

Ćwiczenie T1

OKREŚLANIE WŁASNOŚCI PLASTYCZNYCH MATERIAŁU W PRÓBIE JEDNOOSIOWEGO ROZCIĄGANIA

Celem ćwiczenia jest poznanie przebiegów odkształceń jednoosiowo rozciąganych próbek wykonanych z różnych materiałów oraz wyznaczanie wartości parametrów określających ich własności plastyczne.

1. WIADOMOŚCI PODSTAWOWE

Próbie jednoosiowego rozciągania stosuje się powszechnie do wyznaczania podstawowych własności plastycznych materiału. Należą do nich: granica plastyczności - fizyczna R_e lub umowna $R_{0,2}$, wytrzymałość na rozciąganie R_m , wydłużenie równomierne A_r , wydłużenie całkowite A_5 lub A_{10} oraz przewężenie Z .

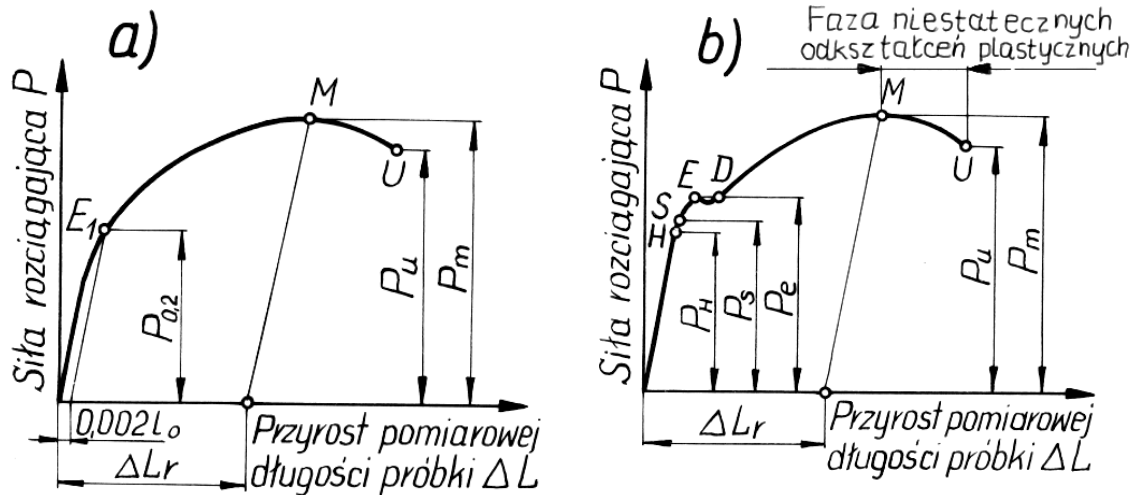
Próba ta jest również stosowana do wyznaczania przebiegu krzywej umocnienia $\sigma_p(\varepsilon)$, w której ε oznacza zastępcze odkształcenie plastyczne, a σ_p wartość naprężenia uplastyczniającego. Jak wiadomo zależność $\sigma_p(\varepsilon)$ umożliwia obliczanie siły i pracy, potrzebnych do realizacji wielu operacji obróbki plastycznej na zimno, zwłaszcza w procesach kształtowania objętościowego.

Nie wszystkie z wymienionych powyżej własności mają określony sens fizyczny, gdyż zależy on zarówno od definicji rozpatrywanej własności, jak i od rodzaju materiału. Aby to wyjaśnić, rozpatrzono najpierw rozciąganie próbek z materiałów o dobrych własnościach plastycznych, gdyż występują dla nich wszystkie charakterystyczne fazy procesu.

1.1. Przebieg rozciągania próbki z materiału o dobrych własnościach plastycznych

Dla materiału o dobrych własnościach plastycznych można rozróżnić dwa przypadki przebiegów krzywej rozciągania. Pierwszy przypadek dotyczy materiałów, które nie posiadają wyraźnej granicy plastyczności (rys.1.1a). Są to metale lub ich stopy krystalizujące przede wszystkim w układzie RCS (regularnym centrowanym ściennie), takie jak Al, Cu, Ag, Pb itd.

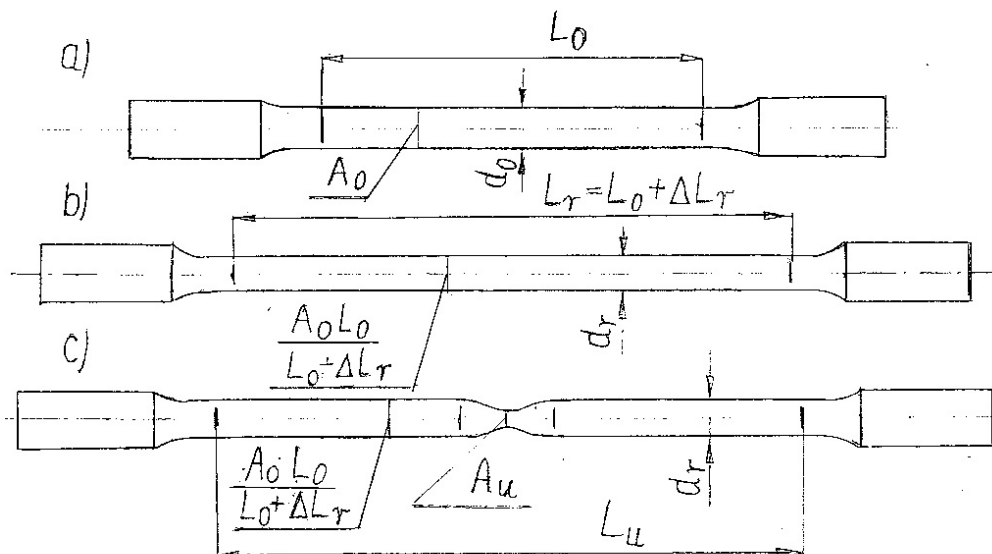
Wyraźna (fizyczna) granica plastyczności występuje przede wszystkim podczas rozciągania próbek z materiałów podlegających starzeniu odkształceniowemu. Typowymi przedstawicielami takich materiałów są stale niskowęglowe (rys.1.1b). Większość materiałów wstępnie odkształconych np. przez walcowanie lub ciągnięcie, można również zaliczyć do grupy o wyraźnej granicy plastyczności.



Rys. 1. 1. Wykresy rozciągania materiału: a) nie posiadającego wyraźnej granicy plastyczności, b) z wyraźną (fizyczną) granicą plastyczności

Dla materiałów o dobrych własnościach plastycznych można rozróżnić następujące fazy procesu rozciągania: odkształcanie sprężyste, stateczne odkształcanie plastyczne, niestateczne odkształcanie plastyczne i rozdzielanie materiału.

Wymienione fazy procesu zostaną omówione na przykładzie rozciągania próbki wykonanej z materiału posiadającego wyraźną granicę plastyczności (rys.1.1b). Na krzywej rozciągania $P(\Delta L)$ tego materiału zaznaczono szereg punktów charakterystycznych. Na uwagę zasługuje punkt M rozgraniczający fazę statecznych i niestatecznych odkształceń plastycznych oraz punkt U odpowiadający momentowi rozdzielania materiału próbki.



Rys. 1. 2. Próbkę rozciągana jednoosiowo: a) przed rozciąganiem, b) po zakończeniu fazy statecznych odkształceń plastycznych (punkt M na rys.1.1), c) po zerwaniu (punkt U na rys.1.1)

Kolejne fazy procesu zilustrowano na rys.1.2) przedstawiającym próbkę przed rozciąganiem oraz po osiągnięciu stanów odpowiadających punktowi M, a następnie punktowi U krzywych rozciągania (rys.1.1).

1.1.1 Faza odkształceń sprężystych

W fazie tej zachodzą głównie odkształcenia sprężyste. Ewentualne odkształcenia trwałe są tak małe, że nie mają praktycznie znaczenia.

Zależność między siłą osiową P a przyrostem długości ΔL bazy pomiarowej próbki jest w przybliżeniu prostoliniowa do granicy proporcjonalności, czyli stosowalności prawa Hooke'a (punkt H na rys.1.1b). Wartość tej granicy określa się ze wzoru:

$$R_H = \frac{P_H}{A_0} .$$

W pobliżu granicy proporcjonalności leży granica sprężystości R_s (punkt S na rys.1.1b). Naprężenie R_s odpowiada maksymalnej sile P_s , po przyłożeniu której i odciążeniu próbka wraca do wymiarów początkowych. Naprężenie to określa zależność

$$R_s = \frac{P_s}{A_0} ,$$

w której A_0 oznacza pole początkowego, poprzecznego przekroju próbki.

