

ĆWICZENIE 2

Własności wytrzymałościowe i plastyczne materiałów inżynierskich

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z charakterem przebiegów zależności naprężenia od odkształcenia podczas badania jednoosiowego rozciągania 3 różnych typów materiałów: metali, ceramiki i polimeru. Studenci oznaczają parametry wytrzymałościowe wybranych metali. Dodatkowo studenci oznaczają twardość wybranych metali przy użyciu metody Brinella. Celem ćwiczenia jest wyjaśnienie zależności pomiędzy siłami działającymi na ciało odkształcalne a zjawiskami zachodzącymi w jego sieci krystalicznej odpowiedzialnymi za jego odkształcenie.

Podstawowa klasyfikacja materiałów opiera się na występujących w nich rodzajach wiązań:

1. metale i stopy metali – wiązanie metaliczne (silne),
2. ceramika - wiązanie kowalencyjne lub jonowe (bardzo silne),
3. polimery - wiązanie kowalencyjne w obrębie makrocząsteczek (bardzo silne) i siły Van der Waalsa i wodorowe jako połączenie między makrocząsteczkami (łańcuchami) (słabe).

Wielkości charakteryzujące własności wytrzymałościowe i plastyczne materiałów można wyznaczyć na podstawie statycznej próby rozciągania. Wyniki przedstawia się w postaci wykresu jako zależność naprężenia do wydłużenia lub odkształcenia względnego. Naprężenie definiowane jest jako iloraz siły i przekroju próbki.

$$\sigma = \frac{N}{A} \left(\frac{N}{m^2} = Pa \right)$$

N – siła normalna (rozciągająca) do powierzchni (N),

A – pole powierzchni przekroju próbki (m^2).

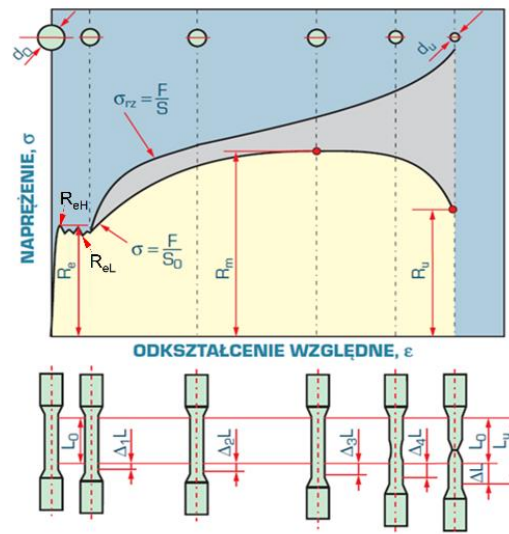
Względne odkształcenie wzdłużne przy rozciąganiu, ε_n , definiuje się jako:

$$\varepsilon_n = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

l_0 i l oznaczają długość próbki przed i po przyłożeniu obciążenia.

Metale i stopy metali

Na rysunku poniżej przedstawiono wykres rozciągania stali wykazującej górną i dolną granicę plastyczności.



Rys. 1. Krzywa rozciągania stali niskowęglowej wykazującej górną i dolną granicę plastyczności.

W pierwszej fazie sprężystego odkształcenia metalu, występuje liniowa zależność pomiędzy naprężeniem i odkształceniem. W tym zakresie obowiązuje prawo Hooke'a:

