

JERZY TADEUSZ PINDERA

BADANIA PEWNYCH REOLOGICZNYCH WŁASNOŚCI  
ELASTOPTYCZNYCH KILKU ŻYWIC POLIESTROWYCH (II)

ROZPRAWY  
INŻYNIERSKIE  
CXXXIV

## SPIS TREŚCI

Część II. Badania i interpretacja wyników	
1. Badania przy rozciąganiu statycznym	483
1.1. Modele	483
1.2. Technika pomiaru	484
2. Badania przy zginaniu statycznym i dynamicznym	485
2.1. Modele	485
2.2. Technika pomiaru	486
3. Opracowanie wyników pomiaru	486
3.1. Opracowanie wykresów	487
3.2. Dokładność pomiaru	487
4. Wyniki badań przy rozciąganiu	488
5. Wyniki badań przy zginaniu	489
6. Analiza wyników	491
6.1. Porównanie wyników badań dla żywicy CR-39	491
6.2. Porównanie wyników badań dla żywicy VP-1527	493
6.3. Porównanie wyników badań dla żywicy P-6	494
7. Metoda i technika badania w świetle uzyskanych wyników	494
7.1. Wpływ sposobu przyłożenia obciążenia	494
7.2. Wpływ charakteru pola naprężeń	498
7.3. Wpływ obciążeń zmiennych	501
8. Interpretacja otrzymanych zależności	503
8.1. Interpretacja strukturalna	503
8.2. Interpretacja reologiczna	513

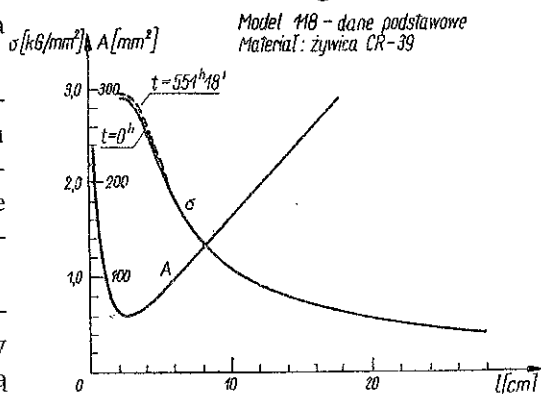
## CZĘŚĆ II. BADANIA I INTERPRETACJA WYNIKÓW

### 1. Badania przy rozciąganiu statycznym

Badania związane z rozciąganiem statycznym obejmowały badania pełzania elastooptycznego i mechanicznego oraz badania nawrotu elastooptycznego, dokonane na próbkach o kształcie smukłego klina. Badania te prowadzone były tylko dla obciążeń statycznych.

**1.1. Modele.** Dane ogólne modeli do badań przy rozciąganiu zestawione są w tabl. 1. Tablica zawiera tylko modele, objęte badaniami opisanymi w niniejszej pracy.

Dane geometryczne dla modeli oraz wartości naprężeń w przekroju osiowym podane są na rys. 1, 2 i 3. Wszystkie pomiary odnoszą się do przekroju



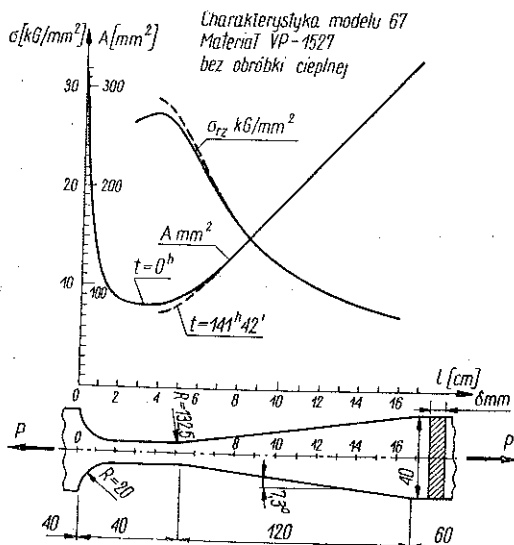
Rys. 1. Model nr 118. Dane podstawowe. Materiał: żywica CR-39

**Tablica 1. Dane o modelach do badań na pełzanie przy rozciąganiu**

(Z — model zerwał się w trakcie badania, N — model nieuszkodzony, W — model wygrzewany  
NW — model niewygrzewany)

Lp	Numer		Materiał modelu		Dane techniczne			Czas obciążenia	Stan modelu po badaniu	
	modelu wzornika		nazwa	grubość cieplna	P	A <sub>min</sub>	σ <sub>max</sub>			
								mm	W/NW	kG
1	67	12	VP-1527	8,4	NW	217,5	84	2,59	141 43'	Z
2	100	14	CR-39	6,7	NW	185,0	67	2,75	305 46'	N
3	118	14	CR-39	6,5	NW	175,0	64	2,74	551 18'	N
4	121	14	P-6	10,6	NW	150,0	102	1,47	548 49'	N
5	122	D14	P-6	10,6	W90°C 40h	425	107	3,97	115 40'	N

osiowego modeli. Wszystkie wartości naprężeń w przekroju osiowym są wartościami rzeczywistymi, to znaczy wyznaczone zostały przy uwzględnieniu współczynnika kształtu oraz przy uwzględnieniu zmiany pól przekrojów poprzecznych w wyniku dużych odkształceń modelu.



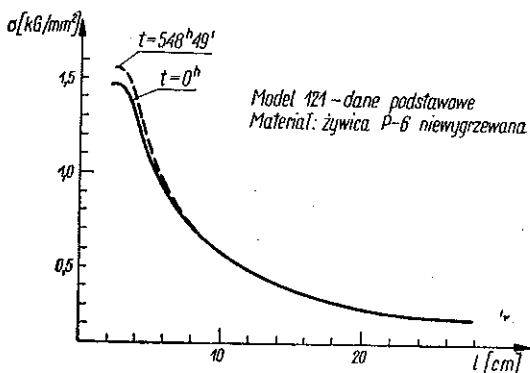
Rys. 2. Model nr 67. Dane podstawowe. Materiał: żywica VP-1527 bez obróbki cieplnej

ciężarów na szalke, która spoczywała na podstawie, po czym (po przeprowadzeniu regulacji osiowego obciążenia modelu) model obciążano w przeciągu około 10 sek obniżając łagodnie talerz podstawy. Bezpośrednio po tym robiono zdjęcia robocze, elastoptyczne i stykowe oraz wykonano pozostałe pomiary.

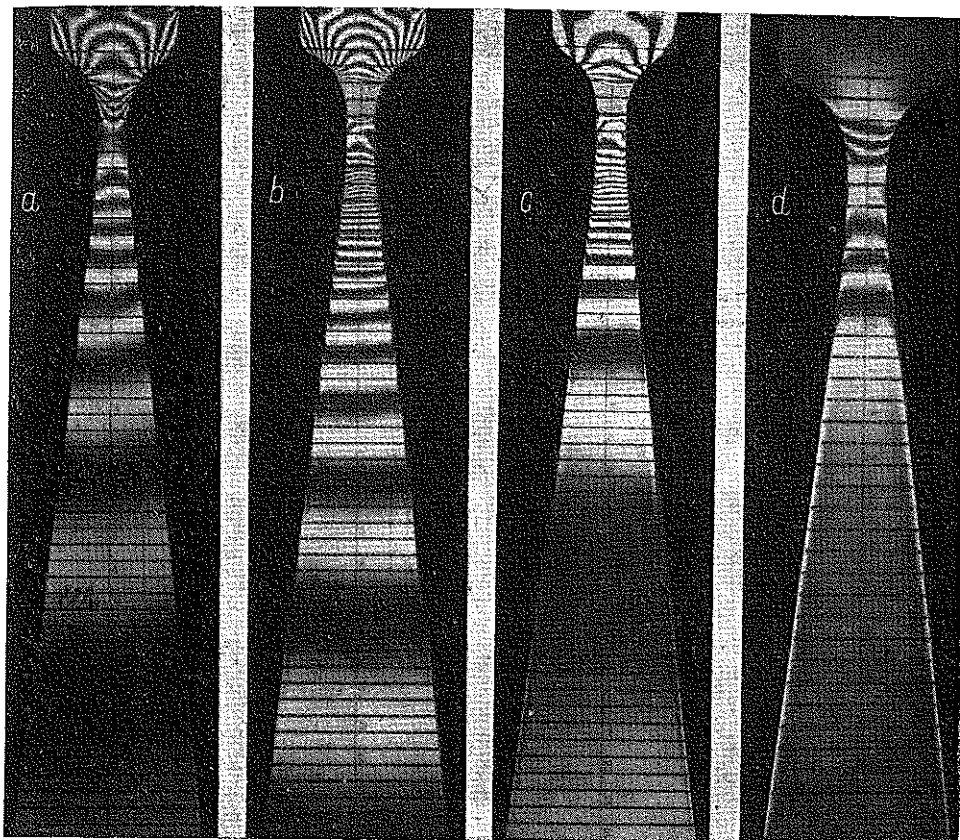
Ze względu na trudność obniżenia temperatury w pomieszczeniu pomiary dokonywano w temperaturze 22-23°C. Ponieważ moment odciążenia modelu (zdjęcie obciążenia lub pęknięcia modelu) jest bardzo interesujący, zmontowano akustyczny zespół sygnalizacyjny, włączający się automatycznie w chwili pęknięcia modelu. W ten sposób przy przypadkowym pęknięciu modelu zdjęcia były dokonywane przed upływem 30 sekund.

**1.2. Technika pomiaru.** Każdy model po wykonaniu i po naniesieniu siatki współrzędnych był zmierzony (współrzędne siatki oraz szerokość i grubość modeli w każdym przekroju). Po ustawieniu dokonywano wyjściowych zdjęć elastoptycznych prostopadle i równoległe do płaszczyzny modelu przy trzech długościach fali świetlnej oraz dokonywano zdjęcia stykowe, mające na celu rejestrację danych geometrycznych badanego modelu.

Obciążano model w ten sposób, że nakładano ustaloną ilość



Rys. 3. Model nr 121. Dane podstawowe. Materiał: żywica P-6 niewygrzewana



Rys. 4. Żywica CR-39 (Model 118). Pola izochrom przy rozciąganiu. Zdjęcia przy żółtej linii rtęci: a — zdjęcie po 1'' po obciążeniu, b — zdjęcie po 549<sup>h</sup> 29' po obciążeniu i przed odciążeniem, c — zdjęcie po 1' po odciążeniu, d — zdjęcie po 3430<sup>h</sup> po odciążeniu

## 2. Badania przy zginaniu statycznym i dynamicznym

Badania przy zginaniu statycznym i dynamicznym obejmowały badania pełzania elastooptycznego, relaksacji elastooptycznej oraz nawrotu elastooptycznego swobodnego i wymuszonego określonym przemieszczeniem przy obciążeniach stałych oraz periodycznie zmiennych.

2.1. Modele. Dane dotyczące modeli użytych do badań przy zginaniu podane są w tabl. 2.

Badania żywicy VP-1527 przeprowadzono na modelach nr 108 i 112; modele te obciążone były dynamicznie. Badania żywicy P-6 przeprowadzono na modelach nr 123 i 124. Model nr 124 był obciążony wyłącznie statycznie, po czym został całkowicie odciążony. Model nr 123 obciążony został statycznie tak samo jak model nr 124, po czym obciążony został dy-

namicznie: wymuszane zostały przemieszczenia symetryczne na końcu modelu dookoła początkowego położenia. Badania żywicy CR-39 przeprowadzono na modelach nr 126A i 127A. Model nr 127A obciążony był statycznie, po czym koniec jego został przemieszczony do początkowego położenia. Model nr 126A był obciążony statycznie tak samo jak model 127A, a następnie został obciążony dynamicznie tak samo jak model nr 123.

Tablica 2. Dane o modelach do badań na pełzanie przy zginaniu  
NW — model niewygrzewany, W — model wygrzewany

Lp	Numer		Materiał modelu			Obciążenie		Amplituda drgań	Czas obciążenia statycznego
	modele wzornika		nazwa	grubość	obróbka cieplna	siła $P$	momentem $M$		
—	—	—	—	mm	WN-W	kG	kG cm	mm	godz./min.
1	112	15	VP-1527	8,3	NW	—		7,38 19,4	
2	123	15	P-6	10,7	NW	12	281	2,5	51 29'
3	124	15	P-6	10,6	NW	12	281		51 52'
4	126	15	CR-39	6,3	NW	12	281		44 46'
5	127	15	CR-39	6,3	NW	12	281		43 55'
6	126A	15	CR-39	4,8	NW	6	140,5	1,5	42 46'
7	127A	15	CR-39	4,8	NW	6	140,5		42 46'

2.2. Technika pomiaru. Badania statyczne wykonywano w ciągłym strumieniu świetlnym tak samo jak przy badaniach na rozciąganie. Badania dynamiczne wykonywano przy zastosowaniu urządzenia stroboskopowego, opisanego w części pierwszej; zdjęcia wykonywano na błonach Agfa-Rapid o czułości 25°/10 DIN. Czas naświetlania dobierano do częstości błysków; przy zastosowaniu filtrów monochromatycznych Wrattenfilter nr 22 i nr 77 naświetlano przeciętnie 200 błyskami.

Pomiarów dokonywano w temperaturze 22-23°C.

### 5. Opracowanie wyników pomiaru

Wyniki pomiaru opracowywano w sposób podany w pracach [8] i [9].

Dążono zasadniczo do możliwie dokładnego wyznaczenia poszukiwanych wartości dla początkowej chwili po obciążeniu. W przypadkach gdy dysponowano dostatecznym materiałem doświadczalnym, wykresy ekstrapolowano do punktu  $t = 0$ . Jako chwilę początkową przyjęto połowę okresu narastania obciążenia.

Wyniki odniesiono do rzeczywistych wartości naprężeń i odkształceń. Zależnościami wyjściowymi były zależności  $m = m(\sigma)$  oraz zależności  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$ . Zależności  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$  wyznaczono na podstawie zdjęć stykowych.

Wartości naprężeń na wykresach nawrotu optycznego posiadają wyłącznie znaczenie umowne i wskazują przekroje, w których panowała w czasie obciążenia określona wartość naprężenia.

**3.1. Opracowanie wykresów.** Opracowano wykresy elastooptyczne dla trzech długości fali świetlnej, mianowicie dla żółtej, zielonej i niebieskiej linii rtęci.

Przy badaniach na rozciąganie opracowano krzywe:  $m = m(\sigma)$  przy  $t = \text{const}$ ,  $m = m(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$ ,  $R = R(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$ ,  $K^{\delta=10} = K(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$ ,  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$ ,  $\varepsilon = \varepsilon(t)$ ,  $m = m(\varepsilon)$ , gdzie  $R = m\lambda$  oraz gdzie  $K^{\delta=10}$  jest elastooptyczną stałą materiałową dla grubości modelu 10 mm.

Wprowadzono pojęcie punktu inwersji i wyznaczono następujące zależności dla punktów inwersji:  $m_i = m_i(t)$ ,  $\sigma_i = \sigma_i(t)$ ,  $\sigma_i/m_i = (\sigma_i/m_i)(t)$ .

Przy badaniach na zginanie opracowano zależności:  $m = m(t)$  dla  $M = \text{const}$ ,  $m = m(t)$  dla  $a = \text{const}$ ,  $m = m(n)$  dla  $a = \text{const}$ , gdzie  $M$  jest momentem gnącym,  $a$  amplitudą drgań oraz  $n$  częstotliwością drgań.

Krzywe nawrotu optycznego przy zginaniu opracowano dla nawrotu swobodnego, dla nawrotu przy przemieszczeniu końca modelu do położenia przed obciążeniem i dla nawrotu przy przemieszczeniu końca modelu do położenia przed obciążeniem, z nałożonymi przemieszczeniami przeciwnymi o zmiennej częstotliwości.

**3.2. Dokładność pomiaru.** Przy badaniach elastooptycznych błędy przypadkowe były małe. Prawie wszystkie punkty pomiarowe mieściły się w grubości narysowanej krzywej. Błędy przypadkowe, wyznaczone na podstawie obliczonych zależności, nie przekraczają z reguły 0,5%. Natomiast rozrzuty punktów pomiarowych przy pomiarach odkształceń są tego samego rzędu co przy typowych badaniach wytrzymałościowych. Tłumaczyć to można zbyt dużym ziarnem klisz, na których dokonywano zdjęcia stykowe.

