

5. BADANIE WŁASNOŚCI MATERIAŁU W JEDNOOSIOWEJ PRÓBIE ROZCIĄGANIA *

5.1. RYS HISTORYCZNY

Od kiedy metal zaczął być wykorzystywany jako materiał konstrukcyjny, inżynierów zaczęło interesować jak zachowuje się on pod wpływem obciążeń. Pierwszym naukowcem, który odkrył zależność między odkształceniem pręta a jego obciążeniem był angielski fizyk R. Hook. Swoje spostrzeżenie ogłosił w 1660 roku na podstawie badań doświadczalnych polegających na rozciąganiu prostego pręta. Dopiero w 1822 A.L. Cauchy uogólnił obserwacje dla dowolnych odkształceń i zapisał je w języku współczesnej mechaniki ciał odkształcalnych. Dzięki tym naukowcom jak i wielu innym (Young, Kirchhoff, Poisson) zaczęła się rozwijać nowa gałąź wiedzy badająca własności mechaniczne materiałów. Służyć miała ona poznaniu zachowania się materiału w różnych warunkach. Określanie takich parametrów jak moduł Younga, granica plastyczności czy wytrzymałość doraźna były historycznie najstarszymi testami co świadczy o wadze opisywanego doświadczenia. Wymienione powyżej wielkości stanowią podstawowe własności każdego materiału i są określane obowiązkowo przed jego zastosowaniem. Dlatego opracowano państwową normę, aby ujednolicić sposób uzyskiwania ich oraz aby w każdym przypadku oznaczały one tę samą wielkość.

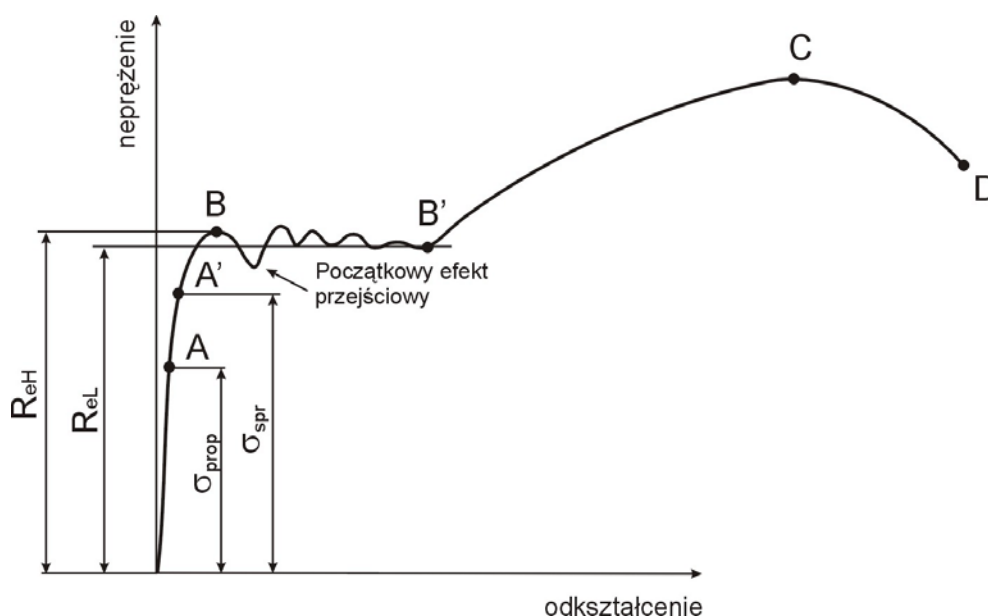
5.2. PODSTAWY FIZYCZNE

5.2.1. Wykres rozciągania

Podstawową charakterystyką metalu z jaką student spotka się podczas tego ćwiczenia jest wykres rozciągania w jednoosiowym stanie naprężeń. Klasyczny przykład wykresu rozciągania dla materiału z wyraźną granicą plastyczności przedstawia rysunek 5.1. Taki obraz krzywej rozciągania można uzyskać na przykład dla stali niskowęglowej. Jak widać krzywa ta składa się z kilku odcinków. Od 0 do punktu A naprężenia rosną proporcjonalnie do odkształceń (obowiązuje prawo Hooke'a). Na odcinku AA' przestaje obowiązywać prawo Hooke'a, ale w próbce nie pojawiają się jeszcze trwałe odkształcenia. Na odcinku A'B zależność ta jest wyraźnie nieliniowa, ale mimo to po odciążeniu materiał pozornie wróci do stanu przed obciążeniem (mówiąc precyzyjniej uznajemy, że trwałe odkształcenia, które powstały są pomijalnie małe z praktycznego punktu widzenia). Jeżeli przekroczymy punkt B w materiale pojawią się znaczące odkształcenia plastyczne, które pozostaną na stałe po odciążeniu. Na odcinku BB' materiał odkształca się nawet przy

