

## WPLYW PROPORCJI WYMIAROWYCH PRÓBKII NA STATECZNOŚĆ PRZY JEDNOOSIOWYM ROZCIĄGANIU

LECH DIETRICH i JAN SOBOTKOWSKI (WARSZAWA)

W pracy przedstawiono wyniki doświadczalnego określenia, przy pomocy różnych metod, początku powstania szyjki w trakcie jednoosiowego rozciągania stalowych próbek cylindrycznych o różnych proporcjach długości do średnicy. Stwierdzono, że wartość odkształceń, przy których zaczyna tworzyć się szyjka jest większa od odkształceń odpowiadających największej sile rozciągania i zależy od proporcji wymiarowych próbki. W pracy przedstawiono również wyniki obliczeń numerycznych otrzymanych na podstawie porównania przyrostów siły rozciągającej dla jednorodnego i lokalnego mechanizmu deformacji próbki wykonanej z materiału ze wzmocnieniem.

### 1. WSTĘP

Zniszczenie metali związane z tworzeniem się, rozwojem i łączeniem pustek (porów) jest zwykle poprzedzone lokalizacją odkształceń. Rozwój niejednorodności odkształceń przy jednoosiowym rozciąganiu doprowadza do powstania geometrycznej niestateczności zwanej szyjką. Wartość odkształceń odpowiadających zerwaniu próbki przy jednoosiowym rozciąganiu traktowana jest obecnie jako wskaźnik zdolności materiału do odkształceń plastycznych. Jest to parametr porównawczy i nie może być traktowany jako stała materiałowa. Jego wartość zależy od wymiarów próbki i nie odpowiada lokalnej wartości odkształceń w momencie zerwania w poszczególnych punktach przekroju. Przykładem konkretnej postaci zależności względnego wydłużenia przy zerwaniu od wymiarów próbki jest znana, empiryczna formuła OLIVIERA [1] dla stali węglowych i stopowych o wytrzymałości na rozciąganie w granicach od 300 do 700 MPa wynosi

$$(1.1) \quad A^* = 2A \left( \frac{\sqrt{S_0^*}}{l_0^*} \right)^{0,4},$$

gdzie  $A^*$  oznacza względne wydłużenie przy zerwaniu próbki o początkowym przekroju poprzecznym  $S_0^*$  i długości pomiarowej  $l_0^*$ ,  $A$  względne wydłużenie przy zerwaniu próbki pięciokrotnej, dla której spełniony jest warunek  $l_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$ .

Niejednorodny rozkład naprężeń i odkształceń w szyjce stanowi dodatkowe utrudnienie w interpretacji uśrednionej (na całej długości pomiarowej) miary zdolności do odkształceń, jaką jest względne wydłużenie przy zerwaniu. Jednoosiowe rozciąganie jest próbą materiałową tylko do momentu początku tworzenia się szyjki, od którego uśrednienie naprężeń i odkształceń na całej objętości próbki traci swój sens fizyczny ze względu na powstałe zakłócenia jednorodności pola deformacji [2].

Wartość odkształceń, przy których zaczyna tworzyć się szyjka w próbie jednoosiowego rozciągania ma istotne znaczenie. Określa bowiem zakres, do którego próba ta może być traktowana jako próba badania materiałowego i jest praktycznym wskaźnikiem zdolności materiału do plastycznych odkształceń dla wielu procesów obróbki plastycznej; umożliwia też ocenę różnych kryteriów powstawania niestateczności próby rozciągania.

W zaproponowanym przez Considère'a [3] kryterium pojawienie się lokalizacji odkształceń utożsamiano z największą siłą rozciągającą. Kryterium to jest w istocie warunkiem ekstremum funkcji siły rozciągającej zależnej od odkształceń. W szeregu innych pracach kryterium to rozszerzono, uwzględniając wpływ prędkości deformacji i temperatury [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 i 11].

Wyniki wielu już w chwili obecnej prac, które polegały na rozwiązywaniu różnymi metodami zagadnienia jednoosiowego rozciągania dla konkretnych warunków brzegowych, wskazują, że wartość odkształceń, przy których pojawia się szyjka zależy od modułu umocnienia materiału, współczynnika jego wrażliwości na prędkość deformacji, stosunku długości do średnicy próbki i warunków jej zamocowania [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 i 20]. Obliczona w tych pracach wartość odkształceń, przy których pojawia się szyjka, jest większa od wartości odkształceń odpowiadającej maksymalnej sile, przy czym różnica między tymi odkształceniami zależy od wartości wymienionych parametrów. Dla danego materiału i tych samych warunków zamocowania próbki różnica między odkształceniami powstania szyjki i maksymalnej siły jest tym większa, im jest mniejszy stosunek długości próbki do jej średnicy.

Fakt pojawienia się szyjki przy odkształceniach większych od odkształceń odpowiadających największej sile rozciągającej znajduje potwierdzenie w wynikach niektórych badań doświadczalnych. Przy rozciąganiu w podwyższonych temperaturach płaskich próbek wykonanych z walcowanego na zimno cyrkonu, odkształcenia, przy których pojawia się szyjka, były przeszło pięciokrotnie większe od odkształceń odpowiadających maksymalnej sile [21]. Moduł umocnienia materiału w tym przypadku był bliski zera, a przy większych odkształceniach miał nawet niewielkie wartości ujemne. W badaniach przeprowadzonych dla miękkiej stali w temperaturze pokojowej [19] stwierdzono pojawienie się szyjki przy odkształceniach o 20% większych od odkształceń odpowiadających największej sile rozciągającej.

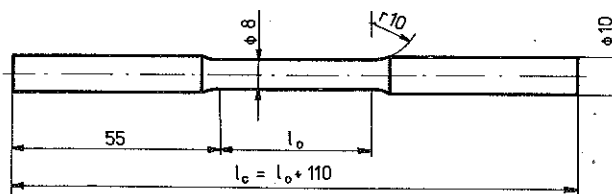
Wpływ proporcji długości do średnicy próbki na jej deformację przy rozciąganiu w temperaturze pokojowej stwierdzono doświadczalnie dla aluminium i miedzi [22]. W środkowej części próbki zmniejszono jej średnicę o 0,25%, wymuszając w ten sposób miejsce lokalizacji szyjki w próbie rozciągania. Odkształcenia, przy których pojawia się szyjka, określano porównując zmianę średnicy próbki mierzoną w dwóch jej przekrojach, osłabionym i w odległości 40 mm od niego. Lokalizacja odkształceń poprzedzona była tzw. szyjką rozprzestrzenioną (*diffused neck*), która charakteryzuje się różnicą prędkości deformacji w dwóch przekrojach pomiarowych i zaczynała powstawać w chwili, gdy siła rozciągająca osiągała największą wartość. Zjawisko to związane jest z propagacją obszarów odciążania próbki poczynając od jej części chwytowych. Odkształcenia, przy których zaczyna tworzyć się szyjka utożsamiane z lokalizacją deformacji w środkowym (osłabionym) przekroju próbki, były większe od odkształceń odpowiadających największej sile, a różnica ta była tym większa, im mniejsza była względna długość próbki odniesienia do jej średnicy.

Odkształcenie odpowiadające początkowi lokalizacji deformacji w próbie jednoosiowego rozciągania jest trudno określić doświadczalnie. Nieznane jest miejsce na próbce, w którym powstanie szyjka, a stwierdzenie wystąpienia początku lokalizacji związane jest z przyjętą definicją, zastosowanymi metodami pomiarowymi i ich dokładnością.

Celem pracy jest analiza doświadczalna wpływu względnej długości próbki na lokalizację deformacji przy jednoosiowym rozciąganiu. Do wykrywania tej lokalizacji zastosowano kilka metod pomiarowych.

## 2. PROCEDURA DOŚWIADCZALNA

Ocenę wpływu proporcji długości pomiarowej do średnicy próbki na odkształcenia, przy których zaczyna tworzyć się szyjka, przeprowadzono na cylindrycznych próbkach wykonanych z miękkiej stali o symbolu A10 (wg PN-73/H-84026) o zawartości węgla max. 0,12% i nominalnej granicy



$$l_0 = 40 ; 90 ; 190 ; 290 ; 490 ; 690$$

$$l_0/d_0 = 5 ; 11,25 ; 23,75 ; 36,25 ; 61,25 ; 86,25$$

Rys. 1

plastyczności  $R_e = 450$  MPa i wytrzymałości na rozciąganie w granicach 570—800 MPa. Kształt i nominalne wymiary próbek przedstawiono na rys. 1. Wykonano sześć serii próbek o długości pomiarowej od 40 do 690 mm, a stosunek rzeczywistych wymiarów długości do średnicy zawarty był w przedziale od 4,97 do 93,5. Wymiary 21 wykonanych próbek przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Nr próbki	$l_0$ mm	$d_0$ mm	$l_0/d_0$
1	40	8	5
2	40	8,04	4,97
3	40	7,95	5,03
4	90	7,99	11,26
5	90	7,98	11,28
6	90	7,94	11,33
20	90	7,95	11,32
21	90	7,91	11,38
7	190	7,97	23,84
8	190	7,97	23,84
9	190	7,88	24,11
13	290	7,87	36,85
14	290	7,75	37,42
15	290	8,06	35,98
10	490	6,83	71,74
11	490	8,40	58,33
12	490	7,67	63,88
16	690	7,70	89,61
17	690	7,71	89,49
18	690	8,06	83,61
19	690	7,38	93,50

Rozciąganie próbek przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 1251 z kinetycznym wymuszeniem ruchu trawersy, dobierając jej prędkość w ten sposób, żeby początkowa prędkość odkształcenia zmieniała się w wąskim przedziale. Rzeczywiste wartości początkowej prędkości odkształcenia utrzymywane były dla wszystkich próbek w przedziale od  $2,4 \cdot 10^{-5}$  do  $4,4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