Przy badaniach elastooptycznych wykluczono możliwość powstawania znacznie większych błędów systematycznych. Zastosowane filtry barwne przepuszczały praktycznie tylko jedną linię widma rtęci. Największe odchylenie zachodziło dla żółtych linii rtęci. Przyjmując mianowicie w przybliżeniu liniową zależność rzędu izochromy od długości fali świetlnej otrzymujemy średni rozrzut

$$\Delta m = \pm \frac{579 - 577}{2 \cdot 578} 100\% = \pm 0,2\%$$

Wpływ ten uwidoczni się więc w nieznacznym powiększeniu szerokości izochrom bez wpływu na dokładność pomiarów przy prawidłowym odczytaniu położenia środka izochromy.

Wszystkie pomiary wykonane były przy tych samych ćwierćfalówkach niezależnie od długości fali świetlnej. Średnia różnica długości fal świetlnych wynosiła

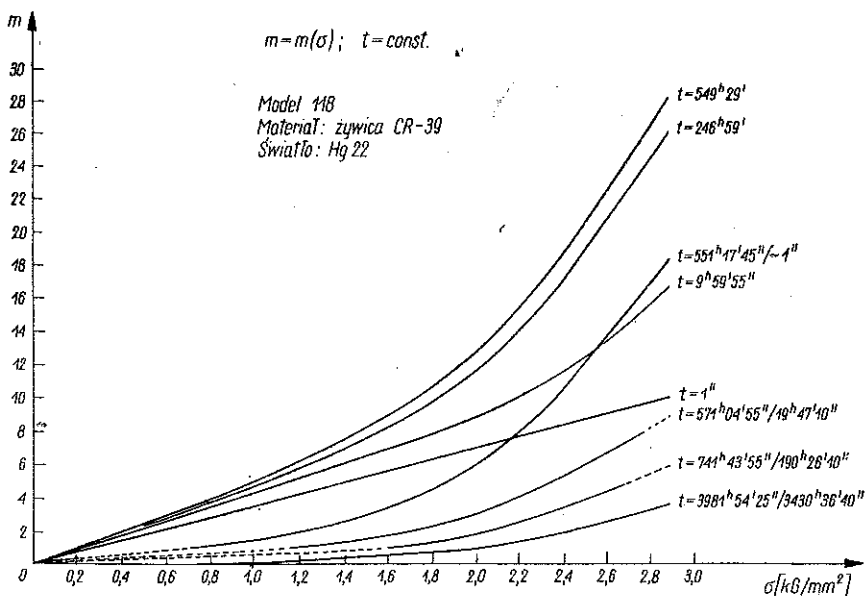
$$\Delta\lambda = \pm \frac{578 - 436}{578 + 436} 100\% = \pm 14\%$$

Różnica ta nie odbiegała znacznie od różnicy przyjętej jako dopuszczalnej dla ćwierćfalówki; uzewnętrzniała się ona w zmianie jasności izochrom bez wpływu na ich położenie przy danym ustawieniu zespołu polaryzującego.

Błąd mogący powstać wskutek zastosowania powierzchniowego a nie punktowego źródła światła wyeliminowany został przez zastosowanie soczewki kolimacyjnej oraz przez silne zmniejszenie otworu obiektywu: zdjęcia wykonywano przy przesłonie 8 obiektywem o ogniskowej 130 mm. Jak wykazują zdjęcia, nie obserwowano efektu grubości, który występuje w tych partiach modelu, które prześwietlane są nieprostopadle.

#### 4. Wyniki badań przy rozciąganiu

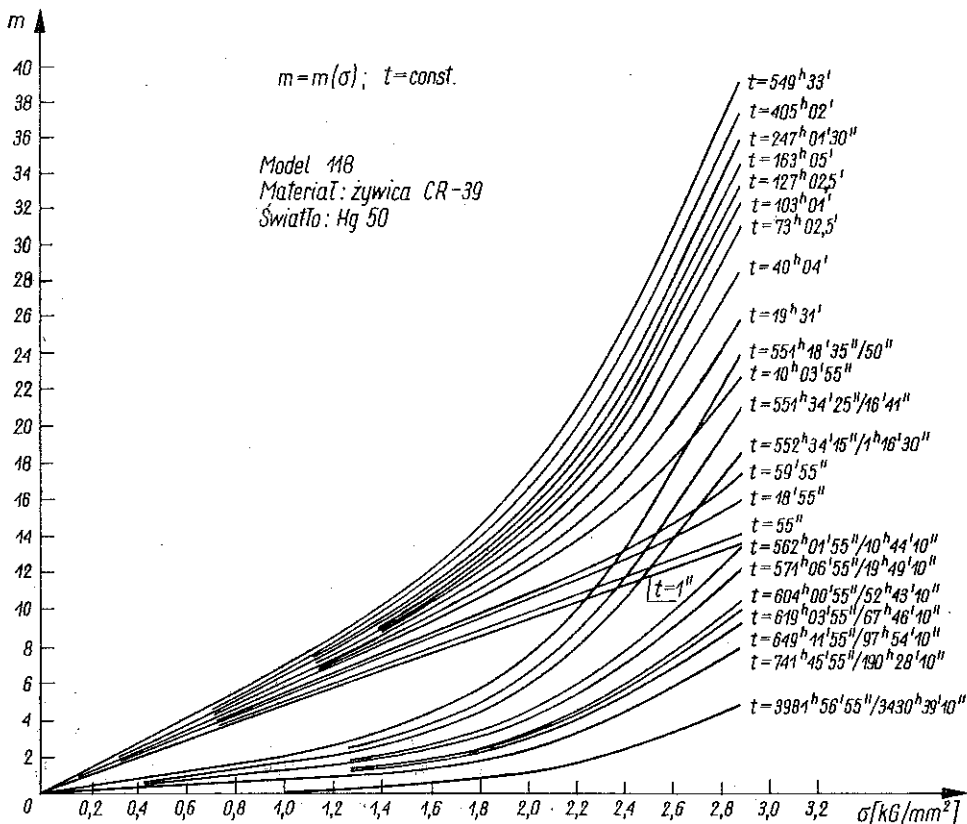
Zgodnie z przeprowadzoną analizą w części pierwszej wyniki badań przy rozciąganiu są zależne tylko od cech materiału. Zależności dla żywicy CR-39 podane są na rys. 4-11. Wykresy dla żywicy VP-1527 bez obróbki



Rys. 5. Żywica CR-39 (Model 118). Zależności  $m = m(\sigma)$  przy  $t = \text{const}$  dla  $P = \text{const}$  i dla  $P = 0$ ; a — dla żółtej linii rtęci



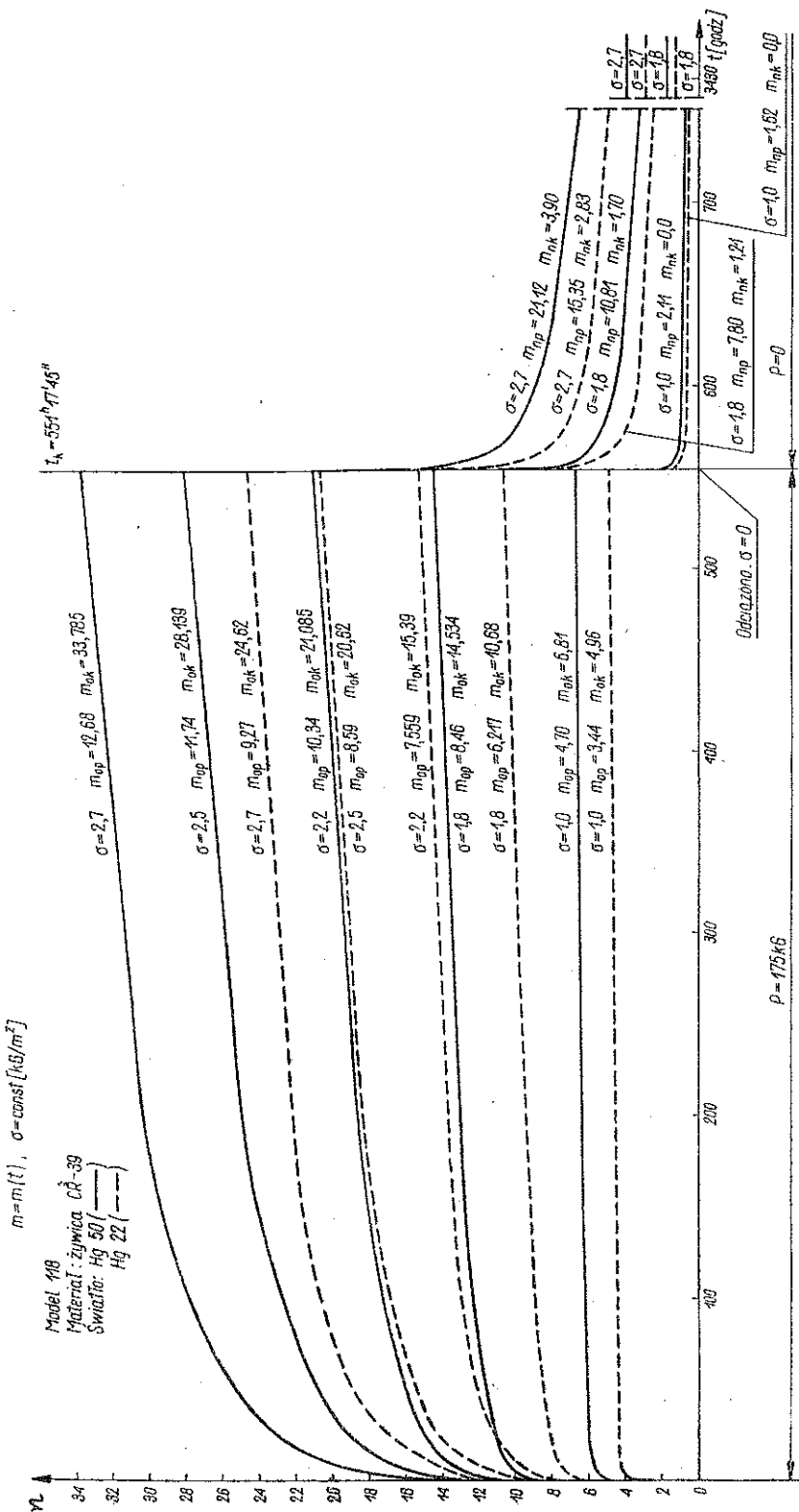
cieplonej podane są na rysunkach 12-16. Wykresy dla żywicy P-6 bez obróbki cieplnej podane są na rysunkach 17-25. Wykresy dla żywicy P-6 po wygrzaniu w temperaturze 90°C przez 40 godzin podane są na rysunku 26-32.



Rys. 6. Żywica CR-39 (Model 118). Zależności  $m = m(\sigma)$  przy  $t = \text{const}$  dla  $P = \text{const}$  i dla  $P = 0$ ; b — dla niebieskiej linii nteci

### 5. Wyniki badań przy zginaniu

Wyniki badań przy zginaniu jak wykazano w części pierwszej stanowią wartości porównawcze, zależne od mechanicznych i elastoptycznych własności reologicznych materiału, od kształtu geometrycznego próbki i od sposobu obciążenia próbki. Pole naprężeń w próbce jest funkcją wymienionych wyżej wielkości. Zależności dla żywicy CR-39 podane są na rys. 33-34; dla żywicy VP-1527 podane są na rys. 35-36; a dla żywicy P-6 na rys. 37-39.



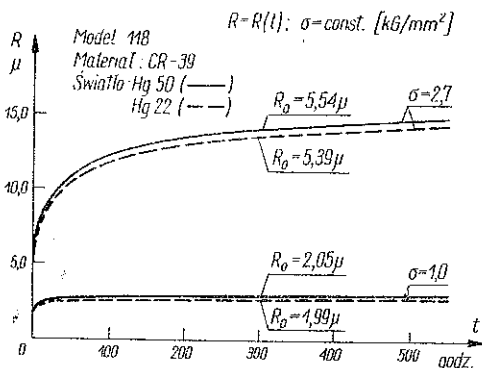
Rys. 7. Żywica CR-39 (Model 118). Zależność  $m = m(t)$  przy  $\sigma = const$  dla  $P = const$  i dla  $P = 0$ ; --- dla żółtej linii rtęci, — dla niebieskiej linii rtęci

## 6. Analiza wyników

Zajmiemy się teraz porównaniem wyników przeprowadzonych badań z innymi wynikami już znanymi, omówimy zastosowaną metodę i technikę badań oraz podamy ogólną interpretację otrzymanych wykresów z reologicznego i strukturalnego punktu widzenia.

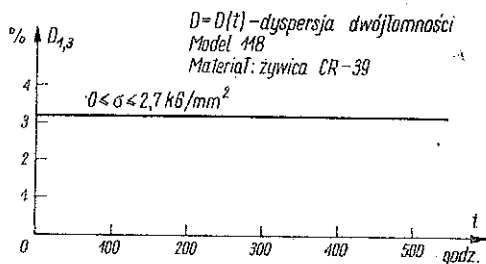
**6.1. Porównanie wyników badań dla żywicy CR-39.** Otrzymane wyniki porównano z wynikami pracy D. L. Coolidge'a, [1], oraz R. Hiltschera, [2]. Porównano przebieg krzywych  $m = m(\sigma)$ , wartości elastooptyczne stałych modelowych oraz wartości przyrostów rzędów izochrom jako funkcji czasu.

Jak wynika z porównania przebiegu krzywych  $m = m(\sigma)$  na rys. 6a i 6b oraz na rys. 8 pracy Coolidge'a, [1], liniowa zależność pomiędzy rzędem izochromy a naprężeniem istnieje według Coolidge'a w przedziale 1,8 kG/mm<sup>2</sup>; badania nasze wykazują, iż w całym badanym przedziale naprężeń, mianowicie od 0 do 2,9 kG/mm<sup>2</sup> zależność ta jest liniowa w ciągu kilku pierwszych minut po obciążeniu.



Rys. 8. Żywica CR-39 (Model 118). Zależność  $R = R(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$   
 --- dla żółtej i — niebieskiej linii rtęci dla pelzania

Różnica ta spowodowana jest odmienną techniką pomiaru. Wpływ techniki pomiaru występuje jeszcze jaskrawiej przy porównaniu wartości elastooptycznych stałych modelowych dla naprężeń  $K$  oraz wartości procentowego przyrostu rzędów izochrom jako funkcji czasu, zestawionych w tabl. 3. Tablicę 3 opracowano w oparciu o rysunki 9 i 11 pracy [1], rys. 8 pracy [2] oraz rys. 7. Zauważyć należy, że podany przez Coolidge'a rozrzut początkowych wartości rzędów izochrom dla tych samych wartości naprężeń wynosi do 50%, zaś rozrzut końcowych wartości rzędów



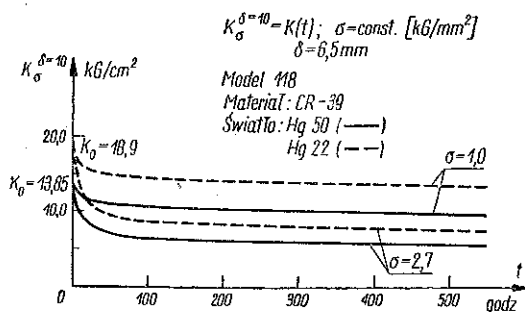
Rys. 9. Żywica CR-39 (Model 118). Dyspersja dwójłomności  $D = D(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$  dla pelzania

izochrom dochodzi do 90% zależnie od wartości momentu gnącego. Coolidge nie podaje długości fali światła, prawdopodobnie obserwacje wykonane zostały przy zielonej linii rtęci.