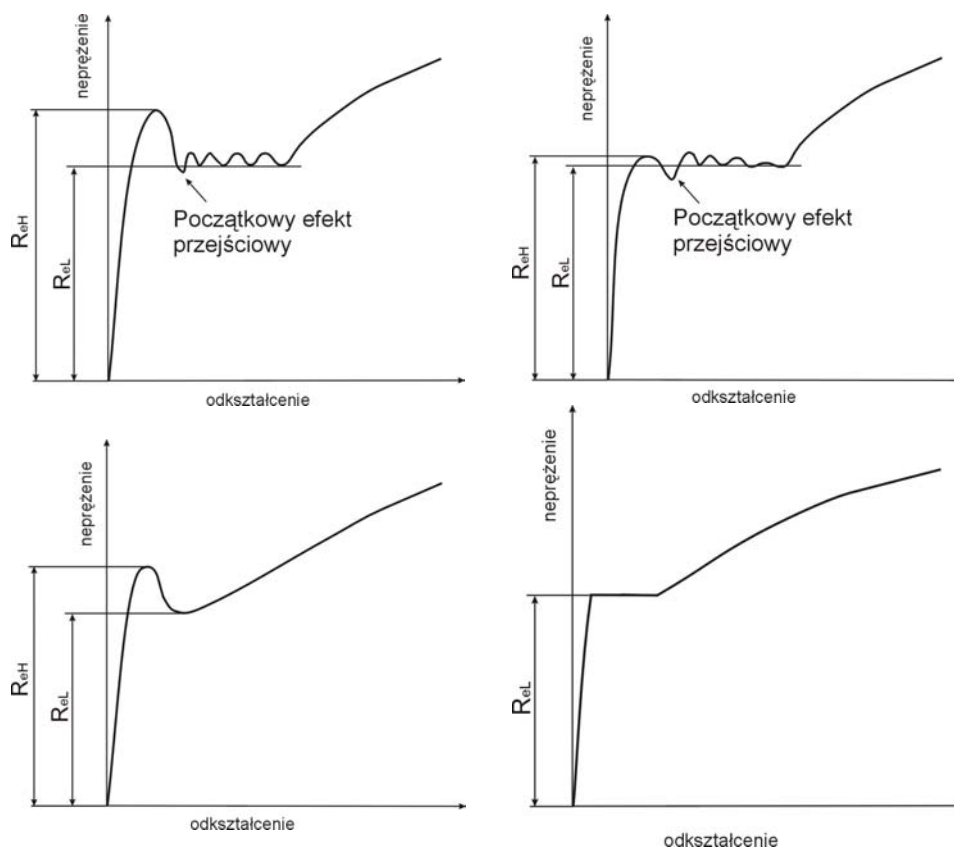
* Opracował: Jarosław Gałkiewicz

zmniejszającym się obciążeniu zewnętrznym. Proces ten nazywa się płynięciem materiału i zachodzi dzięki uruchomieniu defektów (dyslokacji), które początkowo nie mając jeszcze wielu przeszkód poruszają się łatwo. Jedną z hipotez wyjaśniających płynięcie materiału w zakresie wyraźnej granicy plastyczności przy kolejno spadającym i rosnącym obciążeniu jest zjawisko oddziaływania i uwalniania się dyslokacji z tzw. atmosfer Cottrell'a. Są to zbiorowiska atomów wtrąceń znajdujących się w sieci w pozycji międzywęzłowej w pobliżu jądra dyslokacji. Przy uwolnieniu się dyslokacji z atmosfer Cottrell'a spada zewnętrzne obciążenie. Rośnie ono znowu na skutek ponownego otoczenia rdzeni dyslokacji przez defekty punktowe. W wyniku powstawania coraz to nowych dyslokacji, ich wzajemnego oddziaływania przy rosnącej ich liczbie pojawia się proces umacniania materiału (B'C).



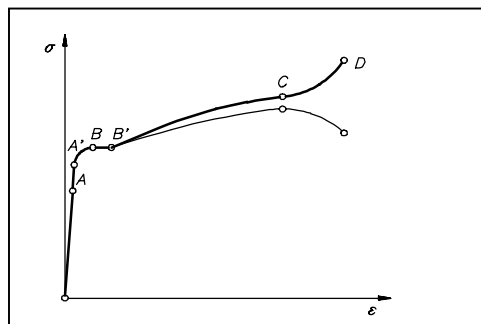
Rys. 5.1. Wykres rozciągania z wyraźną granicą plastyczności

Pojawiające się na odcinku BB' nieregularności można sklasyfikować na kilka podstawowych typów i opisać za pomocą: górnej (R_{eH}) i dolnej (R_{eL}) granicy plastyczności tak jak to pokazano na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Wyznaczanie górnej i dolnej granicy plastyczności.

