

Nauka o Materiałach

Wykład IX Właściwości mechaniczne dekohezja

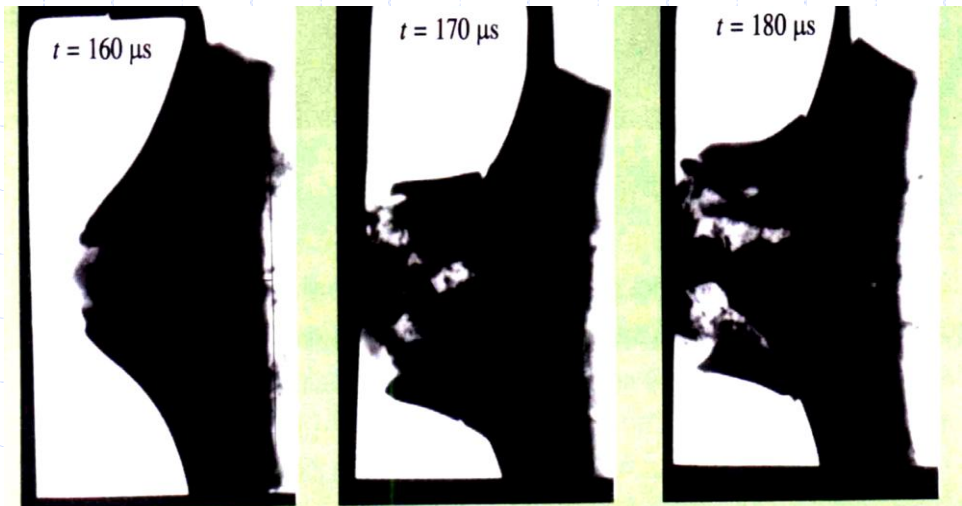
Jerzy Lis



Nauka o Materiałach

Treść wykładu:

1. Dekohezja materiałów - wprowadzenie.
2. Wytrzymałość materiałów - definicje inżynierskie.
3. Wytrzymałość teoretyczne kryształów.
4. Wytrzymałość materiałów rzeczywistych
 - 4.1. Wpływ defektów, teoria Grifitha
 - 4.2. Odporność na pękanie
 - 4.3. Energia pękania
 - 4.4. Mikrostruktura a energia pękania materiałów.
5. Statystyczna teoria wytrzymałości

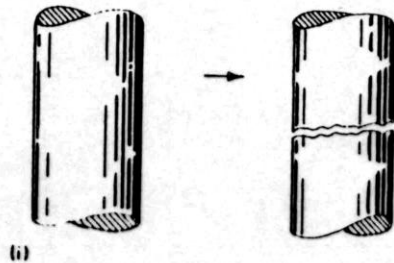


Nauka o materiałach

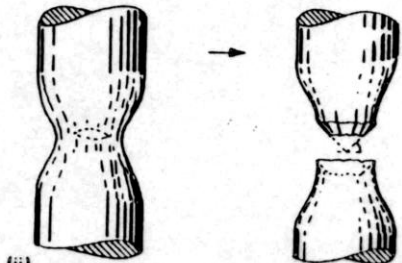
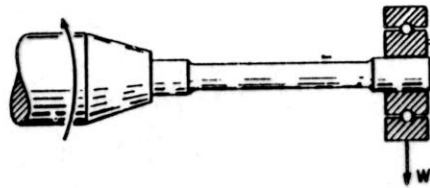
DEKOHEZJA

Wprowadzenie

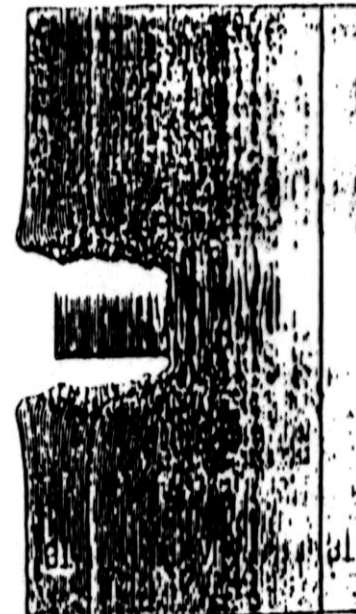
Dekohezja – zniszczenie materiału pod wpływem naprężeń



(i)



(ii)



pękanie

zmęczenie

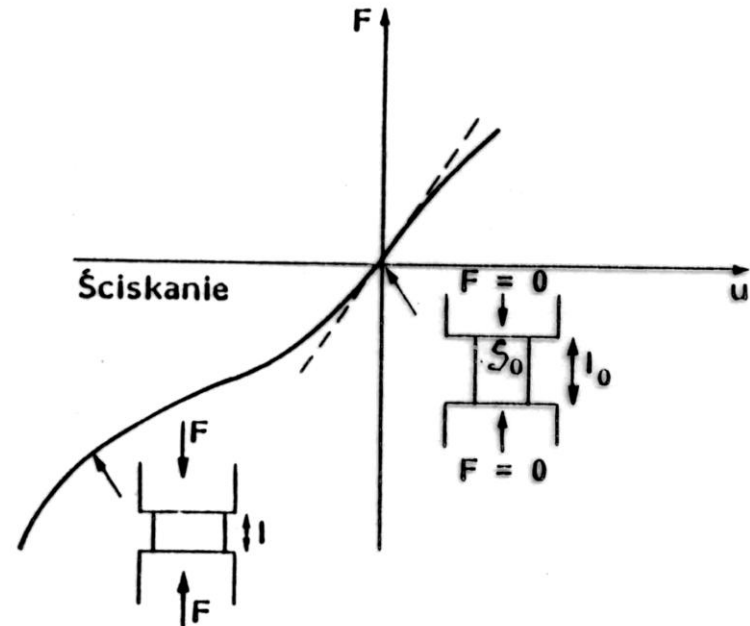
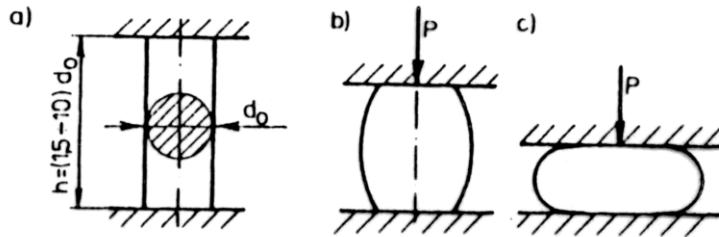
udar