Tablica 3. Żywica CR-39. Przyrosty rzędów izochrom oraz wartości elastoptycznych stałych modelowych w okresie trzech godzin po obciążeniu

Obserwator	1	2	3	4	5	6	7	8	0/0								
									$\sigma$	$\lambda$	$m$		$\Delta m$	$\frac{\Delta m}{m_0} \cdot 100$	$[K^\delta]_{t=0}$	$[K^\delta]_{t=3}$	$\frac{K_{max}^\delta - K_{min}^\delta}{K_{sr}} \cdot 100$
											0 <sup>h</sup> 00 <sup>l</sup>	3 <sup>h</sup> 00 <sup>l</sup>					
									kG/mm <sup>2</sup>	m $\mu$	—	—	—	0/0	kG/cm <sup>2</sup>	kG/cm <sup>2</sup>	
Autor Rys. 7	1,0	435,8	4,70	5,50	0,80	17,00	21,3	18,3	0,0								
	1,8	435,8	8,46	10,00	1,54	18,25	21,3	18,0									
	2,2	435,8	10,34	12,50	2,16	20,90	21,3	17,6									
	2,5	435,8	11,73	14,80	3,07	26,20	21,3	16,9									
	2,7	435,8	12,68	16,80	4,12	35,50	21,3	16,1									
[1] Rys. 11	1,05	546,1	4,0	5,13	1,13	28,2	26,2	20,4	7,0								
	1,76	546,1	6,58	8,50	1,92	29,2	26,7	20,7									
	2,46	546,1	9,20	11,80	2,60	28,2	26,8	20,8									
Coolidge Rys. 9	1,05	546,1	4,20	5,25	1,05	25,0	25,0	20,0									
	1,40	546,1	5,60	7,10	1,50	26,8	25,0	19,7									

Według pracy R. Hiltshera, [2], krzywa  $K = K(t)$  dla CR-39 ([2], rys. 8) dla  $\sigma = 1,2$  kG/mm<sup>2</sup> przebiega w ten sposób, że w ciągu pierwszych 10 minut spadek wartości  $K$  wynosi około 8%, zaś w ciągu 2 godzin wynosi około 16%. Według Coolidge'a (praca [1], rys. 12)



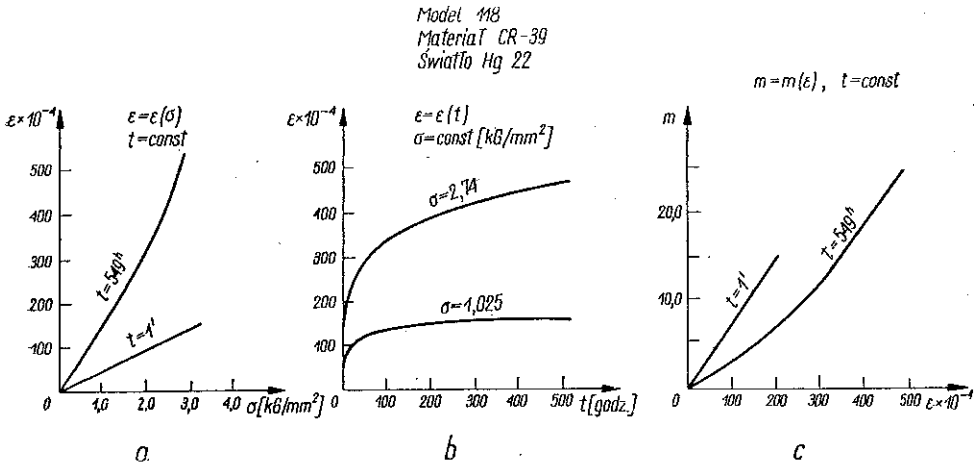
Rys. 10. Żywica CR 39 (Model 118). Zależność  $K = K(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$  — dla żółtej i — niebieskiej linii rtęci

w ciągu pierwszych 10 minut spadek wartości  $K$  dla naprężenia 1,23 kG/mm<sup>2</sup> wynosi około 10%, zaś po upływie 2 godzin około 21%. Charakter krzywej  $K = K(t)$  otrzymanej przez nas jest podobny, jak to wynika z rys. 10 oraz tablicy 3.

Z badań naszych (rys. 5 i 6) wynika, że wykres  $m = m(\sigma)$  początkowo liniowy, poczynając od pewnego czasu i od pewnej wartości naprężenia (będącej funkcją czasu działania obciążenia) staje się nieliniowy, po czym ze wzrostem wartości naprężenie przybiera znowu charakter liniowy. Ta szczególna właściwość nie była możliwa do przewidzenia na podstawie badań krótkotrwałych, jak to wynika z porównania wyżej omówionych wykresów.

6.2. Porównanie wyników dla żywicy VP-1527. Otrzymane wyniki porównano z wynikami pracy R. Hiltschera, [2], oraz H. Titschacka, [3].

Jak wynika z naszych wykresów, które podane są na rys. 15, oraz z wykresów R. Hiltschera (rys. 8 w pracy [2]) i R. Titschacka (rys. 1 w pracy [3]), wyniki badań nie dadzą się porównać. Wpływ metody i techniki pomiaru przy badaniach własności żywicy VP-1527 na otrzymywane zależności jest decydujący; charakter otrzymanych krzywych zależy w sposób istotny od obciążenia odmiennie niż w przypadku żywicy CR-39, gdzie wystąpiły zasadniczo tylko różnice ilościowe.



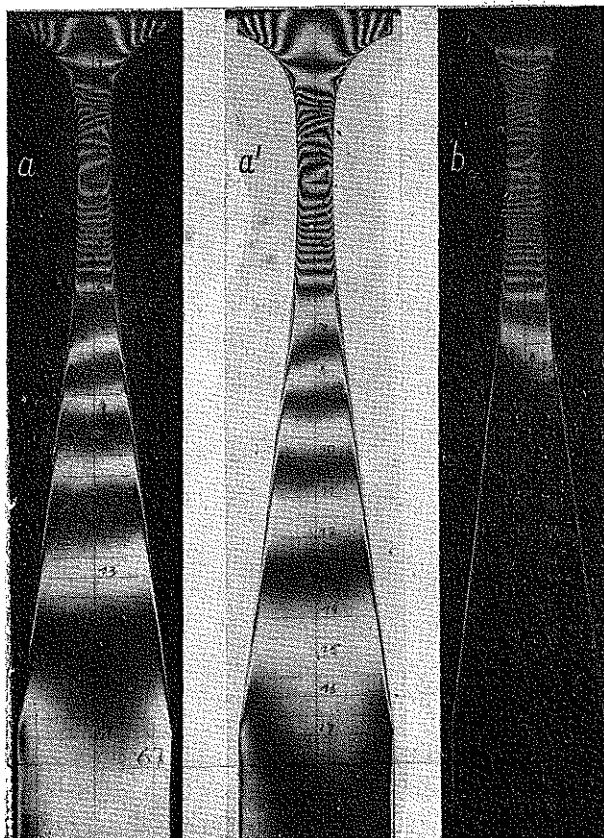
Rys. 11. Żywica CR-39 (Model 118). Zależności a:  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$  przy  $t = \text{const}$ ; b:  $\varepsilon = \varepsilon(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$ ; c:  $m = m(\varepsilon)$  przy  $t = \text{const}$  dla żółtej linii tęczy

Uzyskana przez nas wartość elastoptyczna stałej materiałowej w pierwszych minutach po obciążeniu szybko spada, przy czym w miarę upływu czasu spadek ten jest wolniejszy, aż wreszcie dla żywicy VP-1527 w stanie fabrycznym pochodna funkcji  $K = K(t)$  zmienia znak. Według zaś prac [2] oraz [3] w przeciągu kilkunastu minut po obciążeniu wartość  $K = K(t)$  jest stała i to zarówno dla żywicy w stanie fabrycznym, jak i dla żywicy wygrzewanej.

Wzrost wartości  $K$  w miarę wzrostu stopnia polimeryzacji w wyniku wygrzewania zaobserwowany przez H. Titschacka został potwierdzony wynikami naszych badań.

Wyniki badań porównawczych dokonanych przez nas wykazały ponadto, że charakter peizania elastoptycznego zależy znacznie od partii żywicy oraz od jej wieku. Przebiegający samorzutnie proces dalszej polimeryzacji w temperaturze pokojowej powoduje zmiany własności fizycznych żywicy możliwe do zauważenia już po kilku miesiącach,

6.3. Porównanie wyników badań dla żywicy P-6. Ze względu na brak w literaturze prac na temat żywicy P-6 z punktu widzenia potrzeb elastooptyki porównano otrzymane wyniki z wynikami badań żywicy VP-1527. Jak wynika z rys. 18 oraz 13 elastooptyczne własności żywic VP-1527 oraz P-6 są podobne jakościowo, a nawet częściowo ilościowo.



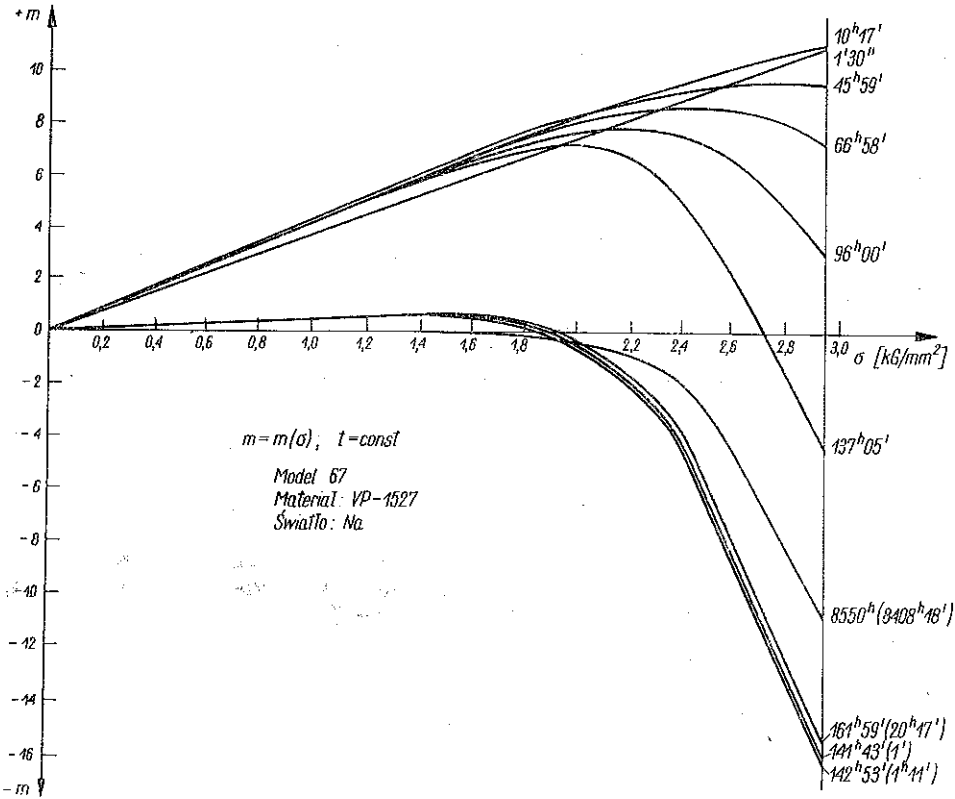
Rys. 12. Żywica VP-1527 bez obróbki cieplnej (Model 67). Pola izochrom przy rozciąganiu. Zdjęcia dla żółtej linii sodu; a — zdjęcia po 137<sup>h</sup>06' po obciążeniu 10' przed zerwaniem, b — zdjęcie po 1' po zerwaniu

## 7. Metoda i technika badania w świetle uzyskanych wyników

7.1. Wpływ sposobu przyłożenia obciążenia. Zależności  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$  oraz  $m = m(\sigma)$  wyznaczone są na ogół na podstawie próby rozciągania lub zginania przy wzrastającym stopniowo obciążeniu. Dla tworzyw sztucznych taka droga postępowania nie jest właściwa. Jak wykazano w p. 6 przy takiej technice pomiaru otrzymuje się krzywe stanowiące pewne wypadko-

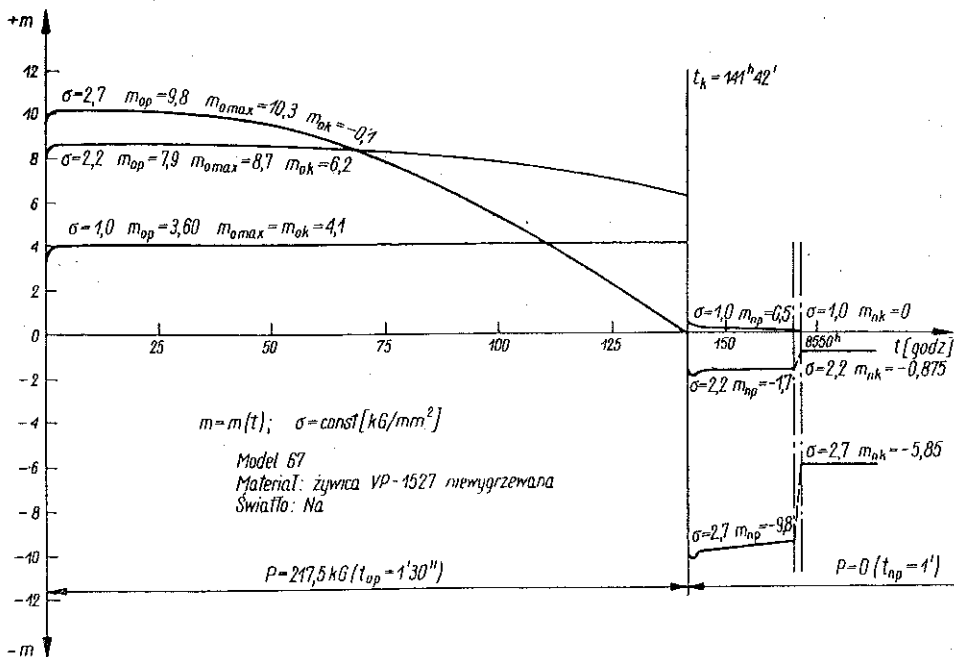
we krzywych pełzania, bliżej niezdefiniowane. Wyniki otrzymane w ten sposób nie są porównywalne z innymi pomiarami, nawet z pomiarami przeprowadzanymi w taki sam sposób.

Zastosowanie szeregu pryzmatycznych próbek obciążanych różnymi siłami prowadzi wprawdzie do celu, ale jest to sposób kosztowny i wymagający czasu a poza tym wyznaczenie ułamkowych rzędów izochrom występujących w obciążonych osiowo próbkach pryzmatycznych jest kłopotliwe lub kosztowne, jeśli stosuje się automatyczną aparaturę rejestrującą.

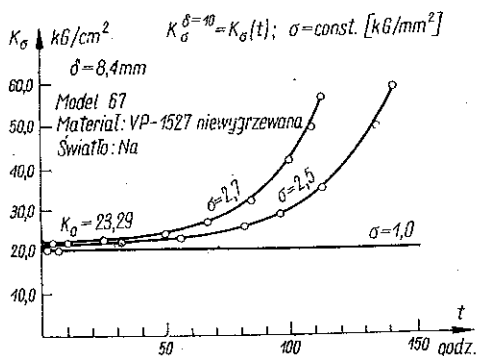


Rys. 13. Żywica VP-1527 bez obróbki cieplnej (Model 67). Zależności  $m = m(\sigma)$  przy  $t = \text{const}$ , dla  $P = \text{const}$  i dla  $P = 0$ , dla żółtej linii sodu

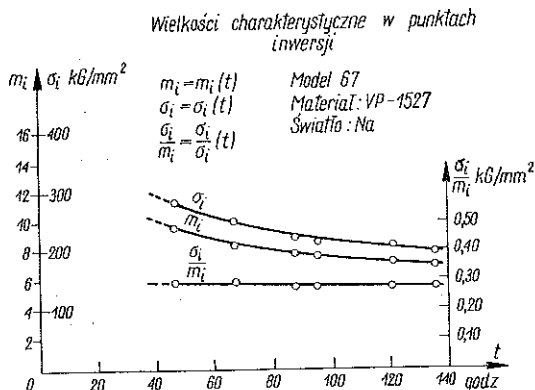
Opracowana przez E. Möncha, [4], metoda wyznaczania wypadkowej krzywej  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$  lub  $m = m(\varepsilon)$  na podstawie krzywych otrzymanych przy różnych prędkościach odkształceń próbki, zilustrowana na rys. 1, 2, 3 pracy [4], wymaga po pierwsze co najmniej 3-4 próbek, poza tym krzywa otrzymana jest pośrednio, co w efekcie zmniejsza dokładność pomiaru.



