

JERZY TADEUSZ PINDERA

**BADANIA PEWNYCH REOLOGICZNYCH WŁASNOŚCI  
ELASTOOPTYCZNYCH KILKU ŻYWIC POLIESTROWYCH (I)**

**ROZPRAWY  
INŻYNIERSKIE  
CXXX**

## SPIS TREŚCI

Część I. Metoda i technika badań przy obciążeniach statycznych oraz periodycznie zmiennych	
1. Cel pracy	363
2. Przegląd niektórych prac o pełzaniu elastooptycznym i mechanicznym materiałów do badań elastooptycznych	364
2.1. Badania ksylonitu	364
2.2. Badania CR-39	365
2.3. Badania plexiglasu	365
2.4. Badania inne	367
3. Celowość, rodzaj i zakres przeprowadzonych badań	371
4. Charakterystyka badanych materiałów w oparciu o opublikowane wyniki badań	373
4.1. Charakterystyka ogólna	373
4.2. Własności żywicy CR-39	376
4.3. Własności żywicy VP-1527	376
4.4. Własności żywicy P-6	377
4.5. Porównanie badanych materiałów	378
5. Metoda badań	379
5.1. Wpływ temperatury	379
5.2. Wpływ stanu naprężenia i odkształcenia	380
5.3. Wpływ długości fali świetlnej	382
5.4. Wpływ czasu badania	382
5.5. Wpływ charakteru obciążenia	383
6. Opis modeli	384
6.1. Model do badań na rozciąganie	384
6.2. Model do badań na zginanie	386
7. Technika badań, aparatura	389
7.1. Dane ogólne	389
7.2. Badania statyczne	392
7.3. Badania dynamiczne	396

CZEŚĆ I. METODA I TECHNIKA BADAŃ  
PRZY OBCIĄŻENIACH STATYCZNYCH ORAZ PERIODYCZNIEM ZMIENNYCH

**Cel pracy**

Badania elastoptycznych i mechanicznych własności materiałów na modele elastoptyczne stanowią jeden z podstawowych działów elastoptyki, [1]. Wszelki postęp w tej dziedzinie wpływa w sposób zasadniczy na rozwój metodyki i techniki badań elastoptycznych. W obecnym stanie zagadnienia daje się zauważyć wyraźna dysproporcja między rozwojem poszczególnych metod elastoptyki a rozwojem badań własności materiałów na modele. Metody i techniki elastoptycznych badań płyt zginanych, badań dynamicznych, badań metodą zamrażania i inne zostały rozwinięte i opracowane szczegółowo. Badania te są oparte albo na intuicyjnie ekstrapolowanych własnościach materiałów modeli bez dostatecznego uzasadnienia naukowego, albo na dość pobieżnych badaniach, jak np. na badaniach przydatności materiałów dla metody zamrażania, w których jednak pomija się pełzanie.

Niezbędne więc jest rozszerzenie i pogłębienie badań własności materiałów używanych na modele elastoptyczne. Niezbędne jest również przedyskutowanie metod i techniki badań materiałów głównie z punktu widzenia jednoznaczności wyników.

Lepsze poznanie własności materiałów stanowić będzie podstawę do doskonalenia metodyki i techniki pomiarów elastoptycznych oraz do ściślejszego ustalenia kryteriów dla poprawnego stosowania praw podobieństwa modelowego.

Najprzejrzystszym i najwygodniejszym sposobem opisanie własności materiałów a zwłaszcza charakteru pełzania jest znalezienie odpowiednich zależności analitycznych. Ustalenie takich zależności nawet tylko dla pełzania mechanicznego sprawia często poważne trudności. Jako ilustracja powyższego służyć może ujęcie tego zagadnienia przez W. Stauffera i A. Kellera zawarte w pracy [2]:

Ein Zweck dieser Ausführungen soll u. a. sein, aufzuzeigen, dass die klassische Kriechkurve in vielen Fällen tatsächlich gewonnen wird, dass aber sehr häufig Abweichungen davon vorkommen, ferner, dass Bemühungen, um aus der Kriech-

kurve, insbesondere aus ihrer anfänglichen Form, auf das spätere Verhalten zu schliessen, als vage Spekulationen erachten werden müssen. Die Kriechkurven gehorchen nur selten einfachen mathematischen Gesetzen, so daß es als unmöglich erscheint, aus Berechnungen das langzeitige Verhalten mit hinreichender Genauigkeit vorauszusagen.

Tym niemniej celowe i niezbędne są próby analitycznego ujęcia zależności mechanicznych i optycznych własności materiałów na modele. Starać się przy tym należy o możliwie poprawny schemat fizyczny (strukturalny) lub fenomenologiczny badanego zjawiska i o właściwe przedyskutowanie otrzymanych zależności w oparciu o doświadczalną weryfikację.

Jednym z celów niniejszej pracy jest wykazanie niezbędności szerszych badań własności materiałów elastooptycznych, wykazanie użyteczności wyników tych badań, wykazanie wpływu takich badań na metodę i technikę pomiarów elastooptycznych oraz omówienie zagadnienia samej metody badań własności materiałów.

## 2. Przegląd niektórych prac o pełzaniu elastooptycznym i mechanicznym materiałów do badań elastooptycznych

2.1. Badania ksylonitu, [3]. Prace z dziedziny pełzania omówione przez Cokera i Filona posiadają już raczej historyczne znaczenie z punktu widzenia ich wyników tak ze względu na używane wówczas materiały, jak i na bardzo krótkie, rzędu kilkudziesięciu minut, okresy badania. Ogólne natomiast zasady badań pełzania oraz przyjęta terminologia pozostały niezmienione. Autorzy w swej klasycznej pracy, [3], wprowadzili terminy «pełzanie optyczne» i «optyczny nawrót» (*optical recovery*), analogiczne do odpowiednich terminów dotyczących zmian wydłużeń przy rozciąganiu w określonym okresie czasu.

Dla ksylonitu (rodzaj celuloidu) Filon i Jessop ustalili następujące zależności:

na pełzanie mechaniczne

$$(1) \quad s = s_0 + at^{1/3} + bt;$$

na pełzanie optyczne

$$(2) \quad r = r_0 + pt^{1/3} + qt.$$

We wzorach tych  $s$  i  $r$  oznaczają odpowiednio wartość wydłużenia oraz opóźnienia względnego,  $s_0$  i  $r_0$  stałe dla danego obciążenia, proporcjonalne do siły obciążającej  $T$ ,  $a$  i  $p$  stałe dla danego obciążenia oraz  $b$  i  $q$  bardzo małe wielkości.

Wzory powyższe dają dobrą zgodność z doświadczeniem w okresie około jednej godziny. Zależność (2) została potwierdzona dla bakelitu.

Według Filona i Jessopa trudno jest jednak takie «mieszane» prawa przyjąć jako podstawową fizyczną interpretację dwójłomności wymuszonej, dlatego rozwinęli oni teorię opartą na dwufazowości materiału: materiał składa się z dwóch składników, z których jeden jest sprężysty, drugi zaś plastyczny. Założenie to jednak ze strukturalnego punktu widzenia posiada obecnie zasadniczo historyczne znaczenie, chociaż było i jest wielokrotnie stosowane, m. in. przy interpretacji zjawiska «zamrażania naprężeń».

Dla związku pomiędzy opóźnieniem względnym a naprężeniem i wydłużeniem Filon i Jessop ustalili następującą liniową zależność:

$$(3) \quad r = aT + \beta s,$$

gdzie  $a$  i  $\beta$  są to stałe dla danej próbki, a  $T$  jest naprężeniem.

Stałe  $a$  i  $\beta$  zależą od czasu. Ponieważ wzór (3) wyprowadzony został dla ksytonitu, można przypuszczać, że na wartość stałych  $a$  i  $\beta$  znaczny wpływ wywiera zmniejszanie się zawartości kamfory w celuloidzie z upływem czasu.

2.2. Badania CR-39, [4], [5]. W pracy [4] omawia się zagadnienie pełzania mechanicznego i elastooptycznego CR-39 tylko pod względem fenomenologicznym. Czas badania jest bardzo krótki — nie przekracza trzech godzin.

Badania pełzania wykonane były na zginanych beleczkach bez uzasadnienia teoretycznego wyników otrzymanych w taki sposób.

Badania tego typu mogą mieć jednak jedynie wartość porównawczą, ponieważ bez znajomości charakteru odkształceń materiału oraz wpływu odkształceń nieliniowo sprężystych na pole naprężeń z samego obrazu izochrom nie można oddzielić wpływu pełzania optycznego od wpływu zmian pola naprężeń. Zależność  $m = m(\sigma)$  zbadana została na próbce pryzmatycznej rozciąganej wzrastającym stopniowo obciążeniem w przeciągu 35 minut. Otrzymana w ten sposób krzywa  $m = m(\sigma)$  reprezentuje w rzeczywistości zależność  $m = m(\sigma, t)$ , gdzie  $t$  jest czasem. Krzywa ta posiada więc również tylko umowną wartość, zwłaszcza że wpływ czasu dla CR-39 jest bardzo znaczny. Autor nie wyprowadza zależności analitycznych.

Praca Hiltshera, [5], podaje zależność  $K = K(t)$  dla CR-39 pokrywającą się co do charakteru z wynikami badań Coolidge'a. Pewne różnice ilościowe spowodowane być mogą przyczynami przypadkowymi, zwłaszcza że nawet materiały sporządzone z takich samych monomerów jak Homalite i CR-39 różnią się nieco pewnymi własnościami. Również i Hiltsher nie wyprowadza żadnych wzorów matematycznych.

2.3. Badania plexiglasu. Praca Aubauda, [6], podaje zbadane zależności pomiędzy dwójłomnością a naprężeniem jako funkcję czasu dla

plexiglasu M222. A u b a u d stosował dwie metody pomiaru: pomiar przy użyciu próbek, w których występuje jednorodne pole naprężeń, na przykład przy użyciu rozciąganego pręta pryzmatycznego, oraz pomiar na próbkach, w których występuje niejednorodne ale ściśle określone pole naprężeń przy założeniu liniowej charakterystyki materiału, np. pręta obciążonego czystym momentem.

A u b a u d otrzymał wyraźną różnicę ilościową przy tym samym charakterze krzywych pomiędzy zależnościami  $m = m(\sigma)$  dla rozciągania i ściskania zarówno przy przecię pryzmatycznym obciążonym siłą osiową, jak i dla pryzmatycznej belki zginanej czystym momentem. Przy badaniu belki zginanej autor otrzymał jakościową różnicę we wzajemnym położeniu krzywych dla rozciągania i ściskania przy różnych wartościach momentu gnącego. Różnicy tej autor nie wyjaśnia.

A u b a u d wysnuwa następujące wnioski:

- (1) zależność pomiędzy naprężeniem a dwójłomnością nie jest liniowa, szczególnie przy rozciąganiu,
- (2) zależność powyższa jest różna dla rozciągania i ściskania,
- (3) wyznaczanie doświadczalne powyższej zależności dało wyniki różne, zależne od stosowanej metody,
- (4) zgodnie z ideą N e u m a n n a wydaje się, że zależność pomiędzy wydłużeniem a dwójłomnością jest liniowa.

Autor jest zdania, że metoda, w której stosuje się próbkę pryzmatyczną obciążoną siłą osiową, wydaje się bardziej interesująca.

Określając stałą elastooptyczną  $C$  według zależności

$$n_1 - n_2 = C(\sigma_1 - \sigma_2),$$

gdzie  $n_1$  i  $n_2$  są współczynnikami załamania światła dla promieni drgających w płaszczyznach  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$ , autor przyjmuje dla  $C$  zależność empiryczną analogiczną do zależności dla histerezy sprężystej:

$$C = C_0 + C_1 t^{1/3},$$

gdzie  $C_0$  i  $C_1$  są stałe, zaś  $t$  oznacza czas.

Dla średnich wartości naprężeń w zakresie 2 godzin działania obciążenia A u b a u d otrzymał następujące wartości współczynników:

$$C = 4,42 + 0,126 t^{1/3}.$$

A u b a u d w konkluzji podkreśla niezbędność badań pełzania optycznego materiału każdej użytej płyty.

Praca J. Marina i J. E. Griffitha, [7], dotyczy tylko mechanicznego pełzania i relaksacji plexiglasu IIA. Badania prowadzone były przy stałej wilgotności względnej  $50\% \pm 2\%$  oraz przy stałej temperaturze  $25,6^\circ\text{C} \pm 1,1^\circ\text{C}$ . Czas badania na pełzanie wynosił 250 godzin.

Badane próbki były rozciągane, ściskane oraz zginane. Przyjęto następującą postać zależności empirycznej pomiędzy naprężeniem, pełzaniem mechanicznym i czasem, jako pozostającą w dobrej zgodności z doświadczeniem:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p' + \varepsilon_p'' + \varepsilon_p''',$$

gdzie  $\varepsilon_e$  oznacza wydłużenie sprężyste,  $\varepsilon_p'$  wydłużenie plastyczne,  $\varepsilon_p''$  wydłużenie lepko-sprężyste oraz  $\varepsilon_p'''$  minimalną wartość trwałego wydłużenia.

Powyższe wyrazy określone są w przybliżeniu następującymi zależnościami:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}, \quad \varepsilon_p' = k_1 \sigma^n, \quad \varepsilon_p'' = k_2 \sigma^n (1 - e^{-qt}), \quad \varepsilon_p''' = k_3 \sigma^n t,$$

gdzie  $\sigma$  oznacza naprężenie,  $t$  czas,  $e$  podstawę logarytmów naturalnych oraz  $E$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  i  $q$  stałe doświadczalne.

Ponieważ stała  $k_1$  w danym przypadku jest prawie równa zero, przyjęta zależność posiada postać

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + k_2 \sigma^n (1 - e^{-qt}) + k_3 \sigma^n t.$$

Stwierdzono zadowalającą zgodność powyższej zależności z doświadczeniem.

Również przy badaniach relaksacji uzyskano zadowalającą zgodność wyników doświadczalnych z wynikami obliczonymi według zależności, które zostały wyprowadzone na podstawie badań pełzania.

**2.4. Badania inne.** A. J. Gu z e t t i w pracy [8] omawia przydatność modelu idealnego lepko-sprężystego ciała złożonego z szeregowo połączonego modelu M a x w e l l a i modelu K e l v i n a, w którym panuje stałe naprężenie, do opisu zachowania się niektórych sztucznych żywic. Zgodnie z przyjętym modelem wykazuje on trzy typy odkształceń: odkształcenie sprężyste, proporcjonalne do naprężenia, całkowicie odwracalne; opóźnione odkształcenie sprężyste, proporcjonalne do naprężenia oraz zależne od czasu; lepkie płynięcie, nieodwracalne (przyrost odkształcenia jest proporcjonalny do naprężenia).

Niesieciowane polimery przy podwyższonych temperaturach zachowują się w sposób bardziej złożony (zwłaszcza odnośnie opóźnionych odkształceń sprężystych), jednakże przyjęty model może być przydatny. Wyidealizowane usieciowane polimery nie mogą wykazywać lepkiego płynięcia, dopóki walencyjne wiązania nie będą zniszczone. Tego typu tworzywo wykazuje odkształcenia sprężyste natychmiastowe oraz sprężyste opóźnione, dążące do pewnej wartości. W rzeczywistych usieciowanych polimerach opóźnione odkształcenia sprężyste nie są całkowicie odwracalne.

Praca B. Hiltscchera, [5], omawia własności elastoptyczne większości stosowanych materiałów na modele. Żadnych szczegółowych wzorów dla pełzania Hiltsccher nie wprowadza. Przy badaniach belki zginanej autor wprowadza poprawkę uwzględniającą nieliniowy rozkład naprężeń w przekroju belki, spowodowany jej zakrzywieniem; poprawka wprowadzona została na podstawie wzorów dla belki zakrzywionej o osi w kształcie łuku koła.

Jako wielkość charakteryzującą pełzanie optyczne autor wprowadza względną optyczną prędkość pełzania  $\varphi_{\sigma,t}$  (w % na minutę) dla danej wartości naprężenia  $\sigma$  oraz czasu badania  $t$ :

$$\varphi_{\sigma,t} = \frac{d(K\delta)}{dt} \frac{100}{K\delta}.$$

Wskazując na trudność i znaczne koszty badań przy użyciu rozciąganych i ściskanych próbek pryzmatycznych (w tym również i na trudność uzyskania równomiernego rozkładu naprężeń w badanych przekrojach), autor proponuje zastąpienie niezbędnych serii badań na rozciąganie i ściskanie przy stałych obciążeniach i zmiennym czasie jednym badaniem belki zginanej czystym momentem z uwzględnieniem omawianej wyżej poprawki na krzywiznę belki. Hiltsccher nie przytacza ani teoretycznego, ani doświadczalnego uzasadnienia tej metody podając głównie względy natury ekonomicznej.

Ze względu na obraną metodę i technikę badania Hiltsccher wprowadza pojęcie odchylenia od proporcjonalności  $\eta$ . Jest to procentowe odchylenie rzędu izochromy krawędziowej od wartości wyznaczonej przez przecięcie się stycznej do wykresu rozkładu izochrom w przekroju poprzecznym belki, poprowadzonej z punktu na osi belki, z krawędzią belki przy uwzględnieniu poprawki na zakrzywienie osi:

$$\eta = 100 \frac{m_{rz} - m_n}{m_n},$$

gdzie  $m_{rz}$  oznacza rzeczywisty rząd izochromy na krawędzi belki, zaś  $m_n$  oznacza obliczony (nominalny) rząd izochromy na krawędzi.

Dla efektu elastoptycznego autor podaje wzór

$$m = f_1(\sigma) + f_2(\epsilon)$$

nie przeprowadzając badania funkcji  $f_1$  i  $f_2$ .

W pracy [9] R. Hiltsccher wprowadza znaną hipotezę dwufazowości materiału przy interpretacji wyników badań polistyrenu, uzyskanych na próbkach pryzmatycznych ściskanych osiowo. Badania prowadzone były tylko przy ściskaniu, gdyż przy rozciąganiu próbki pękały, przy czym występował kruchy złom.



Zjawisko obniżania się rzędu izochromy w miarę upływu czasu wiąże autor z uplastycznianiem się materiału zakładając, że faza sprężysta materiału wykazuje ujemny efekt elastooptyczny, zaś faza uplastyczniająca się — dodatni.

Ten sam autor w pracy [10] przeprowadza strukturalną analizę zjawiska zmiany w czasie efektu elastooptycznego dla polistyrenu, tłumacząc spadek rzędu izochrom w czasie orientacją łańcuchów drobin w kierunku głównego wydłużenia, przy wydłużeniach plastycznych. W wyniku tej orientacji optycznie anizotropowe pierścienie benzenowe ustawiają się tak, że ich płaszczyzny przybierają położenie prostopadłe do kierunku głównego wydłużenia. W wyniku tej orientacji w miarę narastania odkształceń plastycznych dwójłomność orientacyjna przeważa coraz bardziej nad dwójłomnością naprężeniową, gdyż znaki ich są przeciwne; przy znacznych odkształceniach plastycznych efekt elastooptyczny jest wynikiem prawie wyłącznie dwójłomności orientacyjnej.