Na krzywej rozciągania obie te granice leżą blisko siebie. Określenie położenia punktów im odpowiadających wymaga zastosowania odpowiedniej aparatury. Dlatego też mimo, że dotyczą one różnych cech fizycznych materiału, w praktyce przyjmuje się dla nich zwykle wspólną wartość.

Zwiększanie siły rozciągającej ponad wartość P_s powoduje w pewnym momencie znaczny przyrost wydłużenia próbki przy niezmiennej, a nawet malejącej wartości obciążenia. Naprężenie odpowiadające największej sile rozciągającej P_e (punkt E na rys.1.1b), po wystąpieniu której obserwuje się spadek siły lub chwilowe ustalenie się jej wartości, nazywa się fizyczną granicą plastyczności:

$$R_e = \frac{P_e}{A_0} \tag{1.1}$$

Osiągnięcie przez naprężenie wartości R_e można uważać z pewnym przybliżeniem za zakończenie fazy odkształceń sprężystych.

1.1.2 Faza statecznych odkształceń plastycznych

Większe odkształcenia trwałe występują po osiągnięciu przez siłę osiową wartości P_e . Początkowe płynięcie materiału zachodzi bez wyraźnego przyrostu siły (odcinek ED na rys.1.1b). Jednakże dalsze odkształcanie próbki wymaga ponownego zwiększenia siły rozciągającej. Siła osiowa wzrasta aż do osiągnięcia wartości maksymalnej P_m (punkt M na rys.1.1b). Wzrostowi siły towarzyszy trwałe wydłużanie próbki, a więc odpowiednie zmniejszanie jej poprzecznego przekroju, jednakowe na całej długości pomiarowej (rys.1.2b). Tak więc odcinkowi EM krzywej rozciągania odpowiada duże odkształcenie plastyczne próbki. Stosunek siły P dla dowolnego punktu tego odcinka do odpowiadającego

tej sile pola rzeczywistego przekroju próbki A charakteryzuje opór plastyczny materiału i nosi nazwę naprężenia uplastyczniającego $\bar{\sigma}_p$.

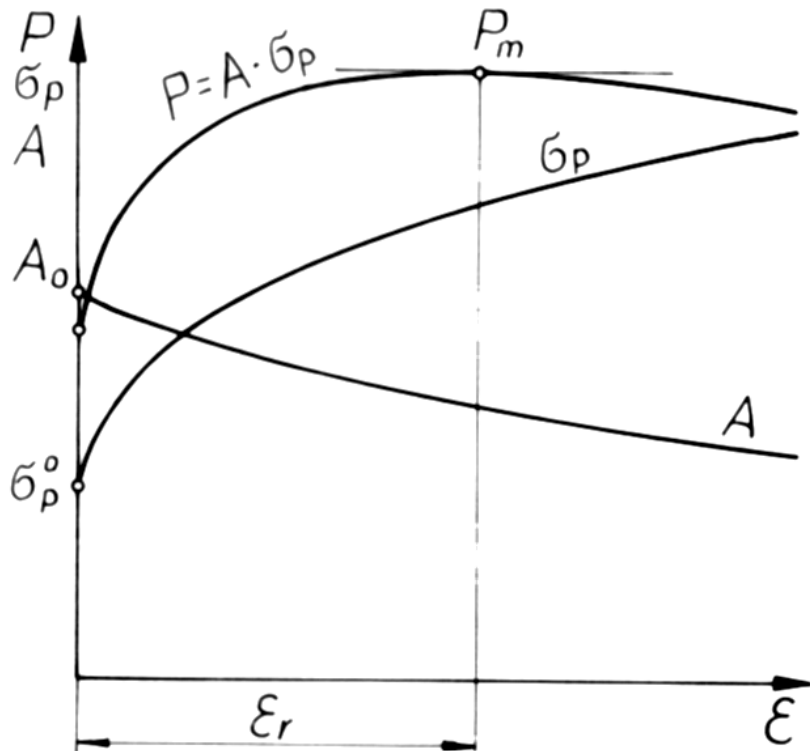
$$\sigma_p = \frac{P}{A} . \quad (1.2)$$

Wartość naprężenia uplastyczniającego $\bar{\sigma}_p$ powiększa się ze wzrostem odkształcenia plastycznego, określonego wzorem:

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A} = \ln \frac{L}{L_0} , \quad (1.3)$$

gdzie L_0 – długość odcinka pomiarowego próbki, mierzona między naniesionymi kreskami na próbce przed odkształceniem, L – długość bazy pomiarowej po odkształceniu.

Charakter przebiegu siły P rozciągającej próbkę podczas jej plastycznego płynięcia (odcinek EU na rys.1.1b) wynika z różnych przebiegów zależności przekroju A próbki i naprężenia uplastyczniającego $\bar{\sigma}_p$ od odkształcenia ε , które pokazano na rys.1.3. Zgodnie z tymi zależnościami siła P , jako iloczyn przekroju A i naprężenia $\bar{\sigma}_p$ początkowo wzrasta, a po osiągnięciu maksimum maleje (rys.1.3).



Rys. 1. 3. Zmiany przekroju próbki A , naprężenia uplastyczniającego $\bar{\sigma}_p$ i siły P w funkcji odkształcenia ε , zachodzące przy jednoosiowym rozciąganiu próbki

Wydłużenie trwale odpowiadające maksymalnej wartości siły rozciągającej nazywa się wydłużeniem równomiernym. Wzrost siły zachodzący w zakresie wydłużania równomiernego jest spowodowany początkowo bardzo intensywnym umacnianiem się odkształcanego materiału. Umacnianie to z nadwyżką kompensuje ubytek przekroju poprzecznego próbki $\left(A = A_0 \frac{L_0}{L} \right)$, zachodzący podczas wydłużania. W tej fazie procesu występuje zjawisko samoczynnego wyrównywania odkształceń wzdłuż długości próbki,

ponieważ bardziej odkształcone miejsce staje się jednocześnie bardziej wytrzymałe, a więc mniej podatne na dalsze odkształcanie plastyczne. W rezultacie, wraz ze wzrostem długości próbki, jej wymiary poprzeczne zmniejszają się jednakowo na całej długości. Mówi się wówczas, że próbka zachowuje stateczność przy rozciąganiu.

Faza statecznych odkształceń plastycznych kończy się w chwili osiągnięcia przez siłę rozciągającą wartości maksymalnej P_m . Stwierdzenie to nie dotyczy materiałów wykazujących szczególnie dużą czułość na prędkość odkształcania, dla których osiągnięcie maksymalnej wartości siły rozciągającej nie jest równoznaczne z wyraźną utratą stateczności.

Stosunek maksymalnej siły rozciągającej P_m do pola A_0 , początkowego poprzecznego przekroju próbki, nazywa się wytrzymałością na rozciąganie:

$$R_m = \frac{P_m}{A_0} . \quad (1.4)$$

Należy podkreślić, że siła P_m odpowiada, znacznie mniejsze od A_0 , pole przekroju A próbki. Wynika stąd wniosek, że wytrzymałość R_m nie ma w rozważanym przypadku sensu fizycznego i jest tylko naprężeniem umownym, odpowiadającym maksymalnej wartości siły rozciągającej.

Wydłużenie równomierne wyrażone w procentach określa zależność:

$$A_r = \frac{\Delta L_r}{L_0} 100 = \left[\left(\frac{d_0}{d_r} \right)^2 - 1 \right] 100 \% , \quad (1.5)$$

natomiast wydłużenie równomierne w mierze logarytmicznej wynosi:

$$\varepsilon_r = \ln \frac{L_r}{L_0} . \quad (1.6)$$

We wzorach tych przyjęto oznaczenia podane na rys. 1.1 i 1.2.

1.1.3 Faza niestatecznych odkształceń plastycznych

Faza niestatecznych odkształceń plastycznych zaczyna się w chwili, gdy następuje trwała lokalizacja odkształcenia (przewężenie). W fazie tej umacnianie materiału nie jest tak intensywne, aby mogło kompensować ubytki przekroju poprzecznego próbki i proces przebiega teraz przy malejącej sile P (rys.1.1 i 1.3). Odkształcenie koncentruje się w najślabszym miejscu próbki, tworząc przewężenie, zwane również "szyjką". W obszarze "szyjki" występuje trójosiowe rozciąganie, przy czym największą wartość mają oczywiście naprężenia osiowe. Razem ze zmniejszaniem się średnicy szyjki wzrasta stosunek naprężeń promieniowych do osiowych.

