



Podstawy Nauki o Materiałach – Pękanie

Dekohezja
zniszczenie materiału pod wpływem naprężeń

Material obrabiany
Nóż
Wiór

pękanie udar skrawanie

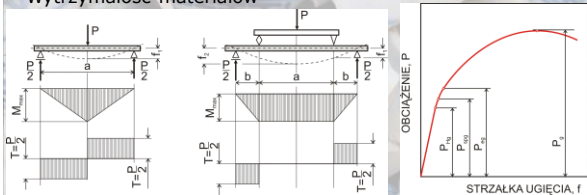
Podstawy Nauki o Materiałach – Pękanie

Wytrzymałość materiałów

Sciskanie

Typowo dla materiałów ceramicznych: $10 \div 20 \cdot R_m \text{ rozcz.} = R_m \text{ ścisk.}$

Wytrzymałość materiałów

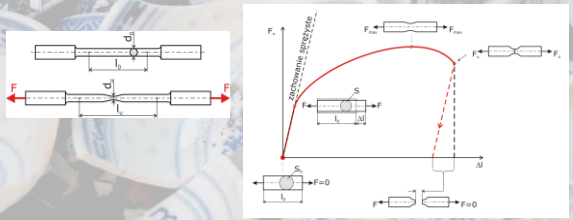


$$\sigma_y = M/W,$$

M - moment gnący; W - wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie
 Wytrzymałość na zginanie jest podstawowym testem wytrzymałościowym dla materiałów ceramicznych (kruchych)

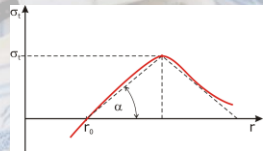
Wytrzymałość materiałów

Wytrzymałość - maksymalne naprężenie jakie może przenieść materiał do zniszczenia (naprężenie niszczące). Wytrzymałość wyznaczana jest w standardowych (normowych) warunkach zniszczenia materiału.



Wytrzymałość teoretyczna kryształów

$F \approx \sin \alpha$
 dla małych odkształceń:
 $\sin \alpha \approx \alpha$ czyli $\sigma = E \epsilon$; $[\epsilon = (r-r_0)/r_0]$
 Zakładamy że zjawisko przebiega w jednostkowym elemencie objętości $V_0=r_0^3$



W chwili zniszczenia (rozerwania) układu atomów gęstość energii sprężystej wykonanej przez siły zewnętrzne:

$$w_1 = (1/2) \sigma_c \epsilon = (1/2) \sigma_c^2 / 2E$$

Całkowita energia sprężysta:

$$W_1 = w_1 r_0^3$$

Wytrzymałość teoretyczna kryształów

Energia ta zostaje zużyta na wytworzenie dwóch nowych powierzchni

$$W_2 = 2\gamma r_o^2$$

Porównując obie energie otrzymujemy:

$$r_o^3 (1/2) \sigma_c^2 / 2E = 2\gamma r_o^2$$

stąd

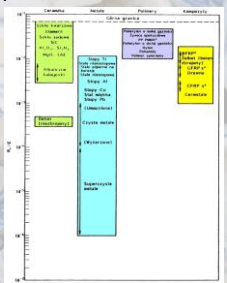
$$\sigma_c = [2E\gamma / r_o]^{1/2}$$

$$\sigma_c = E / (10-15)$$

Jest to maksymalna (teoretyczna) wartość wytrzymałości materiałów

Wytrzymałość rzeczywista materiałów

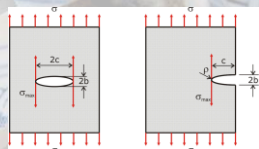
Porównanie teoretycznej wytrzymałości materiału z wyznaczanymi eksperymentalnie wielkościami wytrzymałości na rozciąganie wskazują, że rzeczywista wytrzymałość jest 10 - 100 razy mniejsza.



Wytrzymałość rzeczywista materiałów

W każdym rzeczywistym materiale występują defekty makroskopowe jak: pory, szczeliny, wady na powierzchni.