Pełzanie mechaniczne polistyrenu posiada według badań *Hiltschera* zasadniczo ten sam charakter co pełzanie metali. Przy niskich wartościach naprężeń występuje praktycznie biorąc tylko opóźnione odkształcenie sprężyste, przy wyższych wartościach naprężeń występuje odkształcenie sprężyste oraz odkształcenie spowodowane lepkiem płynięciem, co prowadzi do powstania odkształceń trwałych. Badania pełzania mechanicznego przeprowadzane były na próbkach ściskanych bez uwzględnienia zmiany w przekroju próbki w trakcie narastania odkształceń.

*J. Lessavre* w pracy [11] jako jeden z modeli termoplastycznego polimeru przyjmuje ten sam model co *i Guzetti* w pracy [8], mianowicie model stanowiący szeregową kombinację modelu *Maxwella* oraz modelu *Kelvina* (*Voigta*). Nazwą «odkształcenie sprężyste nie opóźnione» autor ten określa odkształcenie, które maleje do zera w okresie 30 sekund od chwili odciążenia.

*E. Mönch* w pracy [12] jako miarę odkształceń plastycznych w celuloidzie wprowadza za *H. Ambrosem* dyspersję dwójłomności, określaną zależnością

$$D = \frac{(m\lambda)_{Na} - (m\lambda)_{Hg}}{(m\lambda)_{Na}}$$

gdzie *Hg* oznacza niebieską linię rtęci.

Autor ten wyraża pogląd, że dyspersja dwójłomności stanowi wielkość, która łącznie z rzędem izochromy może być wykorzystana przy wyznaczaniach płaskich plastycznych stanów odkształceń oraz że dyspersja dwójłomności może prawdopodobnie bezpośrednio określać stopień odkształcenia plastycznego. Linie jednakowej dyspersji dwójłomności stanowiłyby linie jednakowych odkształceń plastycznych w przypadku jednorodnego pola odkształceń.

Autor stosuje prostą i szybką metodę wyznaczania zależności pomiędzy badanymi wielkościami w określonej chwili. Badana pryzmatyczna próbka jest rozciągana z określoną prędkością. Na podstawie trzech lub czterech takich prób wykonanych z różną prędkością rozciągania autor wyznacza tzw. «wypadkową» krzywą, łącząc punkty na krzywych, odpowiadające obranej chwili.

Wzorów autor nie wyprowadza.

N. I. Prigorowski w pracy [13] przyjmuje jako podstawową zależność dla efektu elastoptycznego poza przedziałem sprężystym następujący wzór:

$$m = \alpha\sigma + \beta\varepsilon,$$

gdzie wielkości  $\alpha$  i  $\beta$  zależą nie tylko od rodzaju materiału, ale również mogą się zmieniać w procesie obciążenia.

Autor podaje za Cokerem i Filonem, że np. dla żywicy  $\beta = 0$ , dla żelatyny  $\alpha = 0$ , zaś dla ksylonitu  $\alpha \neq 0$  oraz  $\beta \neq 0$ .

Prigorowski podkreśla, że zagadnienia powyższe nie są opracowane w dostatecznym stopniu.

Dla przedziału sprężystego, w zakresie temperatur poniżej punktu kruchości (poniżej punktu przemiany drugiego rzędu), autor identyfikuje zależności  $m = m(\sigma)$  oraz  $m = m(\varepsilon)$ :

$$m = m_\sigma = m_\varepsilon = (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{1}{K_\sigma} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \frac{1}{K_\varepsilon}.$$

R. Houwink w pracy [14] podaje tylko wykresy dla zmiany w czasie efektu elastoptycznego tłumacząc nieliniowe zmiany wartości efektu elastoptycznego przy relaksacji kauczuku wpływem samorzutnej wtórnej orientacji oraz wtórnej krystalizacji. Wartość efektu elastoptycznego z upływem czasu wzrastała z malejącą prędkością. Autor sugeruje podobieństwo zjawiska wtórnej orientacji do zjawiska podwójnego załamania prądowego.

M. M. Frocht i A. A. Thomson w pracy [15] podają, że dla celulooidu amerykańskiego możliwe jest ustalenie zależności efektu elastoptycznego tylko od naprężenia pomimo tego, że jak wiadomo z pracy [3] dla celulooidu efekt elastoptyczny zależy zarówno od naprężenia jak i od odkształcenia:  $m = f(\sigma, \varepsilon)$ . Wydłużenie jest zarówno funkcją czasu, jak i naprężenia:  $\varepsilon = g(\sigma, t)$ . Przez podstawienie prawej strony drugiego wzoru do wzoru pierwszego można otrzymać związek  $m = h(\sigma, t)$ . Badania autorów wykazały, że jeżeli  $t$  jest większe od pewnej wartości  $t_0$ , to zależność dwójłomności od czasu można pominąć, tak że ostatecznie otrzymuje się wzór  $m = k(\sigma)$ .

Jeżeli w trakcie badania przy odkształceniach plastycznych nie następuje odciążenie modelu, zależność powyższa jest jednoznaczna. Z badań

wynika, że  $t_0$  w przybliżeniu wynosi 4 godziny. Autorzy nie sugerują rozszerzenia stosowalności powyższych zależności na inne materiały ani nie szukają postaci funkcji  $k$ .

R. S. Stein, [16], tłumaczy zjawisko zmiany efektu elastooptycznego  $m = m(\sigma)$  z upływem czasu dla polistyrenu oraz metakrylanu metylu orientacją segmentów łańcucha cząsteczek, podkreślając zależność tego zjawiska od temperatury zwłaszcza w pobliżu punktu temperatury przemiany (punktu przemiany drugiego rzędu).

Wszystkie omówione wyżej prace oraz prace o charakterze ogólniejszym, jak np. prace [16] lub [17], wskazują na dużą trudność analitycznego opisanie pełzania mechanicznego i optycznego polimerów lub nawet na niecelowość poszukiwań wzorów matematycznych ze względu na duży wpływ parametrów ubocznych, zwłaszcza dla żywic termoutwardzalnych. Położenie punktu przemiany drugiego rzędu (przejście od stanu elastoplastycznego w stan szklisto kruchy) decydującego o podstawowych własnościach fizycznych polimeru zależy w znacznym stopniu, przy tej samej budowie polimeru, od wielkości cząsteczek, stopnia wysycenia wiązań itd. Są to parametry w dużym stopniu zależne od drobnych często zmian w procesie technologicznym.

Wydaje się, iż badania elastooptycznych własności materiałów przeznaczonych na modele, zwłaszcza przy obciążeniach długotrwałych, powinny określać przede wszystkim charakter przebiegu obserwowanych zjawisk, określać wzajemne stosunki obserwowanych wielkości fizycznych najbardziej istotne dla badań elastooptycznych, określać przedziały, w których charakter przebiegu zjawisk pozostaje taki sam, i dla tych przedziałów podać możliwie proste i możliwie dokładne związki pomiędzy poszczególnymi wielkościami fizycznymi. W obecnym stanie wiedzy nie jest możliwe opracowywanie dostatecznie dokładnych wzorów, określających elastooptyczne i mechaniczne własności materiałów na modele tylko na podstawie obserwacji bez analizy struktury materiałów oraz bez analizy podstawowych własności fizyko-chemicznych.

### 3. Celowość, rodzaj i zakres przeprowadzonych badań

Badania przeprowadzono dla następujących rodzajów żywic: żywica CR-39, żywica VP-1527 oraz żywica P-6. Celem wykonanych badań było ustalenie podstawowych zależności pomiędzy naprężeniem, odkształceniem, efektem elastooptycznym oraz czasem dla materiałów najczęściej stosowanych w laboratoriach krajowych na modele elastooptyczne. Najbardziej interesujące wydawało się zjawisko zmiany efektu elastooptycznego z upływem czasu, zwane często pełzaniem optycznym lub pełzaniem elastooptycznym. Ponieważ występujący w trakcie przeprowadzania po-

miarów elastoptycznych efekt pełzania, zwłaszcza pełzania optycznego, posiada zasadniczy wpływ na dokładność wyników, jako jeden z głównych celów pracy przyjęto opracowanie sposobu zmniejszenia wpływu pełzania optycznego na dokładność pomiarów. Wpływ ten można zmniejszać lub eliminować przez:

(a) ustalenie warunków pomiaru, przy których błąd pomiarowy spowodowany pełzaniem optycznym mieści się w dopuszczalnych granicach;

(b) opracowanie metody poprawiania wyników pomiaru na podstawie znajomości charakteru pełzania (eliminacja wpływu pełzania na drodze rachunkowej);

(c) opracowanie metody i techniki pomiaru zmniejszającej wartość pełzania optycznego (eliminacja pełzania na drodze fizycznej).

Następnym celem badań było sprawdzenie opublikowanych wyników podobnych badań, w szczególności sprawdzenie tezy E. Möncha, [12], że dyspersja dwójłomności jest miarą odkształceń plastycznych, oraz ocena metod badania w zakresie niesprężystym przy zastosowaniu zginania, [4], oraz mimośrodowego ściskania, [9] i [10].

Zagadnienie wykrycia zależności pomiędzy wartością naprężenia, czasem oraz charakterystyczną dla odkształceń trwałych zmianą efektu elastoptycznego traktowane było jako jeden z ubocznych wprowadzie, ale istotnych celów pracy.

Wyniki badań będą również stanowić podstawę dla późniejszych badań nad zastosowaniem żywic poliestrowych jako materiałów na modele trójwymiarowe, badane metodą «zamrażania naprężeń» oraz metodą światła rozproszonego. Z powyższego ujęcia zagadnienia wynika celowość wykonania przynajmniej podstawowych badań również przy obciążeniach zmiennych w zakresie od obciążeń quasi-statycznych do częstości porównywalnych z częstością drgań własnych modelu. Uzasadnione to jest w głównej mierze faktem, iż dla materiałów wykazujących znaczne pełzanie mechaniczne i optyczne przy konwencjonalnej metodzie badania nie jest możliwe bezpośrednie wyznaczenie wartości rzędu izochromy w początkowym punkcie czasowym ze względu na skończoną i ograniczoną prędkość wzrostu obciążenia od wartości zerowej do wartości maksymalnej. W praktyce laboratoryjnej przy badaniach pełzania realizuje się w przybliżeniu liniowy przyrost obciążenia, przy czym obciążenie osiąga wartość maksymalną po 5-15 sekundach od chwili rozpoczęcia obciążenia. W tym okresie pełzanie przebiega przy zmiennym naprężeniu. Nie znając zależności pomiędzy wartością efektu elastoptycznego, wartością naprężenia oraz czasem, nie można na drodze rachunkowej wyznaczyć początkowych rzędów izochrom. Zastosowanie specjalnej metody pomiaru, polegającej na wielokrotnej rejestracji w trakcie obciążenia równocześnie wartości efektu elastoptycznego oraz wartości obciążenia,

umożliwia wprawdzie wyznaczenie rzędów izochrom w dowolnej chwili przy znanej wartości naprężenia, jednak opracowywanie wyników pomiarów jest kłopotliwe, zaś końcowy błąd przy opracowywaniu wyników może być dość znaczny. Najprostszym sposobem wyznaczenia początkowych wartości izochrom jest ekstrapolacja krzywych do chwili  $t=0$ . Pożądanym jest sprawdzenie początkowej wartości izochromy przy zastosowaniu odmiennej metody i techniki pomiaru, np. przy obciążeniach periodycznych, jeśli częstotliwości maleją do zera.

Elastooptyczne badania dynamiczne wzbudzają w ostatnich latach coraz większe zainteresowanie. Badania te prowadzone są przy obciążeniach powtarzalnych oraz przy obciążeniach udarowych, jednorazowych. Niektórzy badacze, jak H. Schwieger, [18], [19], omijają wpływ mechanicznego i elastooptycznego pełzania materiału modelu stosując na modele szkło nie wykazujące pełzania mechanicznego ani optycznego. Inni stosują na modele żywice różnego typu przyjmując milcząco, iż własności elastooptyczne tych materiałów nie zależą praktycznie biorąc od charakteru działającego obciążenia. Jak dotąd brak jest prawie całkowicie materiału doświadczalnego dotyczącego elastooptycznych własności materiałów na modele przy obciążeniach zmiennych.

Biorąc powyższe pod uwagę jak również wyniki dotychczas opublikowanych badań dostępnych autorowi i uwzględniając aktualne potrzeby laboratoriów krajowych, przyjęto następujący zakres badań:

- (a) zbadanie zależności pomiędzy naprężeniem, odkształceniem, efektem elastooptycznym i czasem dla następujących trzech materiałów stosowanych w kraju najczęściej na modele elastooptyczne: żywicy allylowej CR-39, żywicy poliestrowej VP-1527 oraz żywicy poliestrowej P-6;
- (b) przeprowadzenie badań w możliwie dużym przedziale czasowym;
- (c) przeprowadzenie badań przy obciążeniach statycznych oraz przy obciążeniach periodycznie przemiennych;
- (d) przeprowadzenie badań przy jednoosiowym stanie naprężenia oraz przy zginaniu.

#### 4. Charakterystyka badanych materiałów w oparciu o opublikowane wyniki badań

4.1. Charakterystyka ogólna. Wszystkie trzy rodzaje badanych sztucznych żywic CR-39, VP-1527 oraz P-6 należą do grupy żywic poliestrowych. Żywice poliestrowe są to związki wielkocząsteczkowe zawierające w swoim łańcuchu grupy estrowe. Otrzymuje się je przez kondensację kwasów i alkoholi wielowartościowych.

Stosowane do syntezy kwasy i alkohole mogą być związkami nasyconymi lub nienasyconymi, to znaczy posiadającymi w cząsteczce podwójne wiązania.

Gdy przynajmniej jeden ze składników jest związkami nienasyconymi, otrzymuje się poliestry posiadające w cząsteczce podwójne wiązania zdolne do reakcji polimeryzacji lub kopolimeryzacji z prostymi monomerami. Reakcje te w określonych warunkach przebiegają bardzo łatwo i są charakterystyczne dla tego typu żywic zwanych żywicami poliestrowymi nienasyconymi. Żywice te są ostatnio szeroko stosowane w elastooptyce.

Żywice poliestrowe nienasycone ze względu na produkty wyjściowe i technologię otrzymywania dzielą się na dwie zasadnicze grupy:

- (1) żywice poliestrowe z nienasyconym kwasem,
- (2) żywice poliestrowe z nienasyconym alkoholem.

Żywice grupy pierwszej otrzymuje się w następujący sposób: kondensuje się nienasycony kwas lub jego bezwodnik, np. bezwodnik maleinowy, kwas fumorowy z glikolami (np. etylenowym, dwuetylenowym lub propylenowym). Reakcję prowadzi się w atmosferze gazu obojętnego w temperaturze ok. 200°C w ciągu 4-8 godzin stosując równe molowo ilości kwasu i glikolu. Otrzymuje się syropowaty lub stały poliestr liniowy, który rozpuszcza się w ciekłym łatwo polimeryzującym monomerze. Z monomerów najczęściej jest stosowany styren, rzadziej metakrylan metylu, octan winylu lub ich mieszanina. Poliestr liniowy w określonych warunkach kopolimeryzuje z monomerem, w tym przypadku ze styrenem, dając produkt usieciowany stały. Jest to reakcja prowadząca do utwardzenia żywicy. Utwardzenie żywicy w warunkach normalnych przebiega bardzo powoli. Aby ten proces przyspieszyć, prowadzi się go w podwyższonej temperaturze lub z dodatkiem katalizatorów i aktywatorów. Jako katalizatory są stosowane nadtlenki i wodoronadtlenki organiczne, jak nadtlenek benzoilu, nadtlenek cykloheksanonu, wodoronadtlenek kumenu; jako aktywatory-aminy trzeciorzędowe lub sole organiczne kobaltu.

Zależnie od rodzaju i stosunków molowych użytych do syntezy kwasów i alkoholi, rodzaju i ilości monomeru oraz sposobu utwardzenia otrzymujemy żywice o różnych własnościach mechanicznych.

Żywice poliestrowe grupy drugiej otrzymuje się przez estryfikację kwasów wielowartościowych lub ich bezwodników alkoholami nienasyconymi. Najczęściej stosuje się kwas ftalowy, węglowy, cyjanurowy oraz alkohol allylowy.

Otrzymuje się monomery o dość dużej cząsteczce i charakterze estrów. Związki te wchodzi w reakcję polimeryzacji lub kopolimeryzacji z innymi monomerami dając produkty o budowie przestrzennej. Utwardzenie przebiega podobnie jak w żywicach grupy pierwszej pod wpływem temperatury lub katalizatorów typowych dla reakcji polimeryzacji.

Żywice poliestrowe swoimi własnościami znacznie przewyższają pozostałe żywice termoutwardzalne. Są tworzywami przezroczystymi o do-

brych własnościach optycznych, znacznej twardości i wytrzymałości mechanicznej, a jednocześnie łatwo dają się obrabiać.

Są odporne na działanie wody i rozpuszczalników organicznych. Mają dobre własności izolacyjne. Wielką ich zaletą jest możliwość formowania w zwykłej temperaturze i bez ciśnienia, co pozwala na otrzymywanie dużych przedmiotów.

**4.2. Własności żywicy CR-39.** Żywica CR-39 jest produkowana w Stanach Zjednoczonych przez Columbia Chemical Division of the Pittsburgh Plate Glass Company. Jest również produkowana w Anglii. Pod względem chemicznym jest polimerem węglanu allylowo-dwuetylenoglikolowego. Monomer otrzymuje się przez kondensację fosgenu z glikolem dwuetylenowym i alkoholem allylowym. Polimeryzację przeprowadza się w obecności nadtlenu benzoilu jako katalizatora. Produkt handlowy rozprowadzany jest w postaci płyt.

Do badań użyto płyty CR-39 grubości  $\frac{1}{4}$ " sprowadzone z Anglii w roku 1950. Płyty te przechowywane były w temperaturze pokojowej. Obróbce cieplnej płyt nie poddawano.

Żywica CR-39 stanowi jeden z najbardziej znanych materiałów do badań elastooptycznych, stosowanych od szeregu lat głównie w USA i w zachodniej Europie.

Własności CR-39 opisane w pracy D. I. Coolidge'a, [4], przedstawiają się następująco. Wykres  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  został zdjęty przy obciążeniu wzrastającym skokami o 40 lb (18,1 kG) co 10 sekund. Pomiar dokonywany był po sekundzie od kolejnego wzrostu obciążenia. Otrzymana krzywa reprezentuje średnią z wyników dla 4 badanych próbek. Na podstawie wykresu można przyjąć, że zależność jest liniowa do około 3 000 psi<sup>1</sup> (2,1 kG/mm<sup>2</sup>), przy czym moduł sprężystości  $E$  wynosi 250 000 psi (176 kG/mm<sup>2</sup>). Największe wartości naprężenia osiągnęte były w okresie 1 do 5 sek od rozpoczęcia próby.