Rys. 14. Żywica VP-1527 bez obróbki cieplnej (Model 67). Żółta linia sodu. Zależności  $m = m(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$  dla  $P = \text{const}$  i  $P = 0$



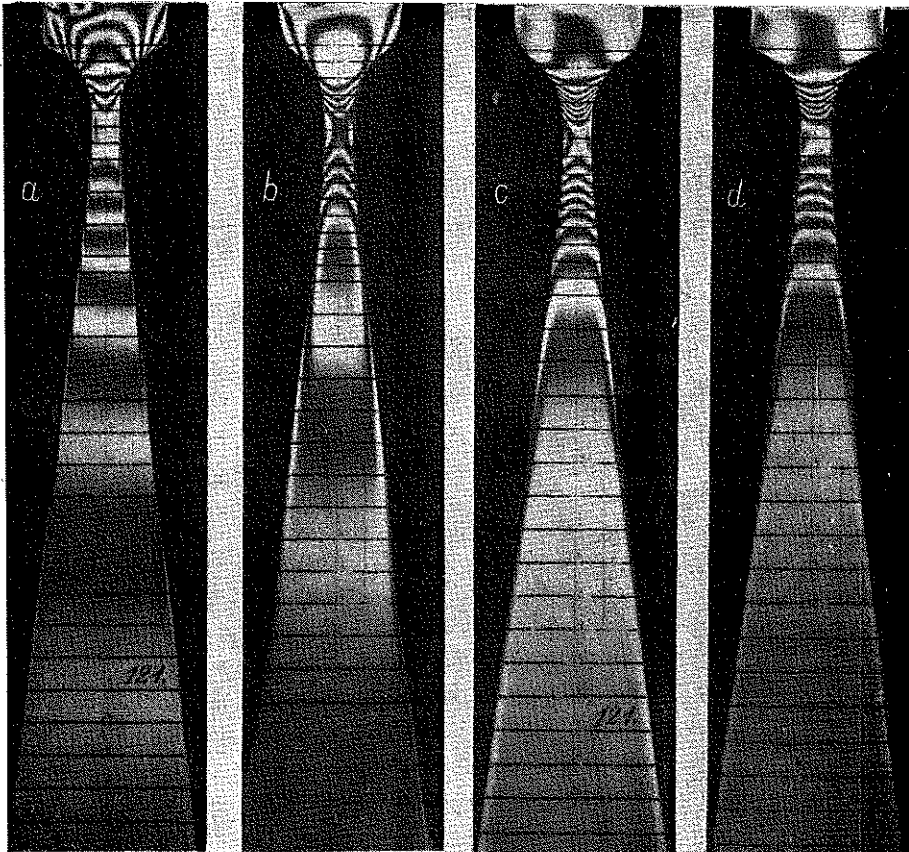
Rys. 15. Żywica VP-1527 bez obróbki cieplnej (Model 67). Żółta linia sodu. Zależności  $K^{\delta=10} = K(t)$  dla  $\sigma = \text{const}$  przy pelzaniu



Rys. 16. Żywica VP-1527 bez obróbki cieplnej. Żółta linia sodu. Wielkości charakterystyczne w punktach inwersji:  $m_i = m_i(t)$ ;  $\sigma_i = \sigma_i(t)$ ;  $\sigma_i/m_i = (\sigma_i/m_i)(t)$



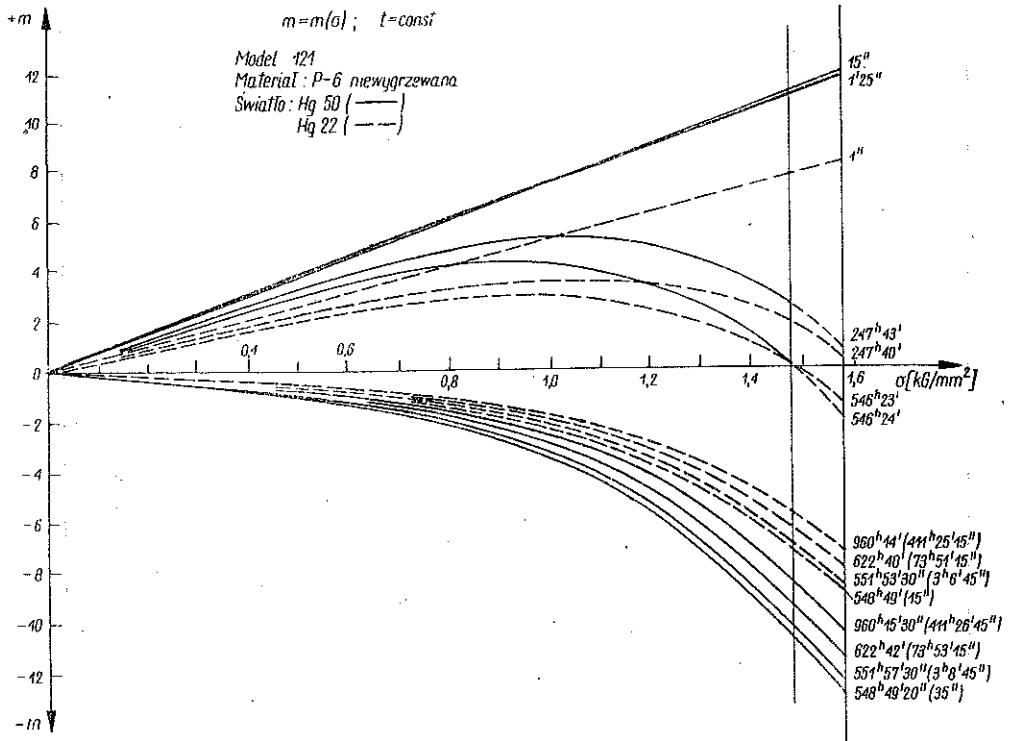
Zaproponowana i wypróbowana przez nas metoda pomiaru przy zastosowaniu próbek w kształcie smukłego klina, przechodzącego w część pryzmatyczną, obciążonego osiowo, nie posiada wyżej wymienionych wad. Poszukiwane zależności otrzymywane są bezpośrednio z dużą dokładnością, średni rozrzut punktów pomiarowych jest mniejszy od 0,5%. Wyniki pomiarów są powtarzalne, co jest np. widoczne przy porównaniu wyników badań modelu nr 100 i nr 118. Pewna wada, mianowicie występowanie



Rys. 17. Zywica P-6 bez obróbki cieplnej (Model 121). Pola izochrom przy rozciąganiu. Zdjęcie przy żółtej linii tęci: a — zdjęcie po 1'' po obciążeniu, b — zdjęcie po 308<sup>h</sup> 46' po obciążeniu 2'' przed odciążeniem, c — zdjęcie po 1'' po odciążeniu, d — zdjęcie po 96<sup>h</sup> 37' po odciążeniu

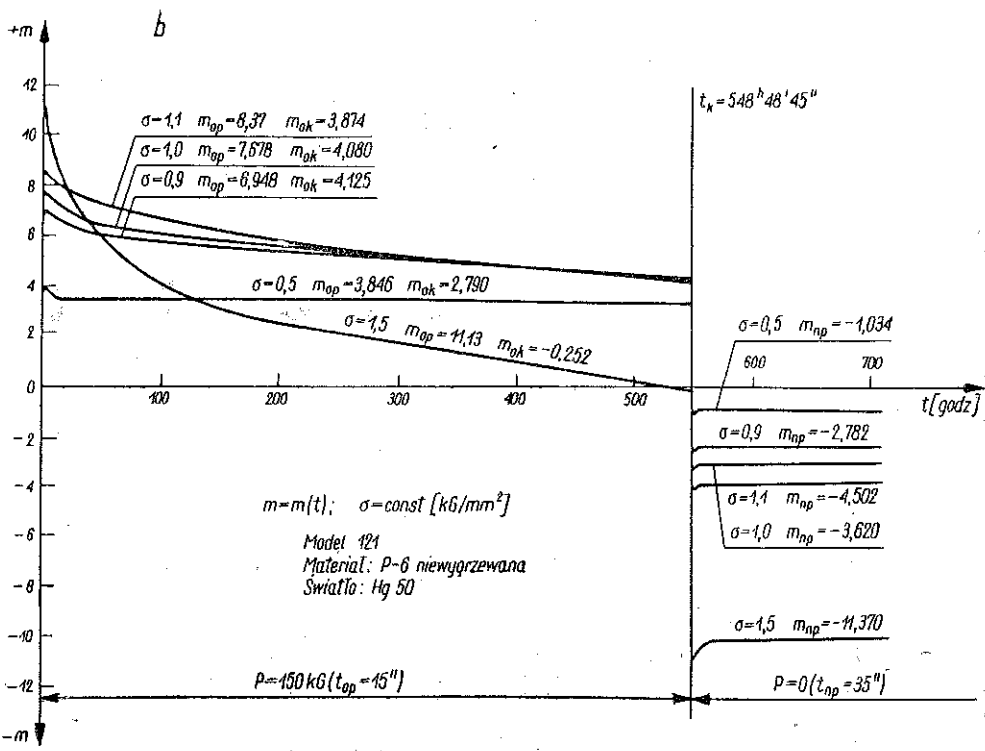
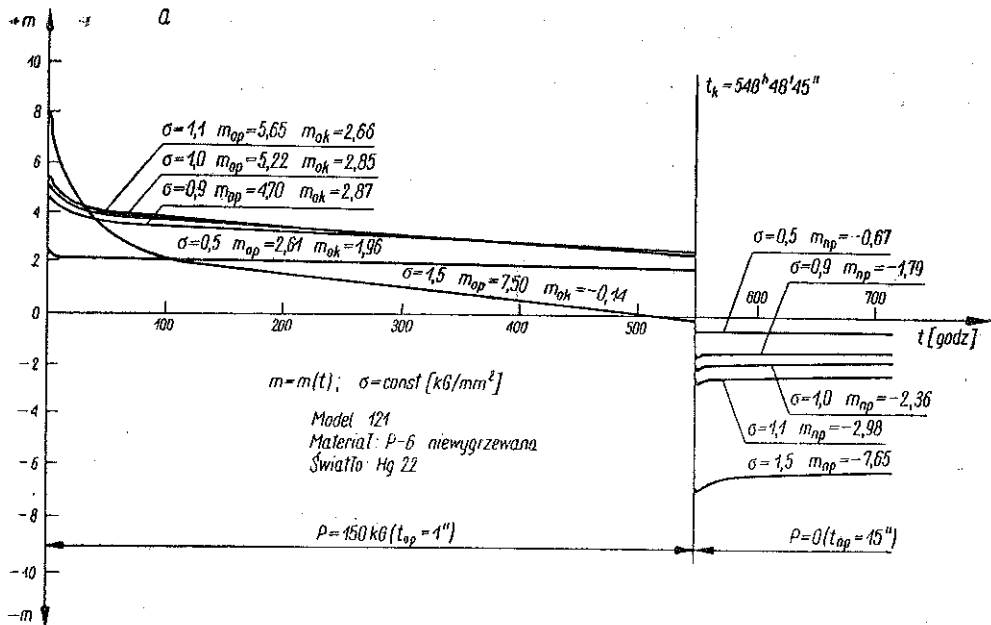
w części klinowej próbki niejednorodnego pola naprężeń nie wpływa przy obranym kącie wierzchołkowym klina w sposób widoczny na wyniki pomiarów, jak to wynika z przebiegu krzywych  $m = m(\sigma)$  na wykresach pełzania.

7.2. Wpływ charakteru pola naprężeń. Jak wynika z porównania wyników badań dla CR-39 oraz dla VP-1527 przeprowadzonego powyżej w p. 6, nie jest obojętne, czy próbka obciążona jest osiowo, czy też obciążona jest momentem gnącym. Dla żywicy CR-39 wyniki badań próbek rozciąganych i próbek zginanych różniły się tylko ilościowo. Dla żywicy o bardziej złożonym przebiegu krzywych pełzania optycznego, jak np. dla żywicy VP-1527, wyniki badań próbek rozciąganych i próbek zginanych różnią się jakościowo. Wynika z tego, że w ogólnym przypadku nie można na podstawie wyników badań próbek obciążonych osiowo przewidywać wyników badań próbek zginanych i odwrotnie.



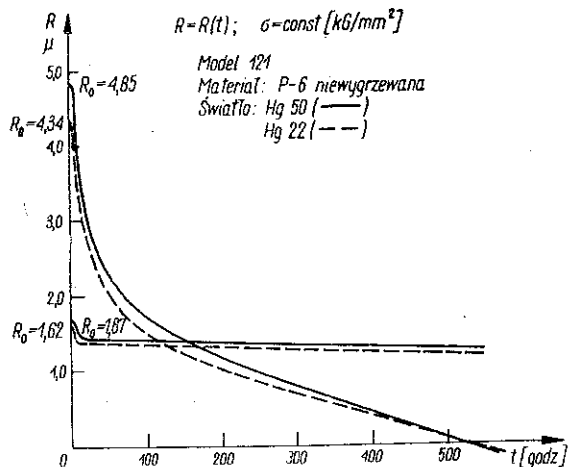
Rys. 18. Żywica P-6 bez obróbki cieplnej (Model 121). Zależności  $m = m(\sigma)$  przy  $t = \text{const}$ , dla  $P = \text{const}$  i dla  $P = 0$ , — — — przy żółtej i — — — przy niebieskiej linii rtęci

W próbkach, w których występuje wyraźnie niejednorodne pole naprężeń (np. w próbkach zginanych), w trakcie narastania odkształceń nieliniowo-sprężystych występuje ze zjawiskiem pełzania równoległe zjawisko relaksacji i to zarówno mechanicznej jak i optycznej. Pole naprężeń w próbce nie jest stałe, a zmienia się z upływem czasu. Przebieg zjawiska



Rys. 19. Żywica P-6 bez obróbki cieplnej (Model 121). Zależności  $m = m(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$  dla  $P = \text{const}$  i dla  $P = 0$ ; a — dla żółtej linii tęci, b — dla niebieskiej linii tęci

w czasie staje się w ten sposób bardzo skomplikowany i uzależniony od większej ilości czynników niż w przypadku jednorodnego pola naprężeń. Wpływ ten powoduje zanikanie niektórych prawidłowości pełzania optycznego, występujących przy jednorodnym polu naprężeń.



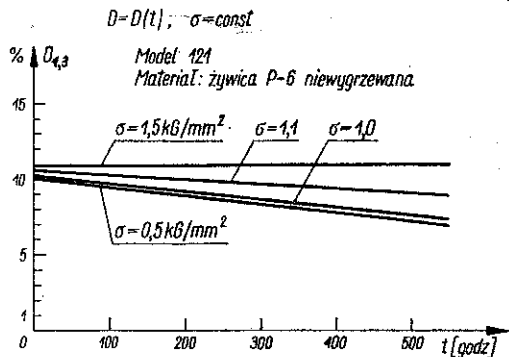
Rys. 20. Żywica P-6 bez obróbki cieplnej (Model 121). Zależności  $R = R(t)$  dla  $\sigma = \text{const}$ , przy  $P = \text{const}$  ——— dla żółtej i ——— niebieskiej linii rtęci dla pełzania

nie na próbkach, w których występuje niejednorodne, chociażby dla ciała liniowo-sprężystego ściśle określone matematycznie pole naprężeń, nie jest dostatecznie uzasadnione, czyli że bezpośrednio przenoszenie wyników takich badań na ogólny przypadek pola naprężeń nie jest słuszne. Ponieważ pełzanie optyczne jest funkcją obu naprężeń głównych oraz zależy od zmiany pola naprężeń w czasie, wobec tego podstawowymi badaniami pełzania muszą być badania przy jednowymiarowym, jednorodnym polu naprężeń, przy rozciąganiu oraz ścisnaniu, a więc badania rozciąganych i ścisnanych próbek pryzmatycznych, zaś badania zginanych belek pryzmatycznych traktować należy jako badania uzupełniające.

Słuszność powyższego potwierdzają wyniki badań przy zginaniu jak również przy obciążeniach zmiennych.

