

## DOŚWIADCZALNE METODY WYZNACZANIA DYNAMICZNYCH CHARAKTERYSTYK UMOCNIENIA MATERIAŁÓW W STANIE PLASTYCZNYM (\*)

J. R. KLEPACZKO (WARSZAWA), W. W. WIKTOROW  
i G. S. SZAPIRO (MOSKWA)

Obecnie istnieje wiele metod badawczych wyznaczania dynamicznych charakterystyk umocnienia metali i innych materiałów plastycznych przy dużych prędkościach deformacji. W pracy przedstawiono opis i analizę dwóch metod, które można uznać za podstawowe, mianowicie dynamiczne rozciąganie próbek pierścieniowych oraz technikę zmodyfikowanego pręta Hopkinsona, gdzie stosuje się ściskanie krótkich walcowych próbek. W pierwszej metodzie omówiono jej poszczególne odmiany, w szczególności wykorzystujące silne pole magnetyczne oraz materiały wybuchowe. W przypadku zmodyfikowanego pręta Hopkinsona przedstawiono różne możliwości pomiarowe. Dla każdej z metod podano podstawowe zależności opisujące proces deformacji i służące do analizy wyników ilustrując je przykładami doświadczalnymi. Przedyskutowano również podstawowe wady i zalety każdej z nich.

### UWAGI WSTĘPNE

Optymalne wykorzystanie materiałów konstrukcyjnych w zastosowaniach praktycznych wymaga dokładnego poznania ich charakterystyk wytrzymałościowych w każdych warunkach obciążenia. Od dawna zaobserwowano, że materiały znajdujące się w stanie sprężystym wykazują takie same własności wytrzymałościowe. Głównie stwierdzenie to odnosi się do wszystkich stałych sprężystości, zarówno podczas obciążeń statycznych jak i dynamicznych. Na przykład ilościowe różnice pomiędzy izotermicznym i adiabatycznym modułem Younga są pomijalnie małe. Jednak większość materiałów wykazuje powyżej granicy sprężystości zdolności do odkształceń niesprężystych. Stwierdzono, że skala czasu w procesie deformacji w zakresie odkształceń niesprężystych wykazuje znaczny wpływ na związek pomiędzy naprężeniem a deformacją. Do wyjątków zalicza się tu jedynie pewne gatunki stali po obróbce termicznej oraz niektóre stopy aluminium.

W zakresie dużych prędkości deformacji w zasadzie począwszy od wartości  $\dot{\epsilon} = 10^2 \text{ s}^{-1}$  napotyka się znaczne trudności w technice doświadczalnej. Eliminacja niepożądanych sił inercyjnych oraz innych zaburzeń podczas pomiarów staje się niezwykle trudna. Fakt ten sprawia, że publikowane w literaturze dane są niekiedy nawet sprzeczne.

(\*) Praca wykonana w ramach współpracy pomiędzy Instytutem Problemów Mechaniki AN-ZSRR (Moskwa) Instytutem Podstawowych Problemów Techniki PAN (Warszawa).

Celem niniejszej pracy jest omówienie niektórych metod badawczych rozwijanych ostatnio zarówno w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN jak i Instytucie Problemów Mechaniki AN-ZSRR, które wydają się być perspektywiczne. Dalszym celem pracy jest przedstawienie niektórych uzyskanych wyników. Omawiane niżej metody odnoszą się do zakresu dużych prędkości deformacji  $5 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ , a więc w przybliżeniu jeden rząd dziesiętny.

## 2. DYNAMICZNE ROZPĘCZANIE PIERSCIENI

Metoda dynamicznego rozpęczania cienkich pierścieni lub cienkościennych próbek rurkowych pozwala na uzyskiwanie dużych prędkości deformacji przy równoczesnym zachowaniu jednorodnego stanu naprężenia w próbce. Pierwszą próbę zastosowania rozpęczania stalowych próbek rurkowych w procesie dynamicznym opisano w pracy [9]. Jednak ostatnio stosuje się coraz częściej krótkie rozpęczane dynamicznie pierścienie o stosunkowo dużej średnicy i małej grubości. Tego rodzaju technikę doświadczalną opisano w pracy [8], gdzie użyto materiału wybuchowego wraz z pierścieniem pośredniczącym, na zewnątrz którego umieszczono cienkościenną pierścieniową próbkę. W ten sposób próbka pierścieniowa zostaje poddana jednorodnemu promieniowemu polu prędkości. Oprócz wymuszenia ruchu próbki za pomocą eksplozji materiału wybuchowego również często stosuje się wymuszenie magnetyczne, spowodowane nagłym działaniem odpowiednio silnego pola magnetycznego na próbkę pierścieniową. Ten rodzaj wymuszenia zastosowano w pracy [2]. Ostatnio wymuszenie magnetyczne zastosowano nie tylko w procesie rozpęczania [5], lecz także w procesie radialnego obciskania pierścienia [4 i 7].

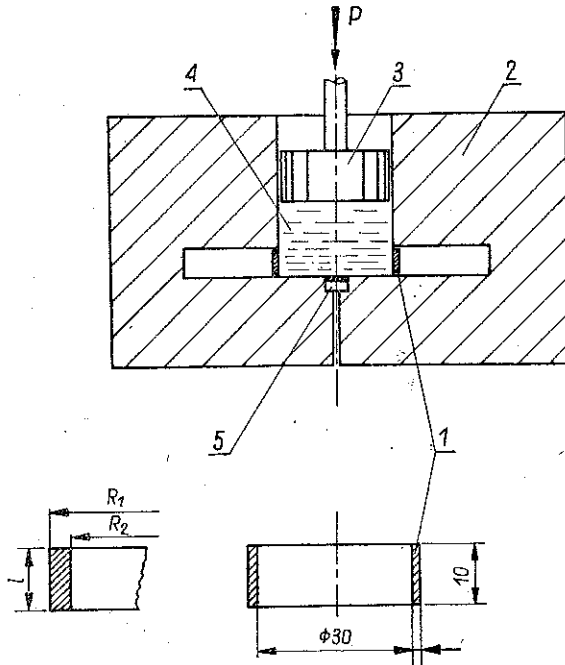
Opis metody dynamicznego rozpęczania próbek pierścieniowych wraz z odpowiednimi wzorami służącymi do wyznaczenia dynamicznej charakterystyki «naprężenie-dokształcenie» zamieszczono w pracy [3]. W pracy tej podano również wyniki wstępnych badań dla stali 1020, stopu aluminium 6061-T6 oraz stopu tytanu Ti-6AL-4V oznaczenia wg ASTM (\*).

Z ogólnego punktu widzenia metoda rozpęczania próbek pierścieniowych wykazuje tę zaletę w porównaniu z innymi metodami, że znacznie ograniczona jest możliwość powstania procesów propagacji sprężysto-plastycznych fal w próbce. Stąd stan naprężenia jest bardzo zbliżony do jednoosiowego i wykazuje dużą jednorodność wzdłuż obwodu pierścienia, jednak w przypadku kiedy zostaje zachowany warunek stałej prędkości początkowej  $v_{or}(\theta) = \text{const}$  w momencie zapoczątkowania ruchu próbki, gdzie  $\theta$  oznacza współrzędną kątową. Natomiast niedogodność metody stanowi zmienna prędkość odkształcenia w procesie deformacji pierścienia. Prędkość odkształcenia zmienia się w tym przypadku od wartości maksymalnej do wartości zerowej, gdy pierścień nie zostaje rozerwany, lub do wartości minimalnej w przypadku rozerwania pierścienia w końcowym etapie procesu deformacji.

Metoda dynamicznego rozpęczania pierścieni jest intensywnie rozwijana w Instytucie Problemów Mechaniki AN-ZSRR w Moskwie.

(\*) Stal 1020 odpowiada stali 20 wg PN/H-84019, stop 6061-T6 odpowiada stopowi PA4 w stanie przesyconym i sztucznie starzonym wg PN-59/H-88026.

Celem porównania wyników badań dynamicznych ze statycznymi w IPM-AN-ZSRR przeprowadzono serię doświadczeń powolnego rozpęczania pierścieni na urządzeniu hydraulicznym, którego schemat wraz z wymiarami próbki przedstawiono na rys. 1. W korpusie przyrządu 2 umieszczony jest tłok 3, który przez ciecz przekazującą 4 wywiera od wewnątrz radialne ciśnienie na pierścieniową próbkę 1. Pomiar ciśnienia cieczy na ścianki próbki odbywa się za pomocą czujnika membra-



Rys. 1. Schemat urządzenia IPM AN ZSRR do statycznego rozpęczania próbek pierścieniowych wraz z wymiarami próbki: 1 — próbka pierścieniowa, 2 — korpus, 3 — tłok

nowego 5 z elementem sprężystym, na który naklejono czujnik elektrooporowy. Odształcenia obwodowe próbki są mierzone również przy użyciu czujników elektrooporowych wykazujących liniowość wskazań do odształcenia w przedziale  $0,08 \div 0,10$ .