Badania wykazały, że typowa obróbka cieplna CR-39 nie wpływa w sposób widoczny na własności mechaniczne. Przy badaniach zależności pomiędzy efektem elastooptycznym a naprężeniem przy prostym rozciąganiu obciążenie próbki wzrastało w ten sposób, że przyrost rzędu izochromy o jedną następował w ciągu 1-2 minut; obciążenie do wystąpienia 14-rzędu izochromy trwało 25 minut. Pełzanie optyczne zauważalne było po przekroczeniu 7 izochrom. Coolidge przyjmuje, że zależność  $m = m(\sigma)$  dla CR-39 można uważać za liniową do  $\sigma = 3000$  psi w typowych warunkach pomiaru. Badania pełzania optycznego Coolidge przeprowadził na czterech próbkach o wymiarach  $\frac{1}{4}$ "  $\times$  1"  $\times$  9" zgina-nych czystym momentem.

<sup>1</sup> 1 psi = 1 lb/inch<sup>2</sup>.

Procentowy wzrost rzędu izochrom z upływem czasu był w każdej próbie taki sam dla wszystkich wartości naprężeń. Coolidge wyjaśnia to zjawisko proporcjonalnością pomiędzy wydłużeniem a rzędem izochromy oraz niepaczeniem się przekrojów poprzecznych próbek.

Wrażliwość CR-39 na działanie karbu jest bardzo znaczna. Na podstawie własnych obserwacji stwierdzić można, że rozciągające naprężenia krawędziowe o wartości 1-2 kG/mm<sup>2</sup> powodują z reguły powstanie złomu doraźnego, jeśli nie są usunięte starannie wszystkie mikrokarby. Nawet naniesienie za pomocą rysika siatki współrzędnych na powierzchni modelu powoduje powstanie pęknięcia przy naprężeniach rzędu 1-2 kG/mm<sup>2</sup>. Niezbędne jest więc staranne szlifowanie a nawet polerowanie krawędzi modelu z CR-39 poddanych naprężeniom rozciągającym.

Największa grubość produkowanych arkuszy CR-39 wynosi 1/4". Arkusze CR-39 wykazują anizotropię optyczną zauważalną przy nieprostokątnym prześwietlaniu arkusza żywicy w polaryskopie. Anizotropia ta wywołana jest procesem produkcyjnym.

4.3. Własności żywicy VP-1527. Żywica VP-1527 produkowana jest przez firmę Dynamit Actien Gesellschaft w Kolonii. Jest to żywica poliestrowa nienasycona, rozprowadzana w postaci płyt i bloków. Brak jest bliższych danych na temat składu chemicznego.

Użyto płyt VP-1527 grubości 6,5 mm sprowadzonych w roku 1950. Płyty przechowywane były w temperaturze pokojowej. Badano materiał bez obróbki cieplnej oraz po wygrzewaniu w temperaturze 100° przez 20 godzin.

Żywica VP-1527 znana jest w elastooptyce od kilku lat. Ze względu na swe zalety (bardzo mały efekt naskórkowy, łatwa obrabialność, dobra charakterystyka wytrzymałościowa) znajduje coraz szersze zastosowanie wypierając żywice fenolowo-formaldehydowe. Jeden z pierwszych opisów własności VP-1527 podany został przez L. Föppl a, [23], w r. 1953, następnie przez R. Hiltsc h e r a, [5], w r. 1954. Najbardziej szczegółowa charakterystyka własności żywicy zawarta jest w pracy H. T i t s c h a c k a, [24].

Żywica VP-1527 dostarczana jest w płytach lub prętach w stanie zupełnie spolimeryzowanym. Dalszy proces polimeryzacji przebiega wprawdzie również w pokojowej temperaturze, ale jest bardzo powolny. Podwyższenie temperatury przyspiesza dalszą polimeryzację. Proces ten nazywamy wygrzewaniem. Dane odnośnie własności tego typu żywic jak VP-1527 odnoszą się zwykle do dwóch stanów: fabrycznego oraz po zakończonym procesie wygrzewania. Niestety, w praktyce stan początkowy nie jest ściśle określony; wpływają na niego rozrzuty własności wyprodukowanego materiału, nie znany na ogół okres czasu pomiędzy wyprodukowaniem a badaniem, nie znane warunki przechowywania, a zwłaszcza



nie znany przebieg temperatury. Z tych względów dane dotyczące własności VP-1527 w stanie wyjściowym należy interpretować bardzo ostrożnie.

Ponieważ dane opublikowane w pracy Hiltscera, [5], oraz Titchacka, [24], odbiegają znacznie od siebie, poniżej przytoczone zostają dane z obu prac. Jako pewne wyjaśnienie rozbieżności przytoczyć można zdanie z pracy Titchacka, dotyczące pracy Hiltscera:

...wurden auch Werte für den Werkstoff VP-1527 angegeben, die sich offenbar auf das unbehandelte Material in Anlieferungszustand beziehen.

Podane na rysunkach dane w pracy Hiltscera otrzymane były przy badaniach beleczek zginanych czystym momentem; przekrój beleczek wynosił  $20 \times 10$  mm, moment gnący o wartości 80 kGcm wywoływał w skrajnych włóknach beleczek naprężenie równe  $120 \text{ kG/cm}^2$ . Zdjęcia izochrom wykonywane były po upływie 0,3 min, 1 min, 3 min, 10 min, 30 min i 100 min po przyłożeniu obciążenia. Długość fali światła nie została podana, prawdopodobnie badania wykonane były w żółtym świetle sodu.

H. Titchack, [24], przeprowadzał badania żywicy VP-1527 na belkach  $10 \times 15 \times 130$  mm, opartych na dwóch podporach i obciążonych siłą skupioną w środku. Pomiary zostały dokonane w zielonym świetle rtęci.

Badania wpływu wygrzewania na własności elastooptyczne VP-1527 wykazały, iż najlepsze własności żywicy uzyskuje się stosując wygrzewanie w temperaturze  $90^\circ\text{C}$  przez 36 godzin.

**4.4. Własności żywicy P-6.** Żywica P-6 firmy Badische Anilin u. Soda Fabrik w Ludwigshafen jest znana w postaci płynnej pod nazwą Palatal P-6. Jest ona żywicą poliestrową, maleinowo-glikolowo-styrenową. Utwardza się ją na zimno za pomocą katalizatora w postaci pasty Katalizatorpaste BASF dodanego w ilości 0,5-5%. Polimeryzację przyspiesza się dodatkiem aktywatora (naftenianu kobaltu) w ilości 0,05-0,5%. Żywicę P-6 w płynie otrzymano w lipcu 1958 r. Płyty grubości 10 mm odlano w początku sierpnia 1958 r. Polimeryzację płyt przeprowadzono w temperaturze pokojowej.

Użyto katalizatora firmowego w ilości 0,5% oraz aktywatora 0,2 ml na 100 g. Żywicę przygotowano oraz polimeryzowano według prospektu fabrycznego, [20], uwzględniając doświadczenia autora, [21]. Płyty odlano w formach szklanych stosując jako rozdzielacz polialkohol winylowy. Podkładki dystansowe pomiędzy ścianami formy wykonywane były z miękkiej gumy, aby umożliwić skurcz w kierunku grubości płyty. Odlane płyty przechowywano w temperaturze pokojowej. Badano płyty bez obróbki cieplnej oraz płyty wygrzewane w temperaturze  $90^\circ\text{C}$  przez

40 godzin. Pracami chemicznymi przy polimeryzowaniu płyt z płynnej żywicy kierowała Irena Słowikowska.

Własności elastooptyczne żywicy P-6 nie zostały dotąd szerzej opisane. Prospekt fabryczny, [20], zawiera ogólne dane, a więc: wytrzymałość na rozciąganie  $R_r = 5,20 \text{ kG/mm}^2$  według DIN 53 455, moduł sprężystości obliczony z próby rozciągania  $E = 48\,000 \text{ kG/cm}^2$  w granicach prawa Hooke'a i przy prędkości wzrostu obciążenia  $75 \text{ kG/min}$ , liczba Poissona  $\nu = 0,38$  (wyznaczona jak  $E$ ), wytrzymałość na zginanie  $R_g = 8,50 \text{ kG/mm}^2$  według DIN 53 452, moduł sprężystości obliczony z próby na zginanie  $E = 40\,200 \text{ kG/cm}^2$  wyznaczony jak przy rozciąganiu.

Prospekt fabryczny nie podaje wpływu wygrzewania na własności mechaniczne P-6.

Wobec tego, że żywica P-6 stosowana jest u nas na modele zbrojone oraz na dwuwarstwowe modele płyt, poznanie jej własności jest sprawą istotną. Wstępne badania prowadzone przez autora wykazały, że elastooptyczne własności tej żywicy podobne są do własności żywicy VP-1527, natomiast żywica P-6 daje się odlewać w płyty o lepszej przezroczystości i mniejszej anizotropii optycznej niż żywica VP-1527.

Moduł sprężystości żywicy P-6 jest stosunkowo wysoki.

**4.5. Porównanie badanych materiałów.** Pod względem gładkości powierzchni, jednorodności oraz izotropii optycznej i mechanicznej, żywica CR-39 wykazuje najkorzystniejsze własności spośród wszystkich badanych materiałów. Arkusze CR-39 posiadają wygląd arkuszy ze szkła lustrzanego. Żywica VP-1527 wykazuje prawie zawsze mniejszą lub większą niejednorodność optyczną, częściowo usuwalną przez właściwie prowadzony proces obróbki cieplnej. Gładkość powierzchni płyt VP-1527 osiąga właściwie granicę dopuszczalnych nierówności. W żywicy VP-1527 występuje często zjawisko tzw. smużenia. Żywica P-6 przy starannym odlewaniu posiada wygląd podobny do żywicy CR-39 z tym zastrzeżeniem, że przepuszczalność światła jest mniejsza wskutek rozproszenia.

Elastooptyczna stała materiałowa wszystkich trzech żywic posiada wartość praktycznie tego samego rzędu  $25\text{--}30 \text{ kG/cm}^2$ . Moduł sprężystości podłużnej CR-39 jest najmniejszy — około  $20\,000 \text{ kG/cm}^2$ . Moduł sprężystości VP-1527 wynosi zależnie od stopnia polimeryzacji od  $20\,000$  do  $42\,000 \text{ kG/cm}^2$ ; moduł sprężystości P-6 jest najwyższy: zależnie od stopnia polimeryzacji wynosi od  $20\,000$  do  $48\,000 \text{ kG/cm}^2$ .

Obróbka CR-39 jest najtrudniejsza ze względu na dużą kruchość. Obróbka VP-1527 oraz P-6 zależy od stopnia polimeryzacji: im materiały są wyżej spolimeryzowane, tym są kruzsze.

Wrażliwość na działanie karbu CR-39 jest bardzo wysoka, co zmusza do bardzo starannego szlifowania a nawet polerowania krawędzi pracujących na rozciąganie.

Naprężenia własne w płaszczyźnie płyty są w przypadku CR-39 dość znaczne. Z tego powodu obserwacja prowadzona z kierunku nieprostopadłego do płaszczyzny płyty powoduje wystąpienie znacznych często błędów pomiarowych. Te same naprężenia w płytach z VP-1527 są bardzo małe i znikają po wygrzaniu płyty. W płytach z P-6 odlewanych w laboratorium, według doświadczeń autora, naprężenia w płaszczyźnie tarczy zależą od konstrukcji formy oraz kierunku skurczu żywicy w trakcie polimeryzacji. Po obróbce cieplnej naprężenia znikają.

Do badań metodą zamrażania naprężeń nadają się dość dobrze żywice VP-1527 oraz żywice P-6. Żywice CR-39, jak wynika z opublikowanych prac, do badań metodą zamrażania naprężeń zasadniczo się nie nadają. Opublikowane dane są jednak bardzo pobieżne.

Pełzanie mechaniczne i optyczne żywicy CR-39 jest tak znaczne, że wielu badaczy zrezygnowało ze stosowania CR-39 jako materiału na modele. Pełzanie mechaniczne i optyczne VP-1527 oraz P-6 jest podobne: żywice te wysoko spolimeryzowane wykazują mały stopień pełzania optycznego i mechanicznego. Zjawisko pełzania CR-39, VP-1527 oraz P-6 jest zbadane jak dotąd w małym stopniu.

Cenną zaletą żywicy P-6 (w mniejszym stopniu VP-1527) jest możliwość dowolnego zmieniania wartości stałych sprężystych w szerokich granicach przez zmianę stopnia polimeryzacji na drodze odpowiedniej obróbki

## 5. Metoda badań

W ogólnym przypadku efekt elastoptyczny wyrażony w wielokrotnościach długości fali świetlnej jest funkcją stanu naprężenia i odkształcenia, czasu, długości fali świetlnej, temperatury:

$$m = m(\sigma, \varepsilon, t^h, \lambda, t^\circ),$$

gdzie  $m$  oznacza rząd izochromy,  $\sigma$  naprężenie,  $\varepsilon$  odkształcenie,  $t^h$  czas,  $\lambda$  długość fali światła oraz  $t^\circ$  temperaturę.

Wobec powyższego metoda i technika badań została tak opracowana, aby było możliwe zanalizowanie wpływu najważniejszych parametrów.

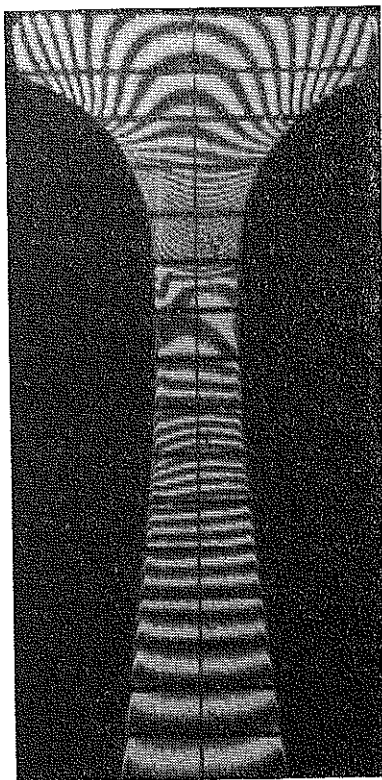
**5.1. Wpływ temperatury.** Ze względu na to, że celem badań było opisanie i zanalizowanie własności niektórych materiałów na modele elastoptyczne badane zasadniczo tylko w temperaturze normalnej, w pracy niniejszej pominięto analizę wpływu temperatury na własności elastoptyczne materiałów. Wpływ temperatury na własności elastoptyczne jest często decydujący [16].

Wszystkie badania przeprowadzone zostały w temperaturze 22-23°C, przy czym temperatura modelu przy badaniach statycznych była taka sama, jak i temperatura otoczenia, zaś przy badaniach dynamicznych w pewnych przypadkach niektóre partie modelu były cieplejsze od oto-

czenia. Zauważyć należy, że A u b a u d, [6], dopuszczał wahania temperatury w granicach  $3^{\circ}\text{C}$ .

W celu uwzględnienia ewentualnego wpływu wahań temperatury oraz wahań wilgotności względnej na mierzone wielkości rejestrowano w sposób ciągły temperaturę i wilgotność względną w pomieszczeniu oraz rejestrowano w pewnych odstępach czasu wskazania termometrów rtęciowych, umieszczonych w przestrzeni pomiarowej polaryskopu.

**5.2. Wpływ stanu naprężenia i odkształcenia.** Badania prowadzono przy jednoosiowym stanie naprężenia traktując je jako badania podstawowe.



Rys. 1. Przykład wpływu miejscowych niejednorodności przy odkształceniach plastycznych na położenie izochrom; model nr 118 po 78 godzinach

Opisanie zależności dla jednoosiowego stanu naprężenia pozwoli na rozszerzenie badań na dwu- i trójosiowe pola naprężeń. Badania przy dwuwymiarowym stanie naprężenia będą w pewnym sensie badaniami zamykającymi pewien etap prac, zwłaszcza że wyniki tych badań będą miały duże znaczenie dla metody i techniki badań elastooptycznych, w tym również i badań konwencjonalnych.

Modele miały spełniać dwa warunki:

(a) kształt modelu oraz sposób obciążenia powinien być tak dobrany, aby niezależnie od odkształceń nieliniowo-sprężystych w modelach panował jednoosiowy stan naprężenia z odchyleniem w dopuszczalnych granicach;

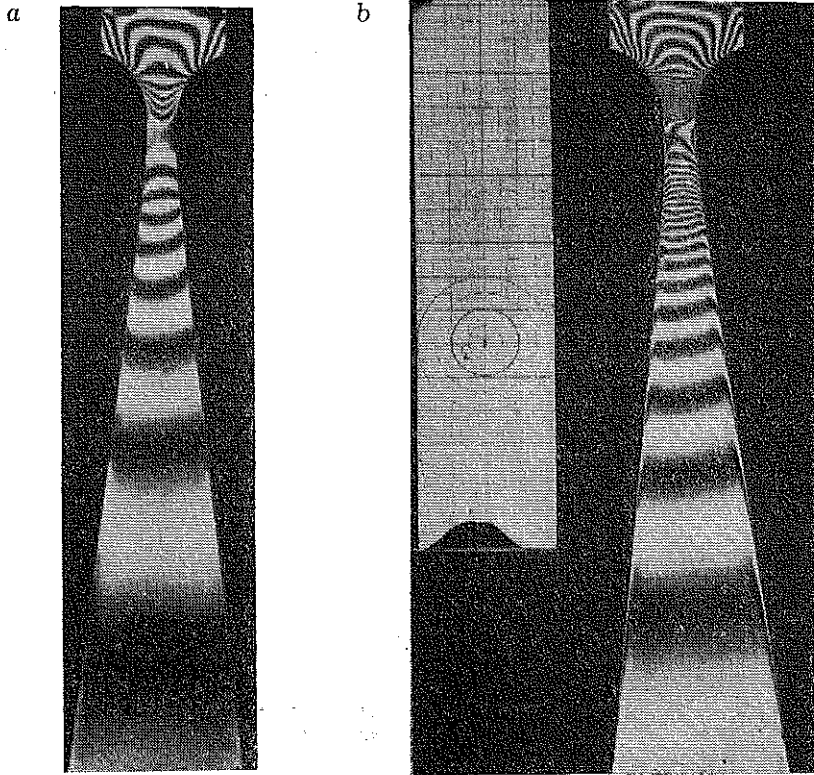
(b) w celu zmniejszenia rozrzutów wyników jeden model powinien umożliwić pomiary przy różnych wartościach naprężeń.

Warunki powyższe wykluczają się wzajemnie. Dla najważniejszych badań, mianowicie badań przy rozciąganiu, znaleziono wyjście kompromisowe stosując modele w kształcie klina o małej zbieżności. Taka droga postępowania pozwala mniejszym nakładem pracy uzyskać wyniki niemniej dokładne, jeśli nie dokładniejsze, niż daje

metoda przyjęta przez E. M ö n c h a, [2], polegająca na wyznaczeniu tzw. wypadkowej krzywej  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$  lub  $m = m(\varepsilon)$ .

Analiza zmian kształtu izochrom jako funkcji czasu uzasadnia powyższe stwierdzenie: zmiany kształtu izochrom są drugorzędne, jeśli chodzi

o wartość rzędu izochromy w przekroju osiowym. Rozrzuty położenia izochrom spowodowane miejscowymi niejednorodnościami materiału są, jak to widoczne jest na zdjęciach rys. 1, większe niż zmiany kształtu izochrom w czasie, spowodowane niejednorodnością pola naprężeń i odkształceń w przekrojach prostopadłych do przekroju osiowego (rys. 2).



