

# DYNAMICZNA WYTRZYMAŁOŚĆ KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH (1)

STANISŁAW O C H E L S K I (WARSZAWA)

Opisano metodę badań dynamicznego rozciągania, skręcania i zginania płyt. Wyniki badań dynamicznych własności mechanicznych przedstawiono w zależności od prędkości odkształcenia. Przedmiotem badań były kompozyty polimerowe ortotropowe i transwersalnie izotropowe. Podjęto próbę opracowania modelu mechanicznego opisującego zachowanie się badanych tworzyw.

## 1. WSTĘP

Badania dynamiczne stanowią trudny problem eksperymentalny, za wyjątkiem standardowych prób udarnościowych. Wzrost zainteresowania badaniami materiałów spowodowany jest nie tylko zainteresowaniem konstruktorów wynikami badań, lecz także znacznym postępem elektronicznych metod pomiarowych, które umożliwiają dokładny pomiar i rejestrację procesów szybkościennych.

W badaniach dynamicznych określa się wpływ prędkości odkształcenia w zakresie sprężystym na dynamiczne moduły sprężystości. Z badań tych można wyznaczyć wzrost granicy plastyczności tworzywa wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia oraz określić czy płynięcie wystąpi od razu przy nagłym wywołaniu naprężenia przewyższającego statyczną granicę plastyczności czy wystąpi po upływie czasu, który zależy od własności materiału. W badaniach dynamicznych określa się także zwiększone wartości naprężeń niszczących wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia. Przy niszczeniu z większą prędkością odkształcenia, wartość odkształceń plastycznych i lepkosprężystych jest na

(1)Pracę wykonano w ramach CPBP 02.01.

ogół mniejsza niż przy niszczeniu w takich samych warunkach z mniejszą prędkością.

Tworzywa sztuczne należą do grupy materiałów o własnościach reologicznych, są więc szczególnie wrażliwe na czas obciążenia i niewielkie nawet zmiany temperatury. W polimerach wielocząsteczkowych, przejście od nieuporządkowanego rozmieszczenia cząsteczek o największej entropii do rozmieszczenia bardziej uporządkowanego wymaga pewnego czasu. Przy bardzo dużej prędkości odkształcenia ważny jest wpływ wzajemnego oddziaływania więzów między cząsteczkami wzdłuż linii lokalnych. Tworzywa sztuczne pozbawione siatki krystalicznej przy dowolnie małym naprężeniu rozciągającym, po upływie dostatecznie długiego czasu, odkształcają się plastycznie, a następnie ulegają zniszczeniu. Przy dużych prędkościach odkształcenia realizowany jest proces adiabatywny, występuje lokalne nagrzewanie się próbki, co wywiera istotny wpływ na własności mechaniczne. Tak więc rola czynnika czasu w badaniach czasu jest złożona.

Określenie własności mechanicznych tworzyw, na podstawie badań dynamicznych, znajdziemy w nielicznych pracach [1,2], w których opisano próby dynamicznego rozciągania. W pracy [3] podano wyniki badań polimetakrylanu metylu w złożonych stanach naprężenia i przy zmiennych prędkościach odkształcenia. Do prób dynamicznego rozciągania najczęściej stosuje się młot PSW-30, między innymi w pracy [1,2]. W badaniach dynamicznych tworzyw termoplastycznych w pracy [2] dokonano analizy własności mechanicznych uwzględniając drgania układu dynamometr - próbka. Sposób obciążenia próbek wywołanego wyładowaniem elektrycznym w cieczy, w układzie cylinder - tłok, omówiono w pracy [4]. Wartość natężenia prądu 80A. Przy realizacji stanowiska opartego na tej metodzie, należy pokonać trudności wynikające z wpływu silnego pola elektrycznego na przyrządy i urządzenia elektryczne zastosowane w stanowisku.

## 2. PRZEDMIOT BADAŃ

Kompozyty polimerowe, składające się przeważnie z matrycy sprężysto-lepko-plastycznej żywicy i wzmocnienia sprężystego, zachowują się jak ciała lepkosprężyste. Własności lepkosprężyste kompozytów polimerowych dobrze ilustrują modele reologiczne na przykład: ciał liniowych -

model standardowy i ciał nieliniowych - zmodyfikowanych przez Eyringa także model standardowy.

Badaniom podano trzy rodzaje kompozytów polimerowych. Kompozyt 1 składał się z żywicy epoksydowej E-53 i tkaniny szklanej STR-58. Kierunki osnowy tkaniny wszystkich warstw w kompozycie pokrywały się tworząc kompozyt ortotropowy. Kompozyt 2 otrzymano również z żywicy E-53 i tkaniny STR-58 z tym, że kierunki osnowy warstw tkanin w stosunku do kierunku osnowy pierwszej warstwy tworzyły kąty  $30^{\circ}$ ;  $15^{\circ}$ ;  $60^{\circ}$ ;  $45^{\circ}$ ;  $90^{\circ}$ ;  $75^{\circ}$ ;  $120^{\circ}$ ;  $150^{\circ}$ ;  $135^{\circ}$ ;  $165^{\circ}$ . Kompozyt ten w płaszczyźnie warstw można zaliczyć do ciał quasi-izotropowych. Kompozyt 3, jednokierunkowo wzmocniony, składał się z żywicy E-53 i równolegle ułożonych pasm ciągłych włókien szklanych ES10-400-0-60. Kompozyty otrzymano w postaci płyt, rurek i próbek owalnych (rys.1b). Technologię otrzymywania próbek podano w [6]. Wagowa zawartość szkła w kompozycie 1 wynosi 0,503, w kompozycie 2 - 0,492, a w kompozycie 3 - 0,496. Wszystkie rodzaje próbek po utwardzaniu żywicy były wygrzewane w celu zakończenia procesu polimeryzacji. Cykl wygrzewania wynosił 24 godziny z maksymalną temperaturą  $80^{\circ}$  i bardzo powolnym chłodzeniem.