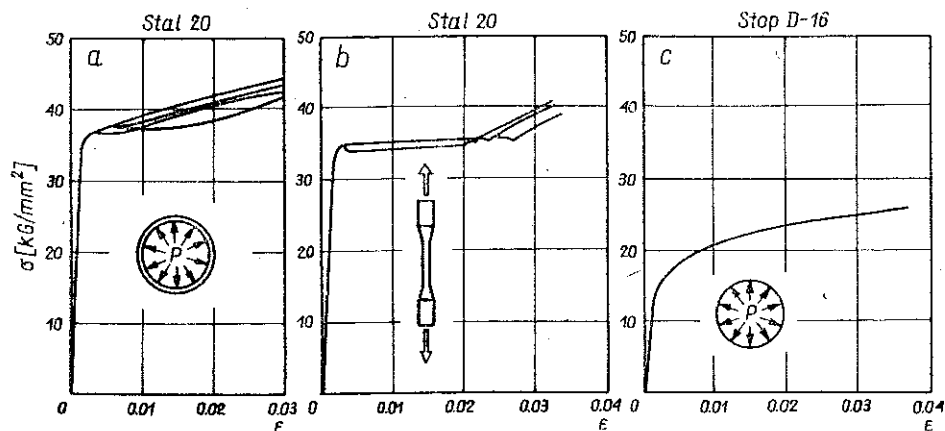
Tego rodzaju badania przeprowadzono dla stali 20 oraz stopu aluminium o wysokiej wytrzymałości D-16 (oznaczenia wg GOST (\*)). Wyniki tych doświadczeń w postaci krzywych umocnienia podano na rys. 2a i 2b (stal 20) oraz na rys. 2c (stop D-16). Dla porównania na rys. 2b. zamieszczono wyniki standardowej próby rozciągania dla stali 20, które zostały uzyskane na maszynie typu kinematycznego.

Porównanie wyników prób wykazuje, że w przypadku próbek pierścieniowych podczas procesu deformacji stali 20 nie pojawia się dolna i górna granica plastyczności, a proces wzmocnienia rozpoczyna się prawie natychmiast. Krzywe umocnienia

(\*) Stop D-16 odpowiada stopowi PA7 wg PN-59/H-88026.

stali 20 stają się podobne dla obydwu metod deformacji przy większych odkształceniach. Różnice w przedziale małych odkształceń wynikają z innego schematu obciążenia próbek.

Istotą prób dynamicznego rozciągania pierścieni jest nadanie próbce odpowiednio dużej początkowej prędkości radialnej  $v_{or}$ . Zmagazynowana w ten sposób energia kinematyczna pierścienia zostaje stopniowo zamieniona na pracę deformacji plastycznej, gdyż próbka deformuje się nadal podczas swobodnego ruchu. Stąd



Rys. 2. Wyniki prób rozciągania dla stali 20 otrzymane na próbkach pierścieniowych, a także z standardowej próby rozciągania na próbkach walcowych, rys. 2a i 2b; wyniki prób rozciągania otrzymane na duralowej próbce pierścieniowej, rys. 2c

w procesie deformacji pierścienia występują dwie fazy: faza ruchu początkowego, podczas której następuje wzrost radialnej prędkości pierścienia oraz faza ruchu swobodnego, podczas której pierścień deformuje się z malejącą prędkością. Rozważenie równania ruchu pierścienia podczas drugiej fazy pozwala na uzyskanie naprężenia obwodowego:

$$(2.1) \quad \sigma = -\rho \frac{(R_{01}^2 - R_{02}^2)}{2(R_1 - R_2)} \frac{l_0}{l} \ddot{R},$$

gdzie  $\sigma$  oznacza naprężenia obwodowe,  $\rho$  gęstość materiału pierścienia,  $R_{01}$  i  $R_1$  odpowiednio początkowy i bieżący zewnętrzny promień pierścienia,  $R_{02}$  i  $R_2$  odpowiednio początkowy i bieżący wewnętrzny promień pierścienia,  $l_0$  i  $l$  odpowiednio początkową i bieżącą wysokość pierścienia oraz

$$(2.2) \quad \ddot{R} = \frac{1}{2} (\ddot{R}_1 + \ddot{R}_2),$$

gdzie  $R$  oznacza średni promień pierścienia.

W celu zastosowania równania (2.1) do analizy wyników doświadczalnych należy wykorzystać warunek nieściśliwości

$$(2.3) \quad \frac{l_0}{l} = \frac{R_1^2 - R_2^2}{R_{01}^2 - R_{02}^2},$$

stąd po uwzględnieniu warunku (2.3) we wzorze (2.1) otrzymuje się

$$(2.4) \quad \sigma = -\frac{\rho}{4}(R_1 + R_2)(\dot{R}_1 + \dot{R}_2).$$

W przypadku cienkich pierścieni  $R_1/R_2 \approx 1$  i równanie (2.4) redukuje się do postaci następującej:

$$(2.5) \quad \sigma(t) = -\rho R(t) \dot{R}(t).$$

Tak więc pomiar zmian promienia jako funkcji czasu  $R(t)$  podczas deformacji próbki pierścieniowej pozwala na jednoznaczne wyznaczenie odkształcenia  $\varepsilon(t)$  oraz po dwukrotnym zróżniczkowaniu funkcji  $R(t)$  względem czasu pozwala także na wyznaczenie  $\sigma(t)$ . Po eliminacji czasu można wyznaczyć krzywą umocnienia  $\sigma(\varepsilon)$ , a także historię prędkości deformacji  $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ . Pomiar przemieszczeń zewnętrznego promienia próbki jako funkcji czasu musi być bardzo dokładny, a to ze względu na konieczność dwukrotnego różniczkowania tej funkcji z odpowiednią dokładnością.

Odształcenie i prędkość odkształcenia jako funkcji czasu oblicza się ze wzorów

$$(2.6) \quad \varepsilon(t) = \frac{R(t)}{R_0} - 1,$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{R}(t)}{R_0}.$$

W przypadku wykorzystania miary odkształceń logarytmicznych  $\varphi$  wzory przyjmą postać

$$(2.7) \quad \varphi(t) = \ln \frac{R(t)}{R_0},$$

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{\dot{R}(t)}{R_0}.$$

Podczas pierwszej fazy deformacji, gdy próbka deformuje się jeszcze pod działaniem od wewnątrz ciśnienia  $p(t)$ , można napisać wzór

$$(2.8) \quad \sigma(t) = R(t) \left[ \frac{p(t)}{g(t)} - \rho \dot{R}(t) \right],$$

gdzie  $g(t)$  oznacza zmianę grubości w trakcie procesu deformacji:

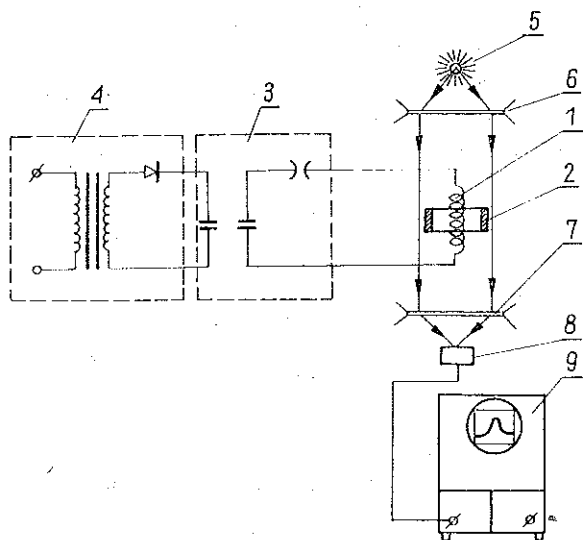
$$g(t) = R_1(t) - R_2(t).$$

W przypadku próby dynamicznej pomiar  $p(t)$  jest zwykle utrudniony i stąd wzór (2.8) jest głównie wykorzystywany w badaniach statycznych z pominięciem drugiego wyrazu z  $\dot{R}$ . Gdy w próbach dynamicznych stosuje się metodę elektromagnetyczną, to funkcję  $p(t)$  można obliczyć na podstawie pomiaru parametrów

elektrycznych. Dla tego przypadku  $p(t)$ , zgodnie z danymi prac [5 i 4], przyjmie postać

$$p(t) = \frac{\mu i_1(t) i_2(t)}{2l^2},$$

gdzie odpowiednio  $\mu$  oznacza przenikliwość magnetyczną pomiędzy obwodem pierwotnym a wtórnym (próbka),  $i_1(t)$  prąd płynący w obwodzie pierwotnym (pierścieni indukujący),  $i_2(t)$  prąd płynący w obwodzie wtórnym przez próbkę. Należy dodać, że w metodzie indukcyjnej można do pewnego stopnia sterować prądem, co w pewnych przypadkach polepsza kształt historii deformacji  $\dot{\epsilon}(t)$ , tj. rozkład prędkości odkształcenia jako funkcji czasu jest bardziej równomierny.



Rys. 3. Schemat urządzenia do dynamicznego rozpędzania próbek pierścieniowych metodą magnetyczną: 1 — induktor, 2 — próbka, 3 — bateria kondensatorów, 4 — blok zasilania, 5 — źródło światła, 6 i 7 — systemy optyczne, 8 — fotopowielacz, 9 — oscyloskop z kamerą

Podstawowy schemat w metodzie wymuszenia magnetycznego przedstawiono na rys. 3. Całe urządzenie składa się z czterech podzespołów: induktora 1 wraz z próbką 2, baterii kondensatorów 3, bloku zasilającego 4 oraz układu pomiarowego, w skład którego wchodzi następujące elementy: źródło światła 5, dwa systemy optyczne 6 i 7, fotopowielacz 8 i oscyloskop z kamerą 9.

W przedstawionym układzie zastosowano cieniową metodę pomiaru przemieszczeń. Podczas procesu deformacji próbkę pierścieniową przesłania stopniowo oświetlone pole widzenia fotopowielacza, który przetwarza sygnał świetlny na elektryczny.

Sygnał napięciowy z fotopowielacza podawany jest na wejście Y oscyloskopu; sygnał ten jest następnie rejestrowany za pomocą kamery.