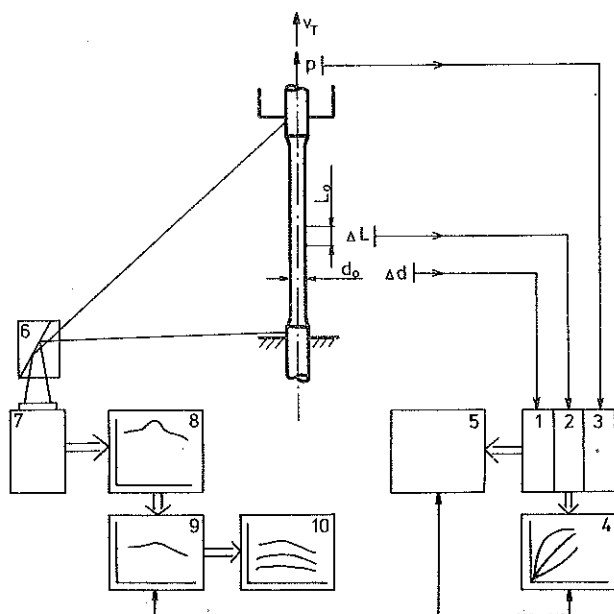
Wartość odkształceń, przy których zaczyna tworzyć się szyjka określano na podstawie następującej:

- 1) detekcji lokalizacji przyrostu temperatury na podstawie pomiaru rozkładu temperatury wzdłuż długości próbki metodą termowizji;
- 2) zmian odkształceń wzdłużnych w czasie rozciągania mierzonych w środkowej części próbki na bazie 12,5 mm przy pomocy ekstensometru firmy Instron;

3) zmian odkształceń poprzecznych w czasie rozciągania mierzonych przy pomocy ekstensometru firmy Instron umieszczonego w pewnej odległości od ekstensometru wzdluznego;

4) wzrokowej obserwacji lokalizacji odkształcenia uwidaczniającej się w postaci zmatowienia powierzchni próbki na pewnym jej odcinku.

Schemat blokowy stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 2. W każdej serii wymiarowej próbek przeprowadzono dwa typy pomiarów. W pierwszym z nich, wykonywanym na jednej próbce z każdej serii, rejestrowano w trakcie rozciągania siłę, wydłużenie odcinka bazowego  $L_0$  ekstensometru wzdluznego umocowanego w środkowej części próbki i zmianę średnicy próbki przy pomocy ekstensometru poprzecznego umocowanego w pewnej odległości od ekstensometru wzdluznego. Zmianę tych trzech wielkości rejestrowano jako funkcje czasu. Sygnał elektryczny z ekstensometru poprzecznego, wzdluznego oraz z celi obciążającej był kierowany poprzez zestaw wzmacniaczy (1, 2, 3) na rejestrator z trzema pisakami (4) maszyny Instron. Sygnał ze wzmacniacza celi obciążającej był jednocześnie przekazywany, w określonych odstępach czasu, na drukarkę (5). Zapis ten był pomocny w identyfikowaniu punktu na wykresie rozciągania, w którym siła osiągała największą wartość. Drugi typ pomiarów, realizowany na dwóch próbkach z każdej serii wymiarowej, polegał na rejestracji zmian rozkładu temperatury wzdluz próbki w czasie jej rozciągania przy pomocy aparatury termowizyjnej AGA 680. Urządzenie to umożliwia rejestrację powierzchni-



Rys. 2

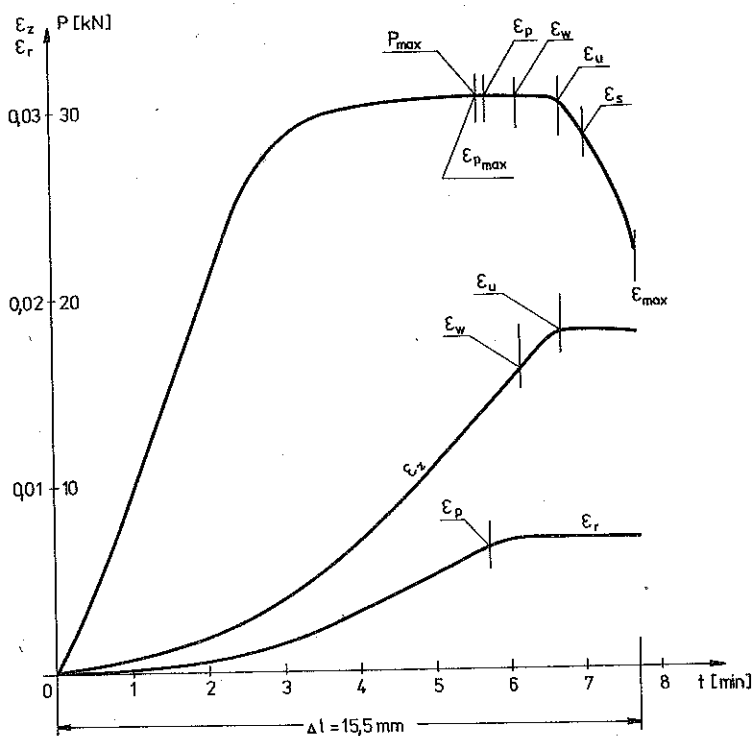
wego rozkładu mocy promieniowania podczerwonego zbieranego z poszczególnych punktów badanej powierzchni przy pomocy mechaniczno-optycznego układu kamery. Promieniowanie z powierzchni zogniskowane zostaje na detektorze podczerwieni, w którym następuje przetworzenie sygnału cieplnego na elektryczny. Wzmocniony impuls elektryczny kierowany jest następnie do oscyloskopu, tak że na jego ekranie obserwujemy bezpośrednio rozkład temperatury danej powierzchni. Układ kamery (7) składa się z dwóch pryzmatów wirujących w dwóch prostopadłych kierunkach, dzięki czemu z całego pola widzenia kamery zbierane jest promieniowanie podczerwone linia po linii. Zatrzymanie pryzmatu o poziomej osi obrotu umożliwia badanie rozkładu temperatur wzdłuż dowolnie wybranej, zależnej od położenia unieruchomionego pryzmatu, linii poziomej pola widzenia kamery. Zastosowanie układu dwóch lusterek (6 — rys. 2) o osiach obrotu wzajemnie prostopadłych umożliwia obserwację rozkładu temperatur wzdłuż długości pionowo ustawionej próbki w maszynie wytrzymałościowej. Sygnał z kamery (7) przekazywany jest na ekran oscyloskopu (8) stanowiącego wyposażenie zestawu AGA, na którym generowany jest wykres temperatury wzdłuż długości próbki z częstotliwością 1800 Hz. Równolegle włączony był dodatkowy oscyloskop z pamięcią cyfrową firmy Gould Advance (9), który umożliwia zapamiętanie obserwowanego na ekranie obrazu i następnie jego odczytanie ze zmniejszoną częstotliwością na rejestratorze X-Y (10). Wyzwolenie pamięci oscyloskopu (9) zsynchronizowane było z drukarką (5) i rejestratorem X-Y (4), na którym rysowano wykres siły jako funkcję czasu. Rozkłady temperatur wzdłuż długości próbki rejestrowano w zakresie płynięcia plastycznego z częstotliwością nie przekraczającą 0,1 Hz, zależną od czasu odtworzenia wykresu na rejestratorze Y-Y (10). Uzyskano w ten sposób zapis kolejnych rozkładów temperatury wzdłuż długości próbki w czasie próby rozciągania, z których odczytywano bezpośrednio lokalizację strefy zwiększonego wzrostu temperatury w porównaniu do pozostałych części próbki. Zwiększenie przyrostów temperatury utożsamiano z lokalizacją odkształceń na pewnej długości próbki. Z obserwacji rozkładów temperatur wzdłuż długości próbki w czasie jej dalszego rozciągania można było ocenić, czy większy przyrost temperatury w danej strefie próbki stanowił początek powstania szyjki, czy też lokalizacja odkształceń w tej strefie rozwijała się tylko przez pewien czas, natomiast szyjka powstała w innym miejscu.

Pomiary rozkładu temperatur wzdłuż długości próbki przeprowadzono dla dwóch próbek w każdej serii wymiarowej. W doświadczeniach z zastosowaniem termowizji zrezygnowano z pomiaru wydłużenia próbki i zmiany jej średnicy przy pomocy ekstensometrów, które powodowałyby zakłócenia w rozkładzie temperatury. Wydłużenie próbki w tej serii doświadczeń określano z przemieszczenia tawersy maszyny wytrzymałościowej. Pomiar wydłużenia i zmiany średnicy próbki przy pomocy ekstensometrów przeprowadzono w oddzielnej próbie dla jednej próbki z każdej serii wymiarowej.