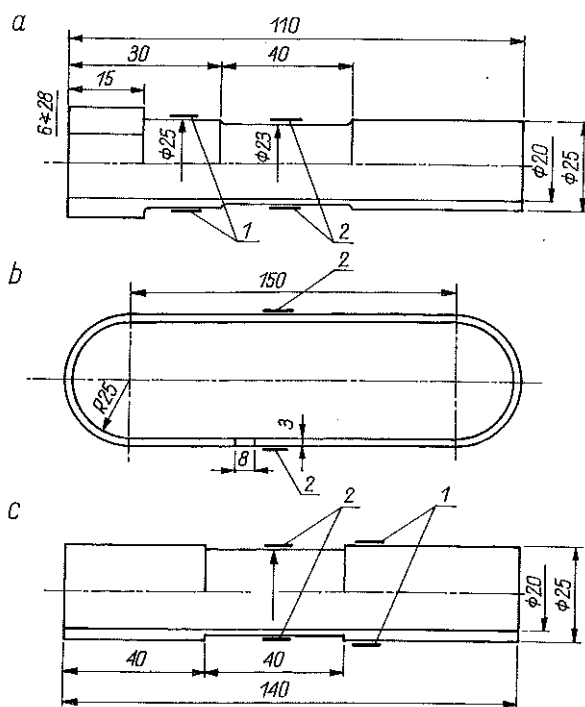
### 3. METODA BADAŃ

W badaniach dynamicznych stosuje się przeważnie obciążenia wywołane impulsem ciśnienia lub obciążenia uderzeniem masą. Stanowisko do badań dynamicznych powinno zapewnić realizację dowolnej postaci i różnej wartości impulsu siły w celu wywołania deformacji lub zniszczenia próbki. Powinno zapewnić ciągły pomiar przebiegu siły i deformacji w funkcji czasu. Przyrządy elektroniczne zastosowane w stanowisku muszą posiadać szerokie pasmo przenoszenia (0-100 kHz). System pomiaru siły winien posiadać krótki czas reakcji na zadane wymuszenie.

Na podstawie powyższych wymagań opracowano i wykonano stanowisko do badań dynamicznych próbek w postaci kołowych płyt oraz rozciągania, skręcania i zginania próbek prostopadłościennych oraz układów pomiarowych rejestrujących ciśnienie, siłę oraz deformację próbki. Obciążenia realizowane są przez detonowanie lub spalanie materiału miotającego w taki sposób, że produkty gazowe powstałe w wyniku

spalania, działają dynamicznie na badaną płytę bezpośrednio lub w sposób pośredni w przypadku rozciągania, skręcania lub zginania próbki. Realizację impulsu ciśnienia o żądanej postaci zapewniają zawory sterowane elektrycznie zamocowane w komorze rozprężnej.

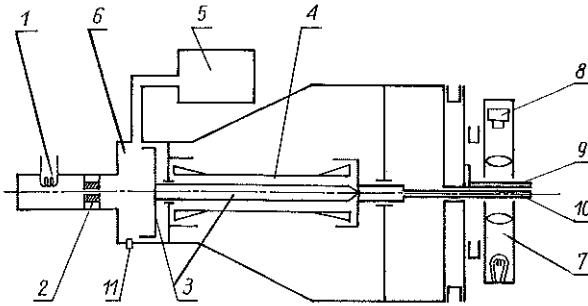
Zastosowane próbki w badaniach dynamicznego rozciągania i skręcania wraz z rozmieszczonymi tensometrami elektrozestancyjnymi przedstawia rys.1.



Rys. 1 Próbki zastosowane w badaniach: a - skręcania, b i c - rozciągania

Tensometr 1 wchodzi w skład układu mierzącego siłę, natomiast tensometr 2 przekazuje odkształcenia początkowej fazy próby. Próbki kształtu owalnego wykonywane były z kompozytu 3. Do dynamicznego zginania próbki posiadały kształt prostopadłościanu, natomiast płyty zginane posiadały średnicę 150mm i grubości 3,1mm i 6,2mm. Technologię wykonania próbek przedstawiono w pracach [5,6].

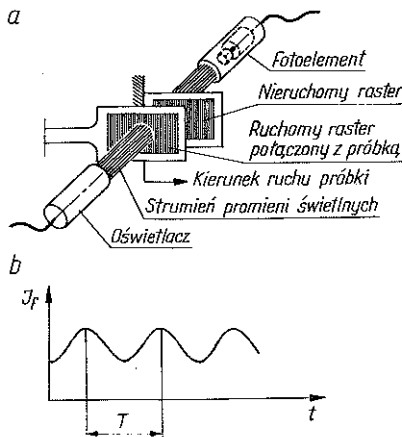
Na rys.2 przedstawiono schemat mechanizmu wytwarzania obciążenia przy rozciąganiu. Zapłonnik elektryczny 1 zapala materiał miotający, a gaz powstały w wyniku spalania przedostaje się przez dyszę



Rys. 2 Schemat mechanizmu wytwarzania obciążenia przy rozciąganiu próbek: 1- zapłonnik elektryczny, 2- dysza, 3- tłok, 4- próbka, 5- elektromagnetyczny zawór rozładowania, 6- komora rozprężna, 7- oświetlacz, 8- fotodioda, 9- raster nieruchomy, 10- raster ruchomy, 11- czujnik piezoelektryczny

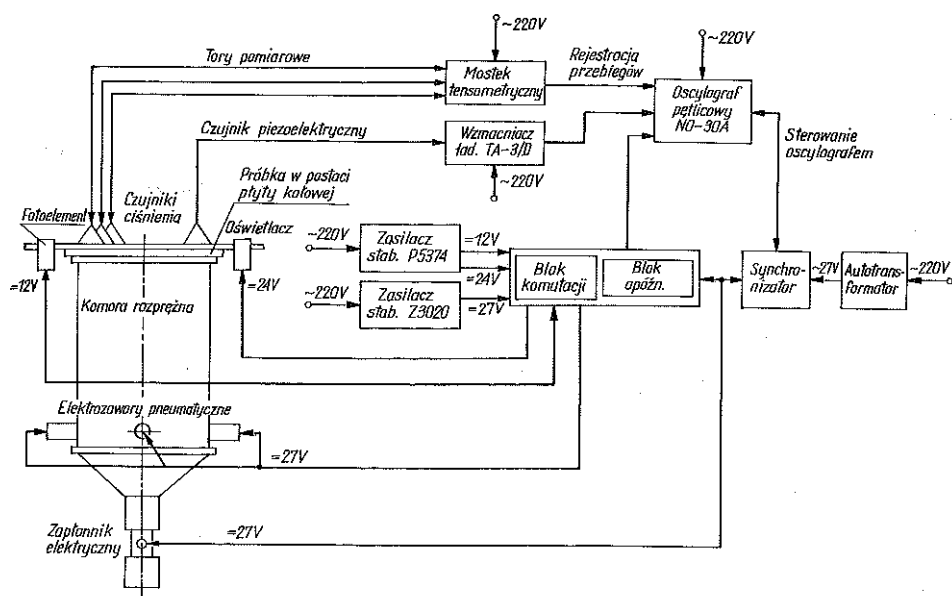
2 do komory rozprężnej 6. Ruch tłoka 3 powoduje rozciąganie próbki 4. Połączony z komorą rozprężną, elektrycznie sterowany zawór pneumatyczny 5, służy do otwarcia komory rozprężnej 6 w określonym czasie kształtując impuls ciśnienia. Stosując dyszę 2 z różną średnicą otworu uzyskuje się różną prędkość odkształcenia próbki.