Jednakże pierwsze prace z tej dziedziny dotyczą metody rozpędzania za pomocą materiału wybuchowego. JOHNSON, STEIN i DAVIS [1] zaproponowali układ pobudzający, przedstawiony na rys. 4a. Następnie podobny układ, jednak o prostszej

konstrukcji, zastosowali HOGGATT, ORR i RECHT [3 i 8]. Został on przedstawiony na rys. 4b. W układzie pierwszym zastosowano grubościenny walec 2 z umieszczonym wewnątrz materiałem wybuchowym 1 oraz elektrycznym detonatorem 4. Próbka 3 umieszczona jest na zewnętrznym podtoczeniu walca 2. Produkty detonacji odprowadzone są przez rurę 5. W układzie drugim zastosowano odpowiednio wyprofilowany grubościenny pierścień stalowy 1, na zewnątrz którego umieszczona jest próbka 3. Wewnątrz pierścienia umieszcza się odpowiedni ładunek wybuchowy. W obydwu przypadkach detonacja materiału wybuchowego powoduje powstanie propagującej się radialnie fali uderzeniowej bądź w cylindrze, bądź w grubościennym pierścieniu. Fala ta po przejściu przez próbkę zostaje odbita jako fala rozciągania. W momencie dojścia fali odbitej do wewnętrznej powierzchni próbki otrzymuje ona pełną energię kinetyczną w procesie, oddziela się i następnie deformuje się swobodnie.

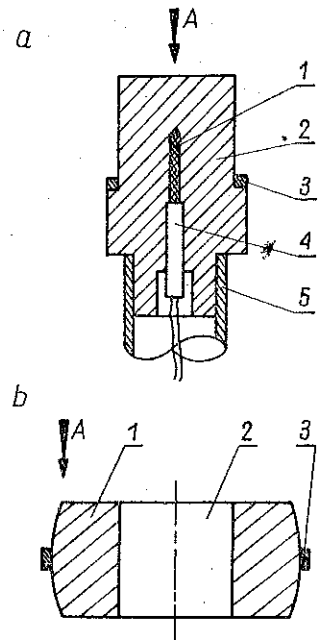
W pierwszej omawianej odmianie metody, celem pomiaru  $R(t)$ , zastosowano szybkie filmowanie o sekwencji ok.  $10^6$  kadrów na sekundę, kierunek obserwacji (kierunek ustawienia obiektywu) oznaczono na rys. 4a przez  $A$ . W przypadku drugim zastosowano filmowanie smugowe z dużą prędkością; kierunek obserwacji oznaczono na rys. 4b również przez  $A$ . Odpowiednio powiększony film z rejestracji smugowej pozwala na odczyty przyrostów promienia z dokładnością 0,0125 mm.

Okazuje się, że w większości przypadków zmiany przyrostów promienia w funkcji czasu  $R(t)$  można z dużą dokładnością przybliżyć parabolą drugiego stopnia,

$$(2.9) \quad \Delta R(\vartheta) = \Delta R_m \vartheta (2 - \vartheta),$$

gdzie  $\Delta R_m$  oznacza maksymalny wzrost promienia w momencie zakończenia ruchu lub rozerwania próbki,  $\vartheta = t/t_m$  bezwymiarowy czas odniesiony do czasu końca ruchu  $t_m$ . Po jednokrotnym i dwukrotnym zróżniczkowaniu równania (2.9) względem  $\vartheta$  otrzymuje się

$$(2.10) \quad \frac{d(\Delta R)}{d\vartheta} = 2\Delta R_m (1 - \vartheta) \quad \text{lub} \quad \Delta \dot{R}(t) = \frac{2\Delta R_m}{t_m} \left(1 - \frac{t}{t_m}\right).$$



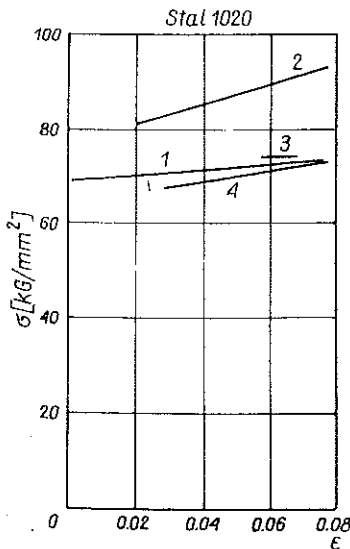
Rys. 4. Schematy doświadczalne dynamicznego rozpeczęcia próbek pierścieniowych w przypadku użycia materiałów wybuchowych: a) według pracy [1], 1 — materiał wybuchowy, 2 — stalowy walec grubościenny, 3 — próbka pierścieniowa, 4 — detonator, 5 — rura służąca do odprowadzania produktów detonacji,  $A$  — kierunek obserwacji ruchu pierścienia filmowane; b) według prac [33 i 8], 1 — grubościenny walec stalowy, 2 — otwór dla umieszczania materiału wybuchowego, 3 — próbka pierścieniowa,  $A$  — kierunek obserwacji metodą filmowania smugowego

oraz

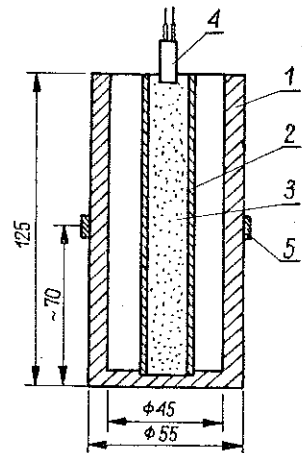
$$(2.11) \quad \frac{d^2(\Delta R)}{dt^2} = -2\Delta R_m \quad \text{lub} \quad \Delta \ddot{R}(t) = -\frac{2\Delta R_m}{t_m^2}$$

z przedziałami zmienności  $0 \leq \vartheta \leq 1$ ,  $0 \leq t \leq t_m$ .

Analityczne przybliżenie doświadczalnie obserwowanej zależności  $\Delta R(t)$  pozwala na uniknięcie dwukrotnego numerycznego różniczkowania tej funkcji względem czasu. Uwzględnienie wzorów (2.9), (2.10) i (2.11) w równaniach (2.5) i (2.6) prowadzi po eliminacji czasu do wyznaczenia dynamicznej krzywej umocnienia  $\sigma(\varepsilon)$  oraz historii prędkości deformacji  $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ . Otrzymaną w ten sposób dynamiczną krzywą umocnienia dla ciągnionej na zimno stali 1020 (oznaczenie wg ASTM) wraz z wyni-



Rys. 5. Dynamiczne krzywe wzmocnienia stali 1020 (oznaczenie wg ASTM) uzyskane przez różnych autorów wg pracy [3]: 1 — dynamiczne rozpęcznie próbek pierścieniowych  $\dot{\varepsilon}=500$  do  $2000 \text{ s}^{-1}$  [3], 2 — próba dynamicznego rozciągania  $\dot{\varepsilon}=192 \text{ s}^{-1}$  [10], 3 — próba dynamicznego rozciągania-napężenie niszczące [11], 4 — dynamiczne rozciąganie  $\dot{\varepsilon}=1,7 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$  [12]



Rys. 6. Doświadczalny schemat dynamicznego rozpęczenia pierścieni stosowany na Politechnice im Baumana Moskwa

kami, które zostały otrzymane przez innych autorów przy użyciu innych metod, przedstawiono na rys. 5 za pracą [3]. Z przedstawionego porównania wynika, że otrzymuje się znaczne różnice w wartościach napężenia plastycznego płynięcia, przy czym różnice te nie układają się zgodnie z wartościami prędkości odkształcenia.

Metoda obciążania próbek pierścieniowych przy użyciu materiału wybuchowego, która zapewnia znaczną stromość impulsu obciążającego próbkę i stąd znaczną początkową prędkość odkształcenia, została przedstawiona na rys. 6. Taka metoda



obciążania jest również stosowana na Politechnice im. Baumana w Moskwie. W przybliżeniu prostokątny impuls jest generowany w stalowym walcu grubościennym 1 (stal 10) za pośrednictwem uderzenia jego wewnętrznej powierzchni przez rozpełniającą się rurę miedzianą 2 (miedź M1). Przed detonacją rura miedziana zostaje napełniona materiałem wybuchowym 3 z możliwością inicjacji za pomocą splonki 4. Próbką pierścieniowa 5 jest nasunięta na zewnętrzną powierzchnię stalowego walca 1. Pomiar przemieszczeń próbki odbywa się przy wykorzystaniu metody fotografii smugowej.

Podczas wstępnych doświadczeń pomierzono metodami filmowania i fotografii smugowej początkową prędkość radialną  $v_{or}$  wewnętrznej rury miedzianej, a także kąt tworzącej  $\alpha$  tak otrzymanego ściętego walca. Wielkości te wyniosły odpowiednio  $v_{or}=1825$  m/s i  $\alpha=9^{\circ}40'$ .

W następnym etapie badano próbki pierścieniowe o grubości ścianki  $g=0,5$  mm wykonane ze stali 10. Początkowa prędkość promieniowa próbki wynosiła średnio  $\dot{R}=885$  m/s, co odpowiada początkowej prędkości deformacji  $\dot{\epsilon}=3,2 \cdot 10^4$  s<sup>-1</sup>. Średnią wartość naprężenia plastycznego płynięcia  $\sigma_d$  określono w danym przedziale czasu z bilansu energii napisanego dla dwóch położań (deformacji) pierścienia:

$$(2.12) \quad \frac{m\dot{R}_1^2}{2} = \frac{m\dot{R}_2^2}{2} + \frac{m}{\rho} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma_d d\varphi,$$

gdzie  $m$  oznacza masę próbki, a  $\rho$  gęstość materiału, z którego jest wykonana. Ponieważ w przedziale odkształceń  $\varphi_1 < \varphi < \varphi_2$  zakłada się  $\sigma_d = \text{const}$ , przeto

$$(2.13) \quad \sigma_d = \frac{\rho(\dot{R}_1^2 - \dot{R}_2^2)}{2(\varphi_2 - \varphi_1)}.$$

Wyniki wstępnych badań wykazują, że średnia dynamiczna wartość naprężenia plastycznego płynięcia dla stali 10, wyznaczona w przedziale stosunku  $R/R_0=1,1$  do 1,35 ( $0,0953 < \varphi < 0,300$ ), wynosi  $\sigma_d=91,8 \pm 1$  kG/mm<sup>2</sup>.

