

Wykład 4



Henryk Adrian

opracowanie na podstawie

M.Blicharski: Wstęp do inżynierii materiałowej

Własności mechaniczne

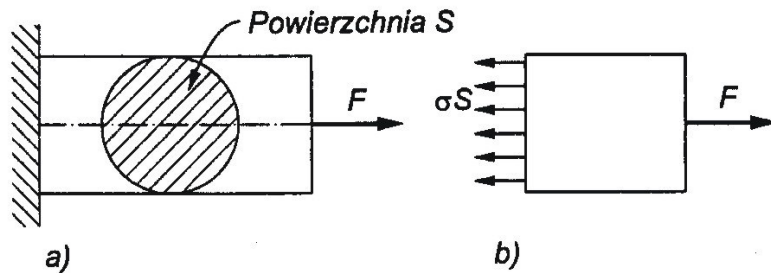


- ⌘ Znajomość reakcji materiału na obciążenie mechaniczne jest ważna, gdyż umożliwia takie projektowanie konstrukcji, by obciążenia eksploatacyjne nie powodowały trwałych odkształceń
- ⌘ Gdy materiały są obrabiane plastycznie – umożliwia prawidłowe zaprojektowanie urządzeń do obróbki plastycznej

Naprężenie i odkształcenie

⌘ Naprężenie

$$\sigma = F/S$$



- ◆ Jednostka naprężenia $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$
 - $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$

Naprężenie i odkształcenie

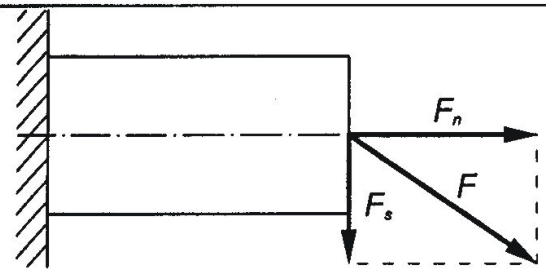
⌘ Naprężenie rozciągające – siła prostopadła do płaszczyzny przekroju

$$\sigma = F_n / S$$

⌘ Naprężenie styczne

$$\tau = F_s / S$$

5.1. Naprężenie i odkształcenie



Odształcenie



⌘ Nominalne odkształcenie liniowe

$$\boxed{\wedge} \varepsilon_n = \Delta l / l_0 = (l - l_0) / l_0$$

⌘ Odkształcenie poprzeczne

$$\boxed{\wedge} \varepsilon_p = -\Delta a / a_0 = (a - a_0) / a_0$$

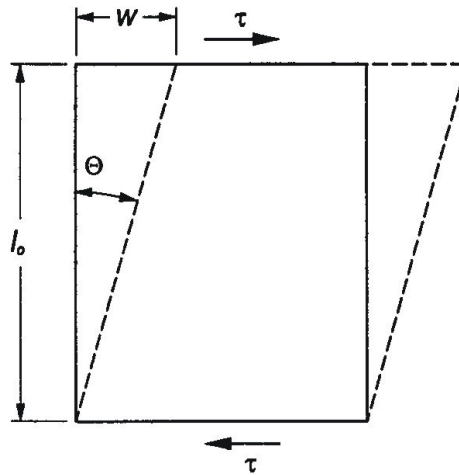
⌘ Liczba Poissona

$$\boxed{\wedge} \nu = -\varepsilon_p / \varepsilon_n$$

Odkształcenie

⌘ Odkształcenie postaciowe

☐ $\gamma = w/l_0 = \text{tg } \theta$



Odkształcenie rzeczywiste

⌘ Wyraża wzór:

$$\varepsilon_r = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

Moduły sprężystości

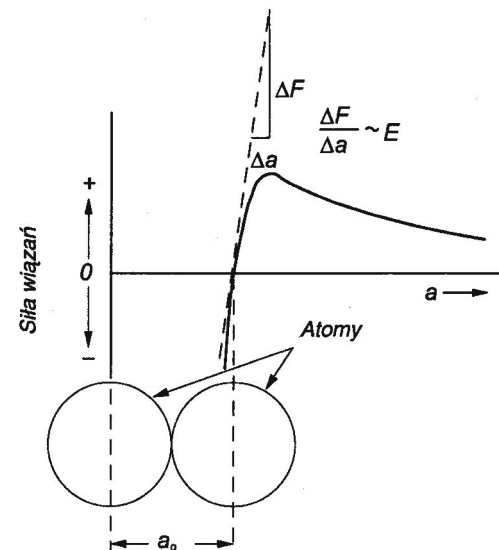
⌘ Prawo Hooke'a

⊞ $\sigma = E\varepsilon$

⊞ E-moduł Younga lub wsp. sprężystości wzdłużnej

⌘ Taka sama zależność w przypadku ściskania

⌘ E jest proporcjonalny do pochylenia krzywej zależności siły wiązania od odległości między atomami w punkcie równowagi



