

PRÓBA DYNAMICZNEGO ROZCIĄGANIA TWORZYW SZTUCZNYCH

JACEK G A R B A R S K I, JANUSZ K L E P A C Z K O (WARSZAWA)

I. Wstęp

Własności mechaniczne tworzyw wielkocząsteczkowych odkształcanych z dużymi prędkościami stają się ostatnio obiektem coraz większego zainteresowania. Wynika to z coraz szerszego ich stosowania jako materiałów konstrukcyjnych. Jednak własności mechaniczne wspomnianych tworzyw są stosunkowo mało poznane, co prowadzi często do niepowodzeń przy ich stosowaniu. Zbadanie zachowania się tworzyw przy obciążeniach dynamicznych może być istotne nie tylko dla szerszego poznania ich własności eksploatacyjnych ale również dla zastosowania w niektórych procesach przetwórczych.

Należy dodać, że zachowanie się tworzyw przy obciążeniach dynamicznych nie może być przewidziane na podstawie prób statycznych, a to ze względu na zbliżenie się procesu odkształcania do procesu adiabatycznego, wskutek czego nie można zastosować zasady superpozycji temperaturowo-czasowej Williamsa-Landiego-Ferry'ego, oraz ze względu na zjawiska falowe, które mogą niekiedy bardzo zmieniać obserwowane zachowanie się materiału.

Standardowe próby udarowe na zginanie próbek z karbem wg Izoda lub Charpy'ego dają tylko jakościowe pojęcie o zachowaniu się materiału w warunkach obciążeń dynamicznych. Udarowe rozciąganie, przy dokładnym pomiarze procesu, stanowi stosunkowo trudny problem eksperymentalny. Jednak próba ta winna być częściej stosowana ze względu na zwiększony zakres uzyskiwanych informacji. Praca niniejsza ujmuje ten problem od strony techniki eksperymentu i dostarcza nowych danych o zachowaniu się niektórych tworzyw podczas próby szybkiego rozciągania.

Dotychczas podejmowano bardzo nieliczne próby badań tworzyw przy dynamicznym rozciąganiu. Jedną z najnowszych jest praca [1]. Przedstawiono w niej wyniki badań na dynamiczne rozciąganie dla poliamidu w zakresie prędkości odkształcenia od $23,5 \text{ s}^{-1}$ do 48 s^{-1} . Znormalizowane próbki zrywano na młocię PSWO-30 wyposażonym w dodatkowy przyrząd umożliwiający rozciąganie. Siła rozciągająca mierzona była przez czujnik piezoelektryczny, natomiast przemieszczenie kątowe bijaka mierzono przy pomocy fotokomórki. Na podstawie uzyskanych oscylogramów określono wielkości charakterystyczne dla próby rozciągania jak wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie całkowite i dynamiczny moduł Younga, podjęto także próbę określenia współczynników nieliniowych w równaniu konstytutywnym zaproponowanym przez KERIMOWA [6].

W pracy [2] zamieszczono wyniki badań własności mechanicznych polimetakrylanu metylu przy zmiennych prędkościach odkształcenia i przy złożonym stanie naprężeń.

Badania objęły prędkości odkształcenia od $1,1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ do $66,67 \text{ s}^{-1}$ przy stosowanej bazie próbki 60 mm, przy czym każda następna prędkość była dziesięciokrotnie większa od poprzedniej. Badania prowadzono w temperaturach -40° , -20° , 0° , 20° i 40°C . Badania z prędkościami od $1,1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ do $0,11 \text{ s}^{-1}$ prowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej typu kinematycznego oraz elektronicznego pomiaru siły. Badania z prędkościami od $1,11 \text{ s}^{-1}$ do $66,67 \text{ s}^{-1}$ przeprowadzono na maszynie posiadającej pneumatyczny system rozciągania i możliwość rejestrowania siły w funkcji czasu dzięki elementowi piezoelektrycznemu. Wykres rozciągania uzyskiwano fotografując ekran oscylografu katodowego. Stwierdzono, że wzrost prędkości odkształcenia wpływa na wzrost wytrzymałości badanego tworzywa, przy czym wpływ ten jest najmniejszy w temperaturze -40°C , następnie rośnie do temperatury $+40^\circ\text{C}$, aby potem znowu zmaleć. Wszystkie badane próbki pękały krucho bez tworzenia się szyjki niezależnie od prędkości odkształcenia i temperatury.

W obydwu wspomnianych wyżej pracach pominięto problem drgań układu dynamometr — próbka, który zawsze występuje przy wszelkich uderzeniach i ma ogromny wpływ na wyniki badań. Problem drgań mechanicznych w układzie pomiarowym rozważony został na przykład w pracy [3], gdzie zakłada się dwa stopnie swobody. Dynamometr i maszyna wytrzymałościowa modelowane są we wspomnianej pracy jako układ sprężysty o liniowej charakterystyce z dwoma masami. Zakłada się, że próbka odkształca się na początku sprężysto, a następnie po przekroczeniu granicy plastyczności, siła potrzebna do jej rozciągania jest stała, niższa lub równa granicy plastyczności próbki. Analiza taka umożliwia prawidłową interpretację wyników doświadczeń.

Fakt, że wyniki prób przy szybkim odkształcaniu tworzyw sztucznych mogą mieć istotne zastosowanie do przewidywania parametrów niektórych procesów technologicznych został potwierdzony między innymi w pracy [4]. W konkluzji tej pracy stwierdzono, że próby rozciągania z dużą prędkością są miarodajne dla przewidywania siły potrzebnej przy tłoczeniu na zimno ABS. Natomiast głębokość tłoczenia wykazuje ścisły związek z wydłużeniem całkowitym w jednoosiowym stanie naprężenia.

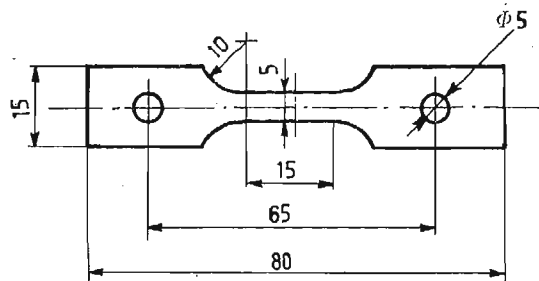
2. Budowa stanowiska badawczego

Zadaniem podjętym w niniejszej pracy jest pomiar granicy plastyczności i naprężenia plastycznego płynięcia, oraz w przypadku próbek kruchych naprężenia niszczącego, w funkcji prędkości rozciągania próbki. Przy czym dalszym krokiem jest porównanie wyników otrzymanych z prób powolnego rozciągania z próbami udarowymi.

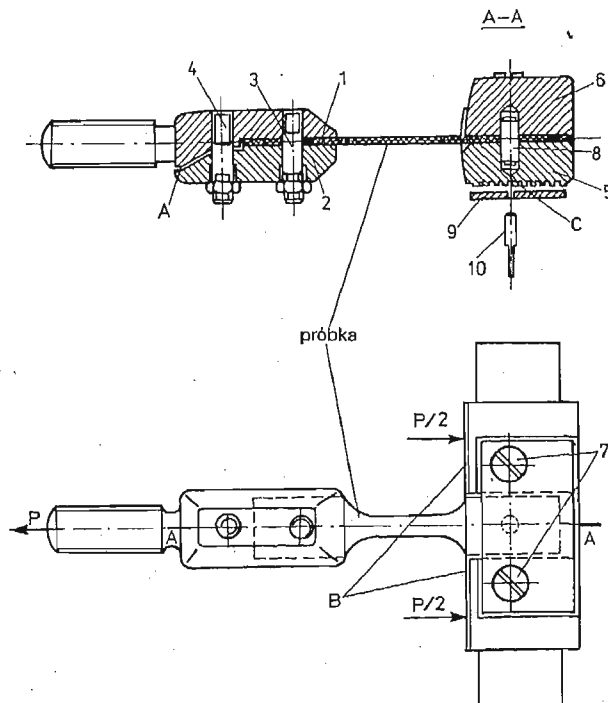
Próby rozciągania z małą prędkością odkształcania przeprowadzono na standardowej maszynie wytrzymałościowej typu kinematycznego, jednak z zastosowaniem kompletnej rejestracji wykresu siła — przemieszczenie uchwytu próbki na drodze elektronicznych pomiarów wielkości mechanicznych. Zastosowano tu specjalny dynamometr z tensometrami elektrooporowymi, mostek prądu stałego o szerokim paśmie przenoszenia ($0 \div 100 \text{ kHz}$) oraz indukcyjny czujnik przemieszczeń wraz z odpowiednim zasilaczem, a także rejestrator X—Y. Przy czym ten sam dynamometr wraz z mostkiem był również używany do pomiaru siły w funkcji czasu podczas badań dynamicznych.

Badania dynamiczne przeprowadzono na młocie wahadłowym typu PSW-30 prod. WPM — Lipsk z zastosowaniem specjalnego urządzenia skonstruowanego w Zakładzie Mechaniki Ośrodków Ciągłych Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN i będącego przedmiotem patentu PRL. Urządzenie zapewnia kompletną rejestrację w funkcji czasu przebiegu siły rozciągającej oraz przemieszczenia końca próbki z użyciem oscyloskopu i kamery Polaroid. Bardziej dokładny opis urządzenia przeznaczonego do dynamicznego rozciągania próbek metalowych dwustronnie gwintowanych zamieszczono w pracy [5].