Zmiana niektórych elementów konstrukcji stanowiska pozwala prowadzić badania różnego rodzaju kształtu próbek i realizować różne rodzaje obciążenia. W pracy [7] przedstawiono stanowisko do dynamicznego zginania płyt, a w [8] do rozciągania próbek owalnych wykonanych z kompozytu 3.



Rys. 3 Schemat układu pomiarowego przemieszczeń w przypadku rozciągania

Schemat układu pomiarowego przemieszczeń ruchomego uchwytu próbki w przypadku rozciągania i skręcania przedstawia rys.3. Płytki ruchoma i nieruchoma posiadają fotograficznie wykonany raster. Podczas ruchu płytki następuje okresowe przepuszczanie promieni świetlnych, które odbiera fotodiody w postaci odpowiednich impulsów. Sygnał z fotodiody zbliżony jest do sinusoid rejestrowanych przez oscylograf w postaci zakodowanego przemieszczenia uchwytu próbki w funkcji czasu. Podziałka nacięcia rastra wynosi 0,25mm, skąd możemy wnioskować o prędkości rozciągania i prędkości odkształceń ponieważ wiadomo, że odległość między sąsiednimi maksimumi sinusoidy o jednakowym znaku odpowiada przemieszczeniu 0,5mm.



Rys. 4 Schemat blokowy układu pomiarowego w przypadku zginania płyt

Schemat blokowy układu pomiarowego i rejestrującego stanowisk przedstawia rys.4. Oświetlacz i fotoelement wchodzi w skład pomiaru ugięcia płyty. Istotną rolę w sterowaniu układem spełniają przyrząd synchronizujący oraz blok komutacji. Rozdzielają one informacje i zasilają urządzenia wykonawcze. Przyrząd synchronizujący posiada blokadę uniemożliwiającą podanie napięcia do zapłonika elektrycznego. W bloku komutacji znajduje się układ opóźnienia sygnału napięcia od 0 do 0,25s, do uruchomienia elektrycznie sterowanych zaworów.

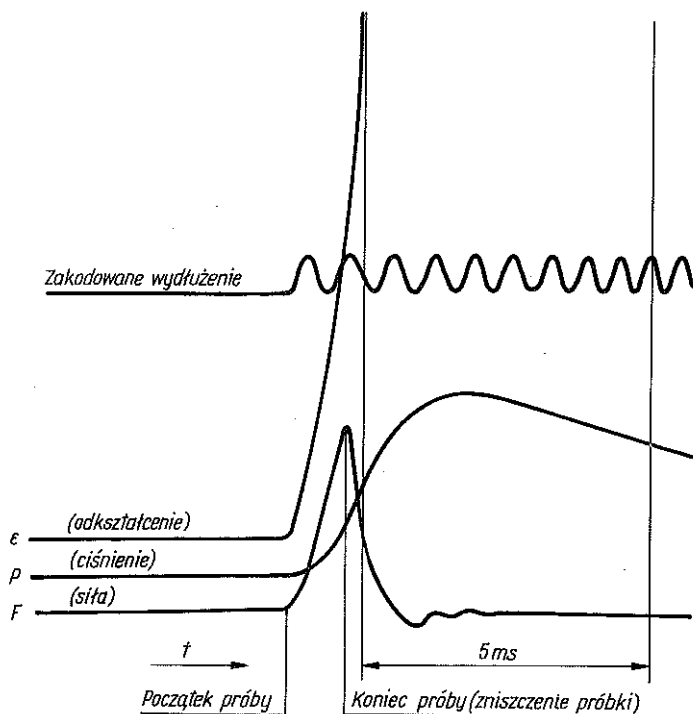
Uruchomienie próby można dokonać przyciskiem START na bloku komutacji z realizacją opóźnienia lub na przyrządzie synchronizującym przy wyłączonym układzie opóźnienia. Przyciskiem start automatycznie uruchamiany jest oscylograf, oraz napięcie prądu zostaje podane na blok opóźnienia i zapłonnik elektryczny. Na stanowisku tym uzyskano najmniejszy czas trwania próby równy 1,0ms, natomiast największy wynosił 2,0s.

Jako podstawowe wiarygodności wskazań czujników elektrozestancyjnych w badaniach dynamicznych, przyjmuje się conajmniej dziesięciokrotnie większy czas próby od okresu pierwszej częstości drgań własnych układu konstrukcyjnego próbki z uchwytem. Częstość drgań własnych obliczono metodą dyskretyzacji układu próbka - uchwyt. Konstrukcję tę podzielono na 16 elementów prętowych, przyjmując w każdym węźle jeden stopień swobody, którym było przemieszczenie wzdłuż osi próbki rozciąganej. W przypadku kształtki próbnej w postaci płyty kołowej zginanej, częstość drgań własnych określono doświadczalnie [7]. W obu przypadkach warunek dziesięciokrotnie większego czasu próby od okresu drgań był spełniony. Skalowanie stanowiska szczegółowo opisano w pracy [7].

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Próby dynamiczne zrealizowano na stanowiskach zapewniających rejestrację na oscylografie pięciopętlicowym zależności  $\sigma = \sigma(t)$ ,  $\epsilon = \epsilon(t)$ , ugięcia płyty  $f = f(t)$  oraz zmiany ciśnienia w czasie  $p = p(t)$  w komorze miotającej w przypadku rozciągania i w komorze rozprężnej w przypadku zginania płyt. Realizowany zakres prędkości odkształceń w tych badaniach wynosił  $10^{-2}\text{s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^2\text{s}^{-1}$ . Układ konstrukcyjny próbki z uchwytami i pomiar obciążenia w czasie w zakresie realizowanych prędkości odkształceń klasyfikują badania te do badań quasi-statycznych. W próbkach tych pominięcie efektów falowych było możliwe, ponieważ czas przejścia fali przez próbkę jest kilkadziesiąt razy krótszy od czasu próby.

Do otrzymania zależności własności mechanicznych określonych w próbie rozciągania kompozytów od zmiany prędkości odkształceń w szerokim zakresie, wykorzystano wyniki badań dynamicznych, pełzania i



Rys. 5 Oscylogramy uzyskane z dynamicznej próby rozciągania

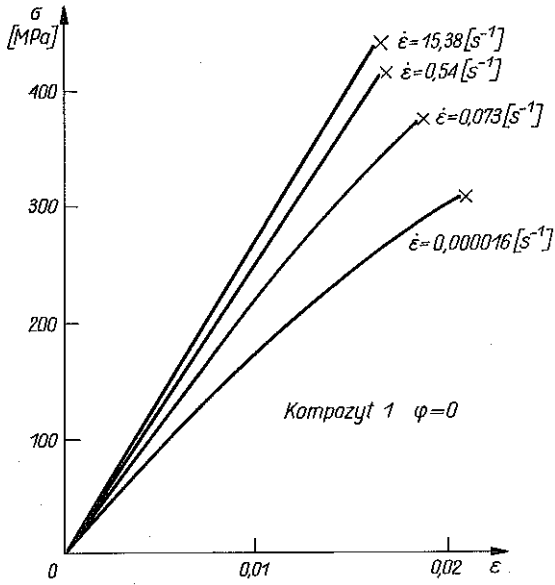
statycznych.