Moduł E

⌘ Wartości E i temperatury topnienia

Zależność pomiędzy modułem Younga i temperaturą topnienia metali

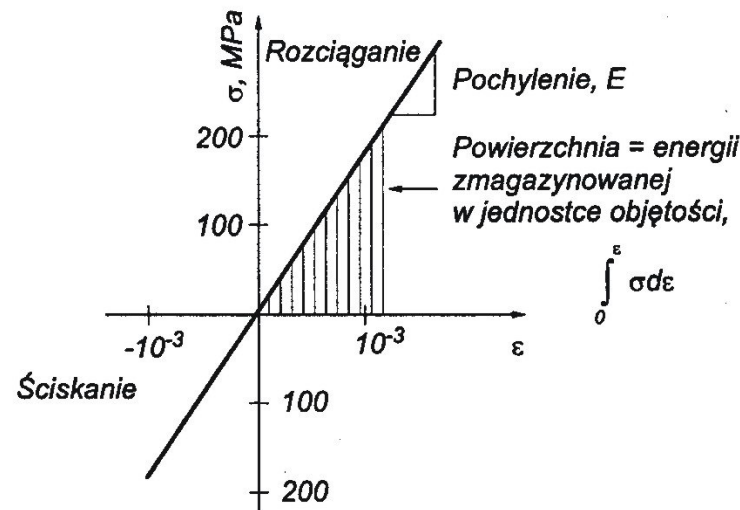
Metal	Temperatura topnienia, °C	Moduł Younga, GPa
Pb	327	14
Mg	650	45
Al	660	69
Ag	962	76
Au	1064	78
Cu	1083	125
Ni	1453	206
Fe	1538	207
Mo	2610	325
W	3410	403

Moduły sprężystości

- ⌘ Moduły sprężystości i temperatury topnienia rosną ze wzrostem sił wiązań
- ⌘ $\tau = G\gamma$
- ⌘ G – moduł Kirchoffa lub wsp. sprężystości poprzecznej
- ⌘ Dla większości metali $G \sim (3/8)E$, $\nu = 0,33$

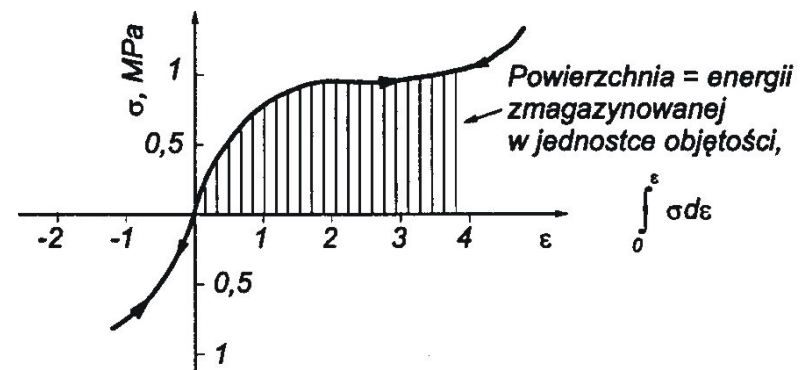
Odształcenie sprężyste

- ⌘ Przy zachowaniu sprężystym materiału odkształcenie ma charakter przemijający – zanika po zdjęciu obciążenia
- ⌘ Takie odwracalne odkształcenie nazywamy sprężystym



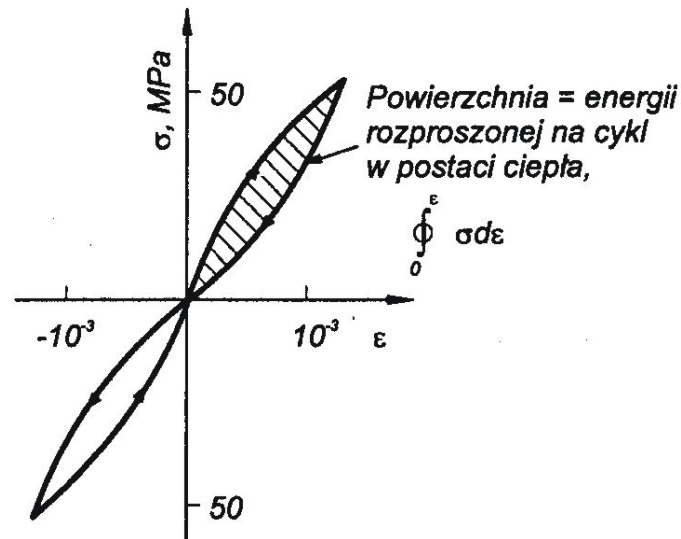
Duże odkształcenie sprężyste

- ⌘ Wykres zależności naprężenia od odkształcenia materiałów charakteryzujących się bardzo dużymi odkształceniami sprężystymi
- ⌘ Takie własności wykazuje np. guma



Okształcenie anelastyczne

- ⌘ Krzywa obciążenia nie pokrywa się dokładnie z krzywą odciążenia – rozpraszanie energii
- ⌘ Materiały o dużym anelastycznym zachowaniu są korzystne w tłumieniu drgań lub w wygłuszaniu hałasu