Statyczna granica plastyczności dla tego materiału jest równa  $\sigma_{cs}=22,5$  kG/mm<sup>2</sup>. Można zatem wnioskować, że w przedziale prędkości deformacji  $1 \cdot 10^4$  s<sup>-1</sup>  $\leq \dot{\epsilon} < 3 \cdot 10^4$  s<sup>-1</sup> zachodzi dla stali znaczny wzrost naprężenia plastycznego płynięcia. Fakt ten znajduje potwierdzenie w literaturze.

Przedstawiona metoda pomiaru dynamicznych krzywych umocnienia na podstawie rozpoczęcia pierścieni w zakresie dużych prędkości deformacji, rzędu  $10^4$  s<sup>-1</sup>, może znaleźć szersze zastosowanie. Jednak muszą tu być spełnione warunki bardzo dokładnego pomiaru radialnych przemieszczeń pierścienia jako funkcji czasu oraz ciśnienia podczas pierwszego etapu obciążenia. Szczególnie przydatną metodą w pomiarze prędkości przemieszczeń może okazać się metoda interferometru laserowego, która stanowi wykorzystanie zjawiska Dopplera [13, 14 i 15]. Metodą tą można bezpośrednio mierzyć prędkość przemieszczeń, unikając tym samym dwukrotnego różniczkowania mierzonego innymi metodami funkcji  $R(t)$ . Do pomiaru impulsów ciśnienia można by używać metodę polaryzujących się pod wpływem ciśnienia płytek [16] lub też manganinowe czujniki ciśnienia [17].

Reasumując, metoda dynamicznego rozpęczania pierścieni pomimo pewnych zalet wykazuje również pewne niedogodności, mianowicie główną z nich jest to, że rekonstrukcja całej krzywej umocnienia dla stałej prędkości odkształcenia wymaga dużej liczby doświadczeń, a następnie dokonania odpowiedniego wyboru punktów dla danej prędkości odkształcenia  $\dot{\epsilon}$ , przy czym punkty są dobierane z kolejnych eksperymentów przeprowadzanych na różnych próbkach. Ponadto, ponieważ napężenie plastycznego płynięcia jest również funkcją historii obciążenia, przeto interpretacja zrekonstruowanych krzywych umocnienia otrzymanych z doświadczeń o znacznie zmieniającej się prędkości odkształcenia — następuje również pewne trudności.

### 3. PRÓBA DYNAMICZNEGO ŚCISKANIA KRÓTKICH PRÓBEK WALCOWYCH. ZMODYFIKOWANY PRĘT HOPKINSONA

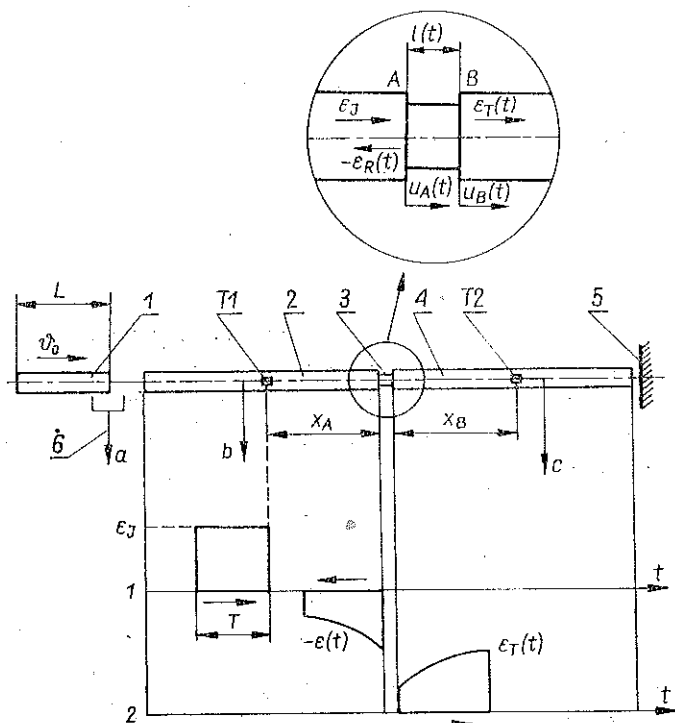
W przeciwieństwie do metody dynamicznego rozpęczania pierścieni metoda zmodyfikowanego pręta Hopkinsona, która została zaproponowana przez KOLSKY'EGO w roku 1949 [18], polega na dynamicznym ściskaniu krótkich próbek walcowych umieszczonych pomiędzy dwoma prętami. Metoda ta znalazła szerokie zastosowanie i uchodzi za jedną z podstawowych przy badaniu dynamicznych krzywych umocnienia w przedziale dużych prędkości odkształcenia.

Technika zmodyfikowanego pręta Hopkinsona stanowi kontynuację pomysłu B. HOPKINSONA z roku 1914 [19], który zaproponował użycie pojedynczego pręta stalowego o wysokiej granicy plastyczności do pomiaru maksymalnych wartości dynamicznych ciśnień. DAVIES w roku 1948 zastosował pomiary elektroniczne w pręcie Hopkinsona [20]. Bardziej szczegółowy opis metody zmodyfikowanego pręta Hopkinsona wraz z poszczególnymi etapami jej rozwoju został przedstawiony w szeregu pracach, np. w [21 i 22] i innych.

W Zakładzie Mechaniki Ośrodków Ciągłych IPPT PAN zmodyfikowany pręt Hopkinsona uruchomiono w roku 1969. Opis zastosowanego wówczas schematu doświadczalnego przedstawiono w pracy [23]. Obecnie stosowany schemat doświadczalny znacznie różni się od pierwotnego.

Zasadę tego urządzenia przedstawiono na rys. 7. Przedstawiony układ jest obecnie najczęściej stosowany. Odpowiednia wyrzutnia pozwala na nadanie wymaganej prędkości uderzenia  $v_0$  prętowi wymuszającemu 1 o długości  $L$ . Prędkość  $v_0$  jest mierzona za pomocą czujnika pomiaru prędkości 6, np. czujnika magnetycznego oraz czasomierza liczącego. Z kolei pręt wymuszający 1 uderza w pręt transmityjący 2, generując w nim falę prostokątną o amplitudzie  $\epsilon_T$ . Fala o amplitudzie  $\epsilon_T$  propagując się wzdłuż pręta 2 przechodzi przez czujnik T1 i następnie dochodzi do próbki 3. Ze względu na różnicę impedancji pręta i próbki część fali  $\epsilon_T$  zostaje odbita jako fala rozciągania  $-\epsilon_R(t)$ . Fala ta po pewnym czasie osiąga czujnik T1. Kształt fal  $\epsilon_T$  oraz  $-\epsilon_R(t)$ , który jest rejestrowany przez czujnik T1, został przedstawiony jako funkcja czasu w dolnej części rys. 7 (kanał 1). Ponieważ próbka ulega procesowi deformacji, zniekształcona część fali  $\epsilon_T$  przechodzi na pręt odbierający 4 w postaci fali  $\epsilon_T(t)$ . Fala ta jest rejestrowana przez czujnik T2 (kanał 2). Cały układ prętów jest hamowany przez opornik 5. Długość pręta 1 oraz prętów 2 i 4,

a także odległości  $X_A$  oraz  $X_B$  czujników T1 i T2 muszą być odpowiednio dobrane. Odpowiedni dobór długości zapewnia prawidłową rejestrację przebiegu fal bez uwidocznienia ich interferencji. Wszystkie sygnały z czujników T1 i T2 rejestrowane są na oscyloskopie z jednorazowo wyzwalaną podstawą czasu. Odpowiednia analiza zarejestrowanych fal  $\varepsilon_I$ ;  $-\varepsilon_R(t)$  oraz  $\varepsilon_T(t)$  umożliwia znalezienie dynamicznej krzywej umocnienia badanej próbki. Schemat takiej analizy zostanie podany niżej.



Rys. 7. Schemat działania nowoczesnego układu zmodyfikowanego pręta Hopkinsona: 1 — pręt wymuszający, 2 — pręt transmitujący, 3 — próbka walcowa, 4 — pręt odbierający, 5 — opornik, 6 — czujnik pomiaru prędkości uderzenia, T1 i T2 — czujniki elektrooporowe,  $\varepsilon_I(t)$  — fala wymuszająca  $\varepsilon_R(t)$  — fala odbita  $\varepsilon_T(t)$  — fala transmitowana

Na wszystkie metody z wykorzystaniem pomiarowego pręta Hopkinsona narzucone są następujące ograniczenia:

a) Zakłada się, że pręty pomiarowe znajdują się zawsze w stanie sprężystym. Dla materiału, z którego wykonane są pręty, istnieje graniczna wartość naprężenia  $\sigma_{max}$ , która jest jeszcze dopuszczalna ze względu na maksymalną prędkość uderzenia  $v_{max}$  oraz na granicę plastyczności materiału prętów  $\sigma_e$ ,  $\sigma_{max} < \sigma_e$ .

b) Zakłada się, że izotermiczny moduł Younga  $E_T$  jest równy adiabatycznemu  $E_A$ , co dla metali zachodzi z dużą dokładnością.

c) W zasadzie zaniebuje się dyspersję geometryczną fal mierzonych w prętach. Założenie to jest poprawne, gdy długość fali jest duża w porównaniu ze średnicą pręta.

d) Zakłada się, że naprężenia wzdłuż osi są rozłożone równomiernie na przekroju pręta.

