

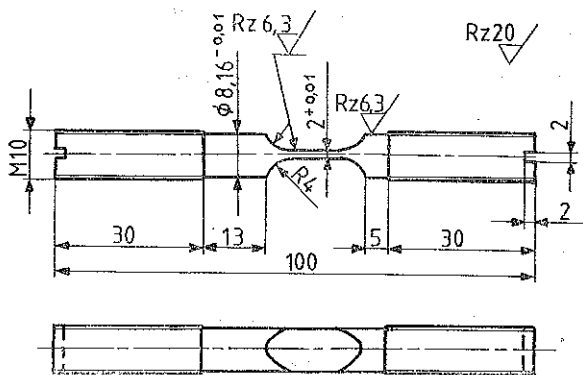
## WPLYW DUŻYCH PRĘDKOŚCI ODKSZTAŁCENIA NA DYNAMICZNE NAPRĘŻENIA PŁYNIĘCIA STALI PRZY BARDZO MAŁYCH UMOWNYCH ODKSZTAŁCENIACH TRWAŁYCH

ZYGMUNT ANISIMOWICZ (TARNOWSKIE GÓRY)

Celem pracy jest zbadanie wpływu prędkości odkształcenia na dynamiczne naprężenia płynięcia przy bardzo małych umownych odkształceniach trwałych. Zbadano cztery gatunki stali metodą dynamicznego rozciągania jednoosiowego. Badania przeprowadzono w zakresie prędkości odkształcenia od  $\dot{\epsilon} = 57s^{-1}$  do  $\dot{\epsilon} = 526s^{-1}$  (od 0,281 m/s do 2,631 m/s) i w przedziałach umownych deformacji trwałych  $\epsilon = 0; 0,02$  i  $0,04\%$ . Określono wpływ prędkości odkształcenia na wartość dynamicznego naprężenia płynięcia dla poszczególnych gatunków stali. Poczyniono próbę teoretycznego opisu równaniem konstytutywnym dynamicznego naprężenia płynięcia dla jednego z gatunków stali z możliwością jej zastosowania dla pozostałych gatunków.

### 1. WSTĘP

Programem badań objęto gatunki stali, różniące się między sobą równomiernym wzrostem zawartości węgla w przybliżeniu o  $0,5\%$ . Próbkę badań (rys. 1) wykonano z prętów o średnicy  $d = 12$  do  $15$  mm, wytworzone z jednego wlewka w poszczególnych gatunkach stali. Wybrano cztery gatunki stali: E04, 45, N11E i NC6. Próbki nie były poddawane obróbce cieplnej.



Rys. 1. Próbka

Badania dynamicznego naprężenia płynięcia prowadzono w zakresie średniej prędkości odkształcenia  $\dot{\epsilon}_{sr} = 0,5 \cdot 10^2$  do  $5 \cdot 10^2 s^{-1}$ , tj. 0,25 do 2,50 m/s, poddając wszystkie wytypowane gatunki stali co najmniej dziesięciu próbom dynamicznego roz-

ciągania jednoosiowego. Średnią prędkość odkształcenia określono z uzyskanych oscylogramów  $\varepsilon(t)$  (rys. 11) wg następującego wzoru:

$$\dot{\varepsilon}_{sr} = \frac{\varepsilon_{0,005}}{t_{0,005}} \left[ \frac{1}{s} \right].$$

Dynamiczne naprężenia płynięcia  $T$  określono przy umownych odkształceniach trwałych oraz wprowadzając następujące oznaczenia:

$$T_0 \text{ przy } \varepsilon=0, \quad T_{0,02} \text{ przy } \varepsilon=0,02\%, \quad T_{0,04} \text{ przy } \varepsilon=0,04\%.$$

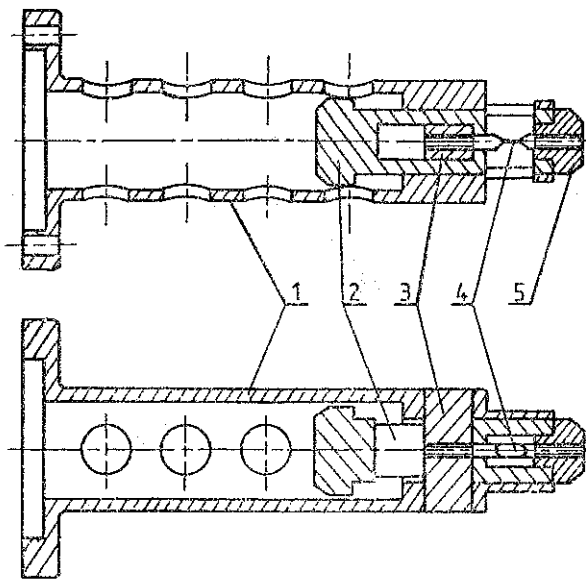
Dla uzyskania danych porównawczych przeprowadzono statyczne badania własności mechanicznych powyższych materiałów z zastosowaniem tensometrii elektrooporowej w układzie mostka pomiarowego Wheatstone'a — tak samo jak dla badań dynamicznych. Próbkę o przekroju nożowym (rys. 1) z naklejonymi obustronnie tensometrami czynnymi i dwoma tensometrami kompensacyjnymi typu FK-5/120, włączonymi w mostek pomiarowy, poddano próbie statycznego rozciągania na zrywarce stacjonarnej ogólnego przeznaczenia. Przeprowadzono po trzy próby dla każdego gatunku stali w ustalonym zakresie odkształcenia, tj. do  $\varepsilon_{max} = 0,5\%$  przy średniej prędkości odkształcenia statycznego  $\dot{\varepsilon}_s = 5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , tj.  $0,25 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ .

Badań w zakresie prędkości odkształcenia  $5 \cdot 10^{-5} < \dot{\varepsilon} < 0,5 \cdot 10^2 \text{ [s}^{-1}\text{]}$  nie prowadzono, a wyniki badań z tego zakresu, niezbędne do budowy funkcji ciągłej opisującej równanie płynięcia, wykorzystano z prac J. D. CAMPBELLA i R. H. COOPERA z roku 1967 [2], J. E. JOHNSONA, D. S. WOODA i D. S. CLARKA, 1953 [6], K. J. MARSHA i D. J. CAMPBELLA, 1963 [10] oraz M. E. D. RANDULLA i J. D. CAMPBELLA, 1972 [16].