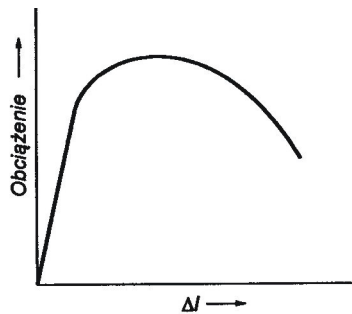
Statyczna próba rozciągania



- ⌘ Umożliwia określenie podstawowych charakterystyk wytrzymałościowych i plastycznych
- ⌘ Sprzęt do jej realizacji: maszyna wytrzymałościowa, umożliwiająca rejestrację zmiany długości pomiarowej próbki (Δl) i siły (F)
- ⌘ Wymiary próbek, definicje parametrów są znormalizowane
- ⌘ Próbki stosowane w próbie rozciągania nazywamy próbkami wytrzymałościowymi

Statyczna próba rozciągania

- ⌘ Bezpośredni wynik próby rozciągania – wykres F w funkcji Δl
- ⌘ Dla materiału plastycznego – przykład wykresu



- ◆ Dla lepszego scharakteryzowania materiału normalizuje się wykres próby ze względu na wymiary próbki

Statyczna próba rozciągania

- ⌘ Normalizacja polega na tym, że obciążenie F zastępuje się naprężeniem nominalnym σ_n

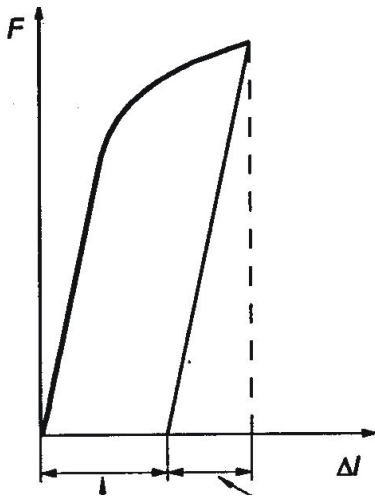
$$\sigma_n = \frac{F}{S_o}$$

- ◆ Wydłużenie Δl zastępuje się wydłużeniem nominalnym ε_n

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l_o}$$

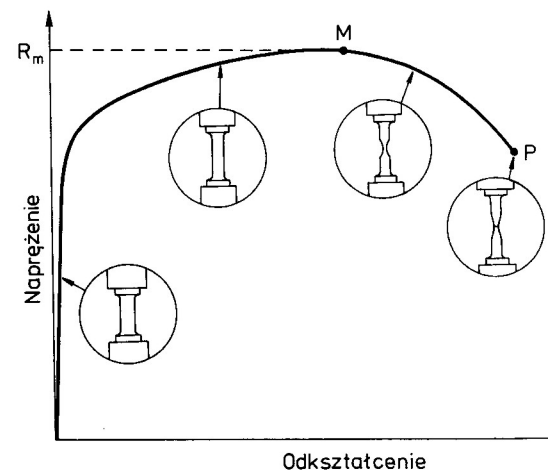
Statyczna próba rozciągania

- ⌘ Kształt krzywej σ_n - ε_n jest identyczny F- Δ
- ⌘ Wykresy σ_n - ε_n pozwalają na porównywanie danych próbek mających różne, choć znormalizowane wymiary
- ⌘ Początkowo próbka rozciąga się sprężysto, później plastycznie (trwale). Jeśli usuniemy naprężenie to próbka będzie dłuższa



Statyczna próba rozciągania

- ⌘ Do obciążenia maksymalnego zmniejszenie przekroju jest równomierne na całej długości
- ⌘ Przy obciążeniu maksymalnym zaczyna tworzyć się przewężenie (szyjka)
- ⌘ Następnie zachodzi szybkie zmniejszanie przekroju w szyjce i spadek siły, aż do zerwania
- ⌘ Po utworzeniu szyjki odkształcenie następuje jedynie w jej obszarze



Statyczna próba rozciągania

⌘ Parametry określone w próbie rozciągania

☒ Umowna granica sprężystości $R_{0.05} = F_{0.05}/S_0$

☒ umowna granica plastyczności $R_{0.2} = F_{0.2}/S_0$

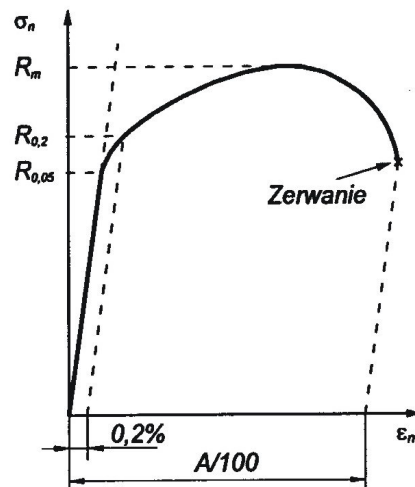
☒ Wytrzymałość na rozciąganie $R_m = F_m/S_0$