## 3. WYNIKI DOŚWIADCZEŃ

Rozciąganie pierwszej grupy próbek o różnej długości przeprowadzono z zamontowanymi dwoma ekstensometrami firmy Instron. Pierwszy z nich o bazie pomiarowej  $L_0 = 12,5$  mm i zakresie  $\pm 40\%$  umieszczony był w środku próbki i służył do pomiaru odkształceń wzdłużnych. Ekstensometr odkształceń poprzecznych, który mierzył zmianę średnicy próbki, umieszczony był poniżej ekstensometru wzdłużnego. W czasie rozciągania rejestrowano zmiany siły  $P$ , odkształceń wzdłużnych  $\varepsilon_z$  i poprzecznych  $\varepsilon_r$  jako funkcje czasu. Ponieważ rozciągano przy stałej prędkości trawersy maszyny, przeto podziałka na osi odciętych była proporcjonalna do całkowitych przyrostów wydłużenia próbki  $\Delta l$ . Typowy wykres przedstawiono na rys. 3 dla próbki nr 17 o początkowej długości pomiarowej  $l_0 = 690$  mm. W pierwszej fazie zaawansowanego płynięcia plastycznego obserwuje się liniowe zmiany obu składowych odkształceń  $\varepsilon_z$  i  $\varepsilon_r$  w zależności od czasu. Przebieg wykresów odkształceń pokazany na rys. 3 jest typowy dla tych próbek, dla których szyjka powstaje w miejscu poza zasięgiem obu ekstensometrów. Sytuacja taka wystąpiła dla sześciu próbek. W dwóch przypadkach, dla próbki nr 6  $l_0 = 90$  mm i nr 9  $l_0 = 190$  mm,

Próbka nr 17

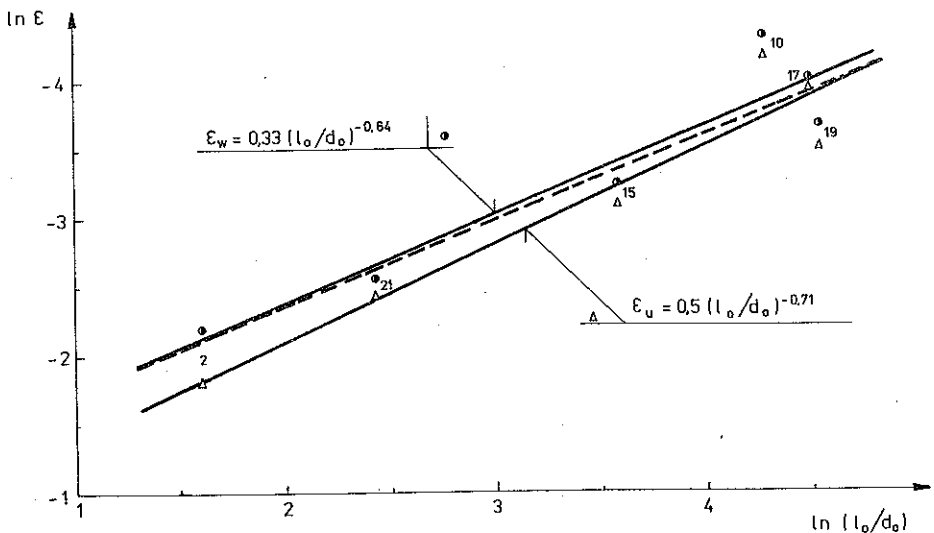


Rys. 3

szyjka utworzyła się w zasięgu ekstensometru wzdłużnego. Obserwowano wówczas zwiększenie prędkości odkształceń mierzonych ekstensometrem w momencie powstania szyjki.

Zaburzenie jednorodnego rozkładu odkształceń wzdłuż długości próbki nr 17 uwidacznia się najpierw w postaci zmniejszenia prędkości odkształceń promieniowych. Odchylenie od liniowości funkcji  $f = \varepsilon_p(t)$  związane jest z propagacją obszarów odciążenia od części chwytowych próbki i utożsamiane jest z powstawaniem tzw. szyjki rozprzestrzenionej. Wartość odkształceń próbki odpowiadającą temu odchyleniu przyjmowano za początek lokalizacji deformacji wyznaczony z ekstensometru poprzecznego i oznaczono symbolem  $\varepsilon_p$ . Wartość  $\varepsilon_p$  była bliska wartości odkształceń  $\varepsilon_{p \max}$  odpowiadających maksymalnej sile. Odkształcenia  $\varepsilon_p$  były większe od  $\varepsilon_{p \max}$  o 1,7%; 4,9%; 5,9%; 6,6%; 8%; 8,3% odpowiednio dla próbek nr 17, 2, 21, 6, 19 i 9. Dla próbki nr 15 i nr 10 nieliniowość wskazań ekstensometru poprzecznego wystąpiła przed osiągnięciem największej siły rozciągającej. Odkształcenia  $\varepsilon_p$  były o 5% i 2,8% mniejsze od odkształceń odpowiadających maksymalnej sile odpowiednio dla próbki nr 15 i nr 10.

Wartość odkształceń odpowiadająca odchyleniu od liniowości funkcji  $f = \varepsilon_z(t)$  oznaczono symbolem  $\varepsilon_w$ . Zmniejszanie się przyrostów odkształceń  $\varepsilon_z$  wskazuje na dojście fali odciążania do obszaru zamocowania ekstensometru wzdłużnego. Zmniejszanie się siły rozciągającej jest w dalszym ciągu niewielkie. Przyrosty wskazań ekstensometru wzdłużnego zmniejszają się dalej, gdy utworzenie się szyjki następuje poza miejscem umocowania ekstensometru. Wartość odkształceń odpowiadająca zerowej prędkości odkształceń na odcinku pomiarowym ekstensometru wzdłużnego oznaczono symbolem  $\varepsilon_u$ . Od mo-



Rys. 4

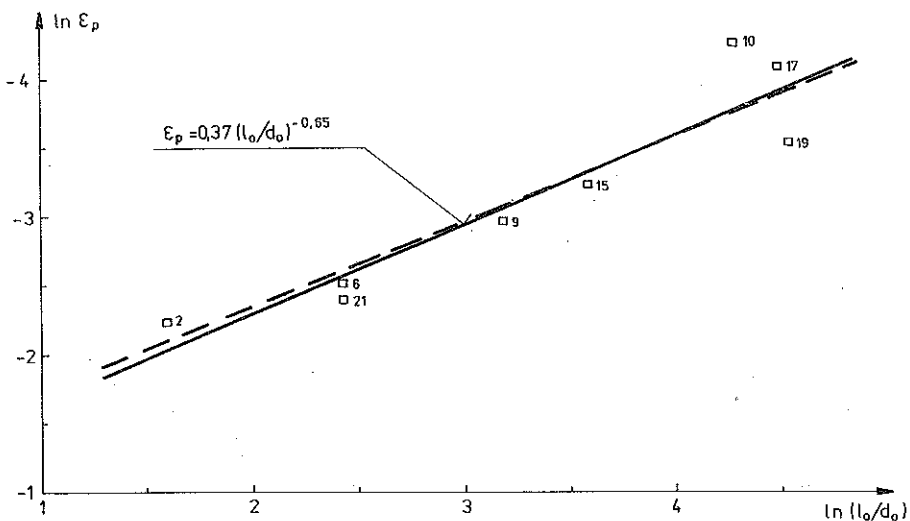


mentu osiągnięcia wartości odkształceń  $\varepsilon_u$  obserwuje się gwałtowne zmniejszanie się siły rozciągającej. Szyjka staje się widoczna gołym okiem w postaci zmatowienia powierzchni próbki na pewnym odcinku, dopiero przy średnich odkształceniach całej próbki oznaczonych symbolem  $\varepsilon_s$ .

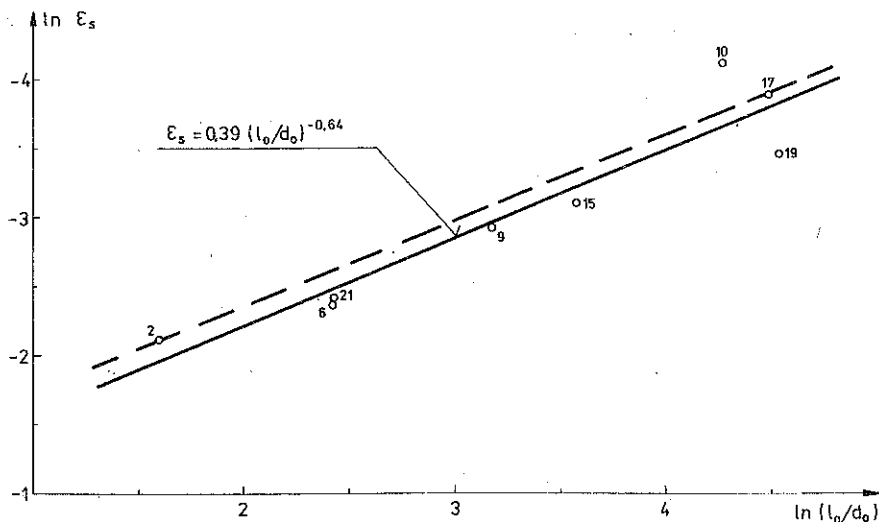
Wyniki pomiarów odkształceń odpowiadających rozwojowi niejednorodności deformacji przy rozciąganiu próbek o różnych proporcjach długości do średnicy przedstawiono na rys. 4 dla definicji  $\varepsilon_w$  i  $\varepsilon_u$  związanych z ekstensometrem wzdłużnym. Wyniki pomiarów odkształceń  $\varepsilon_p$  za pomocą ekstensometru poprzecznego przedstawiono na rys. 5, a odkształcenia  $\varepsilon_s$  odpowiadające utworzeniu się szyjki dostrzegalnej gołym okiem przedstawiono na rys. 6. Wyniki pomiarów przedstawiono dla ośmiu próbek na rys. 5 i 6. Odkształcenia określone z ekstensometru wzdłużnego przedstawiono na rys. 4 dla sześciu próbek. W dwóch próbach rozciągania (dla próbki nr 6 i 9) utworzenie się szyjki nastąpiło w miejscu zamocowania ekstensometru i charakter funkcji  $f = \varepsilon_z(t)$  był inny niż pokazany na rys. 3.

Liniami ciągłymi zaznaczono na rys. 4, 5 i 6 aproksymację zależności odkształceń lokalizacji deformacji dla poszczególnych definicji od stosunku  $l_0/d_0$  otrzymaną metodą najmniejszych kwadratów dla zbioru punktów doświadczalnych przedstawionych na poszczególnych rysunkach. Postać funkcji aproksymującej podano również na rysunkach. Linia przerywaną zaznaczono przebieg funkcji aproksymującej odkształcenia odpowiadające największej sile rozciągającej. Postać tej funkcji otrzymano metodą najmniejszych kwadratów na podstawie wyników rozciągania całej serii 21 próbek przedstawionych na rys. 7 we współrzędnych logarytmicznych.