1.1.4 Rozdzielenie materiału

Graniczna wartość przewężenia (punkt U na rys.1.1) występuje w chwili rozpoczęcia się procesu rozdzielania materiału. Wartość tego przewężenia określa się w procentach ze wzoru:

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} 100 \% , \quad (1.7)$$

gdzie A_u jest polem najmniejszego poprzecznego przekroju próbki po jej zerwaniu. Utracie spójności odpowiada osiągnięcie przez część pomiarową próbki maksymalnego wydłużenia, zwanego wydłużeniem całkowitym. Wydłużenie to, określane najczęściej dla próbki pięciokrotnej ($L_0 = 5 d_0$) lub dziesięciokrotnej ($L_0 = 10 d_0$), oblicza się ze wzoru:

$$A_{5(10)} = \frac{L_u - L_0}{L_0} 100 \% , \quad (1.8)$$

gdzie L_u oznacza długość części pomiarowej próbki po jej zerwaniu (rys.1.2c).

Wygląd przełomu próbki w przypadku niskowęglowej stali ma postać stożkowego krateru z płaskim dnem.

1.1.5 Umowna granica plastyczności

Zamieszczony powyżej opis przebiegu odkształcania próbki wykonanej z materiału o dobrych własnościach plastycznych wymaga uzupełnienia, które dotyczy materiałów nie posiadających fizycznej (wyraźnej) granicy plastyczności R_e . Dla materiałów takich określa się tzw. umowną granicę plastyczności $R_{0,2}$. Jest to naprężenie rozciągające odpowiadające trwałemu względnemu wydłużeniu próbki, o wartości $\varepsilon_L = 0,2 \%$.

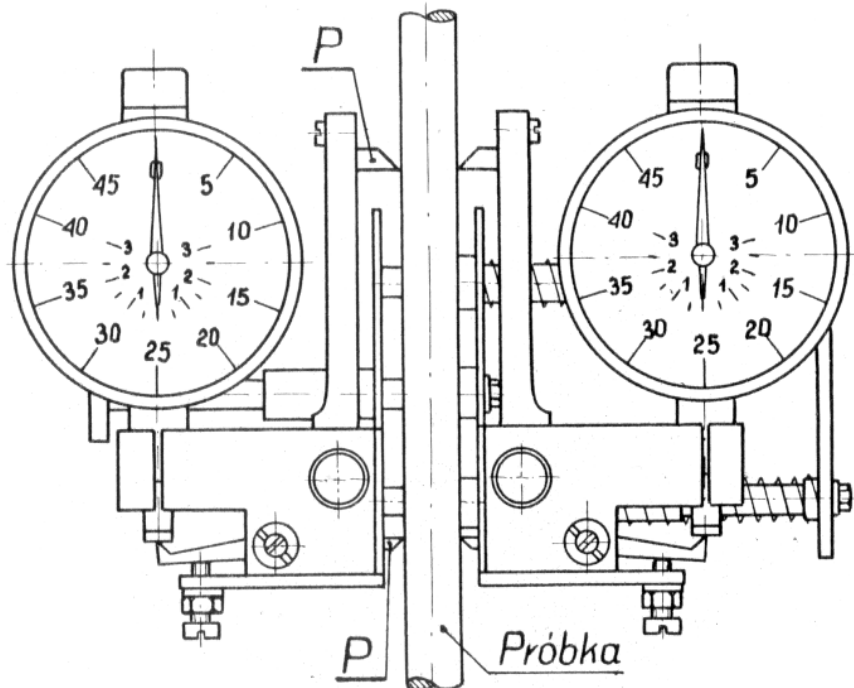
Wartość umownej granicy plastyczności oblicza się ze wzoru:

$$R_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{A_0} , \quad (1.9)$$

w którym $P_{0,2}$ oznacza siłę rozciągającą, powodującą wymienione powyżej trwałe wydłużenie próbki (punkt E_1 na wykresie 1.1a).

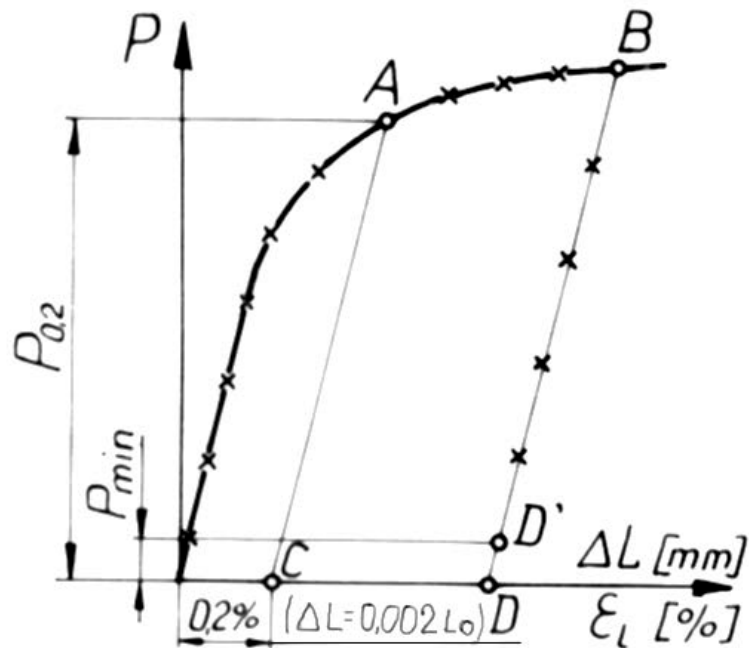
Osiągnięcie przez siłę rozciągającą wartości $P_{0,2}$, podobnie jak dla stali osiągnięcie wartości P_e (rys.1.1b), można uważać z pewnym przybliżeniem za zakończenie fazy odkształceń sprężystych.

Wartość siły $P_{0,2}$ można wyznaczyć za pomocą ekstensometrów, które służą do dokładnego określania wydłużeń odcinka pomiarowego próbki.



Rys. 1. 4. Ekstensometr czujnikowy założony na próbkę

W przypadku zastosowania ekstensometru czujnikowego (rys.1.4) próbkę rozciąga się bardzo wolno, notując wskazania czujników ekstensometru i odpowiadające im wartości siły P , odczytywane z dynamometru maszyny. Umożliwiają one wykreślenie w układzie osi współrzędnych $(\Delta L, P)$ lub (ϵ_L, P) początkowego odcinka OAB krzywej rozciągania, jak to pokazano na rys.1.5. Liczba punktów doświadczalnych powinna być dostatecznie duża: np. przy długości odcinka pomiarowego $L_0 = 100$ mm odczyty należy prowadzić przy przyrostach długości ΔL co $0,03 \div 0,04$ mm. Po wydłużeniu próbki o około 0,5% (punkt B na rys.1.5) należy ją odciążać do niewielkiej siły P_{min} (punkt D' na rys.1.5), a następnie ponownie obciążać, aż do poprzednio uzyskanego odkształcenia, notując jednocześnie co najmniej 4 wskazania czujników i dynamometru zrywarki. Wyznaczona w ten sposób linia BD' (przedłużona następnie do punktu D) określa własności sprężyste materiału.



Rys. 1. 5. Wykreślnie wyznaczanie siły $P_{0,2}$, odpowiadającej umownej granicy plastyczności

Zastosowanie ekstensometru, który umożliwia wykreślenie zależności między siłą rozciągającą P , a odpowiednio dobranym powiększeniem przyrostu bazy pomiarowej próbki ΔL , bezpośrednio podczas jej rozciągania, upraszcza znacznie wyznaczenie wartości siły $P_{0,2}$, a więc również umownej granicy plastyczności $R_{0,2}$.

1.2 Inne przebiegi krzywej rozciągania

Podczas rozciągania próbek z materiałów o gorszych własnościach plastycznych niektóre z omówionych poprzednio faz procesu nie występują. Można rozróżnić następujące przypadki.