skrawanie

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Wytrzymałość materiałów

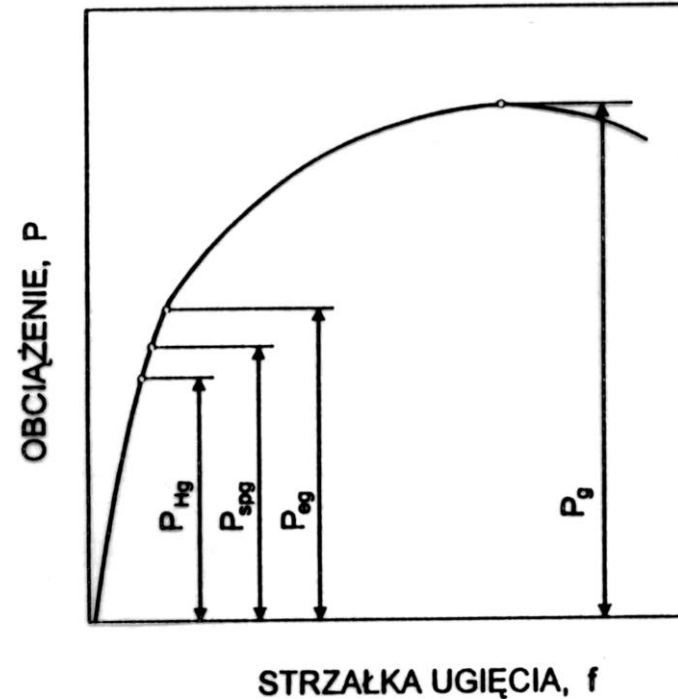
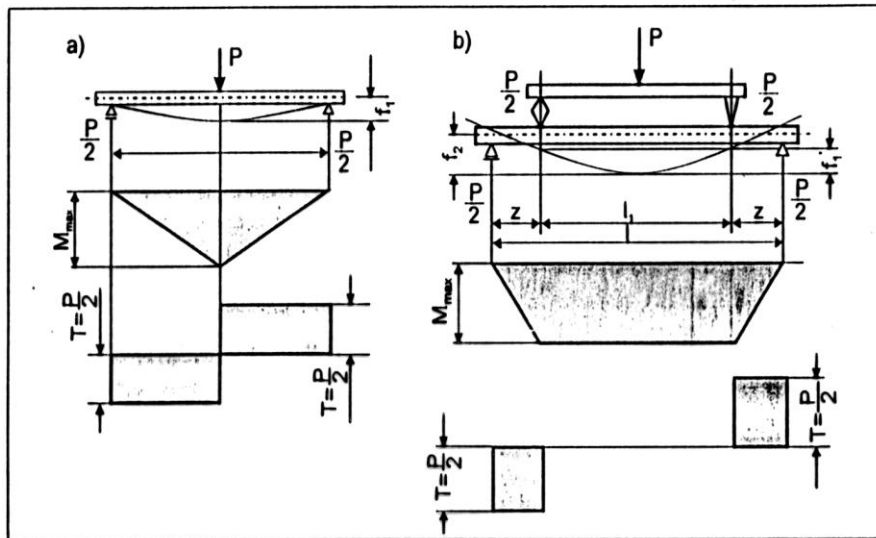


□ Typowo dla materiałów ceramicznych $10 - 20 \times R_m \text{ rozcz.} = R_m \text{ ścisk.}$

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Wytrzymałość materiałów



□ $\sigma_f = \mathbf{M/W}$; M - moment gnący; W - wskaźnik przekroju.

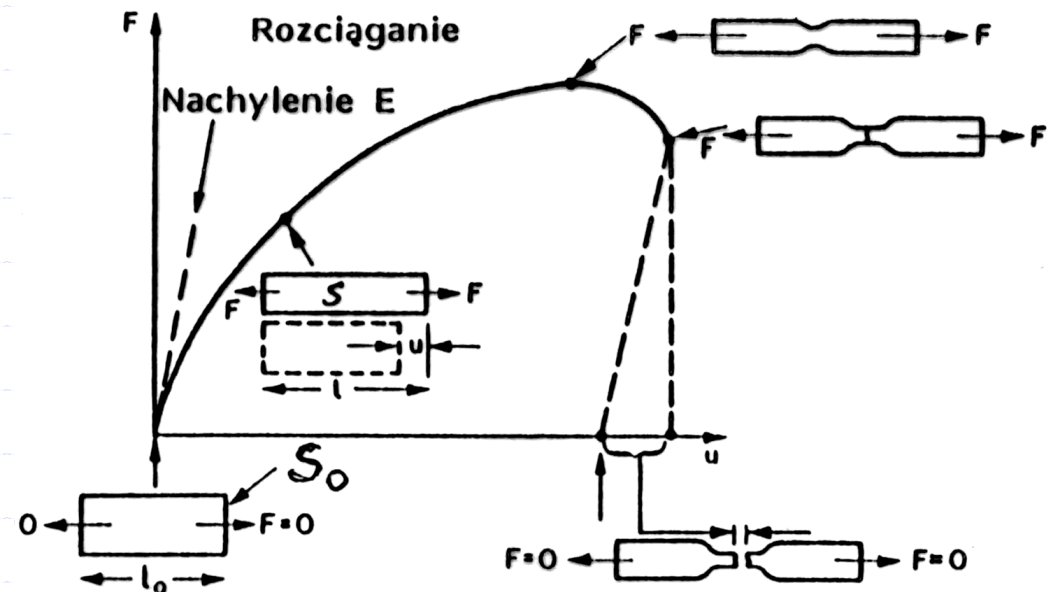
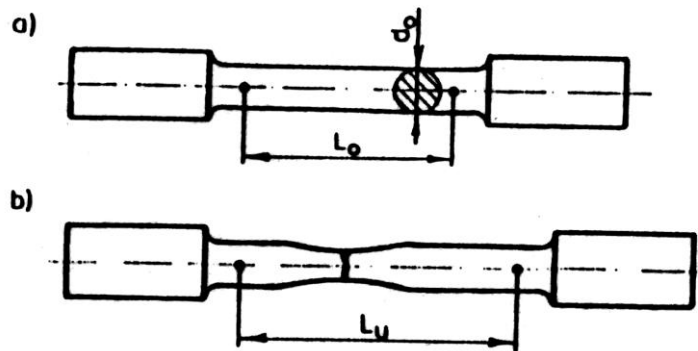
□ Wytrzymałość na zginanie jest podstawowym testem wytrzymałościowym dla materiałów ceramicznych (kruchych)