Rys. 2. Przykłady zmian kształtu izochrom w trakcie próby pełzania (zdjęcia w żółtym świetle sodu) materiał CR-39

*a* — model nr 100 w jedną minutę po obciążeniu, *b* — model nr 100 po 305 godzinach obciążenia

Analiza zdjęć elastoptycznych przedstawionych na rys. 2 uzasadnia stwierdzenie, iż rzędy izochrom w przekroju osiowym modelu stanowią wartości rzeczywiście odpowiadające — przy uwzględnieniu współczynnika kształtu — rzędom izochrom w pręcie pryzmatycznym, w którym panuje to samo naprężenie, oraz że odkształcenia modelu są równe odpowiednio odkształceniom prętów pryzmatycznych dla tych samych warunków.

Zastosowanie modeli w kształcie klina do badań pełzania posiada poza oszczędnością czasu i materiału oraz poza zmniejszeniem rozrzutów wyników spowodowanych niezachowaniem ściśle tych samych warunków

pomiaru dla wszystkich badanych modeli jeszcze jedną zaletę. Zmiany kształtu izochrom, które w początkowej fazie obciążenia stanowią odcinki okręgu koła, pozwalają śledzić powstawanie odkształceń niesprężystych oraz pozwalają w sposób prosty i łatwy zaobserwować, ocenić oraz wyeliminować wpływ efektu naskórkowego.

Największe wartości naprężeń w modelach dobierano tak, aby model nie uległ zniszczeniu w czasie 200-300 godzin działania stałego obciążenia.

**5.3. Wpływ długości fali świetlnej.** Jak wykazano w p. 2 długość fali światła posiada znaczny wpływ na wartości mierzonych wielkości. Dla celuloиду, [12], otrzymano jednoznaczną zależność pomiędzy dyspersją dwójłomności a odkształceniami plastycznymi. Z powyższych względów niezbędne jest przeprowadzanie obserwacji elastooptycznych własności materiałów poza obszarem liniowo sprężystym przy kilku długościach fali świetlnej. Jeśli okazałoby się, że i dla innych materiałów dyspersja dwójłomności stanowi miarę odkształceń plastycznych lub nieliniowo sprężystych, wówczas można by i te materiały stosować do badań w obszarze odkształceń nieliniowo-sprężystych. Ponieważ nienasycone żywice poliestrowe posiadają szereg zalet jako materiał na modele elastooptyczne, ważną jest rzeczą wykrycie dla nich zależności elastooptycznych poza obszarem sprężystym.

Pożądane byłoby przeprowadzenie badań w całym zakresie widma widzialnego dla długości fali świetlnej od 0,3 do 0,7 mikrona. Było to technicznie niemożliwe, z tego względu przeprowadzono pomiary przy dopuszczalnie najniższej ilości różnych długości fali świetlnych, mianowicie przy trzech długościach: niebieskiej, zielonej i żółtej linii rtęci, czyli w zakresie 0,4358-0,578 mikrona.

**5.4. Wpływ czasu badania.** Jak wykazały wstępne obserwacje, czas badania musi być dostatecznie długi: nie może być krótszy od 200-300 godzin ze względu na to, że dla niskospolimeryzowanych nienasyconych żywic poliestrowych w ciągu tego okresu czasu efekt elastooptyczny ulega znacznym jakościowym oraz ilościowym zmianom.

Wartość naprężenia została więc tak dobrana, aby model nie uległ zniszczeniu w czasie krótszym od 200 godzin.

Ponieważ najszybsze zmiany własności elastooptycznych zachodzą w ciągu kilkudziesięciu minut po obciążeniu oraz po odciążeniu modelu, w tych okresach czasu ilość punktów pomiarowych zagęszczono w celu zwiększenia dokładności wyników. Jak wykazują otrzymane wyniki, to zagęszczenie punktów pomiarowych pozwoliło na wykrycie bardzo interesującego przebiegu efektu elastooptycznego w pierwszych trzech godzinach po odciążeniu modelu.

Obserwacje po odciążeniu modeli prowadzono częściowo przez kilkanaście a nawet kilkadziesiąt tysięcy godzin; pozwoliło to na wyciągnięcie

zupełnie pewnych wniosków odnośnie związku pomiędzy odkształceniem plastycznym a efektem elastooptycznym dla badanych materiałów.

W związku z rozpatrywaniem wpływu czasu badania nasuwa się zasadnicze metodyczne pytanie: czy wpływu czasu działania obciążenia nie można by połączyć funkcjonalnie z wartością odkształcenia w myśl zależności

$$\varepsilon = \varepsilon(\sigma, t^h),$$

stąd

$$m(\varepsilon) = m[\varepsilon(\sigma, t^h)]$$

oraz zgodnie z powyższą zależnością we wzorze na  $m$  podstawić zamiast  $\varepsilon$  odpowiednią funkcję zależną od  $\sigma$  i  $t^h$ .

Wstępne obserwacje wykazały, że dla efektu elastooptycznego takie podstawienie jest — metodycznie rzecz ujmując — w obecnym stanie badań w ogólnym ujęciu niedopuszczalne; wprowadzie zależność pomiędzy efektem elastooptycznym a naprężeniem dla badanych plastyków dla chwili początkowej jest liniowa w szerokim zakresie, ale zależność pomiędzy efektem elastooptycznym a wydłużeniem nie jest na ogół monotoniczna dla nienasyconych żywic poliestrowych. Zachodzące zmiany efektu elastooptycznego, związane prawdopodobnie z pewną orientacją grup styrenowych wydają się przebiegać w znacznym stopniu niezależnie od zmian spowodowanych wydłużeniem. Wstępne obserwacje nie wykazały również jasno, czy pozostały po odciążeniu trwałe efekt elastooptyczny wiązać należy z pewną orientacją łańcuchów cząsteczek występujących w trakcie odkształceń plastycznych, czy też z pewną orientacją pierścieni benzenowych. Z powyższych względów postanowiono wpływ czasu badania na efekt elastooptyczny — przynajmniej w pierwszej fazie badań — traktować niezależnie od wpływu naprężenia oraz odkształcenia.

5.5. Wpływ charakteru obciążenia. Analiza wpływu czasu badania na zmianę efektu elastooptycznego przy obciążeniu statycznym powinna być sprawdzona i uzupełniona odpowiednimi badaniami przy obciążeniach periodycznie przemiennych, przy zmiennej częstotliwości poczynając od zera (jak wykazano w p. 3).

Można oczekiwać, że tego rodzaju pomiary, prowadzone przy różnych wartościach naprężeń oraz przy różnych częstościach, pozwolą dokładniej niż badanie statyczne wyznaczyć rzeczywistą krzywą  $m = m(\sigma)$  dla zerowego punktu czasowego oraz pozwolą rozszerzyć interpretację zjawiska pełzania optycznego.

Ze względu na charakter badań wydaje się rzeczą słuszną jako badanie podstawowe dla badań dynamicznych potraktować badanie przy obciążeniach periodycznie przemiennych.

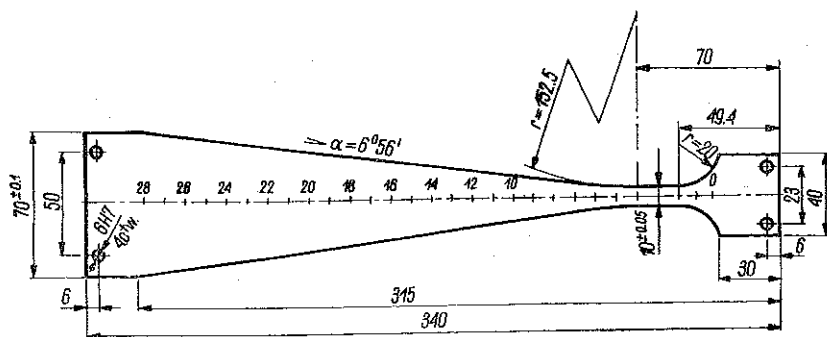
Obciążenie periodycznie zmienne można zrealizować albo działając periodycznie zmienną siłą obciążającą o amplitudzie i częstotliwości stałej w trakcie jednego badania, albo wymuszając periodycznie zmienne przemieszczenie określonego punktu badanego ciała o stałej amplitudzie i stałej częstotliwości. W pierwszym przypadku pożądane jest mierzyć przemieszczenia, w drugim – wartość siły.

Ze względów na aktualne możliwości techniczne zdecydowano prowadzić badania w drugim wariantcie: wymuszać znane przemieszczenia oraz mierzyć w miarę możliwości wartości siły obciążającej.

## 6. Opis modeli

Badania prowadzono przy rozciąganiu oraz przy zginaniu. Modele na rozciąganie badano tylko przy stałej sile. Modele na zginanie badano przy stałej sile, stałym przemieszczeniu końca modelu oraz przy periodycznie przemiennym przemieszczeniu końca modelu (wymuszanie kinematyczne).

6.1. Model do badań na rozciąganie. Model do badań na rozciąganie służy do wyznaczania krzywych  $m = m(\sigma)$  i  $m = m(\epsilon)$  dla różnych wartości parametrów  $\lambda$  oraz  $t^b$  w zakresie dodatnich wartości naprężeń i wydłużeń.



Rys. 3. Szkic modelu do badań na pełzanie przy rozciąganiu

Charakterystyka geometryczna modeli do badań na pełzanie przy rozciąganiu – podana jest na rys. 3 i 4. Model stanowi klin, którego wierzchołek przechodzi łagodnie w część pryzmatyczną tak, że długość części pryzmatycznej jest dwa razy większa od jej szerokości. Część pryzmatyczna przechodzi z kolei w część górną, mocowaną w uchwycie.

W świetle pracy Möncha, [12], wpływ części górnej na charakter odkształceń plastycznych w części pryzmatycznej sięga nie dalej niż jedna szerokość modelu począwszy od końca karbu górnego. Wpływ karbu pomiędzy częścią klinową a częścią cylindryczną modelu jest znikomy, ponieważ promień przejścia jest bardzo duży, około 15 razy większy od sze-



rokości części pryzmatycznej. Z powyższego wyniku (ponieważ przekrój środkowy części pryzmatycznej oddalony jest od początków łuków górnego i dolnego karbu o szerokość części pryzmatycznej), że wpływ karbów na przebieg odkształceń niesprężystych w tym przekroju można pominąć.

Wartość naprężeń w klinie obciążonym siłą skupioną wzdłuż osi obliczono na podstawie funkcji naprężeń we współrzędnych biegunowych:

$$\Phi = cr\theta \sin \theta, \quad \sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} = \frac{2c}{r} \cos \theta,$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} = 0, \quad \tau_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) = 0.$$

Z warunków brzegowych można obliczyć

$$c = \frac{P}{\delta(2a + \sin 2a)};$$

z tych zależności otrzymuje się:

$$[\sigma_r]_{\theta=0} = 2 \frac{P}{\delta(2a + \sin 2a)} \frac{1}{r}, \quad [\sigma_n]_{\theta=0} = \frac{P}{2\delta r \operatorname{tg} a},$$

$$[\sigma_r]_{\theta=a} = 2 \frac{P}{\delta(2a + \sin 2a)} \frac{\cos a}{r}, \quad [\sigma_n]_{\theta=a} = \frac{P}{2\delta r \sin a}.$$

Z powyższych wzorów otrzymano  $a_k$  podane obok rys. 4, przy czym wartości naprężeń nominalnych obliczono dla przekrojów prostopadłych do osi klina i przechodzących przez punkt przecięcia łuków o promieniu  $r$  z ramieniem odpowiadającego kąta  $\theta$ .

Badano dwa typy modeli różniące się zbieżnością: model *a* o kącie wierzchołkowym  $2a = 2 \cdot 7,5^\circ$  oraz model *b* o kącie wierzchołkowym  $2a = 2 \cdot 6^\circ 56'$ . Współczynniki kształtu dla przekroju prostopadłego do osi modeli wynosiły odpowiednio:

dla modelu *a*

na osi  $a_k = 1,012$ ,

na krawędzi  $a_k = 0,994$ ,

dla modelu *b*

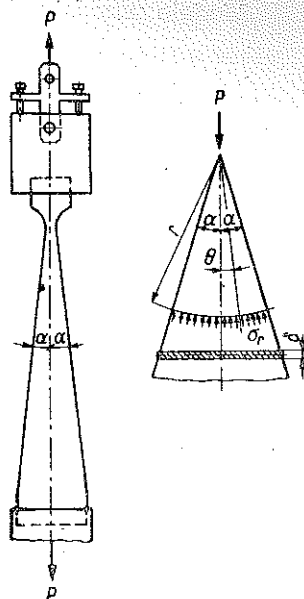
na osi  $a_k = 1,00976$ ,

na krawędzi  $a_k = 0,995$ .

Wobec tego że większość badań wykonana została na modelach typu *b* (model typu *a* stosowany był tylko przy badaniu żywicy VP-1527) w dalszym ciągu nazwą «model na rozciąganie» określamy model typu *b*, chyba że jest inaczej zaznaczone.

Największa różnica współczynników kształtu dla przekroju prostopadłego do osi wynosi

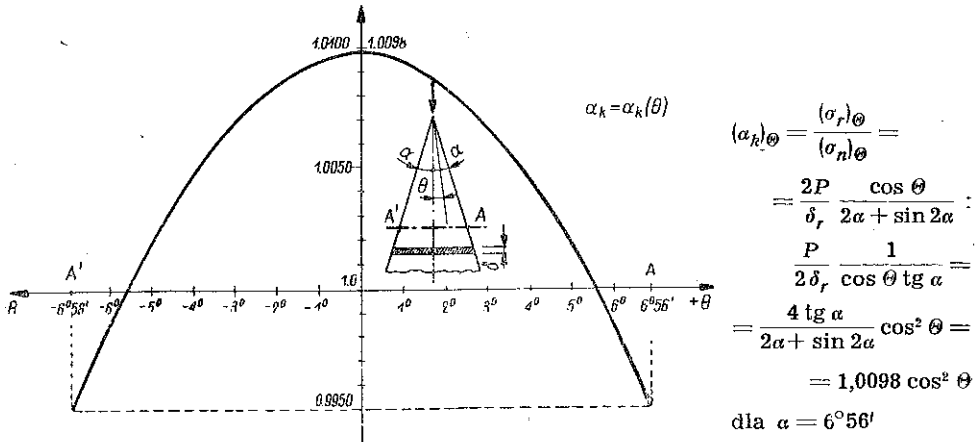
$$\Delta a_k \% = \frac{1,00976 - 0,995}{1,00976} 100 = 1,46\%.$$



Rys. 4. Charakterystyka geometryczna modelu  
Dla  $\alpha = 7^\circ 30'$ :  $[\alpha_k]_{\theta=0} = 1,012$   
i  $[\alpha_k]_{\theta=a} = 0,994$ ;  
dla  $\alpha = 6^\circ 56'$ :  $[\alpha_k]_{\theta=0} = 1,0098$   
i  $[\alpha_k]_{\theta=a} = 0,995$

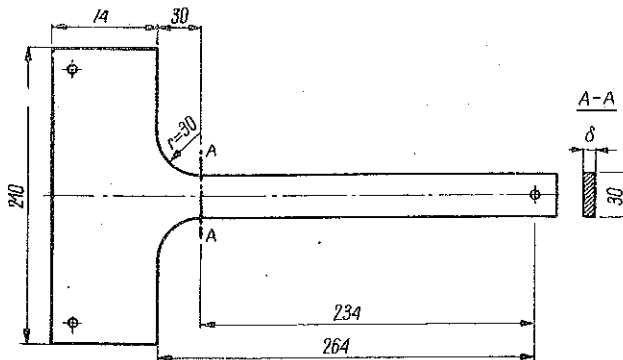
Jest to różnica nie przekraczająca wartości typowych błędów pomiarowych.

Przebieg wartości współczynnika kształtu podany jest na rys. 5. Modele przedstawione są na rys. 3, 6, 14 i 25.



Rys. 5. Wykres współczynnika kształtu dla przekroju poprzecznego klina o kącie wierzchołkowym  $2\alpha = 2 \cdot 6^\circ 56'$ , obciążonego siłą skupioną działającą na wierzchołek klina wzdłuż jego osi

6.2. Model do badań na zginanie. Model do badań na zginanie stanowi belkę wspornikową, jak to podaje rys. 6.



Rys. 6. Szkic modelu do badań na zginanie

Wartość współczynnika kształtu dla karbu przy utwierdzeniu belki, gdy koniec jej obciążony jest siłą prostopadłą do osi, wynosi dla danych parametrów karbu 1,2 (por. rys. 6). Jest to niezbyt duże spiętrzenie naprężeń, nie wywierające zasadniczego wpływu na zmiany pola naprężeń w trakcie powstawania odkształceń niesprężystych.

Model do badań na zginanie przeznaczony jest do następujących badań:

(a) przypadek obciążenia zginającą stałą siłą skupioną na końcu belki,

(b) przypadek stałego przemieszczenia końca belki,

(c) przypadek periodycznie przemiennego przemieszczenia końca belki ze zmienną częstotliwością.

Analiza wyników badań w przypadku (a) pozwoli na uzupełnienie wyników badań przy rozciąganiu oraz pozwoli na jakościowe porównanie charakteru pełzania elastooptycznego przy rozciąganiu i ściskaniu.

Badania w przypadku (b) stanowią badania uzupełniające dla przypadku (a) w sensie rozszerzenia ich na zjawisko relaksacji, a zarazem stanowią badania skalujące dla przypadku (c).

Badania w przypadku (c) miały dostarczyć materiału, który pozwoliłby na opisanie podstawowych własności elastooptycznych przy obciążeniach periodycznie przemiennych, a zwłaszcza wyjaśnić wpływ obciążeń przemiennych na zjawisko pełzania elastooptycznego. Badania te prowadzone były przy różnych częstotliwościach oraz przy różnych wartościach naprężeń.

Wprowadzamy następujące oznaczenia:

$[\sigma_{max}]_0$  jest największym dopuszczalnym naprężeniem w karbie utwierdzenia belki,  $[\sigma]_0$  naprężeniem w karbie utwierdzenia belki,  $w_1$  podstawową częścią drgań własnych belki,  $w$  częstotliwością drgań belki. Przyjęto że wartość  $[\sigma_{max}]_0$  jest równa odpowiednio wartości największego naprężenia przy badaniu na rozciąganie.

Częstotliwość drgań belki  $w$  tak dobrano, aby na pole naprężeń w belce wpływały zasadniczo tylko siły sprężystości, a nie siły masowe; zachodzi to wówczas, gdy  $w < w_1$ .

Częstotliwość drgań własnych obliczono przy następujących założeniach upraszczających: ugięcia są małe, na belkę nie działają momenty zewnętrzne, opór bezwładności przy obrocie elementarnych mas belki jest pominięty jako bardzo mały w stosunku do oporu bezwładności przy prostym przesunięciu, siły masowe zostają pominięte (poza siłami bezwładności).