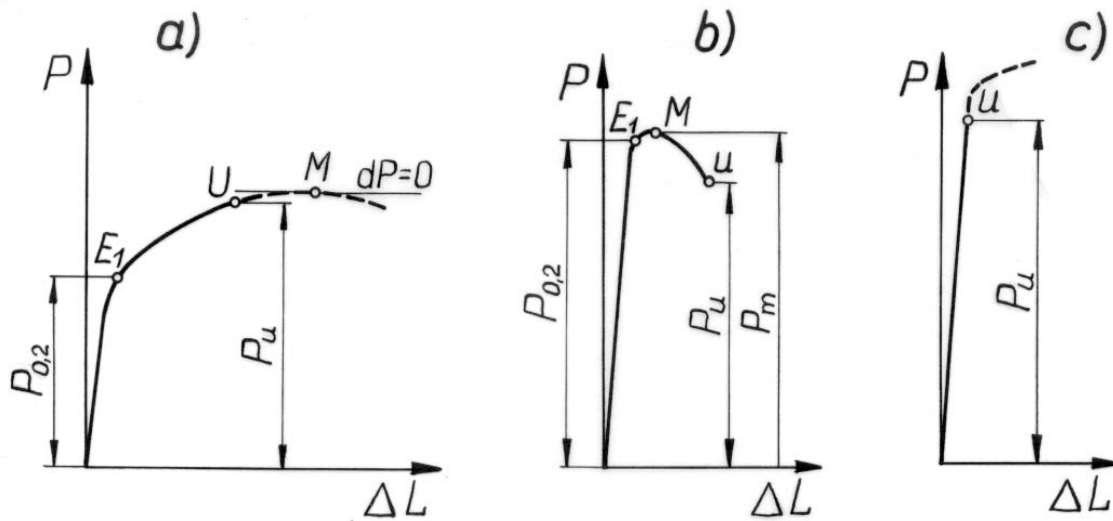
Brak fazy niestatecznych odkształceń plastycznych (rys.1.6a)

Przypadek ten zachodzi wówczas, gdy rozdzielenie materiału następuje przy dodatniej wartości dP , co oznacza, że krzywa rozciągania nie osiąga punktu M (rys.1.6a). Zerwana próbka jest odkształcona plastycznie, ale nie posiada szyjki, a więc wydłużenie

równomierne A_r takiego materiału jest równe wydłużeniu całkowitemu $A_{5(10)}$. Wytrzymałość na rozciąganie obliczona ze wzoru (1.4) nie ma sensu fizycznego, jest natomiast naprężeniem umownym, odpowiadającym momentowi utraty spójności materiału.

Brak fazy statecznych odkształceń plastycznych (rys.1.6b)

Przypadek taki jest charakterystyczny dla materiałów, które przed rozciąganiem poddano dużym odkształceniom plastycznym na zimno. Podczas rozciągania takiego materiału niemal całe odkształcenie plastyczne lokalizuje się w szyjce, a więc wydłużenie równomierne $A_r \approx 0$. Wytrzymałość na rozciąganie, obliczona wg wzoru (1.4), jest w przybliżeniu równa granicy plastyczności materiału.



Rys. 1. 6. Przebieg sił rozciągania próbek z materiałów o różnych własnościach plastycznych: a) materiał wykazujący brak fazy niestatecznych odkształceń plastycznych, b) materiał wykazujący brak fazy statecznych odkształceń plastycznych (materiał mocno odkształcony), c) materiał kruchy (występuje tylko faza odkształceń sprężystych)

Występuje tylko faza odkształceń sprężystych (rys.1.6c)

Przypadek ten jest charakterystyczny dla materiałów kruchych. Utrata spójności zachodzi bez makroskopowych odkształceń plastycznych. Otrzymuje się tzw. złom rozdzielczy kruchy. Wytrzymałość na rozciąganie, obliczona ze wzoru (1.4), posiada w tym przypadku sens fizyczny, gdyż jest to naprężenie wywołujące utratę spójności materiału. To ostatnie naprężenie nosi nazwę wytrzymałości rozdzielczej i oznacza się je przez R_0 .

1.3 Krzywa umocnienia

Przebieg tak zwanej uogólnionej krzywej umocnienia, a więc zależności $\bar{\sigma}_p(\varepsilon)$, można wyznaczyć doświadczalnie różnymi metodami, w tym również za pomocą jednoosiowego rozciągania próbki. Metoda ta pozwala w sposób prosty i dokładny wyznaczyć charakterystykę umacniania materiału, ale tylko dla zakresu odkształceń $\varepsilon \leq \varepsilon_r$. Są

to stosunkowo małe odkształcenia, gdyż wydłużenie równomierne A_r , np. dla niskowęglowej stali wynosi ok. $20 \div 25$ %, a dla miedzi i niektórych jej stopów ok. $30 \div 40$ %.

1.3.1 Wyznaczanie przebiegu krzywej

Odkształcenie zastępcze ε określa się z zależności

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}, \quad (1.10)$$

natomiast naprężenie uplastyczniające $\bar{\sigma}_p$ z warunku plastyczności Hubera w postaci:

$$\sigma_p = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (1.11)$$

W podanych wzorach $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ oraz $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2$ i $\bar{\sigma}_3$ oznaczają składowe odkształceń i naprężeń głównych, przy czym 1 jest kierunkiem zgodnym z osią próbki, natomiast 2 i 3 są kierunkami leżącymi w płaszczyźnie prostopadłej do tej osi.

Ponieważ dla jednoosiowego rozciągania $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -0,5 \varepsilon_1$, a $\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = 0$, więc odkształcenie zastępcze i naprężenie uplastyczniające dla takiego stanu naprężenia odpowiednio wynoszą:

$$\varepsilon = \varepsilon_1, \quad \sigma_p = \sigma_1$$

Oznacza to, że krzywa $\bar{\sigma}_1(\varepsilon_1)$ jest jednocześnie uogólnioną krzywą umocnienia materiału.

Do wyznaczania przebiegu zależności $\bar{\sigma}_1(\varepsilon_1)$ można zastosować rozciąganie próbki z użyciem ekstensometru czujnikowego (rys.1.4). Proces rozciągania należy wówczas prowadzić z przerwami niezbędnymi dla odnotowania przyrostów ΔL początkowej długości pomiarowej próbki L_0 i odpowiadających tym przyrostom wartości siły rozciągającej P .

Wydłużenia części pomiarowej próbki oraz rzeczywiste naprężenia oblicza się ze wzorów:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln \frac{L}{L_0}, \quad (1.12)$$

$$\sigma_1 = \frac{P}{A}, \quad (1.13)$$

gdzie:

L - długość pomiarowa próbki pod działaniem siły P ,

A - pole rzeczywistego poprzecznego przekroju próbki pod działaniem siły P .

Wartość A wyznacza się z warunku niezmienniej objętości pomiarowej części próbki:

$$A = A_0 \frac{L_0}{L}. \quad (1.14)$$

Obliczone ze wzorów (1.12) i (1.13) wartości $\varepsilon_1 = \varepsilon$ oraz $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_p$, dla kolejnych etapów rozciągania próbki, pozwalają na wykreślenie w układzie osi współrzędnych $(\varepsilon, \bar{\sigma}_p)$ krzywej umocnienia materiału (rys.1.3). Jak już wspomniano, otrzymana krzywa odpowiada stosunkowo małym wartościom odkształceń ε , gdyż z próby rozciągania można ją wyznaczyć tylko w zakresie wydłużenia równomiernego.

1.3.2 Wyznaczanie przybliżonego równania krzywej

Umacnianie się materiału pod wpływem odkształceń plastycznych na zimno można opisać za pomocą przybliżonego równania krzywej umocnienia. W zastosowaniach praktycznych najczęściej spotyka się dwa rodzaje równań:

$$\sigma_p = C \varepsilon^n \quad \text{oraz} \quad \sigma_p = C_1 (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n .$$

Równanie $\sigma_p = C \varepsilon^n$ (zaproponowane przez Ludwiga) przedstawia krzywą, która przechodzi przez początek układu osi współrzędnych (ε, σ_p) , a dla małych odkształceń bardzo szybko wznosi się w kierunku dużych wartości σ_p - tym szybciej, im wartość wykładnika potęgowego n jest mniejsza, a stałej C - większa. Jak wiadomo, pierwsze odkształcenia plastyczne rzeczywistych materiałów występują pod wpływem działania naprężeń o znacznych wartościach, a więc krzywa umocnienia dla tych materiałów nie przechodzi przez początek układu osi współrzędnych. Dlatego też równanie $\sigma_p = C \varepsilon^n$ nie może być stosowane dla materiałów wstępnie odkształconych np. dostarczanych w stanie półtwardym. Zapewnia natomiast dostateczną dla celów praktycznych dokładność dla materiałów w stanie wyżarzonym, z wyłączeniem jednak małych odkształceń ε , np. odkształceń $\varepsilon < 0,05$.

Równanie $\sigma_p = C \varepsilon^n$ jest dwuparametrowe. Do wyznaczenia wartości stałych materiałowych C i n wystarczy więc w zasadzie znajomość wartości σ_p i ε tylko dla dwu punktów doświadczalnej krzywej umocnienia.

Drugi rodzaj stosowanego w praktyce równania krzywej umocnienia $\sigma_p = C_1 (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$ (wg Swifta) jest równaniem trójparametrowym. Wartości stałych materiałowych C_1, ε_0, n można wyznaczyć z warunku, aby krzywa określona tym równaniem przechodziła przez trzy zadane punkty leżące na krzywej doświadczalnej. Wynika stąd, że omawiane równanie przedstawia krzywą o przebiegu bardziej zbliżonym do krzywej doświadczalnej niż równanie poprzednie.