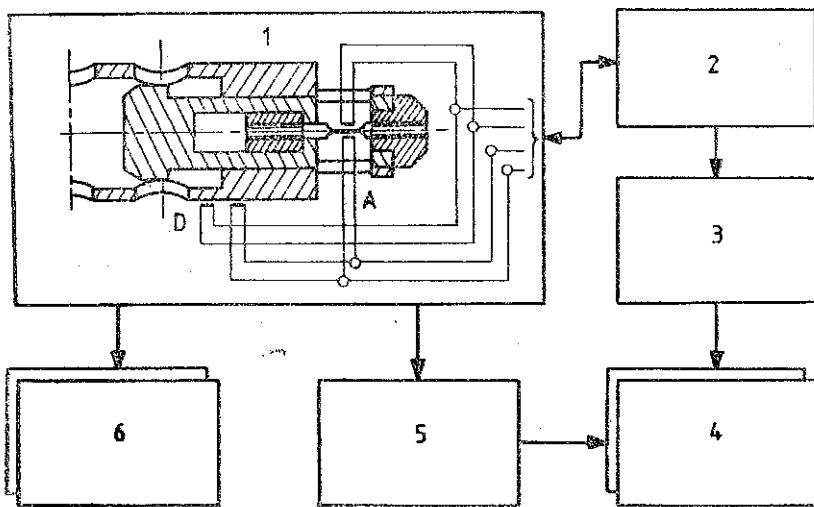
## 2. OPIS TECHNIKI EKSPERYMENTU

Do dynamicznego zrywania próbek zastosowano oryginalne stanowisko badawcze własnej konstrukcji (rys. 2). Oryginalność stanowiska badawczego polega na tym, że określona porcja energii kinetycznej pocisku poprzez odpowiednio sztywny układ mechaniczny jest przekazywana zrywanej dynamicznie próbce 4. W skład zestawu pomiarowo-rejestrującego (rys. 3 i 4) wchodzi następujące elementy: 1) układ miotający kal. 40 mm ze stanowiskiem badawczym (1), 2) układ rejestracji (1 ÷ 5) przebiegów odkształcenia  $\varepsilon(t)$ , 3) układ rejestracji (1 ÷ 5) przebiegów siły  $F(t)$  oraz 4) układ pomiarowy prędkości pocisków (6).

Do budowy powyższego zestawu użyto standardowych przyrządów pomiarowo-rejestrujących z wyjątkiem układu miotającego i stanowiska badawczego. Stanowisko badawcze (rys. 2) zamontowane jest na końcu lufy działka gładkolufowego kal. 40 mm. Bijnik 2, przejmując energię poruszającego się pocisku, przesuwa się, popychając korek 5 z wkręconym w nim prawym końcem próbki 4. Lewy koniec próbki 4 wkręcony jest do sztywnej przegrody 3 opierającej się o korpus 1.

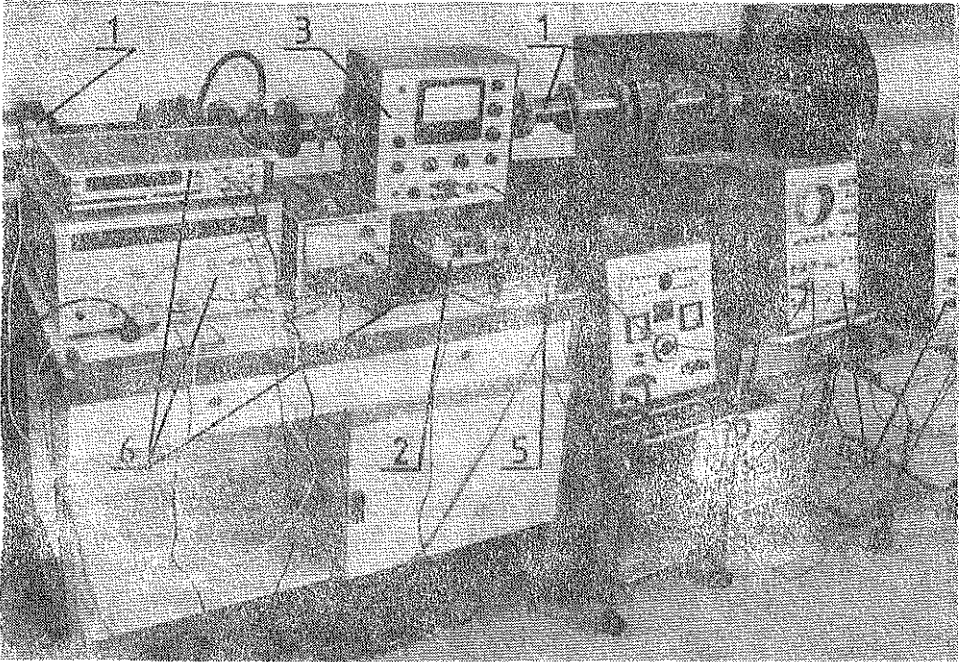


Rys. 2. Stanowisko badawcze własnej konstrukcji



Rys. 3. Schemat zestawu pomiarowo-rejestrującego

Rejestracji zmian odkształcenia w czasie przy dynamicznym rozciąganiu próbki dokonano za pomocą tensometrów elektrooporowych *A* (rys. 3), naklejonych obustronnie na próbce, włączonych w przeciwległe gałęzie mostka Wheatstone'a zasilanego prądem stałym 2 (rys. 3 i 4). Proces pomiarowy i jego rejestracja od chwili odpalenia ładunku miotającego przebiega samoczynnie (rys. 3 i 4). Pocisk, poruszając się w lufie, uruchamia po drodze układ pomiarowy prędkości pocisku 6



Rys. 4. Ułożenie przyrządów zestawu pomiarowo-rejestrującego

i układ wyzwalania podstawy czasu w oscyloskopach 5. Powstałe sygnały napięciowe, określające zmiany odkształcenia zrywanej próbki, podawane są na wzmacniacz 3 i stamtąd do rejestracji w pamięci oscyloskopów 4. Identycznie dokonywana jest rejestracja odkształcenia siłomierza, montowanego szeregowo z próbką.