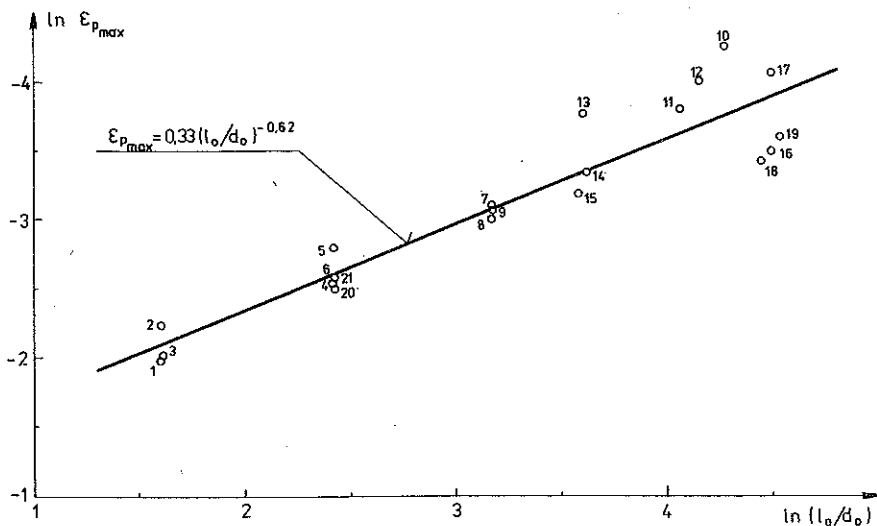
Odchylenie od liniowości wskazań ekstensometru wzdłużnego i poprzecz-



Rys. 5



Rys. 6

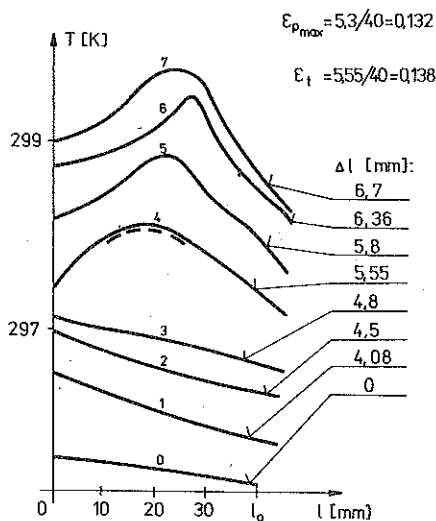


Rys. 7

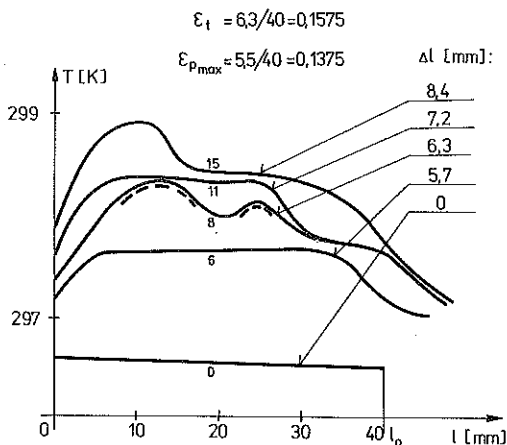
nego daje zbliżone wartości odkształceń odpowiadających początkowi rozprzestrzeniania się obszarów odciążenia. Wartości funkcji aproksymującej punkty doświadczalne dla  $\epsilon_w$  są, dla danej długości próbki, mniejsze od wartości funkcji aproksymującej odkształcenia odpowiadające największej sile rozciągającej i są mniejsze od odpowiadających wartości  $\epsilon_p$ . Wykres funkcji  $\epsilon_u(l_0/d_0)$  jest zbliżony do wykresu funkcji  $\epsilon_s(l_0/d_0)$ , przy czym różnice zależą od zmiennej  $l_0/d_0$ .

W drugiej grupie doświadczeń rejestrowano rozkład temperatury wzdłuż długości próbki za pomocą zestawu AGA 680 oraz wykres siły rozciągającej jako funkcję całkowitego wydłużenia. Siły rozciągające były również zapisywane na drukarce w odstępach czasu zsynchronizowanych z wyzwalczeniem pamięci oscyloskopu rejestrującej zmiany temperatury wzdłuż długości próbki. Zmiany rozkładu temperatur określono dla 13 próbek o różnych proporcjach długości pomiarowej do średnicy. Na papierze rejestratora zapisywano kolejne wykresy temperatury wzdłuż długości próbki w określonych odstępach czasu od początku rozwoju odkształceń plastycznych. Ciągła obserwacja ekranu

Próbka nr 3

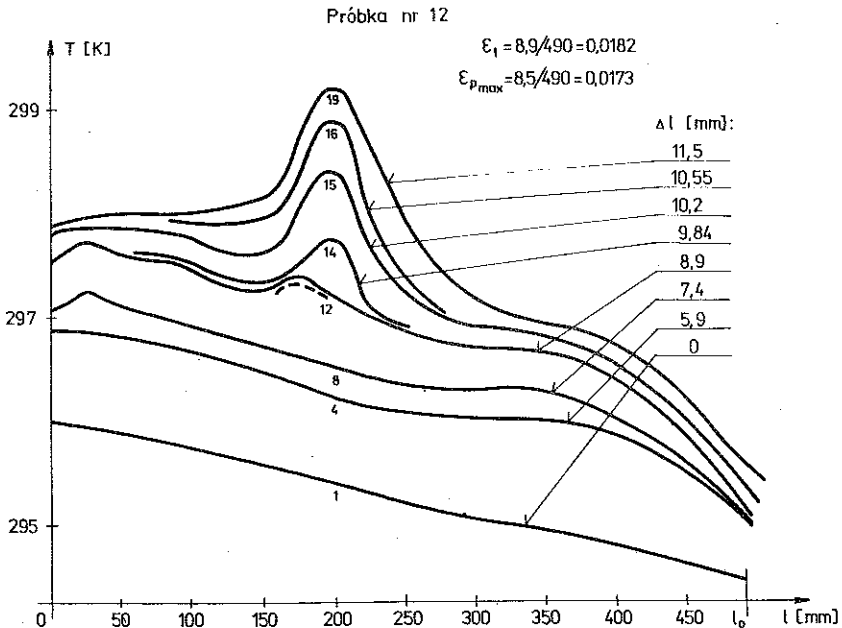


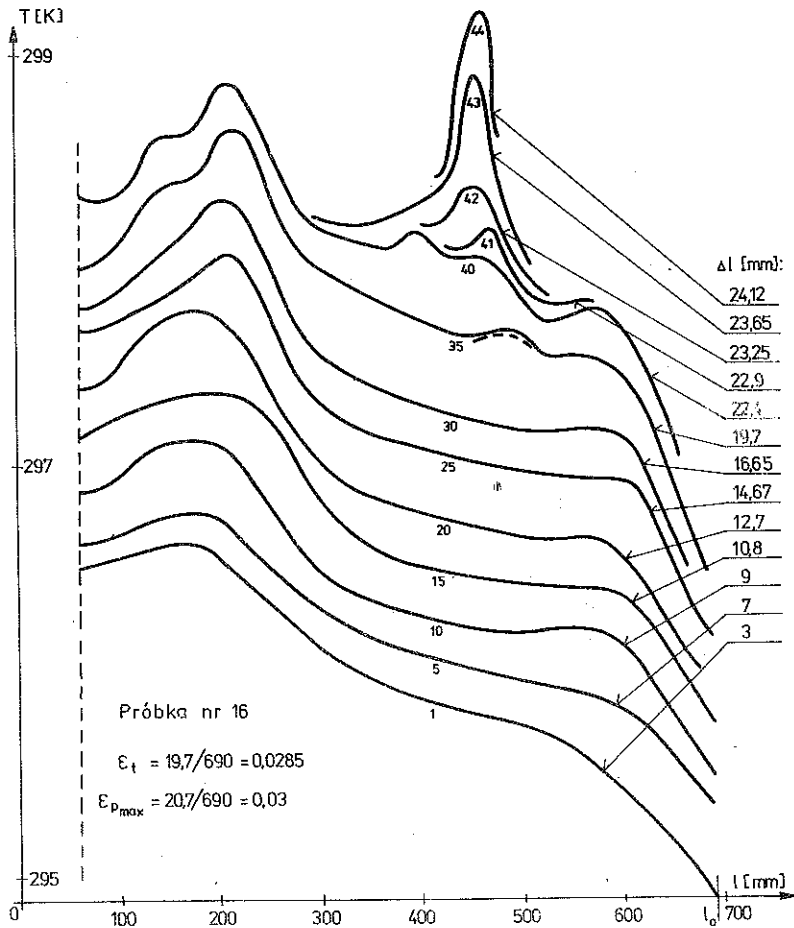
Próbka nr 1



oscylskopu zestawu AGA 680 umożliwiała identyfikację momentu, w którym następuje początek zwiększonych przyrostów temperatury na pewnym odcinku próbki. Dalsza obserwacja ewolucji rozkładu temperatury umożliwiała stwierdzenie, czy zauważone zwiększone przyrosty temperatury były wywołane lokalizacją deformacji prowadzącą do powstania w tym rejonie szyjki.

Zmiany rozkładu temperatury wzdłuż długości próbki w różnych fazach jej rozciągania przedstawiono przykładowo na rys. 8, 9, 10 i 11 dla próbek o początkowej długości pomiarowej równej 40, 490 i 690 mm. Pierwszy wykres rozkładu temperatury wzdłuż próbki rejestrowano po jej zamocowaniu w uchwytach maszyny wytrzymałościowej. Obserwowane wówczas zmiany temperatury wzdłuż długości próbki wywołane były jej nagrzewaniem się od dolnego uchwytu połączonego z siłownikiem hydraulicznym maszyny. W próbkach krótkich różnica temperatury górnej i dolnej części były niewielka. Dla próbek długich wzrastała do wartości w granicach od 1 do 2 K. Kolejne wykresy temperatury wzdłuż długości próbki rejestrowano przy wzrastających jej wydłużeniach całkowitych  $\Delta l$ . W początkowej fazie płynięcia plastycznego próbek krótkich obserwuje się równomierny przyrost temperatury na całej długości próbki (linie 1, 2 i 3; rys. 8). Przy pewnej wartości odkształceń  $\epsilon_t$  obserwuje się większe przyrosty temperatury w środkowej części próbki (linia 4), które utożsamiano z lokalizacją deformacji na części długości pomiarowej. Charakter wykresów nie ulega zmianie w dalszych fazach rozciągania tej próbki aż do jej zerwania. Lokalizacja przyrostów





Rys. 11

temperatury zaobserwowana przy wydłużeniu całkowitym  $\Delta l = 5,55$  mm związana, więc była z procesem tworzenia się szyjki.