Równanie $\sigma_p = C_1 (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$ jest przydatne również do opisu umacniania materiałów zgniecionych, gdyż dzięki występowaniu w nim odkształcenia wstępnego ε_0 wartość σ_p dla odkształcenia $\varepsilon = 0$ przybierać może duże wartości, a przebieg krzywej przy dostatecznie dużej wartości ε_0 jest stosunkowo płaski, co jest charakterystyczne dla krzywych umocnienia materiałów odkształconych plastycznie na zimno.

Równanie dwuparametrowe $\sigma_p = C \varepsilon^n$

Stosuje się kilka sposobów wyznaczania wartości stałych C i n . Różnice między nimi polegają na tym, czy przy wyznaczaniu wartości stałych poprzestaje się na znajomości współrzędnych tylko dwóch punktów doświadczalnej krzywej umocnienia, czy też dysponuje się doświadczalną krzywą wyznaczoną w sposób opisany w punkcie 1.3.1. Oczywiście, w pierwszym przypadku przebieg krzywej według wyznaczonego równania jest w dużym stopniu zależny od doboru punktów i może znacznie różnić się od przebiegu rzeczywistej krzywej umocnienia. W drugim przypadku zgodność rozpatrywanych

krzywych jest znacznie lepsza. Poniżej omówiono niektóre ze sposobów wyznaczania omawianych stałych.

Sposób 1

W sposobie tym wartości stałych określa się na podstawie znanych wartości wydłużenia równomiernego A_r i wytrzymałości materiału na rozciąganie R_m . Dane te można uzyskać korzystając z kalendarzy zawierających informacje o własnościach mechanicznych materiałów. Można je również wyznaczyć doświadczalnie w zwykłej próbie rozciągania, zakończonej zerwaniem próbki.

Zgodnie z rys.1.2b i zależnością (1.5) wzór (1.6) można przekształcić w sposób następujący:

$$\varepsilon_r = \ln(1 + A_r) . \quad (1.15)$$

W dowolnej chwili plastycznego rozciągania próbki, określonej przez wydłużenie $\varepsilon_1 = \varepsilon$, przekrój jej, zgodnie z zależnością (1.3) wynosi $A = A_0 e^{-\varepsilon}$, a wg przyjętego równania krzywej umocnienia, naprężenie rozciągające $\sigma_1 = \sigma_p = C\varepsilon^n$.

Chwilową siłę rozciągającą $P = A\sigma_1$ można więc wyrazić wzorem:

$$P = A_0 e^{-\varepsilon} C\varepsilon^n . \quad (1.16)$$

Aby wyznaczyć wydłużenie równomierne próbki ε_r , które występuje po osiągnięciu przez siłę P wartości maksymalnej, należy pochodną $\frac{dP}{d\varepsilon}$ zależności (1.16) przyrównać do zera:

$$\frac{dP}{d\varepsilon} = A_0 C \left[e^{-\varepsilon} n\varepsilon^{n-1} - e^{-\varepsilon} \varepsilon^n \right] = 0 .$$

Obliczona z tego równania wartość wydłużenia równomiernego wynosi:

$$\varepsilon_r = n , \quad (1.17)$$

a więc jest równa wykładnikowi potęgowemu krzywej umocnienia.

Największą wartość siły rozciągającej, po uwzględnieniu zależności (1.16) i (1.17), można określić ze wzoru:

$$P_{\max} = A_0 C e^{-n} n^n . \quad (1.18)$$

Wytrzymałość na rozciąganie zgodnie z zależnością (1.4) wynosi:

$$R_m = C e^{-n} n^n . \quad (1.19)$$

Przy znanej wartości R_m dla rozpatrywanego materiału można ze wzoru (1.19) wyznaczyć wartość stałej C :

$$C = \frac{R_m}{e^{-n} n^n} . \quad (1.20)$$

Jak wynika z podanych rozważań, w celu wyznaczenia stałych C i n , wykorzystano warunek ekstremum siły rozciągającej oraz wartości współrzędnych ekstremalnego punktu M krzywej rozciągania.

Sposób 2

Dla materiałów w stanie wyżarzonym, posiadających umowną granicę plastyczności $R_{0,2}$, można określić przybliżone wartości stałych C i n na podstawie znanych wartości tej granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie R_m . Wartości $R_{0,2}$ i R_m są w zasadzie zawsze podawane w kalendarzach technicznych, podczas gdy najczęściej brakuje w nich wartości wydłużenia równomiernego A_r .

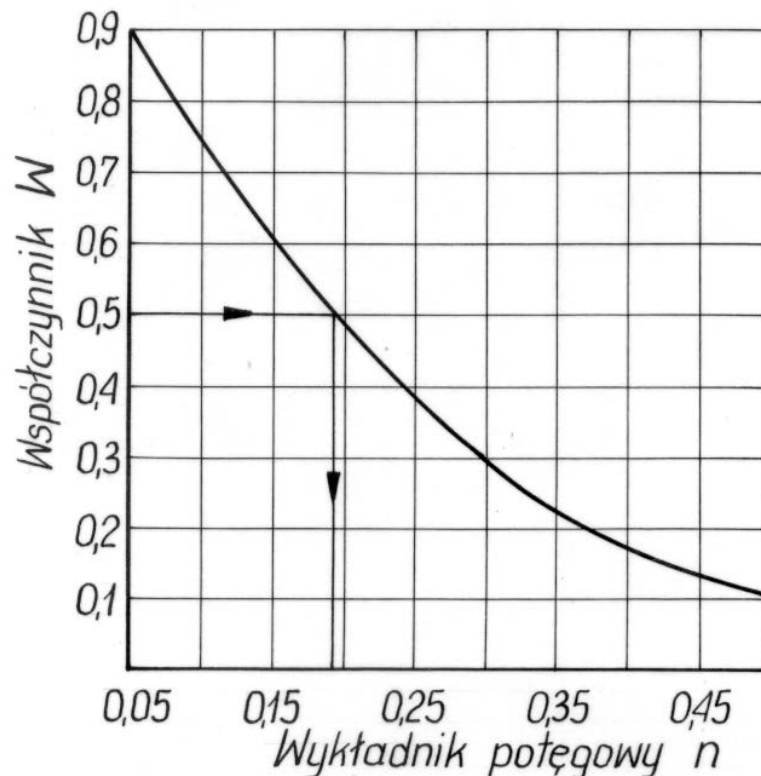
Zgodnie z przyjętym równaniem krzywej umocnienia i definicją umownej granicy plastyczności można napisać zależność:

$$R_{0,2} = C \cdot 0,002^n. \quad (1.21)$$

Dzieląc wartość $R_{0,2}$ przez wartość R_m wg wzoru (1.19), otrzyma się współczynnik:

$$W = \frac{R_{0,2}}{R_m} = \frac{0,002^n}{e^{-n} n^n}, \quad (1.22)$$

który jest funkcją tylko jednej zmiennej n . Przebieg tej funkcji wykreślono na rys. 1.7. Dla znanej wartości współczynnika W można odczytać z tego rysunku wartość wykładnika potęgowego krzywej umocnienia n . Stałą C oblicza się tak jak w poprzednim sposobie, stosując zależność (1.20).



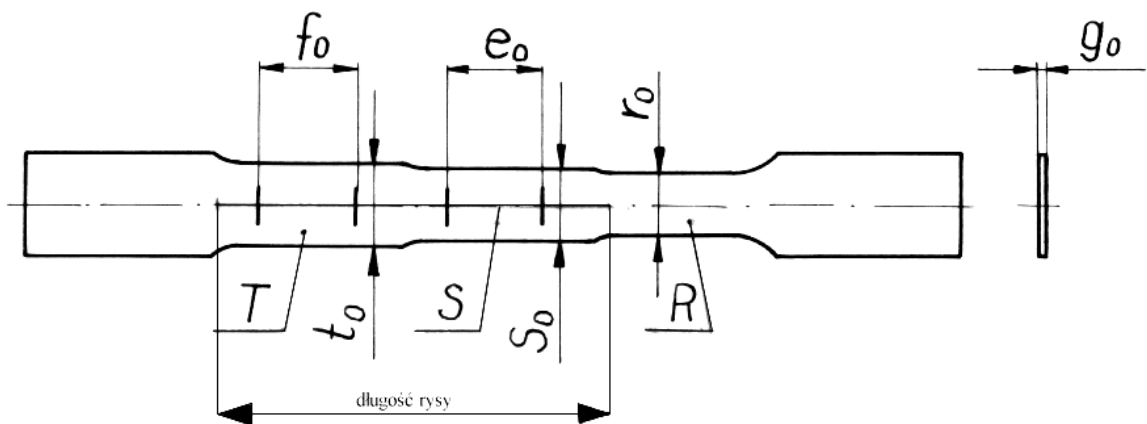
Rys. 1. 7. Zależność współczynnika $W = R_{0,2}/R_m$ od wykładnika potęgowego krzywej umocnienia n

Do wyznaczania stałych C i n wykorzystuje się znajomość współrzędnych dwu krańcowych punktów odcinka krzywej umocnienia odpowiadającego fazie statecznych odkształceń plastycznych występującej podczas rozciągania próbki. Taki dobór punktów nie zapewnia jednak dobrej zgodności otrzymanego równania z doświadczalnym przebiegiem krzywej umocnienia wyznaczonym w sposób omówiony w punkcie 1.3.1.