Dzięki odpowiedniemu doborowi przekroju próbki i elementu odkształcalnego siłomierza, maksymalne naprężenia zrywające próbkę wywołuje w elemencie odkształceniowym siłomierza odkształcenie sprężyste nie przekraczające  $\varepsilon=1, 2$  do 1,5%.

## 2. SPOSÓB POMIARU

Wartości siły jako funkcji czasu  $F(t)$  określono pośrednio przez pomiar odkształcenia siłomierza dla całego zakresu pomiarowego odkształcenia próbki, tj. do  $\varepsilon=5\%$ .

W tym celu pierwszych 10 prób, przy różnych prędkościach odkształcenia, w założonym przedziale  $\dot{\varepsilon}$  wykonano dla określenia zależności  $\varepsilon(t, mV/s)$ , tj. odkształceń jako funkcji czasu i pędu przypadającego na jednostkę powierzchni przekroju poprzecznego próbki dla całego zakresu charakterystyki liniowej tensometru ( $\varepsilon \leq 5$ )%. Następnich 10 prób dla tego samego gatunku stali i w miarę możliwości przy zbliżonych warunkach początkowych do prób poprzednich w tym samym zakresie  $\dot{\varepsilon}$  wykonano dla określenia zależności  $\varepsilon_s(t, mV/s)$ , tj. odkształceń siłomierza jako funkcji czasu i pędu przypadającego na jednostkę powierzchni przekroju poprzecznego próbki. Parametr  $mV/s$  charakteryzujący wielkość pędu wprowadzono dla

jednoznaczności oceny odkształceń próbki i siłomierza. Dla uproszczenia dalszych obliczeń [1] zastąpiono go odpowiadającą mu średnią prędkością odkształcenia  $\dot{\epsilon}_{sr}$ . Stały stosunek pola powierzchni przekroju próbki  $S$  do powierzchni przekroju poprzecznego elementu odkształcalnego siłomierza  $S_s$  (przy  $t=0$ ) pozwala dla dowolnej wielkości odkształcenia siłomierza na ustalenie odpowiadającej mu wielkości odkształcenia próbki w dowolnej chwili  $t$  na przedstawionej graficznie [1] rodzinie funkcji  $\epsilon(t, mV/s)$ .

Siła panująca w próbce wynosi

$$(3.1) \quad F(t) = E \epsilon_s(t) S_s,$$

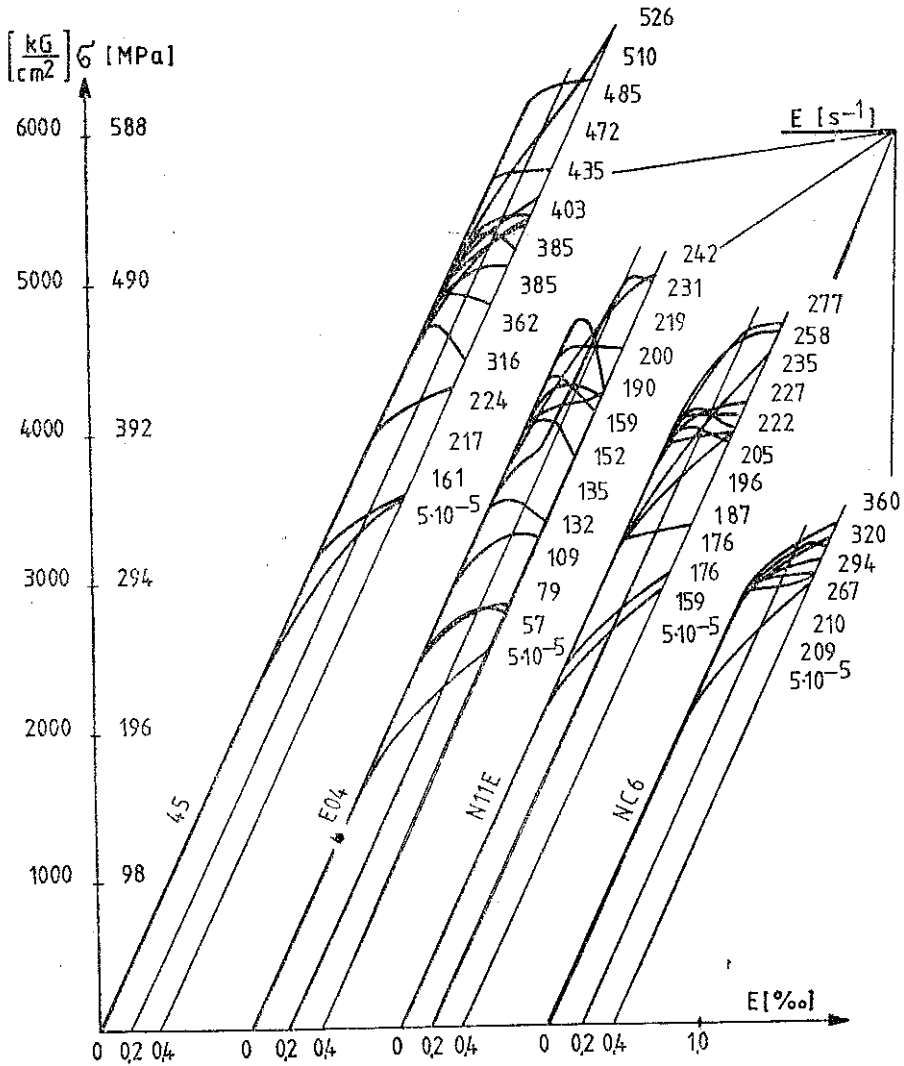
gdzie  $E$  oznacza moduł Younga niezależny od prędkości odkształcenia  $\dot{\epsilon}$ ,  $\epsilon_s(t)$  odkształcenie elementu odkształcalnego siłomierza jako funkcji czasu  $t$  oraz  $S_s$  pole przekroju poprzecznego elementu odkształcalnego siłomierza w miejscu naklejenia tensometrów.