W punkcie C rejestrowane jest maksimum obciążenia. Od tego punktu naprężenia odnoszone do początkowego przekroju próbki maleją, aż do jej zerwania w punkcie D [1]. Odcinek B'D nie jest jednak rzeczywistym obrazem naprężeń w przekroju poprzecznym próbki, ponieważ są to naprężenia jakie wynikają z wartości aktualnej siły siłownika i pola przekroju początkowego. W rzeczywistości jednak pole przekroju na tym odcinku jest dużo mniejsze dzięki odkształceniom sprężystym, plastycznym i powstawaniu szyjki. Od chwili zainicjowania szyjki naprężenia w przekroju poprzecznym do osi próbki są w tym obszarze niejednorodne ze względu na powstające pustki, mikropęknięcia i efekt karbu. Naprężenie w odcinku B'D w rzeczywistości jest wyższe i rośnie jak na rysunku 5.3. Należy podkreślić, że o ile punkty od A-C można utożsamiać z własnościami badanego materiału to nie jest tak z punktem D. Długość odcinka CD na krzywej rozciągania jak i wartość naprężeń w momencie zerwania zależą nie tylko od właściwości materiału, ale od całego układu pomiarowego, a w szczególności od sztywności maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 5.3. Krzywa rozciągania wyrażona poprzez średnie naprężenie „rzeczywiste” ($\sigma = P/A$) oraz średnie naprężenia umowne ($\sigma = P/A_0$)

Zmianę średnicy próbki w miejscu powstania szyjki można uwzględnić przy obliczaniu naprężeń przy wyznaczaniu wykresu SPR w układzie σ – ε . Wiadomo, że naprężenia wyznacza się dzieląc wartość siły przez pole przekroju, na który ta siła działa.

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{ gdzie } A = \frac{\pi d^2}{4}$$

W najprostszym podejściu w mianowniku wstawiamy zawsze początkowe pole części pomiarowej. Wiadomo jednak, że podczas próby objętość części kontrolnej nie zmienia się. Jeśli jej długość wzrasta to dla zachowania stałej objętości średnica musi odpowiednio maleć. Przed rozpoczęciem próby objętość części kontrolnej wynosi:

$$V_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} l_0$$

W każdej chwili próby możemy napisać, że:

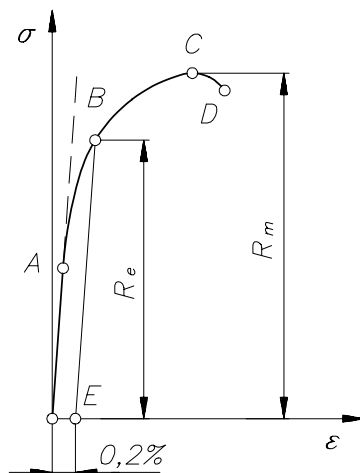
$$V_0 = \frac{\pi d_{\text{aktualna}}^2}{4} l_{\text{aktualna}}$$

stąd aktualna średnica wynosi:

$$d_{\text{aktualna}} = \sqrt{\frac{4V_0}{\pi l_{\text{aktualna}}}}$$

Naprężenia wyznaczone na podstawie początkowej średnicy próbki nazywa się naprężeniami inżynierskimi, zaś naprężenia wyznaczone na podstawie rzeczywistej średnicy nazywa się naprężeniami prawdziwymi lub Cauchy’ego.

Dla wielu metali i ich stopów wykres rozciągania nie ma wyraźnej granicy plastyczności i wygląda jak na rysunku 5.4. Określenie takiej wielkości jak na przykład granica plastyczności jest w tej sytuacji niewykonalne za pomocą bezpośredniego pomiaru. W takim przypadku oblicza się umowną granicę plastyczności $R_{0,2}$ tak jak na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Wykres rozciągania materiału bez wyraźnej granicy plastyczności

Umowna granica sprężystości ($R_{0,05}$) to naprężenia, które wywołują w materiale odkształcenia trwałe wynoszące 0,05% długości pomiarowej L_e .

Umowna granica plastyczności ($R_{0,2}$) to naprężenia, które wywołują w materiale odkształcenia trwałe wynoszące 0,2% długości pomiarowej L_e . Sposób ich wyznaczenia pokazuje sposób rysunek 5.4. Z punktu E na osi odciętych odpowiadającego odkształceniom 0,2% prowadzi się linię EB równoległą do początkowego, prostoliniowego odcinka OA wykresu rozciągania. Poziom naprężeń w punkcie B odpowiada wartości umownej granicy plastyczności.

