

- 5.11.12. – badania doświadczalne
- 5.8.7. – metody doświadczalne
- 5.5.7. – mechanika polimerów

L. Kruszka  
W. K. Nowacki, M. Wolna

STATYCZNE I DYNAMICZNE  
BADANIA KRUCHEGO MATERIAŁU  
ELASTOOPTYCZNEGO

3/1992

P. 269



WARSZAWA 1992

<http://rcin.org.pl>

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 2 marca 1992 r.



56734



N a p r a w a c h r ę k o p i s u

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
Nakład 100 egz. Ark.wyd. 2,3 Ark.druk. 3,0  
Oddano do drukarni w kwietniu 1992 r.

---

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.  
Warszawa, ul.Jasna 1

Leopold Kruszka

Wojskowa Akademia Techniczna

Wojciech K. Nowacki

Zakład Teorii Konstrukcji IPPT PAN

Małgorzata Wolna

Pracownia Technologii Szkła i Ceramiki ORT IPPT PAN

## STATYCZNE I DYNAMICZNE BADANIA KRUCHEGO MATERIAŁU ELASTOOPTYCZNEGO

### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych - statycznych i dynamicznych kruchego przezroczystego materiału modelowego w próbach jednoosiowego ściskania. W badaniach statycznych zastosowano wieloczynnikową metodę eksperymentu wykorzystując pomiary ultradźwiękowe, emisję akustyczną, elastoptykę oraz rejestrację fotograficzną zmian zachodzących w próbkach. Metoda ta umożliwiła zebranie kompleksowych informacji dotyczących mechaniki uszkodzeń i zniszczenia tego materiału.

Porównano statyczne i dynamiczne charakterystyki materiału, wytrzymałości doraźne oraz mechanizmy pęknięcia i zniszczenia z uwzględnieniem wpływu kształtu (smukłości) próbki.

### 1. Wprowadzenie

Do badań modelowych stanu naprężenia i odkształcenia monolitycznych konstrukcji inżynierskich lub ich elementów, zwłaszcza w stadium zniszczenia, wykorzystywane są kruche materiały elastoptyczne. Obecnie coraz większe zainteresowanie skierowane jest na zastosowanie tych materiałów do badania procesu

tworzenia się pęknięć w konstrukcjach lub w modelach wykonanych z materiałów rzeczywistych. Wykorzystywana jest w tym celu metoda powierzchniowej warstwy elastooptycznej. Kruche materiały elastooptyczne znajdują również szerokie zastosowanie w badaniach zachowania się górotworu. Wykonywane są modele fragmentów wyrobisk lub pokrycia elastooptyczne naklejane na próbki rzeczywistych materiałów skalnych. Materiały takie służą także do modelowania pęknięcia, a w szczególności do modelowania rozwoju szczeliny (sztuczna szczelina) oraz modelowania kruche go zniszczenia (zagadnienia brzegowe).

Głównym zadaniem podjętym w niniejszej pracy jest zbadanie zachowania się kruche go materiału elastooptycznego wykonanego na bazie krajowych komponentów w warunkach obciążeń statycznych i dynamicznych. Jest to istotne nie tylko dla lepszego poznania własności tego materiału, lecz służy również do uzyskania informacji dla pełnego modelowania (niestrukturalnego) określonych konstrukcji inżynierskich. Zachowanie się materiału modelowego przy obciążeniach dynamicznych jest całkowicie odmienne od zachowania się w próbach statycznych ze względu na zjawiska falowe. W pracy porównano wyniki badań otrzymane z prób powolnego ściskania (zakres małych prędkości odkształcenia  $\dot{\epsilon} = 3-14 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ) z próbami dynamicznego ściskania (zakres dużych prędkości odkształcenia  $\dot{\epsilon}$  rzędu  $10^3 \text{s}^{-1}$ ) próbek walcowych o czterech smukłościach  $s = h_0/d_0 = 0,5; 1; 1,5; \text{ i } 2$  w warunkach obciążeń jednoosiowych, gdzie  $h_0$  i  $d_0$  są to początkowe wymiary próbek walcowych - wysokość i średnica, a  $d_0 = \text{const} \approx 17 \text{ mm}$ .

W badaniach zastosowano wieloczynnikową metodę eksperymentu obejmującą trzy grupy badań:

- wstępne - nieniszczące, bazujące głównie na pomiarach ultradźwiękowych<sup>1</sup>,
- główne - niszczące (statyczne i dynamiczne<sup>2</sup>),
- uzupełniające - dotyczące tylko badań statycznych, w skład

<sup>1</sup> przy współudziale mgr inż. M. Kiersnowskiego z Samodzielnej Pracowni Badań Nieniszczących IPPT PAN

<sup>2</sup> przy współudziale dr inż. E. Stewarskiego z Instytutu Geomechaniki AGH w Krakowie

których wchodzi: emisja akustyczna<sup>3</sup>, elastoptyka oraz rejestracja fotograficzna zmian zachodzących w próbce podczas procesu deformacji.

Przyjęta metoda pozwala na zebranie wielu informacji umożliwiających opis propagacji spękań oraz mechanizmu zniszczenia próbek. W pracy przedstawiono próbę modelowania kruchego zniszczenia bez stosowania sztucznej szczeliny wykorzystując kruchy materiał modelowy oraz powyższą metodę eksperymentu. W literaturze spotyka się opisy niewielu tego typu badań doświadczalnych. Wstępne badania poznawcze ujęte w niniejszej pracy obejmują zakres mechaniki uszkodzeń i zniszczenia zarówno pod względem wykorzystania aparatury jak również sprawdzenia przyjętej metodyki badawczej. Stąd też na tym etapie badań uzyskane wyniki mają głównie charakter jakościowy.

## 2. Przygotowanie materiału do badań

Do badań zastosowano materiał elastoptyczny wykonany na podstawie krajowych składników: żywicy epoksydowej Epidian 2 i kalafonii destylowanej, otrzymany zgodnie z technologią opisaną w pracy [1].

W Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN otrzymano także kruche materiały elastoptyczne na podstawie żywicy epoksydowej Epidian 2 utwardzanej niewielką ilością bezwodnika ftalowego [2] oraz materiały na podstawie kompozycji żywicy Epidian 2 i kalafonii modyfikowanej [1,3].

Do badań przygotowano serie próbek walcowych o średnicy  $d_0 \approx 17$  mm i wysokościach  $h_0 = 0,5d_0$ ;  $d_0$ ;  $1,5d_0$  i  $2d_0$ . Próbki odlewano w formach wykonanych z kauczuku silikonowego Polastosil M56 sieciowanego w temperaturze pokojowej pod wpływem katalizatora OL-1 w ilości 5% wagowych w stosunku do kauczuku. Elastyczne formy<sup>3</sup> przy współdziałaniu mgr E. Pieczyńskiej i dr inż. S.P. Gadaja z Samodzielnej Pracowni Technologicznej Warstwy Wierzchniej i Przejściowej Ciała Stałego IPPT PAN

eliminowały praktycznie powstanie naprężeń wstępnych w odlewanych próbkach.

Średni ciężar właściwy materiału wynosił  $\gamma = 11,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$ , natomiast średnia twardość  $H_B = 23,2$  (w skali Brinella - według PN-74/H-04350).

Próbki materiału oznaczano następująco:

- smukłość  $s = 0,5; 1; 1,5$  i  $2$  odpowiednio literami: A, B, C, D,
- kolejne odlewy: I-V,
- kolejne numery próbek tej samej smukłości: 1-8.

### 3. Badania nieniszczące

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych przeprowadzono badania nieniszczące, których celem była selekcja próbek do dalszych eksperymentów oraz wyznaczenie stałych materiałowych (elastometria falowa).

Badania nieniszczące wykonano przy użyciu techniki ultradźwiękowej [4]. Pomiar dokonywane były metodą impulsową polegającą na zmierzeniu opóźnienia impulsu (echa dna próbki) przy pomocy defektoskopu z głowicą o częstotliwości 4 MHz.

Przyjęto następującą dopuszczalną odchyłkę prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej  $c_L$  w materiale próbki:

$$\left| \frac{\Delta c_L}{c_L} \cdot 100\% \right| < 1\% \quad (1)$$

Prędkości fal ultradźwiękowych w próbkach były bardzo zbliżone do siebie (nie przekroczono dopuszczalnej odchyłki), co świadczy o tym, że materiał modelowy jest fizycznie jednorodny.

Metoda elastometrii ultradźwiękowej pozwoliła wyznaczyć następujące średnie stałe materiałowe:

- prędkość propagacji sprężystych fal podłużnych  $c_L$  i poprzecznych

$c_T$  :

$$c_L = 2480 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$c_T = 1096 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

- stałe Lamé'go  $\lambda$  i  $\mu$  (moduł odkształcenia postaciowego - Kirchhoffa):

$$\lambda = 4410 \text{ MPa},$$

$$\mu = 1410 \text{ MPa},$$

- moduły sprężystości podłużnej - Younga  $E$  i ścisłości objętościowej  $K$ :

$$E = 19900 \text{ MPa},$$

$$K = 5350 \text{ MPa},$$

- współczynnik odkształcenia poprzecznego - Poissona  $\nu$ :

$$\nu = 0,38.$$

Niezależnie od weryfikacji ultradźwiękowej sprawdzano stan naprężeń wstępnych. Wykorzystano tu pomiary elastoptyczne w świetle spolaryzowanym w polaryskopie kołowym (rys.1.). W tym celu obserwowano próbki zanurzone w cieczy imersyjnej. Pomimo intensywnego chłodzenia próbek w procesie mechanicznej obróbki nie udało się uniknąć powstania trwałych naprężeń resztkowych. Elastooptyka - czuła metoda doświadczalna - doskonale uwidoczniała te naprężenia. Niewielkie naprężenia nie będą wpływały w sposób istotny na rozkład naprężeń powstających w procesie ściskania próbek.

#### 4. Badania niszczące i uzupełniające

Głównym etapem pracy były badania niszczące. Próbki walcowe badanego materiału poddawano jednoosiowemu ściskaniu w warunkach statycznych oraz dynamicznych aż do ich zniszczenia.