Teoria Griffith'a



Na wierzchołku szczeliny następuje koncentracja (zwiększenie) naprężeń:

$$\sigma_{max} = \sigma (1 + 2c/b) = \sigma (1 + 2(c/\rho)^{1/2}) = \sigma 2(c/\rho)^{1/2}$$

zniszczenie nastąpi gdy $\sigma_{max} = \sigma_c$

Wytrzymałość rzeczywista materiałów

A. dla szczeliny

$$\sigma = [E\gamma\rho/2c r_0]^{1/2}$$

B. dla krzywizny rzędu stałej sieciowej $\rho = 2 r_0/\pi$
czyli:

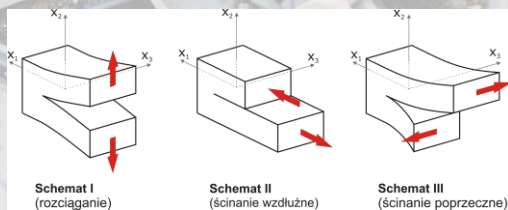
$$\sigma = [E\gamma/\pi c]^{1/2}$$

Jest to zależność jak została także wyprowadzona z warunków energetycznych przez Griffith'a (model Griffith'a) dla warunku zapoczątkowania katastroficznego kruche pęknięcia materiału

W tych warunkach w materiale rozpoczyna się niekontrolowane rozprzestrzenianie szczeliny o wielkości krytycznej **c** tzn. **kruche pęknięcie**.

Krucho pęknięcie materiałów

Układ naprężeń przy rozprzestrzenianiu się szczeliny



Najbardziej niebezpieczne dla pęknięcia jest przypadek I gdy występuje płaski stan odkształceń (PSO) przy przestrzennym stanie naprężeń.

Krucho pęknięcie materiałów

Równanie Griffith'a można zapisać w postaci:

$$\sigma (\pi c)^{1/2} = (E\gamma)^{1/2}$$

I. Wielkość $\sigma (\pi c)^{1/2}$ nazywana jest współczynnikiem intensywności naprężeń K_I .

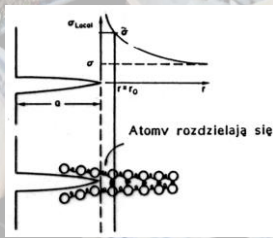
Ogólnie: $K_I = Y \sigma (\pi c)^{1/2}$ [MN/m^{3/2}]
Y - stała zależna od stanu naprężeń

II. Jeżeli wartość $\sigma (\pi c)^{1/2}$ osiągnie pewną **wartość krytyczną** równą $(E\gamma)^{1/2}$ odpowiadającą sytuacji, gdy przekroczona jest na wierzchołku szczeliny wytrzymałość teoretyczna materiału zależną to rozpoczyna się **kruche zniszczenie materiału**.

Tak więc dla materiału który pęka w sposób kruchy o jego wytrzymałości decyduje wytrzymałość teoretyczna (materiału litego) oraz wielkość występującego defektu. Ta wartość krytyczna (maksymalna) współczynnika intensywności naprężeń zwana jest **odpornością na kruche pęknięcie K_{IC}**

Efekty pękania

Typy przelamu w toku pękania

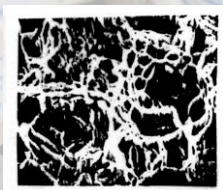
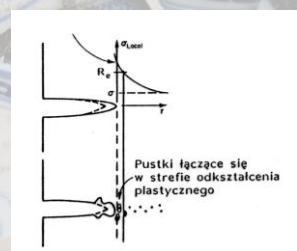


kruchy (szkło)



polikryształ

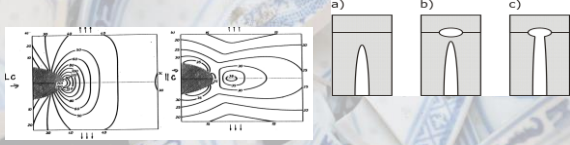
Efekty pękania



plastyczny (metal)

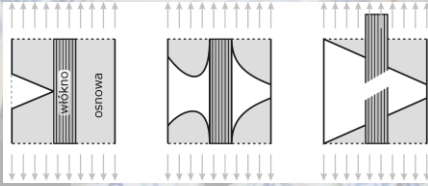
Mechanizmy podwyższania energii pękania

Mechanizm Cooke'a-Gordona - szczelina napotyka granicę międzyziarnową o wytrzymałości mniejszej od 1/5 wytrzymałości ziarna wywołuje spękanie granicy, zmianę kierunku penetracji i dodatkowe spękanie. Podwyższa to energię pękania. Energia pękania polikryształu jest większa od energii pękania monokryształu (przykład tworzyw szkło - krystalicznych).