Założenia dotyczące zachowania się próbki zostaną przedyskutowane w dalszej części pracy.

Dla otrzymania dynamicznej krzywej umocnienia, mając odpowiednio zmierzone kształty fal  $\varepsilon_L$ ,  $\varepsilon_R(t)$  oraz  $\varepsilon_T(t)$ , wykorzystuje się najprostszą teorię propagacji fal sprężystych w prętach. Teoria ta prowadzi do równania falowego o postaci

$$(3.1) \quad \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = C_0^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}.$$

Rozwiązanie równania (3.1) metodą charakterystyk przyjmuje postać

$$(3.2) \quad C_0 = \pm \frac{dx}{dt}, \quad C_0 = \pm \left( \frac{E}{\rho_0} \right)^{1/2},$$

$$\sigma = \pm \rho_0 C_0 v,$$

gdzie  $U$  oznacza przemieszczenie,  $x$  współrzędną Lagrange'a wzdłuż długości pręta,  $t$  czas,  $C_0$  prędkość sprężystej fali podłużnej w pręcie,  $\rho_0$  gęstość materiału pręta, wreszcie  $E$  oraz  $v$  oznaczają odpowiednio moduł Younga i prędkość masową. Ponadto przemieszczenie, odkształcenie i prędkość masowa są powiązane następującymi zależnościami:

$$(3.3) \quad U(t) = \int_0^t \varepsilon(\vartheta) d\vartheta,$$

$$\varepsilon(t) = \pm \frac{v(t)}{C_0},$$

gdzie  $v(t)$  oznacza zmiany prędkości masowej jako funkcji czasu. Jeżeli rozważymy chwilowe przemieszczenia czoł  $A$  i  $B$  prętów 2 i 4, jak to zostało pokazane w powiększeniu na rys 7, to można otrzymać wzór na średnie odkształcenie próbki  $\bar{\varepsilon}_s$ :

$$(3.4) \quad \bar{\varepsilon}_s(t) = \frac{1}{l_0} [U_A(t) - U_B(t)],$$

gdzie  $l_0$  oznacza długość początkową próbki.

Podobnie wzór określający średnią prędkość odkształcenia próbki ma postać

$$(3.5) \quad \bar{\dot{\varepsilon}}_s(t) = \frac{1}{l_0} \left[ \frac{dU_A(t)}{dt} - \frac{dU_B(t)}{dt} \right].$$

Po wykorzystaniu wzorów na charakterystykach (3.3) oraz wzoru (3.3)<sub>1</sub> można obliczyć przemieszczenia  $U_A(t)$  i  $U_B(t)$ :

$$(3.6) \quad U_A(t) = C_0 \int_0^t [\varepsilon_L - \varepsilon_R(\vartheta)] d\vartheta,$$

$$U_B(t) = C_0 \int_0^t \varepsilon_T(\vartheta) d\vartheta.$$

Uwzględnienie wzorów (3.6) w równaniu (3.4) prowadzi do wyznaczenia odkształcenia próbki jako funkcji wielkości mierzonych:

$$(3.7) \quad \bar{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_0}{l_0} \int_0^t [\varepsilon_I - \varepsilon_R(\vartheta) - \varepsilon_T(\vartheta)] d\vartheta.$$

Ponadto można określić średnią prędkość odkształcenia:

$$(3.8) \quad \bar{\dot{\varepsilon}}_s(t) = \frac{C_0}{l_0} [\varepsilon_I - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)],$$

Średnie naprężenie oblicza się ze wzoru

$$(3.9) \quad \sigma_s(t) = \frac{P_A(t) + P_B(t)}{2F_s},$$

gdzie  $P_A(t)$  i  $P_B(t)$  oznaczają siły działające na próbkę odpowiednio od czoła  $A$  i  $B$  prętów,  $F_s$  aktualne pole przekroju poprzecznego próbki. Korzystając z prawa Hooke'a można wyznaczyć  $P_A(t)$  i  $P_B(t)$  jako funkcje wielkości mierzonych:

$$(3.10) \quad \begin{aligned} P_A(t) &= EF_E [\varepsilon_I + \varepsilon_R(t)], \\ P_B(t) &= EF_E \varepsilon_T(t), \end{aligned}$$

gdzie  $E$  jest modułem Younga materiału prętów, a  $F_E$  polem przekroju poprzecznego prętów. Po podstawieniu (3.10) do (3.9) otrzymuje się wzór na średnie naprężenie w próbce:

$$(3.11) \quad \bar{\sigma}_s(t) = \frac{1}{2} E \left( \frac{d_E}{d_s} \right)^2 [\varepsilon_I + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)];$$

$d_E$  oraz  $d_s$  oznaczają odpowiednio średnicę prętów Hopkinsona oraz średnicę próbki.

Tak więc na podstawie znajomości  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_R(t)$  i  $\varepsilon_T(t)$  można określić ze wzorów (3.7), (3.8) i (3.11) chwilową wartość odkształcenia, prędkości odkształcenia oraz naprężenia w próbce. Dokładny pomiar i następnie analiza oscylogramów umożliwia obliczanie wymienionych wielkości podczas całego procesu deformacji próbki.

Zastosowanie układu z prętem wymuszającym 1 umożliwia, w przeciwieństwie do wykorzystania np. materiału wybuchowego, dynamiczne wzorcowanie układu prętów Hopkinsona przez dokładny pomiar prędkości uderzenia  $v_0$ . W momencie uderzenia pręta 1 z prędkością  $v_0$ , która jest dokładnie mierzona, o pręt transmisyjny 2 — generuje się fala wzdłużna o amplitudzie  $\varepsilon_I$  i długości  $\lambda = C_0 T$ , gdzie czas trwania impulsu  $T = 2L/C_0$  (rys. 7).

Amplitudę fali wymuszającej  $\varepsilon_I$  można określić z równania ilości ruchu, przyrównując ilość ruchu pręta 1 do ilości ruchu wywołanej uderzeniem w pręcie 2, stąd, gdy pręty wykonane są z różnych materiałów,

$$(3.12) \quad \rho_1 F_1 L v_0 = 2 \rho_2 F_2 L v.$$

Po wykorzystaniu równania (3.3)<sub>1</sub> przy równoczesnym założeniu jednakowej gęstości materiałów prętów  $\rho_1 = \rho_2$  otrzymuje się

$$(3.13) \quad \varepsilon_I = \frac{1}{2} \left( \frac{d_1}{d_E} \right)^2 \frac{v_0}{C_0}.$$

Równanie (3.13) służy do bezpośredniego dynamicznego wzorcowania całego układu łącznie z elektronicznym układem pomiarowym; jest to znaczna zaleta umożliwiająca podwyższenie dokładności wyznaczania dynamicznych krzywych umocnienia.

Wyprowadzone wzory na  $\bar{\varepsilon}_s$ ,  $\bar{\varepsilon}_s$  oraz  $\bar{\sigma}_s$  zostały otrzymane bez zakładania równowagi sił na czołach *A* i *B* próbki. Ponieważ w doświadczeniach używa się krótkie próbki o długości mniejszej od średnicy, więc założenie równowagi  $P_A = P_B$  prowadzi do warunku

$$\varepsilon_I = \varepsilon_T(t) - \varepsilon_R(t).$$

Wykorzystanie tego warunku znacznie upraszcza wzory (3.7), (3.8) i (3.11):

$$(3.14) \quad \begin{aligned} \varepsilon_s &= -\frac{2C_0}{l_0} \int_0^t \varepsilon_R(\vartheta) d\vartheta, \\ \dot{\varepsilon}_s &= -\frac{2C_0}{l_0} \varepsilon_R(t), \\ \sigma_s &= E \left( \frac{d_E}{d_s} \right)^2 \varepsilon_T(t). \end{aligned}$$

W tym przypadku jedynie pomiar fali odbitej  $\varepsilon_R(t)$  oraz fali transmitowanej  $\varepsilon_T(t)$  umożliwia otrzymanie szukanej dynamicznej krzywej umocnienia. Odształcenie próbki jest proporcjonalne do całki względem czasu określanej falą odbitą  $\varepsilon_R(t)$ , natomiast prędkość odształcenia jest proporcjonalna do fali odbitej, a średnie naprężenie w próbce — do fali transmitowanej  $\varepsilon_T(t)$ . Przy umieszczeniu czujników mierzących fale tak, jak to pokazano na rys. 7, ich rejestracja odbywa się kolejno i są one rozdzielone w czasie.

Fakt ten można wykorzystać w celu elektronicznego całkowania sygnału na kanale 1, co umożliwia bezpośrednie otrzymanie dynamicznej krzywej umocnienia badanej próbki. W tym celu należy zastosować oscyloskop *X-Y*, a na wejście *Y* podawać sygnał z czujnika 2, który jest proporcjonalny do naprężenia. Układ taki został opisany w pracy [24], gdzie uzyskano tą metodą wiele danych dla aluminium, miedzi i ołowiu.