$$\sigma = E \epsilon_n,$$

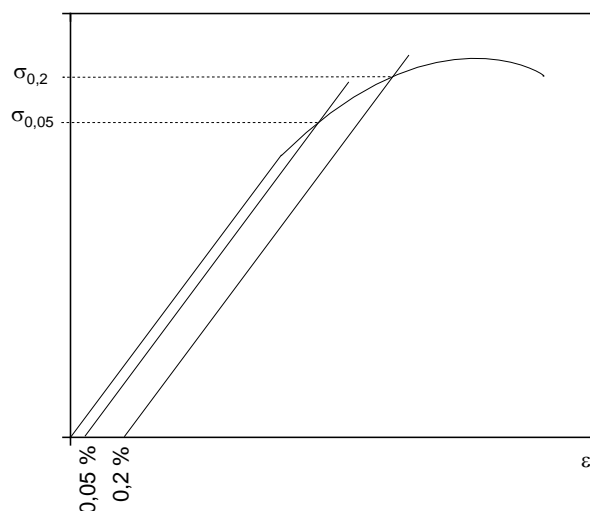
gdzie E – moduł sprężystości wzdłużnej (moduł Younga). Podczas odkształcenia sprężystego występuje wychylenie atomów z ich pozycji równowagowych bez rozrywania wiązań międzyatomowych. Punkt R_e określa granicę plastyczności. Powyżej naprężenia R_e metal zaczyna odkształcać się plastycznie. Stale niskowęglowe wykazują często wyraźną granicę plastyczności. Wyraźną granicą plastyczności R_e jest naprężenie rozciągające w próbce, po osiągnięciu którego następuje wyraźny wzrost rozciąganej próbki bez wzrostu obciążenia. Jeżeli podczas rozciągania stali w okolicy granicy plastyczności występuje oscylacja naprężenia, to świadczy to o występowaniu górnej i dolnej granicy plastyczności, R_{eH} i R_{eL} (Rys. 1). Górną granicę plastyczności jest to naprężenie rozciągające, odpowiadające pierwszemu

szczytowi obciążenia siłą rozciągającą, po której następuje jej spadek. Dolna granica plastyczności jest to naprężenie rozciągające odpowiadające najmniejszej wartości siły rozciągającej, po której następuje jej ciągły wzrost. Opisywane i pokazane na rysunku Rys. 1 zachowanie stali wynika z obecności atomów międzywęzłowych węgla i azotu, które tworzą skupiska wokół dyslokacji i utrudniają ich poślizg. Przy naprężeniach R_{eH} obserwuje się znaczny poślizg dyslokacji. Dalsze odkształcenie zachodzi przy mniejszych naprężeniach R_{eL} ponieważ zainicjowane przy R_{eH} dyslokacje tworzą na napotkanych przeszkodach spiętrzenia, co prowadzi do wytworzenia dodatkowych naprężeń, ułatwiających pokonywanie przeszkód przez dyslokacje.

Punkt na wykresie opisany jako R_m oznacza wytrzymałość na rozciąganie, definiowaną jako naprężenie normalne w próbce obliczone jako stosunek największej siły rozciągającej F_m do pola powierzchni przekroju początkowego próbki. Wzrost naprężeń w zakresie R_m jest rezultatem wzrostu gęstości dyslokacji. Do wystąpienia obciążenia maksymalnego R_m próbka odkształca się równomiernie na całej długości, przy obciążeniu maksymalnym pojawia się przewężenie zwane szyjką. Dalsze odkształcenia próbki zachodzą w obszarze szyjki. R_u określa punkt, w którym następuje zerwanie próbki metalicznej.

Wraz ze wzrostem odkształcenia próbki maleje jej pole przekroju poprzecznego dlatego naprężenie rzeczywiste jest większe od naprężenia nominalnego. Różnica pomiędzy σ_r a σ_n wzrasta wraz ze wzrostem odkształcenia, Rys. 1.

Często wyznacza się granicę sprężystości $R_{p0,05}$ i umowną granicę plastyczności $R_{p0,2}$. Granica sprężystości związana jest z pojawieniem się odkształceń trwałych. Przyjęto, że materiał ma wartości sprężyste do umownej granicy sprężystości ($R_{0,05}$), którą zdefiniowano jako wartość naprężeń rozciągających które wywołują odkształcenia trwałe wynoszące 0,05% pierwotnej długości próbki (rys. 2). Umowną granicę plastyczności wyznacza się tylko dla materiałów nie mających wyraźnej granicy plastyczności, jak np. stal wysokowęglowa i żeliwo. Jest to naprężenie rozciągające wywołujące w próbce odkształcenie trwałe równe 0,2% pierwotnej długości próbki. Sposób wyznaczania granicy sprężystości i umownej granicy plastyczności pokazano na Rys. 2.



Rys. 2. Sposób wyznaczania granicy sprężystości i umownej granicy plastyczności.

Umowna granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie są miarami wytrzymałości materiału, z kolei wydłużenie procentowe po rozerwaniu i przewężenie procentowe po rozerwaniu są miarami plastyczności.

Wydłużenie procentowe po rozerwaniu:

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} 100\%,$$

gdzie l_u długość po rozerwaniu.

Przewężenie procentowe po rozerwaniu:

$$Z = \frac{S_o - S_u}{S_o} 100\%,$$

gdzie S_u pole najmniejszego przekroju próbki po rozerwaniu.