Dysponując dwoma układami rejestrująco-pomiarowymi (2, 3 i 4 na rys. 3 i 4) można dokonywać jednocześnie pomiaru odkształcenia próbki i siłomierza.

#### 4. WYNIKI DOŚWIADCZEŃ I ICH ANALIZA

Wszystkie wyniki badań zawarte w oscylogramach odkształcenia próbki  $\epsilon(t)$  i siłomierza  $\epsilon_s(t)$  poddano analizie oceny pomiarów z jednoczesnym wykluczeniem błędów dużych. Na podstawie preselekcjonowanych wyników sporządzono wykresy rodzin funkcji  $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$  badanych stali (rys. 5) dla przyjętych przedziałów umownych odkształceń trwałych. Pokazane na rys. 5 wykresy  $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$  każdego z badanych metali mają inny kształt i przedstawiają rzeczywiste zachowanie się materiału. Takie zachowanie się materiału potwierdzają prace J. HARDINGA, E. O. WOODA i J. D. CAMPBELLA z roku 1960 [3], J. HARDINGA, 1969 [4], J. E. JOHNSONA, D. S. WOODA i D. S. CLARKA, 1953 [6], LINDHOLMA, 1974 [8] oraz N. N. MALININA i J. RZYSKO, 1981 [9]. Dla poszczególnych przedziałów umownych odkształceń trwałych z wykresów  $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$  badanych stali określono dynamiczne naprężenie płynięcia we współrzędnych półlogarytmicznych i przedstawiono na rys. 6-9. Dla oceny przedziałów, w jakich z danym prawdopodobieństwem mogą mieścić się wyniki spostrzeżeń, obliczono dla dynamicznych naprężeń płynięcia przedziały ufności pojedynczych spostrzeżeń przy ustalonych poziomach ufności  $P=95$  i  $99\%$ .

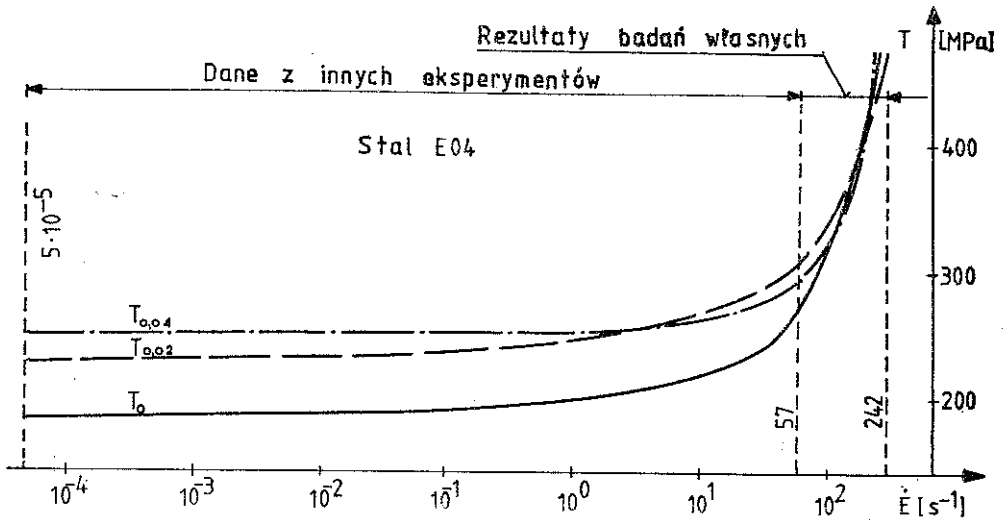
Analiza rezultatów dynamicznych badań doświadczalnych na przykładzie dynamicznych naprężeń płynięcia dla stali przedstawionych na rysunkach 6-10 pokazuje wyraźnie, że efekty prędkości odkształcenia są bardzo istotne. Maleją one w stalach o wzrastającej zawartości w nich węgla. Efekty te wpływają na zmianę charakteru całej krzywej naprężenie-odkształcenie (rys. 5). Obserwujemy je przede wszystkim w zmianie granicy plastyczności  $R_{0,2}$  i sprężystości  $R_{0,05}$  [2, 3, 4, 6, 8, 9, 10 i 16] oraz we wzroście dynamicznego naprężenia płynięcia  $T_{0,04}$ ,  $T_{0,02}$  i  $T_0$  (rys. 6-9). Można postawić wniosek, że efekty prędkości odkształcenia (deformacji) zmieniają charakter wzmocnienia plastycznego oraz zdolność stali do odkształceń

Rys. 5. Wykresy  $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$  badanych stali

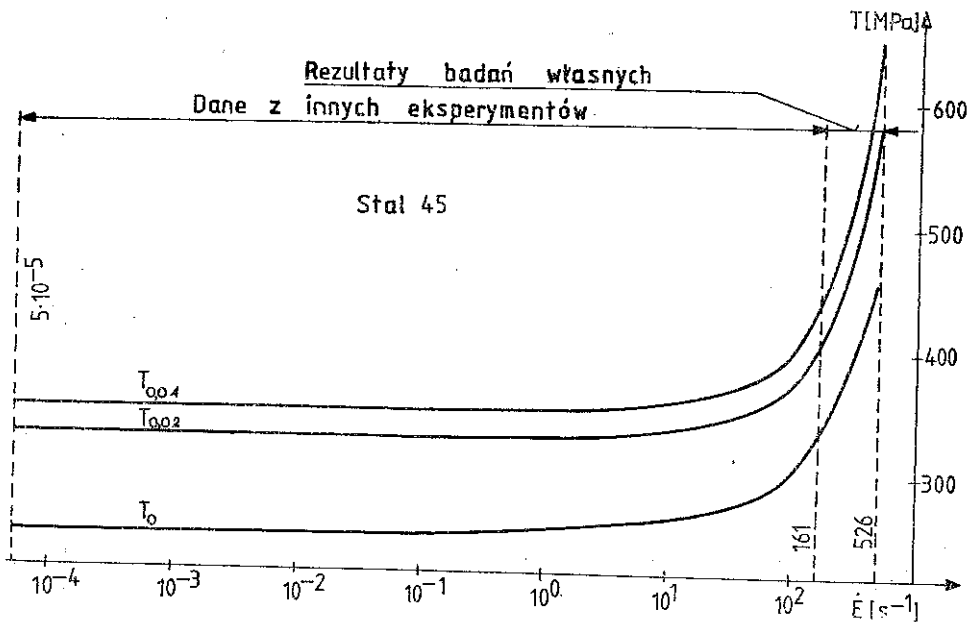
plastycznych i wpływają na wartość naprężenia niszczącego. Powyższe spostrzeżenia są zgodne z rezultatami badań przedstawionymi w pracach [2, 3, 4, 6, 9, 10 i 16].