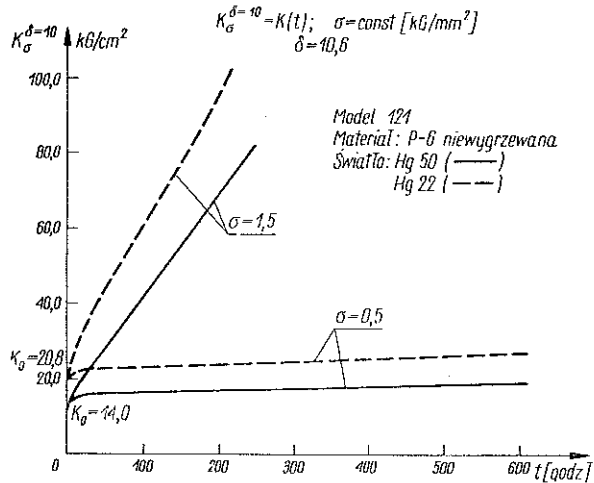
Wpływ charakteru pola naprężeń na pełzanie optyczne widoczny jest dobrze na rys. 25. Punkt inwersji w części modelu, w której panuje niejednorodne, dwuwymiarowe pole naprężeń, występuje dla coraz niższych wartości rzędów izochromy w miarę upływu czasu, a więc również w miarę narastania zmian pola naprężeń w stosunku do punktu inwersji w klinowej części modelu.

Reasumując powyższe wywody można wyrazić pogląd, że badania pełzania wyłącz-



Rys. 21. Żywica P-6 bez obróbki cieplnej (Model 121). Dyspersja dwójłomności  $D = D(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$  dla pełzania

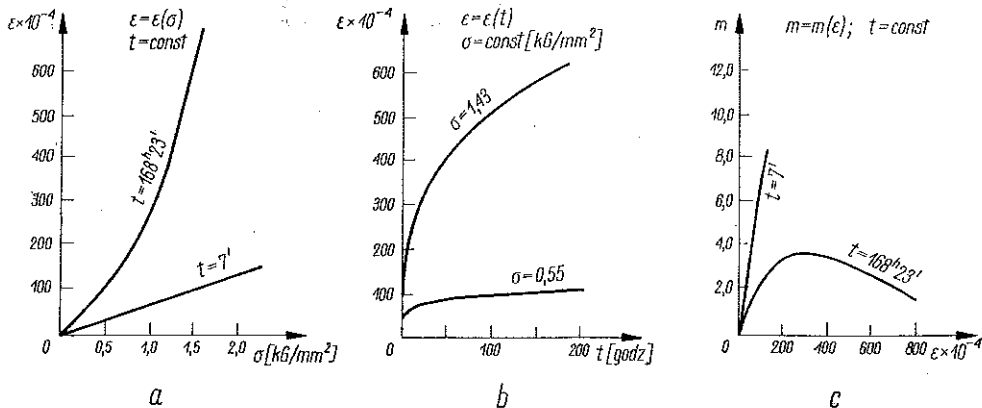
7.3. Wpływ obciążeń zmiennych. Wyniki otrzymane dla żywicy CR-39, żywicy VP-1527 oraz żywicy P-6 odnośnie wpływu obciążeń zmiennych na prędkość nawrotu optycznego po pelzaniu optycznym pokrywają się całkowicie. Prędkość nawrotu optycznego znacznie wzrasta, jeśli w modelu po obciążeniu wymuszamy kinematycznie drgania dookoła pierwotnego położenia jego równowagi. Wzrost ten ma miejsce zarówno w porównaniu z prędkością nawrotu optycznego w modelu swobodnym (rys. 38) jak również w porównaniu z prędkością nawrotu optycznego w modelu, który został po odciążeniu doprowadzony do postaci przed obciążeniem (rys. 34).



Rys. 22. Żywica P-6 bez obróbki cieplnej (Model 121). Zależności  $K^{\delta=10} = K(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$  ——— dla żółtej i ..... niebieskiej linii rtęci przy pelzaniu

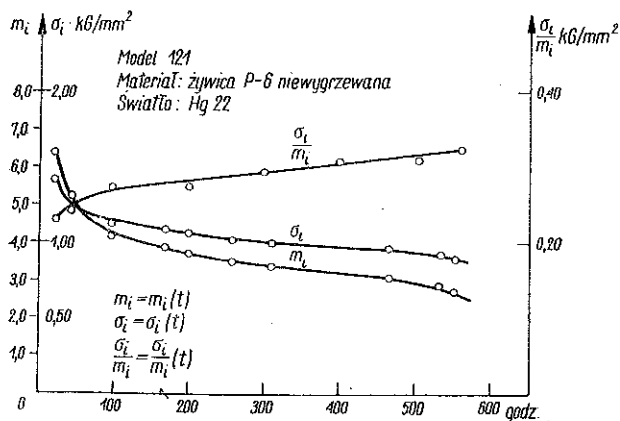
Wzrost prędkości nawrotu optycznego zaobserwowano dla wszystkich

Model 121  
Material P-6  
Swiatlo Hg 22



Rys. 23. Żywica P-6 bez obróbki cieplnej (Model 121). Zależności dla pelzania - a:  $\epsilon = \epsilon(\sigma)$  przy  $t = \text{const}$ ; b:  $\epsilon = \epsilon(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$ ; c:  $m = m(\epsilon)$  przy  $t = \text{const}$  dla żółtej linii rtęci

częstości realizowanych obciążeń, mianowicie dla częstości w zakresie 1-60 Hz. Amplituda drgań, jak wykazały obserwacje, może być bardzo mała, tak że wywołany nią efekt elastoplastyczny jest rzędu 1-3 izochrom.

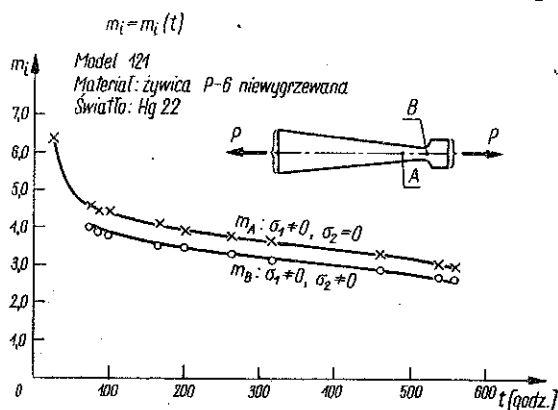


Rys. 24. Żywica P-6 bez obróbki cieplnej (Model 121). Żółta linia rtęci. Pelzanie. Wielkości charakterystyczne w punktach inwersji:  $m_i = m_i(t)$ ;  $\sigma_i/m_i = \sigma_i(t)$ ;  $\sigma_i/m_i = (\sigma_i/m_i)(t)$

wodowany tarciem wewnętrznym, nie wpływa w sposób widoczny na obraz izochrom. Nieuwzględnienie lokalnych zmian mechanicznych i optycznych własności sztucznych żywic spowodowanych lokalnym wzrostem temperatury modelu prowadzić może do poważnych błędów. Zdjęcia na rys. 39a i 39b przedstawiają typowy przykład zmiany pola izochrom pod wpływem miejscowego wzrostu temperatury, wywołanego tarciem wewnętrznym. Model drgał z częstością 35Hz, przy czym zakres drgań był stały i wynosił 33 mm. W miarę lokalnego wzrostu temperatury modelu, pole izochrom zmienia się —

rzędy izochrom maleją, następnie pojawiają się obrazy izochrom odpowiadające punktom inwersji, jak to wynika z porównania rys. 39b z rys. 37c przedstawiającym pola izochrom w odcijanym modelu 123.

Przy żywicach charakteryzujących się wysoką wartością tłumienia właściwego częstość i amplituda drgań musi być tak wzajemnie dobrana, aby wzrost temperatury modelu nie przekroczył wartości dopuszczalnych. Obserwacje wykazały, że dla wysokopolimeryzowanej żywicy poliestrowej np. wygrzewanej żywicy VP-1527, wzrost temperatury o 2-3°C od temperatury pokojowej, spo-



Rys. 25. Żywica P-6 bez obróbki cieplnej (Model 121). Pelzanie. Żółta linia rtęci. Zależności w punktach inwersji,  $m_i = m_i(t)$  dla jednowymiarowego (A) i dwuwymiarowego (B) pola naprężeń

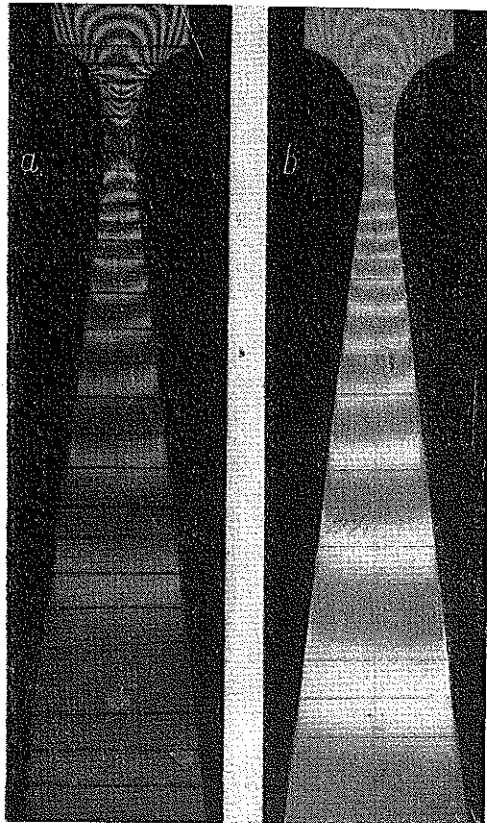
Bezpośrednio po pojawieniu się izochrom charakterystycznych dla punktów inwersji następuje pęknięcie zmęczeniowe próbki w przekroju wyznaczonym przez powyższe izochromy.

Wydaje się, że wyżej opisane zjawiska wskazują, że istnieje związek fizyczny pomiędzy inwersją efektu elastooptycznego, występującą przy próbie pełzania, a zjawiskiem tzw. zamrażania naprężeń. W związku z powyższym powinno być możliwe przewidywanie elastooptycznych własności materiałów w temperaturze podwyższonej na podstawie wyników badania pełzania elastooptycznego i odwrotnie.

Stwierdzenie powyższe popierają wyniki badań nad związkiem pomiędzy punktem przemiany drugiego rzędu a wartością naprężeń, [5]; temperatura przemiany obniża się pod wpływem naprężeń rozciągających.

Obserwacja pól izochrom w trakcie drgań modelu wykazuje, że efekt naskórkowy oraz częściowo efekt obróbczy maleje wydatnie w trakcie przemiennych obciążeń modelu. Po odciążeniu modelu efekty powyższe narastają powoli do poprzednich wartości. Mechanizm zjawiska nie jest jasny.

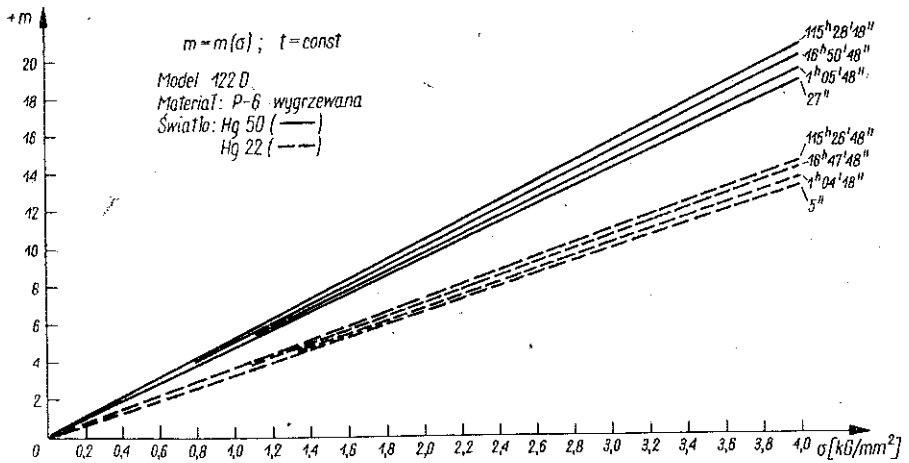
Opisane powyżej zjawiska dodatkowo uzasadniają słuszność postawionej w niniejszej pracy tezy, że badania własności materiałów elastooptycznych przy obciążeniach zmiennych opierać się powinny na starannie przeprowadzonych badaniach przy długotrwałych obciążeniach statycznych.



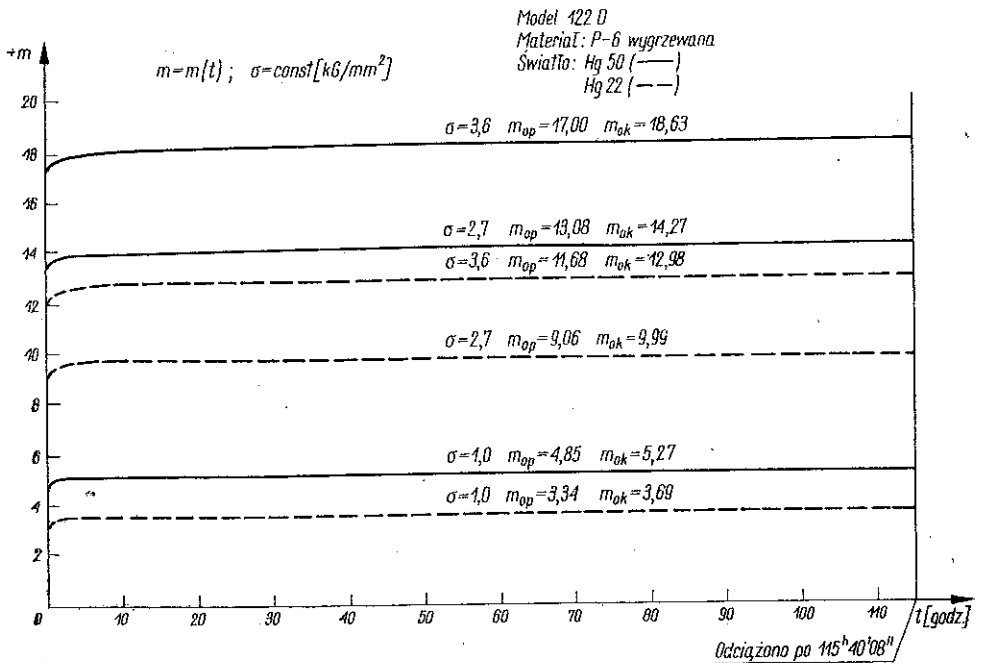
Rys. 26. Żywica P-6 wygrzewana (Model 122). Pola izochrom w modelu: zdjęcia przy żółtej linii rtęci. Pełzanie optyczne: a — zdjęcie po 5" po obciążeniu, b — zdjęcie po 91<sup>h</sup> 24' po obciążeniu

## 8. Interpretacja otrzymanych zależności

**8.1. Interpretacja strukturalna.** Badane żywice wykazują różny charakter pełzania optycznego przy podobnym charakterze pełzania mechanicznego. Ze względów opisanych niżej jest celowe otrzymane krzywe pełzania



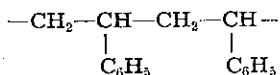
Rys. 27. Żywica P-6 wygrzewana (Model 122). Zależności  $m = m(\sigma)$  przy  $t = \text{const}$  dla  $P = \text{const}$  i  $P = 0$ , ——— przy żółtej i ——— niebieskiej linii rtęci



Rys. 28. Żywica P-6 wygrzewana (Model 122). Zależności  $m = m(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$ , dla  $P = \text{const}$  i  $P = 0$ , ——— przy żółtej i ——— niebieskiej linii rtęci

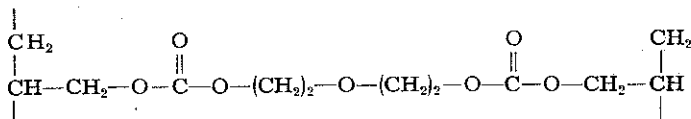


optycznego dla żywic CR-39 oraz P-6 (lub VP-1527) porównać z krzywymi pelzania optycznego polistyrenu. Przyjmujemy krzywe pelzania optycznego  $m = m(\sigma)$  dla polistyrenu otrzymane przez R. Hiltscchera, [6]. Charakter krzywych pelzania optycznego przedstawia rys. 40. Strukturalnie ujmując polistyren opisany jest wzorem

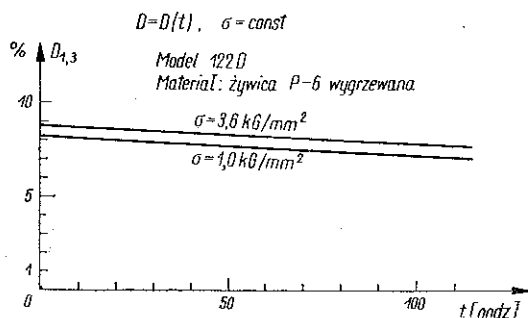
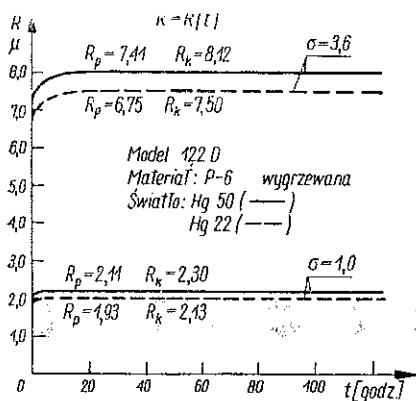


Jest to polimer liniowy posiadający wybitnie anizotropowe optycznie pierścienie benzenowe.