Oba omówione dotychczas sposoby umożliwiają wyznaczenie bardzo przybliżonego równania krzywej umocnienia, które pozwala jednak na pewną ocenę zdolności materiału do umacniania. Stosowanie tych sposobów jest uzasadnione tylko wówczas, gdy nie ma możliwości zrealizowania próby rozciągania w sposób umożliwiający doświadczalne określenia przebiegu krzywej umocnienia.

Sposób 3

Wartości stałych C i n oblicza się na podstawie wyznaczonych doświadczalnie współrzędnych dwu punktów krzywej umocnienia, przy czym zadaniem próby rozciągania jest określenie współrzędnych tylko tych punktów. W tym celu poddaje się rozciąganiu aż do zerwania próbkę, której część środkowa składa się z trzech odcinków o różnych przekrojach: np. w przypadku blach próbka składa się z trzech części pomiarowych R, S, T o różnej szerokości, jak to pokazano na rys.1.8.



Rys. 1. 8. Próbka z blachy o trzech różnych szerokościach pomiarowych

Szerokości odcinków R, S, T dobiera się w ten sposób, aby po zerwaniu próbki w obrębie odcinka R, wydłużenie odcinka T było dużo większe od wydłużenia odpowiadającego umownej granicy plastyczności (np. wynosiło $\varepsilon_l \approx 3\%$), natomiast wydłużenie odcinka S powinno być wyraźnie mniejsze od wydłużenia równomiernego badanego materiału. Jeżeli początkowa szerokość odcinka R próbki wynosi r_0 , to szerokość odcinków S i T można np. przyjąć $s_0 = 1,01r_0$ i $t_0 = 1,1r_0$.

Aby umożliwić dokładne określenie wartości odkształceń ε_S i ε_T odcinków S i T, pośrodku tych odcinków oznacza się ryskami określone długości odcinków pomiarowych e_0 i f_0 (rys.1.8). Po rozciągnięciu próbki, aż do wystąpienia w najwęższej części R wyraźnego przewężenia lub pęknięcia, mierzy się długości e i f na odcinkach S i T. Szukane odkształcenia wynoszą:

$$\varepsilon_S = \ln \frac{e}{e_0}, \quad \varepsilon_T = \ln \frac{f}{f_0}. \quad (1.23)$$

Naprężenia uplastyczniające σ_p , odpowiadające obliczonym odkształceniom, są równe naprężeniom rozciągającym, które występują w tych częściach w końcowej fazie procesu, a więc po osiągnięciu przez siłę osiową wartości maksymalnej P_{max} . Ponieważ siłę tę przenosi część S, jak również T, naprężenia uplastyczniające oblicza się ze wzorów:

$$\sigma_{pS} = \frac{P_{max}}{A_S}; \quad \sigma_{pT} = \frac{P_{max}}{A_T}, \quad (1.24)$$

gdzie A_S i A_T oznaczają pola odpowiednich przekrojów poprzecznych próbki, które można określić z warunku stałej objętości odcinków pomiarowych:

$$A_S = s_0 g_0 \frac{e_0}{e}; \quad A_T = t_0 g_0 \frac{f_0}{f}.$$

We wzorach tych g_0 oznacza początkową grubość próbki.

Po podstawieniu wartości A_S i A_T do wzorów (1.24) otrzyma się zależności:

$$\sigma_{pS} = \frac{P_{max}}{s_0 g_0 \frac{e_0}{e}}; \quad \sigma_{pT} = \frac{P_{max}}{t_0 g_0 \frac{f_0}{f}}. \quad (1.25)$$

W celu wyznaczenia wartości wykładnika potęgowego n należy wykonać kolejno następujące przekształcenia:

1. Po przyrównaniu siły P_{max} określonej z obu wzorów (1.25) otrzyma się zależność:

$$\sigma_{pS} s_0 \frac{e_0}{e} = \sigma_{pT} t_0 \frac{f_0}{f}.$$

2. Podstawiając do tej zależności wartości naprężeń uplastyczniających, określonych zgodnie z przyjętym rodzajem równania krzywej umocnienia, a więc:

$$\sigma_{pS} = C(\varepsilon_S)^n \quad \sigma_{pT} = C(\varepsilon_T)^n \quad (1.26)$$

otrzyma się równanie:

$$(\varepsilon_S)^n s_0 \frac{e_0}{e} = (\varepsilon_T)^n t_0 \frac{f_0}{f},$$

które po podstawieniu związków (1.23) przyjmuje postać:

$$\left(\ln \frac{e}{e_0} \right)^n s_0 \frac{e_0}{e} = \left(\ln \frac{f}{f_0} \right)^n t_0 \frac{f_0}{f}. \quad (1.27)$$

W równaniu (1.27), oprócz wykładnika krzywej umocnienia n występują tylko znane wymiary próbki s_0, t_0, e_0, f_0, e i f .

3. Po zlogarytmowaniu równania (1.27) i uporządkowaniu otrzymuje się wzór:

$$n = \frac{\ln \frac{t_0}{s_0} + \ln \frac{e}{e_0} + \ln \frac{f_0}{f}}{\ln \left[\ln \frac{e}{e_0} - \ln \frac{f}{f_0} \right]},$$

który po uwzględnieniu oznaczeń (1.23) przyjmuje postać:

$$n = \frac{\ln \frac{t_0}{s_0} + \varepsilon_S - \varepsilon_T}{\ln \varepsilon_S - \ln \varepsilon_T}. \quad (1.28)$$

Stałą C wyznacza się przez przyrównanie wzorów (1.25) i (1.26) na naprężenie uplastyczniające - np. dla części T próbki. Otrzymane równanie

$$\frac{P_{\max}}{t_0 g_0 \frac{f_0}{f}} = C(\varepsilon_T)^n,$$

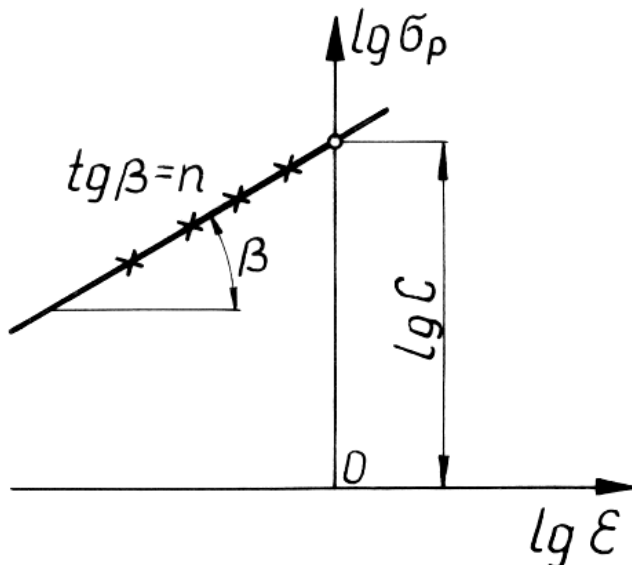
umożliwia obliczenie wartości stałej:

$$C = \frac{P_{\max}}{t_0 g_0 \frac{f_0}{f} (\varepsilon_T)^n}. \quad (1.29)$$

Omawiany sposób wyznaczania stałych C i n różni się od drugiego sposobu doбором punktów doświadczalnych. Jak już wspomniano, punkty te są wyraźnie oddalone od końców odcinka krzywej umocnienia, możliwej do doświadczalnego określenia z próby rozciągania ($\varepsilon_T > 0,002$; $\varepsilon_S < \varepsilon_r$). Położenie tych punktów nie jest stałe i zależy od doboru szerokości próbki s_0 i t_0 w stosunku do r_0 (rys.1.8). Dzięki temu istnieje możliwość dokładniejszego wyznaczenia krzywej umocnienia niż w przypadku poprzednim, zwłaszcza dla materiałów posiadających przystanek plastyczności.

