że jest rzeczą celową dalsze badanie następujących problemów (których opracowanie stworzy podstawy naukowe dalszego rozwoju metod elastooptycznych):

- (1) badania wibropelzania i wibrorelaksacji;
- (2) badania strukturalne; badania związku pomiędzy budową materiału a jego własnościami reologicznymi; opracowywanie materiałów o żądanych własnościach reologicznych;
- (3) badania pelzania i relaksacji w ogólnym stanie naprężenia;



- (4) badania pól naprężeń od miejscowych odkształceń plastycznych;
- (5) badania przebiegów nieustalonych i udarowych;
- (6) badania zagadnień termosprężystych z uwzględnieniem wpływu temperatury na wartości stałych sprężystych materiału<sup>2</sup>.

Terminologia użyta w pracy opiera się na nomenklaturze, którą przyjęliśmy w swych poprzednich pracach z dziedziny elastooptyki, przy częściowym wykorzystaniu nomenklatury, wprowadzonej uprzednio przez M. T. Hubera, Z. Gubrynowicza oraz M. A. Popiela.

#### Literatura cytowana w tekście

[1] J. T. Pindera, *Współczesne kierunki rozwoju metod elastooptyki i możliwości ich zastosowania do rozwiązywania zagadnień mechaniki budowli*, Księga pamiątkowa W. Wierzbickiego, Warszawa 1959.

[2] J. T. Pindera, *Badania pewnych reologicznych własności elastooptycznych kilku żywic poliestrowych*, Cz. I. *Metodyka i technika badania przy obciążeniach statycznych oraz periodycznie zmiennych*, Rozpr. inżyn., 3, 7 (1959), Cz. II. *Badania i interpretacja wyników*, Rozpr. inżyn., 4, 7 (1959).

#### Резюме

#### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОТОУПРУГИХ СВОЙСТВ НЕСКОЛЬКИХ ПОЛИЭСТРОВЫХ СМОЛ (III)

Часть III. О методах фотоупругих исследований в свете экспериментов

Третья часть является завершением цикла работ касающихся реологических исследований фотоупругих материалов. В ней даются также заключения вытекающие из проведенных раньше исследований автора.

Дается характеристика исследуемых материалов с точки зрения точности измерения и формулируются общие критерии пригодности материала для изготовления линейно-фотоупругих моделей, учитывая при этом ползучесть материала.

Предлагается несколько новых методов исследования, как например динамический метод элиминирования фотоупругой ползучести, динамический метод сокращения времени исследования напряженных

<sup>2</sup> Niniejszym wyrażam serdeczne podziękowanie p. prof. Stefanowi Ziembie za pomoc i zachętę przy wykonywaniu tej pracy oraz p. prof. Jarosławowi Naleszkiewiczowi, p. prof. Marianowi Januszowi oraz p. prof. Edmundowi Szczepaniakowi za cenne uwagi przy ostatecznej redakcji pracy.

Dziękuję również współpracownikom, mianowicie p. Irenie Słowikowskiej za współpracę przy analizie budowy materiałów, p. Andrzejowi Raczkowskiemu za opracowanie wyników pomiarów, panom Januszowi Jankowskiemu, Józefowi Siekluckiemu i Waldemarowi Banaszkiwiczowi za współpracę przy wykonywaniu badań doświadczalnych oraz p. Zygmuntowi Kobyliskiemu za współpracę przy konstruowaniu aparatury.

полей в окрестностях выточек в толстых дисках и устанавливаются требования, касающиеся исследований имеющих целью определить характеристику фотоупругих материалов.

Дается описание универсального фотоупругого полярископа удовлетворяющего требованиям, вытекающим из анализа результатов исследований.

Остановиваясь на полученных результатах автор делает следующие заключение:

В настоящем состоянии развития методов фотоупругости возникла необходимость углубления и расширения реологических исследований свойств фотоупругих материалов, как напр. исследование ползучести, релаксации, последствий после ползучести и после релаксации, а также вибро-ползучести и вибро-релаксации; интерпретация полученных фотоупругих зависимостей должна основываться на результатах структуры материала и его физико-химических свойств.