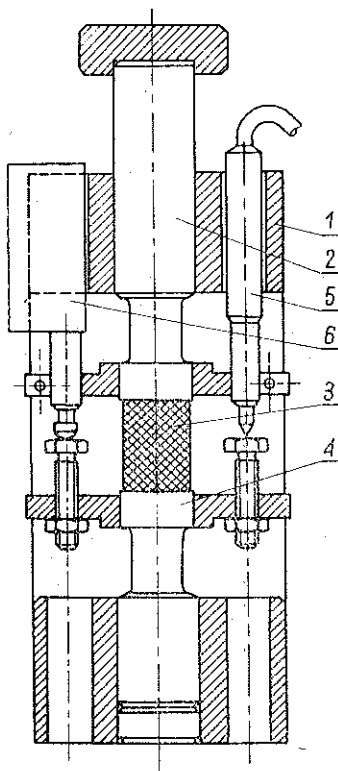
Ostatnie analizy teoretyczne i rozwiązania numeryczne wykazały, że zarówno podane na wstępie założenia, jak również uproszczone wzory (3.14) prowadzą do prawidłowych wyników [25]. Szczególnie analiza zamieszczona w pracy [27], gdzie przy użyciu maszyny matematycznej o dużej pamięci i szybkości działania przeprowadzono dwuosiowe numeryczne obliczenia propagacji fal w prętach i próbce, wykazała użyteczność omawianej metody.

#### 4. PRACE PROWADZONE W ZAKŁADZIE MECHANIKI OŚRODKÓW CIĄGLYCH IPPT PAN Z WYKORZYSTANIEM ZMODYFIKOWANEGO PRĘTA HOPKINSONA

Oprócz innych badań doświadczalnych z zakresu dynamicznej plastyczności metali prowadzone są równoległe prace z zakresu wykorzystania i doskonalenia techniki zmodyfikowanego pręta Hopkinsona. Posiadane obecnie urządzenie umożliwia wszystkie możliwe schematy doświadczalne z równoczesnym prowadzeniem rejestracji przebiegu ściskania jako funkcji czasu, tj.  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_R(t)$  i  $\varepsilon_T(t)$ , a także rejestrację krzywej  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  z wykorzystaniem elektronicznego całkowania. Do tego celu wykorzystuje się specjalnie zbudowane układy elektroniczne, dwukanałowy oscyloskop, niezależnie oscyloskop  $X-Y$  oraz kamery z filmem firmy Polaroid. Stosowany układ pomiarowy opisano dokładniej w pracy [28], jednak bez uwzględnienia wzmacniacza całkującego.

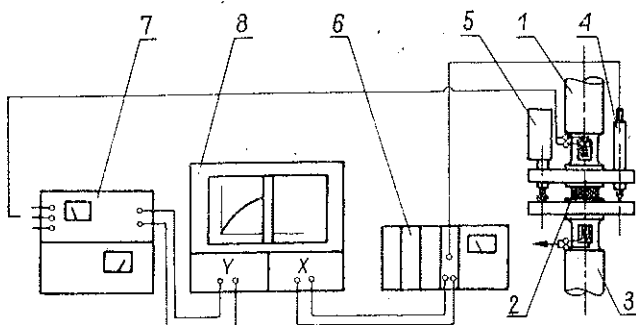
Niezależnie od badań dynamicznych skonstruowano i wykonano specjalny przyrząd do powolnego ściskania krótkich próbek walcowych. Bardziej dokładny opis przyrządu zamieszczono w pracy [29]. Natomiast na rys. 8 oraz na rys. 9 przedstawiono odpowiednio przekrój przyrządu oraz blokowy schemat pomiarowy tak przeprowadzonej próby ściskania. Przyrząd umieszcza się celem dokonania próby ściskania w maszynie wytrzymałościowej. Podczas próby sygnały napięciowe z mostka tensometrycznego (siła  $P$ ) oraz z zasilacza czujnika indukcyjnego (przemieszczenie  $\Delta l$ ) podawane są odpowiednio na wejścia  $Y$  oraz  $X$  rejestratora, co prowadzi do automatycznej eliminacji czasu i rejestracji krzywej  $P = P(\Delta l)$ . Zmierzone w ten sposób krzywe umocnienia stanowią podstawę do porównania wyników otrzymanych ze zmodyfikowanego pręta Hopkinsona.

Jak wspomniano poprzednio, podstawowymi danymi do wyznaczenia dynamicznej krzywej umocnienia są fale  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_R(t)$  i  $\varepsilon_T(t)$  zarejestrowane w postaci oscylogramu. Np. oscylogram otrzymany z próby ściskania próbki aluminiowej przedstawiono na rys. 10. Oscylogram w tej postaci zostaje następnie zmierzony przy użyciu mikroskopu pomiarowego z elektronicznym odczytem i wydrukiem współrzędnych na taśmie papierowej, następnie po odpowiednim uwzględnieniu wzmocnień kanałów współrzędne fal  $\varepsilon_R(t)$  oraz  $\varepsilon_T(t)$  zostają wprowadzone do maszyny matematycznej ODRA 1204. Przy czym można wybrać dwa warianty programu obliczeń. W pierwszym programie nie za-

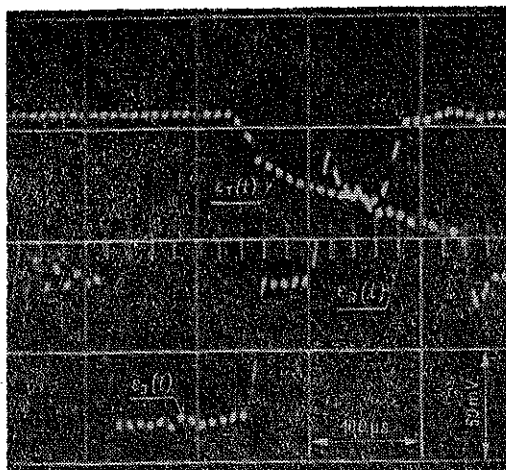


Rys. 8. Przekrój przyrządu IPPT PAN do statycznego ściskania próbek walcowych: 1 — korpus, 2 — stempel z dynamometrem, 3 — próbka, 4 — kowadełko z dynamometrem, 5 — transformatorowy czujnik przemieszczeń, 6 — zegarowy czujnik przemieszczeń

kląda się równowagi sił na czołach  $A$  i  $B$  próbki, wówczas obliczenia przeprowadza się zgodnie z zależnościami (3.7), (3.8) i (3.11) przy równoczesnym uwzględnieniu warunku nieściśliwości materiału próbki; stąd można otrzymać naprężenie rzeczywiste. W przypadku programu drugiego zakłada się istnienie równowagi sił na czołach  $A$  i  $B$  wykorzystując wzory (3.14). W wyniku obliczeń zgodnie z obydwoma



Rys. 9. Schematyczna zasada pomiarów w próbie ściskania stosowana w IPPT PAN: 1 — stempel z naklejonymi tensometrami elektrooporowymi, 2 — próbka, 3 — kowadełko z naklejonymi tensometrami elektrooporowymi, 4 — indukcyjny czujnik przemieszczeń, 5 — zegarowy czujnik przemieszczeń, 6 — zasilacz czujnika 4 typu N101, 7 — mostek tensometryczny, 8 — rejestrator  $X-Y$



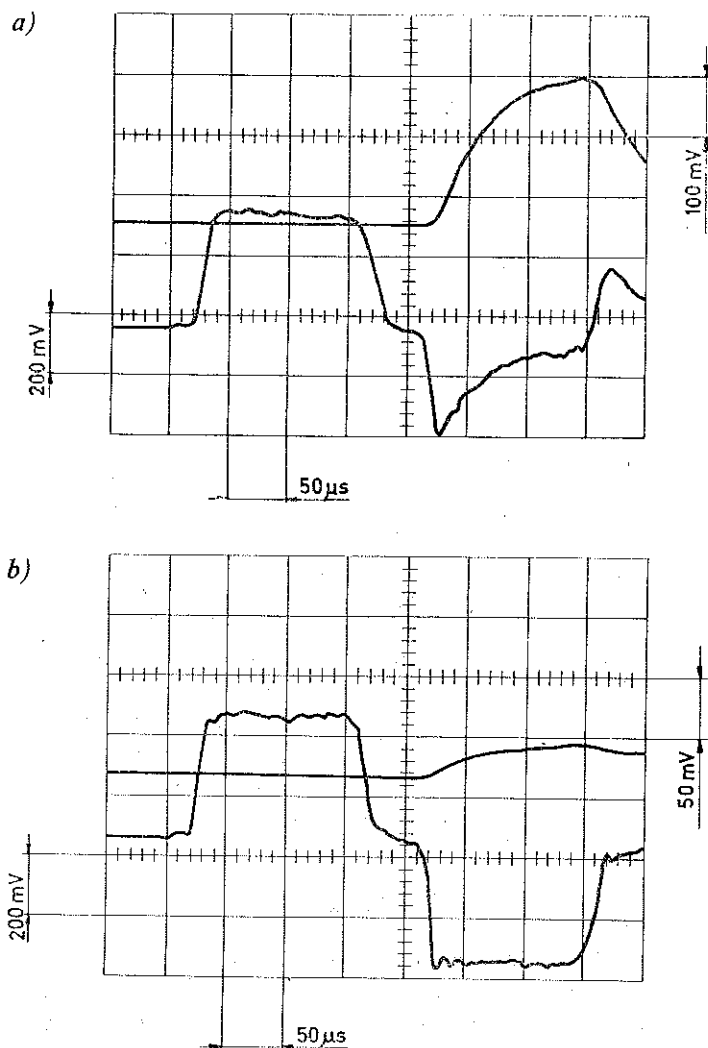
Rys. 10. Oscylogram otrzymany w wyniku ściskania próbki aluminiowej; czułości:  $x=100 \mu\text{s/dz}$ ,  $Y_1, Y_2=50 \text{ mV/dz}$

programami uzyskuje się wydruk  $\epsilon_s(t)$ ,  $\dot{\epsilon}_s(t)$ ,  $\sigma_s(t)$  oraz  $\sigma_s(\epsilon_s)$  i  $\dot{\epsilon}_s(\epsilon_s)$ , co stanowi kompletny układ rezultatów próby. Wizualne przedstawienie wyżej podanych przebiegów można również uzyskać na plotterze.