Wytrzymałość na rozciąganie to naprężenia odpowiadające punktowi C liczone na podstawie maksymalnej wartości zarejestrowanej siły i początkowego pola przekroju.

Naprężenia rozrywające to naprężenia liczone na podstawie wartości siły zarejestrowanej w punkcie D i pola przekroju próbki w miejscu pęknięcia [2].

5.2.2. Dwa podstawowe modele materiałów

Krzywe $\sigma=f(\epsilon)$ otrzymane w jednoosiowej próbie rozciągania są obrazem odpowiedzi materiału na zewnętrzne obciążenia. Ze względu na prostotę ich otrzymywania stały się podstawową charakterystyką określającą własności materiału odkształcalnego. Możemy dzięki tej próbie wyznaczyć podstawowe własności materiału zarówno w zakresie odkształceń sprężystych jak i plastycznych. Mimo, że próbę przeprowadza się w najprostszym stanie naprężenia (jednoosiowym) to dzięki odpowiednim hipotezom uzyskane w niej stałe materiałowe całkowicie wyznaczają stan materiału w złożonym stanie naprężeń i odkształceń.

W jednoosiowej próbie rozciągania możemy wyznaczyć moduł Younga (5.1):

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11} \quad (5.1)$$

i współczynnik Poissona (5.2):

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\nu\varepsilon_{11} \quad (5.2)$$

które są całkowicie wystarczającymi własnościami sprężystymi materiału, pozwalającymi zapisać uogólnione prawo Hooke'a w postaci:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \left((1 + \nu) \sigma_{ij} - \nu \delta_{ij} \sigma_{kk} \right)$$

Przykładowe wartości modułu Younga i współczynnika Poissona podano w Tabeli 5.1.

Tabela 5.1

Mechaniczne własności materiałów

Materiał ³	E [MPa]	ν
stal St3S	$2,06 \cdot 10^5$	0,29
stal spręż. 60SGH	$2,08 \cdot 10^5$	0,30
stop Al-Cu (dural D 16)	$7,0 \cdot 10^4$	0,34
stop Cu-Sn (brąz)	$1,0 \div 1,1 \cdot 10^5$	0,32
szkło potasowe (zwykłe)	$6,0 \div 6,5 \cdot 10^4$	0,23
bakelit	$3,5 \div 4,0 \cdot 10^3$	0,37

Prawo Hooke'a opisuje materiał w zakresie liniowym i tylko w tym zakresie można wyznaczyć moduł Younga za pomocą równania 5.1.

Zwróćmy uwagę na drugą wielkość podaną w tabeli 5.1. Jest to tzw. liczba Poissona. Gdy słuszne jest prawo Hooke'a wówczas odkształcenia w kierunku poprzecznym są proporcjonalne do odkształceń w kierunku działania obciążenia według równania (5.2). Jednoosiowemu stanowi naprężenia nigdy nie towarzyszy jednoosiowy stan odkształcenia.

$$\begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} = -\nu \frac{\sigma_{11}}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} = -\nu \frac{\sigma_{11}}{E} \end{vmatrix}$$

W przypadku wielu materiałów nieliniowych (czyli takich w których zależność między naprężeniem i odkształceniem nie linią prostą) ich zachowanie można opisać prawem potęgowym Ramberga-Osgooda. Prawo to opisuje krzywą rozciągania w jednoosiowej próbie w zakresie plastycznym i można je zapisać za pomocą równania:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (5.3)$$

gdzie: σ_0 jest granicą plastyczności (R_e lub $R_{0,2}$); ε_0 jest odkształceniem odpowiadającym granicy plastyczności ($\varepsilon_0 = \sigma_0/E$); E jest modułem Young'a; α jest stałą, określaną mianem stałej umocnienia, n – wykładnikiem potęgowym, określanym mianem współczynnika umocnienia lub wykładnika umocnienia.

W praktyce równanie 5.3 sprawia duże problemy, gdyż z matematycznego punktu widzenia w punkcie oznaczającym granicę plastyczności prowadzi do sprzeczności, dlatego prawo Ramberga-Osgooda zastępuje się dwuczłonowym opisem w postaci:

$$\begin{cases} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} & \text{dla } \sigma \leq \sigma_0 \\ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n & \text{dla } \sigma > \sigma_0 \end{cases} \quad (5.4)$$

co oznacza, że do osiągnięcia granicy plastyczności materiał traktuje się jako liniowo-sprężysty, zaś powyżej opisuje go prawo Ramberga-Osgooda.

Stałe materiałowe α i n , mają swe zastosowanie w uogólnionym prawie Ramberga-Osgooda na przypadki trójosiowe:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \alpha \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y} \right)^{n-1} \frac{s_{ij}}{\sigma_y} \quad (5.5)$$

gdzie:

$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$ jest dewiatorem tensora naprężenia, zaś

$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}$ jest naprężeniem efektywnym.