☒ Wydłużenie względne $A = (l_u - l_0)/l_0$

☒ przewężenie względne $Z = (S_0 - S_u)/S_0$

Statyczna próba rozciągania

- ⌘ $R_{0.2}$ i R_m - miary wytrzymałości materiału
- ⌘ A , Z - miary ciągliwości



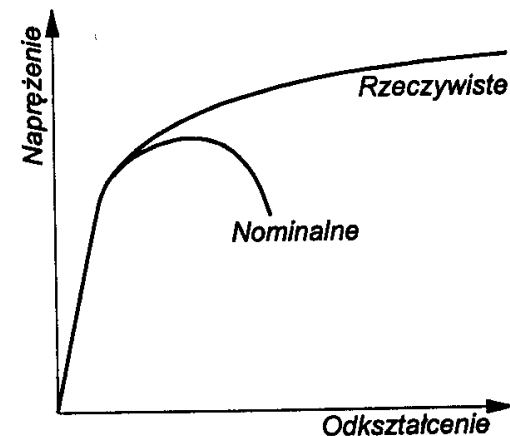
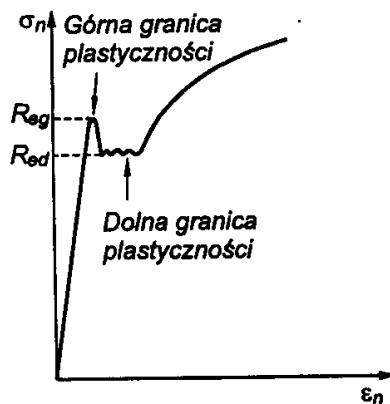
Statyczna próba rozciągania



- ⌘ Ze wzrostem temperatury własności wytrzymałościowe maleją, A i Z - rosną
- ⌘ Wykorzystuje się to podczas przeróbki plastycznej metali - na gorąco

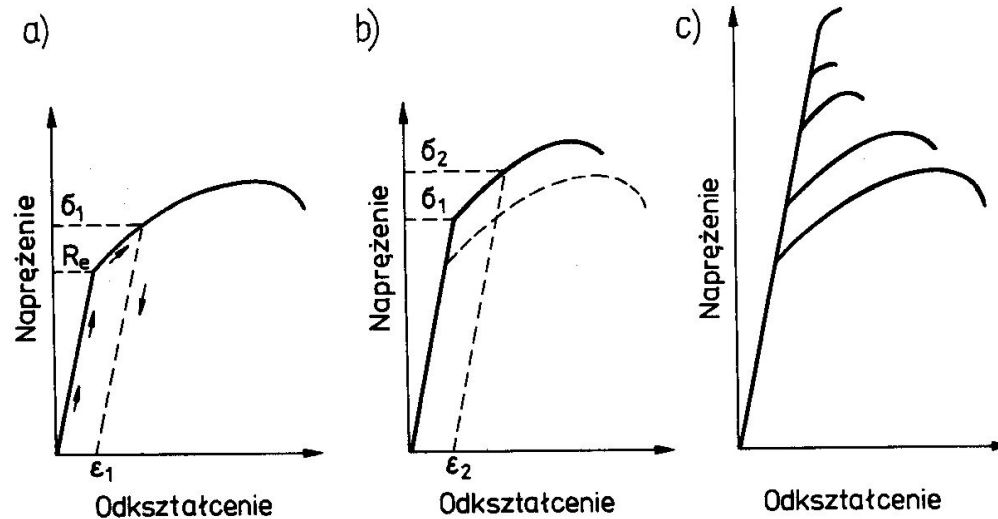
Wyraźna granica plastyczności

- ⌘ W stalach niskowęglowych występuje wyraźna granica plastyczności
- ⌘ przyczyna: atomy C i N tworzą skupiska wokół dyslokacji utrudniające ich poślizg
- ⌘ W ocenie materiałów korzysta się z dolnej granicy plastyczności
- ⌘ Powyżej R_m naprężenia rzeczywiste rosną aż do zerwania próbki
- ⌘ Wzrost naprężeń jest rezultatem wzrostu gęstości dyslokacji i jest nazywany **umocnieniem odkształceniowym**



umocnienie odkształceniowe

- ⌘ Przykładanie coraz większych obciążeń z następnym odciążaniem powoduje wzrost granicy plastyczności i spadek wydłużenia przy następnym obciążeniu



Twardość

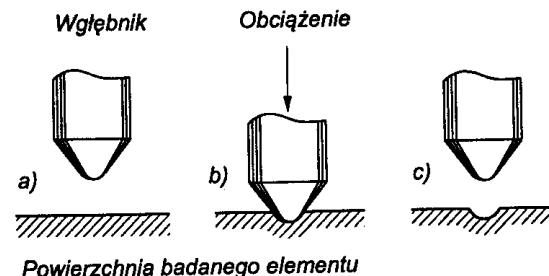
⌘ Twardość - opór materiału przeciw wciskaniu wgłębnika

⌘ Metody:

☒ statyczne: Brinella, Vickersa, Rockwella

☒ dynamiczne (Shore'a, młotek Poldi)