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Wytrzymałość materiałów

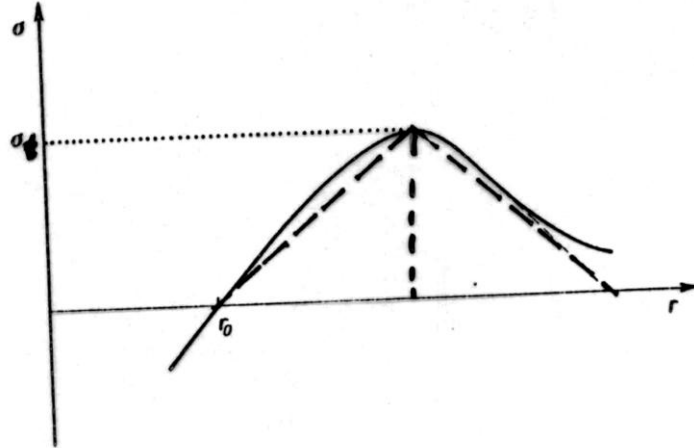
- **Wytrzymałość** - maksymalne naprężenie jakie może przenieść materiał do zniszczenia
- Wytrzymałość wyznaczana jest w standardowych (normowych) warunkach zniszczenia materiału.



Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Wytrzymałość teoretyczna kryształów



$$F \approx \sin x$$

dla małych odkształceń $\sin x \approx x$ czyli $\sigma = E \varepsilon$; $[\varepsilon = (r-r_0)/r_0]$

Zakładamy że zjawisko przebiega w jednostkowym elemencie objętości r_0^3

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

$$w_1 = (1/2) \sigma_t \varepsilon = (1/2) \sigma_t^2 / 2E$$

$$\text{Całkowita energia sprężysta } W_1 = w r_0^3$$

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Wytrzymałość teoretyczna kryształu

Energia ta zostaje zużyta na wytworzenie dwu nowych powierzchni

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

Porównując obie energie otrzymujemy:

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

stąd

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

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

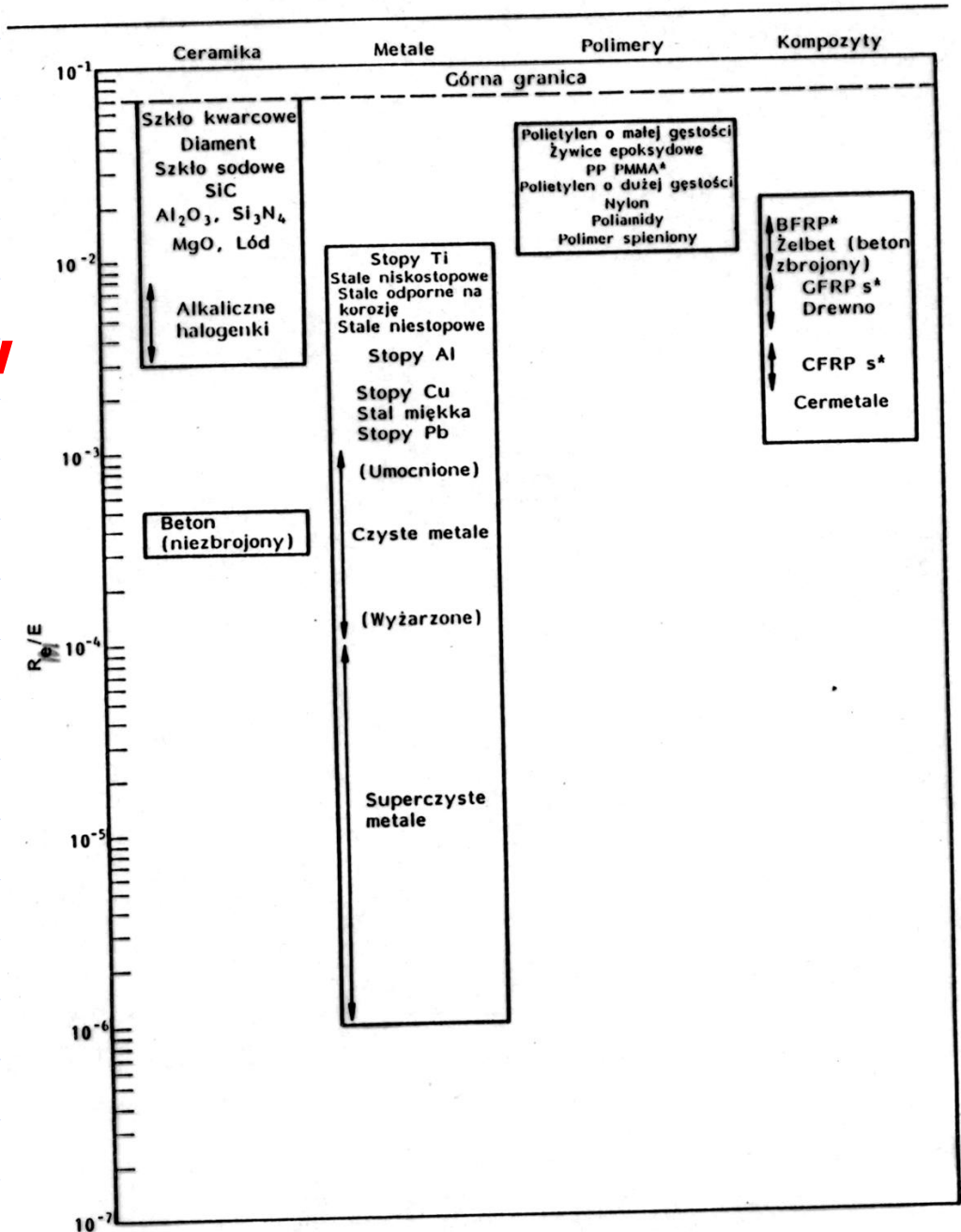
Jest to maksymalna (teoretyczna) wartość wytrzymałości materiałów