Dotychczas przeprowadzono kilka obszernych serii badań. Między innymi badano zachowanie się polimerów przy dużych prędkościach deformacji. Na rys. 11 przedstawiono dwa oscylogramy z prób na polimetakrylanie metylu (pleksiglas) oraz na

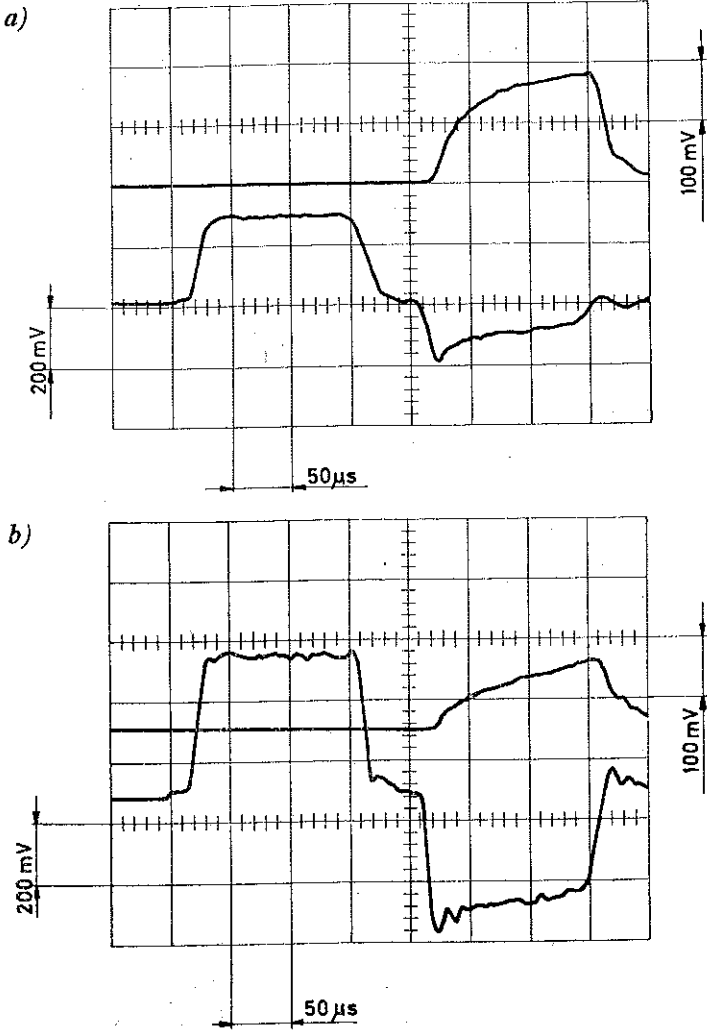


polietylenie. Obydwa materiały wykazały bardzo dużą wrażliwość na prędkość odkształcenia. Np. dla polietylenu naprężenia w próbie dynamicznej ( $\dot{\epsilon} \approx 1 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) są około sześć razy większe od naprężeń uzyskanych przy powolnym odkształcaniu ( $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ).



Rys. 11. a) Oscylogram z próby dynamicznego ściskania próbki z polimetakrylanu metylu (pleksiglas); czułości:  $x=50 \mu\text{s}/\text{dz}$ ,  $Y_1=200 \text{ mV}/\text{dz}$ ,  $Y_2=100 \text{ mV}/\text{dz}$ . b) Oscylogram z próby dynamicznego ściskania próbki z polietylenu; czułości:  $x=50 \mu\text{s}/\text{dz}$ ,  $Y_1=100 \text{ mV}/\text{dz}$ ,  $Y_2=50 \text{ mV}/\text{dz}$

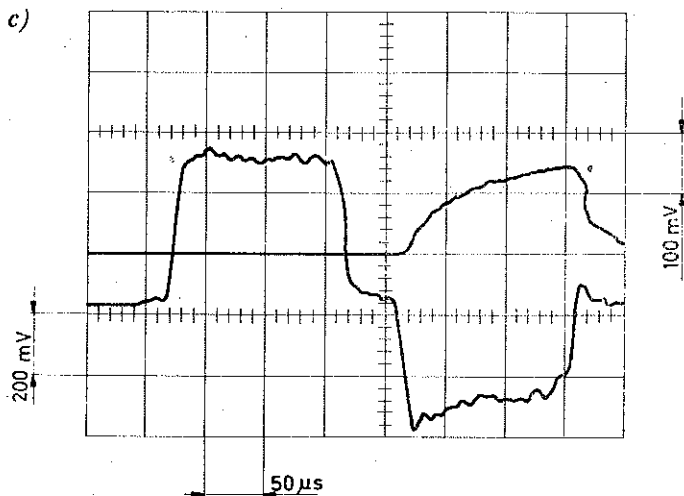
Następny cykl badań, mający na celu analizę wpływu warunków smarowania oraz oszacowania efektów tarcia w miejscu kontaktu próbki z prętami, wykonano na wyżarzonych próbkach aluminiowych o różnej smukłości początkowej  $s_0 = l_0/d_0$ , gdzie  $l_0$  oznacza początkową długość, a  $d_0$  początkową średnicę próbki. Niektóre z oscylogramów z uzyskanych w tej serii badań przedstawiono na rys. 12. Badania



Rys. 12

te wykazały niewielki wzrost dynamicznego współczynnika tarcia w porównaniu z wartościami uzyskiwanymi podczas ściskania powolnego; czoła próbek w obydwu przypadkach smarowano sproszkowanym  $\text{MoS}_2$ . W tym cyklu badań zastosowano przedział smukłości  $0,1 \leq s_0 \leq 1,0$  dla dziesięciu pośrednich wartości  $s_0$ . Na rys. 12a, b oraz c można wyraźnie zaobserwować wpływ smukłości na amplitudę fali  $\varepsilon_T(t)$ , która jest proporcjonalna do naprężenia  $\sigma_s(t)$  wzór (3.14)<sub>3</sub>. Korzystając z rozwiązania Sibela, można stąd obliczyć dynamiczny współczynnik tarcia [29]. Wyniki tych badań będą przedmiotem odrębnego opracowania.

Podczas dynamicznego ściskania krótkich próbek obserwuje się oprócz efektów tarcia efekty inercyjne, które pozornie zwiększają opór plastyczny deformowanej próbki. Efekty inercyjne były przedmiotem kilku studiów; prace [18, 21, 27 i 30] i inne. W pierwszym przybliżeniu pozorna nadwyżka naprężenia plastycznego płynię-



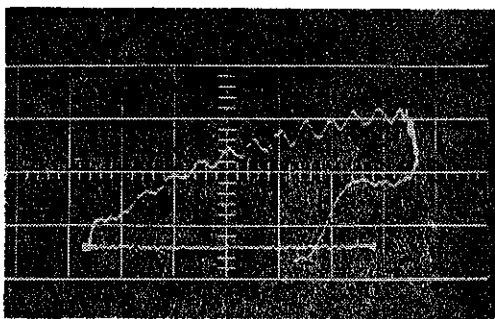
Rys. 12. Oscylogramy z prób ściskania próbek aluminiowych o różnej smukłości początkowej  $S_0 = l_0/d_0$ . a)  $S_0 = 0,162$ ; b)  $S_0 = 0,5$ ; c)  $S_0 = 1,0$ . We wszystkich przypadkach  $x = 50 \mu\text{s/dz}$ ,  $Y_1 = 200 \text{ mV/dz}$ ,  $Y_2 = 100 \text{ mV/dz}$

cia wywołana bezwładnością wzdłużną i poprzeczną próbki może być oszacowana ze wzoru

$$(4.1) \quad \Delta\sigma = \rho_s \ddot{\epsilon}_s \left[ \frac{d_{s0}^2}{32(1-\epsilon_s)} - \frac{1}{6} l_0^2 (1-\epsilon_s)^2 \right],$$

gdzie  $\rho_s$  oznacza gęstość materiału próbki, natomiast  $d_{s0}$  jest początkową średnicą próbki.

Ponieważ wartość  $\Delta\sigma$ , które jest wynikiem efektów inercyjnych jest proporcjonalna do gęstości materiału próbki do oszacowania rzędu efektów inercyjnych wybrano ołów. W wyniku doświadczeń na próbkach ołowianych oraz analizy numerycznej stwierdzono, że w zakresie odkształcenia rzędu  $\epsilon \approx 1 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$  efekty inercyjne nie przekraczają kilku procent naprężenia plastycznego płynięcia. Ponadto, ponieważ w trakcie procesu deformacji  $\ddot{\epsilon}$  zmienia znak, również  $\Delta\sigma$  może przyjmować wartości bądź dodatnie, bądź ujemne. Podczas badań ołowiu zaobserwowano również niestabilności krzywej umocnienia przebiegające ze znacznymi prędkościami. Niestabilności te przejawiają się w postaci periodycznych zmian naprężenia na krzywej umocnienia. Na rys. 13 przedstawiono oscylogram otrzymany w wyniku elektronicznego całkowania, a więc



Rys. 13. Oscylogram w postaci krzywej umocnienia próbki ołowianej o smukłości  $S_0 = 0,605$  otrzymany przy użyciu elektronicznego układu całkowania i oscyloskopu X-Y; odkształcenie  $X = 0,029 \mu\text{s/dz}$ , naprężenie  $Y = 1,4 \text{ kG/mm}^2/\text{dz}$

oscylogram krzywej umocnienia z widocznymi niesta bilnościami. Należy podkreślić, że pewne niestabilne zachowanie się próbek ołowianych zostało również zaobserwowane podczas badań statycznych.