W celu bliższej analizy badań doświadczalnych można posłużyć się za [15] schematyczną ilustracją efektów prędkości odkształcenia zaproponowaną przez U. S. Lindholma. Występujący parametr Lindholma  $\beta$  zależy od  $\dot{\epsilon}$  i temperatury  $t$  i podobny do parametru Zenera-Hollomana należałoby zmodyfikować przez zastąpienie zmiennego współczynnika zależnego od temperatury współczynnikiem stałym (przy  $t = \text{const}$ ). Wtedy w zależności od wielkości parametru  $\beta$  na inżynierskiej krzywej  $\sigma(\epsilon)$  można wyznaczyć granicę naprężeń sprężystych, naprężeń statycznych i naprężeń niestatecznych plastycznych. Wspólną granicę górną naprężeń

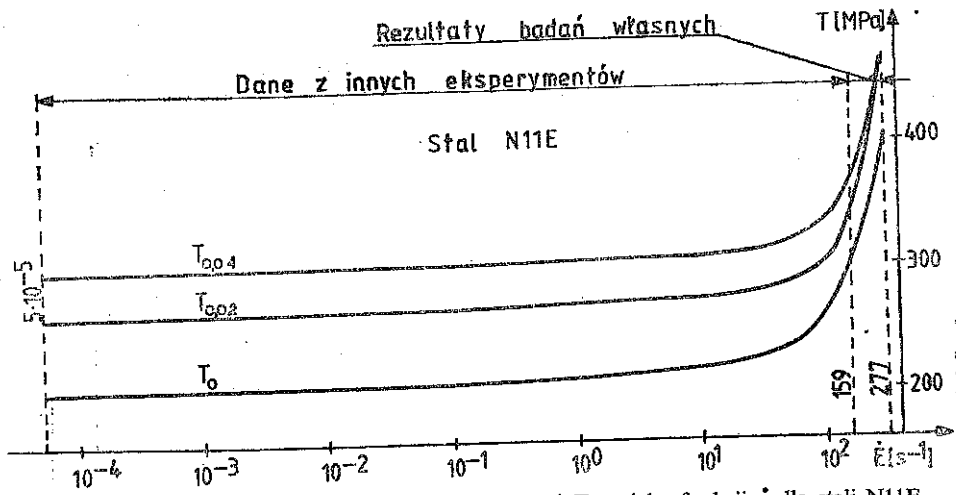
statecznych i dolną niestatecznych wyznacza względne maksimum na inżynierskiej krzywej naprężenie-odkształcenie. Granicę pomiędzy obszarami sprężystym i statecznym plastycznym przedstawia w płaszczyźnie  $\sigma(\epsilon)$  granica uplastycznienia (granica płynięcia). Można przyjąć, że taką granicę przedstawia dynamiczne naprężenie płynięcia  $T_{0,04}$ .



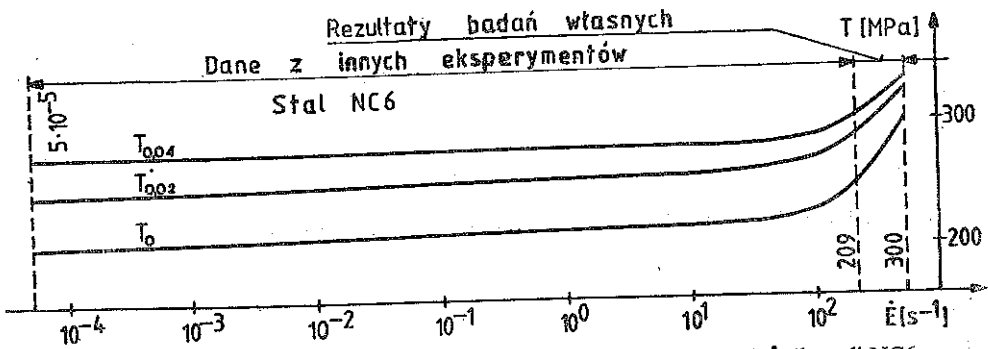
Rys. 6. Dynamiczne naprężenia płynięcia  $T_0$ ,  $T_{0,02}$  i  $T_{0,04}$  jako funkcji  $\dot{\epsilon}$  dla stali E04



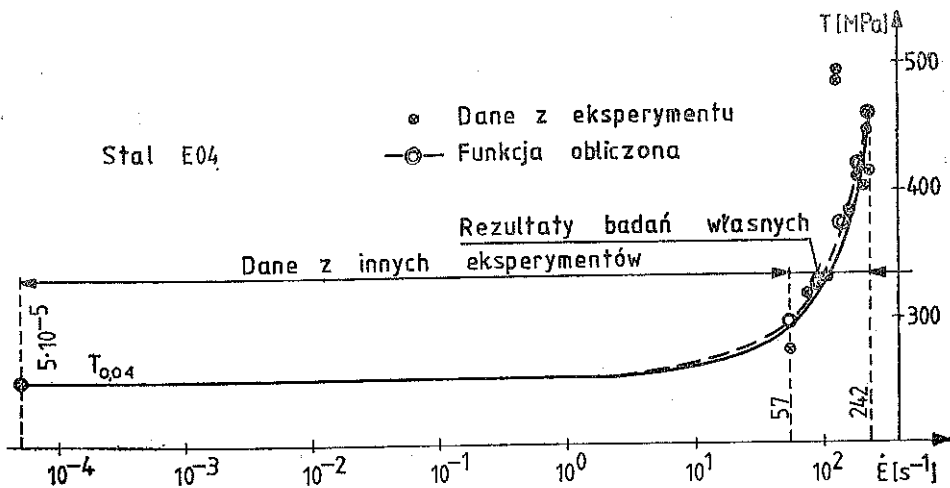
Rys. 7. Dynamiczne naprężenia płynięcia  $T_0$ ,  $T_{0,02}$  i  $T_{0,04}$  jako funkcji  $\dot{\epsilon}$  dla stali 45