Żywicę CR-39, będącą polimerem węglanu allylowodwuetylenoglikolowego, opisać można wzorem ogólnym:



W skład struktury wchodzi anizotropowe wiązania podwójne  $\text{C}=\text{O}$ .



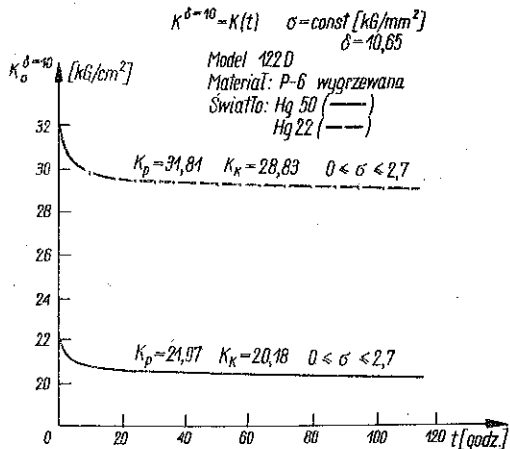
Rys. 29. Żywica P-6 wygrzewana (Model 122). Zależności  $R = R(t)$  dla  $\sigma = \text{const}$  przy  $P = \text{const}$  — dla żółtej i — niebieskiej linii rtęci

Rys. 30. Żywica P-6 wygrzewana (Model 122). Dyspersja dwójłomności  $D = D(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$  dla pelzania

Jak wynika z opisu oraz z własności żywicy P-6 i żywicy VP-1527, w skład tych żywic wchodzi zarówno anizotropowe pierścienie benzenowe jak i anizotropowe grupy  $\text{C}=\text{O}$ .

Jeśli uwzględnimy wyżej opisane szczegóły struktury żywicy CR-39, żywicy P-6, VP-1527 oraz polistyrenu, wówczas rys. 40 pozwoli na wysnuęcie bardzo interesujących wniosków. Na rysunku tym zestawione są krzywe ilustrujące charakter pelzania optycznego żywicy CR-39, żywicy P-6 (VP-1527) oraz polistyrenu.

R. Hiltcher, [6], tłumaczy charakterystyczny dla polistyrenu przebieg krzywych  $m = m(\sigma)$  w czasie wpływem narastającej orientacji grup anizotropowych, w tym przypadku pierścieni benzenowych, zgodnie z interpretacją wyników badań wpływu czasu na wartość stałej elastooptycznej różnych materiałów, przytoczoną przez R. S. Steina, [7].



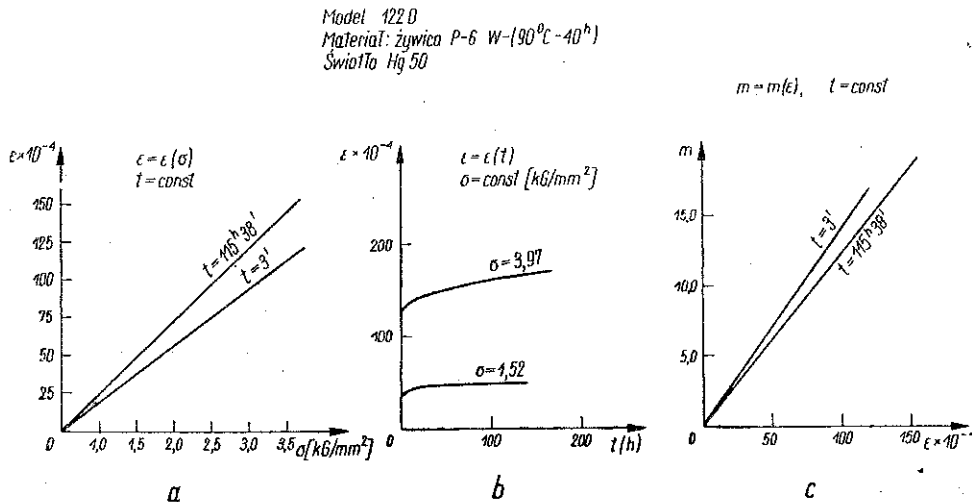
Rys. 31. Żywica P-6 wygrzewana (Model 122). Zależności  $K^{\delta=10} = K(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$  dla — — — żółtej i — — — niebieskiej linii rtęci

Narastający w czasie efekt dwójłomności orientacyjnej polistyrenu posiada znak odwrotny do znaku dwójłomności wymuszonej (naprężeniowej).

Wydaje się rzeczą słuszną rozszerzyć powyższą interpretację na badane materiały.

Pełzanie optyczne żywicy CR-39 związać można z występującą orientacją grup C=O, przy czym efekt dwójłomności

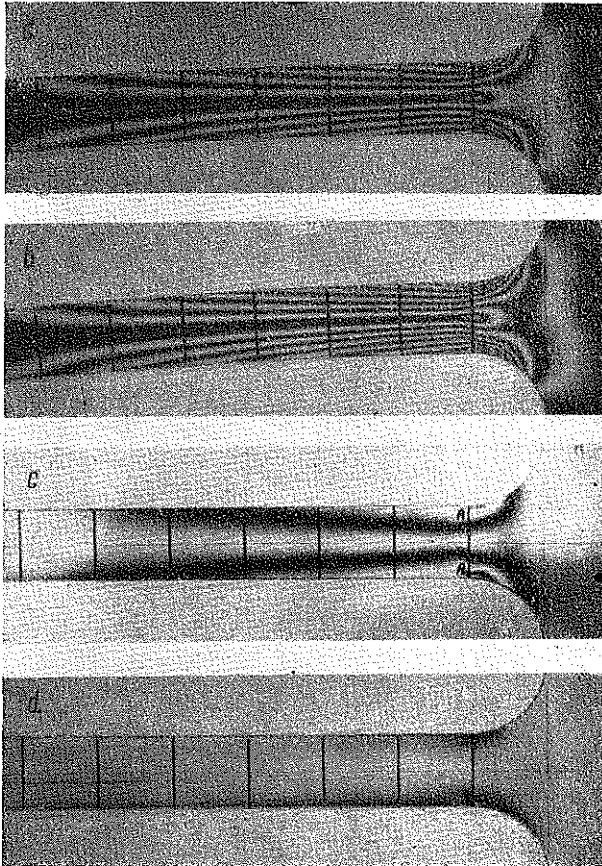
naprężeniowej orientacyjnej w tym przypadku sumuje się z efektem dwójłomności wymuszonej. Jak wynika z rys. 11, można w pierwszym przybliżeniu przyjąć, że narastający w czasie efekt dwójłomności orientacyj-



Rys. 32. Żywica P-6 wygrzewana (Model 122). Zależności dla pełzania, a:  $\epsilon = \epsilon(\sigma)$  przy  $t = \text{const}$ ; b:  $\epsilon = \epsilon(t)$  przy  $\sigma = \text{const}$ ; c:  $m = m(\epsilon)$  przy  $t = \text{const}$  dla żółtej linii rtęci

nej dla żywicy CR-39 jest wprost proporcjonalny do wartości odkształcenia niespreżystego.

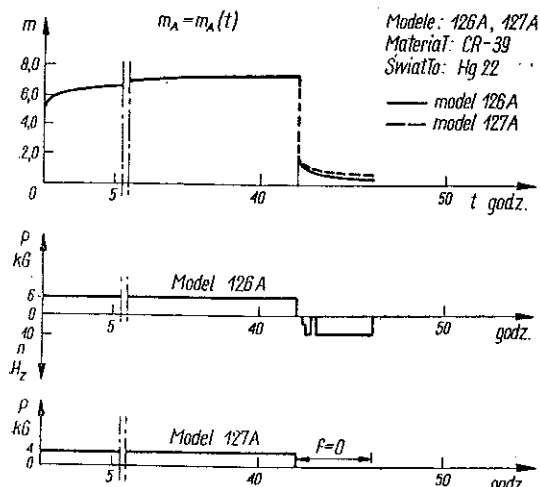
Bardzo charakterystyczny dla żywicy CR-39 jest przebieg krzywych  $m = m(\sigma)$  jako funkcji czasu. Ze wzrostem wartości  $\sigma$  przebieg krzywych



Rys. 33. Żywica CR-39. Pola izochrom przy zginaniu. Zdjęcie przy zielonej linii rtęci. Modele były obciążone statycznie przez 42h 46'. Model 127A po odciążeniu był obciążony przemiennie dookoła pierwotnego położenia równowagi. Model 126A po odciążeniu był przywrócony do pierwotnego położenia (podparty): a — model 127A po 5' po obciążeniu statycznym, b — model 127A po 42<sup>h</sup> po obciążeniu statycznym, przed odciążeniem, c — model 126A po 1' po odciążeniu, 1' przed obciążeniem przemiennym, d — model 126A po 5 godzinach obciążenia przemiennego

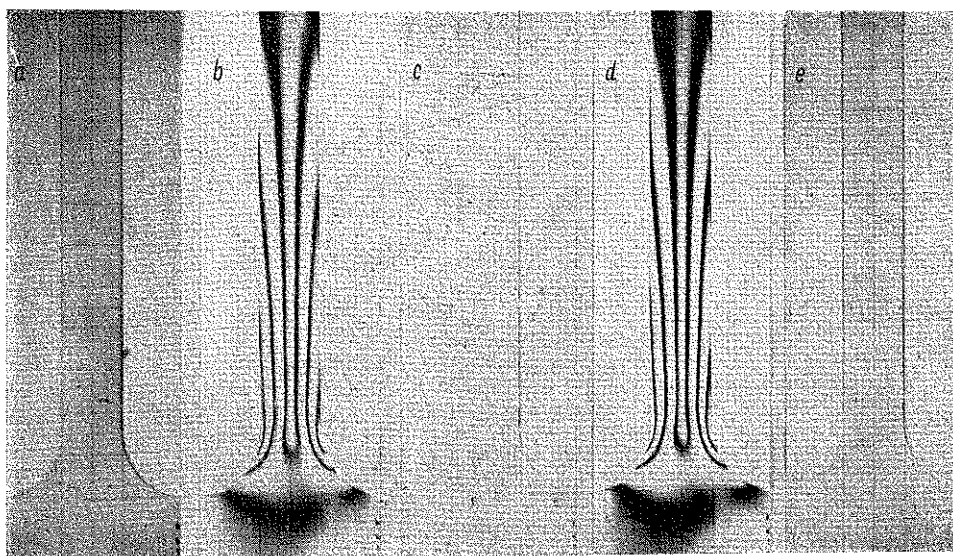
dla dostatecznie dużego czasu od chwili obciążenia jest początkowo liniowy, następnie staje się nieliniowy i przechodzi znów w liniowy. Również krzywe  $m = m(\sigma)$  po odciążeniu, a więc w trakcie nawrotu optycznego,

posiadają ten sam charakter. Wartość  $m$  rozpatrywana jako funkcja  $\sigma$  zmienia się monotonicznie dla wszystkich przedziałów czasu, zarówno przy



Rys. 34. Schemat przebiegu obciążenia oraz zależności  $m = m(t)$  dla krawędzi zginanych modeli 126A i 127A z żywicy CR-39 w przekrojach A-A według rys. 33. Przy obciążeniu modeli stałą siłą  $P = 6$  kG krzywe  $m = m(t)$  dla obu modeli pokrywają się z sobą

obciążeniu jak i po odciążeniu modelu. Przedłużenia obu prostych odcinków krzywych przecinają się w punktach o mniej więcej stałej wartości rzędnej  $m$ . Taki przebieg krzywych świadczy o tym, że począwszy od określonej wartości naprężenia (będącej funkcją czasu działania obciążenia) przyrost efektu elastooptycznego nosi charakter lepkiego płynięcia. Z drugiej strony, jak to wskazują krzywe nawrotu optycznego, przyrost ten jest w znacznym stopniu odwracalny: na podstawie krzywych pełzania i nawrotu optycznego podanych na rys. 7 wnioskować

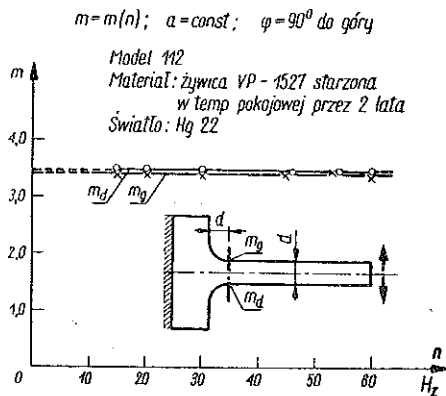


Rys. 35. Pola izochrom w modelu zginanym przemiennie. Materiał: żywica VP-1527 starzona w temp. pokojowej przez 2 lata. Zdjęcia w fazie największego wychylenia oraz w położeniu zerowym przy różnych częstościach drgań dla żółtej linii rtęci: a:  $n = 14$  Hz  $\varphi = 0^\circ$ , b:  $n = 14$  Hz  $\varphi = 90^\circ$ , c:  $n = 45$  Hz  $\varphi = 0^\circ$ , d:  $n = 60$  Hz  $\varphi = 90^\circ$ , e:  $n = 60$  Hz  $\varphi = 0^\circ$

można, że trwały efekt elastoptyczny, związany z nieodwracalnymi zmianami w materiale modelu, wynosi do kilkunastu procent całkowitego nieliniowego przyrostu elastoptycznego w zakresie naprężeń do  $3\text{kg/mm}^2$  i w zakresie czasu obciążenia do 550 godzin.

Trwały efekt elastoptyczny, jak to wynika z analizy przeprowadzonej w następnym punkcie, wzrasta w sposób nieliniowy z upływem czasu.

Z powyższego wynika, że pełzania optycznego w ogólnym przypadku nie można interpretować tak, jak interpretuje się proste, liniowe modele reologiczne. Treści fizycznej prostych modeli reologicznych Maxwella i Kelvina oraz modeli złożonych nie można przenosić na zjawiska optyczne, zachodzące w rozciągającym modelu w żywicy CR-39. Być może, że zmieniający się w czasie efekt dwójłomności orientacyjnej spowodowany jest poza narastającą orientacją grup  $\text{C}=\text{O}$  również zmienną w czasie orientacją segmentów łańcucha. W takim przypadku należałoby ściślej zdefiniować pojęcie dwójłomności naprężeniowej.