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Wytrzymałość rzeczywista materiałów

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



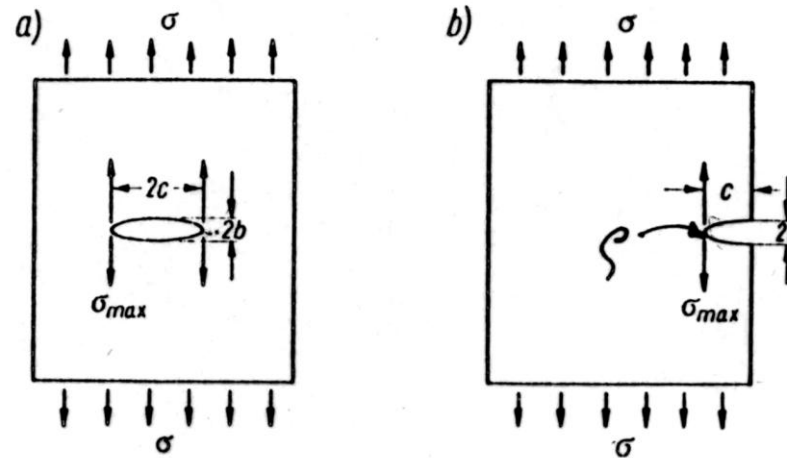
Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Wytrzymałość rzeczywistych materiałów

Wpływ szczeliny

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

$$\sigma_{\max} = \sigma_t$$

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Wytrzymałość rzeczywistych materiałów

Wpływ szczeliny

A. dla szczeliny

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

B. dla krzywizny rzędu stałej sieciowej $\rho = 2 r_o/\pi$ 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 kruchego pęknięcia materiału



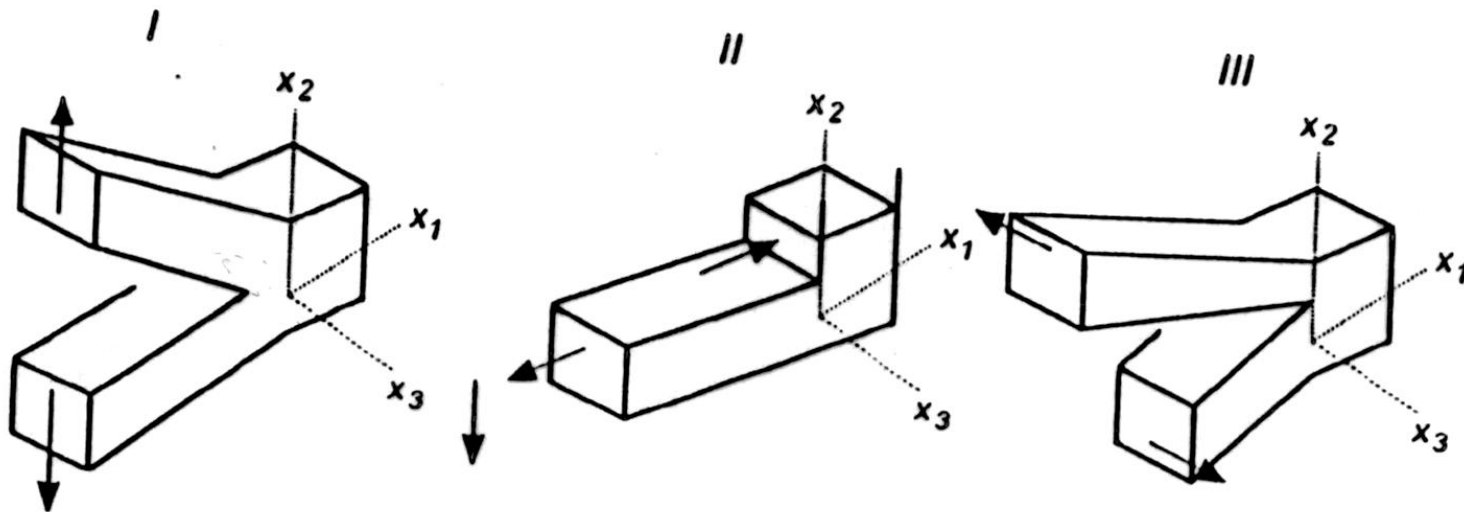
W tych warunkach w materiale rozpoczyna się niekontrolowane rozprzestrzenianie szczeliny o wielkości krytycznej c tzn. **kruche pęknięcie.**

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Krucze pękanie materiałów

Układ naprężeń przy rozprzestrzenianiu się szczeliny



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

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Krucze pękanie 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_c

Ogólnie $K_c = Y \sigma (\pi c)^{1/2}$ [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 pękanie K_{IC}

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Odporność na kruche pękanie

K_{IC} jest wielkością stałą charakterystyczną dla danego tworzywa. zależy od stałych materiałowych:

$$K_{IC} = (E\gamma)^{1/2}$$

γ [kJ/m²] - energia pochłaniana w czasie powstawania pęknięcia niszczącego materiał zwana energią pęknięcia