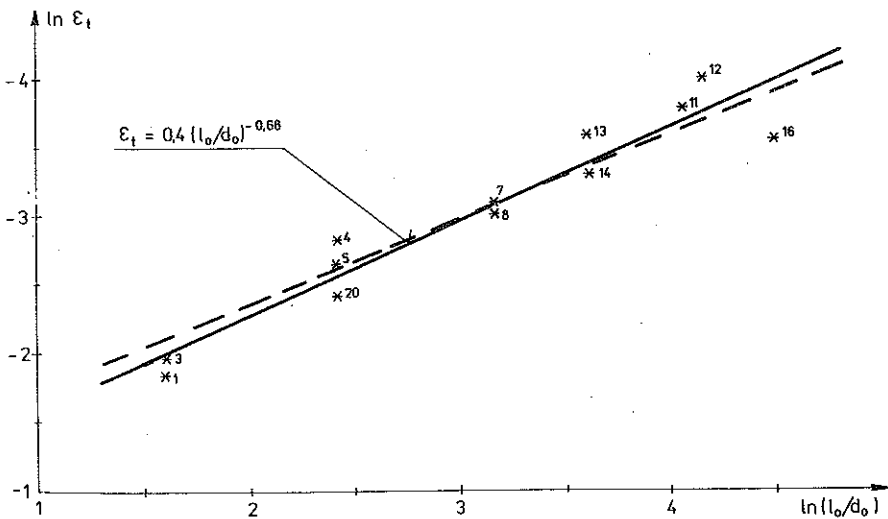
Zmiany rozkładów temperatury miały nieco inny charakter przy rozciąganiu drugiej próbki o początkowej długości pomiarowej  $l_0 = 40$  mm (rys. 9). Zwiększone przyrosty temperatury wystąpiły w dwóch miejscach próbki przy jej wydłużeniu o  $\Delta l = 6,3$  mm. Przy dalszym rozciąganiu nastąpiło wyrównanie temperatury na odcinku łączącym te dwa obszary lokalizacji deformacji, a następnie zdecydowany wzrost temperatury o obszarze pierwszej lokalizacji. W miejscu tym wystąpiło następnie zerwanie próbki.

Lokalizacja przyrostów temperatury przy rozciąganiu próbek długich pojawiała się w kilku miejscach i przy niewielkich wydłużeniach, ale związana z tym lokalizacja deformacji ulegała zanikowi w dalszej fazie rozciągania i nie prowadziła do utworzenia się szyjki. Początek procesu tworzenia się

szyjki utożsamiano w takich przypadkach z lokalizacją wzrostu temperatury, która związana była z obszarem, w którym w dalszej fazie wystąpiło zniszczenie próbki. W przypadku próbki o początkowej długości pomiarowej  $l_0 = 490$  mm (rys. 10) pierwsza lokalizacja zwiększonych przyrostów temperatury występuje przy wydłużeniu próbki o 5,9 mm (krzywa 4) w odległości 380 mm od dolnej granicy długości pomiarowej. W następnej fazie rozciągania, przed osiągnięciem największej siły, występuje lokalizacja przyrostów temperatury (krzywa 8) przy dolnej części chwytowej próbki. Dopiero trzecia lokalizacja, która powstaje przy wydłużeniu 8,9 mm prowadzi w konsekwencji do utworzenia się szyjki i zerwania próbki w jej środkowej części. Największa siła rozciągająca wystąpiła przy wydłużeniu całkowitym  $\Delta l = 8,5$  mm.

Zmiany rozkładu temperatur wzdłuż długości próbki nr 16 (rys. 11) wskazują na lokalizację deformacji od samego początku rozciągania. Pierwsza krzywa obrazująca zmiany temperatur jeszcze w zakresie sprężystym, przy wydłużeniu całkowitym 3 mm, ma wyraźnie dwa obszary zwiększonych przyrostów temperatury w odległości około 180 mm i 500 mm od granicy dolnej części chwytowej. Lokalizacja deformacji w tych obszarach rozwija się w dalszych fazach rozciągania, ale dopiero przy wydłużeniu całkowitym 19,7 mm (krzywa 35) można zaobserwować zwiększone przyrosty temperatur w innym miejscu w odległości około 480 mm od dolnej części chwytowej. Rozwój tej lokalizacji deformacji doprowadził do powstania szyjki w dalszym etapie rozciągania w wyniku utworzenia się dodatkowej lokalizacji deformacji widocznej na następnej krzywej rozkładu temperatur i ich połączeniu.

Odształcenia  $\epsilon_t$  odpowiadające początkowi utworzenia się szyjki, określone za pomocą termowizji przedstawiono na rys. 12 jako funkcję stosunku

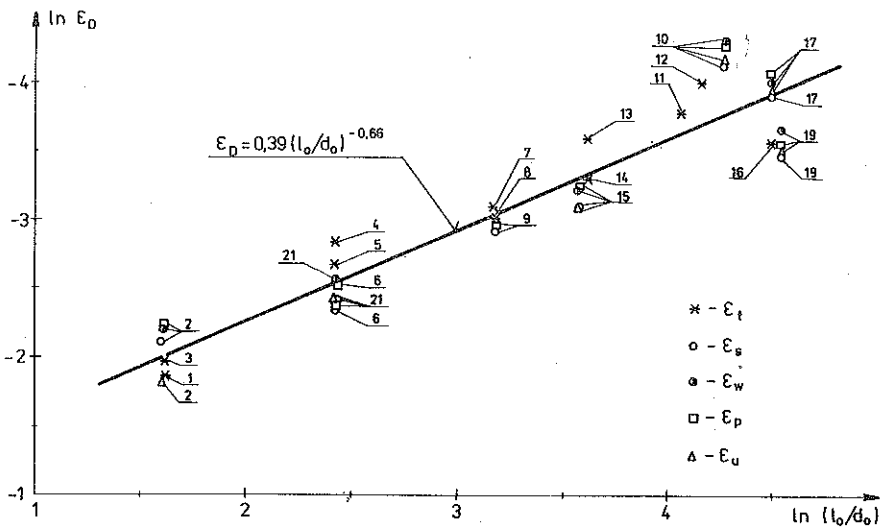


Rys. 12

początkowych pomiarów próbki  $l_0/d_0$  w układzie współrzędnych logarytmicznych. Zaznaczone gwiazdkami punkty doświadczalne dla 12 próbek aproksymowano metodą najmniejszych kwadratów funkcją wykładniczą, której postać podano na rysunku. Linią przerywaną zaznaczono wykres funkcji aproksymującej odkształcenia odpowiadające największej sile rozciągającej. Wykresy obu funkcji aproksymujących wyniki doświadczalne wskazują, że dla  $l_0/d_0 < 25,94$  odkształcenia  $\epsilon_t$  są większe od odkształceń  $\epsilon_{p\max}$ , natomiast dla próbek dłuższych ( $l_0/d_0 > 25,94$ ) określony za pomocą termowizji początek utworzenia się szyjki występuje przed osiągnięciem największej siły rozciągającej.

Zbiorcze zestawienie wszystkich punktów doświadczalnych obrazujących wartości odkształceń początku powstania szyjki w zależności od proporcji wymiarowych próbki przedstawiono na rys. 13 w układzie współrzędnych logarytmicznych. Cyframi zaznaczono numery próbek. Punkty doświadczalne dla poszczególnych sposobów detekcji początku utworzenia się szyjki zaznaczono odmiennie.

Ocena zastosowanych sposobów pomiaru odkształceń odpowiadających powstaniu szyjki jest bardzo trudna do przeprowadzenia. Pomiarów zmian rozkładu temperatury wzdłuż długości próbki przeprowadzono na innych próbkach niż pomiary za pomocą ekstensometrów. Nie jest więc możliwe bezpośrednie porównanie czułości wykrywania inicjacji szyjki między zastosowanymi sposobami, a trzeba uwzględnić rozrzuty wyników poszczególnych próbek. Charakter zmian wydłużenia na niewielkiej bazie w stosunku do długości pomiarowej, czy też przewężenia próbki przy jej rozciąganiu ze stałą prędkością zależy od usytuowania czujników względem obszaru pow-



Rys. 13

stania szyjki. Stwarza to dodatkowe trudności w interpretacji uzyskanych wyników. Z tych też względów nie porównywano wyników uzyskanych dla poszczególnych próbek, ale uśrednione wartości w całym zakresie proporcji wymiarowych  $l_0/d_0$ .