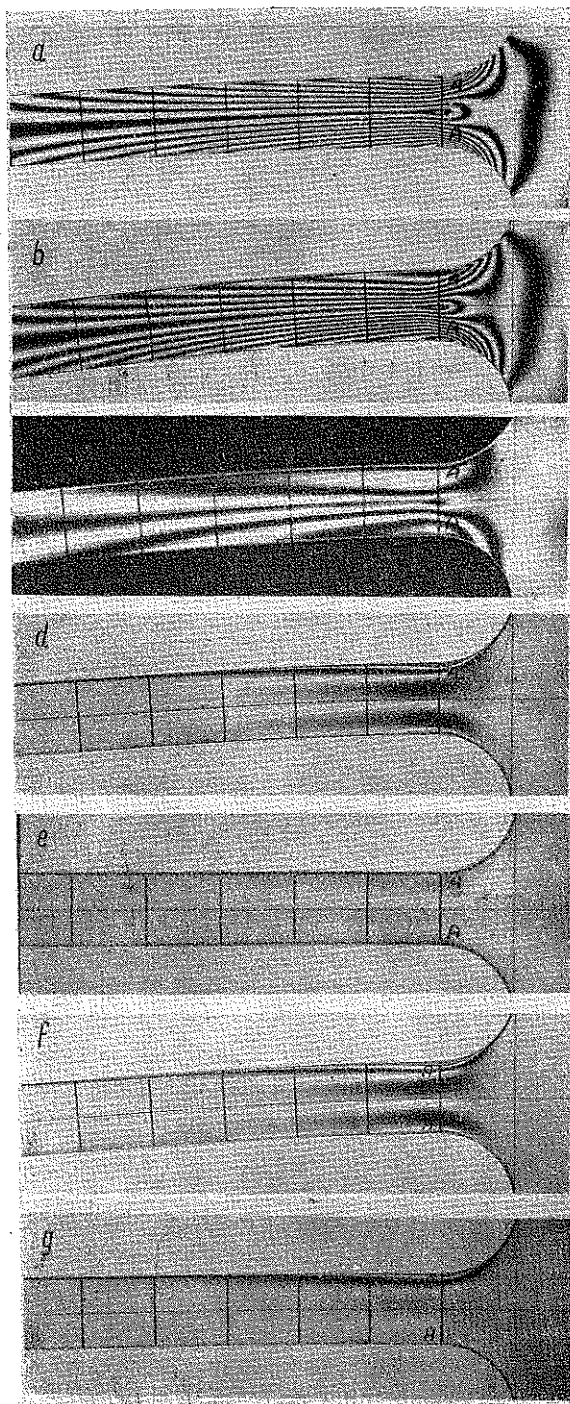
Rys. 36. Model z VP-1527 zginany przemiennie. Zależności  $m = m(n)$  dla krawędzi modelu w przekroju A-A, według rys. 35

Tablica 4. Przyrosty rzędów izochrom w okresie 20 godzin dla żywicy CR-39 oraz VP-1527

$\sigma$ $\text{kg/mm}^2$	$m (t = 0)$		$\Delta m (t = 20)$		$\Delta m^0/0 (t = 20/h)$	
	CR-39	VP-1527	CR-39	VP-1527	CR-39	VP-1527
1,0	3,44	3,70	0,90	0,4	26,2	10,8
1,8	6,22	6,60	2,13	0,7	34,2	10,6
2,2	7,56	8,00	3,21	0,7	42,4	8,8
2,5	8,59	9,10	5,15	0,7	60,0	7,7
2,7	9,27	9,90	7,63	0,4	82,4	4,0

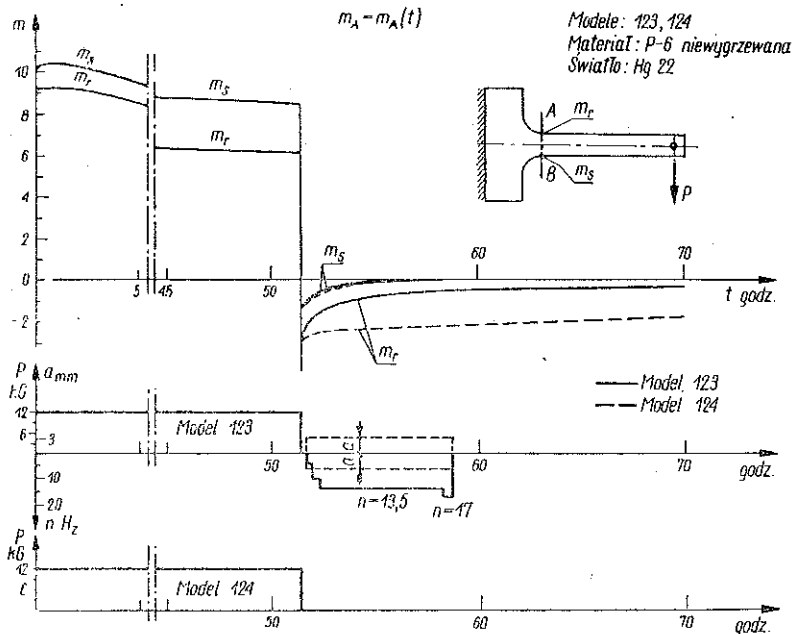
Pełzanie optyczne żywicy P-6 oraz VP-1527 na podstawie rys. 40 tłumaczyć można jako efekt wypadkowy efektów dwójłomności orientacyjnej o różnych znakach, spowodowanych orientacją grup  $\text{C}=\text{O}$  oraz orientacją pierścieni benzenowych.

Wpływ obu rodzajów grup anizotropowych na wypadkowy efekt elastoptyczny zależy od ich stosunku ilościowego oraz od ich ruchliwości. Powyższa hipoteza, traktowana jako hipoteza robocza, wyjaśnia charakte-

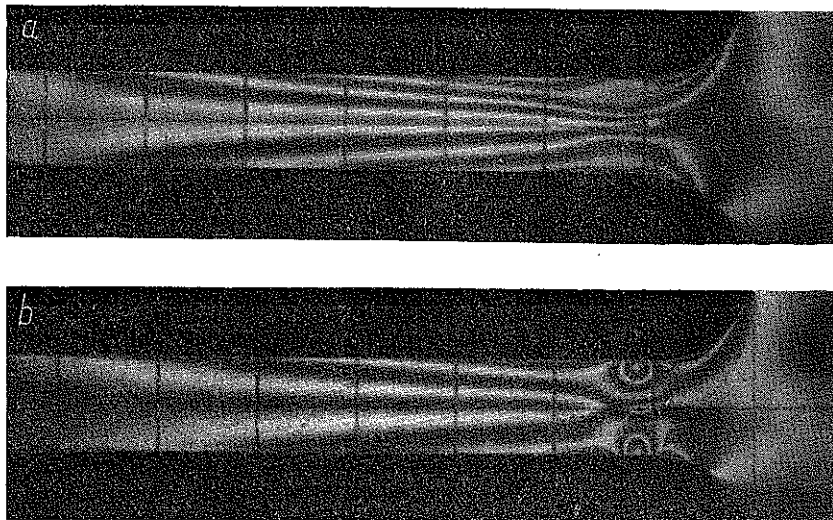


Rys. 37. Żywica P-6 niewygrzewana. Pola izochrom przy zginaniu.

Zdjęcia przy żółtej linii rtęci. Modele były obciążone statycznie przez 51 godzin. Model 124 po odciążeniu był obciążony przemiennie przez 7 godzin. Model 124 po odciążeniu pozostawiony został swobodny; a — model 123 po 30 sekundach obciążenia statycznego, b — model 123 po 51 godzinach obciążenia statycznego przed odciążeniem, c — model 123 w trakcie odciążania — na model działa siła  $P=3$  kG, d — model 123 po 1' po odciążeniu statycznym 4' przed obciążeniem przemiennym, e — model 123 po 7 godzinach obciążenia przemiennym, f — model 124 po 51 godzinach obciążenia statycznego, przed odciążeniem, g — model 124 po 14 godzinach obciążenia przemiennym, przed odciążeniem.



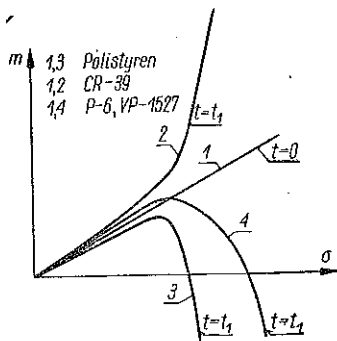
Rys. 38. Schemat przebiegu obciążenia oraz zależności  $m = m(t)$  dla krawędzi zginanych modeli 123 i 124 z żywicy VP-1527 w przekrojach A-A według rys. 37. Przy obciążeniu modeli stałą siłą  $P = 6$  kG krzywe  $m = m(t)$  dla obu modeli pokrywają się z sobą



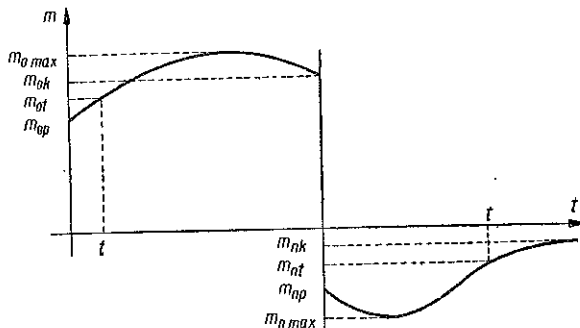
Rys. 39. Pole izochrom w zginanym modelu z niewygrzewanej żywicy P-6 drgającym z częstotliwością 35 Hz: a — pierwsza faza lokalnego wzrostu temperatury — pole izochrom w okolicy przekroju A-A poczynają się deformować; b — druga faza lokalnego wzrostu temperatury — pole izochrom lokalnie silnie zdeformowane.

rystyczny przebieg krzywych pełzania optycznego jako funkcji czasu oraz krzywych nawrotu optycznego, podanych na rys. 14, 19 oraz 28.

Jeśli potraktuje się frunkcję  $m = m(t)$  dla żywic VP-1527 oraz P-6 jako sumę dwóch funkcji odpowiadających w przybliżeniu żywicy CR-39 i polistyrenowi, to stanie się zrozumiałą zarówno charakterystyczny przebieg krzywych pełzania optycznego, a zwłaszcza charakterystyczna zmiana wartości przyrostów rzędów izochrom wskutek pełzania ze wzrostem war-



Rys. 40. Charakter zależności  $m = m(\sigma)$  bezpośrednio po obciążeniu oraz po upływie czasu  $t_1$  przy rozciąganiu stałą siłą dla polistyrenu, żywicy CR-39 oraz dla żywic P-6 i VP-1527



Rys. 41. Oznaczenia rzędów izochrom przy pełzaniu i nawrocie optycznym

tości naprężenia w tabl. 4 jak również stanie się zrozumiałą charakterystyczny przebieg krzywych nawrotu optycznego w pierwszym okresie po odciążeniu. W przeciągu pierwszych trzech godzin po odciążeniu wartość efektu elastooptycznego, spowodowanego pełzaniem optycznym, spada dla żywicy CR-39 o około 30%, przy czym największa prędkość zmian zachodzi w ciągu pierwszej godziny. Krzywe nawrotu optycznego dla VP-1527 oraz P-6 wykazują w początkowym okresie po odciążeniu typowy dalszy wzrost ujemnych rzędów izochrom z malejącą prędkością aż do osiągnięcia minimum. Przyjmując w pierwszym przybliżeniu początkową część krzywej nawrotu optycznego dla polistyrenu jako taką samą jak początkową część krzywej pełzania optycznego, wnioskować można na podstawie przebiegu zależności  $m = m(\sigma)$  podanych w pracy [6], że prędkość nawrotu polistyrenu w pierwszej fazie nawrotu jest mniejsza niż żywicy CR-39, czyli że krzywa  $m = m(t)$  przebiega dla polistyrenu po nawrocie bardziej płasko. Różnice rzędnych obu krzywych dają krzywą nawrotu optycznego żywicy VP-1527 lub P-6 z charakterystyczną zmianą krzywizny w pierwszym okresie.

Powyższa interpretacja jest wyłącznie jakościowa i opiera się na nieudowodnionym założeniu, że efekty optyczne obu różnych grup anizotro-



powych można w pierwszym przybliżeniu superponować. Założenie to wyjaśnia jednak przebieg zjawiska, a poza tym znajduje potwierdzenie jakościowe w podobieństwie pomiędzy efektem elastooptycznym przy metodzie zamrażania a trwałym efektem elastooptycznym wywołanym pełzaniem optycznym.

W myśl powyższej interpretacji wydatne zmniejszenie pełzania optycznego o znaku przeciwnym dla wygrzanego VP-1527 oraz wygrzanego P-6, wynikające z rys. 28, jak również wydatne zmniejszenie trwałego efektu elastooptycznego (a praktycznie właściwie spadek do zera tego efektu w warunkach pomiaru) tłumaczyć należy malejącą ruchliwością pierścieni benzenowych w miarę wzrostu stopnia polimeryzacji. Pewne zakrzywienie się linii  $m = m(\sigma)$  dla wygrzanego VP-1527 oraz wygrzanego P-6 wypukłością ku górze (rys. 27) świadczyłoby o tym, że proces porządkowania się pierścieni benzenowych w pewnym stopniu zachodzi nawet dla wysoko spolimeryzowanych żywic P-6 i VP-1527.

8.2. Interpretacja reologiczna. Interpretację reologiczną własności materiałów przeprowadzamy w oparciu o otrzymane prawidłowości charakterystyczne dla danych materiałów.

Wprowadzamy następujące oznaczenie  $m$  dla wartości efektu elastooptycznego wyrażonego w rzędach izochrom zgodnie z rys. 41:

- $m_{0p}$  wartość rzędu izochromy bezpośrednio po obciążeniu dla danej wartości naprężenia,
- $m_{0max}$  maksymalna wartość rzędu izochromy dla danej wartości naprężenia na krzywej pełzania optycznego,
- $m_{0k}$  końcowa wartość rzędu izochromy dla danej wartości naprężenia przed momentem odciążenia,
- $m_{0t}$  wartość rzędu izochromy na krzywej pełzania optycznego w chwili  $t$ ,
- $m_{np}$  początkowa wartość rzędu izochromy dla danej wartości naprężenia bezpośrednio po odciążeniu,
- $m_{nmax}$  ekstremalna wartość rzędu izochromy dla danej wartości naprężenia na krzywej nawrotu optycznego,
- $m_{nk}$  końcowa wartość rzędu izochromy dla danej wartości naprężenia na krzywej nawrotu optycznego,
- $m_{nt}$  wartość rzędu izochromy na krzywej nawrotu optycznego w chwili  $t$ .

Analogicznie wprowadzamy oznaczenia dla wartości względnego opóźnienia  $R$  wyrażonego w mikronach.

Oznaczmy przez  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  i  $\lambda_3$  następujące długości fal widma rtęci:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 435,8 \text{ m}\mu \text{ (światło Hg, filtr 50),} \\ \lambda_2 &= 546,1 \text{ m}\mu \text{ (światło Hg, filtr 77),} \\ \lambda_3 &= 578,0 \text{ m}\mu \text{ (światło Hg, filtr 22).}\end{aligned}$$

Wprowadźmy jako wartość dyspersji dwójłomności zależność:

$$D_{1,3} = \frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1}}$$

oraz

$$D_{1,2} = \frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1}}$$

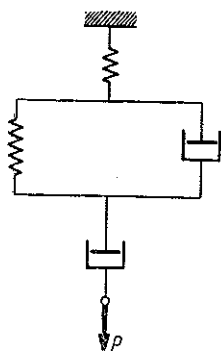
Zależność tę można przekształcić następująco:

$$D_{1,3} = \frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1}} = \frac{\lambda_1 m(50) - \lambda_2 m(22)}{\lambda_1 m(50)} = \frac{m(50) - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} m(22)}{m(50)} = \frac{m(50) - 1,326 m(22)}{m(50)},$$

gdzie:  $m(22)$  oznacza rząd izochromy przy świetle Hg z filtrem 22, oraz  $m(50)$  oznacza rząd izochromy przy świetle Hg z filtrem 50.