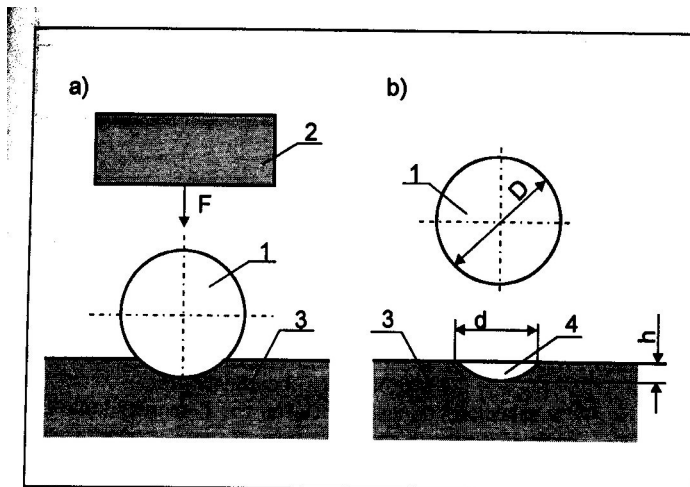
⌘ Schemat pomiaru:



Metoda Brinella

⌘ Sposób pomiaru

☐ $HB = F/S$



Metoda Brinella



⌘ $F=KD^2$

⌘ $D=10, 5, 2.5, 2, 1 \text{ mm}$

⊞ $K=30 \text{ (HB=96-650)}$

⊞ $K=15 \text{ (50-325HB)}$

⊞ $K=10 \text{ (32-200HB)}$

⊞ $K=5 \text{ (16-100HB)}$

⊞ $K=2.5 \text{ (8-50HB)}$

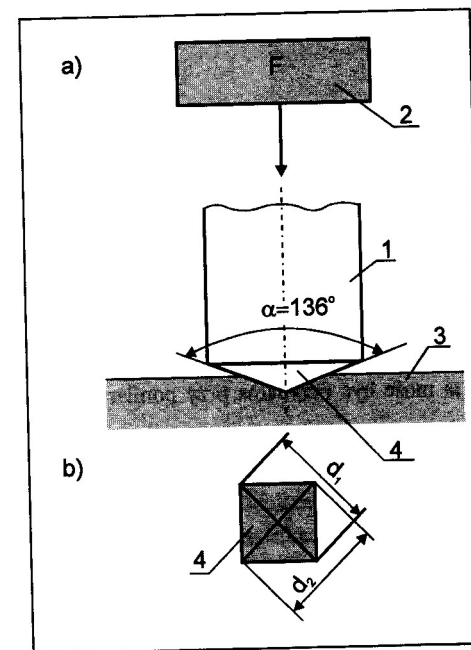
⌘ Średnica odcisku: $0.25D < d < 0.6D$

⌘ Zakres: 450HB (kulka stalowa), 650HB (węgliki spiekane)

Metoda Vickersa

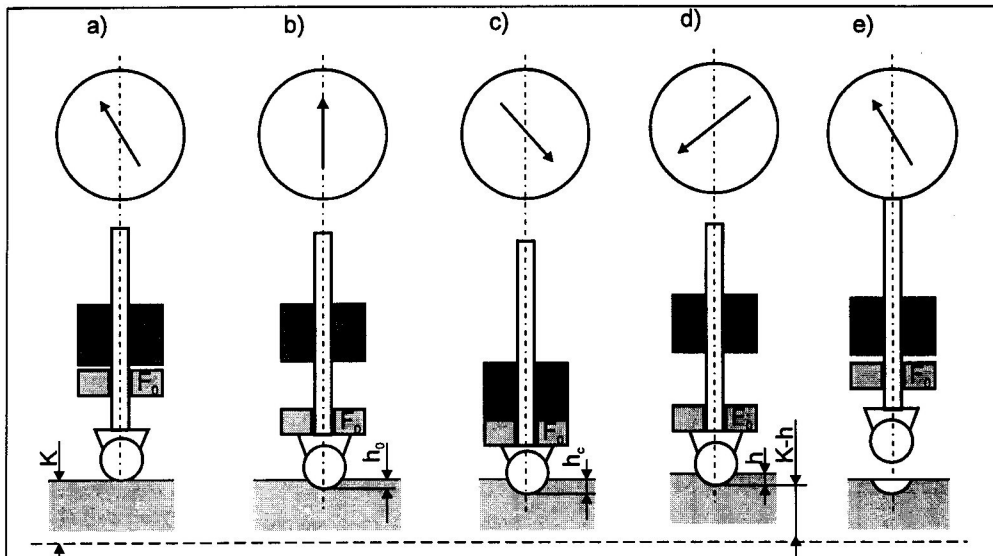
⌘ Sposób pomiaru

$$\text{HV} = F/S = 1854.4 \cdot F/d^2$$



Metoda Rockwella

- ⌘ Kulka stalowa, $F=100\text{kG}$, $\text{HRB}=130-h/0.002$
- ⌘ Stożek diamentowy, $F=150\text{kG}$, $\text{HRC}=100-h/0.002$