Jednakże wcześniej trzeba wyznaczyć ich wartości. W obliczeniach inżynierskich stała umocnienia – α przyjmowana jest często jako równa jedności. Stopień umocnienia materiału jest wtedy określany jedynie na podstawie współczynnika umocnienia n .

Po wybraniu wzoru opisującego zachowanie się materiału można przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów dopasować parametry α i n . Dopasowanie to można zrobić dla „odpowiednio” wybranych punktów z zakresu od początku zarejestrowanej krzywej doświadczalnej do momentu osiągnięcia maksimum na krzywej doświadczalnej.

Istotną sprawą jest wybór punktów wykorzystanych do aproksymacji. Zależać on może od kilku czynników. Najważniejsze z nich to:

- cel i zakres analizy (małe czy duże odkształcenia, przewaga odkształceń sprężystych czy plastycznych),
- charakter krzywej rozciągania (wyrażna czy umowna granica plastyczności).

Dla wszystkich badanych stali najbardziej zbliżonymi do rzeczywistego okazują się być modele:

- oparty o wzór 5.4 w którym od uzyskania stałych α i n wykorzystuje się zakres punktów pomiędzy granicą plastyczności a wytrzymałością doraźną
- oparty o wzór 5.4 w którym $\alpha=1$ a n wyznacza się na podstawie punktów pomiędzy granicą plastyczności a wytrzymałością doraźną

Modele oparte o wzór 5.3 obarczone są większymi błędami w porównaniu do dwóch wyżej wymienionych.

Granica plastyczności zmierzona w jednoosiowej próbie rozciągania ma podstawowe znaczenie w hipotezach wytrzymałościowych służących do określenia momentu przejścia w stan plastyczny w wieloosiowym stanie naprężenia. Dzięki jej wyznaczeniu i wspomnianym hipotezom na podstawie prostej próby można przewidywać zachowanie materiału w złożonych stanach obciążenia.

W hipotezie Hubera-Missesa-Henckyego zakłada się, że materiał osiąga stan plastyczny, gdy drugi niezmiennik dewiatora naprężenia osiąga wartość krytyczną k^2 :

$$\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = k^2 \quad (5.6)$$

k jest granicą plastyczności przy czystym ścinaniu. W przypadku prostej próby rozciągania mamy $\sigma_{22}=\sigma_{33}=0$, $\sigma_{11}=R_e$ więc:

$$2R_e^2 = 6k^2 \Rightarrow k = \frac{R_e}{\sqrt{3}} \quad (5.7)$$

Czyli znając granicę plastyczności przy jednoosiowym rozciąganiu możemy obliczyć granicę plastyczności przy czystym ścinaniu.

W hipotezie Treski założono z kolei, że materiał zaczyna płynąć kiedy maksymalne naprężenia styczne osiągną wartość krytyczną k . W przypadku jednoosiowej próby rozciągania mamy $\sigma_{22}=\sigma_{33}=0$, $\sigma_{11}=R_e$. Na podstawie analizy koła Mohra otrzymujemy zależność (5.8):

$$\frac{\max\{\sigma_{11} - \sigma_{22}; \sigma_{11} - \sigma_{33}; \sigma_{22} - \sigma_{33}\}}{2} = k \Rightarrow k = \frac{R_e}{2} \quad (5.8)$$

Otrzymujemy więc nieco inną wartość k niż przy wykorzystaniu hipotezy Hubera-Missesa-Henckyego

5.3. PODSTAWOWE MIARY ODKSZTAŁCEŃ

W trakcie przeprowadzania próby konieczne jest ustalenie stopnia odkształcenia materiału. Podstawową wielkością, która opisuje odkształcenie bazy pomiarowej jest odkształcenie zdefiniowane w następujący sposób:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5.9)$$

gdzie l_0 jest początkową długością bazy pomiarowej (w naszym przypadku zwykle 50mm), zaś l_1 to bieżącą długość bazy. Jak widać jest to więc iloraz przyrostu długości bazy pomiarowej do długości początkowej. Jest to wielkość bezwymiarowa. Tak zdefiniowane odkształcenie w literaturze nazywane jest odkształceniem inżynierskim lub nominalnym.