#### 4.1. Badania statyczne

Ściskanie statyczne realizowano w maszynie wytrzymałościowej o napędzie mechanicznym. Zachowywano stałą prędkość ruchu trawersy  $v_t = 0,07$  mm/min. Globalna prędkość odkształcenia w tym procesie wynosi:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_t}{h_0} \quad (2)$$

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów sporządzono wykresy zmiany siły obciążającej  $F$  w funkcji przemieszczenia  $\Delta h$ , gdzie  $\Delta h = h_0 - h$  jest to zmiana odległości między płytami prasy.

Dokonywano pomiarów odkształceń globalnych na całej wysokości próbki. Ten sposób pomiaru posiada pewne wady, opisane szczegółowo w pracy [5]. Jednak z uwagi na prostotę przeprowadzenia badań metoda ta jest często stosowana na etapie badań wstępnych do wyciągania wniosków głównie o charakterze jakościowym. Ponadto w badaniach niszczących pomiar lokalnych odkształceń mierzonych metodą tensometryczną jest często utrudniony, a nawet niemożliwy - zwłaszcza w zakresie pozasprężystym w okolicach naklejonych tensometrów (zazwyczaj o bazach kilkakrotnie mniejszych od wysokości próbek) - ze względu na uszkodzenia a następnie zniszczenie próbki.

Do pomiaru przemieszczeń stosowano rejestrator zmiany długości typu indukcyjnego. Doświadczenia wykonywano według dwóch założonych programów obciążenia:

- bez odciążenia, do osiągnięcia wytrzymałości doraźnej (rys. 2 -5),
- z czterema cyklami obciążenie-odciążenie przed osiągnięciem wytrzymałości doraźnej, z obniżeniem wartości siły ścisającej  $F$  do zera w każdym cyklu, przy czym cykl pierwszy (I) realizowano do około 20% średniej wartości siły maksymalnej  $F_c$  uzyskanej w programie pierwszym dla danej smukłości próbek, cykl drugi (II) - do około 40% wartości siły, cykl trzeci (III) - do około 60% tej siły i cykl czwarty (IV) - do około 80% siły  $F_c$  (rys. 6 - 9).



Na rysunku 10 przedstawiono zbiorcze zależności średniego naprężenia nominalnego  $\sigma = \frac{F}{A_0}$  od odkształcenia globalnego  $\epsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$  dla czterech różnych smukłości próbek, gdzie  $A_0$  oznacza początkowy przekrój poprzeczny próbki:  $A_0 = \pi d_0^2/4$ . Wykonano je na podstawie wykresów otrzymanych z badań w maszynie wytrzymałościowej dla programu pierwszego. Średni statyczny moduł Younga  $E_0$  wyniósł 3520 MPa. Nie zawierają one części pokrytycznych - charakterystyk osłabienia. Te części krzywych zależne są od typu zniszczenia próbki. Przedstawiono je na dalszych rysunkach dla wybranych próbek. Równoległe z procesem ściskania prowadzono rejestrację fotograficzną zmian zachodzących w próbce w świetle sodowym niespolaryzowanym i spolaryzowanym kołowo.

W czasie próby ściskania można zauważyć, że w chwili pojawienia się odkształceń plastycznych na powierzchni próbek, która staje się matowa, występują cienkie linie poślizgu (Lüdersa-Hartmana-Czerenkowa) nachylone w stosunku do osi próbki pod kątem bliskim  $45^\circ$ , zgodnie z pochyleniem płaszczyzn ekstremalnych naprężeń stycznych. Wewnątrz materiału próbki tworzą się pasma odkształceń poślizgowych (plastycznych) w postaci zaciemnionych prążków (obszarów).

Rejestrowano również te zmiany w badaniach ultradźwiękowych wykorzystując metodę emisji akustycznej [6] (rys.11). Po zakończeniu badania (po ostatecznym odciążeniu) próbki, które nie uległy całkowitemu zniszczeniu były prześwietlane wzdłuż i prostopadle do swej osi podłużnej. Wyniki te dokumentowano fotograficznie. Były to badania uzupełniające. Wraz z zależnością siła-przemieszczenie (rys.3) podano dla tej samej próbki przykładowe wykresy sygnałów z pomiaru emisji akustycznej przedstawiające ilość impulsów w jednostkę czasu  $N/\Delta t$  (rys.12) i RMS (root mean square) (rys. 13) czyli wartość skuteczną sygnału napięcia, która jest proporcjonalna do sprężystej energii akustycznej generowanej w materiale pod wpływem ściskania.

W celu zmniejszenia współczynnika tarcia na powierzchni kontaktu próbki z płytami prasy maszyny wytrzymałościowej stosowano smarowanie powierzchni czołowych próbek pastą silikonową, smarem grafitowym lub dwusiarczkiem molibdenu z

dotatkem nafty. Rodzaj smarowania nie miał wpływu na kształt wykresu siła-przemieszczenie. W dalszych badaniach (statycznych i dynamicznych) stosowano pastę silikonową.

#### 4.2. Badania dynamiczne

Badania dynamiczne przeprowadzono za pomocą urządzenia zwanego zmodyfikowanym prętem Hopkinsona [7-10]. Ta technika badawcza, która pierwotnie została zaproponowana do badania własności plastycznych metali przy dużych prędkościach odkształcenia, znalazła szerokie zastosowanie do określania dynamicznego zachowania się innych materiałów [11], a zwłaszcza tworzyw sztucznych [12-16] oraz materiałów kruchych - skał [17-28] i betonu [29-32]. Umożliwia ona pomiar praktycznie całego procesu dynamicznego obciążania próbki walcowej łącznie z momentem uszkodzenia (damage), a następnie fragmentacji aż do zniszczenia (fracture) próbki.

Schemat ideowy stanowiska do badań dynamicznych przedstawiono na rysunku 14. Stanowisko składa się z następujących elementów: wyrzutni pneumatycznej pręta wymuszającego 1, pręta inicjującego 2, w którym generuje się wzdłużna ściskająca fala sprężysta o odkształceniu w czasie  $\epsilon_j(t)$ , której część zostaje odbita jako fala rozciągająca  $\epsilon_R(t)$ , pręta transmitującego 3, w którym propaguje się zniekształcona po przejściu przez próbkę 4 część fali  $\epsilon_j(t)$  w postaci fali ściskającej  $\epsilon_T(t)$ . Między prętami pomiarowymi 2 i 3 znajduje się badana próbka walcowa 4, która ulega procesowi deformacji, uszkodzenia i zniszczenia.

Symbolami literowymi oznaczono:

$B_1, B_2$  - baterie zasilające źródła światła  $Z_1$  i  $Z_2$  i fotokomórki  $F_1$  i  $F_2$  systemu pomiaru prędkości uderzenia  $V$  pręta wymuszającego,

$C_2$  - częstotliwościomierz do pomiaru czasu przejścia pręta wymuszającego między punktami pomiarowymi prędkości uderzenia,

$T_1, T_2, T_3$  - czujniki tensometryczne odkształceń,

WT - wzmacniacz tensometryczny dynamiczny,

WO - wzmacniacz operacyjny,

PAC - przetwornik analogowo-cyfrowy (pamiętający),

O - oscyloskop,

INT - interfejs,

ZX81 - mikrokomputer,

DRUK - drukarka,

TV - monitor,

XY - rejestrator graficzny.

Próbki walcowe o średnicy  $d_0 \approx 17$  mm i różnych smukłościach poddane były krótkotrwałym obciążeniom ściskającym o czasie działania rzędu 100-160  $\mu$ s.

Przebieg doświadczenia wyglądał następująco:

Badaną próbkę 4 umieszczano pomiędzy prętami 2 i 3. Za pomocą wyrzutni pneumatycznej 1 nadawano określoną wymaganą prędkość uderzenia prętowi wymuszającemu. Ten pręt-pocisk uderza z prędkością  $V$  w pręt 2 wytwarzając w nim inicjującą falę odkształcenia  $\epsilon_J(t)$ . Fala ta docierając do czujnika tensometrycznego  $T_1$  uruchamia podstawę czasu w przetworniku pamiętającym PAC i oscyloskopie O. Następnie mierzona jest przez czujnik  $T_2$  i rejestrowana w przetworniku PAC. Część fali  $\epsilon_J$  ulega odbiciu od płaszczyzny styku końca pręta 2 z próbką 4 i propaguje się w przeciwną stronę w postaci fali  $\epsilon_R(t)$ . Pozostała część fali  $\epsilon_J$  przechodzi przez próbkę 4 i wytwarza falę odkształcenia  $\epsilon_T(t)$  w pręcie 3. Fale: odbita  $\epsilon_R(t)$  i transmitowana  $\epsilon_T(t)$  są mierzone odpowiednio czujnikami  $T_2$  i  $T_3$  i rejestrowane w przetworniku PAC. Zarejestrowany obraz tych fal odkształceń ( $\epsilon_J$ ,  $\epsilon_R$ ,  $\epsilon_T$ ) zostaje przesłany do oscyloskopu w celu oceny jego poprawności. Po stwierdzeniu poprawności zapisu zapamiętany sygnał z PAC skierowany jest do mikrokomputera w celu numerycznej obróbki dla wyznaczenia średnich wartości następujących funkcji:

- naprężenia w czasie  $\bar{\sigma}(t)$ ,
- odkształcenia w czasie  $\bar{\epsilon}(t)$ ,
- prędkość odkształcenia w czasie  $\dot{\bar{\epsilon}}(t)$ ,
- naprężenie - odkształcenie  $\bar{\sigma}(\epsilon)$ .

Skorzystano z poniższych zależności:

$$\bar{\sigma}(t) = \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2 A_o} \quad (3)$$

gdzie:

$P_1(t)$ ,  $P_2(t)$  - siły działające na próbkę na czołach prętów Hopkinsona 2 i 3,

$$P_1(t) = E_H A_H [\epsilon_J(t) + \epsilon_R(t)] \quad (4)$$

$$P_2(t) = E_H A_H \epsilon_T(t) \quad (5)$$

gdzie:

$E_H$  - moduł Younga materiału prętów Hopkinsona,

$A_H = \pi d_H^2 / 4$  - pole przekroju poprzecznego prętów Hopkinsona.