Ze względu na to, że przystawka do młota PSW-30 umożliwiającą udarowe rozciąganie została pierwotnie zaprojektowana dla próbek metalowych z dwustronnym gwintem M12 i długości pomiarowej 50 mm, nie można było (ze względu na ograniczenia wymiarowe) do badań tworzyw zastosować standardowych próbek wiósełkowych. Projektując

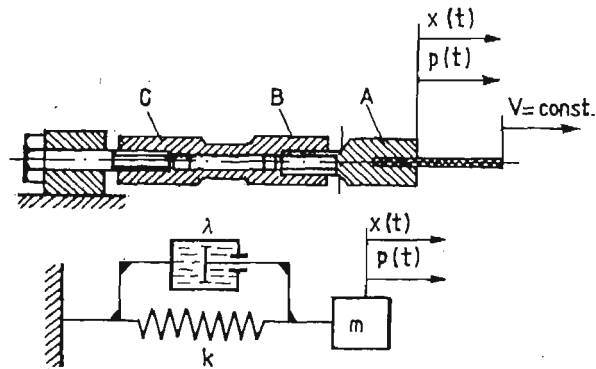


Rys. 1. Stosowana próbka płaska w badaniach statycznych i dynamicznych



Rys. 2. Uchwyt do rozciągania próbek płaskich z tworzyw sztucznych

specjalny uchwyt do próbek z tworzyw sztucznych przyjęto kształt próbki jak na Rys. 1, w związku z czym próbki mogły być frezowane z płyt o grubości od 0,8 do 3,5 mm. Budowę uchwytu przedstawia Rys. 2. Uchwyt 1 wkręcono w dynamometr identyczny jak do badań próbek metalowych. Próbka umocowana jest między moletowanymi płaszczyznami uchwytu 1 i 2 dociśniętymi do siebie śrubami 3 i 4. Śruba 3 spełnia jednocześnie rolę kołka ustalającego próbkę względem uchwytu i zabezpiecza ją dodatkowo przed wysunięciem. W związku z różną grubością stosowanych próbek powstała konieczność użycia podkładek aby uzyskać styk w punkcie A. Druga część uchwytu, zabierak przyjmujący uderzenie bijaka młota dwiema płaszczyznami B, składa się z korpusu 5 i nakładki 6 skręcanych śrubami i ustalonych względem siebie i próbki kołkiem 8. Płaszczyzny stykające się z próbką zostały również moletowane. Uchwyt 1 jest szeregowo mocowany przy pomocy połączenia gwintowego z dynamometrem (Rys. 3). Drugi koniec dynamo-



Rys. 3. Schemat uchwytu wraz z dynamometrem i model dynamiczny układu

metru jest mocowany do korpusu urządzenia. Natomiast zabierak, w który uderza dwupunktowo bijak młota jest dwustronnie suwliwie prowadzony w korpusie przyrządu. Miejsca uderzenia bijaka młota w zabierak, wraz z kierunkiem działania siły zostały oznaczone strzałkami oraz symbolem $P/2$, gdzie P oznacza siłę rozciągającą próbkę.

Ponieważ czas zerwania próbki jest stosunkowo krótki i wynosi zaledwie od jednej do kilku milisekund, system pomiaru sił winien charakteryzować się krótkim czasem reakcji na zadane wymuszenie. Tego rodzaju wymagania spełnia zastosowany dynamometr wraz z układem mostka tensometrycznego na prąd stały.

System pomiaru przemieszczeń zabieraka oparty jest zatem o zasadę modulacji częstotliwości impulsów świetlnych odbijanych od rastra C zabieraka 5 (Rys. 2). Płaszczyzna C posiada mechanicznie wykonany raster umożliwiający okresowe odbijanie światła i przez to dawanie odpowiednich impulsów do odpowiednio umieszczonej fotodiody 10. Zabierak oświetlony jest od dołu małą żarówką poprzez szczelinę w przesłonie 9, a odbijana część światła rejestrowana jest w funkcji czasu na oscyloskopie poprzez fotodiodę 10. Sygnał z fotodiody zbliżony jest do sinusoidy i zawiera zakodowane przemieszczenie zabieraka. Stąd staje się możliwa kompletna rejestracja przebiegu próby dynamicznego rozciągania przy użyciu dwustrumieniowego oscyloskopu. Na kanale pierwszym rejestruje

się siłę w funkcji czasu, a na kanale drugim zakodowane przemieszczenie. Po eliminacji czasu można otrzymać poszukiwany wykres siła-przemieszczenie, a następnie wykres naprężenie-odkształcenie.

3. Program badań

Badania objęły trzy materiały: polistyren wysokoudarowy, polichlorek winylu i poli-propylen. Z materiałów tych w postaci płyt o grubości od 2,5 do 3,2 mm frezowano próbki jak na rys. 1, które następnie przechowywano przez 7 dni przed rozpoczęciem badań w klimatyzowanym pomieszczeniu w którym odbywały się badania. Dla ustalenia poziomu odniesienia dla badań dynamicznych, wykonano najpierw próby statyczne przy rozciąganiu z prędkością odkształcenia $\dot{\epsilon} = 8,9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Rozciąganie dynamiczne przeprowadzono przy czterech założonych prędkościach dla każdego z materiałów, a dla każdej prędkości wykonano po dwie udane próby, otrzymując w sumie dwadzieścia cztery oscylogramy. Różne prędkości rozciągania uzyskano spuszczać bijak młota z określonych wysokości. Osiągnięto dzięki temu prędkości uderzenia v : $6,5 \text{ ms}^{-1}$, 5 ms^{-1} , $3,5 \text{ ms}^{-1}$ i $1,65 \text{ ms}^{-1}$, co dla założonej bazy próbki $l_0 = 15,5 \text{ mm}$ odpowiada prędkościom odkształcenia $\dot{\epsilon} = 419 \text{ s}^{-1}$, $332,5 \text{ s}^{-1}$, $225,8 \text{ s}^{-1}$ i $106,45 \text{ s}^{-1}$.

4. Analiza układu dynamometr—próbka—zabierak

Dokładniejsze wyznaczenie granicy plastyczności lub wartości naprężenia niszczącego można osiągnąć przeprowadzając analizę przyjętego w obecnej pracy modelu układu drgającego z jednym stopniem swobody i tłumieniem, który jest zbliżony do rzeczywistego układu dynamometr — próbka — uchwyty. Przyjęty model został przedstawiony na rys. 3. Analiza taka pozwala na ustalenie wpływu drgań, w które rzeczywisty układ zostaje wprowadzony podczas uderzenia bijaka młota. Wychodząc z założenia, że dynamometr i uchwyt z próbką są układem drgającym z jednym stopniem swobody, ogólne równanie ruchu układu, tj. zredukowanej masy skupionej drgającej na nieważkiej sprężynie można napisać następująco:

$$(1) \quad m\ddot{x} + \lambda\dot{x} + kx = P(t),$$

gdzie:

m — zastępcza masa drgająca

λ — współczynnik tłumienia proporcjonalny do logarytmicznego dekrementu tłumienia

k — sztywność sprężyny

$P(t)$ — impuls wymuszający

Zastępczą masę drgającą obliczono sumując masę uchwyty A, masę części B dynamometru oraz jedną trzecią masy części C dynamometru. Parametry λ i k wyliczono na podstawie otrzymanych oscylogramów (równania 27 i 28). Ponadto zakłada się, że energia zużyta do zniszczenia próbki jest pomijalna w porównaniu z energią kinetyczną bijaka, oraz że przemieszczenie środka masy $x(t)$ jest pomijalne w porównaniu z wydłużeniem próbki Δl . Zakłada się również, że próbka odkształca się ze stałą prędkością, a siła potrzebna

do jej rozciągania, która zmienia się w funkcji czasu, jest impulsem wywołującym drgania. Ponieważ otrzymany oscylogram jest odpowiedzią układu, tj. oscylacjami nałożonymi na krzywą rozciągania próbki, chcąc otrzymać impuls wymuszający, czyli wykres rozciągania próbki, należy znaleźć rozwiązanie równania (1) dla żadanego impulsu, a następnie porównać otrzymane rozwiązanie z wynikiem doświadczalnym (oscylogramem).

Równanie (1) można przepisać w formie

$$(2) \quad \ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = N(t),$$

gdzie

$$2n = \frac{\lambda}{m}; \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m}; \quad N(t) = \frac{P(t)}{m}$$

Przykładowe rozwiązanie tego równania dla impulsu osiągającego skokowo w czasie równym zero pewną wartość i utrzymującego się dalej na tym poziomie, będzie miało postać, tzn. impuls wymuszający $N(t) = N_0 = \text{const}$, albo $P(t) = P_0 = \text{const}$.

$$(3) \quad x(t) = \frac{N_0}{\omega_0^2} \left[1 - e^{-nt} \frac{n}{\omega} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{n} \cos \omega t \right) \right].$$

Rozpatrując siłę $P(t) = x(t) \cdot k$ zamiast przesunięcia otrzymuje się:

$$(4) \quad P(t) = P_0 \left[1 - e^{-nt} \frac{n}{\omega} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{n} \cos \omega t \right) \right]$$