Исследования свойств фотоупругих материалов при использовании образцов, изгибаемых чистым моментом, ввиду сложности фотоупругих реологических процессов не дают возможности получить удовлетворительные реологические зависимости; в качестве основных фотоупругих реологических свойств следовало бы рассматривать исследования при использовании образцов, в которых существует возможно одноосное и однородное напряженное поле. Предлагается проведение исследований фотоупругой ползучести на растягиваемых образцах в форме смуклого клина переходящего в призматическую часть.

Результаты исследований не подтвердили предположений, что изменение дисперсии дупереломления может быть общей мерой пластической деформации фотоупругих материалов.

Наблюдаемые характерные формы кривых ползучести и фотоупругого последствия и устойчивый фотоупругий эффект является, главным образом, функцией степени последствия различных анизотропных групп, подвижность которых зависит от степени последствия материала. Эта интерпретация позволяет сделать ряд практических заключений, в том числе заключений, касающихся разработки материалов, обладающих требуемыми фотоупругими, реологическими свойствами, а также касающихся метода замораживания.

Исследования показали, что реологическая модель исследуемых материалов отличается от модели, состоящей из последовательно соединенных моделей Максвелла и Кельвина и что эта модель является нелинейной.

В заключение дается эскиз дальнейших исследований.

## Summary

### INVESTIGATION OF CERTAIN RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOME POLYESTER RESINS FROM THE POINT OF VIEW OF PHOTOELASTICITY (III)

#### Part III. Photoelastic investigations method in the light of experiment

This is the last of a set of papers on the investigations of the rheologic properties of photoelastic materials, containing conclusions from the author's investigations carried out hitherto.

The author gives a characteristic of the materials tested from the point view of the accuracy of measurement and formulates general criteria of suitability of a material for the purpose of making linearly elastic models, taking creep phenomena into consideration.

Several new investigation methods are proposed such as the dynamic method for eliminating the photoelastic creep, the dynamic method for reducing the time of creep and relaxation tests and the dynamic method for testing stress fields in the neighbourhood of notches in thick plates. Requirements for experimental investigations of the most characteristic properties of photoelastic materials are established.

The paper contains a description of a universal photoelastic polariscope satisfying the requirements following from the analysis of the test results.

The following conclusions are drawn from the results obtained.

At the present state of development of the photoelastic methods it is necessary to intensify the investigations of the rheologic properties of photoelastic materials such as creep, relaxation, creep and relaxation recovery, vibro-creep and vibro-relaxation, and to widen their scope. The interpretation of the photoelastic relations should be based on the results of investigations of the structure of the material and its physical and chemical properties.

Investigations of the properties of photoelastic materials by means of prismatic test pieces subjected to pure bending does not enable us, in view of the complexity of the rheologic processes, to obtain correct results. Therefore investigations by means of test-pieces under possibly one-axial and homogeneous stress should be treated as a basic investigation of the rheologic properties in photoelasticity. It is proposed to perform photoelastic creep tests using test-pieces in the form of slender wedges passing into prismatic parts.

The test results did not confirm the suppositions that the change of dispersion of the birefringence may constitute a general measure of plastic strain of photoelastic materials.

The characteristic forms of curves of photoelastic creep and recovery observed may be explained by assuming that photoelastic creep, recov-

ery and durable photoelastic effect are above all a function of orientation of various anisotropic groups the rotation of which depends on the degree of cross-linking of the material. This interpretation enables us to draw a number of practical conclusions, among others conclusions concerning the preparation of photoelastic materials of desired rheologic properties and concerning the freezing method.

Investigations have shown that the rheologic type of the materials tested differs from that of the combined linear Maxwell-Kelvin model.

Further investigations are announced.

**ZAKŁAD BUDOWNICTWA  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

*Praca została złożona w Redakcji dnia 19 kwietnia 1959 r.*

---