Stąd

$$\bar{\sigma}(t) = \frac{1}{2} E_H (d_H / d_o)^2 [\epsilon_J(t) + \epsilon_R(t) + \epsilon_T(t)] \quad (6)$$

$$\bar{\epsilon}(t) = \frac{u_1(t) - u_2(t)}{h_o} \quad (7)$$

gdzie:

$u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  - przesunięcia czoł prętów Hopkinsona 2 i 3.

$$\dot{\bar{\epsilon}}(t) = \frac{1}{h_o} \left[ \frac{du_1(t)}{dt} - \frac{du_2(t)}{dt} \right] \quad (8)$$

stąd

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{1}{h_0} \left[ \varepsilon_J(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t) \right] \quad (9)$$

Zastosowanie układu z prętem wymuszającym 1, co jest zaletą tej metody badawczej w stosunku do użycia techniki materiałów wybuchowych, umożliwiło dokładne dynamiczne wzorcowanie całego zestawu prętów Hopkinsona podczas każdego doświadczenia przez pomiar prędkości uderzenia  $V$ . W momencie uderzenia pręta 1 o długości  $L$  poruszającego się z prędkością  $V$  o pręt inicjujący 2 generuje się fala o maksymalnym odkształceniu  $\varepsilon_{J_{\max}}$  i długości  $2L$ . Przyrównując ilość ruchu pręta 1 do ilości ruchu wywołanej uderzeniem w pręcie 2 otrzymuje się podstawowe równanie wykorzystywane przy dynamicznym wzorcowaniu układu:

$$\varepsilon_{J_{\max}} = V / 2c_L^H \quad (10)$$

gdzie:

$$(c_L^H)^2 = E_H / \rho_H, \quad \rho_H - \text{gęstość materiału prętów Hopkinsona.}$$

Równanie to pozwala na łączne cechowanie układu wraz z elektronicznym układem pomiarowym. Jest to szczególnie istotne w badaniach materiałów kruchych [18].

Wszystkie podane wyżej wzory zostały otrzymane na podstawie najprostszej teorii propagacji fal wzdłużnych w prętach. W teorii tej zakłada się jednowymiarowy stan naprężenia w prętach, a także jednowymiarowy stan naprężenia w próbce. Zagadnienia te przedyskutowano w kilku pracach. Zarówno analizy teoretyczne, których wynikiem są przybliżone rozwiązania w postaci zamkniętej dotyczące zachowania się próbki, jak i bardziej dokładne rozwiązania numeryczne wskazały, że powyższe uproszczone wzory prowadzą do prawidłowych wyników [33]. Szczególnie analiza numeryczna zamieszczona w pracy [34], gdzie przeprowadzono dwuwymiarowe (osiowa symetria) obliczenia propagacji fal w

systemie prętów wraz z próbką, wykazała pełną użyteczność tej metody do pomiaru własności mechanicznych materiałów poddanych krótkotrwałym obciążeniom.

Zastosowanie mikrokomputera wraz z techniką rejestracji cyfrowej pozwoliło na szybkie wyznaczanie wymienionych wielkości podczas całego procesu deformacji próbki.

Wyniki laboratoryjnych badań dynamicznych podano na zbiorczych wykresach dla czterech wybranych próbek: CIII/1, CIII/3, DIV/2 i DVI/7 (rys. 15-18). Przedstawiają one charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe  $\bar{\sigma}(\epsilon)$ , przebiegi naprężeń i prędkości odkształceń w czasie:  $\bar{\sigma}(t)$ ,  $\bar{\epsilon}(t)$  oraz zmianę prędkości odkształceń w funkcji odkształceń  $\dot{\epsilon}(\epsilon)$ . Wykresy te pozwalają prześledzić zachowanie się próbki w czasie obciążania dynamicznego oraz zaobserwować przebieg zmienności prędkości odkształcenia w czasie eksperymentu. Na kolejnym rysunku (rys. 19) podano zbiorczy wykres dynamicznych krzywych  $\sigma$ - $\epsilon$  dla siedmiu próbek o różnej smukłości  $s$  i różnych prędkościach odkształceń  $\dot{\epsilon}$  na tle krzywej statycznej dla  $s = 0,5$ . Widać znaczny wzrost wartości dynamicznego modułu sprężystości w porównaniu do jego wartości statycznej. Dla próbek o mniejszych wartościach smukłości  $s=0,5$  i  $s=1$  można zaobserwować wyraźny proces odciążenia dynamicznego. Przebadata materiał jest wrażliwy na prędkość odkształcenia  $\dot{\epsilon}$  (por. dla  $s=0,5$ :  $\dot{\epsilon}=1,4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{s}$ ,  $390 \frac{1}{s}$ ,  $680 \frac{1}{s}$ ), jednak maksymalne wartości naprężeń uzyskiwane są w badaniach statycznych. Podobnie zachowuje się żywica epoksydowa (rys. 20) stanowiąca główny składnik testowanego materiału modelowego [35]. Każda próbka poddana deformacji dynamicznej była fotografowana w celu rejestracji końcowych spekań, które miały miejsce podczas tego procesu.

#### 4.3. Badanie procesu niszczenia materiału elastooplastycznego obciążanego z różnymi prędkościami odkształcenia

Cechą charakterystyczną materiałów kruchych jest pojawienie się mikropęknięć podczas procesu obciążenia, a następnie dezintegracja próbki. Przeto bardzo ważnym czynnikiem jest sztywność

mechanicznego układu obciążającego [36]. Układ ten może być mniej lub bardziej sztywny. Materiał kruchy przechodzący w stan zniszczenia po przekroczeniu swojej wytrzymałości, posiadający charakterystykę pozniszczeniową bardziej stromą od charakterystyki układu obciążającego będzie ulegał gwałtowniejszemu rozpadowi. Korzystną cechą jest więc większa sztywność maszyny wytrzymałościowej, gdyż wówczas podczas procesu niszczenia próbki, gdy siła szybko spada, można dokładniej zmierzyć rzeczywiste własności materiału. Uzyskuje się w ten sposób pełną charakterystykę materiału kruchego zawierającego zarówno gałąź wznoszącą jak i opadającą - pozniszczeniową. Zastosowane w badaniach tego materiału maszyny wytrzymałościowe i układ prętów Hopkinsona należy zaliczyć do układów sztywnych. Zwiększanie dostarczanej do nich energii umożliwiło obserwację wzrostu stopnia i formy zniszczenia próbki łącznie z obserwacją poszczególnych faz fragmentacji materiału (rejestrowaną fotograficznie tylko w badaniach statycznych). Procesowi deformacji (statycznej i dynamicznej) towarzyszą zmiany wewnętrznej struktury materiału wywołane pojawieniem się mikrouszkodzeń - mikropęknięć. Następnie wzrost i łączenie się wewnętrznych mikrodefektów prowadzi do wystąpienia jednej lub kilku makroszczelin, a w konsekwencji do zniszczenia materiału. Przeprowadzone badania wskazują, że uszkodzenie próbek jest zjawiskiem anizotropowym i silnie zależy od prędkości odkształcenia, geometrii próbek i warunków na powierzchni kontaktu próbki z płytą dociskową (wielkości kontaktowych sił tarcia). Stwierdzono, że przy odpowiednio dużym obciążeniu zarówno statycznym jak i dynamicznym materiał próbki przechodzi następujące stadia: obciążenie sprężyste, początek pojawienia się pęknięć (uszkodzenie materiału) oraz fragmentację (zniszczenie).

Dużą zaletą badanego materiału kruchego jest jego przezroczystość i czułość (wrażliwość) na efekty dwójmności wymuszonej. Umożliwia to, w przeciwieństwie do innych materiałów nieprzezroczystych (beton, skały) [37], pełną, ciągłą obserwację procesu zniszczenia próbki, który może być zarejestrowany fotograficznie szczególnie łatwo w badaniach statycznych. Ponadto możliwa jest doświadczalna analiza stanu naprężenia i odkształcenia na podstawie obrazów elastooptycznych.

Jak już wspomniano jednym z czynników wpływających w sposób zasadniczy na wyniki (szczególnie przy badaniach statycznych) są warunki brzegowe panujące na powierzchniach próbki przylegających do płyt dociskowych maszyny wytrzymałościowej. Tarcie pomiędzy materiałem a płytą stalową, wielokrotnie większa sztywność płyty, powodują poważne zakłócenia jednoosiowego stanu naprężenia, powstanie sił poprzecznych, ograniczenie swobody odkształceń poprzecznych tak istotnych dla procesu niszczenia materiału kruchego. Zgodnie z zasadą Saint Venanta dopiero w odległości większej od średnicy próbki niezależniamy się od sposobu przyłożenia siły. Stąd wynikają tendencje do zwiększenia wysokości ciał próbnych do dwu-, a nawet trójrotności wymiaru poprzecznego [38-41]. Przy smukłości próbek  $s$  większej od 2 rozkład naprężeń ściskających uważa się praktycznie za jednorodny (do momentu wystąpienia spękań - uszkodzeń w próbce). Dowodem na to są obrazy izochrom uzyskane w naszych badaniach. Widoczną oznaką wpływu smukłości próbki na wyniki wytrzymałościowe są zarejestrowane zdjęcia rys i sposób niszczenia próbki [42]. W próbkach smukłych ( $s > 1$ ) powstają pojedyncze ukośne ścięcia (pękanie ścinania - faulting). W próbkach o smukłości  $s = 1$  mamy do czynienia z charakterystycznymi odwróconymi stożkami spowodowanymi pęknięciem ścinania i podłużnym rozłupaniem (axial splitting) bądź łuszczeniem (slabbing). W próbkach krępych ( $s = 0,5$ ) występują liczne pęknięcia rozdzielcze wraz z łuszczeniem wokół powierzchni bocznych. Opisany charakter zniszczenia próbek przy ściskaniu świadczy o obecności tarcia kontaktowego. Klasyczne podłużne rozłupanie obserwowane w materiałach kruchych przy nieznacznym tarcu oporowym w naszych badaniach nie wystąpiło. Podobne typy zniszczenia próbek walcowych w procesie jednoosiowego statycznego ściskania podane są w literaturze dla innych rodzajów materiałów kruchych:

- skał [43-54],
- betonu (również dla próbek sześciennych ściskanych dwukierunkowo [55]) i zapraw [56],
- stali hartowanej, żeliwa [57].