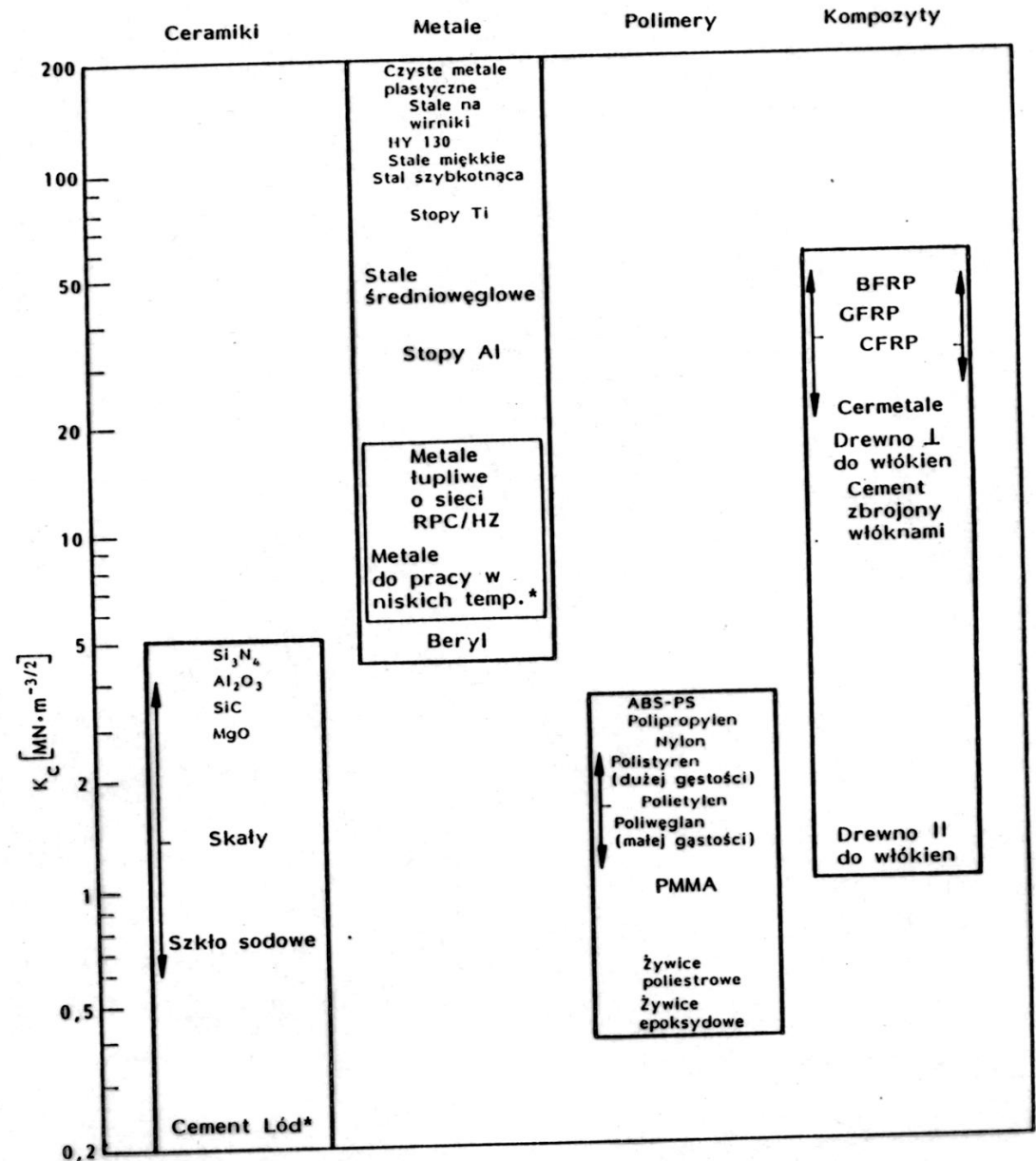
Jest to bardzo ważny parametr decydujący o wytrzymałości tworzyw kruchych (zwłaszcza ceramicznych)

Zwana także wiązkością lub krytyczną szybkością uwalniania energii

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Odporność
na kruche pękanie



Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Energia pękania tworzyw

Wielkością decydującą o odporności materiału na kruche zniszczenie jest efektywna energia pękania

Energję pękania podwyższają wszystkie procesy pochłaniania energii w toku pękania np.

$$\gamma_{ef} = \gamma + \gamma_p + \gamma_r + \gamma_{pf} + \gamma_i$$

gdzie:

γ - energia powierzchniowa

γ_p - energia odkształcenia plastycznego

γ_r - energia powstawania dodatkowych spękań

γ_{pf} - energia pochłaniana w toku przemian fazowych

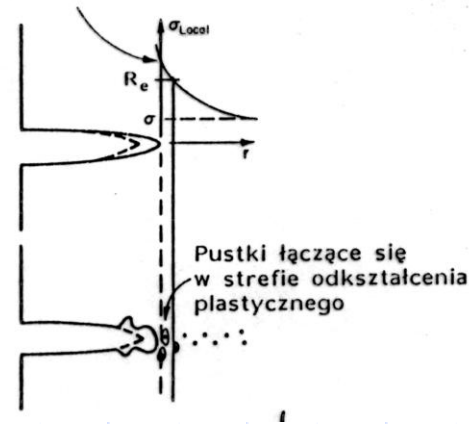
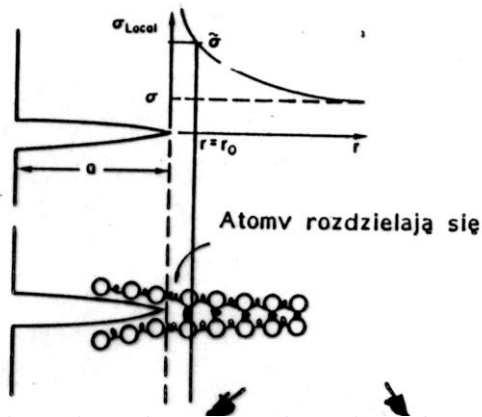
γ_i - wszelkie inne procesy pochłaniania energii

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Energia pękania tworzyw

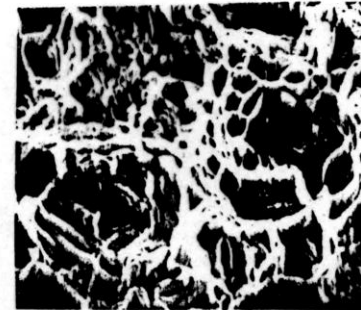
Typy przełamu w toku pękania



kruchy (szkło)



polikryształ



plastyczny (metal)

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Energia pękania

Przykłady mechanizmów podwyższania energii pękania

(tym samym odporności na pękanie i wytrzymałości)