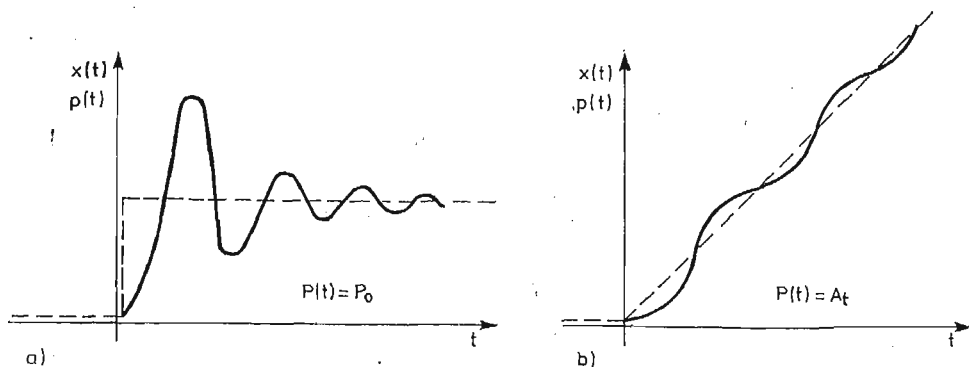
gdzie $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - n^2}$; jest to przypadek małego tłumienia tzn., że $\omega_0 > n$. Rozwiązanie to otrzymano metodą uzmienniania stałych. Tą samą metodą otrzymano rozwiązanie dla impulsu liniowo narastającego w czasie: $N(t) = N \cdot t$ albo $P(t) = P \cdot t$

$$(5) \quad x(t) = \frac{N}{\omega_0^2 \omega} \left[\omega t - \frac{2n\omega}{\omega_0^2} + \frac{e^{-nt}(\omega_0^2 - 2n^2)}{\omega_0^2} \left(\frac{2n\omega}{\omega_0^2 - 2n^2} \cos \omega t - \sin \omega t \right) \right],$$

lub dla siły $P(t) = k \cdot x(t)$

$$(6) \quad P(t) = P \left[t - \frac{2n}{\omega_0^2} + \frac{e^{-nt}(\omega_0^2 - 2n^2)}{\omega_0^2 \omega} \left(\frac{2n\omega}{\omega_0^2 - 2n^2} \cos \omega t - \sin \omega t \right) \right].$$

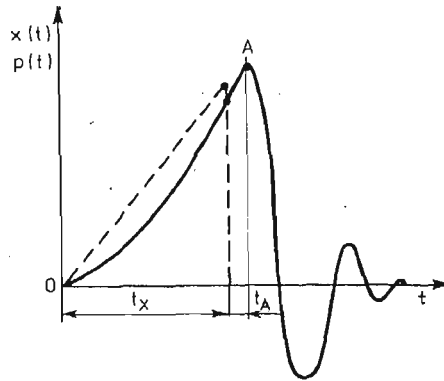
Rys. 4. Przedstawia podane wyżej typy impulsów i odpowiedzi układu.



Rys. 4. Odpowiedzi układu na: a) impuls stały, b) impuls liniowo narastający w czasie

Żaden z wymienionych impulsów wymuszających nie stanowi sam w sobie dobrej aproksymacji wykresu rozciągania. Jedynie impuls liniowo narastający dość dobrze przybliża zachowanie się materiału sprężysto-kruchego. Jednak nawet dla takiego przypadku przy dokładnej analizie oscylogramu należy uwzględnić bezwładność mas połączonych z dynamometrem i związane z tym zjawiska.

Rozważmy co się dzieje z układem drgającym przed i po zerwaniu próbki (Rys. 5). Przed zerwaniem podczas procesu obciążania, na skutek bezwładności, odpowiedź układu



Rys. 5. Impuls wymuszający i odpowiedź układu dla materiałów kruchych

opóźnia się w stosunku do impulsu wymuszającego. Po zerwaniu tj. po czasie t_x , dynamometr rejestruje dalszy wzrost siły aż do zatrzymywania się rozprędzonej masy co następuje po czasie t_A licząc od momentu zerwania. W punkcie A odpowiadającym temu czasowi siła osiąga maksimum, po czym gwałtownie spada i następują tłumione drgania swobodne układu wokół położenia $P = 0$. Chcąc więc analizować oscylogram z zarejestrowaną odpowiedzią dla materiału sprężysto-kruchego, należy rozważyć dwie fazy, a więc fazę przed i po zerwaniu. Do analizy pierwszej fazy można posłużyć się równaniem (5) lub (6). Natomiast druga faza, to drgania swobodne dla warunków początkowych nie równych zero. Warunkami tymi są konkretne przesunięcie i prędkość w momencie zerwania t_x czyli $x(t_x) = s_x$ i $\dot{x}(t_x) = v_x$

$$(7) \quad \dot{x}(t_x) = \frac{N}{\omega_0^2 \omega} \left[\omega - e^{-n t_x} \cdot n \left(\sin \omega t_x + \frac{\omega}{n} \cos \omega t_x \right) \right].$$

Warunki te wejdą do równania ruchu przy uzmiennianiu stałych. Dla drgań swobodnych równanie (1) przyjmuje postać

$$(8) \quad m\ddot{x} + \lambda\dot{x} + kx = 0,$$

albo

$$(9) \quad \ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = 0.$$

co daje rozwiązanie ogólne:

$$(10) \quad x(t) = e^{-nt} (A \cdot \cos \omega t + B \sin \omega t),$$

gdzie A i B oznaczają stałe.

Różniczkując równanie (10) stronami otrzymuje się:

$$(11) \quad \dot{x}(t) = e^{-nt}(nB + \omega A) \left(\frac{\omega B - nA}{nB + \omega A} \cos \omega t - \sin \omega t \right).$$

Jeśli w punkcie t_x przyjąć początek nowej skali czasu to można napisać:

$$(12) \quad x(0) = S$$

$$(13) \quad \dot{x}(0) = v,$$

co stanowi układ dwóch równań z niewiadomymi A i B.

Po rozwiązaniu otrzymuje się

$$(14) \quad A = S,$$

oraz

$$(15) \quad B = \frac{v + ns}{\omega}$$

Wstawiając zależności (14) i (15) do równania (10) otrzymuje się ostatecznie:

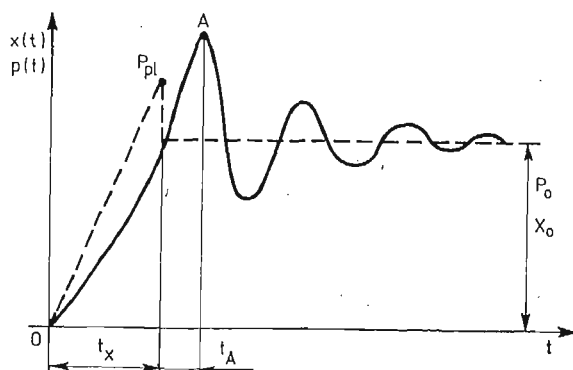
$$(16) \quad x(t) = \frac{e^{-nt}(v + ns)}{\omega} \left[\frac{\omega S}{v + ns} \cos \omega t + \sin \omega t \right].$$

Można stąd również obliczyć czas t_A wychodząc z założenia, że w tym momencie prędkość $\dot{x} = 0$. Różniczkując równanie (16) i przyrównując do zera tj. $x(t) = 0$, otrzymuje się ostatecznie:

$$(17) \quad 0 = e^{-nt_A} \left[\frac{n(v + ns)}{\omega} + \omega S \right] \left[\frac{v}{(v + ns)n + \omega S} \cos \omega t_A + \sin \omega t_A \right],$$

oraz

$$(18) \quad t_A = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{v}{(v + ns)n + \omega S} \right]^2}}$$



Rys. 6. Impuls wymuszający i odpowiedź układu dla materiału z fizyczną granicą plastyczności

Opisana metoda obliczania odpowiedzi układu na zadany impuls, uwzględniająca dwie fazy procesu rozciągania została nazwana metodą łączenia rozwiązań, w tym przypadku w punkcie odpowiadającym czasowi t_x . Pokazano ją dla najprostszego przypadku drugiej fazy tj. dla drgań swobodnych po zerwaniu gdy $P = 0$.

Z badań statycznych wynika, że dobrym przybliżeniem dynamicznej krzywej rozciągania byłby impuls o kształcie pokazanym na rys. 6. Jest to impuls narastający liniowo do chwili t_x , a następnie utrzymujący wartość stałą P_0 , w ogólnym przypadku różną od P_{pl} tj. siły odpowiadającej górnej granicy plastyczności. Metoda postępowania prowadząca do otrzymania odpowiedzi układu jest identyczna. W pierwszej fazie, do osiągnięcia czasu t_x , posługujemy się równaniem (5) lub (6). Dla czasu t_x obliczamy $x(t_x) = S_x$ i $\dot{x}(t_x) = v_x$ z równań (5) i (7). Są to warunki początkowe dla uzmiennienia stałych w równaniu ruchu dla drugiej fazy opisanej równaniem:

$$(19) \quad m\ddot{x} + \lambda\dot{x} + kx = P_0.$$

Postępując podobnie jak w wypadku poprzednim otrzymuje się rozwiązanie dla drgań po zerwaniu:

$$(20) \quad x(t) = \frac{N}{\omega_0^2} \left[1 + \sin \omega t \cdot \frac{e^{-nt}}{\omega} \left(\frac{\omega_0^2}{N} (v + ns) - n \right) + \cos \omega t \cdot e^{-nt} \left(\frac{\omega_0^2}{N} \cdot s - 1 \right) \right],$$

lub dla przypadku siły

$$(21) \quad P(t) = P_0 \left[1 + \sin \omega t \cdot \frac{e^{-nt}}{\omega} \left(\frac{k}{P_0} (v + ns) - n \right) + \cos \omega t \cdot e^{-nt} \left(\frac{k}{P_0} S - 1 \right) \right].$$