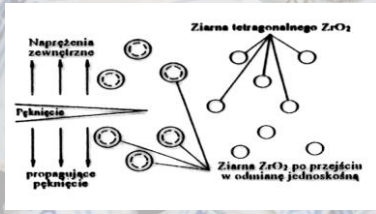
Mechanizmy podwyższania energii pękania

Mostkowanie - po dojściu pęknięcia do słabej granicy włókno-osnowa następuje rozwarstwienie granicy a następnie „mostkowanie” spękania przez bardziej wytrzymałe włókno i ewentualnie „wyciąganie” włókien z osnowy.



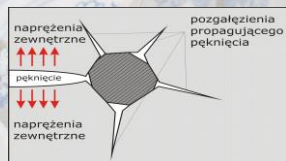
Mechanizmy podwyższania energii pękania

Wzmocnienie wskutek przemian fazowych - polikrystaliczne spieki zawierające ziarna tetragonalnej odmiany ZrO_2 .



Mechanizmy podwyższania energii pękania

Wzmocnienie wskutek przemian fazowych - przy dochodzeniu pęknięcia do ziarna fazy tetragonalnej następuje przemiana fazowa związana ze zwiększeniem się objętości. Dochodzi do pochłaniania energii odkształceń sprężystych oraz powstania sieci mikrospeków.



Wpływ mikrostruktury na pękanie – porowatość

Wytrzymałość materiałów ulega obniżeniu wraz ze wzrostem porowatości i zależy od kształtu porów. Zależności mają postać podobną do tych, które opisują moduł Younga.

W przybliżeniu, wychodząc z prawa mieszanin i zakładając zjawisko koncentracji naprężeń:

$$\sigma = \sigma_0 (1 - kV_p)$$

σ_0 - wytrzymałość materiału bezporowatego,
 V_p - udział objętościowy porów,
 k - współczynnik koncentracji,

Zależności te można przybliżyć równaniami empirycznymi np. postaci
 $\sigma = \sigma_0 \exp(-bV_p)$, $\sigma = \sigma_0 [1 - AV_p - B(V_p)^2 - \dots]$

Wpływ mikrostruktury na pękanie – wielkość ziaren

W polikryształach ceramicznych (pękanie kruche) możliwy jest zróżnicowany mechanizm pękania z przewagą pękania po granicach ziaren lub poprzez ziarna.

Dla typowych polikryształów jednofazowych charakter pękania zmienia się z wielkością ziaren: dla małych ziaren przeważa pękanie międzyziarnowe a dużych poprzez ziarna.

I. Lokalne pękanie międzyziarnowe powoduje zwiększenie energii pękania i energia ta rośnie z wielkością ziaren.

II. Pękanie poprzez ziarna wiąże się podwyższaniem energii pękania wskutek występowania mechanizmu Cooke'a-Gordona skutek którego jest mniejszy wraz ze wzrostem wielkości ziaren.

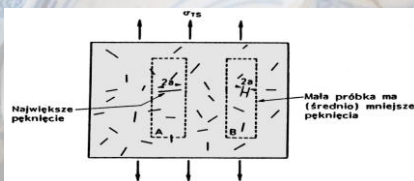
Sumarycznie często występuje ekstremum energii pękania = wytrzymałości polikryształu dla pewnej wielkości ziaren.



Statystyczna teoria wytrzymałości

Jeżeli o wytrzymałości materiałów decydują obecne w materiale defekty krytyczne to poszczególne próbki mogą charakteryzować się znacznym rozrzutem wartości.

Aspekty te uwzględnia **statystyczna teoria wytrzymałości Weibulla**



Statystyczna teoria wytrzymałości

Założenia:

1. Materiał posiada charakter izotropowy i posiada statystyczny rozkład defektów,
2. Prawdopodobieństwo znalezienia defektu o wielkości krytycznej takie samo jest w całej objętości materiału,
3. Materiał ma charakter kruchy a jego zniszczenie następuje wskutek rozprzestrzeniania się defektu krytycznego,
4. Liczba defektów w materiale jest duża.