Do obliczeń wytrzymałościowych przyjmuje się dopuszczalne naprężenia ze wzoru:

$$k_r = \frac{R_{eH}}{x_w},$$

gdzie:

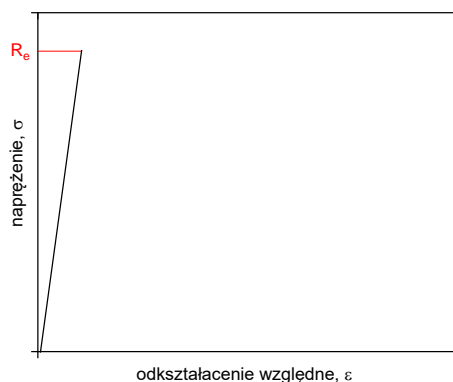
k_r – naprężenia dopuszczalne na rozciąganie,

x_w – współczynnik bezpieczeństwa.

Materiały ceramiczne

Ceramika to materiały niemetaliczne i nieorganiczne, które można klasyfikować na wiele różnych sposobów. Ogólnie można wyróżnić ceramikę tradycyjną (krzemianową - porcelana, wyroby budowlane) i inżynierską. Ze względu na zastosowanie ceramikę inżynierską funkcjonalną i konstrukcyjną. Ze względu na skład chemiczny ceramikę inżynierską można podzielić na tlenkową (Al_2O_3 , ZrO_2 , BeO , materiały glinokrzemianowe (porcelana techniczna) i beztlenkową (węgliki, azotki, borki, diament, grafit). Ze względu na strukturę, materiały ceramiczne dzielą się na amorficzne, do których zaliczane jest szkło oraz krystaliczne, do których zaliczane są pozostałe materiały ceramiczne. Ze względu na rodzaj wiązań wyróżnia się ceramikę o wiązaniach jonowych (związki metalu z niemetalem) i kowalencyjnych (czyste pierwiastki tj. diament, grafit, krzem oraz związki dwóch niemetałów np. SiC).

Materiały ceramiczne wykazują wysoką wartość modułu Younga, co wynika z dużej sztywności wiązań jonowych i kowalencyjnych. Tworzywa ceramiczne należą do materiałów kruchych i pod wpływem działającego obciążenia ulegają zniszczeniu bez odkształceń plastycznych. Podczas pęknięcia ceramiki największe naprężenia występują na wierzchołku pęknięcia. Na rysunku poniżej przedstawiono wykres rozciągania ceramiki.



Rys. 3. Krzywa rozciągania materiałów ceramicznych.

Polimery

Ze względu na właściwości użytkowe polimery dzielą się na plastomery i elastomery. Plastomery to polimery charakteryzujące się wydłużeniem przy rozerwaniu zwykle nieprzekraczającym 200% i dzielą się na:
polimery termoplastyczne (termoplasty),

polimery utwardzalne (duroplasty).

Elastomery to polimery cechujące się skłonnością do dużych odkształceń sprężystych (po poddaniu dużemu odkształceniu i odciążeniu praktycznie powracają do pierwotnej postaci).

Polimery zbudowane są z długich cząstek składających się z monomerów połączonych w łańcuchy główne za pomocą wiązań kowalencyjnych. Ze względu na topologię wyróżnia się trzy główne typy polimerów:

1) polimery liniowe – w których łańcuchy główne są proste i nie mają żadnych rozgałęzień, np. wysokociśnieniowy polietylen lub teflon

2) polimery rozgałęzione – w których łańcuchy główne są rozgałęzione. Wyróżnia się tutaj:

2a) polimery bocznołańcuchowe – w których krótkie, boczne łańcuchy są regularnie lub nieregularnie rozmieszczone wzdłuż głównego łańcucha

2b) polimery rozgałęzione wielokrotnie (ang. hyperbranched) – w których występuje wiele wielokrotnych rozgałęzień i nie da się wyróżnić głównego łańcucha

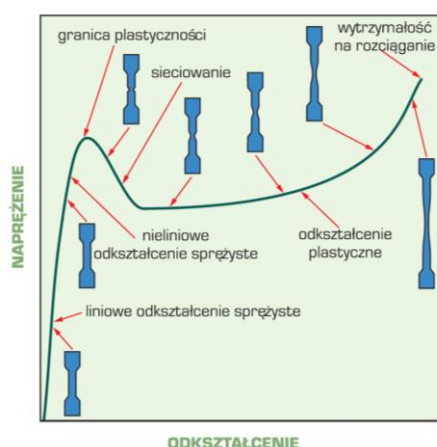
3) polimery usieciowane – tworzące przestrzenną ciągłą sieć, w których nie da się wyróżnić pojedynczych cząsteczek. Polimery usieciowane dzielą się na wysokiej i niskiej gęstości usieciowania.