Przy powyższych założeniach drgania swobodne pręta opisane są równaniem

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0,$$

gdzie  $\rho$  oznacza gęstość materiału belki,  $A$  przekrój poprzeczny belki.

Rozwiązanie powyższego równania dla pręta jednostronnie utwierdzonego daje następującą zależność dla częstotliwości drgań własnych belki:

$$n_i = \frac{m_i^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{J}{A}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{1}{2\pi} \frac{m_i^2}{l^2} r v,$$

gdzie  $l$  oznacza długość belki,  $r$  oznacza promień bezwładności przekroju,  $v$  prędkość dźwięku w materiale,  $m_i$  stałą przybierającą następujące wartości, [25]:  $m_1 = 0,597\pi = 1,875$ ,  $m_2 = 1,494\pi = 4,694$ ,  $m_3 = 2,500\pi = 7,855$ .

Dla podstawowej częstości drgań własnych belki mamy zależność

$$n_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{m_1^2}{l^2} rv.$$

Prędkość fali podłużnej w materiale wynosi

$$v = \sqrt{98,1 \frac{E}{\rho}}, \text{ gdzie } E [\text{kG cm}^{-2}] \text{ oraz } v [\text{m sek}^{-1}].$$

Na podstawie powyższej zależności obliczamy prędkość dźwięku w kilku różnych materiałach elastooptycznych (tabl. 1).

Tablica 1

L. p.	Materiał	E kG/cm <sup>2</sup>	ρ	Zródło dla E i ρ	v m/sek
1	Plexiglas 300	(28,5 — 30,0) · 10 <sup>3</sup>	1,18	Schaefer	1540 - 1580
2	Perspex plastyfikowany	31,5 · 10 <sup>3</sup>	1,18	Jessop i Harris	1620
	nieplastyfikowany	32,9 · 10 <sup>3</sup>	1,18		1650
3	CR-39	(19,6 — 24,5) · 10 <sup>3</sup>	1,06	Jessop i Harris Coolidge	1340 - 1500
		17,5 · 10 <sup>3</sup>	1,06		1270
4	Celuloid amerykański	(14 — 27,3) · 10 <sup>3</sup>	1,35 - 1,60	Frocht	1180 (średnio)
5	P-6	48 · 10 <sup>3</sup>	1,22	Prospekt fabryczny	1970
6	VP-1527	40 · 10 <sup>3</sup>	1,22	H. Titschack	1800

Promień bezwładności przekroju dla przekroju prostopadłego wynosi

$$r = \sqrt{\frac{J}{A}} = 0,2884 h,$$

gdzie  $h$  jest wysokością belki.

Częstość drgań własnych obliczamy dla belek o wymiarach  $l = 250$  mm,  $h = 30$  mm.

Wymiary te zostały dobrane w ten sposób, aby model mieścił się w polu widzenia polaryskopu:  $r = 0,2884$ ,  $h = 0,2884 \cdot 30$  mm = 8,7 mm oraz

$$n_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{m_1^2}{l^2} rv = 77,8 \cdot 10^{-3} v [1/\text{sek}].$$

Wyniki obliczeń zestawione są w tablicy 2.

Amplitudę drgań końca belki tak dobrano, aby przy ugięciu statycznym naprężenie w miejscu utwierdzenia belki nie przekraczało  $0,5 R_r$ .

Jako najbardziej wiotką belkę przyjęto belkę o danych:  $h = 20$  mm,  $l = 250$  mm,  $E = 30 \cdot 10^3$  kG/cm<sup>2</sup>,  $R_r = 4,9$  kG/mm<sup>2</sup>,  $a_k = 2,0$ .

Tablica 2

Lp.	Materiał	$v$ m/sek	$n_1$ 1/sek
1	Plexiglas 300	~ 1560	~ 121,3
2	CR-39	~ 1400	~ 109,0
3	P-6	1970	153,3
4	VP-1527	1800	140,0

Dla powyższych danych strzałka ugięcia końca belki wynosi około 9 mm, zaś odpowiadająca siła na końcu belki równa jest około 3 kG.

Jako założenie konstrukcyjne aparatury, wynikające z powyższej charakterystyki modeli na zginanie, przyjęto następujące dane: amplituda zmienna w granicach  $\pm 20$  mm, częstość drgań zmienna w granicach 0-100 Hz przy amplitudzie  $\pm 20$  mm, siła sprężysta elementu badanego przy maksymalnej amplitudzie nie mniejsza od 10 kG.

Ponieważ zawsze należy się liczyć z możliwością wystąpienia drgań wzdłużnych belki, sprawdzono, czy częstość drgań wzdłużnych jest dostatecznie odległa od częstości drgań giętych.

Dla pręta jednym końcem utwierdzonego częstość wzdłużnych drgań własnych wynosi

$$n_m = \frac{2n-1}{4l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{2n-1}{4l} v.$$

Dla prędkości dźwięku  $v = 1580$  m/sek (plexi), podstawowa częstość drgań własnych

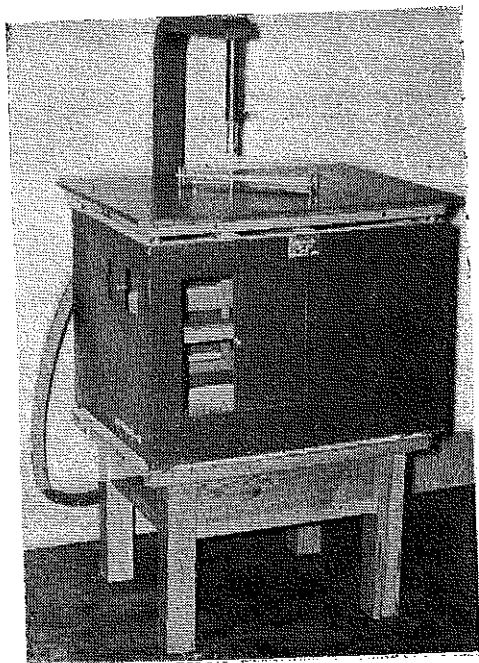
$$n_1 = \frac{1}{4l} v = \frac{1}{4 \cdot 0,25 \text{ m}} 1580 = 1580 \text{ [Hz]}.$$

Częstość ta jest przeszło 10 razy większa od częstości własnych drgań giętych, nie należy więc spodziewać się dostrzegalnych zakłóceń przebiegu izochrom w badanej belce.

## 7. Technika badań, aparatura

7.1. Dane ogólne. Posługiwano się taką samą techniką badań odnośnie badań statycznych oraz taką samą techniką przygotowywania pomiarów i opracowywania wyników, jak to podane jest w pracy [26].

Model wykonano na wycinarce typu JP-3b (rys. 7) w sposób opisany w pracy [26]. Aby możliwie zmniejszyć niebezpieczeństwo pęknięć pod wpływem mikrokarbów, powierzchnie boczne modeli po obróbce na wycinarce szlifowano i polerowano załamując lekko krawędzie.



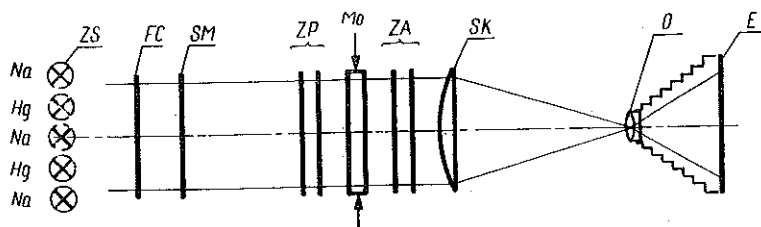
Rys. 7. Wycinarka typu JP-3b

Badania przeprowadzono za pomocą technicznego polaryskopu elastooptycznego typu JP-8. Schemat układu optycznego polaryskopu podany jest na rys. 8. Widok polaryskopu JP-8 podany jest na rys. 9. Średnica pola widzenia polaryskopu wynosi 300 m. Ogniskowa soczewki analizatora wynosi 1200 mm. Badania przeprowadzono w świetle rtęciowym przy użyciu filtrów monochromatycznych typu Wrattenfilter firmy Kodak.

Zastosowane filtry oraz długości fal światła podane są w tabelicy 3.

Filtry monochromatyczne umieszczano w nasadkach zakładanych na obiektyw aparatu fotograficznego.

Obrazy izochrom rejestrowano fotograficznie aparatem Exacta-Varex z obiektywem Triotar 4/135. Płazyczna główna obiektywu umieszczona była w ognisku soczewki analizatora.

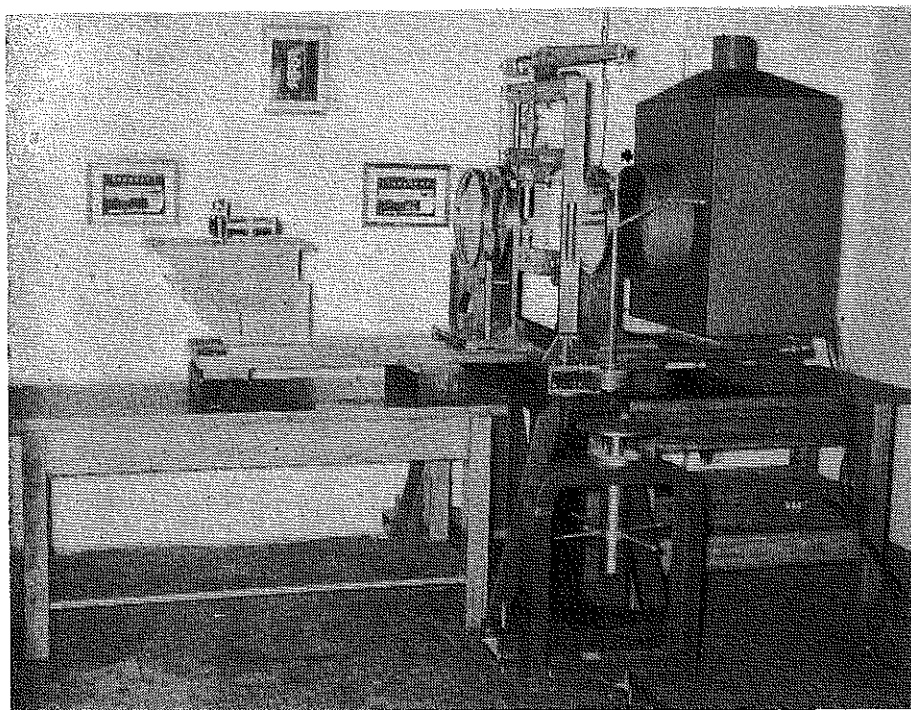


Rys. 8. Schemat technicznego polaryskopu elastooptycznego

ZS — źródło światła, SM — szkło mleczne, ZP — zespół polaryzatora, ZA — zespół analizatora, FC — filtr ciepły, MO — model badany, SK — soczewka kolimacyjna, O — obiektyw, E — ekran

Do rejestracji użyto filmów fotograficznych Agfa. Filmy wywoływano wywoływaczem drobnoziarnistym Final, utrwalano w utrwalaczu kwaśnym, krajowym.

Położenie izochrom odczytywano bezpośrednio z negatywów za pomocą czytnika firmy Polskie Zakłady Optyczne (P.Z.O.) Warszawa.



Rys. 9. Polaryskop JP-8

Tablica 3

Lp.	Nr filtru	Długość fali $\lambda$ w Å	Barwa
1	50	4358	niebieski
2	77	5461	zielony
3	22	5770/90, średnio 5780	żółty

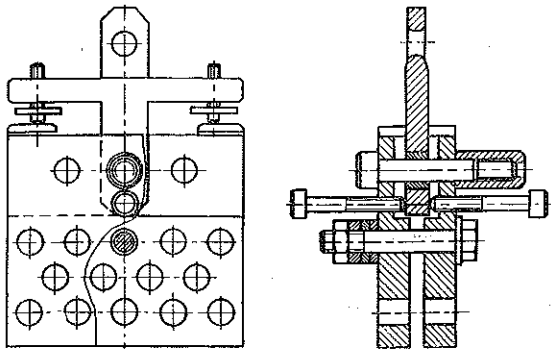
Pomiary modeli wykonywano za pomocą mikroskopu warsztatowego tych samych zakładów oraz za pomocą komparatora Abbego, model B, produkcji Zeissa. Dane przyrządów pomiarowych podano w tabl. 4.

Pomiary wykonywano przy temperaturach otoczenia w granicach 20-23°C.

Tablica 4

Przyrząd	Najmniejsza działka dla pomiarów	
	liniowych	kątowych
Mikroskop warsztatowy P.Z.O.	0,01 mm	2'
Komparator poziomy Abbego, model B, Zeissa	1 $\mu$	—

7.2. **Badania statyczne.** Badania statyczne przy rozciąganiu prowadzono stosując obciążenie modeli za pomocą typowego układu obciążającego polaryskopu JP-8. Model obciążony został przez dźwignię o przekładni 1 : 5.



Rys. 10. Szkic regulowanego uchwytu do rozciągania

W celu zapewnienia osiowego obciążenia modeli rozciąganych zaprojektowano tzw. regulowany uchwyt do rozciągania przedstawiony na rys. 10. Uchwyt ten umożliwia regulację osi obciążenia w dowolnej fazie badania w sposób dokładny, łatwy i szybki.

Dla zapewnienia płynnego oraz szybkiego obciążenia modeli skonstruowano podstawkę pod ciężarki o regulowanej wysokości w granicach  $\pm 150$  mm, widoczną na rys. 9. Talerz podstawy znajduje się bezpośrednio pod szalką dźwigni.

Szkic zespołu obciążającego przedstawia rys. 11. Na modelach nanoszono tuszem siatkę współrzędnych.

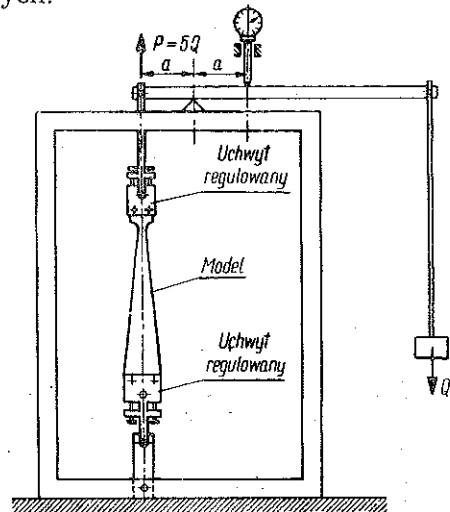
Pomiar odkształceń modelu w trakcie obciążenia zapewniono przez stosowanie zdjęć stykowych, za pomocą zdjęć porównawczych oraz przez pomiar wydłużenia całkowitego.

Zdjęcia stykowe wykonywane na kliszach szklanych Omega o wymiarach  $12 \times 18$  cm produkcji Filmu Polskiego (fabryka Alfa); są to klisze wysokoczułe, ortochromatyczne, bezodblaskowe. Czulość klisz wynosiła  $13^{\circ}/_{10}$  DIN.

Zdjęcia stykowe modelu wykonywano równolegle ze zdjęciami elastooptycznymi stosując to samo oświetlenie co i do zdjęć elastooptycznych. Czas naświetlania wynosił około 1,5 sekundy.

Technika wykonywania zdjęć stykowych widoczna jest na rys. 12.

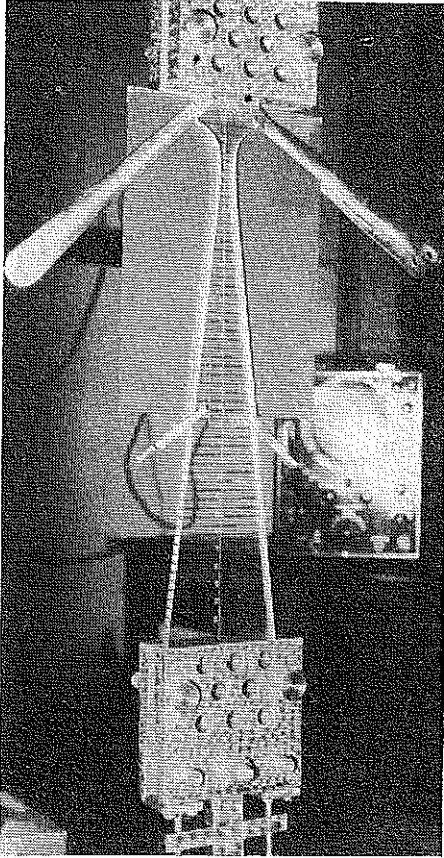
Na podstawie zdjęć stykowych wyznaczono odkształcenia modelu w jego płaszczyźnie. Pomiaru odkształceń ze zdjęć dokonywano z pomocą



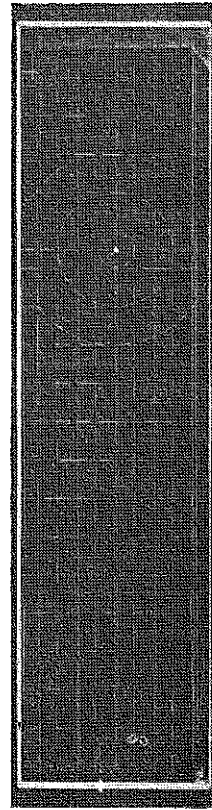
Rys. 11. Szkic zespołu obciążającego w ustawieniu do badań pełzania przy rozciąganiu



komparatora poziomego Zeissa, model B. Zmiany grubości modeli w czasie mierzono mikromierzem warsztatowym. W ten sposób uzyskano nie tylko wartości wydłużeń właściwych dla wszystkich przekrojów modelu, ale również otrzymano zależność pomiędzy wielkością przekrojów poprzecznych i czasem dla różnych wartości naprężeń. Zależność powyższa umożliwia wyznaczenie rzeczywistej krzywej pełzania przy odniesieniu naprężeń do rzeczywistych przekrojów, a nie do przekrojów początkowych.