Omawiając technikę zmodyfikowanego pręta Hopkinsona posłużono się jedynie przykładami jej zastosowania głównie w postaci oscylogramów, demonstrując wszechstronność jej wykorzystania. Podanie szczegółowych wyników oraz ich dyskusja wykracza poza ramy niniejszego opracowania i znajduje się bądź zostanie zamieszczona w odrębnych publikacjach.

## 5. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione w poprzednich częściach pracy dwie techniki doświadczalne służące do badania dynamicznych krzywych umocnienia, mianowicie dynamiczne rozpęczanie pierścieni oraz zmodyfikowany pręt Hopkinsona, są technikami wzajemnie się uzupełniającymi. Przedziały prędkości odkształcenia możliwe do uzyskania zarówno w pierwszym, jak i w drugim przypadku są podobne, z tym zastrzeżeniem, że materiał rozpęczanego pierścienia jest rozciągany, natomiast w klasycznym schemacie zmodyfikowanego pręta Hopkinsona cienkie próbki walcowe są ściskane. Spotyka się jednak opisane w literaturze zastosowania zmodyfikowanego pręta Hopkinsona do próby na rozciąganie [31]. Zastosowanie wspomnianego schematu na rozciąganie pozwoliłoby na bezpośrednie porównanie wyników otrzymywanych z dynamicznego rozpęczania pierścieni. W ostatnim okresie, ze względu na brak efektów bezwładności poprzecznej i tarcia, stosuje się coraz częściej zmodyfikowany skrętny pręt Hopkinsona [23 i 32]. Zaletą tego ostatniego systemu jest możliwość badania materiałów o bardzo wysokiej granicy plastyczności.

W porównaniu do techniki rozpęczania pierścieni w zmodyfikowanym pręcie Hopkinsona prędkość odkształcenia jest bardziej stała w trakcie procesu deformacji, co stanowi jego cechę dodatnią. Natomiast dynamiczne rozpęczanie pierścieni w większym stopniu zapewnia jednorodność deformacji próbki na skutek znacznie mniejszych efektów falowania w kierunku radialnym w pierwszej fazie obciążania pierścienia. Dotychczas jednak nie zgromadzono dostatecznie dużo danych doświadczalnych demonstrujących dodatnie cechy tej metody. Stąd konieczność prowadzenia dalszych badań w tym kierunku.

## LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. P. C. JOHNSON, B. A. STEIN and R. S. DAVIS, *Basic parameters of metal behaviour under high rate forming*, Final Report WAL TR 1112/20-6, Arthur D. Little Corporation 1962.
2. F. I. NIORDSON, *A unit for testing materials at high strain rates*, *Experimental Mechanics*, **5**, 1, 29, 1965.
3. C. R. HOGGAT and R. F. RECHT, *Stress-strain data obtained at high rates using an expanding ring*, *Experimental Mechanics*, **9**, 10, 441, 1969.
4. M. J. FORRESTAL and H. C. WALLING, *Axisymmetria plastic respons of rings to short-duration pressure pulses*, *AIAA Journal*, **10**, 10, 1382, 1972.

5. H. C. WALLING and M. J. FORRESTAL, *Elastic-plastic expansion of 6061-T6 aluminium rings*, AIAA Journal, **11**, 8, 1196, 1973.
6. R. BEALING, *Impulse loading of circular rings*, Experimental Mechanics, Proc. of the 11th Annual symposium, Univ. of New Mexico, 15, 1971.
7. H. C. WALLING, M. J. TUCKER and W. K. TUCKER, *An experimental method for impulsively loading ring structures*, International J. Solids and Structures, **8**, 6, 825, 1972.
8. C. R. HOGGAT, W. R. ORR and R. F. RECHT, *The use of an expanding ring for determining tensile stress-strain relationships as functions of strain rate*, The First International Conference of the Center for High Energy Forming, Estes Park 1967.
9. D. S. CLARK and P. E. DUWEZ, *The influence of strain rate on some tensile properties of steel*, Proc. ASTM, **50**, 560, 1950.
10. J. E. SMITH, *Tension tests of metals at strain rates up to 200 sec<sup>-1</sup>*, Materials Research and Standards, **9**, 1963.
11. D. S. CLARK and D. S. WOOD, *The tensile impact properties of some metals and alloys*, Trans. ASM, **42**, 1950.
12. A. L. AUSTIN and R. F. STEIDEL, *A method for determining the tensile properties of metals of high rates of strain*, Proc. SESA, **17**, 99, 1959.
13. L. M. BARKER and R. E. HOLLENBACH, *Interferometer technique for measuring the dynamic mechanical properties of materials*, Rev. Sci. Instrum., **36**, 11, 1617, 1965.
14. Н. А. Златин, С. М. Мочалов, Г. С. Пучгаев, А. М. Братов, *Лазерный дифференциальный интерферометр теория прибора и пример использования*, Журнал Технической физики, **43**, 9, 1961.
15. J. KLEPACZKO, M. KORZUN, *Metody pomiaru prędkości masowych na czole fali uderzeniowej z wykorzystaniem laserów*, Biul. WAT, **19**, 11, 113, 1970.
16. P. J. A. FULLER and J. H. PRICE, *Dynamic stress-strain release paths for aluminium and magnesium measured to 200 k Bar*, Brit. J. Appl. Phys., Ser. 2, **2**, 2, 1969.
17. Н. А. Фом, В. П. Алексеевский, В. В. Ярош, *Исследование диэлектрических датчиков импульсного давления*, Проблемы Прочности, **5**, 94, 1973.
18. H. KOLSKY, *An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading*, Proc. Phys. Soc., **B62**, 676, 1949.
19. V. HOPKINSON, *A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosive or by the impact of bullets*, Phil. Trans., **A213**, 437, 1914.
20. R. M. DAVIES, *A crystal study of the Hopkinson pressure bar*, Phil. Trans., **A240**, 375, 1948.
21. E. D. H. DAVIES and S. C. HUNTER, *The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar*, J. Mech. Phys. of Solids, **11**, 155, 1963.
22. H. S. LINDHOLM, *High strain rates*, Technique of Metals Research, Part 1, Measurements of Mechanical Properties, Interscience Publ., 1971.
23. J. KLEPACZKO, *Zmodyfikowany preł Hopkinsona*, Mech. Teor. i stos., **9**, 4, 479, 1971.
24. K. S. LINDHOLM, *Some experiments with the split Hopkinson pressure bar*, J. Mech. Phys. of Solids, **12**, 6, 317, 1964.
25. W. E. JAHSMAN, *Reexamination of the Kolsky technique for measuring dynamic material behaviour*, J. Appl. Mech., **38**, 75, 1971.
26. L. D. BERTHOLF, *Feasibility of two-dimensional numerical analysis of the split-Hopkinson pressure bar system*, J. Appl. Mech., **41**, 137, 1974.
27. L. D. BERTHOLF and C. H. KARNES, *Two-dimensional analysis of the split Hopkinson pressure bar system*, J. Mech. Phys. of Solids, **23**, 1, 1, 1975.
28. Y. C. T. YEUNG, WGE KONG, B. PARSONS and B. N. COLE, *The dispersive behaviour of a Hopkinson pressure bar in material property tests*, Proc. Conf. Inst. Phys., Ser 21, Oxford 1974.
29. Z. MALINOWSKI, J. KLEPACZKO, *Szacowanie współczynnika tarcia na czolach ściskanej plastycznie próbki walcowej*, Mech. teor. i stos., **10**, 4, 561, 1972.

30. J. KLEPACZKO, *Lateral inertia corrections in impact experiments*, IPPT Reports, 17, 1969.  
 31. K. S. LINDHOLM, L. M. YEAKLEY, *High strain-rate testing: tension and compression*, Experimental Mechanics, 8, 1, 1968.  
 32. J. DUFFY, J. D. CAMPBELL, R. H. HAWLEY, *On the use of a torsional split Hopkinson bar to study rate effects in 1100-0 aluminium*, J. Appl. Mech., 38, 83, 1971.

## Резюме

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАСТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

Сейчас существует много исследовательских методов определения динамических характеристик упрочнения металлов и других пластических материалов при больших скоростях деформации. В работе представлены описание и анализ двух методов, которые можно считать основными, именно динамическое выпучивание кольцевых образцов и техника модифицированного стержня Гопкинсона, где применяется сжатие коротких цилиндрических образцов. В первом методе обсуждены его отдельные модификации, в частности использующие сильное магнитное поле и взрывчатые вещества. В случае модифицированного стержня Гопкинсона представлены разные измерительные возможности. Для каждого из методов приведены основные зависимости, описывающие процесс деформации и служащие для анализа результатов, иллюстрируя их экспериментальными примерами. Обсуждены тоже основные недостатки и достоинства каждого из них.

## SUMMARY

## EXPERIMENTAL METHODS OF DEFORMING DYNAMIC WORK-HARDENING CHARACTERISTICS OF MATERIALS IN PLASTIC RANGE

There are known nowadays many experimental methods of evaluating dynamic characteristics of the work-hardening of metals and other plastic materials at high strain rates. Two of them which are considered as the basic ones, namely the dynamic expansion of the ring specimens and the modified Hopkinson bar where compression of short cylindrical specimens is used, are thoroughly described and analyzed in this paper. The different varieties of the first method are considered and in particular these ones in which the strong magnetic field and explosive materials are applied. In a case of the modified Hopkinson bar the different measuring possibilities are presented. For each of the methods the basic formulae describing the deformation process and allowing the analysis of the results are given and illustrated by the numerical examples. The basic advantages and disadvantages of each of these two methods are also discussed.

POLSKA AKADEMIA NAUK  
 INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI  
 i  
 AKADEMIA NAUK ZSRR  
 INSTYTUT PROBLEMÓW MECHANIKI

*Praca została złożona w Redakcji dnia 15 lipca 1976 r.*