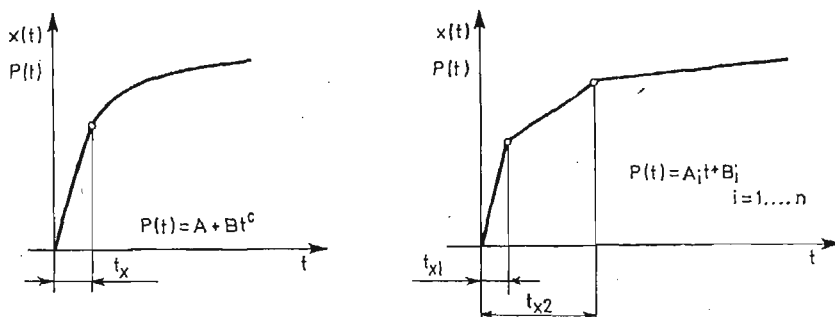
Ze zróżniczkowanego równania (20), które następnie przyrównuje się do zera można otrzymać czas t_A , który wynosi:

$$(22) \quad t_A = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + M^2}},$$

gdzie

$$M = \frac{\frac{P_0}{m} - n(v + ns) - s\omega^2}{\omega \cdot v}.$$

Posługując się podaną wyżej metodą łączenia rozwiązań można otrzymać rozwiązanie dla dowolnego impulsu drugiej fazy. Rys. 7a jest przykładem takiego impulsu o równaniu



Rys. 7. a) Impuls drugiej fazy typu $P(t) = A + Bt^c$, b) Impuls drugiej fazy typu $P(t) = At + B$

$P(t) = A + B \cdot t^c$, natomiast Rys. 7b przedstawia połączone ze sobą impulsy liniowe typu $P(t) = At + B$. Złożoność rozwiązania analitycznego powoduje jednak, że impulsy tego typu, jakkolwiek dobrze odpowiadające krzywym rozciągania, są zbyt pracochłonne do analizy. I tak np. dla impulsu $P(t) = At + B$ połączonego z impulsem narastającym w punkcie t_x rozwiązanie ma postać

$$(23) \quad x(t) = \frac{1}{\omega_0} \left\{ \omega(ct + \alpha) - \frac{2n\omega c}{\omega_0^2} + e^{-nt} \cdot Q[P \cdot \cos\omega t + \sin\omega t] \right\},$$

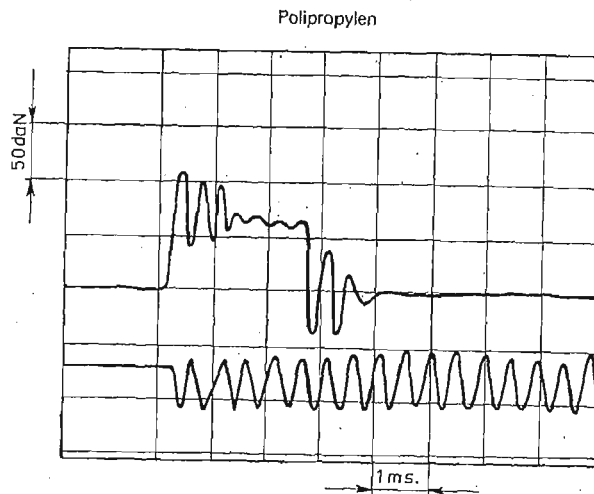
$$\text{gdzie } c = \frac{A}{m}; \quad d = \frac{B}{m}; \quad Q = \frac{(v + ns)\omega_0^4 - dn\omega_0^2 - c(\omega_0^2 - 2n^2)}{\omega_0^2};$$

$$P = \frac{2\omega nc - d\omega_0^2\omega + s\omega\omega_0^4}{(v + ns)\omega_0^4 - dn\omega_0^2 - c(\omega_0^2 - 2n^2)}$$

Przedstawione przykłady analizy układu umożliwiają bardziej dokładną ocenę zachowania się próbki w procesie udarowego rozciągania i tym samym bardziej dokładne wyznaczanie odpowiednich naprężeń.

5. Opracowanie wyników

Przy użyciu urządzenia do dynamicznego rozciągania otrzymuje się oscylogramy o charakterze jak przedstawiony na rys. 8. Pomiary oscylogramów przeprowadzono przy pomocy mikroskopu pomiarowego z elektronicznym odczytem współrzędnych



Rys. 8. Oscylogram z dynamicznej próby rozciągania polipropylenu na podstawie którego opracowano rys. 9

$X-Y$ oraz drukarki. Pomiary należy przeprowadzać dla możliwie jak największej liczby punktów leżących na krzywej $P(t)$. Na podstawie dokonanego przed pomiarem zasadniczym wzorcowania mikroskopu można przeliczyć wartości napięć elektrycznych na siłę w N i czas w ms. Z dalszego przebiegu sygnału z fotodiody, który stanowi zakodowane

przemieszczenie zabieraka próbki w funkcji czasu, wywnioskować można o prędkości rozciągania gdyż wiadomo, że odległość między sąsiednimi maksimami o jednakowym znaku odpowiada przemieszczeniu jednego milimetra; jest to podziałka nacięcia rastra. W efekcie analizy pomiarów na mikroskopie uzyskuje się ostatecznie odwzorowany oscylogram we współrzędnych $P-t$ oraz przemieszczenie $\Delta l(t)$, a stąd prędkość odkształcenia $\dot{\epsilon}(t)$.

Chcąc następnie dopasować rozwiązanie analityczne do otrzymanego wyniku doświadczalnego według metody podanej poprzednio, należy określić parametry układu drgającego występujące w równaniu (1), tzn. zredukowaną masę, współczynnik tłumienia oraz sztywność układu. Masę zredukowaną określono sumując odpowiednie masy elementów drgających z rys. 3, wyniosła ona $m = 0,1861$ kg. Pozostałe parametry są różne dla każdego z badanych materiałów. Określano je indywidualnie na podstawie otrzymanych oscylogramów. Okres drgań T obliczano jako średnią ze wszystkich prób dla danego materiału. Na tej podstawie można następnie określić częstotliwość kołową:

$$(24) \quad \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Dekrement tłumienia n obliczano biorąc średnią stosunków następujących po sobie amplitud:

$$(25) \quad n = \frac{1}{T} \ln \frac{P(t)}{P(t+T)}.$$

Znalezienie wartości powyższych parametrów pozwala na obliczenie pozostałych ze wzorów:

$$(26) \quad \omega_0^2 = \sqrt{\omega^2 + n^2},$$

$$(27) \quad \lambda = 2mn,$$

$$(28) \quad k = m\omega_0^2.$$

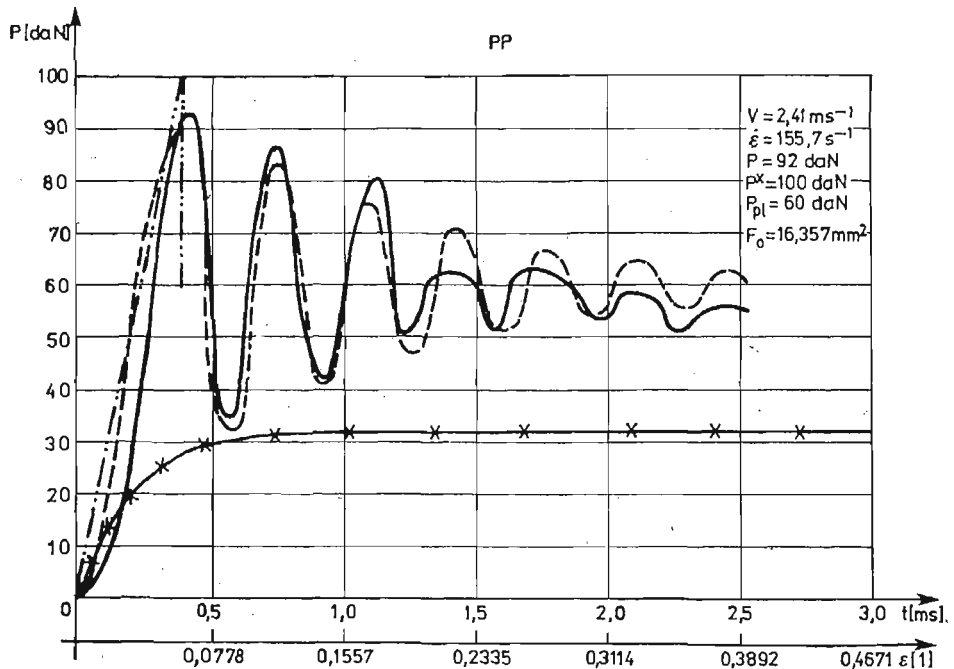
W Tabelcy I zestawiono obliczone w ten sposób parametry dla trzech badanych tworzyw.

Tabelca I—Parametry układu drgającego dynamometr—uchwyty—próbka

	T (ms)	ω (s ⁻¹)	n (s ⁻¹)	ω_0 (s ⁻¹)	λ (kg s ⁻¹)	k (kg s ⁻²)
Polistyren udarowy	0,3420	18 362	4645,5	18 940	1728,1	66 744 666
Polichlorek winylu	0,4540	13 849	1150,7	13 901,7	428,1	35 984 875
Polipropylen	0,3400	18 453	1068,8	18 983,7	397,6	63 547 193

Następnie mając wyznaczone parametry układu drgającego można przystąpić do obliczania jego odpowiedzi na zadany impuls składający się z dwóch faz, a mianowicie liniowego narastania siły, a następnie jej spadku do zera lub utrzymywania się na stałym poziomie w zależności od tego czy materiał pęka krucho czy też tworzy się sztywna po przekroczeniu granicy plastyczności. Należy pamiętać, że w przypadku tworzyw sztucznych sztywna stabilizuje proces odkształcania.