Sposób 4

Sposób ten stosuje się zwykle w przypadku znanego przebiegu doświadczalnej krzywej umocnienia, a więc dla znanych współrzędnych wielu punktów tej krzywej. Ponieważ krzywa umocnienia określona równaniem $\sigma_p = C\varepsilon^n$ w układzie współrzędnych $(\lg \varepsilon, \lg \sigma_p)$ przedstawia prostą o równaniu $\lg \sigma_p = \lg C + n \lg \varepsilon$, więc wartości stałych C i n można wyznaczyć metodą graficzną. Współczynnik kierunkowy prostej poprowadzonej przez punkty doświadczalne jest równy wykładnikowi potęgowemu n , natomiast rzędna punktu przecięcia prostej z osią $\lg \sigma_p$ wyznacza wartość $\lg C$ (rys.1.9). O stopniu zgodności przebiegu rzeczywistej krzywej umocnienia z przyjętym równaniem świadczy rozrzut punktów wyznaczonych doświadczalnie w stosunku do przyjętej linii prostej.



Rys. 1. 9. Krzywa umocnienia w układzie współrzędnych $(\lg \varepsilon, \lg \sigma_p)$

W tych przypadkach, w których rozrzut ten jest wyraźny, linię prostą wykreśla się w rezultacie przez dwa punkty krzywej doświadczalnej. Należy to zrobić w ten sposób, aby przebieg krzywej wg wyznaczonego równania możliwie najmniej różnił się od przebiegu krzywej doświadczalnej.

Dla materiałów posiadających długi przystanek plastyczności należy pominąć punkty leżące w zakresie tego przystanku, ustalając jednocześnie minimalną wartość odkształcenia $(\varepsilon)_{min}$, powyżej którego wyznaczone równanie krzywej umocnienia może być stosowane.

Równanie trójparametrowe $\bar{\sigma}_p = C_1(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$

Wartości stałych C_1 , ε_0 i n najprościej wyznacza się z warunku, aby krzywa określona podanym równaniem przechodziła przez trzy zadane punkty A, B, C leżące na krzywej doświadczalnej. Przy znanych wartościach $\bar{\sigma}_p$ i ε dla tych trzech punktów, można napisać układ równań:

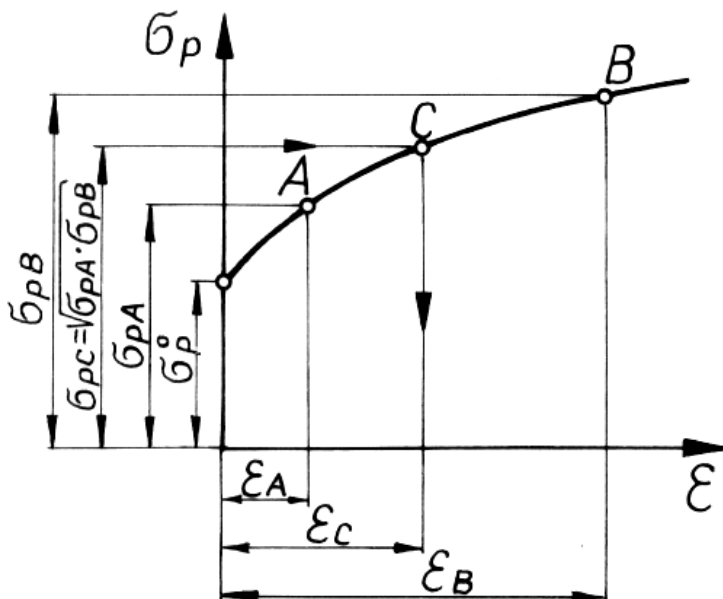
$$\begin{aligned}\sigma_{pA} &= C_1(\varepsilon_0 + \varepsilon_A)^n, \\ \sigma_{pB} &= C_1(\varepsilon_0 + \varepsilon_B)^n, \\ \sigma_{pC} &= C_1(\varepsilon_0 + \varepsilon_C)^n,\end{aligned}\quad (1.30)$$

który pozwala wyznaczyć szukane wartości stałych. Układ ten rozwiązuje się bardzo prosto, jeżeli przyjąć, że między naprężeniami uplastyczniającymi dla punktów A, B, i C występuje następujący związek:

$$\sigma_{pC} = \sqrt{\sigma_{pA} \sigma_{pB}} \quad (1.31)$$

Po przyjęciu punktów A i B na krzywej doświadczalnej odczytuje się wartości współrzędnych $\bar{\sigma}_{pA}$, ε_A , $\bar{\sigma}_{pB}$, ε_B , a następnie ze wzoru (1.31) oblicza się wartość $\bar{\sigma}_{pC}$.

Wartość ε_C ustala się wykreślnie. Sposób postępowania pokazano na rys.1.10.



Rys. 1. 10. Wyznaczanie wartości ε_C , na podstawie znanego przebiegu krzywej umocnienia

Uwzględniając zależności (1.30) i (1.31), można napisać równanie:

$$C_1(\varepsilon_0 + \varepsilon_C)^n = C_1^{0,5}(\varepsilon_0 + \varepsilon_A)^{0,5n} C_1^{0,5}(\varepsilon_0 + \varepsilon_B)^{0,5n},$$

które, po podniesieniu obu stron do potęgi $2/n$ i uporządkowaniu pozwala wyrazić odkształcenie wstępne ε_0 za pomocą znanych wartości ε_A , ε_B , ε_C :

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_C^2 - \varepsilon_A \varepsilon_B}{\varepsilon_A + \varepsilon_B - 2\varepsilon_C}. \quad (1.32)$$

Mając znaną wartość ε_0 , można obliczyć wartość wykładnika potęgowego n . W tym celu wystarczy podzielić stronami np. dwa pierwsze równania (1.30). Otrzyma się wówczas zależność:

$$\frac{\sigma_{pB}}{\sigma_{pA}} = \frac{(\varepsilon_0 + \varepsilon_B)^n}{(\varepsilon_0 + \varepsilon_A)^n}. \quad (1.33)$$

Po zlogarytmowaniu równania (1.33) i przekształceniu, wykładnik n można wyrazić wzorem:

$$n = \frac{\lg \sigma_{pB} - \lg \sigma_{pA}}{\lg(\varepsilon_0 + \varepsilon_B) - \lg(\varepsilon_0 + \varepsilon_A)}. \quad (1.34)$$

Przy znanych wartościach ε_0 i n można obliczyć stałą C_1 z jednego z równań (1.30).

2. WYKONANIE ĆWICZENIA

Ćwiczenie jest dwuczęściowe. Celem pierwszej części jest określenie podstawowych własności plastycznych materiału. Druga część dotyczy wyznaczania równania opisującego w przybliżeniu umacnianie materiału.

Przewiduje się trzy warianty realizacji ćwiczenia. Różnice między nimi dotyczą głównie sposobu wyznaczania równania krzywej umocnienia materiału. Dlatego też w poniżej podanym zestawieniu sposoby te zostały omówione w pierwszej kolejności.

Wariant A. Wyznaczenie dwuparametrowego równania krzywej umocnienia dla znanych wartości wydłużenia równomiernego A_r i wytrzymałości na rozciąganie R_m , określonych podczas jednoosiowego rozciągania próbki o kołowym przekroju poprzecznym.

Przyjęcie takiego założenia umożliwia zastosowanie tej samej próbki również do określenia pozostałych własności plastycznych badanego materiału, a więc do wykonania w całości również pierwszej części ćwiczenia.

Wariant B. Wyznaczenie dwuparametrowego równania krzywej umocnienia dla blachy w stanie wyżarzonym na podstawie wyników uzyskanych podczas rozciągania próbki o różnych szerokościach części pomiarowej, pokazanej na rys.1.8.

Założono, że w tym wariancie ćwiczenia pierwsza jego część zostanie ograniczona do określenia niektórych tylko własności plastycznych badanego materiału. Ograniczenie to wynika z nietypowej geometrii rozciąganej próbki.

Wariant C. Wyznaczenie trójparametrowego równania krzywej umocnienia na podstawie wyników pomiarów otrzymanych podczas rozciągania próbki o kołowym przekroju poprzecznym z zastosowaniem ekstensometru.

Poniżej zestawiono czynności niezbędne do realizacji doświadczalnej części kolejnych wariantów ćwiczenia.