W polimerach liniowych i rozgałęzionych łańcuchy połączone są między sobą za pomocą słabszych wiązań międzycząsteczkowych, takich jak siły van der Waalsa oraz wiązania wodorowe. W polimerach usieciowanych między łańcuchami występują wiązania poprzeczne o charakterze kowalencyjnym. Ze względu na rodzaj wiązań występujących między łańcuchami polimery usieciowane wykazują znacznie mniejszą podatność na odkształcenia niż polimery liniowe i rozgałęzione.

Polimery mogą występować w dwóch postaciach amorficznej i częściowo krystalicznej. Polimery amorficzne nie tworzą żadnej struktury uporządkowanej. Polimery częściowo krystaliczne w pewnych określonych warunkach mają możliwość do tworzenia struktur krystalicznych. Te pierwsze są najczęściej przezroczyste, te drugie mętne lub nieprzezroczyste. Częściowe uporządkowanie łańcuchów (krystaliczność), występuje jedynie w polimerach liniowych bez rozgałęzień, np. w polietylenie (PE), polipropylenie (PP). Lepsze upakowanie łańcuchów w przestrzeni i silne zbliżenie makrocząsteczek wywołuje powstanie silniejszych wiązań pomiędzy łańcuchami. Skutkiem jest lepsza wytrzymałość, sztywność i wyższa temperatura mięknięcia (odporność cieplna).

Polimery amorficzne mogą znajdować się w jednym z czterech stanów fizycznych, które zależą od temperatury i czasu obciążenia: szklistym, lepkosprężystym, wysokoelastycznym i plastycznym (ciekłym).

Dobrym reprezentantem grupy polimerów jest polietylen (PE) należący do polimerów liniowych, częściowo krystalicznych i termoplastycznych. Na poniżej pokazano schemat krzywej rozciągania typowego materiału polimerowego termoplastycznego.



Rys. 4. Krzywa rozciągania typowego materiału polimerowego termoplastycznego.

W początkowym zakresie obciążeń podobnie jak w przypadku metali i materiałów ceramicznych, występuje odkształcenie sprężyste. Jest to związane ze sprężystym odkształceniem wiązań kowalencyjnych. Odkształcenie plastyczne następuje po przekroczeniu granicy plastyczności, lecz nie jest związane z poślizgiem dyslokacji jak w przypadku stopów metali, lecz z rozciąganiem, rozkręcaniem, przemieszczaniem i wyprostowywaniem łańcuchów polimerowych pod wpływem przyłożonego obciążenia. Pomędzy bliżej ułożonymi łańcuchami występują silniejsze wiązania Van der Waalsa i aby bardziej odkształcić próbkę należy użyć większych sił rozciągających.

Moduł Younga różnych materiałów

Material	Moduł Younga
Diament	1100 GPa
Weglik wolframu	450 – 650 GPa
Al ₂ O ₃	390 GPa
Stal	190 – 210 GPa
Elastomery	0.1-10 MPa
Plastomery	1000-2000 MPa

Oznaczanie twardości materiałów

Twardość jest miarą odporności materiału na odkształcenia plastyczne, zależy od oporu jaki stawia sieć krystaliczna przemieszczającym się dyslokacjom. Metale są materiałami

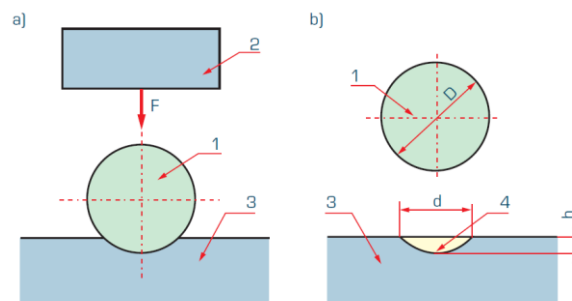
plastycznymi, ponieważ opór stawiany dyslokacjom przez niezlokalizowane wiązania metaliczne jest stosunkowo mały. Tworzywa ceramiczne takie jak korund Al_2O_3 czy diament są materiałami kruchymi, ponieważ wiązania kowalencyjne stawiają duży opór przemieszczającym się dyslokacjom. W materiałach ceramicznych odkształcenie plastyczne przez ruch dyslokacji jest niemożliwe.