Analizę numeryczną rozpoczyna się od dobrania odpowiedniego współczynnika narastania impulsu oraz od ustalenia czasu t_x . Dokonuje się tego na drodze numerycznej poprzez kolejne przybliżenia. Dalej wyznacza się odpowiednie parametry brzegowe wymagane do połączenia w chwili t_x odpowiedzi na dwa kolejne impulsy, tak jak to przedyskutowano poprzednio. Przebiegi tego rodzaju obliczano na mikrokomputerze Tektronix (Tek 31) wyposażonym dodatkowo w plotter. Po uzyskaniu wystarczającej zgodności danych eksperymentalnych z wynikami obliczeń numerycznych, można traktować impuls wymuszający jako uproszczony kształt krzywej rozciągania w układzie siła — czas. Na tej podstawie można dalej sporządzić wykres siły, a następnie naprężenia niszczącego



Rys. 9. Wynik dynamicznego rozciągania polipropylenu dla $V = 2,41 \text{ ms}^{-1}$: — krzywa eksperymentalna — tj. zmierzony oscylogram, ---- odpowiedź układu obliczona analitycznie, -.-.- impuls wymuszający * - - - - * krzywa rozciągania statycznego

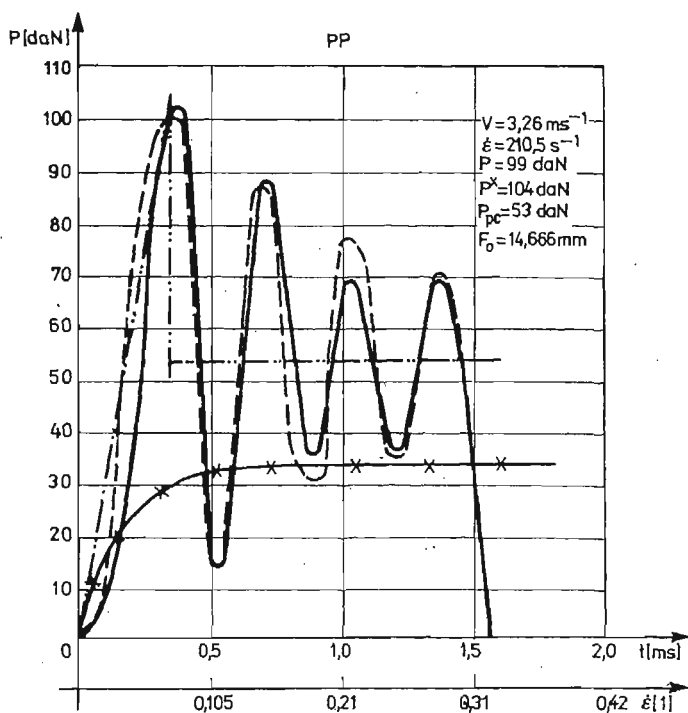
lub naprężenia będącego granicą plastyczności w funkcji prędkości rozciągania. Na rys. 9 pokazano opracowany w ten sposób oscylogram z rys. 8, uzyskany z dynamicznej próby rozciągania próbki wykonanej z polipropylenu.

6. Omówienie wyników

Wszystkie trzy tworzywa (PSW, PCW, PP) badane w zakresie małych prędkości rozciągania $1 \text{ ms}^{-1} \leq v \leq 5 \text{ ms}^{-1}$, co odpowiada zakresowi prędkości odkształcenia $70 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 330 \text{ s}^{-1}$, zachowują się jak materiały plastyczne znajdujące się w stanie twardym ciągliwym. Dla tworzyw sztucznych stan ten znajduje się pomiędzy temperaturą

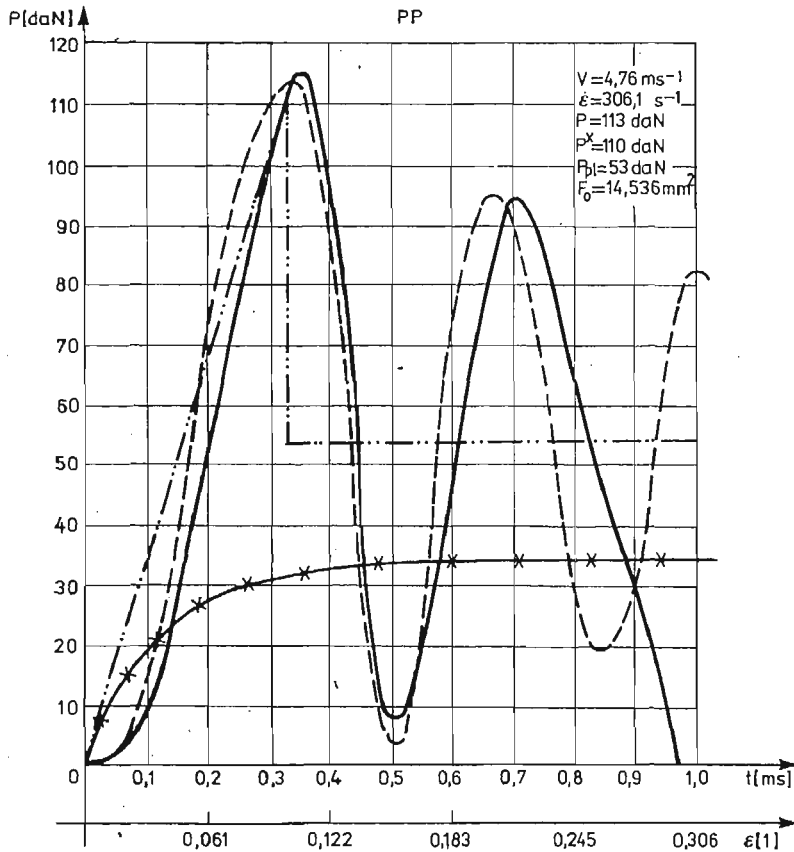
kruchości a rekryształacji i charakteryzuje się wyraźną granicą plastyczności. Do osiągnięcia granicy plastyczności materiał odkształca się jednorodnie w całej objętości, a po jej przekroczeniu tworzy się lokalne przewężenie, co powoduje pewien spadek siły rozciągającej. Następujące w wyniku powstania szyjki lokalne umocnienie materiału jest tak duże, że kompensuje lokalne zmniejszenie się przekroju do tego stopnia, że przekrój ten może przenosić większe obciążenie niż sąsiadujący z nim materiał. W efekcie następuje propagacja przewężenia, co odbywa się przy stałej sile mniejszej od granicy plastyczności. Rys. 9 przedstawia, jak wspomniano poprzednio, wynik rozciągania polipropylenu z prędkością $\dot{\epsilon} = 155,7 \text{ s}^{-1}$. Znaczenie poszczególnych rodzajów linii na tym, jak i na dalszych rysunkach jest jednakowe: linia ciągła — krzywa eksperymentalna uzyskana na podstawie pomiaru oscylogramu; linia kreska — dwie kropki — kreska — oznacza impuls wymuszający, innymi słowy jest to przybliżona krzywa materiałowa; linia przerywana — obliczona analitycznie odpowiedź układu na zadany impuls; linia z krzyżykami — krzywa powolnego rozciągania. Należy zaznaczyć, że podziałka odkształceń jest wspólna zarówno dla krzywej statycznej jak i dynamicznej, zaś podziałka czasu odpowiada tylko krzywej dynamicznej. Obliczona analitycznie odpowiedź układu powinna jak najściślej pokrywać się z krzywą eksperymentalną. Należy opk określić dobrą zgodność analitycznie obliczonej odpowiedzi układu z wynikiem pomiaru oscylogramu.

Zwiększanie prędkości odkształcenia powoduje przesuwanie się stanu materiału w kierunku kruchości. I tak np. krzywe rozciągania dla polipropylenu uzyskane przy prędkościach odkształcenia $\dot{\epsilon} = 210,5 \text{ s}^{-1}$ i $\dot{\epsilon} = 306,1 \text{ s}^{-1}$ przedstawiają rys. 10 i rys. 11. Przy



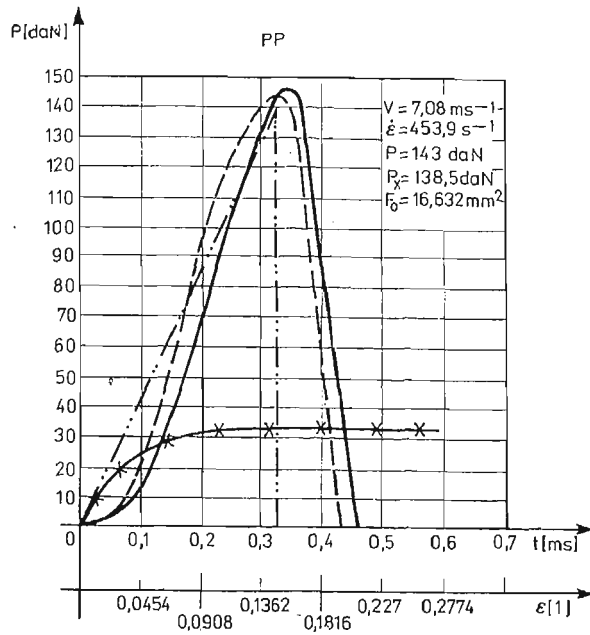
Rys. 10. Wynik dynamicznego rozciągania polipropylenu dla $V = 3,26 \text{ ms}^{-1}$

tych prędkościach odkształcenia materiał jest jeszcze plastyczny. Natomiast zastosowanie prędkości $\dot{\epsilon} = 453,9 \text{ s}^{-1}$ Rys. 12 sprawia, że materiał ulega zerwaniu bez przejścia w stan plastyczny. Z tego wypływa wniosek, że dla temperatury pokojowej w zakresie prędkości $306,1 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 453,9 \text{ s}^{-1}$ zachodzi przemiana krucho-ciągła tego materiału. Jak już