Dodatkowej wiedzy o przebiegu procesu niszczenia materiału próbek przy obciążeniach statycznych dostarczyły nam sygnały



emisji akustycznej (AE). Parametry sygnałów AE zawierają informacje o dyskretnych procesach zachodzących w materiale podczas obciążania aż do momentu jego zniszczenia. Klasyczna natomiast zależność między siłą a przemieszczeniem (naprężeniem a odkształceniem) przedstawia procesy ciągłe, uogólnione, zachodzące podczas obciążania materiału. Podstawowymi źródłami AE w materiałach kruchych są według dotychczasowych badań [50,54,58-64]: mikropęknięcia, zrywanie spoiwości, makropęknięcia materiału, tarcie powierzchni makropęknięć i wreszcie rozpad materiału. Pojedyncze sygnały AE lub ich serie pojawiają się również w zakresie sprężystości materiału i wskazują na pewne niestabilności lokalne poprzedzające niestabilność całej masy badanego materiału [54]. W tym miejscu warto nadmienić, że charakter procesu niszczenia materiałów kruchych - skał poddanych naprężeniom zewnętrznym jest skalowo niezmienny [65,66], tzn. że taki sam fizyczny proces zachodzi w małym wymiarze (próbki w laboratorium), w średniej skali (np. zawały w kopalniach) i na wielką skalę (trzęsienia ziemi). Teza, według której odkształcenie materiałów kruchych jest procesem niezależnym wymiarowo, wskazuje na możliwość poznania tego procesu w laboratorium na próbkach oraz zastosowania wyników tych badań w innej skali.

Metoda AE znacznie rozszerza zakres informacji dotyczących wytrzymałości materiałów kruchych i umożliwia śledzenia całości procesu ich odkształcenia i niszczenia w funkcji obciążenia. Najbardziej reprezentatywnym i powszechnie wykorzystywanym parametrem AE jest liczba impulsów  $N$  w jednostce czasu  $\Delta t$ . Zależność liczby impulsów w przedziale czasowym od wielkości i czasu przyłożonego obciążenia próbki jest charakterystyczna dla danego rodzaju materiału kruchego, jego struktury, stanu zachowania itp. Drugim parametrem AE o podstawowym znaczeniu jest energia sygnału AE. Pomiarowi podlega zsumowana energia sygnałów w jednostce czasu: RMS. Potwierdza ona informacje dostarczane przez rejestrację liczby impulsów i równocześnie wskazuje na gwałtowność przebiegu procesu niszczenia mechanicznego.

Na podstawie analizy dotychczasowych wyników badań metodą AE kruchego materiału elastooptycznego w skali laboratoryjnej stwierdzono, że proces statycznego odkształcenia próbek walcowych

ściskanych osiowo można podzielić na kilka zakresów z punktu widzenia liczby impulsów AE w przedziale czasowym oraz zsumowanej energii tych sygnałów w jednostce czasu. Zakresy te odpowiadają specyficznym stanom strukturalnym materiału dotyczącym mechaniki pęknięcia i zniszczenia:

I faza - ułożenie próbki w układzie ściskającym maszyny.

W tej fazie przy małych naprężeniach występuje stosunkowo duża aktywność AE: RMS i  $N/\Delta t$ . Zależność między siłą a przemieszczeniem jest nieliniowa (dla próbki BV/6: 0-2 min. - rys. 12). Powstają drobne pęknięcia przy podstawach próbki.

II faza - powstawanie mikropęknięć.

Faza ta charakteryzuje się małą aktywnością RMS ( $t=2-7$  min.) oraz emisją chwilową  $N/\Delta t$ , a także dalszymi pęknięciami przy podstawach próbki.

III faza - powstawanie makropęknięć.

Przejawia się w postaci "wybuchów" impulsów energii RMS ( $t=7-12$  min.) i dalszą emisją chwilową  $N/\Delta t$ . Powstają widoczne spękania i linie poślizgu. Występuje stabilna propagacja pęknięć.

IV faza - zniszczenie wstępne.

Następuje silny wzrost aktywności akustycznej:  $N/\Delta t$  oraz RMS ( $t=12-14,5$  min.). Tworzą się pasma Ludersa-Hartmana-Czerenkowa, następuje niestabilna propagacja pęknięć. Przedział czasowy pomiędzy początkiem fazy zniszczenia wstępnego zwanym prekursorem a rozpadem próbki jest przeważnie okresem o obniżonej aktywności  $N/\Delta t$ .

V faza - zniszczenie materiału.

Następuje rozpad próbki. Bezpośrednio przed zniszczeniem i w czasie rozpadu obserwuje się wzrost liczby impulsów w jednostce czasu i gwałtowny wzrost energii impulsu (RMS).

Przeprowadzone dotychczas badania w różnych krajach wskazały na możliwość praktycznego wykorzystania parametrów prekursora w warunkach terenowych do przewidywania zawałów w kopalniach lub trzęsień ziemi. Stwierdzono bowiem ścisłą zależność wiążącą czas narastania prekursora z okresem między prekursorem a rozpadem masy materiału kruchego:

Zupełnie inny charakter zniszczeń i uszkodzeń próbek walcowych jest podczas dynamicznego ich ściskania w pręcie Hopkinsona. W

próbkach o smukłości  $s \geq 1,5$  oprócz podłużnych pęknięć występują poprzeczne wtórne spękania (secondary transversal cracks) spowodowane naprężeniami rozciągającymi w procesie falowym w długich próbkach. Te strefy uszkodzeń są od strony przyłożenia obciążenia i powiększają się wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia aż do całkowitego rozpadu próbki. W próbkach o smukłości  $s \leq 1$  występują tylko podłużne spękania:

- na całej wysokości  $h$  próbki niezależnie od wielkości obciążenia dla  $s = 0,5$ ,

- na wysokości próbki zależnie od wielkości obciążenia dla  $s = 1$ , podobnie jak to ma miejsce w próbkach o smukłości  $s \geq 1,5$ .

Intensywność uszkodzeń (spękań) w próbkach każdej smukłości zależy od wielkości przyłożonego obciążenia i wzrasta wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia.

Opisane tu formy uszkodzeń i zniszczeń zostały zarejestrowane fotograficznie i były zaprezentowane na 27 Polskiej Konferencji Mechaniki Ciała Stałego w Rytrze [67].

## 5. Porównanie wyników badań

Przeprowadzone eksperymenty pozwoliły na zbadanie zachowania się nowego elastooptycznego materiału krucho w warunkach osiowych obciążeń ściskających w dwóch zakresach prędkości odkształceń: małych (badania statyczne) i dużych (badania dynamiczne). Materiał ten jest wrażliwy na prędkość deformacji zarówno w obszarach sprężystych (znaczny wzrost modułu Younga) jak i w obszarach plastycznych (różne charakterystyki dynamiczne). Jest to doskonale widoczne dla próbek o smukłości  $s = 0,5$  na zbiorczym wykresie  $\sigma - \epsilon$  podanym na rysunku 19. Taki ośrodek nazywamy sprężysto-lepkoplastycznym [68].

Przy obciążeniach statycznych w porównaniu z dynamicznymi występuje większa deformacja sprężysta materiału. Jest to spowodowane tym, że przy małych prędkościach odkształcenia rejestruje się jednocześnie deformację czysto sprężystą i lepkosprężystą, które rozwijają się dostatecznie długo w czasie. Przy dużych prędkościach odkształcenia deformacje sprężyste mają

charakter natychmiastowy. Wzrost prędkości deformacji spowodował podwyższenie sprężystości materiału, ale również zmniejszenie jego wytrzymałości doraźnej. Na ten ostatni fakt ma wpływ charakter uszkodzenia i niszczenia próbki - ciągliwo-kruchy w przypadku obciążenia statycznego i kruchy przy obciążaniu dynamicznym.

Zastosowana wieloczynnikowa metoda badań umożliwiła zebranie wielu informacji dotyczących rozwoju mechanizmów pęknięcia i zniszczenia kruchego materiału modelowego (głównie w badaniach statycznych) oraz wniosków dotyczących metodyki badawczej. Potwierdziły się zalecenia odnośnie doboru smukłości walcowych ciał próbnych, przy których uzyskuje się w próbce jednoosiowy stan naprężenia:

- $s = 2$  w badaniach statycznych - w środkowej części próbki eliminuje się wpływ znacznych sił tarcia, które występują na powierzchni kontaktu próbki z płytą obciążającą,
- $s = 0,5$  w badaniach dynamicznych - w próbce eliminowane są efekty falowe.

Zastosowany przezroczysty materiał modelowy (elastoptyczny) umożliwił pełną wizualizację zachodzących zjawisk, a w szczególności:

- propagację szczelin,
- mechanizmy uszkodzeń i zniszczenia,
- linie płynięcia plastycznego,
- wpływ sił tarcia,
- koncentrację naprężeń wokół szczelin.

Duży wpływ na kształt krzywej naprężenie-odkształcenie oraz na mechanizm uszkodzeń i zniszczenia odgrywa geometria próbek. W badaniach dynamicznych dla próbek wysokich ( $s > 1$ ) otrzymuje się inny charakter krzywej  $\sigma$ - $\epsilon$  niż dla próbek niskich ( $s \leq 1$ ). W badaniach statycznych wpływ smukłości zaznaczył się dopiero na części pokrytycznej charakterystyki  $\sigma$ - $\epsilon$  (po osiągnięciu wytrzymałości doraźnej): kształt tej części krzywej silnie zależy od mechanizmu zniszczenia próbki. W badaniach dynamicznych uszkodzenia i zniszczenia próbek następuje poprzez pęknięcia podłużne oraz poprzeczne. Te ostatnie są obecne tylko w próbkach o smukłości  $s > 1$ . Obszar uszkodzeń i zniszczenia, który występuje od strony przyłożenia ob-

ciężenia (dla  $s=0,5$  na całej wysokości próbki) oraz intensywność uszkodzeń zależą od prędkości obciążenia. W badaniach statycznych w próbkach o smukłości  $s>1$  dominuje pękanie przy ścinaniu. W próbkach  $s=1$  występują ukośne ścięcia i podłużne rozłupania albo łuszczenia. W próbkach  $s=0,5$  powstają pęknięcia rozdzielcze wraz z łuszczeniem wokół powierzchni bocznych. Każdemu z tych mechanizmów odpowiada inna krzywa pozniszczeniowa na wykresie  $\sigma$ - $\epsilon$ . Uszkodzenie i zniszczenie obejmuje praktycznie całą objętość próbki, w przypadku  $s=1$  ma charakter osiowej symetrii. Obciążenia statyczne wywołują więc inną fragmentację próbek - drobniejszą o odmiennym charakterze niż obciążenia dynamiczne.