Z badań dynamicznych otrzymano wyniki na taśmie oscylografu, które przykładowo dla tworzywa 1, rozciąganego w kierunku głównej osi ortotropii (wzdłuż osnowy tkaniny w tworzywie), podano na rys.5. Wartość siły, odkształceń i ciśnienia wykazywane przez oscylograf były skalowane w badaniach statycznych z użyciem czujnika piezoelektrycznego przez stopniowe zwiększanie obciążenia. Zależności  $\sigma = \sigma(t)$  otrzymuje się z rys.5 ze wskazań dynamometru wraz z układem mostka tensometrycznego. Natomiast zależności  $\epsilon = \epsilon(t)$  uzyskano dwoma sposobami: wskazania początkowej fazy odkształceń tensometru elektrorezystancyjnego naklejonego na pomiarowej części próbki oraz z zakodowanego wydłużenia w postaci impulsów fotodiody, spowodowanych względnym ruchem. Zarejestrowana na taśmie zależność  $p = p(t)$  ma charakter informacyjny.

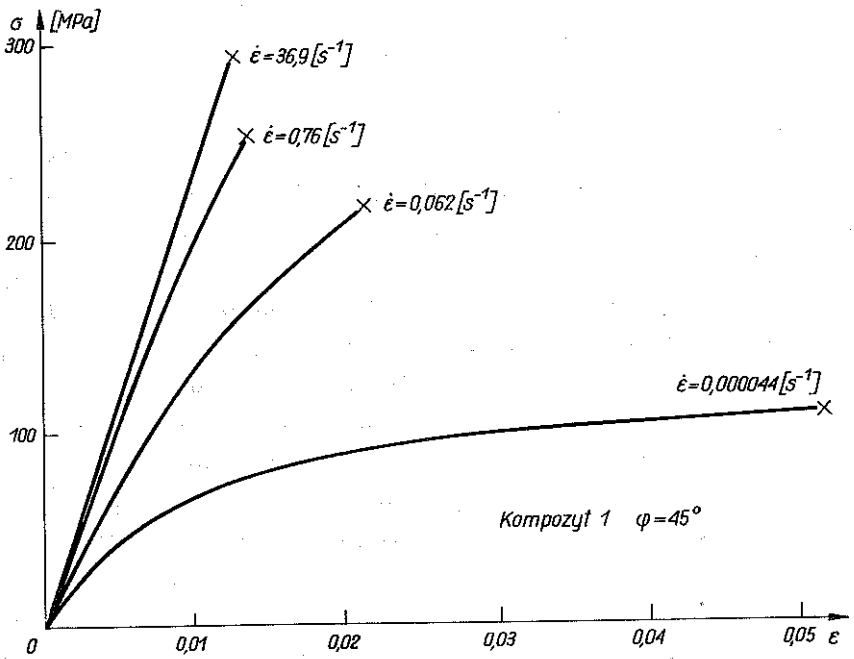
Badania statyczne realizowano na zrywarkach typu kinematycznego gwarantujących utrzymanie stałej prędkości odkształcenia w zakresie

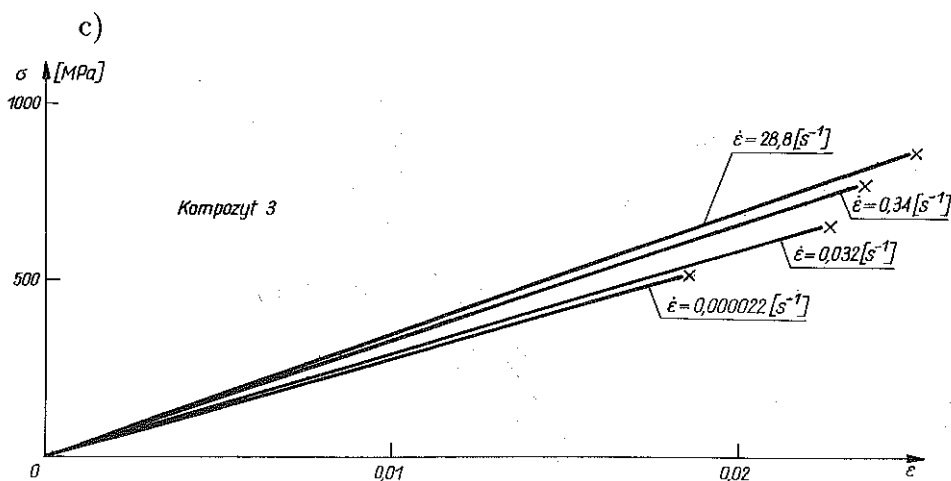


a)



b)





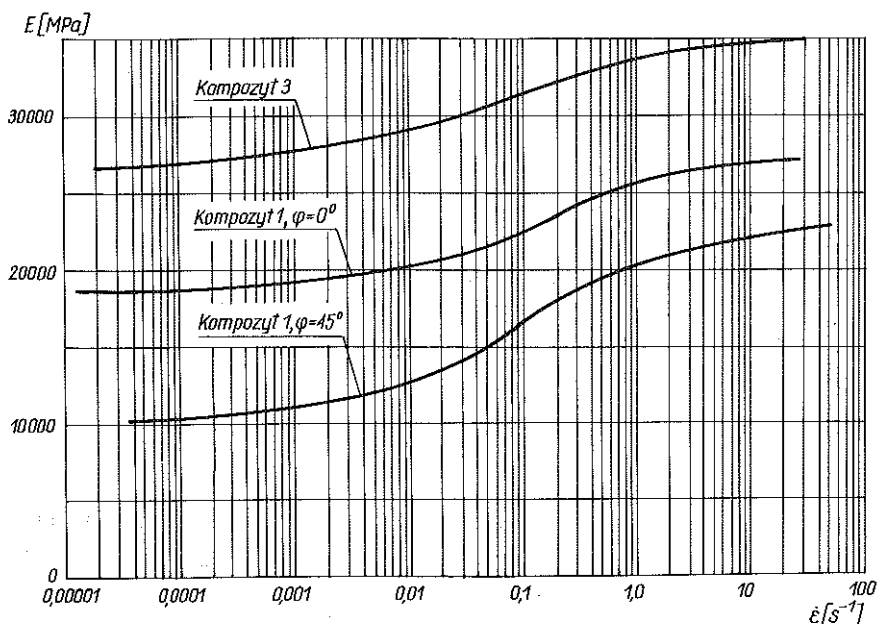
Rys. 6 Zależności naprężeń od odkształceń dla różnych prędkości odkształcenia rozciąganych kompozytów; a, b – kompozyt 1, c – kompozyt 3.