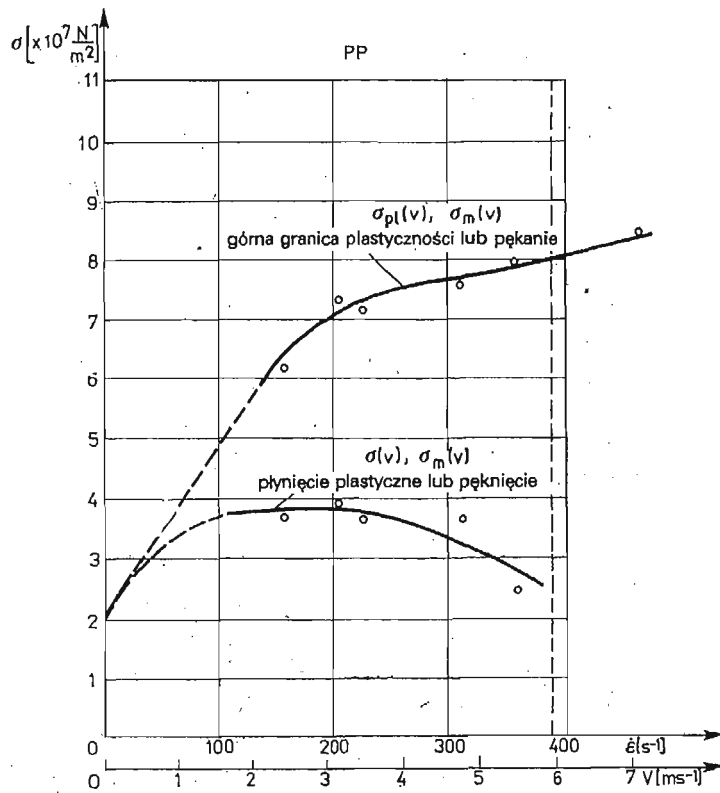


Rys. 11. Wynik dynamicznego rozciągania polipropylenu dla $V = 4,76 \text{ ms}^{-1}$

wspomniano poprzednio, na podstawie otrzymanych przybliżonych krzywych rozciągania można wykonać wykresy skorygowanej górnej granicy plastyczności i naprężenia płynięcia lub naprężenia pęknięcia w funkcji prędkości odkształcenia. Takie wykresy wykonane dla polipropylenu przedstawia rys. 13. Widać z nich, że granica plastyczności rośnie wraz ze zwiększaniem się prędkości odkształcenia, natomiast naprężenie płynięcia wykazuje tendencję malejącą. Pionowa linia przerywana odpowiada hipotetycznej prędkości przemiany krucho-ciągłej. Aby wyjaśnić takie przebiegi krzywych, rozważmy stan fizyczny badanego tworzywa odpowiadający temperaturze pokojowej, czyli stan twardy ciągliwy zwany też stanem twardym wymuszonej elastyczności. Tworzywa nieusieciowane poniżej temperatury kruchości mogą odkształcać się tylko sprężysto z zachowaniem liniowości lub nieliniowo, co jest związane ze zmianą kąta walencyjnego między atomami.



Rys. 12. Wynik dynamicznego rozciągania polipropylenu dla $V = 7,08 \text{ ms}^{-1}$



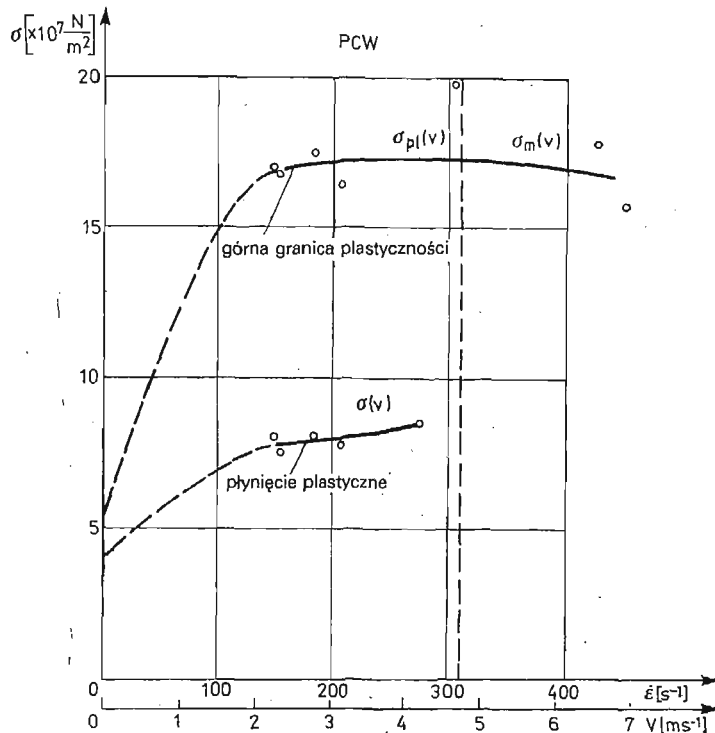
Rys. 13. Rezultaty badań polipropylenu — PP, krzywa górna stanowi zmianę górnej granicy plastyczności lub pęknięcie, krzywa dolna przedstawia zmiany naprężenia płynięcia

Powyżej zaś temperatury rekryształizacji występuje stan elastyczny charakteryzujący się odkształceniami lepkosprężystymi, zwanymi też sprężystymi opóźnionymi. Odkształcenia te zachodzą dzięki prostowaniu się makrocząsteczek na skutek obrotu merów względem siebie bez zmiany kąta walencyjnego. Odkształcenia tego typu ilustruje dobrze model Kelvina. Stan, w którym znajduje się polipropylen w temperaturze pokojowej jest stanem pośrednim pomiędzy dwoma stanami wymienionymi. Stosując względnie małe prędkości odkształcenia można wymusić tu odkształcenia lepkosprężyste. W wyniku lokalnego nagrzania się materiału na skutek dysypacji energii można osiągnąć temperaturę, w której makrocząsteczki mogą się prostować, a więc układać równoległe do siebie wywołując większe umocnienie materiału w kierunku rozciągania.

Jak zostało powiedziane wyżej odkształcenia tego typu to odkształcenia lepkosprężyste wynikające z prostowania się makrocząsteczek, a więc powrotne. Trwałość odkształcenia występuje dzięki następującemu natychmiast po procesie odkształcenia ochłodzeniu się materiału. Wystarczy jednak odkształcony w ten sposób materiał ogrzać o kilkadziesiąt stopni, a nastąpi nawrót odkształceń. Innymi słowy nie są to odkształcenia trwałe, a zamrożone lepkosprężyste lub wymuszone sprężyste, stąd bardziej uzasadnione wydaje się użycie określenia „granica wymuszonej sprężystości” niż „granica plastyczności”. Sprężystość niewymuszona ma miejsce powyżej temperatury rekryształizacji. Tutaj wymuszamy ją przez oddziaływanie mechaniczne. Należy pamiętać, że naprawdę trwałe odkształcenia tworzyw mają miejsce powyżej temperatury płynięcia, kiedy przesuwają się względem siebie całe makrocząsteczki, a nie tylko ich segmenty. Wracając do płynięcia na zimno polipropylenu należy zauważyć, że inicjacja i propagacja przewężenia, to fizycznie dwa różne procesy, przy czym pierwszy z nich bierze początek na skutek lokalnej wady materiałowej, np. mniejszego efektywnego przekroju próbki, gdzie naprężenia rzeczywiste zostają spiętrzone, co prowadzi na początku procesu odkształcania do lokalnego odkształcenia się próbki. Propagacja zaś przewężenia związana jest z tak zwanym mięknięciem odkształceniowym, co z kolei jest wynikiem przepływu ciepła z odkształcanej części materiału próbki do części nieodkształconej. Należy tu zwrócić uwagę na pewną różnicę w porównaniu z płynięciem plastycznym metali, niezależnie od faktu, że dla tworzyw nie są to odkształcenia plastyczne. Metale odkształcają się w zasadzie jednorodnie w całej objętości. Poza tym utworzenie się przewężenia oznacza utratę stateczności procesu, tutaj powoduje stabilizację. Wychodząc ze wspomnianego założenia, że inicjacja i propagacja przewężenia są niezależnymi od siebie procesami można próbować wyjaśnić charakter przebiegu krzywych odpowiednich naprężeń σ_{pl} , σ , σ_m , w funkcji prędkości odkształcenia gdzie σ_{pl} oznacza górną granicę plastyczności, σ jest naprężeniem plastycznego płynięcia, a σ_m naprężeniem niszczącym. Zmniejszenie się naprężenia płynięcia na zimno tłumaczyć można w oparciu o przepływ ciepła w próbce podczas odkształcania. Ponieważ, jak już wspomniano, płynięcie na zimno spowodowane jest przepływem ciepła z części odkształconej do nieodkształconej, to zwiększanie prędkości odkształcenia spowoduje mniejsze jego rozproszenie, co z kolei ze względu na zachowanie bilansu cieplnego prowadzi będzie do większego nagrzania części odkształconej. Im większa prędkość odkształcania tym bardziej proces zbliża się do adiabatycznego i tym bardziej wzrasta efektywna temperatura, przy której ma miejsce płynięcie na zimno. Przy mniejszych natomiast prędkościach odkształcenia generowane ciepło będzie rozpra-

szane w otaczającej atmosferze dostatecznie szybko aby wzrost temperatury był mniejszy. Spowolnienie odkształcenia przesuwa proces w kierunku procesu izotermicznego. Potwierdzenie przytoczonego wyводу znaleźć można w pracy (7) dla próby powolnego rozciągania z różnymi prędkościami.