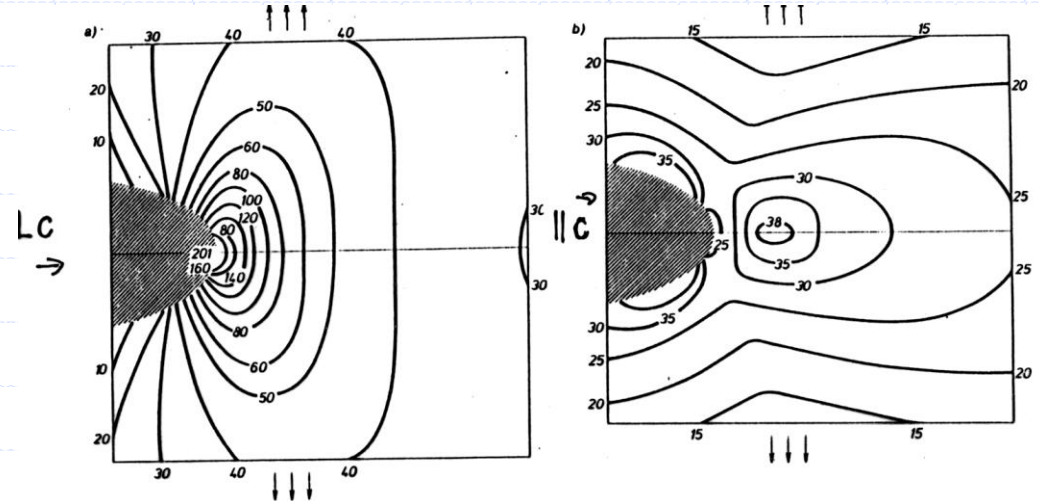
Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Energia pęknięcia

A. Wpływ granic ziarn

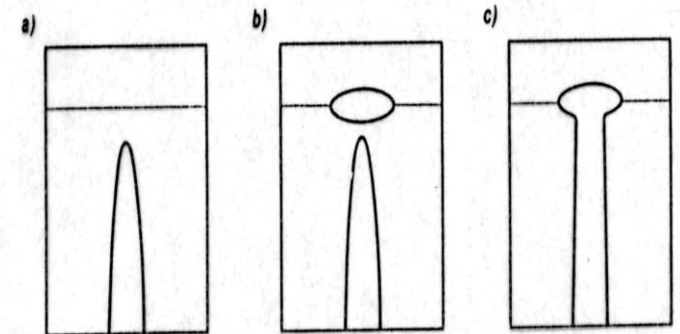
Mechanizm Cooke'a - Gordona



Szczelina napotykając granicę międzyziarnową o wytrzymałości mniejszej od $1/5$ wytrzymałości ziarna wywołuje spękanie granicy, zmianę kierunku penetracji i dodatkowe spękanie. Podwyższa to energię pęknięcia.

Energia pęknięcia polikryształu jest większa od energii pęknięcia monokryształu

(przykład tworzywo szkło - krystalicznych).

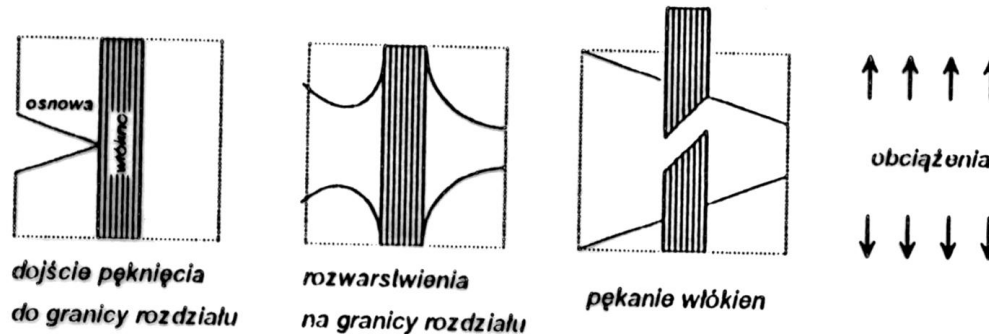


Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Energia pęknięcia

B. Hamowanie pęknięcia w kompozytach włóknistych



Po dojściu spęknięcia do słabej granicy włókno-osnowa następuje rozwarstwienie granicy i następnie „mostkowanie” spęknięcia przez bardziej wytrzymałe włókno i ewentualnie „wyciąganie” włókien z osnowy.

Mechanizmy te powodują podwyższenie energii pęknięcia kompozytu.

Nauka o materiałach

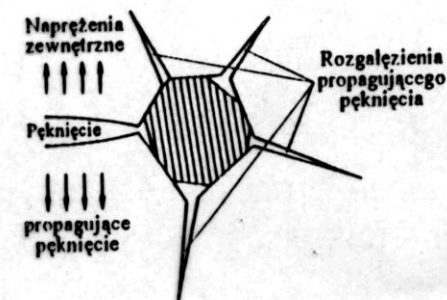
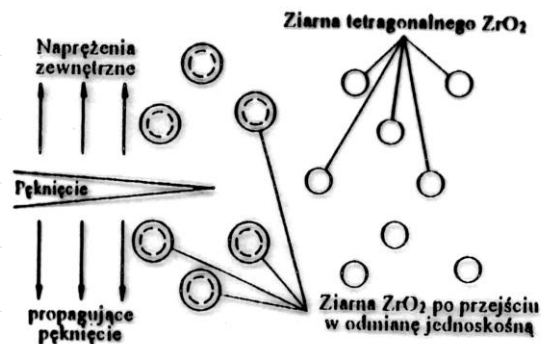
DEKOHEZJA

Energia pęknięcia

C. Hamowanie pęknięcia wskutek przemian fazowych wtrąceń ziarnistych

Przykład:

Spiek PZT (Polikryształ regularnej odmiany ZrO_2 z wtrąceniami tetragonalnej odmiany ZrO_2)



Przy dochodzeniu spękania do wtrącenia następuje przemiana fazowa związana ze zwiększeniem się objętości.