## Bibliografia

1. WOLNA M., KRUSZKA L.: Kruche materiały elastoptyczne w badaniach doświadczalnych stanu naprężenia i odkształcenia. Prace IPPT (w druku).
2. WOLNA M.: Specjalne kruche materiały elastoptyczne na podstawie żywicy Epidian 2. Materiały VIII Symposium Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego. Cz. 2, Warszawa 1978, 433-440.
3. WOLNA M.: Kruche materiały elastoptyczne na podstawie żywicy epoksydowej Epidian 2 i kalafonii. Materiały XI Symposium Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego. Warszawa 1984, 363-366.
4. WEHR J.: Pomiar prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych. PWN Warszawa 1972.
5. GUSTKIEWICZ J.: O zniekształceniach wyników testowania skał na jednoosiowe ściskanie. Archiwum Górnictwa 20,1,17-39, 1975.
6. PAWŁOWSKI Z.: Badania nieniszczące - Poradnik ODK SIMP, Warszawa 1984.
7. KLEPACZKO J.: Zmodyfikowany pręt Hopkinsona. Mechanika Teoretyczna i Stosowana 4,9,479-497, 1971.
8. KLEPACZKO J.: Badania doświadczalne lepkoplastyczności. W: Zastosowania lepkoplastyczności. Wyd. PAN, Warszawa 1971, 49-116.
9. KOLSKY H.: An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. Proc. Phys. Soc. 62B, 676-700, 1949.
10. LINDHOLM U.S.: Some experiments with split Hopkinson pressure bar. J. Mech. Phys. Solids, 12, 6, 317-335, 1964.
11. MAIDEN C.J., GREEN S.J.: Compressive strain-rate tests on six selected materials at strain rates from  $10^{-3}$  to  $10^4$  in/in/sec. J. of Appl. Mech., September, 496-504, 1966.
12. BILLINGTON E.W., BRISSENDEN C.: Mechanical properties of various polymeric solids tested in compression. Int. J. Mech. Sci. 13, 531-545, 1971.
13. GRIFFITHS L.J., PARRY D.J., WORTHINGTON R.P.: A comparison of optical and strain gauge techniques in the determination of the dynamic mechanical behaviour of carbon-fibre composite using a

split Hopkinson pressure bar. Int. Phys. Conf. Ser. No. 47, ch. 1, 62-70, 1979.

14. WALLY S.M., FIELD J.E., SWALL C.M., MENTHA S.N.: The response of various polymers to uniaxial compressive loading at very high rates of strain. J. Phys., 46, C5, 607-616, 1985.

15. BAI Y., HARDING J.: Fracture initiation in glass-reinforced plastics under impact compression. International Conference in Structural Impact and Crashwithness, Elsevier Applied Science Publishers, London and New York 1984, 482-493.

16. CHOU S.C., ROBERTSON K.D., RAINEY J.H.: The effect of strain rate and heat developed during deformation on the stress-strain curve of plastics. Exp. Mech, 13, 10, 422-432, 1973.

17. YALUN Y.: Characteristics of rock under high-speed impact loading. Proc. of the Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and Its Effects, Science Press, Beijing, China, 1986, 820-825.

18. KLEPACZKO J.: Zastosowanie metody zmodyfikowanego pręta Hopkinsona do udarowego badania skał. Rozpr. Inż. 28, 3, 381-399, 1980.

19. KLEPACZKO J.: On the rate sensitivity of coal. Rozpr. Inż. 31, 3, 341-360, 1983.

20. BUCHAR J., DUŠEK F.: The influence of loading rate on mechanical properties of rocks. Arch. Górnictwa 20, 2, 245-259, 1975.

21. KRZYSZTOŃ D., MIKOŚ T., STEWARSKI E.: Investigation of rock sample dynamic properties on the Hopkinson modified bar device. Arch. Górnictwa 31, 4, 661-688, 1986.

22. NIELICKI A.: Some remarks on the limitations of the application of the method of split Hopkinson's pressure bar. Arch. of Min. Sci. 32, 1, 109-121, 1987.

23. ATTEWELL P.B.: Response of rocks high velocity impacts. Bull. of the Inst. of Min. and Metallurgy No 670, 705, 1962, Transactions, 71, 1961-62, part 12.

24. HAKALEHTO K.O.: The behaviour of rock under impulse loads - a study using Hopkinson split bar method. Acta Polytech. Scandinavia, chap. 81, 1969.

25. LUNDBERG B.: A split Hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 13,

187-197, 1976.

26. CHRISTENSEN R.J., SWANSON S.R., BROWN W.S.: Split Hopkinson bar tests on rock under confining pressure. *Exp. Mech.* **12**, 1, 500, 1972.

27. LINDHOLM V.S., YEAHLEY L.H., NAGY A.: The dynamic strength and fracture properties of Drosser basalt. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **11**, 181-191, 1974.

28. KLEPACZKO J.: Pseudo-viscous approach to properties of coal under impact loadings. *Archiwum Górnictwa* **29**, 3, 279-307, 1984.

29. MALVERN L.E., JENKINS D.A., TANG T., ROSS C.A.: Compressive split Hopkinson bar testing of concrete. *Proc. of the Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and Its Effects*. Science Press, Beijing, China 1986, 726-731.

30. BHARGAVA J., REHNSTROM A.: Dynamic strength of polymer modified and fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, **7**, 198-208, 1977.

31. GOLDSMITH W., POLIVKA M., YANG T.: Dynamic behaviour of concrete. *Exp. Mech.*, **6**, 65, 1966.

32. BIRKIMER D.L., LINDEMAN R.: *Am. Conc. Inst. J.*, **6**, 47, 1971.

33. JAHSMAN W.E.: Reexamination of the Kolsky technique for measuring dynamic material behaviour. *J. Appl. Mech.* **41**, p. 137, 1974.

34. BETHOLF L., KERNES C.H.: two-dimensional analysis of the split Hopkinson pressure bar system. *J. Mech. Phys. Sol.*, **23**, 1, 1975.

35. CAZENEUVE C., MAILE J.C.: Etude du comportement de composites a fibres de carbone sous differentes vitesses de deformation. *J. de Phys.* **46**, 8, 551-555, 1985.

36. BAUER J.: Considerations on the design of a stiff testing machine. *Studia Geotechnica et Mechanica*, **4**, 3-4, 3-14, 1982.

37. NELSON A.C., WANG C.Y.: Non-destructive observation of internal cracks in stressed rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **14**, 103-107, 1977.

38. HOEK E.: Rock mechanics laboratory testing in the context of a consulting engineering organisation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **14**, 93-101, 1977.

39. HOBLER M.: *Badania fizykomechaniczne własności skał*. PWN Warszawa 1977.



40. ZAWADA J.: Experimental analysis of a rock block compressed between two plates. *Rozpr. Inż.*, 28,1, 129-137, 1980.
41. HARPALIANI S.: Specimen preparation for testing coal properties. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 25, 327-330, 1988.
42. KRUSZKA L., NOWACKI W.K., WOLNA M.: Experimental investigations of fracture mechanisms in brittle photoelastic material. W: *Proc. VII European Conference on Fracture, Budapest 1988*, vol. 2, 523-525.
43. HOLZHAUSEN G.R., JOHNSON A.H.: Analyses of longitudinal splitting of uniaxially compressed rock cylinders. In *J. Rock Mech. Min. Sci.*, 16, 163-177, 1979.
44. WAWERSIK W.R., BRACE W.F.: Post-failure behaviour of a granite and diabase. *Rock Mechanics*, 3,2, 61-85, 1971.
45. YANAGIDANI T., EHARA S., NISHIZAWA O., KUSONOSE K.: Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant uniaxial stress. *J. Geophys. Res.* 90, 6840-6858, 1985.
46. LIN H.P., LIVANOS A.C.R.: Dilatancy and precursory bulging along incipient fracture zone in uniaxially compressed Westerly granite. *J. Geophys. Res.* 81, 3495-3510, 1976.
47. KRANZ R.L.: Crack growth and development during creep of Barre granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 16, 23-25, 1979.
48. FRIEDMAN M., PERKINS R.D., GREEN S.J.: Observations of brittle deformation features at the maximum stress of Westerly granite and Solenhofen limestone. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 7, 297-306, 1970.
49. SCHOLZ C.H.: Experimental study of the fracturing process in brittle rock. *J. Geophys. Res.* 73, 1447-1454, 1968.
50. LIVŠIĆ L.D., GABRILOV B.T.: Istočniki akustičeskoj emisji i očaj pazrušenja. *Doklady Akad. Nauk SSSR.* 292, 3, 572-575, 1987.
51. READ H.E., HEGEMIER G.A.: Strain softening of rock, soil and concrete - a review article. *Mech. of Mat.* 3, 271-294, 1984.
52. KWAŚNIEWSKI H.: Wpływ stanu naprężenia, temperatury i prędkości odkształcenia na mechaniczne własności skał. *Arch. Górn.* 31, 2, 383-415, 1986.
53. CHONG K.P., HOYT P.M., SMITH J.W., PAULSEN B.Y.: Effects of strain rate on oil shale fracturing. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 17, 35-43, 1980.