Z rys. 13 wynika również, że zwiększenie prędkości odkształcania powoduje wzrost górnej granicy plastyczności. Odkształcenia poprzedzające inicjację przewężenia, co odpowiada osiągnięciu górnej granicy plastyczności są w głównej mierze sprężyste, a więc nie rozpraszające energii. To tłumaczyłoby dlaczego nie następuje spadek obserwowanej granicy plastyczności. Jej wzrost wyjaśnić można na gruncie zasady superpozycji temperaturowo-czasowej. Wzrost naprężeń potrzebnych do inicjacji przewężenia przy zwiększeniu prędkości odkształcania jest równy przyrostowi jaki nastąpiłby przy odpowiednim obniżeniu temperatury, a więc przy przesuwaniu się stanu tworzywa w kierunku kruchości. Wydaje się więc słuszne, że dla zwiększającej się prędkości odkształcania górna granica



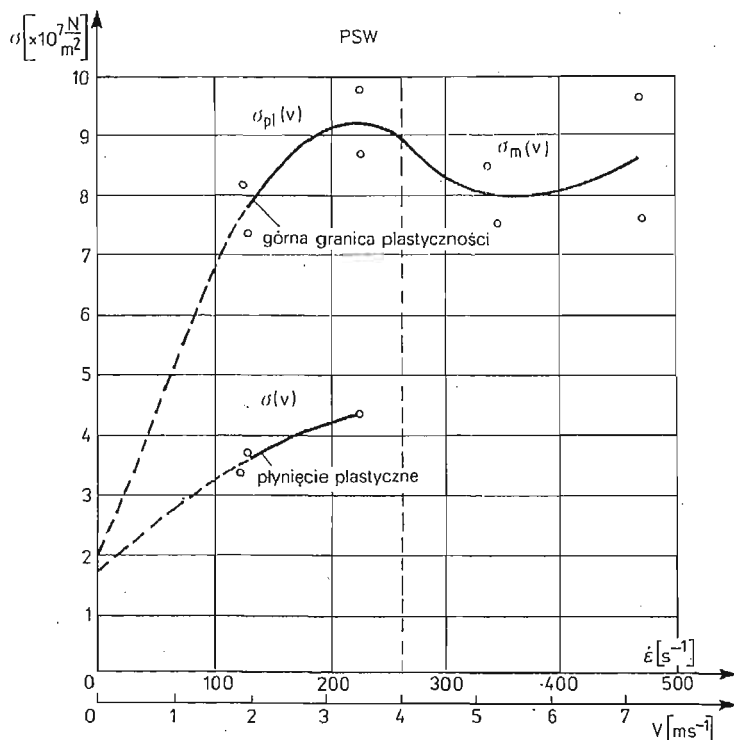
Rys. 14. Rezultaty badań polichloroku winylu — PCW

plastyczności powinna rosnać, natomiast naprężenie płynięcia na zimno maleć. Potwierdzają to uzyskane wyniki dla polipropylenu.

Natomiast w przypadku PCW i PSW przebiegi są nieco inne od oczekiwanych. Wyniki badań dla tych dwóch tworzyw zamieszczono na rys. 14 i rys. 15. Opracowane oscylogramy dla skrajnych prędkości przy dynamicznym rozciąganiu tworzyw PCW i PSW przed-

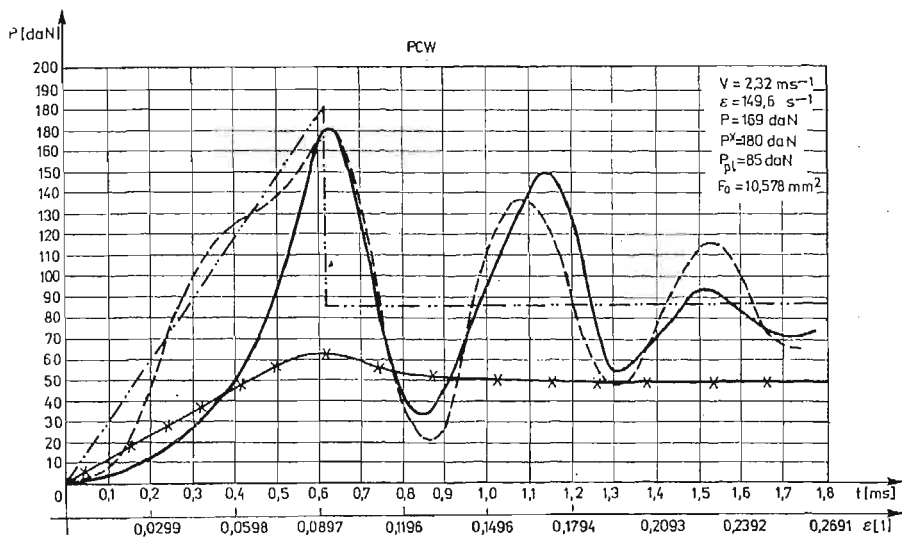
stawiono na rys. 16 i rys. 17 — PCW oraz rys. 18 i rys. 19 — PSW. W każdym z obydwu przypadków występuje duża różnica pomiędzy górną granicą plastyczności i naprężeniem płynięcia na zimno, o wiele większa niż dla warunków rozciągania statycznego. Dla polipropylenu na przykład, przy rozciąganiu statycznym różnica ta praktycznie nie istnieje, natomiast dla polistyrenu wysokociśnieniowego jest bardzo niewielka.

Po przekroczeniu krytycznej prędkości odkształcenia, zaznaczonej na rys. 13, 14 i 15 pionową linią przerywaną, materiał nie płynie na zimno. Próbką ulega zniszczeniu

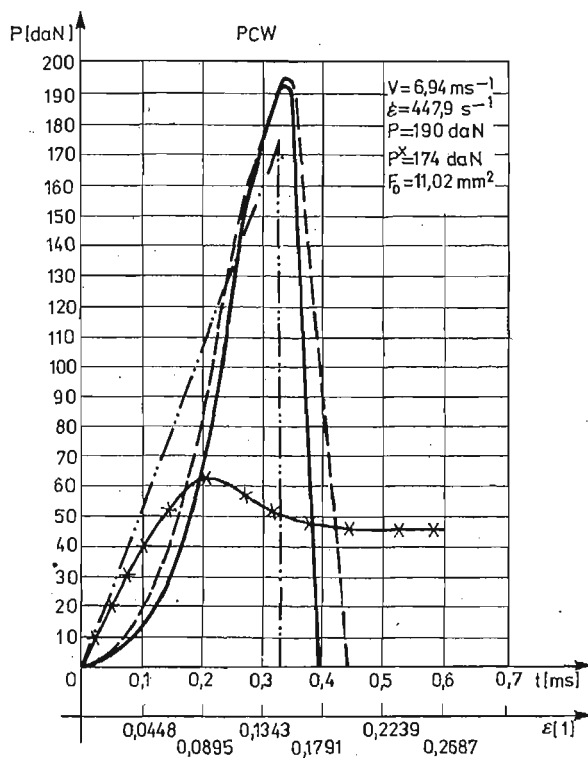


Rys. 15. Rezultaty badań polistyrenu wysokoudarowego — PSW

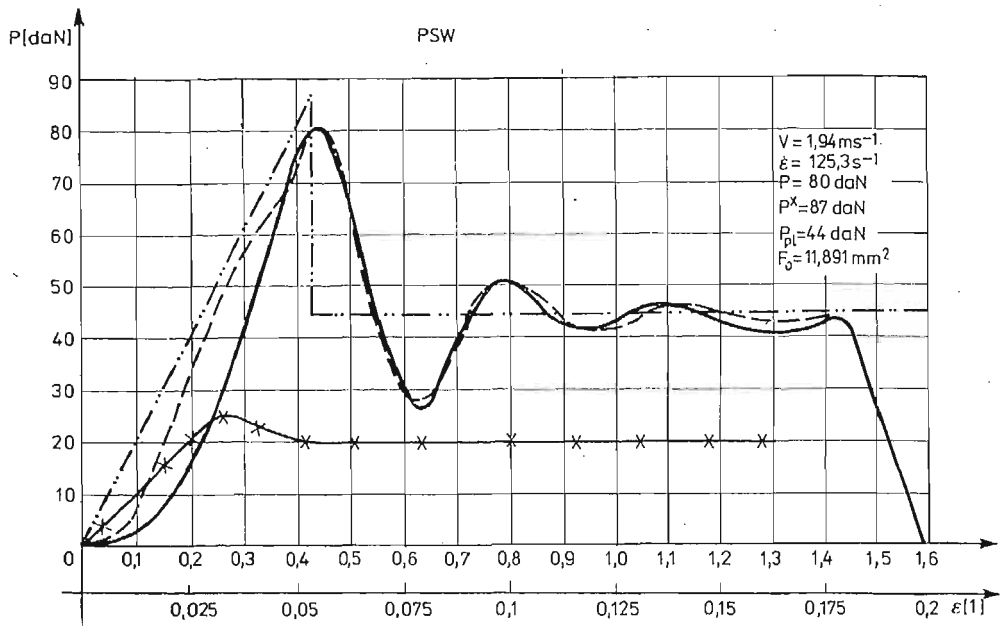
po osiągnięciu naprężenia maksymalnego. Należy jednak zdawać sobie sprawę, że pokazane na rysunkach z opracowanymi oscylogramami, w szczególności rys. 17 i rys. 19, impulsy wymuszające są przybliżone i nie powinny sugerować całkowicie kruchego zachowania się materiału. W rzeczywistości następuje prawdopodobnie niewielki spadek naprężenia po przekroczeniu naprężenia maksymalnego, a następnie zerwanie próbki, które jednak nie jest pęknięciem całkowicie kruchym, a raczej spowodowane jest dużym lepkiem oporem materiału. Widać więc wyraźnie, że istnieje pewna prędkość krytyczna odkształcenia poniżej której naprężenie płynięcia wykazuje pewną wartość, a powyżej której materiał pęka bez występowania widocznego płynięcia. Dalsze studia tego zagadnienia mogłyby być użyteczne w ustaleniu optymalnych prędkości dla procesów technologicznych kształtowania na zimno wyrobów z tworzyw sztucznych (4).