Dochodzi do: pochłaniania energii wskutek powstawania sieci spękań

Sumarycznie wzrasta energia pęknięcia i odporność na kruche pęknięcie

Wytrzymałość PZT do 1 GPa zaś K_{IC} do 15 $MN/m^{3/2}$

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Wpływ porowatości na wytrzymałość

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 przybliżać równiami empirycznymi np. postaci

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-bV_p)$$

$$\sigma = \sigma_0 [1 - AV_p - B(V_p)^2 - \dots]$$

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Zależność wytrzymałości od wielkości ziaren

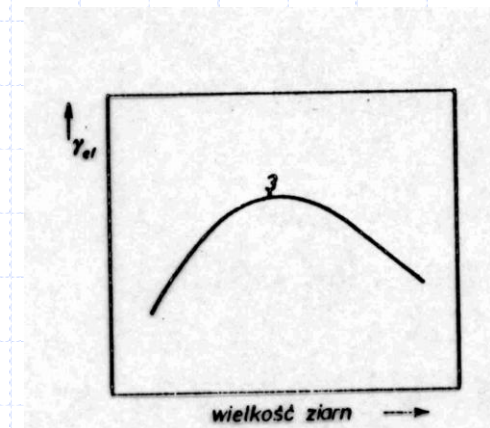
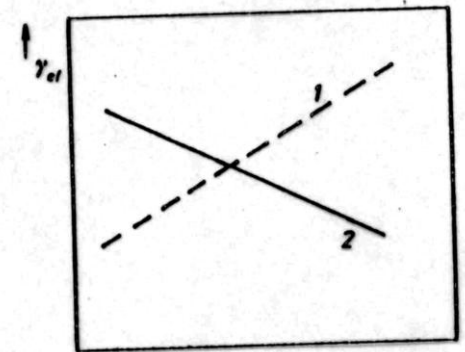
W polikryształach ceramicznych (pękanie kruche) możliwy jest zróżnicowany mechanizm pęknięcia z przewagą pęknięcia po granicach ziaren (międzyziarnowego) lub poprzez ziarna (transziarnowego).

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

I. Lokalne pęknięcie międzyziarnowe powoduje zwiększenie energii pęknięcia i energia ta rośnie z wielkością ziaren.

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

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



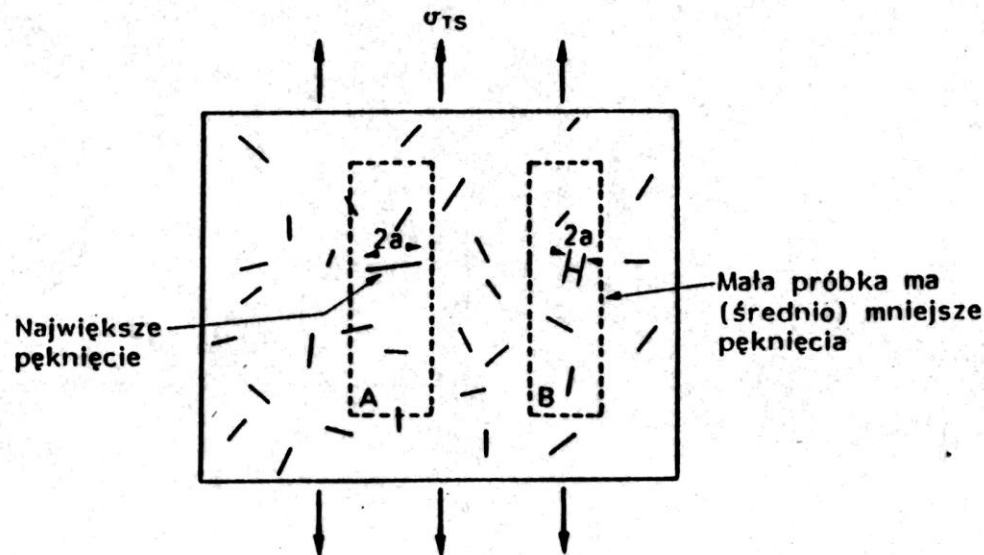
Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

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**



Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Statystyczna teoria wytrzymałości

Założenia:

1. Materiał posiada charakter izotropowy i posiada statystyczny rozkład defektów
2. Prawdopodobieństwo znalezienia defektu o wielkości krytycznej jest w całej objętości materiału identyczne
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:

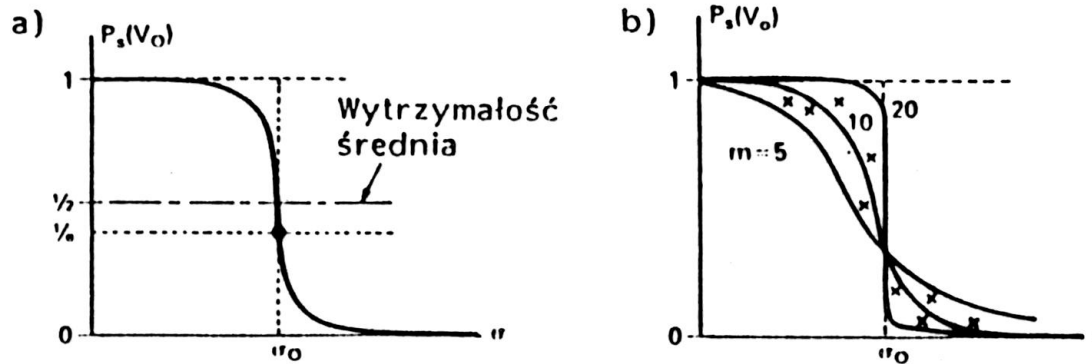
m - stała Weibulla charakterystyczna dla danego materiału

σ_0 - wielkość charakterystyczna dla której $P = 1/e (=37\%)$

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Statystyczna teoria wytrzymałości



Im większa stała Weibulla tym materiał ma mniejszy rozrzut wytrzymałości.