54. JAROSZEWSKA A.: Badania wpływu fazy odkształcenia niektórych skał na parametry emisji akustycznej. Technika poszukiwań geologicznych, 1 (121), 28-33, 1986.
55. PATAS P.: Własności betonu łupkoporytowego w stanie dwukierunkowego ściskania. Archiwum Inżynierii Lądowej, 19, 549-565, 1973.
56. LOBODA P., SZOSTEK M.: Wpływ wielkości ciała próbnego na wytrzymałość zapraw budowlanych. Inż. i Bud. 1/81 oraz Odpowiedź Autorów. Inż i Bud. 8-9, 219-220, 1982.
57. MIASTKOWSKI J.: Mechaniczne własności materiałów przy rozciąganiu i ściskaniu. Prace IPPT nr 43/1976.
58. RADU C., RUGINA I., WINTER G., WINTER W.: Dependence of acoustic emission signal statistic characteristics in brittle rocks on the change of uniaxial compressive load. Rev. Roum. Sci. Techn.-Mec. Appl. 27, 3, 391-400, 1982.
59. HAMSTAD M.A.: A review : acoustic emission, a tool for composite materials studies. Exp. Mech. 3, 7-13, 1986.
60. LAUGHNER J.W., CLINA T.W., NEWNHAM R.E., CROSS L.E.: Acoustic emissions from stress-induced dauphine' twinning in quartz. Phys. Chem. Minerals. 4, 2, 129-137, 1979.
61. IVANOV V.I.: Akustičeskaja emisja v procese kogerentnogo razrušenja. Doklady Akad. Nauk SSSR. 287, 2, 302-306, 1986.
62. FRĄCKIEWICZ R., WALA D., RANACHOWSKI J.: Powiązanie emisji akustycznej z propagacją pęknięć w warunkach uprzywilejowanego pęknięcia w zależności od składu i struktury wybranych materiałów kruchych. W: Elektryczne i akustyczne metody badań materiałów i struktur biologicznych. Warszawa - Jabłonna, IPPT PAN, SEP, 1984, 241-258.
63. KOLTOŃSKI W.: O niektórych możliwościach wykorzystania zjawiska emisji akustycznej w budownictwie. Inżynieria i Budownictwo nr 11(469) 401-404, 1984.
64. KOLTOŃSKI W.: Pomiar poziomu emisji akustycznej w konstrukcjach budowlanych. Inżynieria i Budownictwo nr 3, 95-97, 1986.
65. BRADY B.T.: An investigation of the scale invariant properties of failure, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 14, 1977.

66. REYMOND M.C., BILLAUD J.: Emission acoustique dans les roches calcaires. a differentes echelles. Revue d'acoustique nr 52, 1980.
67. KRUSZKA L., NOWACKI W.K., WOLNA M.: Fracture behaviour of brittle photoelastic material. Abs. of 27th Polish Solid Mechanics Conference and Symposium on Inelastic Solids and Structures Rytro, IPPT PAN, 99,1988.
68. NOWACKI W.K.: Zagadnienia falowe w teorii plastycznosci. PWN Warszawa 1974.

## Podpisy pod rysunkami

Rys. 1. Badanie elastoptyczne próbki walcowej zanurzonej w cieczy immersyjnej. K - kamera (aparatus) fotograficzna, A - analizator, P - polaryzator, M - matówka, Z - źródło światła,  $\lambda/4$  - filtr ćwierćfalowy, 1 - próbka, 2 - ciecz immersyjna.

Rys. 2. Zależność siły ściskającej F działającej na próbkę AV/7 ( $s=0,5$ ) od przemieszczenia  $\Delta h$ . t - oś czasu pomiaru.

Rys. 3. Zależność siły ściskającej F działającej na próbkę BV/6 ( $s=1$ ) od przemieszczenia  $\Delta h$ . t - oś czasu pomiaru.

Rys. 4. Zależność siły ściskającej F działającej na próbkę CV/4 ( $s=1,5$ ) od przemieszczenia  $\Delta h$ . t - oś czasu pomiaru.

Rys. 5. Zależność siły ściskającej F działającej na próbkę DIV/3 ( $s=2$ ) od przemieszczenia  $\Delta h$ . t - oś czasu pomiaru.

Rys. 6. Zależność między siłą ściskającą F i przemieszczeniem  $\Delta h$  z czterema (I - IV) cyklami obciążenie-odciążenie w obciążanej osiowo próbce AIV/4 ( $s = 0,5$ ).  $F_c$  - średnia wytrzymałość doraźna uzyskana w badaniach bez odciążania dla próbek  $s = 0,5$ .

Rys. 7. Zależność między siłą ściskającą F i przemieszczeniem  $\Delta h$  z czterema cyklami obciążenie-odciążenie w obciążanej osiowo próbce BI/1 ( $s=1$ ).  $F_c$  - średnia wytrzymałość doraźna uzyskana w badaniach bez odciążania dla próbek  $s = 1$ .

Rys. 8. Zależność między siłą ściskającą F i przemieszczeniem  $\Delta h$  z czterema cyklami obciążenie-odciążenie w obciążanej osiowo próbce CIII/2 ( $s=1,5$ ).  $F_c$  - średnia wytrzymałość doraźna uzyskana w badaniach bez odciążania dla próbek  $s = 1.5$ .

Rys. 9. Zależność między siłą ściskającą F i przemieszczeniem  $\Delta h$  z czterema cyklami obciążenie-odciążenie w obciążanej osiowo próbce DIV/1 ( $s=2$ ).  $F_c$  - średnia wytrzymałość doraźna uzyskana w badaniach bez odciążania dla próbek  $s = 2$ .

Rys. 10. Zbiorczy wykres statycznych zależności średniego naprężenia nominalnego  $\sigma$  od odkształcenia globalnego  $\epsilon$  dla różnych smukłości s próbek.  $E_o$  - średni statyczny moduł Younga,  $\dot{\epsilon}$  - prędkość odkształcenia.

Rys. 11. Technika pomiaru sygnałów emisji akustycznej z użyciem elementu pośredniczącego. 1 - obciążana próbka, 2 - detektor typu rezonansowego (zakres pomiaru 50-600 kHz, max. 250 kHz), 3 -

element pośredniczący (zabezpieczenie przed uszkodzeniem detektora podczas badań niszczących), F - siła ściskająca.

Rys. 12. Wykres sygnału emisji akustycznej  $N/\Delta t$  (ilość impulsów w jednostce czasu) w czasie pomiaru t dla próbki BV/6.

Rys. 13. Wykres sygnału emisji akustycznej RMS (wartość skutecznej sygnału napięcia) w czasie pomiaru t dla próbki BV/6.

Rys. 14. Schemat ideowy stanowiska badawczego - zmodyfikowany pręt Hopkinsona. Oznaczenia podano w tekście.

Rys. 15. Zbiorczy wykres zależności:  $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ ,  $\bar{\sigma}-t$ ,  $\dot{\epsilon}-t$  i  $\dot{\epsilon}-\bar{\epsilon}$  dla próbki CIII/1 ( $s=1,5$ ) obciążonej dynamicznie.

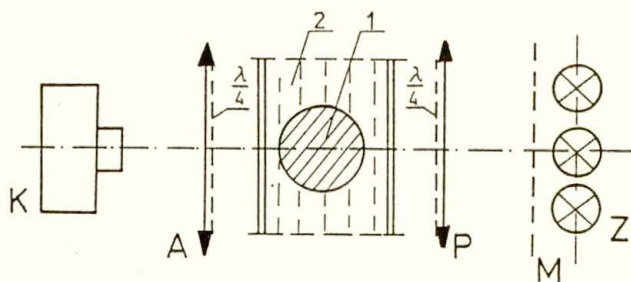
Rys. 16. Zbiorczy wykres zależności:  $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ ,  $\bar{\sigma}-t$ ,  $\dot{\epsilon}-t$  i  $\dot{\epsilon}-\bar{\epsilon}$  dla próbki CIII/3 ( $s=1,5$ ) obciążonej dynamicznie.

Rys. 17. Zbiorczy wykres zależności:  $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ ,  $\bar{\sigma}-t$ ,  $\dot{\epsilon}-t$  i  $\dot{\epsilon}-\bar{\epsilon}$  dla próbki DIV/2 ( $s=2$ ) obciążonej dynamicznie.

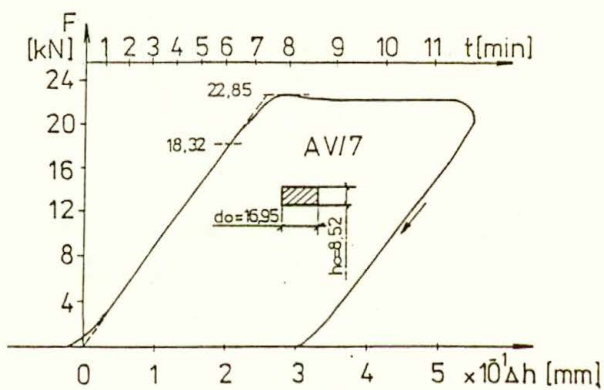
Rys. 18. Zbiorczy wykres zależności:  $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ ,  $\bar{\sigma}-t$ ,  $\dot{\epsilon}-t$  i  $\dot{\epsilon}-\bar{\epsilon}$  dla próbki DVI/7 ( $s=2$ ) obciążonej dynamicznie.

Rys. 19. Zbiorczy wykres dynamicznych krzywych  $\sigma-\epsilon$  dla próbek o różnej smukłości s i różnych prędkości odkształceń  $\dot{\epsilon}$ . E - dynamiczny moduł Younga. Na rysunku podano też krzywą statyczną  $\sigma-\epsilon$  dla  $s=0,5$ . Oznaczenia próbek: 1 - AII/2, 2 - AV/6, 3 - BII/2, 4 - CIII/1, 5 - CIII/3, 6 - DVI/7, 7 - DIV/2.

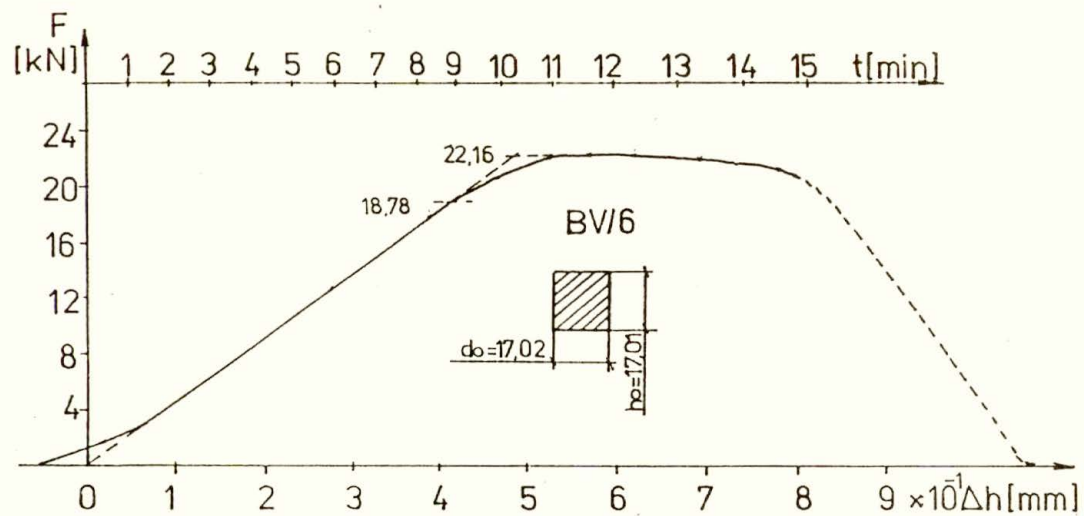
Rys. 20. Krzywe  $\sigma-\epsilon$ : dynamiczne i statyczne dla próbki walcowej o smukłości  $s=0,25$  wykonanej z żywicy epoksydowej [35].