Rys. 8. Dynamiczne naprężenia płynięcia  $T_0$ ,  $T_{0,02}$  i  $T_{0,04}$  jako funkcji  $\dot{\epsilon}$  dla stali N11E



Rys. 9. Dynamiczne naprężenia płynięcia  $T_0$ ,  $T_{0,02}$  i  $T_{0,04}$  jako funkcji  $\dot{\epsilon}$  dla stali NC6



Rys. 10. Dynamiczne naprężenie płynięcia  $T_{0,04}$  jako funkcji  $\dot{\epsilon}$  dla stali E04



W celu przeprowadzenia pełnej analizy zachowania się stali, konieczny jest opis dynamicznych naprężeń płynięcia  $T_0$ ,  $T_{0,02}$  i  $T_{0,04}$  za pomocą równań płynięcia. Taka próba opisu równaniem konstytutywnym (nazywanym też prawem płynięcia)  $T_{0,04}$  została podjęta dla stali E04 w p. 5. Mając tak określone wszystkie granice pomiędzy obszarami (sprężystym, statecznym plastycznym i niestatecznym plastycznym) i określone równania konstytutywne w obszarach sprężystym i plastycznym można mówić o pełnym opisie zachowania się stali.

##### 5. PRÓBA TEORETYCZNEGO OPISU DYNAMICZNEGO PŁYNIĘCIA RÓWNIANIEM KONSTITUTYWNYM

Istnieje szereg sposobów opisu matematycznego związku między naprężeniem a odkształceniem i jego prędkością dla interesującego nas jednoosiowego stanu naprężeń. Dość dokładny zapis ogólnego związku przedstawiono w pracach [5 i 7] następująco:

$$(5.1) \quad \dot{\epsilon} = \frac{\sigma}{E} + \Phi[\sigma - f(\epsilon)],$$

gdzie  $\Phi$  oznacza uogólnioną nieliniową funkcję zależną od dodatniego argumentu (jest równa zero przy argumentie ujemnym) oraz  $f(\epsilon)$  statyczną krzywą rozciągania (ściskania).

Dokładniejszy zapis ogólnego związku został przedstawiony w pracach [13 i 15] w postaci prawa płynięcia (równania konstytutywnego) następująco:

$$(5.2) \quad \dot{\epsilon} = \frac{\sigma}{E} + \gamma^* \left[ \Phi \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right) \right]$$

oraz

$$(5.3) \quad \sigma = \sigma_0 \left[ 1 + \Phi^{-1} \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{\gamma^*} \right) \right],$$

gdzie  $\dot{\epsilon}_p$  oznacza prędkość odkształcenia niesprężystego,  $\gamma^*$  parametr lepkości,  $\sigma_0$  granicę plastyczności oraz  $\Phi$  funkcję materiałową.

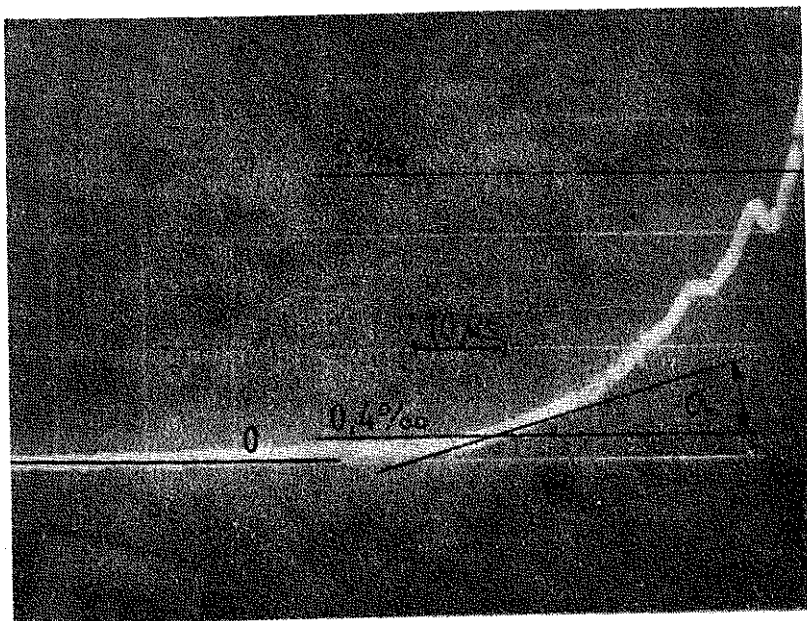
Równania konstytutywne, najściślej opisujące współczynniki mające wpływ na proces płynięcia materiału, przedstawiono w pracy [11] następująco:

$$(5.4) \quad T = \chi_0^* \left\{ 1 + \Phi^{-1} \left[ \frac{\dot{\epsilon}_p}{\gamma_0^*} \varphi \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} - 1 \right) \right] \right\},$$

gdzie  $T$  oznacza dynamiczne naprężenie płynięcia zależne od temperatury i  $\dot{\epsilon}$ ,  $\chi_0^*$  parametr określający wielkość statycznego naprężenia płynięcia ( $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_s$ ),  $\gamma_0^*$  parametr lepkości zależy od temperatury i  $\dot{\epsilon}$ ,  $\dot{\epsilon}_s$  prędkość odkształcenia statycznego oraz  $\Phi$  i  $\varphi$  funkcje materiałowe.