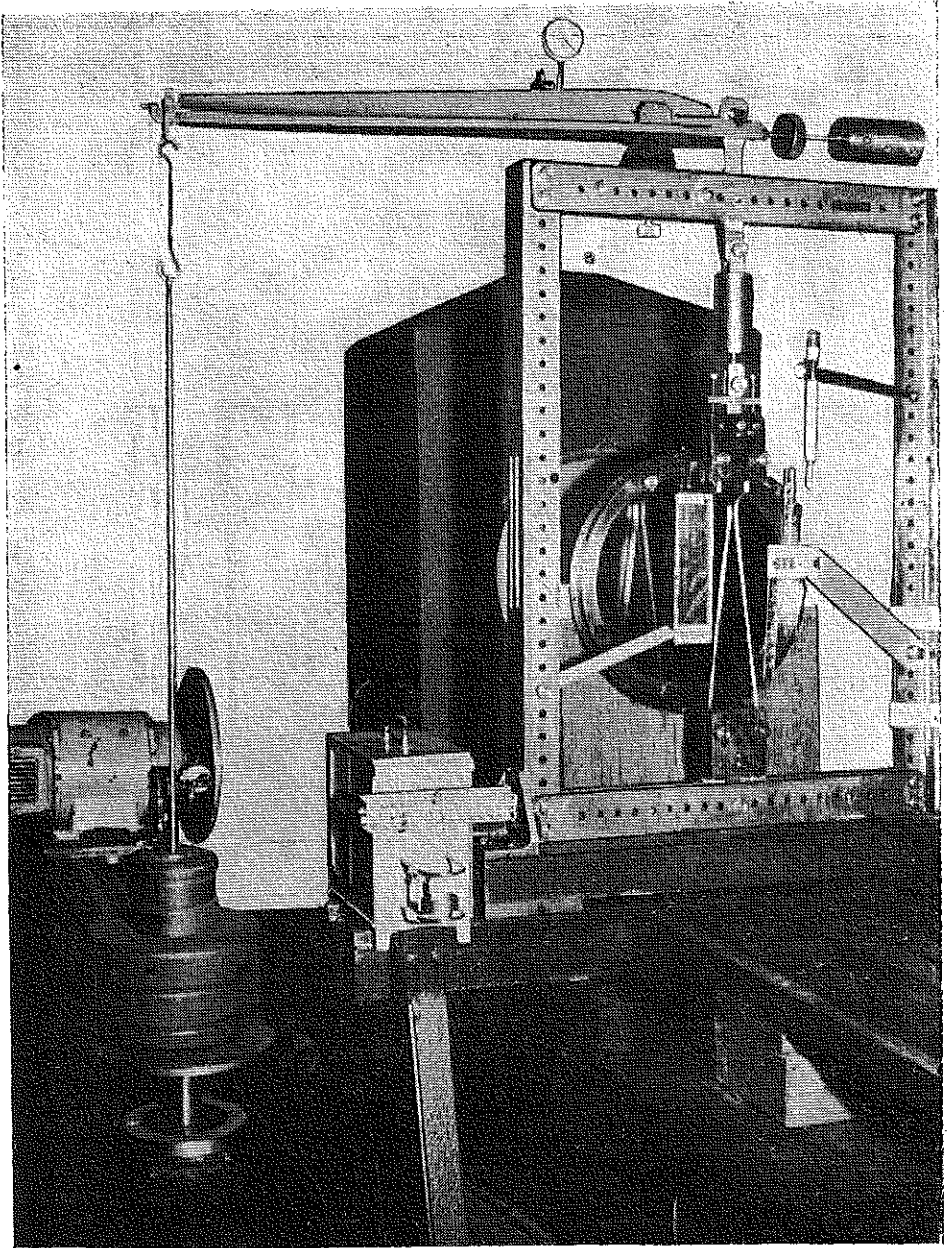


Rys. 12. Technika wykonywania zdjęć stykowych do pomiaru pełzania mechanicznego



Rys. 13. Skalomierz

Zdjęcia porównawcze wykonywano przy zastosowaniu tzw. skalomierza. Skalomierzem jest płytką z plastyku o tym samym współczynniku rozszerzalności liniowej co i materiał modelu, pokryta siatką współrzędnych. Skalomierz widoczny jest na rys. 13. Aby było możliwe otrzymywanie obrazu skalomierza na zdjęciu również przy ciemnym polu widzenia, powierzchnia skalomierza od strony latarni pokryta została ce-



Rys. 14. Zespół obciążający w trakcie pomiarów pełzania przy rozciąganiu

łofanem. Warstwa celofanu została tak zorientowana, aby zarówno przy ciemnym, jak i przy jasnym polu widzenia światło przechodzące przez skalomierz było zawsze spolaryzowane eliptycznie.

Skalomierz umieszczony został obok modelu, w jego płaszczyźnie; w ten sposób jest on widoczny na wszystkich zdjęciach elastooptycznych, co umożliwia również wyznaczanie odkształceń modelu w jego płaszczyźnie, przy czym wpływ zmian temperatury jest automatycznie wyeliminowany.

Pomiar wydłużenia całkowitego dokonywany był przy pomocy czujnika zegarowego mierzącego wychylenie dźwigni obciążającej. Czujnik został umieszczony tak, że jego wskazania dają bezpośrednio wartość całkowitego wydłużenia modelu.

Czujnik umożliwia również kontrolę pomiaru temperatury, gdyż jego wskazania — jak to wynika ze schematu obciążenia — zależą również od zmian temperatury zgodnie z zależnością

$$[\Delta l]_t = (t_1 - t_2) (a_1 - a_2) l_m,$$

gdzie  $[\Delta l]_t$  oznacza wpływ temperatury na wskazania czujnika,  $t_1$  i  $t_2$  odpowiednio temperatury w przestrzeni pomiarowej w dwóch różnych chwilach,  $a_1$  i  $a_2$  oznacza odpowiednio współczynniki rozszerzalności liniowej materiału ramy obciążającej i materiału modelu,  $l_m$  oznacza długość modelu pomiędzy uchwytami.

Współczynniki liniowe rozszerzalności cieplnej wynoszą: dla stali  $a_1 = 11 \cdot 10^{-6}$ , dla żywicy P-6:  $a_2 = (10-15) 10^{-5}$ , średnio  $a_2 = 12 \cdot 10^{-5}$ . Dla przyrostu temperatury o  $1^\circ\text{C}$  mamy

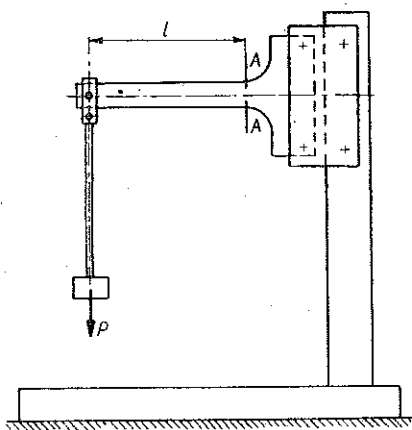
$$\frac{[\Delta l]_t}{l_m} = (120 - 11) 10^{-6} \approx 1,1 \cdot 10^{-4};$$

przy długości modelu między uchwytami  $l = 300$  mm

$$[\Delta l]_t = 300 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} = 0,03 \text{ mm}/1^\circ\text{C}.$$

Pomiar temperatury w przestrzeni pomiarowej dokonywano za pomocą dwóch termometrów rtęciowych. Równocześnie rejestrowano przebieg temperatury oraz wilgotności względnej za pomocą termohydrografu tygodniowego umieszczonego obok zespołu obciążającego.

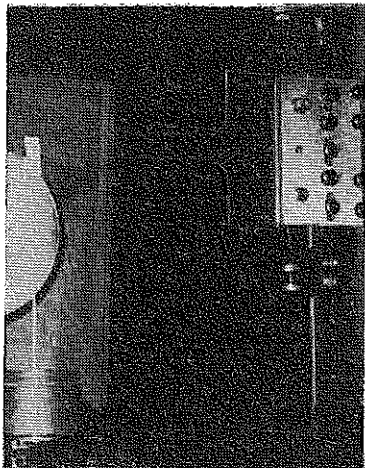
Widok zespołu obciążającego w trakcie pomiarów przy rozciąganiu podany jest na rys. 14.



Rys. 15. Szkic zespołu obciążającego do badań na zginanie przy stałej sile

Badania statyczne przy zginaniu wykonywano na modelach obciążonych stałą siłą przyłożoną na końcu modelu.

Modele do badań przy stałej sile wmontowane były w odpowiednie urządzenia obciążające, zapewniające pomiar przemieszczeń belki. Szkic



Rys. 16. Widok modelu do badań na pełzanie przy zginaniu stałą siłą w zespole obciążającym

urządzenia obciążającego do badań przy stałej sile podany jest na rys. 15. Widok zmontowanego urządzenia wraz z modelem przedstawia rys. 16.

Badania zmian efektu elastooptycznego po odciążeniu przeprowadzono jak na rys. 17 oraz rys. 18. Sposób badania wynika z rysunku: dwa identyczne modele były w identyczny sposób obciążone. Po odciążeniu obu modeli jeden z nich poddany został działaniu obciążeń przemiennych.

Badania statyczne przy zginaniu były analogiczne do badań przy rozciąganiu.

aby można było prosto i łatwo realizować dowolny przypadek obciążenia niesymetrycznego.

### 2.3. Badania dynamiczne.

Badania dynamiczne prowadzono przy obciążeniach periodycznie przemiennych. Tym niemniej aparaturę do badań zaprojektowano tak,

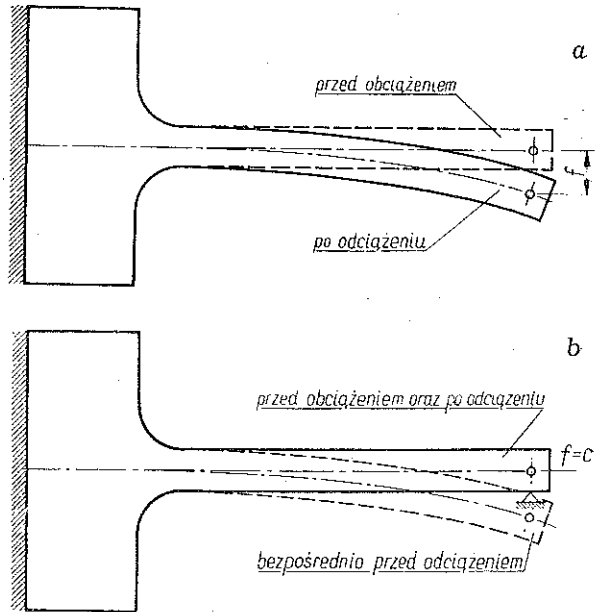
zagadnienie można było opracować prowadząc badania przy periodycznie zmiennych obciążeniach lub przy periodycznie zmiennych przemieszczeniach, inaczej mówiąc prowadząc badania przy wymuszeniu dynamicznym lub przy wymuszeniu kinematycznym. Badania przy periodycznie zmiennych obciążeniach są pod względem technicznym znacznie bardziej kłopotliwe. Aparatura realizująca obciążenia oraz układ kontrolujący i samoregulujący jak również układ pomiarowy muszą być dość złożone. Natomiast badania przy periodycznie zmiennych przemieszczeniach są znacznie prostsze: zarówno układ realizujący przemieszczenia o dowolnie zmiennej amplitudzie i częstotliwości, jak również układ kontrolny, układ samoregulujący za pomocą sprzężeń zwrotnych oraz układ mierzący badane wielkości są stosunkowo proste, zarówno funkcjonalnie jak i konstrukcyjnie.

Z punktu widzenia mechaniki ciał odkształcalnych przy założeniu, że warunki założeniowe odnośnie obciążeń i przemieszczeń są ściśle spełnione, badania przy wymuszeniu dynamicznym i kinematycznym mają różny charakter.

Przy wymuszeniu dynamicznym na geometryczną stronę przebiegu zjawiska (wartość przemieszczeń, kształt linii ugięcia) wywiera zasadniczy

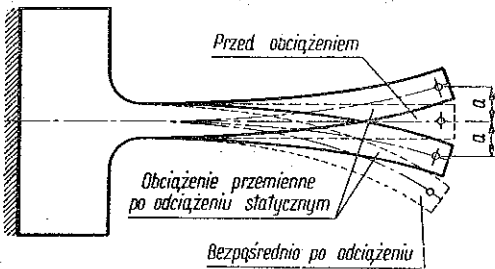
wpływ histereza materiału oraz pełzanie materiału. Amplituda drgań ustala się dopiero po pewnym czasie. Nieliniowa zależność pomiędzy tłu-  
mieniem a odkształceniem spowodować może inny kształt linii ugięcia niż obliczony dla ciał liniowo sprężystych. Pełzanie materiału wywołuje zwiększenie amplitudy drgań. Wzrost temperatury w trakcie badania, wywołany tarcie-  
m wewnętrznym, zmienia histerezę, co z kolei wpływa na amplitudę drgań.

Przy wymuszaniu kinematycznym amplituda drgań jest stała przez cały okres badania, a więc odkształcenia posiadają stałą wartość. Analiza wyników badania jest więc prosta i dokładna, zwłaszcza że łatwo jest przeprowadzić skalujące badania statyczne.



Rys. 17. Schemat badania zmian efektu elastooptycznego przy zginaniu po odciążeniu  
a — belka odciążona swobodna, b — belka po odciążeniu przywrócona do pierwotnego położenia

Wytyczne dla konstrukcji urządzenia do badań dynamicznych — na podstawie analizy zawartej w pracy [1] i w punkcie 3 oraz na podstawie żądanej dokładności pomiaru — ustalono jak następuje:



Rys. 18. Schemat badania zmian efektu elastooptycznego przy zginaniu po odciążeniu z zastosowaniem przemieszczeń przemien-nych końca modelu o stałej amplitudzie dokoła pierwotnego położenia równowagi

- (1) średnica pola widzenia 300 mm z możliwością adaptacji do 260 mm,
- (2) częstotliwość drgań regulowana w zakresie 0-200 Hz,
- (3) amplituda drgań regulowana w zakresie  $0 \pm 20$  mm,
- (4) odpowiadająca sobie czę-  
stotliwość i amplituda drgań: 100 Hz przy  $\pm 20$  mm,
- (5) maksymalna siła obciąża-  
jąca 50 kG,

- (6) obserwacja stroboskopowa w przerywanym elektrycznie strumieniu świetlnym,

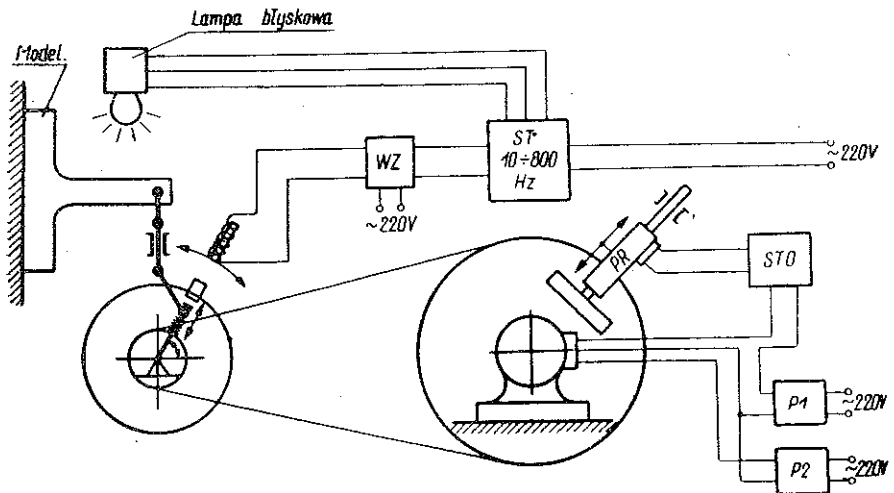
- (7) przesuw ciągly fazy błysku w trakcie pomiaru w granicach  $\pm 90^\circ$ ,
- (8) dopuszczalne przemieszczenie punktów modelu w trakcie jednego błysku  $\pm 0,3$  mm,
- (9) dopuszczalne samoczynne przesunięcie fazy błysku  $\pm 0,5^\circ$ .

Warunek (8) wynikający ze zdolności rozdzielczej polaryskopu jest w istocie warunkiem na czas trwania błysku. Przy częstotści zmian równej 100 Hz z amplitudą  $\pm 20$  mm, warunek powyższy sprowadza się do żądania, aby czas trwania błysku nie przekraczał około

$$\Delta t^h = \frac{0,5}{2\pi \cdot 20 \cdot 100} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ [sek].}$$

Warunek (9) jest warunkiem dla niestateczności układu wyzwalającego błysk.

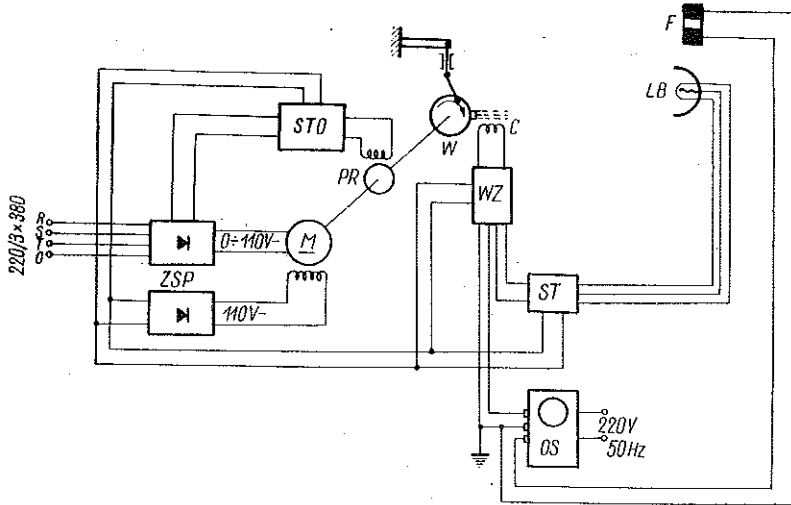
Na podstawie powyższych założeń zaprojektowane zostało urządzenie o schemacie podanym na rys. 19. Schemat układu elektrycznego urządzenia przedstawia rys. 20.