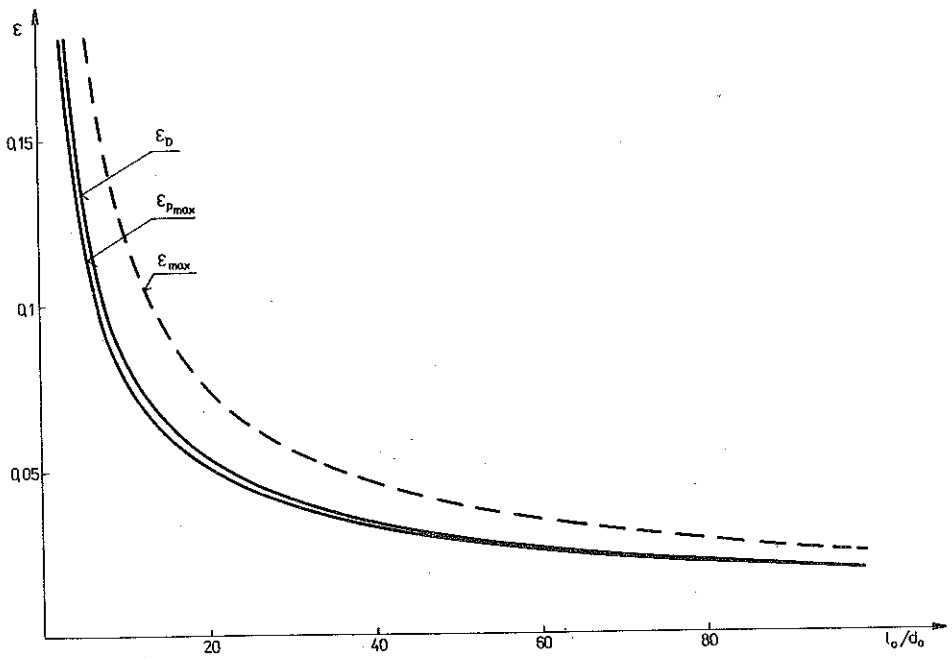
Punkty doświadczalne na rys. 13 reprezentują wartości odkształceń próbek odpowiadające zarówno inicjacji lokalizacji odkształceń związanej z szyjką rozprzestrzenioną jak i odkształceń odpowiadających początkowi powstania szyjki. W pierwszym przypadku odkształcenia rozwijają się jeszcze na znacznej długości próbki, ale z różnymi prędkościami, w drugim natomiast w momencie powstania szyjki odkształcenia są zlokalizowane tylko w jej rejonie. Wartości odkształceń  $\varepsilon_w$  związanych z odchyleniem od liniowości wskazań ekstensometru wzdłużnego,  $\varepsilon_p$  związanych z odchyleniem od liniowości wskazań ekstensometru poprzecznego i  $\varepsilon_t$  związanych z pomiarem zmian rozkładu temperatury odpowiadają pewnemu etapowi szyjki rozprzestrzenionej. Natomiast odkształcenie  $\varepsilon_u$  związane z zanikiem przyrostu odkształceń w obrębie ekstensometru i  $\varepsilon_s$  związane z procesem formowania się szyjki odpowiadają rozwojowi deformacji wyłącznie w rejonie szyjki. Wykres funkcji aproksymującej zależność odkształceń  $\varepsilon_D$  od proporcji wymiarowych próbek określono metodą najmniejszych kwadratów, biorąc pod uwagę wszystkie punkty doświadczalne zaznaczone na rys. 13. Jest to uśrednienie ze względu na sposób detekcji lokalizacji deformacji i rozrzuty wyników doświadczeń między poszczególnymi próbkami. Odkształcenia  $\varepsilon_D$  reprezentują więc średnią doświadczalną odpowiadającą powstaniu szyjki przy jednoosiowym rozciąganiu. Postać funkcji  $\varepsilon_D(l_0/d_0)$  podano na rys. 13, a jej wykres przedstawiono również na rys. 14, gdzie zaznaczono dodatkowo wykresy aproksymowanych danych doświadczalnych dla funkcji  $\varepsilon_{P_{max}}(l_0/d_0)$  i  $\varepsilon_{max}(l_0/d_0)$  opisującej średnie odkształcenie próbki w momencie jej zerwania. Odkształcenia  $\varepsilon_D$  są większe od odkształceń odpowiadających największej sile rozciągającej dla próbek o proporcji wymiarowych  $l_0/d_0 < 65,13$ . Dla próbek dłuższych wartości funkcji aproksymującej  $\varepsilon_D(l_0/d_0)$  są mniejsze od  $\varepsilon_{P_{max}}(l_0/d_0)$ .

Procentowe różnice wartości funkcji aproksymujących  $\varepsilon_w$ ,  $\varepsilon_u$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_t$  i  $\varepsilon_s$  oraz wartości funkcji średniej  $\varepsilon_D$  przedstawiono na rys. 15 jako funkcje stosunku  $l_0/d_0$ . Wykresy te nie są obrazem dokładności poszczególnych sposobów detekcji początku powstania szyjki, ale umożliwiają ocenę ich przydatności w zależności od proporcji wymiarów próbki. Wartości średnich odkształceń  $\varepsilon_u$  oznaczających zerową prędkość wydłużenia na dowolnie wybranym, małym odcinku pomiarowym daje nierealistyczną ocenę początku lokalizacji deformacji dla próbek krótkich. Im mniejszy jest stosunek długości bazy pomiarowej ekstensometru do długości pomiarowej próbki tym różnice  $\varepsilon_u$  i  $\varepsilon_D$  są mniejsze.

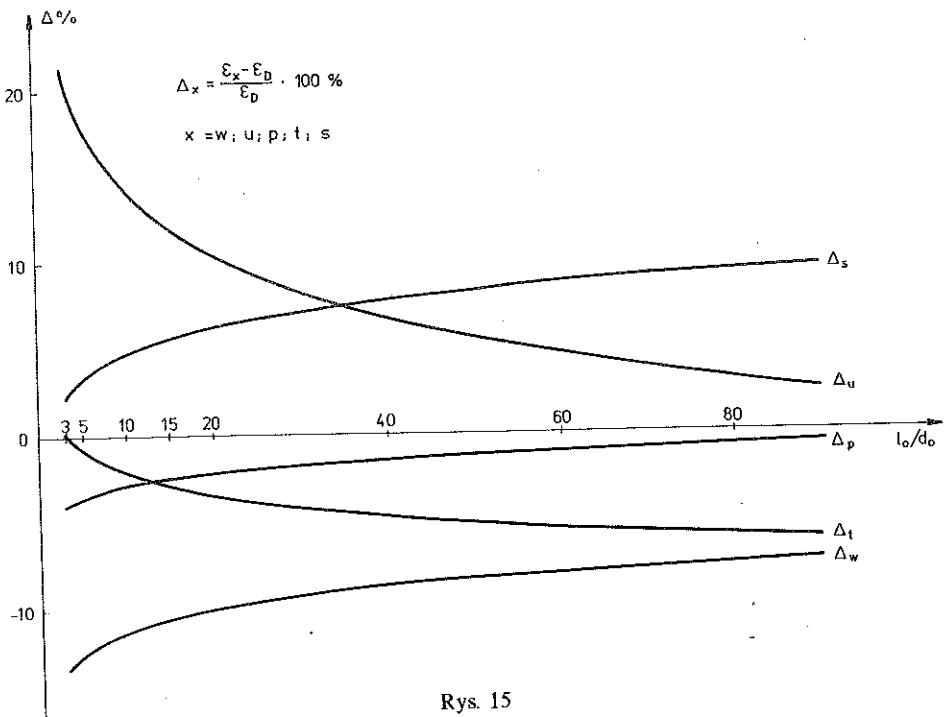
Wizualna obserwacja utworzenia się szyjki jest trudniejsza dla próbek dłuższych i różnica  $\varepsilon_s$  i  $\varepsilon_D$  zwiększa się ze wzrostem  $l_0/d_0$ .

Odciążenie, które propaguje się od części chwytowych próbki, od pewnego





Rys. 14



Rys. 15

etapu rozciągania uwidaczniało się najwcześniej w postaci odchylenia od liniowości wskazań ekstensometru wzdłużnego o małej bazie. Określone w ten sposób odkształcenia  $\varepsilon_w$  zależą od długości próbki, bazy i rozdzielczości ekstensometru i jego usytuowania w stosunku do miejsca późniejszej lokalizacji szyjki. Wartość  $\varepsilon_p$  określona na podstawie wskazań ekstensometru poprzecznego jest również uzależniona od tych samych czynników. Wartości funkcji aproksymujących  $\varepsilon_p$  są większe od odpowiadających wartości  $\varepsilon_w$ , ale w dwóch przypadkach dla próbek nr 2 i 17 określone doświadczalnie wartości  $\varepsilon_p$  były mniejsze od wartości  $\varepsilon_w$  (Rys. 13).

Krzywa  $\Delta_t$  przedstawiająca różnice wartości funkcji aproksymującej dla odkształceń  $\varepsilon_t$  i wartości funkcji aproksymującej  $\varepsilon_D$  leży, dla wartości  $l_0/d_0 \leq 40$ , blisko krzywej  $\Delta_p(l_0/d_0)$ . Ze wzrostem stosunku  $l_0/d_0$  funkcja  $\Delta_t(l_0/d_0)$  zbliża się do krzywej  $\Delta_w(l_0/d_0)$ . Ocena wartości odkształceń, przy których powstaje lokalizacja deformacji na podstawie zmian rozkładu temperatury wzdłuż długości próbki, zależy od proporcji wymiarowych  $l_0/d_0$ . Dokładność tej oceny uzależniona jest od odwzorowania długości próbki na ekranie oscyloskopu zestawu termowizyjnego. Rozdzielczość osi odciętej wykresu zmian temperatury na ekranie oscyloskopu pogarsza się ze wzrostem długości próbki i tym trudniej zaobserwować lokalizację wzrostu temperatury na małym odcinku.

Zbieżność wyników pomiarów na podstawie zmian rozkładu temperatur i odchylenia od liniowości odkształceń wzdłużnych i poprzecznych wskazuje na przydatność tych trzech sposobów do oceny średnich odkształceń próbki, przy których zaczyna się lokalizacja deformacji. Dokładność określenia tych odkształceń zależy nie tylko od rozdzielczości urządzeń pomiarowych, ale również od innych, specyficznych dla danego sposobu czynników. W przypadku zastosowania ekstensometrów istotne jest ich usytuowanie poza zasięgiem wpływu powstającej w końcowej fazie rozciągania szyjki. Ocena spełnienia tego warunku można przeprowadzić dopiero po zerwaniu próbki. Zastosowanie dwóch jednakowych ekstensometrów umieszczonych w różnych miejscach próbki zapewnia spełnienie tego warunku i zwiększa dokładność pomiaru odkształceń odpowiadających powstaniu lokalizacji deformacji. W przypadku zastosowania termowizji należy uwzględnić zmianę rozdzielczości wymiaru liniowego na ekranie oscyloskopu dla próbek o różnej długości pomiarowej.