Analiza zależności dla żywicy CR-39 pozwala na wysnucie następujących wniosków:

Na podstawie rys. 5 i 6 oraz 7 dla badanego zakresu napiężeń i czasu oraz na podstawie tablicy zależności dla CR-39 przedstawiają się następująco:



$$(1) \quad m_{0max} = m_{0k},$$

$$(2) \quad m_{np} = m_{0k} - m_{0p},$$

$$(3) \quad D_{1,3}^0 = \text{const} = 3,2\% \pm 0,1\%$$

dla pelzania optycznego oraz dla nawrotu optycznego. Tak więc mamy

$$(4) \quad m = m_{sp} + m_{is} + m_{pl},$$

Rys. 42. Liniowy model reologiczny złożony z szeregowo połączonych modeli Maxwella i Kelvina

gdzie  $m$  oznacza całkowity rząd izochromy,  $m_{sp}$  rząd izochromy bezpośrednio po obciążeniu,  $m_{is}$  rząd izochromy narastający w czasie, odwracalny z opóźnieniem,  $m_{pl}$  rząd izochromy narastający pod obciążeniem w czasie, nieodwracalny, przy czym  $m = m_{0t}$ ,  $m_{sp} = m_{0p}$ ,  $m_{pl} = m_{nk}$ ,  $m_{is} = m - (m_{sp} + m_{pl})$ .

Zależności (1), (2) i (4) oraz charakter krzywych pelzania optycznego i nawrotu optycznego opisać można w sposób najprostszy liniowym modelem reologicznym składającym się z szeregowo połączonych modeli Kelvina i Maxwella według rys. 42 w sposób następujący:

$$m = k_1 \sigma + k_2 \sigma (1 - e^{-qt}) + k_3 \sigma t,$$

gdzie  $k_1, k_2, k_3$  i  $q$  są współczynnikami stałymi.

Współczynnik  $k_1$  stały jest w całym zakresie naprężeń, jak to wynika z zależności  $K = K(t)$  dla żywicy CR-39 (rys.10), wobec tego wyraz  $k_1\sigma$  opisuje poprawnie występujący efekt optyczny.

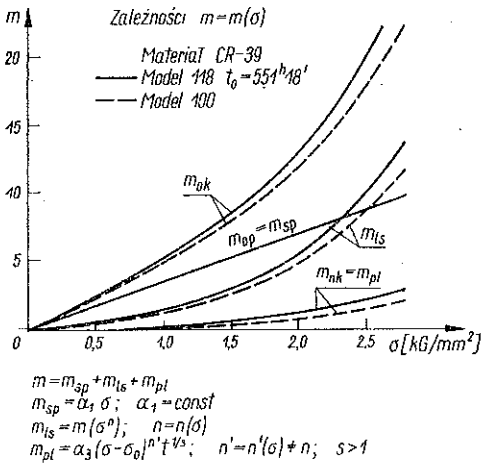
Wyraz drugi,  $k_2\sigma(1 - e^{-a\sigma})$ , jak wynika z rys. 49 oraz z tabl. 6 nie opisuje poprawnie zjawiska; wartość  $m_{ts}$  jest związana z wartością  $\sigma$  zależnością

$$m_{ts} = f(\sigma^n),$$

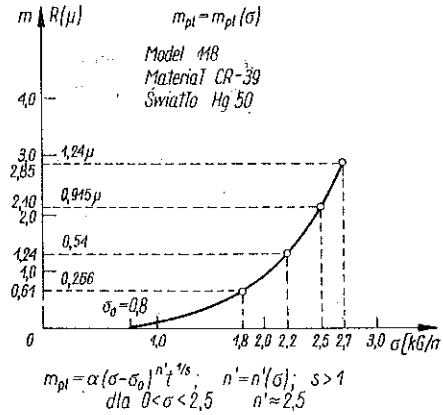
przy czym

$$n = f(\sigma).$$

Wyraz trzeci  $k_3\sigma t$  nie daje poprawnych wartości dla  $m_{pl}$ . Jak wynika z rys. 43 oraz 44  $m_{pl}$  jest funkcją wykładniczą. Jak wynika z porównania



Rys. 43. Żywica CR-39. Żółta linia r tęci. Zależności  $m = m(\sigma)$  przy pełzaniu i nawrocie optycznym dla dwóch czasów obciążenia:  $t_1 = 551^h18'$  oraz  $t_2 = 305^h46'$  (model 118 oraz model 100)



Rys. 44. Żywica CR-39. Niebieska linia r tęci. Zależność  $m_{pl} = m_{pl}(\sigma)$  dla czasu obciążenia  $t_1 = 551^h18'$  (model 118)

wartości  $m_{pl}$  dla modeli 118 oraz 100 obciążonych odpowiednio w ciągu 554 godzin i 306 godzin, wartość  $m_{pl}$  nie jest wprost proporcjonalna do czasu działania obciążenia. Na podstawie powyższych rysunków można ustawić empiryczną zależność

$$m_{pl} = \alpha (\sigma - \sigma_0)^{n'} t^{1/s},$$

gdzie  $\sigma_0$  jest pewną wartością naprężenia, a stałą,  $s$  oraz  $n'$  są współczynnikami dodatnimi większymi od jedności (ostatni jest funkcją naprężenia o wartości około 2,5).

Z tablic 5 i 6 wynika, że  $n \neq n'$ .

Z zależności (3) wynika, że w trakcie powstawania nieodwracalnego efektu elastooptycznego dyspersja dwójłomności nie ulega zmianie, nie może więc być ona wykorzystana do analizy wyników badań w obszarze niesprężystym.

Z wyżej przeprowadzonej analizy wynika, że liniowy model reologiczny nie opisuje zjawiska pełzania oraz nawrotu optycznego dla żywicy CR-39.

Przeprowadzimy z kolei analizę dla żywic P-6 oraz VP-1527.

Zagadnienie modelu reologicznego dla żywic P-6 oraz VP-1527 jest jeszcze bardziej złożone niż dla żywicy CR-39. Dla tych żywic związek pomiędzy efektem elastooptycznym a odkształceniem, jak wynika z otrzy-

Tablica 5. Żywica CR-39. Żółta linia rtęci.  
Zestawienie otrzymanych wartości reologicznych dla dwóch czasów badania

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{551,30^h}{305,77} = 1,805$$

Model nr	Czas obciążenia $T$	1	2	3	4	5	6	6 $m_{pl} \frac{T_1}{T_2}$
		$\sigma$	$m_{sp}$	$m_T$	$m_{pl}$	$m_{ns}$	$m_{1s}$	
—	godz.	kG/mm <sup>2</sup>	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	(3)–(2)	(5)–(4)	(4) × 1,805
118 Hg 22	$T_1 =$ $= 551^h 18'$	1,0	3,44	4,96	0,00	1,52	1,52	—
		1,8	6,22	10,68	0,61	4,46	3,85	—
		2,2	7,56	15,39	1,24	7,83	6,59	—
		2,5	8,59	20,62	2,10	12,03	9,93	—
		2,7	9,27	24,62	2,85	15,35	12,50	—
100 Hg 22	$T_2 =$ $= 305^h 46'$	1,0	3,45	4,65	0,00	1,25	1,25	0,00
		1,8	6,24	10,05	0,41	3,81	3,40	0,74 > $(m_{pl})_{T_1}$
		2,2	7,59	14,26	0,72	6,67	5,95	1,30 > $(m_{pl})_{T_1}$
		2,5	8,62	18,56	1,33	9,94	8,61	2,30 > $(m_{pl})_{T_1}$
		2,5	9,30	22,10	1,94	12,80	10,86	3,50 > $(m_{pl})_{T_1}$

manych zależności, nie jest tak jednoznaczny jak dla żywicy CR-39. Opierając się o wyniki interpretacji strukturalnej należałoby zbudować model, składający się z modeli dla żywicy CR-39 oraz dla polistyrenu. Budowa takiego modelu nie jest możliwa bez wyjaśnienia czy względnie w jakim stopniu można stosować zasadę superpozycji.

Ogólnie ujmując można przyjąć za tezę udowodnioną, iż wszelka analiza reologiczna własności elastooptycznych żywic sztucznych, a w szczególności budowa modeli oraz zależności reologicznych nie jest możliwa bez uprzedniego dokładnego poznania fizykalnego przebiegu zjawiska

(opis fenomenologiczny można budować tylko na podstawie opisu strukturalnego).

Z matematycznego punktu widzenia możliwe jest dobranie funkcji spełniających otrzymane doświadczalnie zależności, przy czym funkcje te — w granicach dopuszczalnych rozrzutów — mogą mieć rozmaitą postać, czyli można podkładać pod nie rozmaity sens fizyczny. Z powyższego względu funkcje te, chociaż mają postać zależności ogólnych, stanowią w istocie rzeczy odpowiednik rozwiązania numerycznego przy określonych wartościach parametrów. Wynikają z tego dwa wnioski:

1. Szukanie zależności reologicznych dla elastoptycznych własności tworzyw sztucznych, połączone z budową odpowiedniego modelu reologicznego, powinno być poprzedzone badaniami strukturalnymi i z nich wynikać, tak jak to było powiedziane wyżej.

2. W przypadku gdy niezbędnym jest dla skrócenia opisu własności elastoptycznych ustawienie zależności funkcjonalnej, zależność ta może mieć jak najprostszą postać z zachowaniem przyjętych jako dopuszczalne odchyłeń od wyników doświadczalnych na ogół w granicach 5-10%.

Tablica 6. Model 118. Żywica CR-39. Żółta linia rtęci.

Analiza prawdopodobnych zależności dla  $m_{1s}$  i  $m_{pl}$ .

1. $m = \alpha \sigma t$ , $\alpha \neq \text{const}$		2. $m = \alpha \sigma^n t$ , $\alpha = \text{const}$ ,													
$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\alpha_1 \sigma_1}{\alpha_2 \sigma_2} = k \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ , $k = \frac{m_1/m_2}{\sigma_1/\sigma_2}$		$\frac{m_1}{m_2} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^n$ , $n = \frac{\log(m_1/m_2)}{\log(\sigma_1/\sigma_2)}$													
Dane dla $\sigma$ , $m_{1s}$ oraz $m_{pl}$ wzięto z tablicy 5															
	1	2	3	4	5	(5):(1)	(5):(2)	(5):(3)	(5):(4)	(4):(1)	(4):(2)	(4):(3)	(3):(1)	(3):(2)	(2):(1)
$\sigma kG/mm^2$	1,0	1,80	2,20	2,50	2,70	2,70	1,50	1,229	1,08	2,50	1,39	1,136	2,20	1,223	1,80
$m_{1s}$	1,52	3,85	6,59	9,93	12,50	8,88	3,25	1,895	1,261	6,53	2,58	1,51	4,34	1,713	2,53
$k$	—	—	—	—	—	3,29	2,17	1,545	1,166	2,61	1,86	1,33	1,975	1,40	1,41
$n$	—	—	—	—	—	2,20	2,90	3,09	3,02	2,05	2,88	3,23	1,86	2,68	1,58
$m_{pl}$	0	0,61	1,24	2,10	2,85	—	4,675	2,50	1,358	—	3,44	1,695	—	2,03	—
$k$	—	—	—	—	—	—	3,12	1,875	1,255	—	2,48	1,49	—	1,66	—
$n$	—	—	—	—	—	—	3,80	4,07	3,98	—	3,76	4,12	—	3,51	—

#### Literatura cytowana w tekście

[1] D. J. Coolidge, *On Investigation of the Mechanical and Stress-Optical Properties of Columbia Resin CR-39*, Proc. E. S. A., 1, 6 (1948).

[2] R. Hiltcher, *Gütebeurteilung spannungsoptischer Modelwerkstoffe*, Forsch. 3, 20 (1954).

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

- [4] E. Mönch, *Die Dispersion der Doppelbrechung als Mass für die Plastizität bei spannungsoptischen Versuchen*, Forschung, 1, 1955.
- [5] R. Houwink, *Elastomers and Plastomers*, New York 1950.
- [6] R. Hiltcher, *Theorie und Anwendung der Spannungsoptik im elastoplastischen Gebiet*, Z VDI, 2, 97 (1955).
- [7] H. A. Stuart, *Die Physik der Hochpolymeren*, J. Springer, Berlin 1956.
- [8] J. T. Pindera, *Zarys elastooptyki*, PWT, Warszawa 1953.
- [9] J. T. Pindera, *Technika elastooptycznych badań płaskiego stanu naprężenia*, Rozpr. Inżyn. 1, 3 (1955).
- [10] J. T. Pindera, *Współczesne kierunki rozwoju metod elastooptyki i możliwości ich zastosowania do rozwiązywania zagadnień mechaniki budowli*, Księga Jubileuszowa W. Wierzbickiego, Warszawa 1959.
- [11] J. T. Pindera, *Badania pewnych reologicznych własności elastooptycznych kilku żywic poliestrowych, Cz. I. Metodyka i technika badania przy obciążeniach statycznych oraz periodycznie zmiennych*, Rozpr. inżyn., 3, 7 (1959).

## Резюме

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

#### Часть II. Исследования и интерпретация результатов

Во второй части работы, касающейся реологических фотоупругих свойств нескольких полиэстровых смол, обсуждаются результаты исследований и их интерпретация, а также сравнение этих исследований с исследованиями других авторов.

Статистические исследования ползучести и последействия автор проводил на образцах в форме смуклого клина, растягиваемых постоянной силой. Результаты заключают действительные значения напряжений. Исследуются фотоупругие реологические свойства при растяжении постоянной силой смол CR-39, VP-1527 и P-6 в широком диапазоне времени исследований.

Исследования ползучести и фотоупругого последействия при изгибе проводятся на образцах изгибаемых сосредоточенной силой, постоянной силой и периодически переменной силой.

Сравнивая полученные результаты с результатами полученными другими авторами доказывається существование основного влияния техники на результаты измерений.

Проводится подробный анализ примененной методики и техники исследований а также анализ влияния способа нагрузки образца, влияния характера поля напряжений в образце и влияние переменных нагрузок.

Полученные реологические диаграммы интерпретируются, принимая во внимание структуру материала и схему реологической модели.

Доказывается возможность выяснения характера ползучести и последствия исследуемых смол принимая, что наблюдаемый фотоупругий эффект является результирующим эффектом, зависящим от увеличения во время ориентации отдельных анизотропных групп.

Основываясь на реологической модели Кельвина и Максвелла, доказывается, что линейная реологическая модель этого типа не описывает ползучести и оптического последствия исследуемых смол. Для смолы CR-39 формулируются условия, которым должны удовлетворять реологические формулы, доказывая нелинейность явления.

Доказывается, что составленная схема реологических зависимостей для исследования смол должна основываться на точных физических исследованиях свойств материалов и на исследованиях их структуры.

Констатируется весьма существенные влияния переменных нагрузок на скорость фотоупругого последствия.

Доказывается также для исследуемых смол существование зависимости между явлением «замораживания напряжений» и явлением фотоупругой ползучести.

#### S u m m a r y

#### INVESTIGATIONS OF CERTAIN RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOME POLYESTER RESINS FROM THE POINT OF VIEW OF PHOTOELASTICITY (II)

##### Part II. Examination and interpretation of the results

This second part of the paper on the rheologic photoelastic properties of certain polyester resins embodies a discussion of test results, their interpretation, and comparison with results obtained by other authors.

Static tests of creep and recovery were conducted with test-pieces in the form of a thin wedge, stretched with a constant force. The real values of stresses are given. The rheologic photoelastic properties of the CR-39, VP-1527 and P-6 resins were tested for tension with a constant force in a broad range of test durations.

The investigations of creep and recovery for bending were performed with test-pieces acted on by a concentrated force constant or periodic.

Comparing the results obtained with those of other investigations, it is shown how fundamental is the influence of measurement technique on test results.

The method of investigation used is subjected to a detailed analysis. In particular, the influence of the manner of applying the load, and the influence of the stress field are discussed, together with the alternating character of the load.

The rheologic diagrams obtained are interpreted from the point of view of the structure of the material and the rheologic model used. It is shown that the character of creep and recovery of the resins in question may be explained by assuming that the photoelastic effect observed is consequent on the history of the orientation of each anisotropic group.

On the basis of the Kelvin-Maxwell model, it is shown that a linear rheologic model of this type does not describe the creep and the recovery of the resins tested. For the CR-39 resin, the conditions are established as being satisfied by the rheologic formulae, the non-linear character of the phenomenon being shown.

It is demonstrated that the structure of rheologic materials and the rheologic relations should, for the resins tested, be based on accurate investigations of physical properties and structure.

It is found that the influence of alternating loads on the rate of the recovery is fundamental.

It is shown also that for the resins tested there exists a relation between the phenomenon of stress freezing and that of optical creep.

**ZAKŁAD BUDOWNICTWA  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

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

---