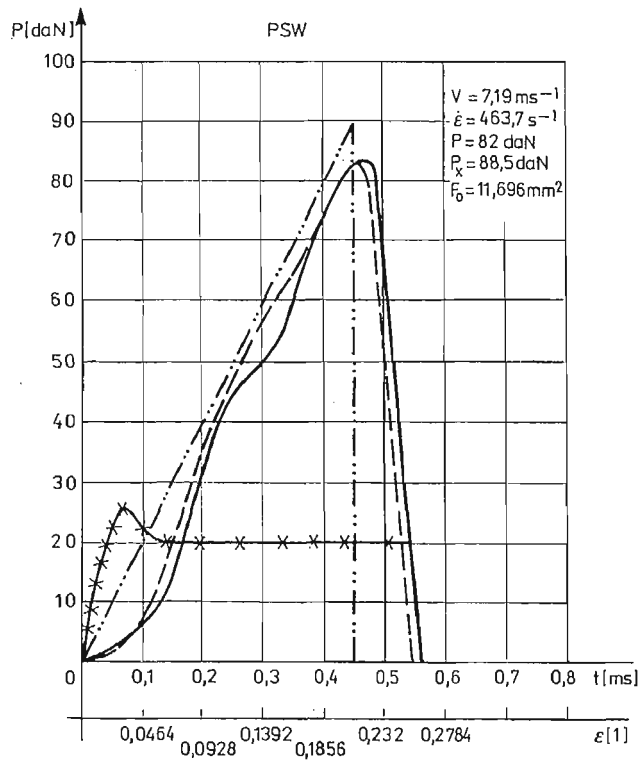
Rys. 16. Wynik dynamicznego rozciągania próbki z polichlorku winylu dla $V = 2,32 \text{ ms}^{-1}$



Rys. 17. Wynik dynamicznego rozciągania próbki z polichlorku winylu dla $V = 6,94 \text{ ms}^{-1}$



Rys. 18. Wynik dynamicznego rozciągania próbki z polistyrenu wysokoudarowego dla $V = 1,94 \text{ ms}^{-1}$



Rys. 19. Wynik dynamicznego rozciągania próbki z polistyrenu wysokoudarowego dla $V = 7,19 \text{ ms}^{-1}$

7. Wnioski

- Spośród ważniejszych wniosków uzyskanych w pracy należy wymienić:
- Badania zachowania się tworzyw sztucznych przy odkształceniu z dużymi prędkościami mogą być bardzo przydatne do oceny zarówno ich własności eksploatacyjnych jak i technologicznych.
 - Dla wszystkich trzech badanych tworzyw, tj. dla polipropylenu, polichlorku winylu i dla polistyrenu wysokociśnieniowego zaobserwowano przy pewnej krytycznej prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon}_{cr}$ pękanie badanych materiałów bez wystąpienia widocznego płynięcia. Otrzymane wartości $\dot{\epsilon}_{cr}$ wynoszą odpowiednio w przybliżeniu PP — $\dot{\epsilon} \approx 390 \text{ s}^{-1}$, PCW — $\dot{\epsilon} \approx 310 \text{ s}^{-1}$, PSW — $\dot{\epsilon} \approx 260 \text{ s}^{-1}$.
 - Stosunkowo duża masa zredukowana układu drgającego w porównaniu ze stosunkowo małymi siłami obserwowanymi przy rozciąganiu powoduje trudności w określeniu parametrów układu. Pomimo tego rodzaju trudności uzyskano w miarę dokładne opisy analityczne oscylogramów.
 - W dalszych badaniach należałoby stosować bardziej dokładne założenia dotyczące krzywoliniowości impulsu wymuszającego przyjmowanego w analizie numerycznej, co pozwoliłoby na jeszcze dokładniejsze określenie charakterystyki materiałowej.
 - W sumie przedstawiona metoda pomiaru własności wytrzymałościowych tworzyw sztucznych, w przypadku badania płaskich próbek przy dynamicznym rozciąganiu z kompletną rejestracją próby, może stanowić podstawę do dalszych badań w tym kierunku.

Literatura cytowana w tekście

1. S. BUĆKO, E. CEGIELSKI; *Badania własności mechanicznych PA przy udarowym rozciąganiu*, Instytut Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Krakowskiej 1976.
2. W. DĘBSKI; *Własności mechaniczne PMMA przy zmiennych szybkościach odkształcania i przy złożonym stanie naprężeń*, Prace Politechniki Poznańskiej 1966.
3. P. P. GILLIS; *Vibration analysis of a high speed tension test*, University of Kentucky 1969.
4. *Analysis of abs cold-forming by high speed testing*, Borg-Warner Corporation 1969.
5. J. KLEPACZKO; *Urządzenie do dynamicznego rozciągania*, Prace IPPT (w przygotowaniu).
6. K. A. KERIMOW, J. R. MARDUCHAJEW; *Issledowanieje mechaniczeskich charakteristik polimernih nitiej s ucetom skorosti dieformacji i relaksacji pri prodolnom udarie*. Mech. Dieformirujemnych Twiordych Tiel sei. Mech. Baku 1970.
7. J. M. WARD; *Mechaniczne własności polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych*, PWN 1975.

Резюме

УДАРНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ ПОЛИМЕРОВ

В работе описывается экспериментальная установка и приводятся полученные результаты в виде кривых напряжение-деформация при ударном одноосном растяжении для избранных полимеров. Экспериментальные исследования проводились на маятниковом копре PSW-30 с использованием установки сконструированной в Институте Основных Проблем Техники ИАН. Эта установка, (имеющая патент ПНР) дает возможность одновременной записи силы, растягивающей

образец и перемещения из его концов. Течение процесса во времени регистрируется с помощью осциллографа, оснащенного фотокамерой POLAROID. В итоге обработки осциллограммы, исключая параметр времени, получают кривую растяжения, искаженную влиянием колебаний системы динамометр-образец-захваты. Действительная сила, действующая на образец, получается путем учета математически моделируемых параметров этой системы.

Если аналитическая модель удовлетворительно описывает экспериментально полученную кривую, это означает, что найденная сила, действующая при испытании на один из концов образца, описана правильно. Следовательно такой подход дает возможность косвенного устранения влияния колебаний, искажающих кривую растяжения.

При аналитическом подходе решения складывались, это создавало возможность исследовать материалы с более сложными прочностными характеристиками, например, с верхним и нижним пределами текучести.

Исследования проводились для трех материалов: высокоударного полистирола, полихлорвинила и полипропилена. Для всех исследуемых материалов было установлено существование предельной скорости растяжения, превышение которой вызывает разрушение образца без предварительного развития шейки. Для полимеров это равнозначно исчезновению верхнего предела текучести. В итоге проведенных экспериментов были получены кривые, описывающие влияние скорости на предел текучести, напряжение пластического течения и временное сопротивление разрушающее напряжение. Было установлено наличие существенных различий в поведении исследуемых материалов при медленной и ударной нагрузках. Предпринята попытка объяснить это явление с точки зрения кинетики образования и развития шейки.

Summary

DYNAMIC TENSION TEST OF POLYMERS

The paper presents some results on dynamic tension tests of several polymers. A new device is applied and described. All impact experiments were performed with the aid of pendulum hammer type PSW — 30 equipped with a special device designed at the Institute of Fundamental Technological Research of the Polish Academy of Sciences. The device, being the subject of patent, enables one to measure simultaneously the tensile force and displacement of the specimen grip as a function of time. Force and displacement is recorded independently on a two-beam oscilloscope and Polaroid camera. Having recorded the oscillogramme, the time can be eliminated and force — displacement curve obtained. However, the curve shows presence of some vibrations in the system of dynamometer — specimen — grips. Assuming a suitable vibration model it was possible to find out the parameters of the vibrating system and to calculate the real force acting on the specimen. If the analytical description coincides with the oscillogram — it means that the force was calculated correctly. Such procedure enables the indirect elimination of vibrations from the stress — strain curve. In the analytical description the method of „connecting solutions” was applied which makes possible to evaluate materials with a more complicated shape of its stress — strain curve (e.g. upper and lower yield point).

Altogether three materials were tested: impact resistant polystyrene, PVC, and polypropylene. In all materials tested the critical strain rate was measured beyond which the fracturing of specimen without prior necking is observed. It means that in such a case the plastic flow is limited. As the result of experiments the diagrams have been obtained which demonstrate the effect of strain rate on the yielding stress, flow stress, and fracture stress for all materials tested. Considerable differences are observed in material behaviour tested under slow and impact loading. An attempt was taken up to explain this phenomenon within the framework of the necking and neck propagation kinetics.

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
IPPT PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 5 lipca 1979 roku