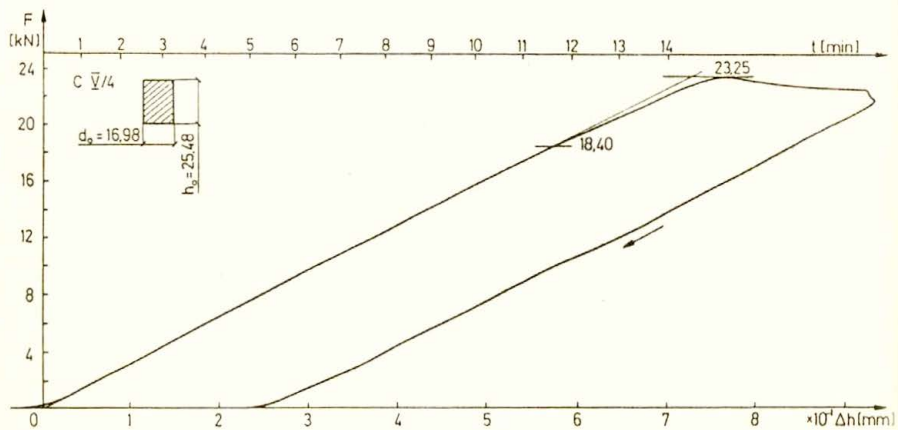
Rys. 1



Rys. 2

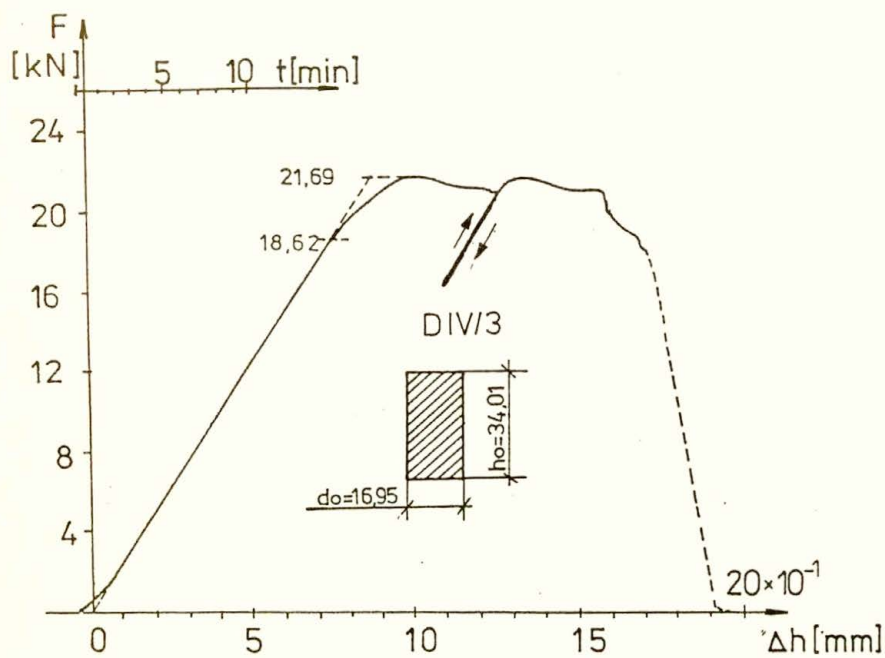


Rys. 3

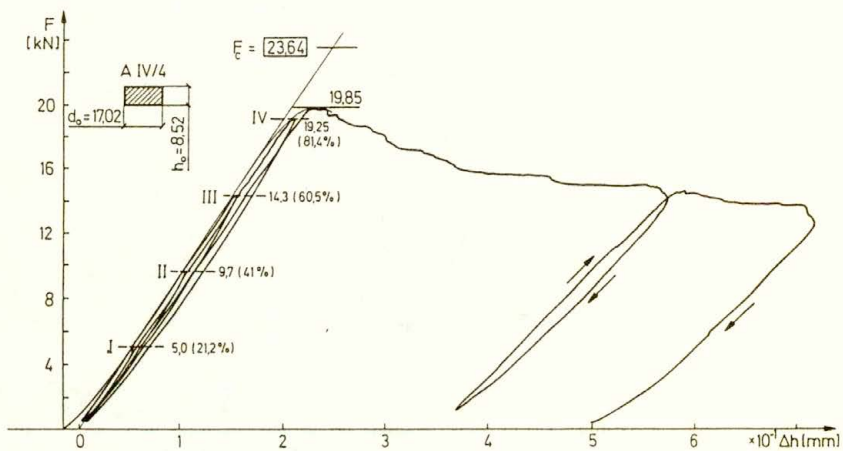


Rys. 4

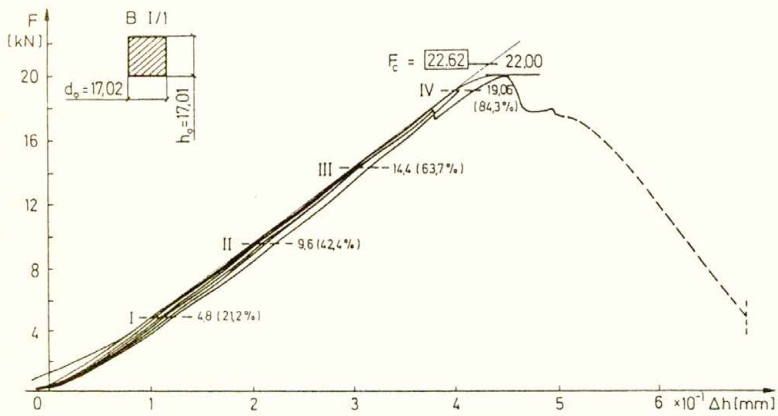




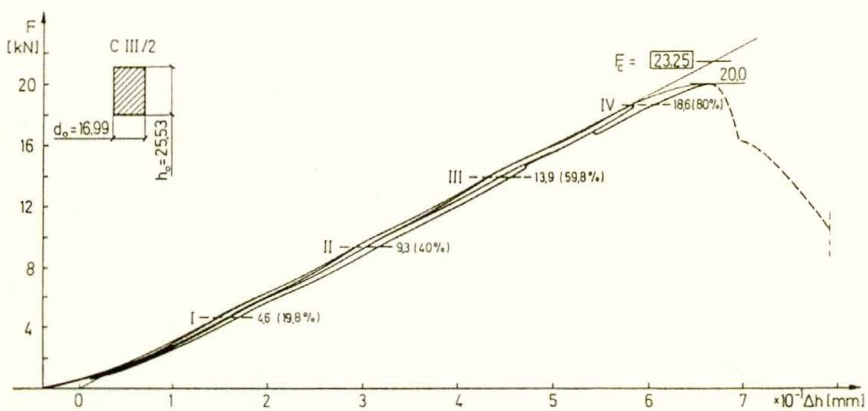
Rys.5



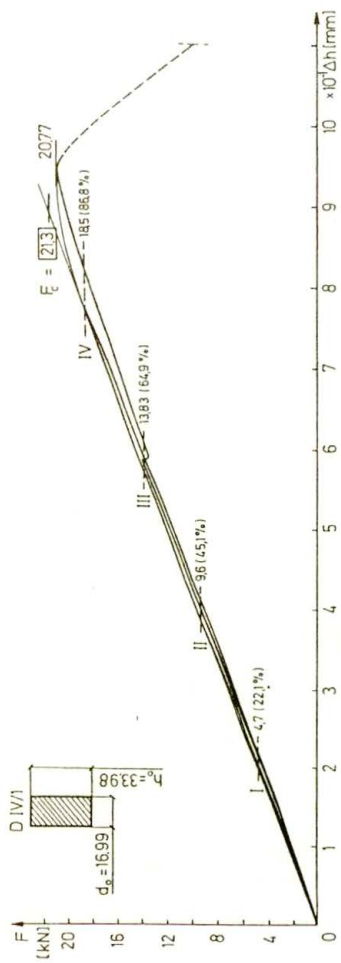
Rys. 6



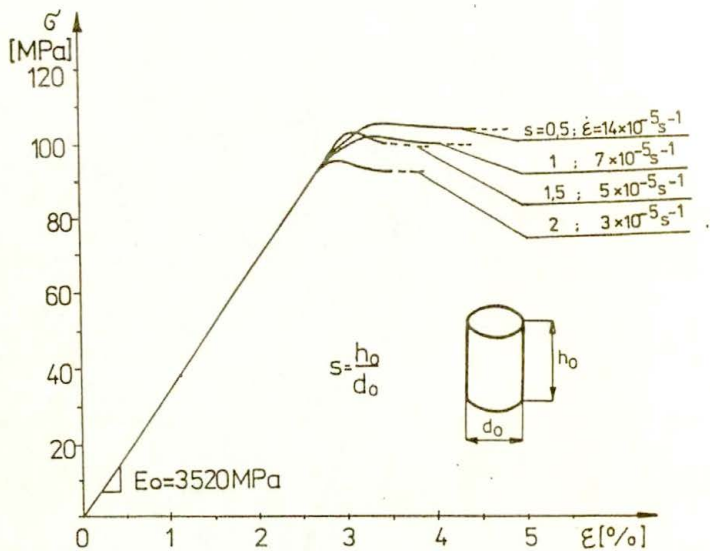
Rys. 7



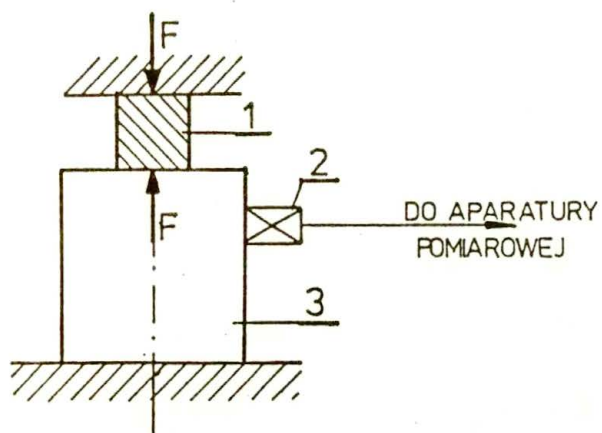
Rys. 8



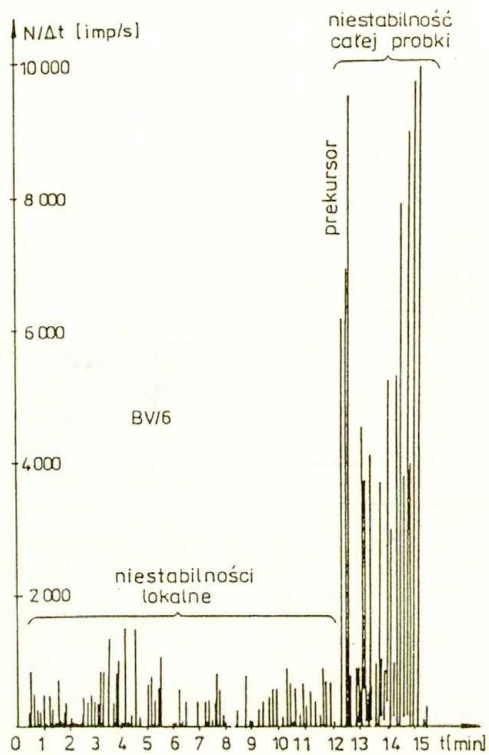
Rys. 9