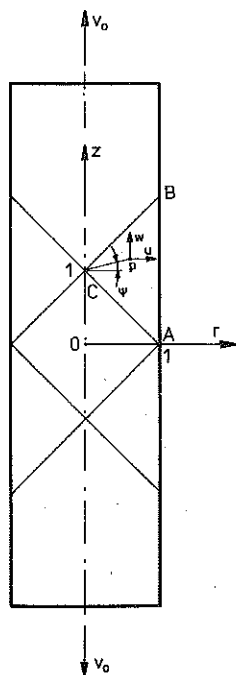
#### 4. OSZACOWANIE WARTOŚCI ODKSZTAŁCEŃ ODPOWIADAJĄCYCH LOKALIZACJI DEFORMACJI

Wartość odkształceń odpowiadających początkowi lokalizacji deformacji przy jednoosiowym rozciąganiu próbek cylindrycznych o różnych proporcjach długości do średnicy obliczono zgodnie z procedurą opisaną szczegółowo

w pracy [19]. Wykorzystywany tam sposób polegał na numerycznym określeniu przyrostu siły rozciągającej dla założonego mechanizmu zlokalizowanego płynięcia plastycznego i przyjęciu, że szyjka powstanie, gdy przyrost ten będzie mniejszy lub równy przyrostowi siły dla mechanizmu jednorodnej deformacji wywołującej takie same wydłużenie całkowite próbki. Warunek lokalizacji deformacji w jednoosiowym rozciąganiu wyrażono w postaci:

$$(4.1) \quad \frac{dP^*}{dl} \leq \frac{dP}{dl},$$

gdzie  $dP^*$  jest przyrostem siły rozciągającej mechanizmu lokalnego płynięcia,  $dP$  jest przyrostem siły rozciągającej dla mechanizmu równomiernego odkształcania całej próbki,  $dl$  jest przyrostem całkowitej długości próbki.



Rys. 16

Podstawą obliczeń przyrostu siły jest dobór mechanizmu lokalnej deformacji, który w konsekwencji doprowadza do powstania przewężenia średnicy próbki. W obliczeniach wcześniejszych [19] wykorzystywano jedno z pól kinematycznych zaproponowane w pracy [23]. Podstawą obliczeń [24] wykorzystywanych w tej pracy jest pole przedstawione schematycznie na rys. 16. Obszar uplastyczniony w jednej ćwiartce układu współrzędnych  $r, z$  tego pola ograniczony jest liniami  $OA$ ,  $OC$  i  $CB$ . Jego zasięg jest dwa razy większy

od połowy średnicy próbki ( $AB = 2 \cdot OA$ ). W trójkącie  $OAC$  składowe prędkości płynięcia  $u$  i  $w$  w kierunkach  $r$  i  $z$  wynoszą

$$(4.2) \quad u = -0,5r, \quad w = z,$$

gdzie  $r$  i  $z$  oznaczają bezwymiarowe współrzędne odniesione do promienia próbki.

Składowe prędkości płynięcia w obszarze  $ABC$  określone są wzorami

$$(4.3) \quad u = r \left( \frac{1}{2\pi} \arcsin(\operatorname{tg} \psi) + \frac{1}{2\pi} \frac{\sin \psi}{\cos^2 \psi} \cos^{\frac{1}{2}} 2\psi - \frac{1}{4} \right),$$

$$w = r \operatorname{tg} \psi \left( -\frac{1}{\pi} \arcsin(\operatorname{tg} \psi) - \frac{1}{\pi} \frac{\cos^{\frac{1}{2}} 2\psi}{\sin \psi} + \frac{1}{2} \right) + 1.$$

Prędkości odkształceń w obszarze  $OAC$  są stałe i wynoszą

$$(4.4) \quad \dot{\epsilon}_r = \dot{\epsilon}_\theta = -0,5, \quad \dot{\epsilon}_z = 1.$$

W obszarze  $ABC$  wynoszą

$$(4.5) \quad \dot{\epsilon}_r = \frac{1}{2\pi} \arcsin(\operatorname{tg} \psi) - \frac{1}{2\pi} \frac{\cos^{\frac{1}{2}} 2\psi}{\cos^2 \psi} \sin \psi - \frac{1}{4},$$

$$\dot{\epsilon}_z = -\frac{1}{\pi} \arcsin(\operatorname{tg} \psi) + \frac{1}{2},$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{1}{2\pi} \arcsin(\operatorname{tg} \psi) + \frac{1}{2\pi} \frac{\cos^{\frac{1}{2}} 2\psi}{\cos^2 \psi} \sin \psi - \frac{1}{4}.$$

Rozwiązanie określone wzorami (4.1) i (4.2) spełnia równania dla prędkości wynikające z warunku nieściśliwości i izotropii oraz spełnia warunki brzegowe na granicach poszczególnych obszarów. Granice te nie są liniami nieciągłości prędkości. Pole prędkości odkształceń (4.4) i (4.5) wynikające ze związków (4.3) i (4.4) spełnia również warunki ciągłości, a składowe prędkości odkształceń na liniach granicznych między obszarem sztywnym i plastycznym (linia  $CB$ ) są równe zero.

Przyrost siły dla mechanizmu lokalnej deformacji obliczono zgodnie z następującym algorytmem [25]: 1) zakładając skończony przyrost czasu  $\Delta t$  obliczono na podstawie związków (4.2) i (4.3) przemieszczenia swobodnego brzegu  $AB$  i rozkład intensywności prędkości odkształceń w całym obszarze uplastycznionym; 2) dla danego kształtu brzegu swobodnego i znanym rozkładzie niejednorodności określonej z wartości intensywności odkształceń w danym punkcie i założonego modułu umocnienia materiału, rozwiązano układ równań plastyczności dla materiałów niejednorodnych stosując metodę charakterystyk; 3) siłę rozciągającą obliczono na podstawie wyznaczonego rozkładu naprężeń dla założonej wartości modułu umocnienia materiału i określonego wydłużenia całkowitego pręta.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla różnych modułów umocnienia i różnych wydłużeń próbki, wyznaczając na tej podstawie zależność przyrostu siły lokalnej deformacji dla przyjętej kinematyki płynięcia. Warunek lokalizacji deformacji dla jednoosiowego rozciągania cylindrycznego pręta określono z porównania przyrostów siły dla równomiernej i zlokalizowanej deformacji na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych w następującej postaci:

$$(4.6) \quad f_1(\varepsilon_T) = 0,816 \cdot f_2(\varepsilon_T) - 0,716,$$

gdzie  $\varepsilon_T$  oznacza odkształcenie próbki, przy którym następuje lokalizacja deformacji; funkcja  $f_1$  określona jest następująco

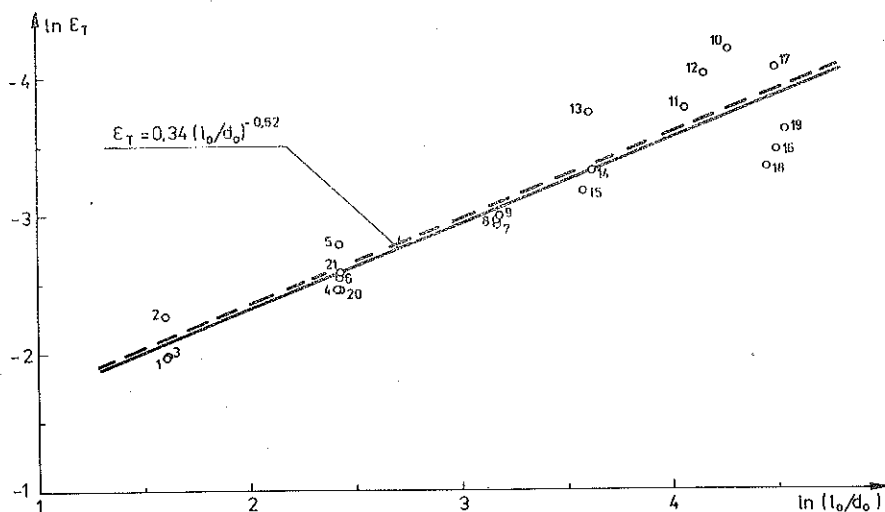
$$(4.7) \quad f_1 = \frac{1}{P} \frac{dP}{dl}.$$

Wartości tej funkcji dla danych odkształceń obliczano, różniczkując określoną doświadczalnie zależność siły rozciągającej od całkowitego wydłużenia próbki. Funkcja  $f_2$  jest bezwymiarowym modułem umocnienia materiału i jest określona następująco:

$$(4.8) \quad f_2 = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\varepsilon},$$

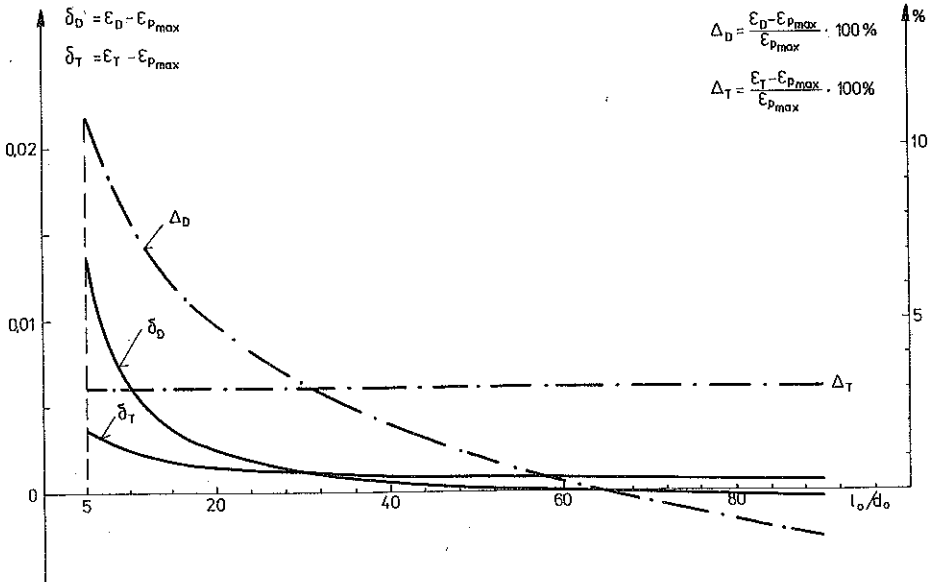
Jej wartość obliczono, różniczkując funkcję określającą zależność naprężeń rzeczywistych od odkształceń.