Metody statyczne pomiaru twardości polegają na wciskaniu wgłębnika w badany materiał poza granicę sprężystości, co prowadzi do występowania odkształceń trwałych.

Do najczęściej stosowanych w technice należą metody:

- Brinella,
- Vickersa,
- Knoopa,
- Chruszczowa–Bierkowicza,
- Grodzińskiego,
- Rockwella.

Podczas ćwiczeń wykonywany będzie pomiar twardości miedzi i mosiądzu przy użyciu metody Brinella. Metoda ta polega na wciskaniu w badany materiał kulki ze stali hartowanej. Schemat pomiaru przedstawiono poniżej.



a) podczas obciążenia, b) po obciążeniu.

- 1-kulka
- 2-element obciążający
- 3-badany materiał
- 4-odcisk

Twardość według metody Brinella w jednostkach bezwymiarowych HB wynosi:

$$HB = \frac{0,204F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Zależność między twardością wyznaczoną z metody Brinella i wytrzymałością metali opracowano R_m można wyznaczyć z poniższego wzoru:

$$R_m \text{ (MPa)} = 3,55 \times \text{HB, dla HB} \leq 175 \text{ lub}$$

$$R_m \text{ (MPa)} = 3,38 \times \text{HB, dla HB} > 175.$$

Wykonanie ćwiczenia:

1. Umieścić próbkę w szczękach maszyny wytrzymałościowej i wyzerować zegar mierzący wydłużenie Δl .
3. Rozciągać próbkę do zerwania, rejestrując obciążenie co 1kN i wydłużenie próbki.
4. Złożyć próbkę po rozerwaniu i zmierzyć długość odcinka pomiarowego (l_u) i średnicę w miejscu przewężenia (S_u).
5. Wykonać test twardości wybranej próbki przy użyciu metody Brinella za pomocą kulki stalowej o średnicy 10 mm powoli zwiększając ciśnienie do 10 kN i utrzymując obciążenie przez 15 sekund. Zmierzyć średnicę zagłębienia przy użyciu suwmiarki i lupy.

Opracowanie wyników

Dla testowanych próbek wyznaczyć: moduł Younga E , granicę plastyczności R_e (umowną granicę plastyczności $R_{p0,2}$), wytrzymałość na rozciąganie R_m , wydłużenie procentowe po rozerwaniu A i przewężenie procentowe po rozerwaniu Z . Oznaczyć twardość dla wybranej próbki na podstawie testu oznaczania twardości.

Pytania na kolokwium:

1. Co jest celem ćwiczenia?
2. Definicje naprężenia i odkształcenia.
3. Narysować i opisać krzywą rozciągania stali niskowęglowej wykazującej górną i dolną granicę plastyczności, zdefiniować zakresy odkształcenia.
4. Opisać zjawiska zachodzące w stali niskowęglowej odpowiedzialne za jej odkształcenie podczas badania jednoosiowego rozciągania.
5. Wyjaśnić dlaczego naprężenie rzeczywiste dla metali jest większe od naprężenia nominalnego.
6. Przedstawić podział materiałów ceramicznych.
7. Narysować i opisać krzywą rozciągania materiału ceramicznego.
8. Przedstawić podział materiałów polimerowych.

9. Narysować i opisać krzywą rozciągania typowego materiału polimerowego termoplastycznego.
10. Opisać metodę Brinella oznaczania twardości materiałów.

Literatura:

<https://www.e-plastics.eu/aktualnosci/tworzywa-krystaliczne-i-amorficzne--roznice-i-wlasciwosci,112>

<https://mech.pg.edu.pl/documents/174709/18148043/2-Materialy-polimerowe-1-Instrukcja.pdf>

<https://www.e-plastics.eu/aktualnosci/tworzywa-krystaliczne-i-amorficzne--roznice-i-wlasciwosci,112>

<https://www.yumpu.com/xx/document/read/31476897/3-polimery-amorficzne>

<https://mech.pg.edu.pl/documents/174709/18148043/2-Materialy-polimerowe-1-Instrukcja.pdf>

<http://home.agh.edu.pl/~ziam/pliki/3LAB.pdf>