W przypadku dużych odkształceń bazy (np.: bardzo plastyczne materiały czy gumy należące do materiałów hiperelastycznych) stosują się inną miarę odkształceń:

$$e = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (5.9)$$

Odkształcenie określone równaniem 5.9 nazywa się odkształceniem rzeczywistym lub logarytmicznym. Logarytmiczny charakter równania 5.9 wynika z całkowania małych przyrostów odkształcenia celem uzyskania całkowitego odkształcenia:

$$de = \frac{dl}{l} \quad (5.10)$$

$$e = \int_0^E de = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (5.11)$$

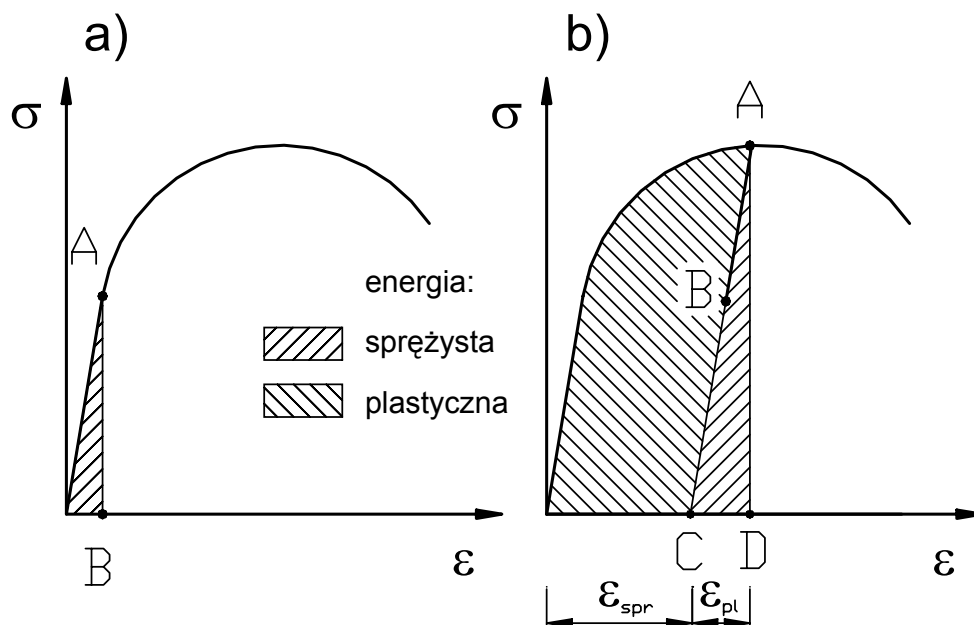
Między odkształceniem inżynierskim i prawdziwym istnieje zależność matematyczna. Można ją uzyskać rozpisując funkcję logarytmiczną w szereg. Po odrzuceniu członów wyższego rzędu otrzymujemy zależność $e=\varepsilon$. Oznacza to, że dla małych odkształceń obie wielkości są prawie identyczne.

$$e = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) = \varepsilon - \frac{1}{2}\varepsilon^2 + \frac{1}{3}\varepsilon^3 - \frac{1}{4}\varepsilon^4 + \dots \approx \varepsilon \quad (5.12)$$

Jak widać dla małych przyrostów odkształcenia różnica między obu miarami odkształcenia jest niewielka. Dla $\varepsilon=1\%$ różnica jest rzędu ε^2 czyli 10^{-4} .

5.4. ENERGIA ODKSZTAŁCENIA SPRĘŻYSTA I PLASTYCZNA

W kolejnych rozdziałach wielokrotnie pojawiać się będą pojęcia energii odkształcenia, energii sprężystej, energii plastycznej, energii dyssypowanej. Pojęcie energii w mechanice ciał odkształcalnych jest pojęciem kluczowym, wykorzystywanym do opisu wielu zjawisk. Zakładamy, że było one omówione w trakcie innych wcześniej wykładanych przedmiotów. W niniejszym ćwiczeniu chcielibyśmy zwrócić uwagę na to, że prosta próba rozciągania może również z powodzeniem wspomagać teoretyczną analizę bilansu energetycznego.



Rys. 5.5. Graficzna prezentacja rozkładu energii plastycznej i sprężystej

Do momentu pojawienia się odkształcenia plastycznego praca sił zewnętrznych w całości zamieniona zostaje na sprężystą energię odkształcenia. Na wykresie rozciągania podczas procesu obciążenia zmierzać będziemy od punktu 0 do A. Przy odciążeniu będziemy się cofać od punktu A do 0 (rys. 5.5a). Pole zamknięte między punktami 0AB przedstawia energię sprężystą odkształcenia.