Odkształcenia  $\varepsilon_T$  odpowiadające lokalizacji deformacji określone na podstawie warunku (4.1) obliczano dla danej próbki ze związku (4.6) po wyznaczeniu funkcji  $f_1$  i  $f_2$  w pewnym przedziale odkształceń  $\varepsilon$ . Wyniki obliczeń



Rys. 17

$\varepsilon_T$  przedstawiono w postaci punktów na rys. 17 dla 21 próbek o różnych proporcjach długości do średnicy. Linią ciągłą zaznaczono aproksymację zależności  $\varepsilon_T = \varepsilon_T(l_0/d_0)$  określoną metodą najmniejszych kwadratów przy założeniu wykładniczej postaci funkcji. Linią przerywaną zaznaczono przebieg funkcji określającej odkształcenia odpowiadające największej sile rozciągającej pokazanej na rys. 7. Wykładniki potęgi obu funkcji aproksymujących,  $\varepsilon_T$  i  $\varepsilon_{Pmax}$ , mają tę samą wartość. Wartość odkształceń lokalizacji deformacji wyznaczona z warunku (4.1), na podstawie doświadczalnie wyznaczonych wykresów rozciągania, jest większa od odpowiadającej wartości odkształceń, przy których siła rozciągająca osiąga największą wartość. Bezwzględne i procentowe różnice  $\delta_T$  wartości funkcji aproksymujących  $\varepsilon_T$  i  $\varepsilon_{Pmax}$  przedstawiono na rys. 18 jako funkcje proporcji wymiarowych długości do średnicy



Rys. 18

próbki w zakresie objętym programem doświadczalnym od  $l_0/d_0 = 5$  do 90. Bezwzględne różnice odkształceń  $\varepsilon_T$  i  $\varepsilon_{Pmax}$  zależą od stosunku  $l_0/d_0$ , a różnica procentowa odniesiona do  $\varepsilon_{Pmax}$  ma stałą wartość równą 3,03%. Na rysunku tym zaznaczono również różnice  $\delta_D$  wartości funkcji aproksymującej dane doświadczalne  $\varepsilon_D$  i funkcji  $\varepsilon_{Pmax}$ . Różnice  $\delta_D$  są większe od  $\delta_T$  dla małych wartości  $l_0/d_0$  w zakresie od 5 do 30. Procentowe różnice  $\Delta_D$  wartości funkcji aproksymującej  $\varepsilon_D$  i  $\varepsilon_{Pmax}$  zmieniały się w tym zakresie wartości  $l_0/d_0$  od 10 do 3%. Dla większych wartości  $l_0/d_0$  procentowe różnice są mniejsze od 3%, przy czym począwszy od  $l_0/d_0 = 65,13$  mamy  $\varepsilon_{Pmax} > \varepsilon_D$ .

## 5. WNIOSKI

1. Pomiar odkształceń poprzecznych oraz wzdłużnych na małej bazie pomiarowej w stosunku do długości próbki może być wykorzystany do detekcji początku lokalizacji deformacji w próbie jednoosiowego rozciągania pod warunkiem usytuowania ekstensometrów poza zasięgiem wpływu powstającej szyjki. Warunek ten można łatwo spełnić wykorzystując dwa ekstensometry umieszczone w różnych miejscach próbki.

2. Pomiar rozkładu temperatur wzdłuż długości rozciąganej próbki za pomocą termowizji daje dobrą ocenę wartości odkształceń odpowiadających początkowi lokalizacji deformacji. Jest to jednak sposób wymagający stosowania specjalnej aparatury pomiarowej.

3. Wyznaczona doświadczalnie wartość odkształceń, przy których zaczyna się lokalizacja deformacji w trakcie jednoosiowego rozciągania cylindrycznych prętów zależy od proporcji długości do średnicy próbki. Jest ona większa od wartości odkształceń odpowiadających największej sile rozciągającej. Różnica odkształceń odpowiadających lokalizacji deformacji i największej sile rozciągającej zależy od proporcji długości do średnicy próbki. Różnica ta zmniejsza się w miarę zwiększania długości próbki. Wynik ten jest zgodny z wynikami obliczeń teoretycznych.

## LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. D. A. OLIVER, Proc. Inst. Mech. E., **11**, 827, 1928 również: International Standard ref. No ISO 2566/I-1973 (E).
2. W. BURZYŃSKI, *W sprawie przejawów plastyczności przy próbie rozrywania*, Czasopismo Techn., **49**, 100—101, 1931, również: W. BURZYŃSKI, *Dziela wybrane*, tom II, 329, PWN Warszawa 1982.
3. A. CONSIDÈRE, Ann. des Ponts Chaussées, **9**, 6, 574, 1985.
4. J. D. CABBELL, *Plastic instability in rate-dependent materials*, J. Mech. Phys. Solids, **15**, 6, 1967.
5. E. W. HART, *Theory of the tensile test*, Acta Metallurgica, **15**, 2, 1967.
6. J. KLEPACZKO, *Generalized conditions for stability in tension tests*, Int. J. Mech. Sci., **10**, 4, 1968.
7. J. J. JONAS, R. A. HOLT, C. E. COLEMAN, *Plastic stability in tension and compression*, Acta Metallurgica, **24**, 10, 911—918, 1976.
8. M. A. FORTES, *The stability of plastic deformation in tension*, Int. J. Mech. Sci., **19**, 8, 483—489, 1977.
9. J. W. HUTCHINSON, K. W. NEALE, *Influence of strain-rate sensitivity on necking under uniaxial tension*, Acta Metallurgica, **25**, 8, 839—846, 1977.
10. M. Y. DEMERI, H. CONRAD, *Instability of plastic flow in tension*, Scripta Metallurgica, **12**, 5, 1978.
11. J. J. JONAS, N. CHRISTODOULOU, *The onset of plastic instability in tensile sample containing deformation defects*, Scripta Metallurgica, **12**, 5, 1978.
12. G. R. COWPER, E. T. ONAT, *The initiation of necking and buckling in plane plastic flow*, Proc. 4th U. S. Nat. Congr. Appl. Mech. ASME New York, **2**, 1023—1029, 1962.

13. Z. WESOŁOWSKI, *The axially symmetric problem of stability loss of an elastic bar subject to tension*, Arch. Mech., **15**, 3, 1963.
14. J. P. MILES, *Bifurcation in plastic flow under uniaxial tension*, J. Mech. Phys. Solids, **19**, 2, 1971.
15. S. Y. CHENG, S. T. ARIARATNAM, R. N. DUBEY, *Axisymmetric bifurcation in an elastic-plastic cylinder under axial load and lateral hydrostatic pressure*, Quart. Appl. Math., **29**, 1, 1971.
16. W. H. CHEN, *Necking of a bar*, Int. J. Solids Structures, **7**, 7, 1971.
17. A. NEEDLEMAN, *A numerical study of necking in circular cylindrical bars*, J. Mech. Phys. Solids, **20**, 2, 1972.
18. A. K. GHOSH, *Tensile instability and necking in materials with strain hardening and strain rate hardening*, Acta Metallurgica, **25**, 12, 1977.
19. L. DIETRICH, *Analysis of necking in cylindrical bar of hardening materials*, Arch. Mech., **32**, 3, 1980.
20. M. KLEIBER, *Numerical study on necking-type bifurcations in voidcontaining elastic-plastic material*, Int. J. Solids Structures, **20**, 3, 191—210, 1984.
21. J. H. KEELER, *The tensile characteristics of unalloyed zirconium at low and moderate temperatures*, Trans. Am. Soc. Metals, **47**, 157—192, 1955.
22. N. K. GUPTA, B. P. AMBASHI, *An experimental investigation of tensile deformation of round bars*, Mech. Materials, **1**, 3, 219—228, 1982.
23. G. EASON, R. T. SHIELD, *The plastic indentation of a semi-infinite solid by a perfectly rough circular punch*, ZAMP, **11**, 1, 33—42, 1960.
24. J. SOBOTKOWSKI, *Niestateczność geometryczna przy jednoosiowym rozciąganiu*, Praca doktorska [w przygotowaniu].
25. L. DIETRICH, *Solving of the plastic problems for hardening materials*, J. Mécanique, **20**, 4, 803—824, 1981.

## РЕЗЮМЕ

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРНЫХ ПРОПОРЦИЙ ОБРАЗЦА НА НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

В работе представлены результаты экспериментального определения, при помощи разных методов, начала возникновения шейки в процессе одноосного растяжения стальных цилиндрических образцов с разными пропорциями длины к диаметру. Констатируется, что значение деформаций, при которых начинает образоваться шейка, больше чем деформации, отвечающие наибольшей растягивающей силе и зависит от размерных пропорций образца. В работе представлены тоже результаты численных расчетов полученных на основе сравнения приростов растягивающей силы для однородного и локального механизма деформации образца, изготовленного из материала с упрочнением.

## SUMMARY

## THE INFLUENCE OF DIMENSIONS RATIO OF A SPECIMEN ON ITS UNSTABLE BEHAVIOUR IN UNIAXIAL TENSION TEST

In the paper are presented results of experimental determination of the onset of necking during uniaxial tension of cylindrical, steel specimens with different length-to-diameter ratios.



It has been shown that the strain at the onset of necking is greater than that at the maximum load and depends on the length-to-diameter ratio of the specimen. In the paper are also presented numerical results obtained on the basis of comparison of increments of loads for uniform and local deformation modes of a specimen made of strain-hardening material.

**POLSKA AKADEMIA NAUK  
INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI**

*Praca została złożona w Redakcji dnia 7 grudnia 1985 r.*

---