$10^{-4}s^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^2s^{-1}$ . Z prób tych otrzymano bezpośrednio zależności  $\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$ .

Z badań pełzania kompozytów aż do zniszczenia próbki otrzymano uśrednione prędkości odkształceń  $\dot{\epsilon} \leq 10^{-4}s^{-1}$ . Uzyskane z badań doświadczalnych zależności  $\epsilon = \epsilon(t)$  przy  $\sigma_i = \text{const}$ , graficznie zróżniczkowano względem czasu, otrzymując zależności  $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}(t)$ . Po wyrugowaniu czasu z powyższych zależności i uśrednieniu wyników można otrzymać zależność  $\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$ . Badania długotrwałej wytrzymałości [9] tych samych kompozytów dostarczyły zależności  $\sigma_{\text{niszcz}} = \sigma_{\text{niszcz}}(t)$ .

Na podstawie opracowanych wyników doświadczalnych rozciągania kompozytu 1 i 3, uzyskanych z badań dynamicznych, statycznych i pełzania, określono zależności  $\sigma_{11} = \sigma_{11}(\epsilon, \dot{\epsilon})$ ,  $E_{11} = E_{11}(\dot{\epsilon})$  i  $\sigma_{11}^{\text{niszcz}} = \sigma_{11}^{\text{niszcz}}(\dot{\epsilon})$ . Zależności te przedstawiono na rys. 6a, 6b, 6c, 7 i 8. Zmiana podłużnego modułu sprężystości określonego w kierunku głównej osi anizotropii kompozytów jest podana dla różnych czasów trwania próby rozciągania, od modułu natychmiastowego (adiabatycznego) określonego przy  $t \rightarrow 0$  do modułu zrelaksowanego (izotermicznego) określonego przy  $t \rightarrow \infty$ .

Badania wpływu prędkości odkształcenia na granicę plastyczności i naprężenia niszczące przy rozciąganiu wykazały, że przy  $\epsilon > 10^{-4}s^{-1}$  wartość granicy plastyczności jest równa naprężeniom niszczącym. Granicę plastyczności wyznaczono, wykorzystując efekt sprężenia

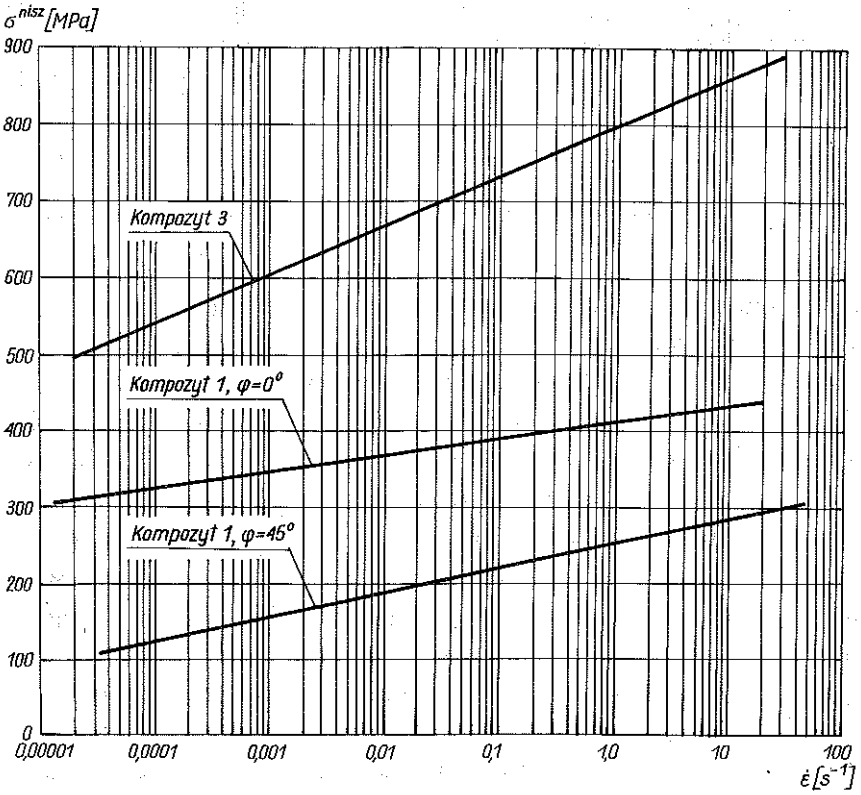


Rys. 7 Zależności podłużnego modułu sprężystości od prędkości odkształcenia

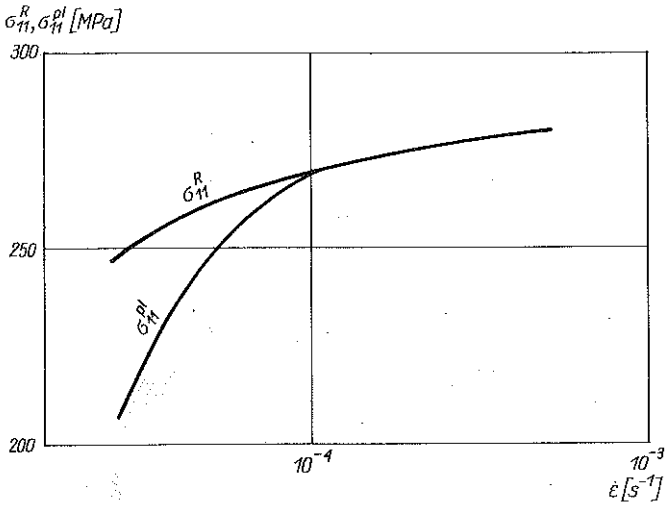
termomechanicznego [10]. Zmianę temperatury mierzono za pomocą przyrządu termistorowego. Wyniki badań kompozytu 1 rozciąganego wzdłuż głównej osi anizotropii (wzdłuż osnowy tkaniny w kompozycie 1) przedstawione na rys.9. Z przedstawionej zależności wynika, że w badaniach dynamicznych, gdzie prędkości odkształcenia są znacznie większe od  $10^{-4}s^{-1}$ , niszczenie próbek odbędzie się w zakresie sprężystym.

Z porównania przedstawionych własności kompozytów 1 i 3 w zależności od prędkości odkształcenia, wynika istotny wpływ wzmocnienia równoległego pasmami ciągłymi, jako elementu w kompozycie przejmującego obciążenia, na charakterystyki mechaniczne. Moduły sprężystości podłużnej i naprężenia niszczące, badanych kompozytów, znacznie rosną wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia, natomiast odkształcenia niszczące zmieniają się nieznacznie w przypadku rozciągania kompozytów wzdłuż osi głównej anizotropii. Mechaniczne charakterystyki kompozytów polimerowych zależą więc od charakteru procesu relaksacji występującego podczas odkształcenia.