Jeżeli jednak przekroczymy granicę plastyczności pojawią trwałe odkształcenia, które w sposób nieodwracalny pochłoną część dostarczonej energii. Energia zostanie rozproszona w dużej mierze (ponad 80%) na ciepło, które odprowadzone zostaje do otaczającej atmosfery. Odciążenie w obszarze plastycznym nie spowoduje już powrotu wzdłuż linii obciążenia, ale wzdłuż prostej odciążenia równoległej do początkowego odcinka krzywej rozciągania (odcinek AB na rysunku 5.5b). W wyniku przedłużenia prostej AB do punktu C dostajemy dwa pola. Trójkąt ACD obrazuje energię odzyskaną w wyniku odciążenia. Pochodzi ona od sprężystego odkształcenia próbki powracającej do stanu nieobciążonego. Odcinek CD przedstawia część sprężystą odkształcenia. Pole 0AC przedstawia energię, którą zużyto na odkształcenie plastyczne. Podczas próby wykonamy kilka takich odciążeń, aby zobaczyć jak zmieniają się proporcje między tymi dwoma rodzajami energii w różnych częściach krzywej.

Wykres rozciągania można przedstawić w dwóch układach współrzędnych. Tak jak na rysunku 5.5 w układzie naprężenia odkształcenia (σ – ϵ) lub w układzie siła–

wydłużenie części pomiarowej ($F-\Delta l$). Przejście między tymi dwoma układami jest bardzo proste, ale wyznaczane wielkości zmieniają swój charakter. Pole oznaczające konkretną ilość energii na wykresie $F-\Delta l$ po przejściu na wykres $\sigma-\epsilon$ oznacza energię właściwą (a więc ilość energii zgromadzonej w jednostce objętości). Zamiast modułu Young’a wyznaczanego w układzie $\sigma-\epsilon$ uzyskujemy sztywność w układzie $F-\Delta l$. Wniosek z tego jest bardzo istotny. W układzie $\sigma-\epsilon$ wyznaczamy wielkości niezależne od geometrii użytej próbki – stałe materiałowe, natomiast w układzie $F-\Delta l$ uzyskiwane wielkości zależą od kształtu i wymiarów próbek.

Podczas doświadczenia sztywność (podatność) próbki przy odciażaniu ulega zmianie. Do osiągnięcia granicy plastyczności sztywność nie będzie się istotnie zmieniała, ale po jej przekroczeniu będzie inaczej. Jakie jest fizyczne uzasadnienie tego zjawiska?

Ponieważ energii na wykresie SPR stanowi pole powierzchni pod krzywą rozciągania, aby ją wyznaczyć należy dokonać całkowania dowolną metodą. Najprymitywniejsza polega na zliczeniu kratek na papierze milimetrowym, ale jest to bardzo prymitywny sposób. Najlepiej do tego celu wykorzystać programy Origin lub Excel. Można też pokusić się o napisanie własnej procedury, wyznaczającej wartość całki na podstawie wartości zapisanych w pliku z wynikami pomiaru. W tym przypadku najprostszą i najbardziej efektywną będzie metoda trapezów [3].

5.4. PRZEBIEG ĆWICZEŃ

5.4.1. Ćwiczenie 1

Ćwiczenie to polega na przeprowadzeniu próby rozciągania dla materiału nie posiadającego wyraźnej granicy plastyczności. Na próbce należy zamocować ekstensometr o bazie 50 mm, który posłuży do określenia odkształceń elementu rozciąganego. Rejestruje się sygnały: przemieszczenia trawersy, siły z jaką siłownik rozciąga próbkę i przemieszczenia nóżek ekstensometru. Wzmocnione sygnały analogowe z czujników przekazywane są przez kartę AC do komputera. Sterowanie próbą odbywać się będzie za pomocą programowalnego modułu sterownika (MicroProfiler) w warunkach kontrolowanego przemieszczenia. Użyty program steruje przemieszczeniem z zadaną prędkością [4].

Przed przystąpieniem do próby należy:

- zmierzyć średnicę przekroju próbki d_0 ; pomiaru należy dokonać w trzech miejscach na długości pomiarowej w dwóch prostopadłych kierunkach (powierzchnię przekroju poprzecznego S_0 oblicza się na podstawie średniej arytmetycznej z wykonanych 6-ściu pomiarów),
- zamocować próbkę w uchwytach maszyny tak, aby oś próbki i kierunek rozciągania pokrywały się,

- skalibrować i zamocować ekstensometr na próbce oraz zapisać rozstaw jego podpór, który stanowi bazę pomiarową L_0 ,
- po sprawdzeniu poprawności połączeń aparatury pomiarowej z komputerem i zorganizowaniu środowiska pomiarowego programu (czas pomiaru, częstość próbkowania) należy wyzerować wszystkie sygnały a następnie uruchomić rejestrację wyników i w chwilę potem program sterujący maszyną MTS,
- po wykonaniu próby należy zapisać wyniki do pliku *.pom.