Młotek Poldi

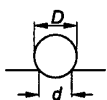

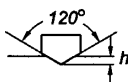

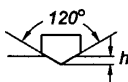

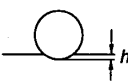

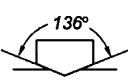



$$\text{⌘} HB_p = k \cdot HB_w$$

Twardość

metody oceny - szczegóły

Podstawowe metody pomiaru twardości

Metoda	Wgłębnik	Kształt odcisku		Obciążenie*	Wzór do obliczenia liczby twardości**
		Widok z boku	Widok z góry		
1	2	3	4	5	6
Brinella	Kulka stalowa lub z węgla wolframu o średnicy 10; 5; 2,5; lub 1 mm			F	$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Rockwella					
A	stożek diamentowy			60 kG	HRA = 100 - 500h
C	stożek diamentowy			150 kG	HRC = 100 - 500h
B	kulka stalowa 1/16 cala			100 kG	HRB = 130 - 500h
Vickersa	Piramida diamentowa			F	$HV = \frac{1,8544F}{a^2}$

* Obciążenie jest podawane w kG siły; 1 kG ≈ 9.81 N.

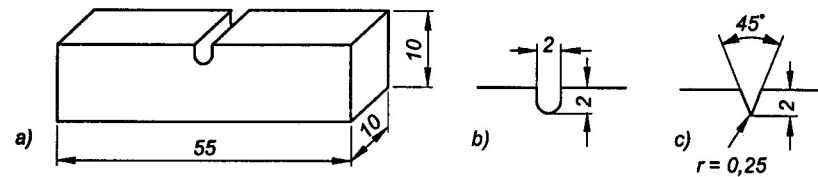
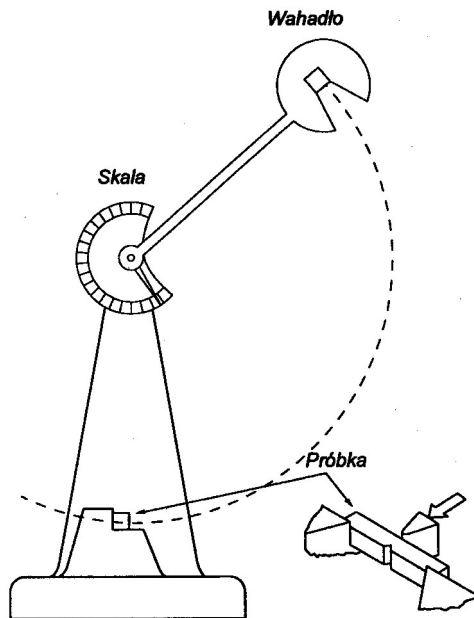
** Występującą we wzorach wielkość odcisków należy podawać w mm.

Udarność

⌘ Dynamiczne zginanie próbki z karbem

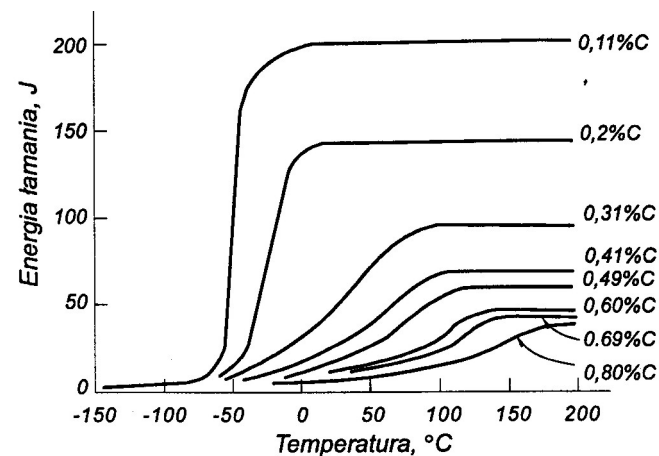
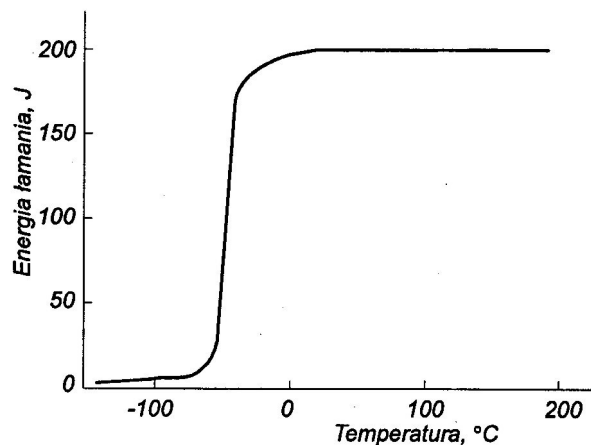
☑ próbki Charpy V