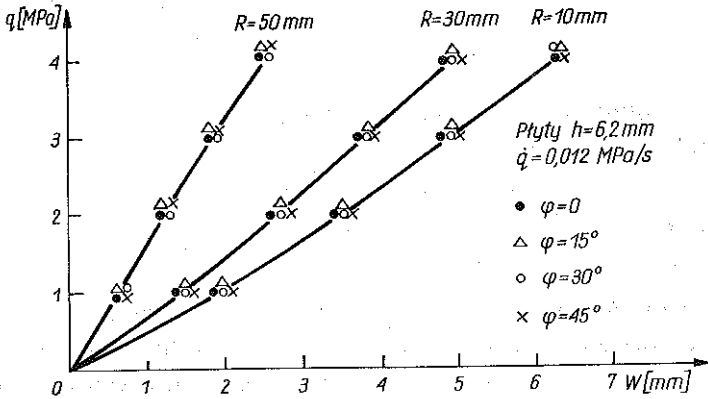
Wyniki badań wpływu własności anizotropowych płyty ortotropowej na ugięcia przedstawiono na rys.10, na którym kąt  $\varphi$  zawarty jest



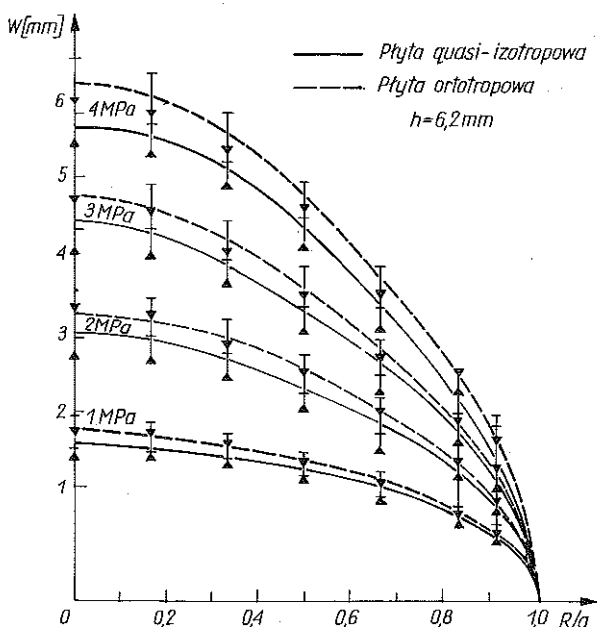
Rys. 8 Zależność naprężeń niszczących od prędkości odkształcenia



Rys. 9 Zależność granicy plastyczności i naprężeń niszczących od prędkości odkształcenia



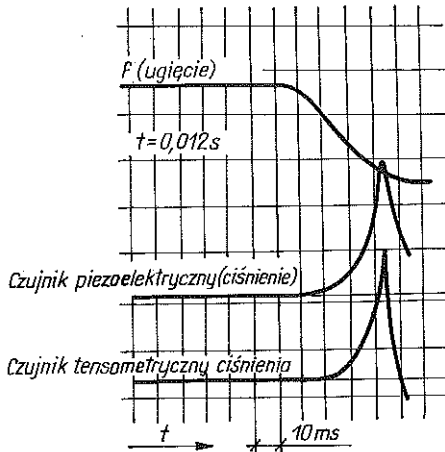
Rys. 10 Zależność ugięć od obciążenia płyty ortotropowej dla różnych kątów  $\varphi$  i promieni  $R$



Rys. 11 Powierzchnie ugięć płyt utwardzonych dla różnych obciążeń

między kierunkiem głównej osi anizotropii a kierunkiem pomiaru ugięć wzdłuż promienia. Różnice w ugięciach dla różnych  $\varphi$  przy obciążeniu  $q_i = \text{const}$  i promieniu  $R_i = \text{const}$  mieszczą się w granicach błędu pomiaru czujnika, którym mierzono ugięcia płyty. Porównanie wyników badań płyty quasi-izotropowej i ortotropowej przedstawiono na rys.11. Stosunkowo mała różnica zależności  $w = w(R)$  dla  $q_i = \text{const}$  płyt ortotropowych i quasi-izotropowych wynosząca od 11% do 23% powoduje, że dla celów praktycznych w obliczeniach zginania płyt ortotropowych przyjmuje się je jako izotropowe.

Z doświadczalnych prób niszczących płyt otrzymano zależności obciążenia równomiernego i ugięcia od czasu zarejestrowane przez oscylograf dla różnych prędkości obciążenia. Dla przykładu jedną z nich przedstawiono na rys.12. Wartości prędkości obciążenia określono przez graficzne różniczkowanie zależności  $q = q(t)$ . Wyniki badań dla płyt utwardzonych przedstawiono na rys.13 i 14. Maksymalne ugięcia płyt w czasie niszczenia dla wszystkich badanych prób z różnymi prędkościami obciążenia, nieznacznie różniły się od średniej wartości równej 7,51mm (rys.14).



Rys. 12 Oscylogramy z dynamicznej próby zginania płyty ortotropowej grubości 3,1 mm

## 5. PRÓBA OKREŚLENIA MODELU MECHANICZNEGO OPISUJĄCEGO ZACHOWANIA SIĘ BADANYCH KOMPOZYTÓW

W teorii ośrodków lepkosprężystych istotną rzeczą jest określenie funkcji lepkosprężystych opisujących mechaniczne zachowanie się tworzywa. Do tych funkcji zalicza się widma czasów relaksacji i czasów opóźnienia. Do określenia tych widm wykorzystuje się wyniki z badań pełzania, relaksacji naprężeń lub wyniki badań drgań. Wyznamy widma czasów relaksacji kompozytu 1 i 3 z wyników rozciągania ze stałą prędkością odkształceń i pełzania, w zakresie  $10^{-7} s^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^2 s^{-1}$ .

Widma czasów relaksacji określimy metodą przybliżoną [12] z zależności

$$(5.1) \quad E(T) = E_{\infty} + \int_{-\infty}^{\infty} H(\tau) e^{-\frac{T}{\tau}} d \ln \tau,$$

gdzie  $E(t)$  oznacza moduł relaksujący,  $E$  - moduł zrelaksowany,  $H(\tau)$  - widmo czasów relaksacji.