Wg. teorii Weibulla prawdopodobieństwo przetrwania (nie zniszczenia) próbek o danej objętości jednostkowej V_0 pod działaniem naprężenia σ określone jest zależnością:

$$P(V_0) = \exp[-V_0(\sigma/\sigma_0)^m]$$

gdzie:

m - stała Weibulla charakterystyczna dla danego materiału,
 σ_0 - wielkość charakterystyczna dla której $P = 1/e (=37\%)$.

Statystyczna teoria wytrzymałości

Im większa stała Weibulla tym materiał ma mniejszy rozrzut wytrzymałości.

Dla $m \rightarrow \infty$ krzywa ma charakter schodkowy:

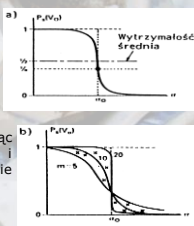
$$\lim \exp[-(\sigma/\sigma_0)^m] = 1 \text{ dla } (\sigma \rightarrow \sigma_0)$$

$$\lim \exp[-(\sigma/\sigma_0)^m] = 0 \text{ dla } (\sigma \rightarrow \sigma_0)$$

Zależności Weibulla można przedstawić także opisując prawdopodobieństwo zniszczenia próbek wprowadzając wielkość progową σ_u poniżej której nie można zniszczyć próbek.

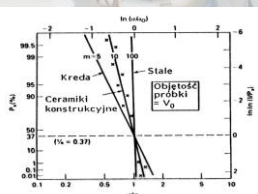
$$P(V_0) = 1 - \exp[-V_0[(\sigma - \sigma_u)/\sigma_0]^m] \text{ dla } \sigma > \sigma_u$$

$$P(V_0) = 0 \text{ dla } \sigma < \sigma_u$$



Statystyczna teoria wytrzymałości

Materiał ceramiczny	Parametry Weibulla		K_{IC} [MPa/m ²]
	m	S_0 [MPa]	
Al ₂ O ₃	7	330	4,5
ZrO ₂ -MgO-CaO	25	350	6,0
ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	20	960	10,5
SiC	10	360	4,0
SSiC	8	360	3,0
Si ₃ N ₄ -Y ₂ O ₃	20	810	7,0
Al ₂ O ₃ -ZrO ₂	10	610	5,8
Al ₂ O ₃ -TiC	10	610	5,4
Al ₂ TiO ₅	20	30	-



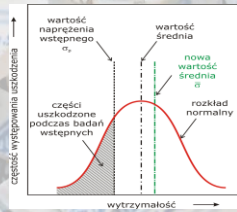
Statystyczna teoria wytrzymałości

Z teorii Weibulla wynika, że istnieje zależność wytrzymałości materiałów kruchych od ich objętości. Przy jednakowym prawdopodobieństwie zniszczenia wytrzymałość dla danego materiału zależy odwrotnie od objętości badanej próbki:

$$\sigma_1 / \sigma_2 = (V_2 / V_1)^{1/m}$$

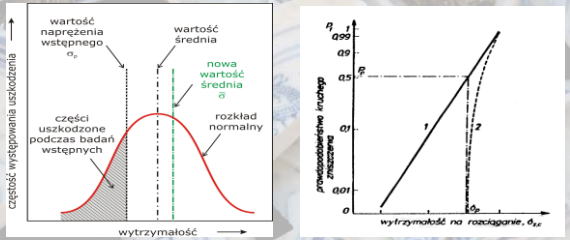
Statystyczna teoria wytrzymałości

Podniesienie wytrzymałości próbek metodą testów próbnych (proof testing) - dla wyeliminowania możliwości występowania wadliwych próbek wszystkie próbki poddaje się działaniu naprężenia większego od naprężenia w warunkach pracy. Następuje zniszczenie części próbek - pozostające posiadają wyższe prawdopodobieństwo przetrwania.



Statystyczna teoria wytrzymałości

Podniesienie wytrzymałości próbek metodą testów próbnych (proof testing)





Podstawy Nauki o Materiałach – Pęknięcie