Dla $m=\infty$ krzywa ma charakter schodkowy

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

$$i \quad \lim_{\sigma \rightarrow \sigma_0^+} \exp[-(\sigma/\sigma_0)^m] = 0$$

$$\sigma \rightarrow \sigma_0^-$$

$$\sigma \rightarrow \sigma_0^+$$

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

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

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

Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

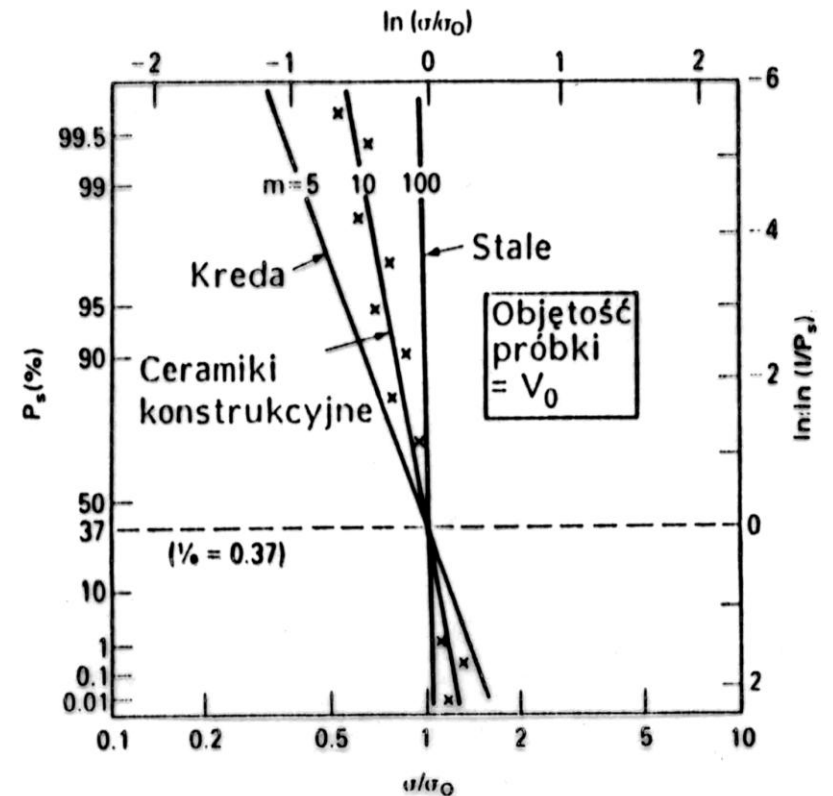
Statystyczna teoria wytrzymałości

Przykłady wartości stałej Weibulla:

TABLICA 3-III. Parametry Weibulla dla różnych ceramicznych materiałów technicznych [9]

Materiał ceramiczny	Parametry Weibulla		Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{Ic}^a MPa·m ^{-1/2}
	m	σ_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
SiSiC	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	-

^a określany również jako odporność na kruche pękanie



Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

Statystyczna teoria wytrzymałości

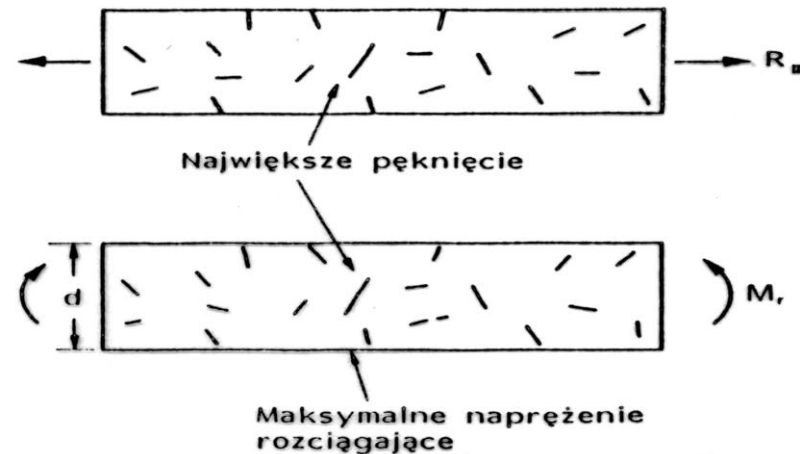
Zależność wytrzymałości materiałów kruchych od objętości

Z teorii Weibulla wynika, że przy jednakowym prawdopodobieństwie zniszczenia wytrzymałość dla danego materiału zależy odwrotnie od objętości badanej próbki:

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

Przykład:

relacja pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie a wytrzymałością na zginanie dla materiałów kruchych



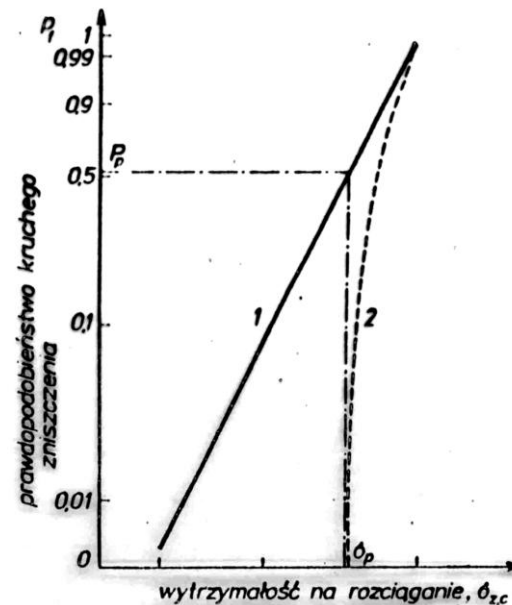
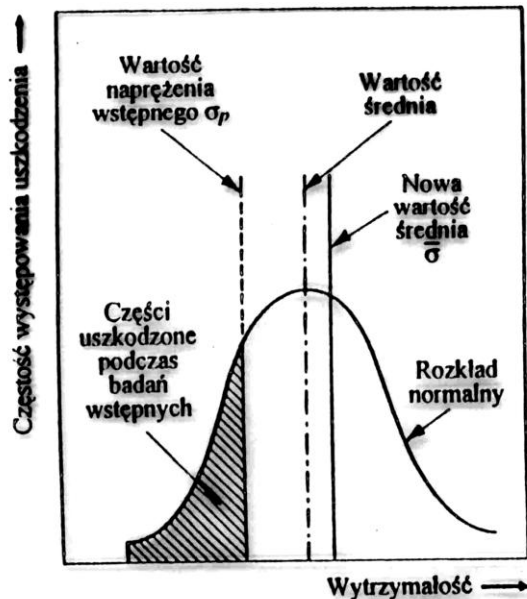
Nauka o materiałach

DEKOHEZJA

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 - pozostałe posiadają wyższe prawdopodobieństwo przetrwania.



Dziękuję

do zobaczenia za
tydzień