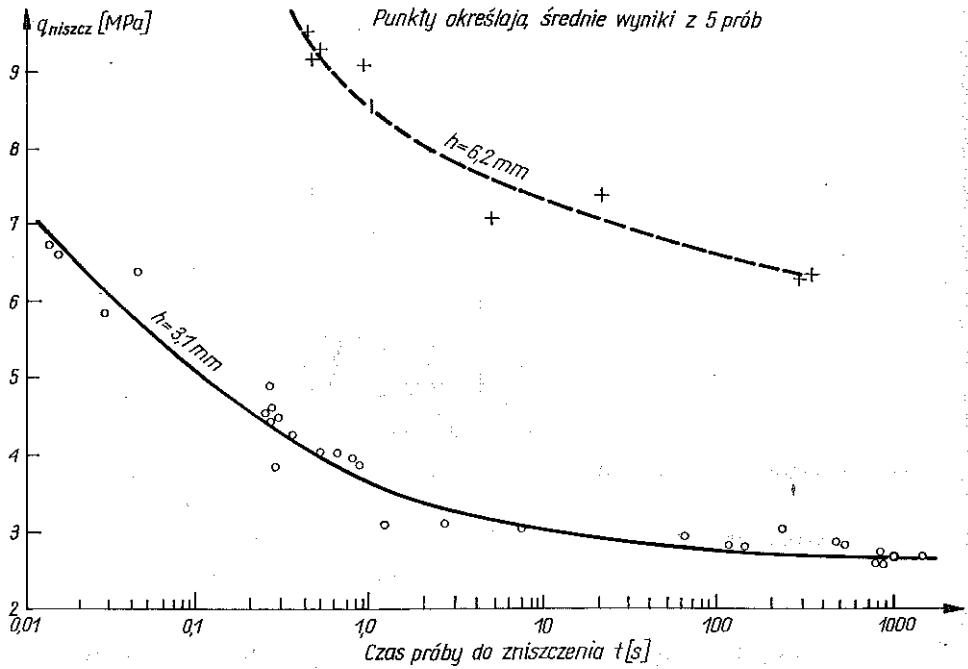
Zakłada się, że własności lepkosprężyste ośrodka można opisać za pomocą  $n$  połączonych równolegle modeli Maxwella.

Naprężenie całkowite jest wówczas równe

$$(5.2) \quad \sigma = E_{\infty} \cdot \epsilon + \dot{\epsilon}_0 \int_0^{\infty} \int_0^t \frac{H(\tau)}{\tau} e^{-\frac{\xi}{\tau}} d\xi d\tau,$$

gdzie  $H(\tau) = E(\tau)\tau$ ,  $\tau = \eta/E$  - czas relaksacji.

Określając moduł sieciowy  $E_a$  dla różnych prędkości odkształceń  $\dot{\epsilon}_0$  i założonych stałych odkształceń względnych  $\epsilon_a$ , równanie (5.2) przepi-



Rys. 13 Zależność obciążenia niszczonego od czasu próby

szemy

$$(5.3) \quad E_a = \frac{\sigma_a}{\epsilon_a} = E_\infty + \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^2 \frac{H(\tau)}{\tau} e^{-\frac{\xi}{\tau}} d\xi d\tau,$$

gdzie  $Z = \epsilon_a / \dot{\epsilon}_0$  oznacza czas potrzebny do uzyskania odkształceń  $\epsilon_a$ . Oznaczając  $E = E_a = -E_\infty$ ,  $R = EZ$ , równanie (5.3) zapiszemy w postaci

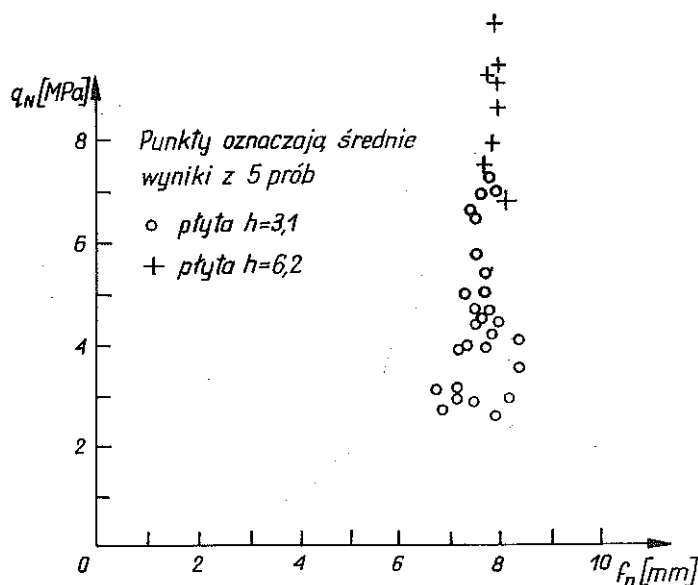
$$(5.4) \quad R(z) = \int_0^\infty \int_0^2 \frac{H(\tau)}{\tau} e^{-\frac{\xi}{\tau}} d\xi d\tau,$$

skąd

$$(5.5) \quad R'(z) = \frac{\partial R(z)}{\partial z} = \int_0^\infty \frac{H(\tau)}{\tau} e^{-\frac{z}{\tau}} d\tau,$$

Z równania (5.5) dla  $z = 0$  otrzymuje się  $R'(0) = E_0 - E_\infty$ , gdzie  $E_0$  oznacza asymptotyczną zależność  $E = E(\ln \dot{\epsilon})$  przy  $\dot{\epsilon} \rightarrow \infty$ . Moduł  $E_a$  obliczono jako sieczny dla  $\epsilon_a = 0,001$  dla różnych prędkości odkształceń. Na podstawie tych danych zbudowano  $R'(z) = f(z)$ , przy czym  $E_\infty$  otrzymano z badań statycznych. Dla badanych kompozytów zależności te przedstawiono na rys.15. Doświadczalne zależności  $R' = R'(z)$  można





Rys. 14 Zależność ugięcia środka płyty od obciążenia niszczonego dla różnych prędkości obciążenia

Tablica 1.

Stałe	A	B	C
Kompozyt 1, $\varphi = 0$	9200	10,4488	0,6143325
Kompozyt 2, $\varphi = 45^\circ$	13500	24,521	0,86335
Kompozyt 3,	5500	7,3208	0,62152

aproxymować funkcją spełniającą warunki  $R'(z) = 0$  gdy  $z \rightarrow \infty$  i  $R'(z) = E_0 - E_\infty$  gdy  $z \rightarrow 0$ . Warunki te spełnia następująca funkcja [4]

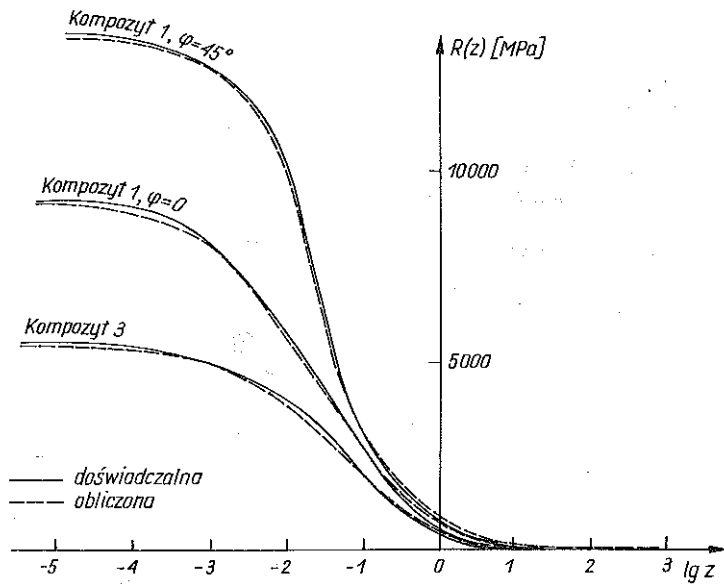
$$(5.6) \quad R'(z) = \frac{A}{1 + Bz^c},$$

w której  $A, B, C$  - stałe,  $A = R'(0)$ .