Z kolei przejdziemy do praktycznego określenia równania konstytutywnego dla jednego z dynamicznych naprężeń płynięcia  $T$  na bazie uzyskanych wyników badawczych dla stali E04. Wyznaczenie prędkości odkształcenia niesprężystego  $\dot{\epsilon}_p$

przy małych odkształceniach ( $\varepsilon=0,4\%$ ) zachodzi z dość znacznym błędem z powodu zastosowania stosunkowo dużego ( $\varepsilon=5\%$ ) zakresu pomiarowego odkształcenia (rys. 11), a niezbędnego dla prawidłowego określenia dynamicznych naprężeń płynięcia  $T_0$ ,  $T_{0,02}$  i  $T_{0,04}$  z funkcji  $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ . Przy określeniu  $\dot{\varepsilon}_p$  dla  $\varepsilon < 0,04\%$  zostaną popełnione jeszcze większe błędy. Z tego powodu ograniczono się do wyznaczenia  $\dot{\varepsilon}_p$  tylko przy  $\varepsilon=0,04\%$ . Prowadząc styczne do krzywej  $\varepsilon(t)$  w tym punkcie (rys. 11)



Rys. 11. Oscylogram odkształcenia próbki  $\varepsilon(t)$  dla stali EO4 przy  $\dot{\varepsilon}_{sr}^* = 96,1$  1/s

i określając tg kąta ich nachylenia od odciętych, określono  $\dot{\varepsilon}_p$  dla każdej  $\dot{\varepsilon}_{sr}$ . Dla zniwelowania różnic między poszczególnymi  $\dot{\varepsilon}_p$  (wynikami z poprowadzenia obarczonych pewnym błędem stycznych do funkcji  $\varepsilon(t)$  w punktach  $\varepsilon$  również obranych z pewnym błędem) poczyniono próbę uśrednienia uzyskanych wartości przez określenie zależności  $\dot{\varepsilon}_p(\dot{\varepsilon}_{sr})$  w postaci

$$(5.5) \quad \dot{\varepsilon}_{p\ 0,04} = 0,23746 \dot{\varepsilon}_{sr} + 0,0022766 \dot{\varepsilon}_{sr}^2.$$

Funkcję (5.5) dobrano metodą najmniejszych kwadratów. Mając obliczone i uśrednione wielkości  $\dot{\varepsilon}_{p\ sr}$  przy  $\varepsilon=0,04\%$  łącznie z określonymi z rys. 5 eksperymentalnie dynamicznymi naprężeniami płynięcia  $T_{0,04}$  dla odpowiednich  $\dot{\varepsilon}_{sr}$  oraz dane z eksperymentu

$$\dot{\varepsilon}_s = 5 \cdot 10^{-5} [s^{-1}], \quad \lambda_0^* = 249 [MPa],$$

można w równaniu konstytutywnym (5.4) określić metodą kolejnych prób parametr lepkości  $\gamma_0^*$  i funkcje materiałowe  $\Phi^{-1}$  i  $\varphi$ . Jest to równanie (5.4) z trzema niewiadomymi, tj.  $\gamma_0^*$ ,  $\varphi$  i  $\Phi^{-1}$ . W pierwszej kolejności określono parametr lepkości  $\gamma_0^*$  przy założeniu stałych wartości funkcji  $\varphi$  i  $\Phi^{-1}$ , przyrównując lewą stronę rów-

nania (5.4) do maksymalnej wartości dynamicznego naprężenia pływnięcia. Uzyskany w ten sposób parametr  $\gamma_0^*$  jako stały wstawiono do równania (5.4), którego lewą stronę przyrównano do minimalnego dynamicznego naprężenia pływnięcia i określono funkcje  $\varphi$  i  $\Phi^{-1}$ . Otrzymywano pewną różnicę między wcześniej założonymi, a później określonymi funkcjami  $\varphi$  i  $\Phi^{-1}$ . Po skorygowaniu funkcji  $\varphi$  i  $\Phi^{-1}$  ponownie obliczono parametr  $\gamma_0^*$ . I tak metodą kolejnych prób, po sprawdzeniu punktów pośrednich funkcji między  $T_{\min}$  a  $T_{\max}$ , dobrano ostatecznie parametr  $\gamma_0^*$  i funkcje materiałowe  $\varphi$  i  $\Phi^{-1}$  w równaniu (5.4) następująco:

$$(5.6) \quad T_{0,04}^{\text{oblicz}} = 249 \left\{ 1 + \left[ \frac{\dot{\epsilon}_p}{1,38964 \cdot 10^9} \left( \frac{\dot{\epsilon}_{sr}}{5 \cdot 10^{-5}} - 1 \right) \right]^{5/12} \right\}.$$

Wykres dynamicznego naprężenia pływnięcia (5.6) przedstawiono na wykresie (rys. 10) w postaci linii przerywanej. Po porównaniu wartości funkcji rzeczywistej (linia ciągła) z obliczoną (linia przerywana) na rys. 10 można sądzić o trafnym określeniu równania konstytutywnego, opisującego zachowanie się dynamicznego naprężenia pływnięcia przy umownym odkształceniu trwałym  $\epsilon=0,04\%$  dla stali E04.

Analogicznie postępując można określić równania konstytutywne dla pozostałych gatunków stali. Różnić się będą one między sobą parametrami  $\lambda_0^*$  i  $\gamma_0^*$  oraz funkcjami materiałowych  $\varphi$  i  $\Phi^{-1}$  (5.4).

## 5. WNIOSKI

Przedstawiona metoda badawcza własności mechanicznych materiałów może być adaptowana do badania różnych materiałów jak i sposób analizy i opisu matematycznego pływnięcia podanego w formie równania konstytutywnego.

Przedstawiona próba teoretycznego opisu równaniem konstytutywnym dynamicznego naprężenia pływnięcia może być analogicznie zastosowana dla pozostałych gatunków stali. Uzyskane równania (5.6) różnić się będą między sobą tylko współczynnikami stałymi określającymi lepkość i statyczne naprężenie pływnięcia oraz funkcjami materiałowymi charakterystycznymi dla poszczególnych stali.