Rys. 19. Schemat blokowy układu do elastooptycznych badań dynamicznych

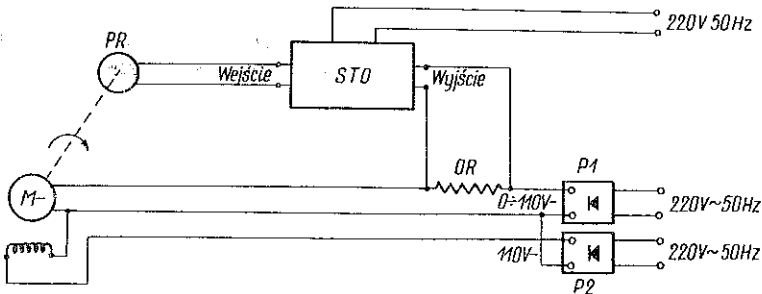
Model  $M_0$  zamocowany jest w uchwycie dwuszcękowym umieszczonym przesuwnie na stojaku, który z kolei przymocowany jest do podstawy zespołu obciążającego. Koniec belki modelu sprzęgnięty jest za pośrednictwem wahliwego łącznika z wodzikami tzw. wibratora kinematycznego  $W$ , wymuszającego przemieszczenia końca belki o amplitudzie zmiennej w granicach  $\pm 20$  mm. Na kole zamachowym wibratora umieszczony jest trzpień, który przecinając linie pola magnetycznego cewki impulsowej  $C$  wyzwalają impuls sterujący lampą błyskową. Cewka impulsowa umieszczona jest obrotowo-przesuwnie w granicach  $\pm 90^\circ$ . Wibrator  $W$

napędzany jest przez silnik bocznikowo-szeregowy prądu stałego *M* za pomocą przekładni pasowej. Silnik zasilany jest przez zespół prostowników *ZSP* napięciem 110 V. Jeden z prostowników, prostownik lampowy *P2*, zasila uzwojenie wzbudzające silnika napięciem 110 V. Drugi



Rys. 20. Schemat blokowy układu elektrycznego urządzenia do elastooptycznych badań dynamicznych

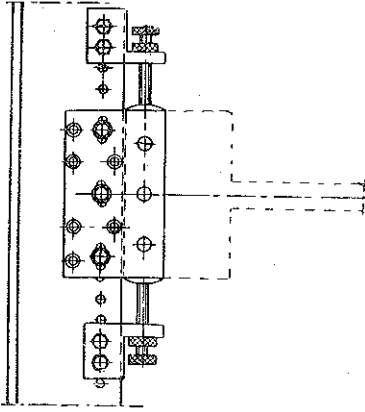
*ZSP* — zespół prostowników 0-110 V, *M* — silnik prądu stałego, *PR* — prądniczka prądu stałego, *STO* — stabilizator obrotów, *W* — wibrator, *WZ* — wzmacniacz impulsów, *C* — cewka impulsowa, *ST* — stroboskop elektrony, *OS* — oscylograf, *LB* — lampa błyskowa, *F* — fotokomórka



Rys. 21. Schemat blokowy układu do stabilizacji obrotów silnika wibratora  
*M* — silnik prądu stałego, *PR* — prądniczka prądu stałego, *STO* — stabilizator obrotów, *OR* — opór szeregowy 2  $\Omega$ , 250 W (w obwodzie zasilania), *P1*, *P2* — prostowniki zasilające

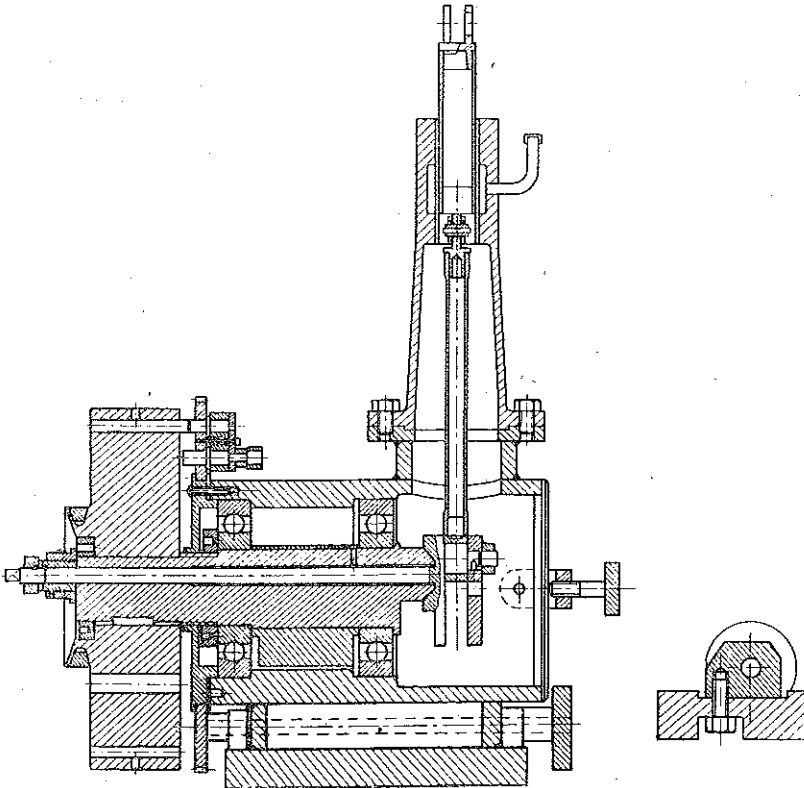
z prostowników, prostownik selenowy *P1*, zasila uzwojenie wirnika prądem o napięciu regulowanym skokowo w granicach 0-110 V, co 6 volt. Na kole pasowym silnika elektrycznego umieszczona jest przesuwne prądniczka prądu stałego *PR*, sterująca stabilizatorem obrotów *Sto*. Stabilizator obrotów utrzymuje stałość obrotów silnika włączając lub wyłączając

opór dodatkowy. Zasada działania układu do stabilizacji obrotów silnika wibratora podana jest na rys. 21. Impuls od cewki impulsowej *C* wzmocniony we wzmacniaczu impulsów *WZ* steruje stroboskopem elektronowym *ST*, który wyzwala błyski rtęciowej lampy błyskowej *LB* stale w tej samej fazie przemieszczenia modelu. Fotokomórka *F* ma za zadanie kontrolować prawidłową pracę lampy *LB*. Impuls od fotokomórki *F* kierowany jest na ekran oscyloskopu katodowego *OS*. Jednocześnie dla kontroli prawidłowego nadawania impulsów przez cewkę impulsową *C* są one również kierowane na ekran oscyloskopu *OS*.



Rys. 22. Szkic przesuwne-  
go uchwyty dwuszcękowego

Zespół mocujący model rozwiązany jest podobnie jak przy badaniach statycznych (rys. 15-16) z tą tylko róż-

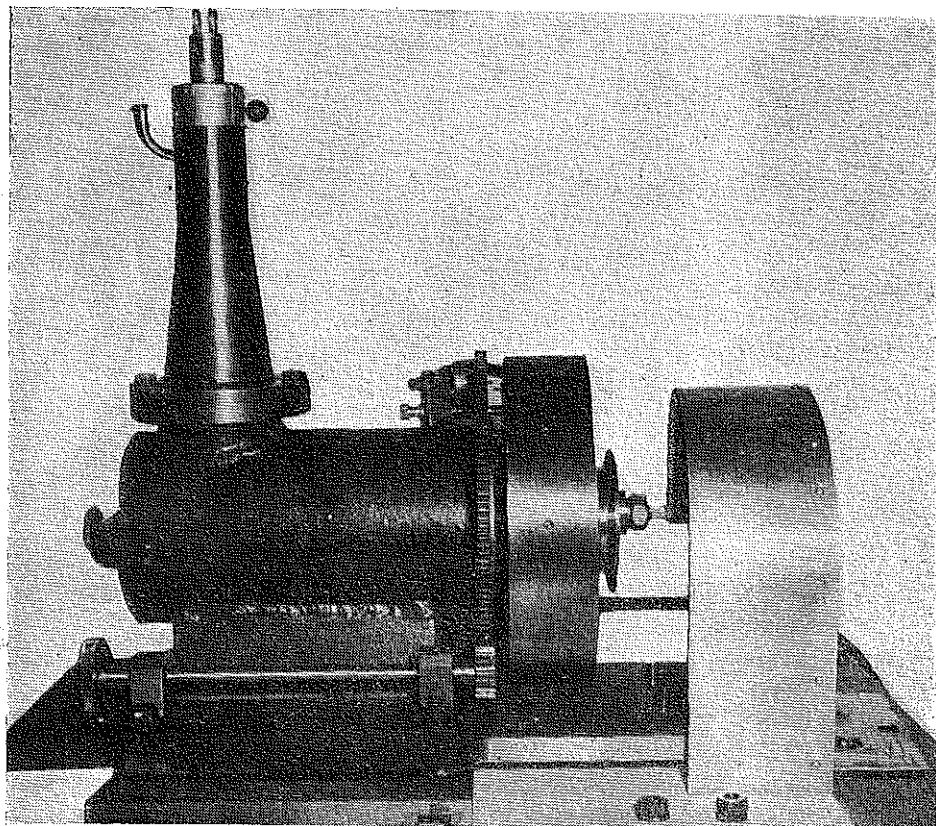


Rys. 23. Zestawienie wibratora kinematycznego, przekrój podłużny



nicą, że zapewniona jest dzięki przesuwneemu pionowo uchwytowi dwupłytkowemu dokładna regulacja położenia modelu w kierunku poziomym. Szkic przesuwneego uchwytu przedstawia rys. 22.

Za pomocą tego uchwytu zapewniona jest zarówno możliwość dokładnej i szybkiej regulacji położenia zerowego modelu, którego drugi koniec złączony jest z wodzikim wibratora kinematycznego, jak i zapewniona jest możliwość dokładnego i szybkiego zrealizowania wstępnego przemieszczenia końca modelu w zerowym położeniu zmian obciążeń.



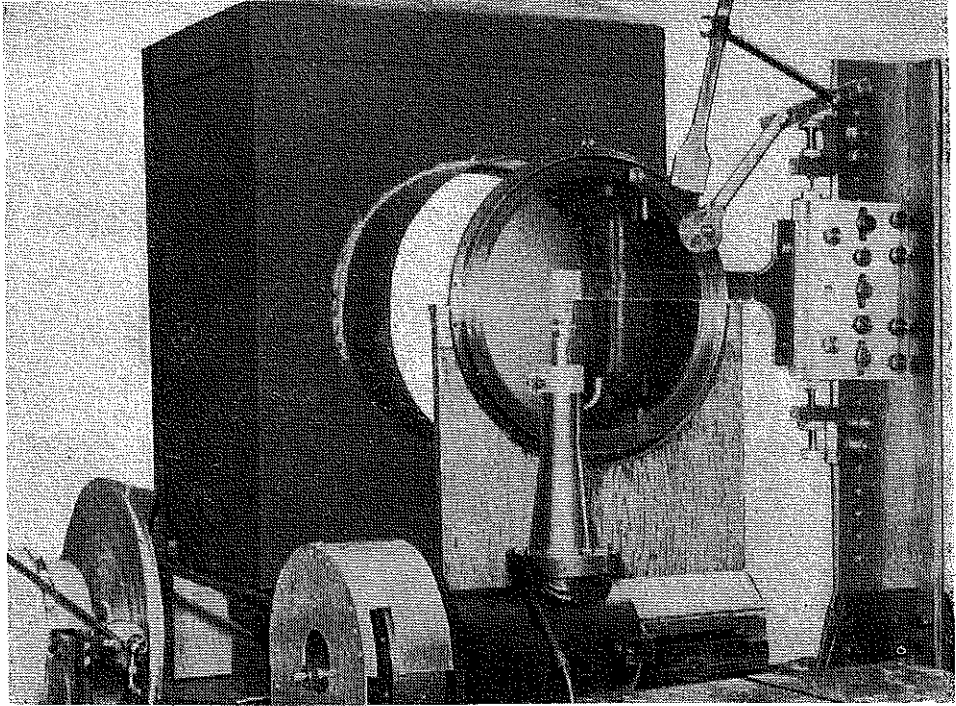
Rys. 24. Widok ogólny wibratora kinematycznego

Przesuwny uchwyt zamocowany jest na sztywnym stojaku złączonym z podstawą zespołu obciążającego.

W skład zespołu obciążającego wchodzi wibrator kinematyczny, wymuszający przemieszczenia modelu, silnik prądu stałego napędzający wibrator, zespół prostowników zasilających silnik prądu stałego oraz układ stabilizujący obroty silnika.

Wibrator kinematyczny, wymuszający przemieszczenie określonego punktu modelu o przebiegu sinusoidalnym, stanowi układ korbkowy, wo-

dzikowy. Badany element łączony jest z wibratorem za pomocą widełek łącznikowych. Zestawienie wibratora podane jest na rys. 23. (Wibrator został obliczony i skonstruowany przez A. Lewandowskiego na podstawie funkcjonalnych i konstrukcyjnych założeń autora).



Rys. 25. Stoisko do badań dynamicznych: zespół mocujący model, model badany, wibrator

Nierównomierność względna ruchu sinusoidalnego (stosunek amplitudy drugiej harmonicznej do amplitudy pierwszej harmonicznej) oraz odpowiednie współczynniki nierównomierności w odniesieniu do przyspieszeń są podane w tabl. 5.

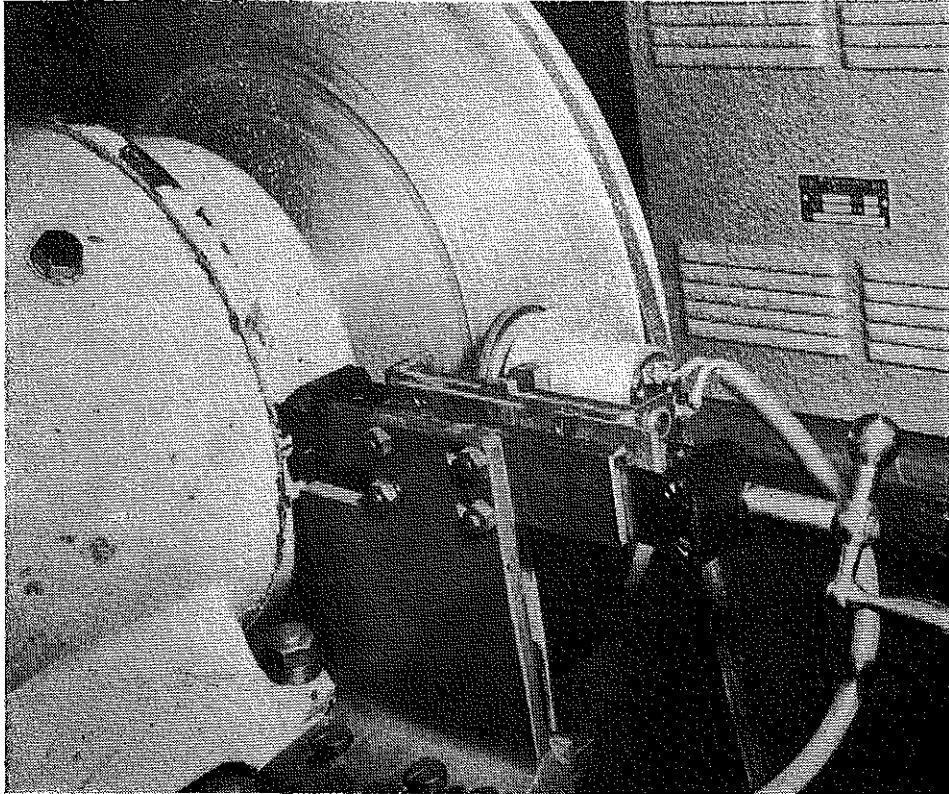
Tablica 5

Amplituda drgań: pierwsza harmoniczna w mm	20	10	5
Stosunek amplitudy pierwszej harmonicznej do amplitudy drugiej harmonicznej w %	2,5	1,25	0,625
Współczynnik nierównomierności w odniesieniu do przyspieszeń w %	10	2,5	1,25

Nierównomierność względna ruchu obrotowego przy  $n = 100$  Hz i przy maksymalnej amplitudzie 20 mm jest mniejsza od 0,016%.

Widok ogólny wibratora kinematycznego podany jest na rys. 24.

Wibrator napędzany jest silnikiem prądu stałego, bocznikowo-szeregowym na 110 V o mocy 0,8 kW za pomocą przekładni klinowej. Wibrator umocowany jest na podstawie zespołu obciążającego; silnik umocowany jest na własnej podstawie. Ustawienie modelu do badań na zginanie obciążanego za pomocą wibratora widoczne jest na rys. 25.



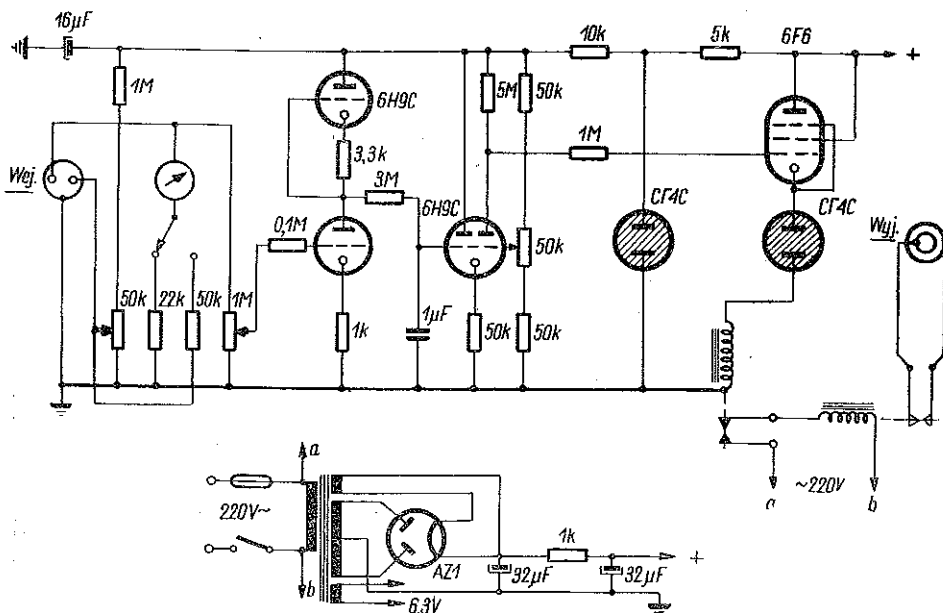
Rys. 26. Prądniczka prądu stałego sterująca obrotami silnika napędzającego wibrator

Zespół prostowników zasilających silnik elektryczny składa się z jednego prostownika selenowego zasilającego obwód wirnika i jednego prostownika lampowego zasilającego obwód wzbudzenia o następujących charakterystykach: prostownik selenowy — napięcie wyjściowe 0-110 V z regulacją skokową co 6 V, maksymalny prąd 10 A, typ BMZ-3-120-25; prostownik lampowy, napięcie wyjściowe 110 V, maksymalny prąd 1 A (konstrukcji Z. Kobylińskiego).

Układ stabilizujący obroty silnika składa się z prądniczki prądu stałego, sterującej pracą stabilizatora oraz z elektronowego stabilizatora obrotów. Wirnik prądniczki sprzęgnięty jest mechanicznie z kołem pasowym

silnika za pomocą przekładni ciernej; prądniczka zamocowana jest przesuwnie w taki sposób, że przekładnia pomiędzy wirnikiem silnika a wirnikiem prądniczki może być zmieniana w sposób ciągły. Zamocowanie prądniczki widoczne jest na rys. 26. Prądniczka sprzęgnięta jest elektrycznie z elektronowym stabilizatorem obrotów. Zasada działania oraz schemat stabilizatora widoczny jest na rys. 27. Rysunek 28 podaje widok stabilizatora. Stabilizator skonstruowany został przez L. Korczaka i Z. Kobylńskiego.

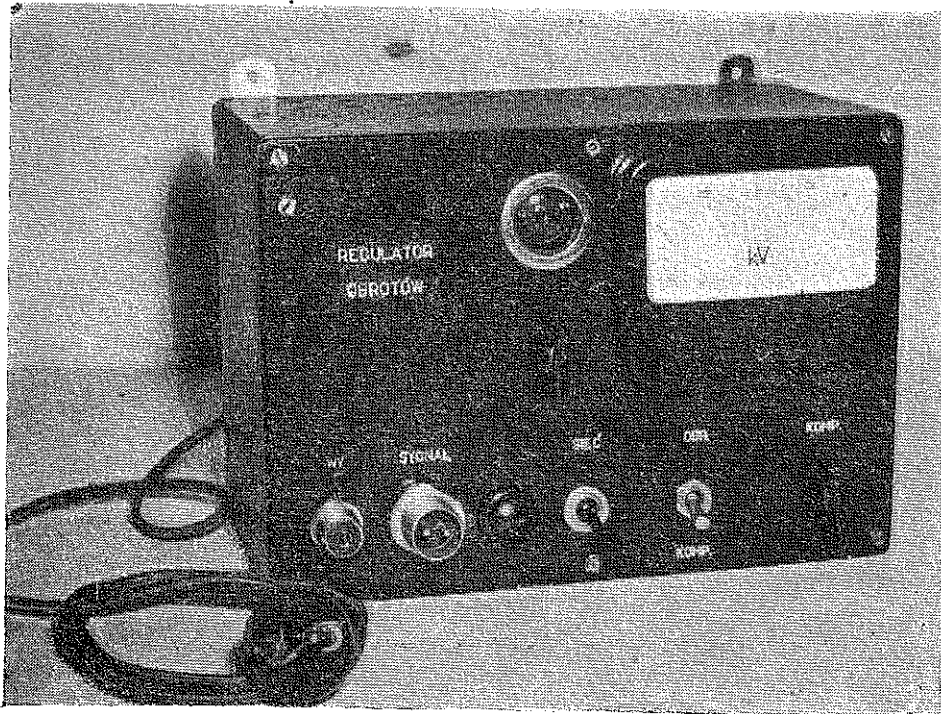
W skład zespołu oświetlającego wchodzi cewka impulsowa sterująca błyskami lampy, wzmacniacz impulsów, stroboskop elektronowy z lampą rtęciową, fotokomórka kontrolna (fotoogniwo germanowe) oraz oscyloskop katodowy dwustrumieniowy.