Wartości wyliczonych stałych przedstawia tablica 1.

Określona zależność  $R'(z)$  pozwala wyznaczyć z równania (5.5) widma czasów relaksacji

$$(5.7) \quad H(\tau) = \frac{ABC\tau^c}{(1 + B\tau^c)^z}$$

Rys. 15 Zależności  $R'(z)$  badanych kompozytów

Dla badanych kompozytów obliczono wartości  $H(\tau)$  z zależności (5.7), które przedstawiono na rys.16.

Uzyskane widma czasów relaksacji pozwalają określić z równania (5.1) i (5.2) własności mechaniczne badanych kompozytów w zależności od prędkości odkształcenia.

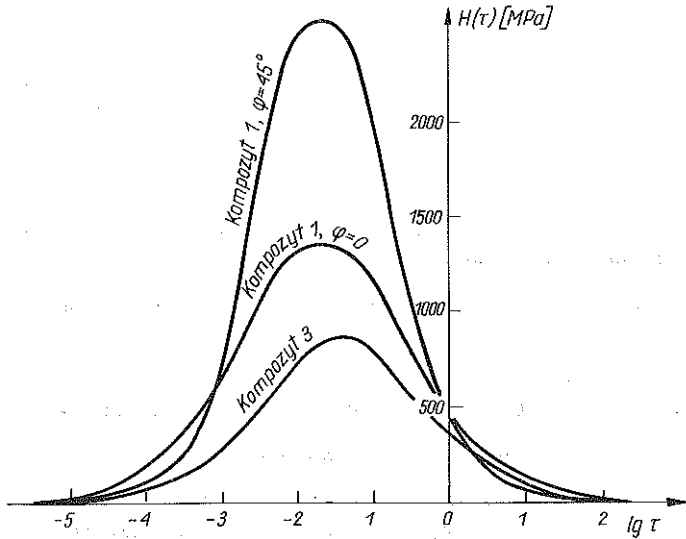
## 6. WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania potwierdziły dużą przydatność zastosowanej metody badań dynamicznej wytrzymałości z wykorzystaniem opracowanego stanowiska, która może być z powodzeniem zastosowana do badań różnych materiałów.

2. Określone wytrzymałości na rozciąganie i moduły sprężystości podłużnej, badanych kompozytów, wykazują znaczny wzrost wartości wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia.

3. Odkształcenia niszczące badanych kompozytów nieznacznie zależą od prędkości odkształcenia.

4. Przedstawiona próba matematycznego opisu własności mechanicznych z dużą dokładnością określa mechaniczne zachowanie się bada-



Rys. 16 Widma czasów relaksacji badanych kompozytów

nych kompozytów w szerokim zakresie zmiany prędkości odkształcenia. Może być także wykorzystywana dla innych rodzajów tworzyw. Wówczas w równaniu (5.7) zmienia się współczynniki określające funkcje materiałowe.

Ponieważ badania dynamicznej wytrzymałości odbywają się w krótkim czasie, realizowany jest więc proces adiabatyczny, w którym energia dysypacji zamienia się na ciepło. W rezultacie czego zaobserwowaliśmy podczas badań znaczny wzrost temperatury próbki, która jak wiadomo wywiera wpływ na własności mechaniczne tworzyw.

#### LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. B.BUĆKO, E.CEGIELSKI, *Badania własności mechanicznych PA przy udarowym rozciąganiu*, Prace Instyt. Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Polit.Krakowskiej, 1976.
2. J.GARBARSKI, J.KLEPACZKO, *Próba dynamicznego rozciągania tworzyw sztucznych*, Mech. Teoret. i Stos., 2, 1980.
3. W.DĘBSKI, *Własności mechaniczne PMMA przy zmiennych szybkościach odkształcenia przy złożonym stanie naprężenia*, Prace Polit. Poznańskiej, 1966.
4. Ц.М.Кокочвили, *Методы динамических испытаний жестких полимерных материалов*, "Зинтари", Рига 1978.

5. S. OCHELSKI, *Badania długotrwałej wytrzymałości niektórych kompozytów polimerowych w płaskim stanie naprężenia*, Biul. WAT, 3, 1986.
6. S. OCHELSKI, *Analiza pełzania nieliniowych lepkośćprężystych tworzyw aniozotropowych w złożonej historii obciążenia*, Dodatek do Biul. WAT, 4, 1977.
7. T. GRZESIKOWSKI, S. OCHELSKI, *Urządzenie do badań dynamicznych płyt*, Biul. WAT, 8, 1985.
8. R. GIELETA, S. OCHELSKI, *Próba dynamicznego rozciągania kompozytów epoksydowo-szklanych*, Biul. WAT, 4, 1987.
9. S. OCHELSKI, *Wytrzymałość kompozytów epoksydowo-szklanych w złożonych długotrwałych obciążeniach*, Rozpr. Inż., 34, 1, 1986.
10. S. OCHELSKI, J. POŁAŃSKI, *Wpływ prędkości obciążenia na powierzchnie plastyczności lepkośćprężystego tworzywa ortotropowego*, Rozpr. Inż., 33, 4, 1985.
11. А.Ц. Вольмир, *Гибкие пластинки и оболочки*, Москва 1956.
12. Ц.М. Кокосвили, В.П. Тамуж, Ю.О. Янцон, *Вычисление релаксационных спектров по результатам динамических испытаний*, *Механика Полимеров*, 2, 1971.

#### Резюме

#### ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Описан метод исследований динамического растяжения, скручивания и изгиба плит. Результаты динамических исследований механических свойств представлены в зависимости от скорости деформации. Предметом исследований являлись полимерные ортотропные и трансверсально изотропные композиты. Препринята попытка разработки механической модели, описывающей поведение исследуемых материалов.

#### SUMMARY

#### DYNAMIC STRENGTH OF POLYMER COMPOSITIES

A method of dynamic tension, torsion and bending tests of plates is proposed the results concerning dynamic mechanical properties are presented as function of the strain rates. Orthotropic and transversely isotropic polymer composities are analyzed. Attempt is made to construct a mechanical model describing the behaviour of the materials considered.

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

Praca została złożona w Redakcji dnia 14 marca 1989.