5.4.2. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

- wykres $\sigma=f(\epsilon)$,
- obliczone wszystkie (możliwe do wyznaczenia) wielkości występujące w poniższej tabeli:

Symbol	Nazwa	Wartość
1	2	3
A_p	Względne wydłużenie próbki po rozrywaniu	$A_p = \frac{\Delta L}{L_0} 100 [\%]$
Z	Względne przewężenie próbki	$Z = \frac{d_0^2 - d_u^2}{d_0^2} 100 [\%]$
$R_{0,05}$	Umowna granica sprężystości	$R_{0,05} = \frac{F_{0,05}}{S_o} [\text{MPa}]$
$R_{0,2}$	Umowna granica plastyczności	$R_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_o} [\text{MPa}]$

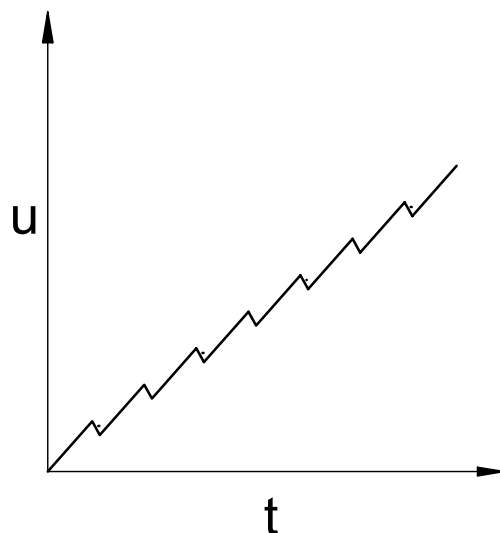
1	2	3
R_m	Wytrzymałość na rozciąganie	$R_m = \frac{F_m}{S_o}$ [MPa]
R_u	Napężenie rozrywające	$R_u = \frac{F_u}{S_u}$ [MPa]
E	Współczynnik sprężystości wzdłużnej - moduł Young'a	Tangens nachylenia krzywej (σ - ϵ) w początkowym liniowym odcinku. Do wykonania należy wybrać punkty leżące w zakresie $<0,25F_{0,2}; 0,75F_{0,2}>$ i aproksymować je linią prostą przy pomocy metody najmniejszych kwadratów [3]. Następnie obliczyć: $E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}$

- parametry krzywej R-O (jeśli będzie to możliwe),
- wnioski.

5.4.3. Ćwiczenie 2

W drugiej próbie wykorzystany zostanie materiał o znacznie większych skłonnościach do odkształceń plastycznych.

- należy przeprowadzić próbę według opisu ćwiczenia 1; zaprogramować sterownik maszyny w ten sposób, aby wprowadzić co najmniej 10 odciążeń (dwa przed granicą plastyczności, cztery między $R_{0,2}$ i R_m oraz cztery pomiędzy R_m i R_u) (wartości $R_{0,2}$, R_m i R_u zna prowadzący ćwiczenie); ponieważ sterować będziemy przemieszczeniem trawersy jego przebieg powinien wyglądać jak na rysunku 5.6),
- po wykonaniu próby należy zapisać wyniki do pliku *.pom (następnie sprawdzić czy próba jest ważna).



Rys. 5.6. Przebieg przemieszczenia trawersy w funkcji czasu

5.4.4. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

- wykres $P=f(u)$,
- dla każdego z odciażeń wyznaczone wartości energii plastycznej, sprężystej i całkowitej oraz wartość podatności (należy też określić wartość całkowitej energii zużytej na rozerwanie próbki),

Nr odc.	$A_{spr}[J]$	$A_{pl}[J]$	$A_{cal}[J]$	$C [mm/kN]$
1	Wielkość określona na podstawie pola pod krzywą rozciągania	Wielkość określona na podstawie pola pod krzywą rozciągania	Suma energii sprężystej A_{spr} i energii plastycznej A_{pl} .	Określona na podstawie linii odciażenia na wykresie rozciągania.
...	...	...	...	...
10				

- dokonać pomiaru średnicy przewężenia d_u i obliczyć wszystkie wielkości niezbędne do wypełnienia tabeli zamieszczonej w punkcie 5.4.2,

- wnioski.

5.5. ZAGADNIENIA KONTROLNE

- opisać proces rozciągania próbki z zaznaczeniem charakterystycznych punktów na wykresie rozciągania,
- stałe materiałowe uzyskiwane podczas próby rozciągania,
- graficzna prezentacja rozkładu energii sprężystej i plastycznej.

Literatura

1. BRZOSKA Z.: Wytrzymałość materiałów. Warszawa: PWN 1974 s. 22-28
2. KATARZYŃSKI S., KOCANĀDA S., ZAKRZEWSKI M.: Badanie własności mechanicznych metali. Warszawa: WNT 1967 s. 91-218
3. BJORCK A., DAHLGUIST G.: Metody numeryczne. Warszawa: PWN 1987 s. 14
4. PN-91/H-04310. Próba statyczna rozciągania metali