☑ Próbki Mesnagera U



Udarność

- ⌘ Stopy o strukturze RSC mają ciągły przełom niezależnie od T
- ⌘ Stopy o strukturze HZ są kruche
- ⌘ Stopy o strukturze RPC charakteryzują się dużą zależnością mechanizmu pęknięcia od T
- ⌘ Temperatura przejścia od przełomu plastycznego do kruchego zależy od składu chemicznego i od wielkości ziarna



Odporność na pękanie



⌘ pękanie plastyczne

⌘ pękanie kruche

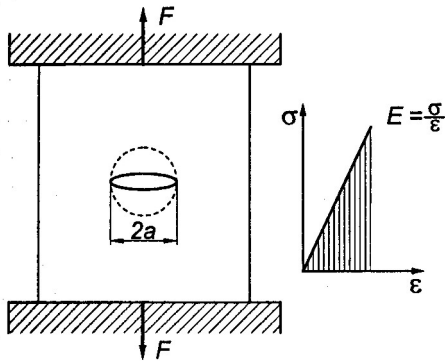
⏏ K_{IC}

Odporność na pękanie

- ⌘ Można wyróżnić dwa skrajne przypadki zniszczenia materiałów pod wpływem naprężeń rozciągających
 - ☒ **Materiały bardzo plastyczne** – przewężają się do pojedynczych atomów. Odkształcenie plastyczne prowadzi do absorpcji dużej ilości energii. Powierzchnia przełomu rozbudowana
 - ☒ **Materiały kruche** – pękają bez odkształcenia plastycznego. Mała ilość zaabsorbowanej energii, powierzchnia przełomu – gładka
 - ☒ W dużych konstrukcjach spawanych nieodpowiedni sposób spawania prowadzi do powstawania pęknięć, rozprzestrzeniających się z szybkością dźwięku

Liniowo sprężysta mechanika pękania

- ⌘ Ilość energii sprężystej na jednostkę objętości płyty wynosi $0.5\sigma.\varepsilon = \sigma^2/(2E)$
- ⌘ Ilość uwalnianej energii sprężystej na jednostkę objętości płyty wynosi $\pi.a^2\sigma^2/E$



Liniowo sprężysta mechanika pękania

- ⌘ Z tworzeniem pęknięcia związane jest tworzenie powierzchni swobodnej oraz odkształcanie się materiału w pobliżu pęknięcia. Wartość zaabsorbowanej energii wynosi $2aG_c$
- ⌘ $U-U_0 = 2aG_c - \pi a^2 \sigma^2 / E$

Liniowo sprężysta mechanika pęknięcia

⌘ Pęknięcie o wielkości krytycznej gdy:

⌘ $dU/da = 2G_c - 2\pi a \sigma^2 / E = 0$

⌘ Stąd: $G_c = \pi a \sigma^2 / E$

⌘ Dalej:

$$\sigma \sqrt{\pi a} = \sqrt{E G_c}$$

G_c – suma energii powierzchniowej powstającego pęknięcia i energii odkształcenia plastycznego na jednostkę powierzchni pęknięcia

Liniowo sprężysta mechanika pękania

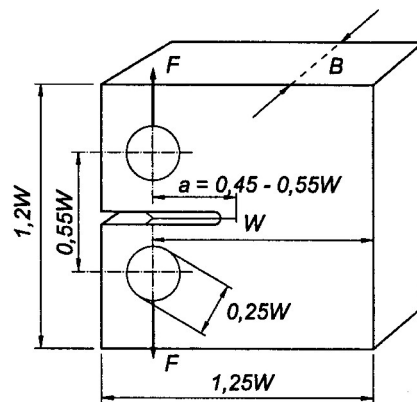
- ⌘ Z równania wynika, że szybkie rozprzestrzenianie pęknięcia wystąpi, gdy σ osiągnie wartość krytyczną, lub a
- ⌘ Prawa strona zależy tylko od własności materiału
- ⌘ Krytyczna kombinacja naprężeń i długości pęknięcia od której zacznie się szybkie rozprzestrzenianie pęknięcia jest równa stałej materiałowej

Odporność na pękanie

☒ Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń:

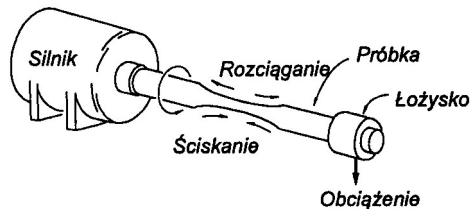
$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi a}$$

Wartość K_{IC} wyznacza się doświadczalnie na próbkach jak na rys., w warunkach płaskiego stanu naprężeń. Grubość próbki musi być $\geq 2.5(K_{IC}/R_e)^2$



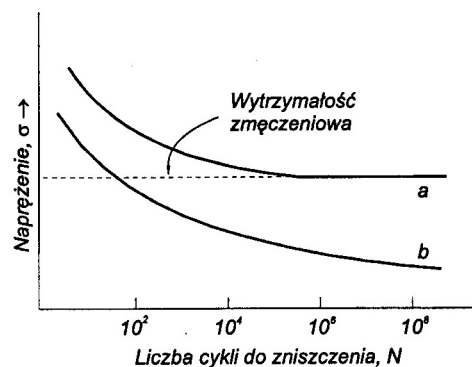
Zmęczenie

- ⌘ Pękanie materiału pod wpływem zmieniających się cyklicznie naprężeń
- ⌘ 90 % zniszczonych podczas eksploatacji ruchomych części maszyn ma charakter zmęczeniowy
- ⌘ Badanie odporności na zmęczenie prowadzi się na urządzeniu:



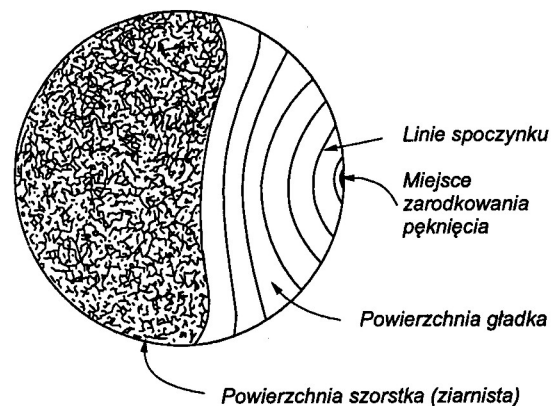
Zmęczenie

- ⌘ Wynik pojedynczego badania – liczba cykli obciążeń N do zniszczenia
- ⌘ Wyniki wielu próbek służą do określenia zależności N od σ
- ⌘ W przypadku stali, poniżej pewnej amplitudy naprężeń próbka nie ulegnie zniszczeniu – wytrzymałość zmęczeniowa



Zmęczenie

- ⌘ Pękaniu zmęczeniowemu sprzyjają koncentratory – karby, ostre podcięcia itp.
- ⌘ Zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej osiąga się przez eliminację lub ograniczenie miejsc zarodkowania pęknięć
- ⌘ Inny sposób: wprowadzenie do warstwy powierzchniowej naprężeń ściskających lub jej umocnienie



Pełzanie



- ⌘ Pełzanie - Zwiększające się z upływem czasu odkształcenie plastyczne pod wpływem stałego obciążenia
- ⌘ Temperatury, od których pełzanie staje się istotne wynoszą 0.3 do $0.5T_t$
- ⌘ Wiele polimerów ulega pełzaniu już w temperaturze otoczenia
- ⌘ Jest ono istotne w konstrukcjach eksploatowanych w wysokich temperaturach (turbiny, reaktory jądrowe, aparatura przemysłu chemicznego i petrochemicznego)

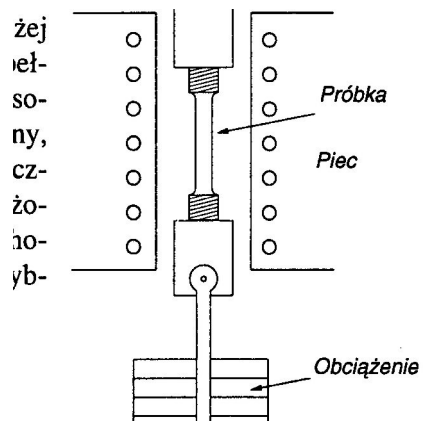
Pełzanie



- ⌘ Przy wysokich temperaturach mogą zachodzić procesy:
 - ☑ dyfuzyjna migracja atomów
 - ☑ przemieszczanie dyslokacji
 - ☑ poślizg po granicach ziarn
 - ☑ zdrowienie, rekrytalizacja i rozrost ziarn
 - ☑ koagulacja cząstek fazy umacniającej

Pełzanie

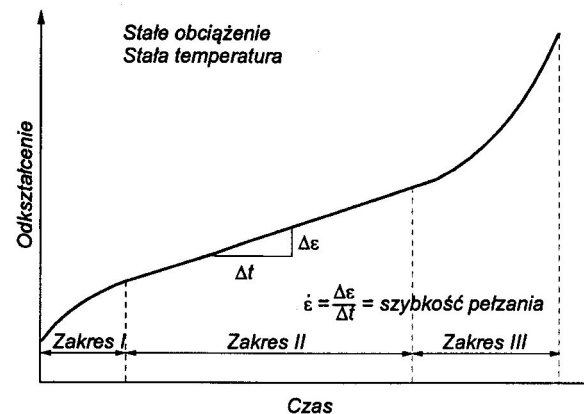
⌘ Urządzenie do próby pełzania



Pełzanie

⌘ Krzywa pełzania – 3 zakresy

- ☒ I szybki spadek szybkości odkształcenia z upływem czasu (wzrost gęstości dyslokacji) - **pełzanie nieustalone**
- ☒ II szybkość odkształcenia stała – równowaga dynamiczna między czynnikami wzmacniającymi i osłabiającymi - **pełzanie ustalone**
- ☒ III szybki wzrost szybkości odkształcenia – zmiana przekroju poprzecznego, tworzenie się szyjki - **pełzanie przyspieszone**



Pełzanie

- ⌘ Wpływ obciążenia i temperatury na kształt krzywej pełzania