Rys. 10

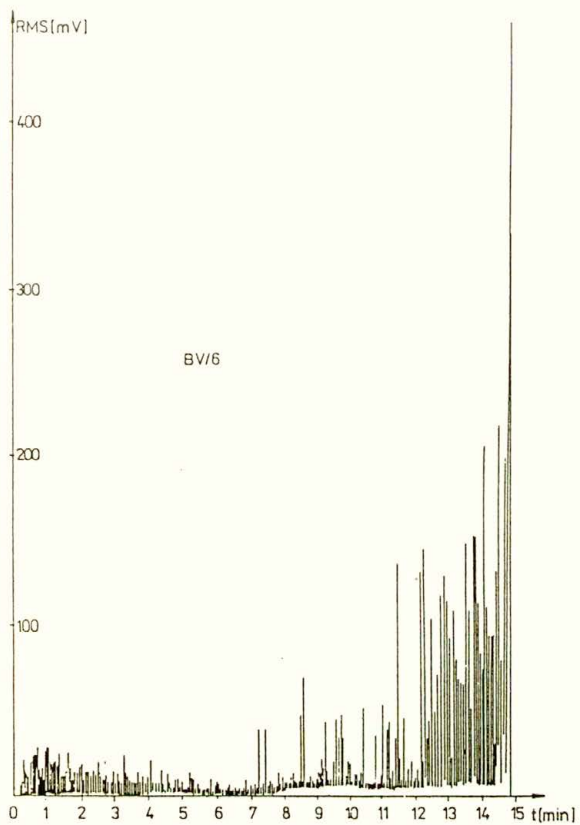


Rys. 11

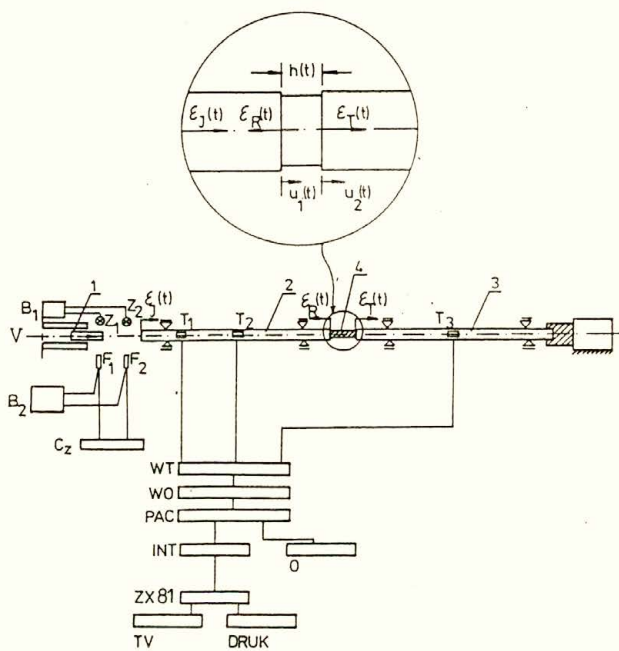


Rys. 12

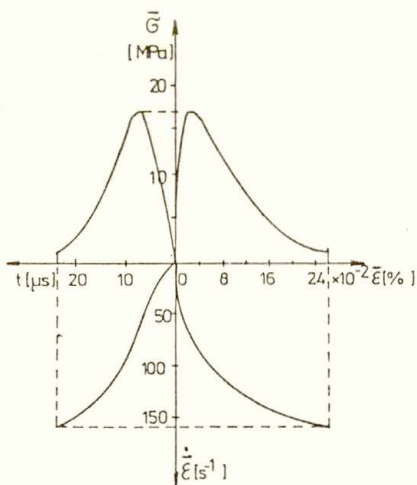




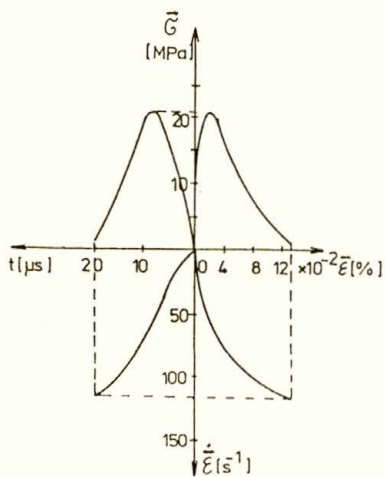
Rys.13



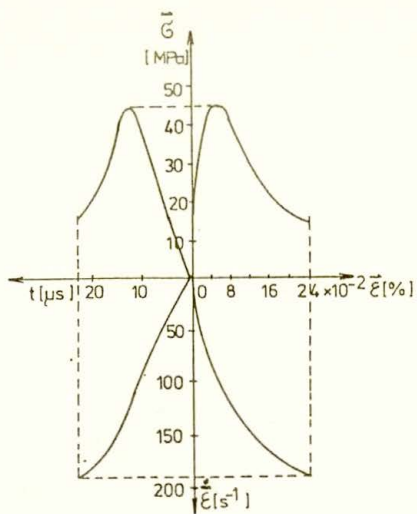
Rys. 14



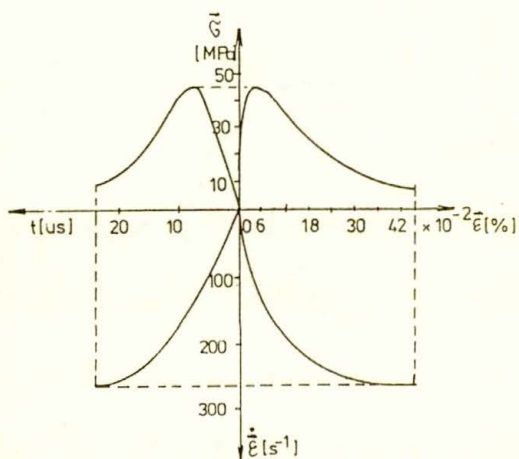
Rys. 15



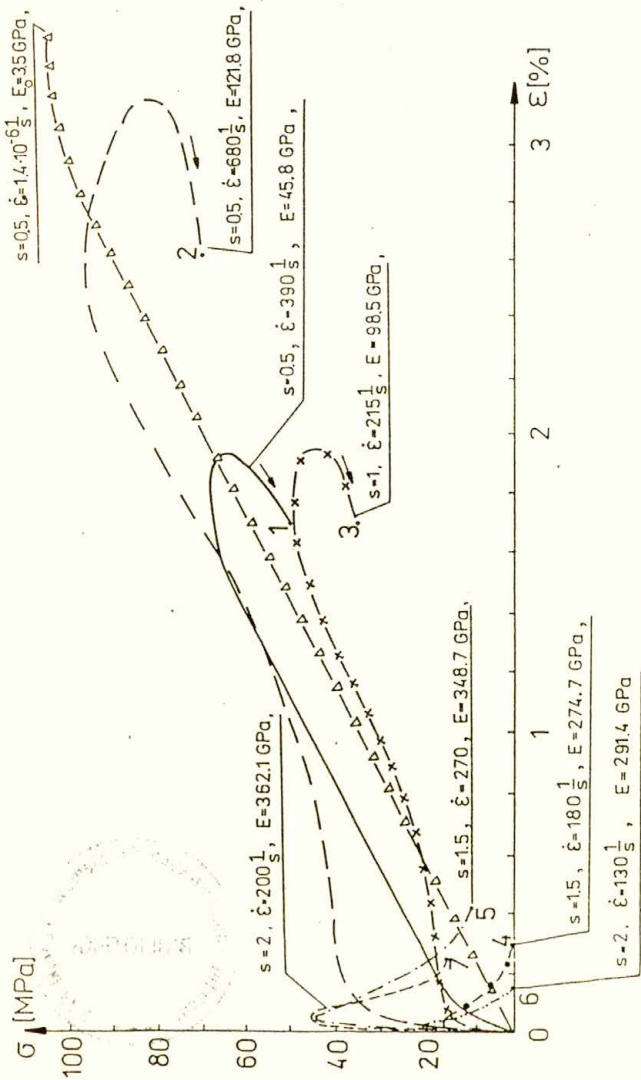
Rys. 18



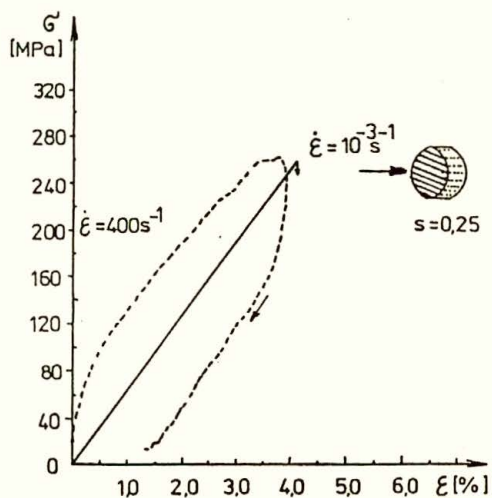
Rys. 17



Rys. 16



Rys.19



Rys. 20



56734