Przy wykonaniu rozszerzonego zakresu badań można wyznaczyć wszystkie granice pomiędzy obszarami (sprężystym, statecznym plastycznym i niestatecznym plastycznym), przedstawiającymi schematyczną ilustrację efektów prędkości odkształcenia [15]. Zamieszczone rezultaty badań pozwalają na wyznaczenie granicy między obszarem sprężystym i statecznym plastycznym przy umownym przyjęciu takiej granicy, jako dynamiczne naprężenie pływnięcia przy umownym odkształceniu trwałym  $\epsilon=0,04\%$ . Pełny opis zachowania się stali przedstawiają wyznaczone granice pomiędzy poszczególnymi obszarami wraz z określonymi w tych obszarach równaniami konstytutywnymi. Wykonanie tego zadania wymaga rozszerzenia programu badań na duże umowne odkształcenia trwałe ( $\epsilon > 0,04\%$ ) dla wejścia w obszar niestateczny plastyczny.

Wyznaczenie umownej granicy między obszarem sprężystym a statecznym plastycznym wraz z określeniem równania konstytutywnego dla jednej ze stali,

przy możliwości analogicznego określenia tych równań dla pozostałych gatunków stali, pozwala przyjąć, że została dokonana pełna analiza zachowania się materiałów dla zawartego programu badań, określonego uzyskanymi maksymalnymi prędkościami odkształcenia i wyznaczonymi dynamicznymi naprężeniami płynięcia przy maksymalnym umownym odkształceniu trwałym. Osobnym problemem badawczym będzie określenie dynamicznych naprężeń płynięcia w złożonych stanach naprężenia.

#### LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. Z. ANISIMOWICZ, *Kryterium doboru stali konstrukcyjnych do budowy sprzętu uzbrojenia pracującego w zakresie dużych prędkości odkształcenia*, Rozpr. doktorska, Biblioteka Główna WAT, Warszawa 1981.
2. J. D. CAMPBELL and R. H. COOPER, *Yield and flow low carbon steel at medium strain rates*, Proc. Phys. Conf. Basis Yield Fracture, 77—87, 1967.
3. J. HARDING, E. O. WOOD and J. D. CAMPBELL, *Tensile testing of materials at impact rates of strain*, J. Mech. Engeng. Sci., 2, 88—96, 1960.
4. J. HARDING, *The effect of grain size and strain rate on the lower yield stress of pure iron at 288°K*, Acta Metallurg. 17, 949—958, 1969.
5. A. JAKOWLUK, *Mechanika techniczna i ośrodków ciągłych*, PWN, Warszawa 1977.
6. J. E. JOHNSON, D. S. WOOD, D. S. CLARK, *Delayed yielding in annealed low-carbon steel under compression impact*, Proc. Am. Soc. Test. Materials, 53, 755—764, 1953.
7. J. KLEPACZKO, *Doświadczalne badania sprężysto plastycznych procesów falowych w metalach*. Cz. 1 i 2, Prace IPPT, 61, 1970 i 19, 1971.
8. U. S. LONDHOLM, *Review of dynamic testing techniques and material behaviour*, Proc. Conf. Mech. Prop. Mat. High Rates of Strain, Oxford, 2—4 April, 1974. Conf. Sev. No. 21, The Institute of Physics, London and Bristol, 3—21, 1974.
9. N. N. MALININ, J. RZYSKO, *Mechanika materiałów*, PWN, Warszawa 1981.
10. K. J. MARSH and D. J. CAMPBELL, *The effect of strain rate on the post yields flow of mild steel*, J. Mech. Phys. Solids, 11, 49—63, 1963.
11. P. PERZYNA, *Modified theory of viscoplasticity. Application to advanced flow and instability phenomena*, Arch. Mech., 32, 403—420, 1980.
12. P. PERZYNA, *Stability problems for inelastic solids with defects and imperfections*, Arch. Mech., 33, 587—602, 1981.
13. P. PERZYNA, *Teoria lepkoplastyczności*, PWN, Warszawa 1966.
14. P. PERZYNA, *Termodynamiczna teoria materiałów o własnościach reologicznych*, PAN, Warszawa 1966.
15. P. PERZYNA, *Termodynamika materiałów niesprężystych*, PWN, Warszawa 1978.
16. M. R. D. RANDALL and J. D. CAMPBELL, *Dynamic plasticity under combined stresses. The development and use of medium — rate tension — torsion machine*, University of Oxford, Report No. 1047/72, December 1972.
17. L. Z. RUMSZYŃSKI, *Matematyczne opracowanie wyników eksperymentu*, WNT, Warszawa 1973.

## Резюме

## ВЛИЯНИЕ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ОЧЕНЬ МАЛЫХ УСЛОВНЫХ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Целью работы является исследование влияния скорости деформации на динамические напряжения течения при очень малых условных остаточных деформациях. Исследованы четыре сорта сталей методом динамического одноосного растяжения. Исследования проведены в интервале скоростей деформаций от  $\dot{\epsilon} = 57 \text{ с}^{-1}$  до  $\dot{\epsilon} = 526 \text{ с}^{-1}$  (от 0,281 м/с до 2,631 м/с) и в интервалах условных остаточных деформаций  $\epsilon = 0; 0,02$  и  $0,04\%$ . Определено влияние скорости деформации на значение динамического напряжения течения для отдельных сортов сталей. Предпринята попытка теоретического описания определяющим уравнением динамического напряжения течения для одного из сортов сталей с возможностью ее применения для остальных сортов.

## SUMMARY

## EFFECT OF HIGH STRAIN RATES ON DYNAMIC YIELD STRESSES IN STEEL UNDER VERY SMALL PERMANENT PROOF STRAINS

The paper is aimed at the investigation of the effect of strain rates on the dynamic yield stresses under the assumption of very low permanent proof strains. Four steel grades are tested by means of uni-axial dynamic tension. The tests are performed in the strain rate ranges from  $\dot{\epsilon} = 57 \text{ s}^{-1}$  to  $\dot{\epsilon} = 526 \text{ s}^{-1}$  (from 0.281 m/s to 2.631 m/s) and for permanent proof deformations  $\epsilon = 0, 0.02$  and  $0.04\%$ . The effect of strain rates on the dynamic yield stresses of various steel grades is determined. An attempt is made to describe the dynamic yield stresses by means of a theoretical constitutive equation.

*Praca została złożona w Redakcji dnia 26 maja 1983 r.*

---