Rys. 27. Schemat oraz zasada działania elektronowego stabilizatora obrotów silnika wibratora

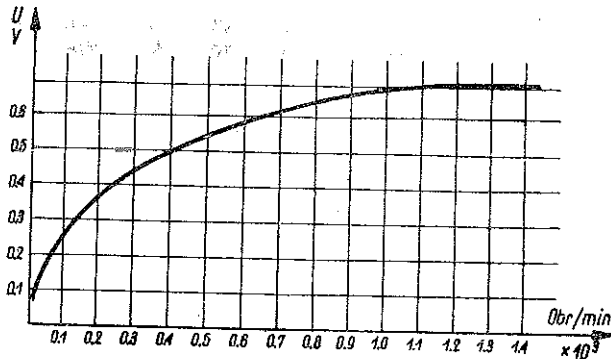
Cewka impulsowa zamocowana jest na tarczy obrotowej umieszczonej na kadłubie wibratora współosiowo z kołem zamachowym, jak to jest widoczne na rys. 23. Za pomocą przekładni zębatej położenie cewki zmieniać można w granicach  $\pm 90^\circ$ .

Cewka impulsowa posiada stały magnes ferrytowy. Końcówki sworzni w kole zamachowym i w cewce przecinających strumień magnetyczny posiadają średnicę 2 mm. Sworznie umieszczone są na promieniu 100 mm. Obserwacje prowadzone za pomocą lampy błyskowej oraz oscylografu katodowego wykazały, że impuls wywołany mijaniem się sworzni wyzwała



Rys. 28. Stabilizator obrotów

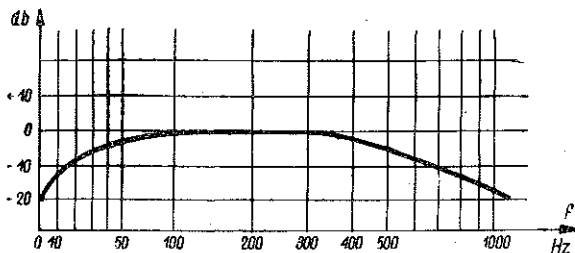
błysk lampy wówczas, gdy oba sworznie pokrywają się w jednej czwartej swej średnicy z dokładnością do  $\pm 20\%$  średnicy. Obliczony stąd błąd kątowy wyzwolenia błysku wynosi  $0,2^\circ$ .



Rys. 29. Charakterystyka cewki impulsowej  $U = f \text{ obr/min}$

Wzmacniacz impulsów wzmacnia impulsy sterujące cewki impulsowej o charakterystyce podanej na rys. 29; charakterystykę wzmacniania podaje rys. 30. Po wyjściu ze wzmacniacza impuls sterujący doprowadzony jest do stroboskopu.

Stroboskop elektronowy firmy RFT, typ LS-911 z lampą rtęciową został zastosowany jako źródło błysków świetlnych. Błyski świetlne wyzwalane stale w tej samej fazie przemieszczenia modelu pozwalają na wykonywanie zarówno obserwacji jak i rejestracji fotograficznej w sposób podobny jak przy obciążeniach statycznych. Licząc się z bezwładnością postrzegania obserwatora wygodnie jest prowadzić obserwację wizualną poczynając od częstości błysków 16 Hz w górę.

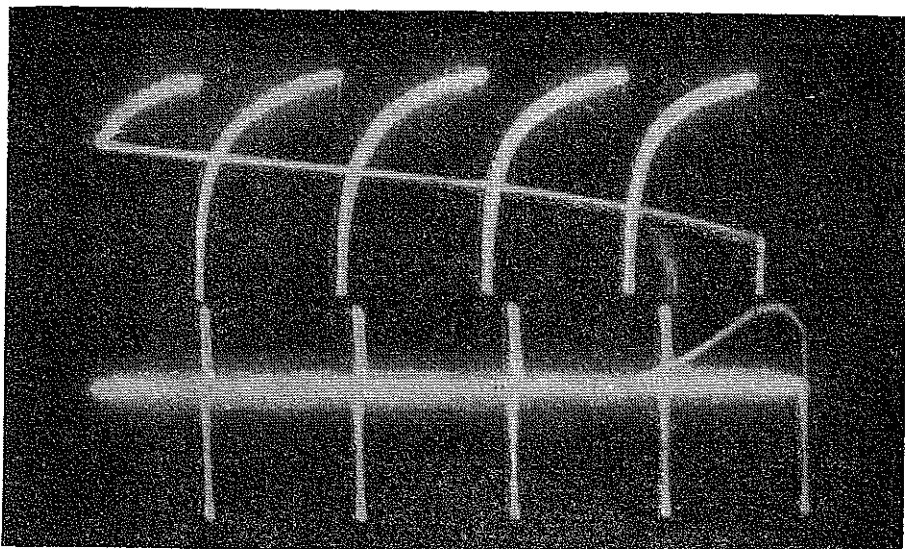


Rys. 30. Charakterystyka przenoszenia wzmacniacza impulsów

Charakterystyka stroboskopu jest następująca: zakres częstości błysków 12-800 Hz regulowany skokowo i płynnie, czas trwania błysku  $1 \cdot 10^{-6}$  sek, napięcie obcego impulsu sterującego 5-10 V.

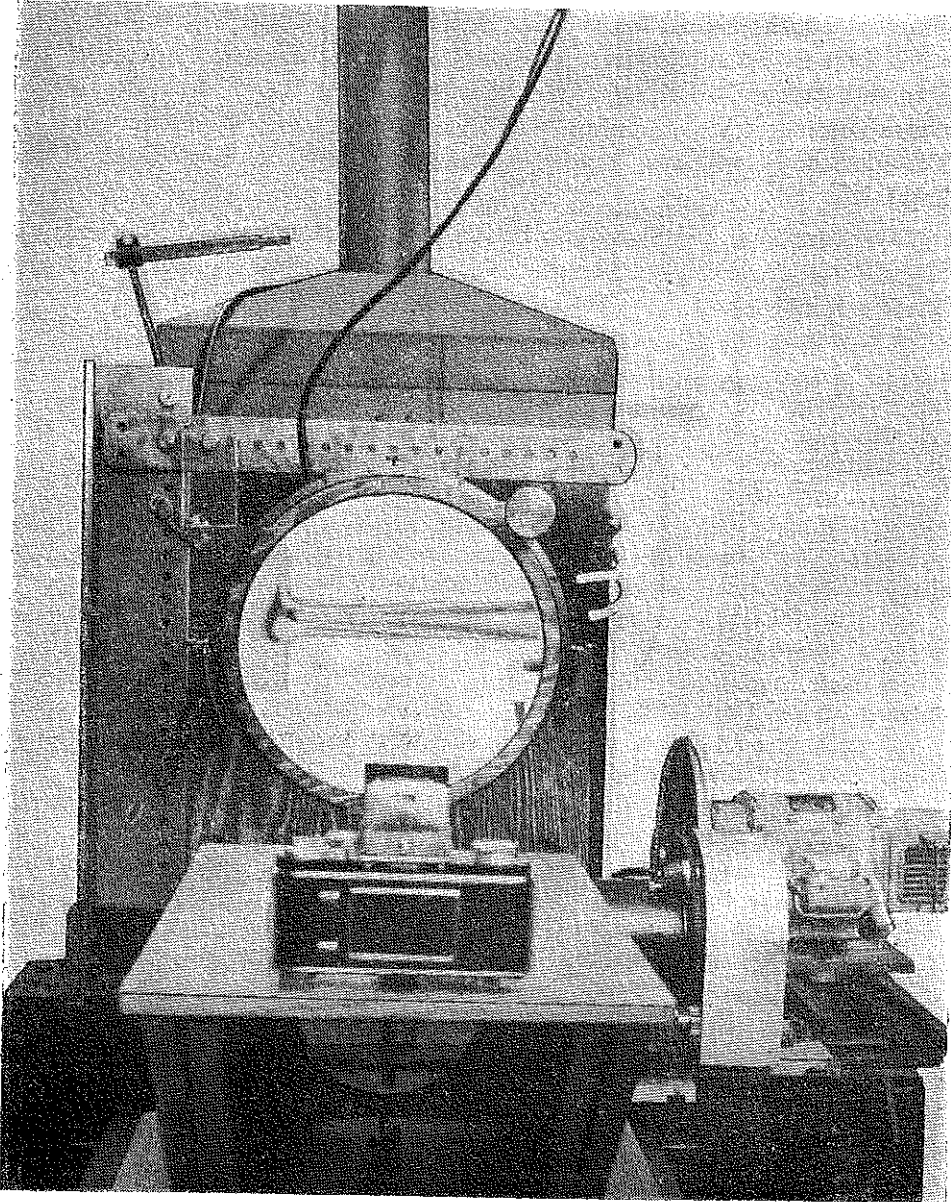
Stroboskop przerobiono w celu obniżenia dolnej granicy częstości błysków; błyski po przerobieniu wyzwalane są w najniższym zakresie częstości od 2-3 Hz bezpośrednio impulsem sterującym z pominięciem własnego generatora. (Przeróbkę zaprojektował i wykonał Z. K o b y l i ń s k i).

Fotokomórka służąca do kontroli fazy błysku w stosunku do fazy impulsu sterującego umieszczona jest w latarni polaryskopu. Jako fo-



Rys. 31. Obraz impulsu cewki impulsowej oraz fotokomórki na ekranie oscyloskopu katodowego

tokomórkę zastosowano tzw. fotodiode germanową produkcji Zakładu Doświadczalnego Instytutu Łączności, pracującą jako fotoogniwo o następującej charakterystyce: czułość 20 mA/lumen, prąd ciemni  $< 10 \mu\text{A}$ , charakterystyka przenoszenia płaska do 12 kHz, maksymalna czułość fotodiody przy promieniowaniu o długości fali  $\lambda = 1,5 \mu$ .



Rys. 32. Urządzenie do badań dynamicznych w trakcie pracy; model drga z częstotliwością 50 Hz

Stosowano również fotokomórkę selenową.

Impulsy od fotokomórki oraz od wzmacniacza impulsów cewki impulsowej doprowadzone są do oscyloskopu katodowego jedno- lub dwustrumieniowego, jak to podane jest na rys. 20.

Oscyloskop katodowy służy do kontroli pracy cewki impulsowej oraz lampy stroboskopowej. Stosowano dwa typy oscyloskopów katodowych: oscyloskop dwustrumieniowy produkcji Zakładu Konstrukcji Tele- i Radiotechnicznych Politechniki Warszawskiej typu KO-2 oraz oscyloskop jednostrumieniowy produkcji firmy Radiometer (Kopenhaga) typ OSG-41A. Zdjęcie na rys. 31 podaje obraz obu impulsów na ekranie oscyloskopu.

Wyżej opisane urządzenie do badań dynamicznych pracowało zadawalająco. Montaż elektryczny całości urządzenia wykonał Z. Kobylński i J. Sieklucki.

Całość urządzenia (z wyjątkiem prostowników znajdujących się w sąsiednim pomieszczeniu) podczas pracy widoczna jest na rys. 32.

#### Literatura cytowana w tekście

[1] J. T. Pindera, *Współczesne kierunki rozwojowe metod elastoptyki i możliwości ich zastosowania do rozwiązywania zagadnień mechaniki budowli*, Księga Pamiętkowa dla uczczenia zasług naukowych prof. W. Wierzbickiego (w druku).

[2] W. Stauffer i A. Keller, *Besondere Erscheinungen beim Zeitstandsversuch*, Schweizer Archiv, Dezember 1956.

[3] E. G. Cooker and L. N. Filon, *A Treatise on Photoelasticity*, Cambridge University Press 1957 (1932).

[4] D. J. Coolidge, *An Investigation of the Mechanical and Stress-Optical Properties of Columbia Resin CR-39*, E. S. A. V. VI, nr 1/1948.

[5] R. Hiltcher, *Gütebeurteilung spannungsoptischer Modellwerkstoffe*, Forschung 20 Bd, Heft 3, 1954.

[6] J. Aubaud, *Recherches sur la relation contrainte-biréfringence dans le plexiglas M222*, La Recherche Aéronautique, 26, 1952.

[7] J. Marin and J. E. Griffith, *Creep Relaxation of Plexiglas II A for Simple Stress*, J. Engin. Mech. Div. Proc. of. A. S. C. E., July 1956.

[8] A. J. Guzetti, *Measurement of Cure Rate of Thermosetting Moulding Materials*, ASTM Bull. Febr. 1957.

[9] R. Hiltcher, *Spannungsoptische Untersuchung elastoplastischer Spannungszustände*, Z. VDI, Bd. 95, nr 23, 11 August 1953.

[10] R. Hiltcher, *Theorie and Anwendung der Spannungsoptik im elastoplastischen Gebiet*, Z. VDI, 97, nr 2, 11 Januar 1955.

[11] J. Lesavre, *Le fluage des thermoplastiques*, R. G. C. Vol. 30, nr. 12, 1953.

[12] E. Mönch, *Die Dispersion der Doppelbrechung als Mass für die Plastizität bei spannungsoptischen Versuchen*, Forschung, Heft 1, 1955.



[13] Н. И. Пригоровский, *Оптически активные прозрачные материалы для плоских и объемных моделей: Поляризационно-оптический метод исследования напряжений*, Изд. А.Н. СССР, Moskwa 1956.

[14] R. Houwink, *Elastomers and plastomers*, Vol. I, Elseviers Publ. Co. New York, 1950.

[15] M. M. Frocht and A. A. Thomson, *Studies in Photoplasticity*, Illinois Inst. Techn., Dez. 1957. Referat na Sympozjum Niejednorodności w Teorii Sprężystości i Plastyczności, Warszawa 1958.

[16] H. A. Stuart, *Die Physik der Hochpolymeren*, Dritter Band Vierter Band, J. Springer, Berlin 1956.

[17] A. M. Freudenthal, *Inelastisches Verhalten von Werkstoffen*, (tłum. z ang.), Verlag Technik, Berlin 1955.

[18] H. Schwieger und I. Trager, *Kinematographische Auflösung der Biegewellenausbreitung beim Balkenquerstoss*, Experim. Techn. Phys., Heft 5, 1957.

[19] H. Schwieger, *Spannungsoptische Methoden zur Untersuchung dynamischer Spannungszustände*, Experim. Techn. Phys., Heft 2, 1956.

[20] Prospekt fabryczny Nr 88524, Januar 1955. — Palatal P-6. Badische Anilin Soda-Fabrik A. G.

[21] B. Lewicki i J. T. Pindera, *Model elastoptyczny konstrukcji zbrojonej*, Arch. Inżyn. Łąd., nr. 4, 1956.

[22] H. T. Jessop i F. C. Harris, *Photoelasticity. Principles and Methods*, Cleaver-Hume Press, London 1949.

[23] L. Föppl, *Fortschritte in der Spannungsoptik*, Kunststoffe, B. 43, 346, 1953.

[24] H. Titschack, *Ein Beitrag zur Frage des Modellwerkstoffes im ebenen und räumlichen spannungsoptischem Versuch*, Dynamit-Actien-Gesellschaft, Troisdorf (bez daty po r. 1954).

[25] W. Horth, *Technische Schwingungslehre*, J. Springer, Berlin 1922.

[26] J. T. Pindera, *Technika badań elastoptycznych płaskiego stanu naprężenia*, Rozpr. Inżyn., 1, 3 (1955).

## Резюме

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОТОУПРУГИХ СВОЙСТВ НЕСКОЛЬКИХ ПОЛИЭСТРОВЫХ СМОЛ

Часть I. Метод и техника исследований при статических периодически  
изменяющихся нагрузках

В настоящей фазе развития методов фотоупругости необходимо обратить большое внимание на исследование свойств материалов для изготовления моделей, а в особенности на исследования при длительных нагрузках.

Исследование влияния длительных нагрузок на фотоупругие свойства материалов проводились различными авторами при использовании нескольких измерительных методов. Исследования, проводимые, в общем, на балках изгибаемых чистым моментом постоянной вели-

чины или на призматических образцах, нагруженных постепенно увеличивающейся силой ограничивались исследованием упруго-оптической ползучести при постоянной нагрузке. В настоящей работе анализируются некоторые исследования фотоупругой ползучести, указывая на недостатки применяемых до сих пор методов исследования фотоупругих свойств материалов.

Разрабатывается метод и техника исследования, при практически одноосном, однородном поле напряжений, на моделях, в форме смуклого клина, растягиваемых постоянной осевой силой.

Разрабатывается метод и техника исследований ползучести фотоупругого поворота при периодически переменных нагрузках. Проводится анализ структуры и свойства исследуемых полиэстровых смол (смола CR-39, смола VP-1527 и смола палатал Р-6) на основании опубликованных работ.

Устанавливается программа исследований ползучести и фотоупругого поворота при статических и периодически переменных нагрузках так, чтобы полученные результаты можно подвергнуть структуральной и реологической интерпретации, а также чтобы они были вступлением для дальнейших исследований фотоупругой виброползучести.

#### S u m m a r y

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

##### Part I. Investigation method and technique with static and periodic loads

In the present state of development of photoelastic methods, it is necessary to devote more attention to the investigation of the properties of materials for models, especially for loads of long duration.

The influence of loads of long duration on the photoelastic properties of materials was tested by various authors, several measurement methods being used. The tests carried out, usually with beams subjected to pure bending with moments of constant value or prismatic specimens subjected to a progressively increasing load, were confined to the investigation of the optical creep with constant load. Some of the investigations of photoelastic creep are analyzed in the present paper, and reveal the incompleteness of the investigation methods over the photoelastic properties of materials hitherto employed.

For a homogeneous practically one-axial stress field an investigation method and technique is proposed, involving models in the form of slender wedges, stretched by a constant axial force.

Methods and technique of tests of creep and optical retardation with periodic loads are also advanced.

The structure and properties of the polyester resins (CR-39 resin, VP-1527 resin and P-6 palatal resin) are analyzed on the basis of the literature.

A program is suggested for tests concerning the creep and elasto-plastic retardation with static and periodic loads, in such a manner that the results obtained may be interpreted from the structural and rheological point of view and constitute an introduction to further investigation of photoelastic vibro-creeping.

**ZAKŁAD BUDOWNICTWA  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

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

---