2.1. Wariant A

1. Sporządzić kartę pomiarową.
2. Zmierzyć mikrometrem średnicę d_0 części pomiarowej próbki w trzech miejscach i dwóch prostopadłych kierunkach. Pomiarzy przeprowadzić w środku i w pobliżu końców części pomiarowej. Uśredniony wynik zanotować w karcie.
3. Na części pomiarowej próbki nanieść dwie ryski w odległości $L_0=10d_0$, służące do określenia całkowitego wydłużenia A_{10} (rys.1.2a).
4. Określić siłę potrzebną do przeprowadzenia próby i dobrać odpowiedni zakres pomiarowy maszyny wytrzymałościowej. Przygotować układ samopiszący dynamometru.
5. Zamocować próbkę w uchwytach maszyny i przeprowadzić próbę rozciągania według wskazówek prowadzącego ćwiczenie. Należy rejestrować przebieg siły aż do utraty spójności próbki. Wartość maksymalnej siły P_{max} zanotować w karcie pomiarowej.
6. Zmierzyć mikrometrem średnicę d_r zerwanej próbki w kilku miejscach wydłużonych równomiernie, a więc leżących poza zasięgiem przewężenia. Uśredniony wynik zanotować w karcie pomiarowej.
7. Zmierzyć na mikroskopie warsztatowym odległość L_u między ryskami pomiarowymi oraz najmniejszą średnicę d_u w miejscu przewężonym (rys.1.2c). Wyniki pomiarów zamieścić w karcie.

2.2. Wariant B

1. Sporządzić kartę pomiarową.
2. Za pomocą mikrometru zmierzyć grubość próbki g_0 oraz szerokości t_0 , s_0 i r_0 trzech jej odcinków oznaczonych rysikiem zgodnie z rys.1.8 literami T, S i R. Wyniki zanotować w karcie.
3. Zgodnie z rys.1.8 na odcinkach T i S próbki nanieść za pomocą rysika po dwie rysy pomiarowe, określające odcinki o długości f_0 i e_0 . Rysy powinny być dostatecznie odległe od końców odpowiedniego odcinka próbki, określonych przez jego zmierzoną szerokość (np. o $1,5\sqrt{A_0}$, gdzie A_0 oznacza poprzeczny przekrój odcinka próbki o największej szerokości).
4. Zmierzyć za pomocą mikroskopu warsztatowego długości odcinków f_0 i e_0 . Wyniki zanotować w karcie.
5. Próbę rozciągania zrealizować zgodnie z punktami 4 i 5 podanymi dla wariantu A ćwiczenia (punkt 2.1). Wyniki pomiarów zanotować w karcie.
6. Po zerwaniu próbki zmierzyć za pomocą mikroskopu warsztatowego długości odcinków f i e . Wyniki zanotować w karcie.

2.3. Warianc C

Wszystkie czynności podane w punkcie 2.1 dla wariantu A są tu również aktualne. Trzeba je jednak uzupełnić o czynności związane z zastosowaniem ekstensometru, zwłaszcza ekstensometru czujnikowego (rys.1.4). W tym przypadku trzeba sporządzić drugą kartę pomiarową, przeznaczoną do zanotowania wskazań czujników i odpowiadających im wartości siły rozciągającej. Próbę rozciągania, do chwili wystąpienia w przybliżeniu siły maksymalnej P_{max} , należy przeprowadzić zgodnie z odpowiednią instrukcją oraz wskazówkami prowadzącego ćwiczenie.

Jak już wspomniano w punkcie 1.1.5 można również zastosować ekstensometr, który umożliwi podczas próby rozciągania bezpośrednio wykreślenie zależności $P(\Delta L)$, gdzie ΔL oznacza odpowiednio powiększone przyrosty długości pomiarowego odcinka próbki. Wykreślony odcinek krzywej rozciągania do chwili wystąpienia siły P_{max} pozwala wówczas na znacznie mniej pracochłonne wyznaczenie przebiegu krzywej umocnienia materiału.

W obu przypadkach po osiągnięciu siły P_{max} należy ekstensometr zdjąć z próbki, a następnie prowadzić proces rozciągania do chwili jej rozdzielenia. Umożliwi to wyznaczenie wartości wydłużenia całkowitego A_{10} i przewężenia Z badanego materiału.

3. OPRACOWANIE SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniach ze wszystkich wariantów ćwiczenia powinny znajdować się następujące opracowania cząstkowe.

1. Starannie wypełnione karty pomiarowe.
2. Wklejony wykres z wykonanej próby rozciągania, uzupełniony odpowiednim opisem i omówieniem kolejnych faz procesu.
3. Wartości parametrów określających podstawowe własności plastyczne badanego materiału, wyznaczone podczas próby rozciągania, jak R_e , R_m , A_r , A_{10} , Z .
4. Wyznaczenie przybliżonego równania krzywej umocnienia badanego materiału.
5. Wykreślenie przebiegu krzywej umocnienia wg wyznaczonego równania.
6. Analiza wpływu wartości parametrów C i n na przebieg krzywej umocnienia wg równania $\sigma_p = C\varepsilon^n$.

Opracowanie cząstkowe wg punktu 4 należy wykonać szczególnie starannie, zamieszczając szczegółowy opis postępowania i odpowiednie obliczenia.

Przy realizacji zadania wg punktu 5 należy określić współrzędne dostatecznie dużej ilości punktów krzywej umocnienia (np. 10÷15), przyjmując odpowiednie ich zagęszczenie dla małych odkształceń ε .

4. PYTANIA

1. Na czym polega utrata stateczności i utrata spójności podczas jednoosiowego rozciągania próbki?
2. Jaki jest stan naprężenia w szyjce rozciąganej próbki?
3. W jakich przypadkach wytrzymałość materiału na rozciąganie ma sens fizyczny?
4. W jakim miejscu szyjki wystąpi początek rozdzielania materiału i dlaczego?
5. Jak przebiega proces odkształcania próbki blaszanej złożonej z trzech lub dwóch odcinków o różnej szerokości?
6. Jakie zadanie spełnia najwęższy odcinek R próbki wykonanej z blachy wg rys.1.8?
7. Co oznacza stała C w równaniu krzywej umocnienia w postaci $\sigma_p = C\varepsilon^n$?
8. Jaki przebieg mają krzywe umocnienia wg równania $\sigma_p = C\varepsilon^n$ dla materiałów o tej samej wartości parametru C i różnych wartościach wykładnika potęgowego n ?
9. Jaki przebieg mają krzywe umocnienia według równania $\sigma_p = C\varepsilon^n$ dla materiałów o tej samej wartości wykładnika potęgowego n i różnych wartościach stałej C ?
10. Dlaczego równanie $\sigma_p = C\varepsilon^n$ nie może być użyte do opisu umacniania materiałów wstępnie odkształconych?
11. Jaką postać przybiera wzór na pracę odkształcenia plastycznego, jeżeli odkształcenie materiału jest jednorodne, a krzywa umocnienia jest określona za pomocą równania $\sigma_p = C\varepsilon^n$?
12. Ile wynosi praca odkształcenia plastycznego przy odkształceniu 10 cm^3 materiału, dla którego wyznaczono podczas ćwiczenia krzywą umocnienia, jeżeli wiadomo, że jednorodne odkształcenie zastępcze osiągnęło wartość $\varepsilon = 0,15$?
13. Jaka jest wartość wydłużenia równomiernego ε_r dla materiału wyżarzonego, którego umocnienie opisuje równanie $\sigma_p = C_1(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$?
14. Jakie metody umożliwiają wyznaczenie dłuższego odcinka doświadczalnej krzywej umocnienia niż jest to możliwe w próbie jednoosiowego rozciągania?
15. Jaka musi być wartość siły rozciągającej potrzebnej do 15-procentowego wydłużenia okrągłego pręta wykonanego z badanego materiału, jeżeli jego średnica początkowa wynosi 10 mm ?
16. Jak określić wytrzymałość na rozciąganie R_m materiału wyżarzonego, który umacnia się zgodnie z równaniem $\sigma_p = C_1(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$?

Literatura

- [1] Katarzyński S., Kocańda S., Zakrzewski M.: Badania własności mechanicznych metali. WNT, Warszawa 1967, str. 57÷67, 91÷104, 140÷145, 147÷155.
- [2] Marciniak Z.: Odkształcenia graniczne przy tłoczeniu blach. WNT, Warszawa 1971, str. 28÷34, 44÷46.
- [3] Marciniak Z.: Mechanika procesów tłoczenia blach. WNT, Warszawa 1961, str. 27÷36.
- [4] Erbel St., Kuczyński K., Marciniak Z.: Techniki Wytwarzania. Obróbka Plastyczna. PWN, Warszawa 1981 lub 1986, str. 58÷64.
- [5] Pełczyński T.: O krzywych umocnienia. Obróbka Plastyczna, z. 1/1975, str. 1÷27.