



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

NAUKA O MATERIAŁACH

Wykład X: Dekohezja

JERZY LIS
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki




Treść wykładu:

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



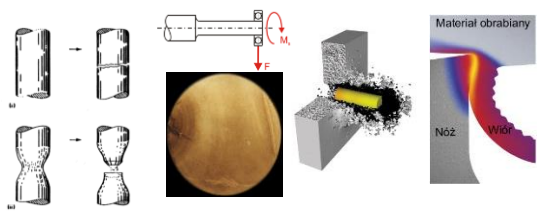
D. C. Hoffman (1961). Designing metallic/glass matrix composites with high toughness and tensile ductility. Mater+45: 1086-1090 (2008)

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohezja



Dekohezja - wprowadzenie

Dekohezja – zniszczenie materiału pod wpływem naprężeń.



pękanie zmęczenie udar skrawanie

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohezja

AGH Wytrzymałość materiałów

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

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Wytrzymałość materiałów

$\sigma_y = M/W_y$;
 M - moment gnący;
 W - wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie
 Wytrzymałość na zginanie jest podstawowym testem wytrzymałościowym dla materiałów ceramicznych (kruchych)

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Wytrzymałość materiałów

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

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH 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:
 $w_1 = (1/2) \sigma_0 \epsilon = (1/2) \sigma_0^2 / E$
 Całkowita energia sprężysta:
 $W_1 = w_1 r_0^3$

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Wytrzymałość teoretyczna kryształów

Energia ta zostaje zużyta na wytworzenie dwóch nowych powierzchni
 $W_2 = 2\gamma r_0^2$

Porównując obie energie otrzymujemy:
 $r_0^3 (1/2) \sigma_0^2 / 2E = 2\gamma r_0^2$

stąd
 $\sigma_0 = [2E\gamma / r_0]^{1/2}$

$\sigma_0 = E / (10-15)$

Jest to maksymalna (teoretyczna) wartość wytrzymałości materiałów

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Wytrzymałość rzeczywista materiałów

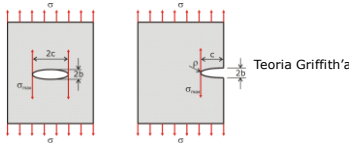
Porównanie teoretycznej wytrzymałości materiału z wyznaczanymi eksperymentalnie wielkościami wytrzymałości na rozciąganie wskazują, że rzeczywista wytrzymałość jest 10 - 100 razy mniejsza.

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Wytrzymałość rzeczywista 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 $\sigma_{max} = \sigma_c$

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Wytrzymałość rzeczywista materiałów

Wpływ szczeliny

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 go pęknięcia materiału

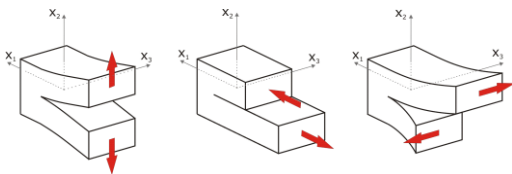
W tych warunkach w materiale rozpoczyna się niekontrolowane rozprzestrzenianie szczeliny o wielkości krytycznej c tzn. **kruche pęknięcie**.

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Wytrzymałość rzeczywista materiałów

Kruche pęknięcie materiałów

Układ naprężeń przy rozprzestrzenianiu się szczeliny



Schemat I (rozciąganie) Schemat II (ściananie wzdłużne) Schemat III (ściananie poprzeczne)

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

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Wytrzymałość rzeczywista materiałów

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_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 $(E\gamma_c)^{1/2}$ 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 X: Dekohesja

AGH Wytrzymałość rzeczywista materiałów

Odporność na kruche pękanie

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

$$K_{Ic} = (E\gamma_c)^{1/2}$$

γ [kJ/m²] - energia pochłaniana w czasie powstawania pęknięcia niszczonego 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 X: Dekohesja

AGH Wytrzymałość rzeczywista materiałów

Odporność na kruche pękanie

Klasa Materiału	Przykładowe Materiały	Wartość K_{Ic} [MN m ^{3/2}]
Ceramiki	Alumina	~3
	Węgiel (grafit)	~10
	Węgiel (węgielny)	~10
Metale	Stal	~50
	Aluminiowy	~50
	Stal nierdzewna	~50
	Węgiel (węgielny)	~100
	Węgiel (węgielny)	~150
Polimery	PMMA	~1
	PC	~1
Kompozyty	CFRP	~100
	CFRP	~150

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

 **Wytrzymałość rzeczywista materiałów**

Energia pękania tworzyw

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


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

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

gdzie:

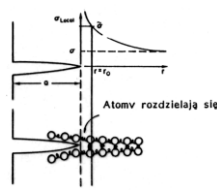
- γ - energia powierzchniowa
- γ_p - energia odkształcenia plastycznego
- γ_r - energia powstawania dodatkowych spękań
- γ_{pr} - energia pochłaniana w toku przemian fazowych
- γ_i - wszelkie inne procesy pochłaniania energii

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja


 **Wytrzymałość rzeczywista materiałów**

Energia pękania tworzyw


Typy przelamu w toku pękania



Atomy rozdzielają się




kruche (szkło)



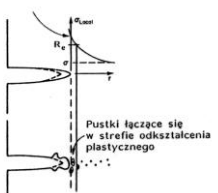
polikryształ

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja


 **Wytrzymałość rzeczywista materiałów**

Energia pękania tworzyw

Typy przelamu w toku pękania




Pustki łączące się w strefie odkształcenia plastycznego



plastyczny (metal)


NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

 **AGH Wytrzymałość rzeczywista materiałów**

Energia pękania

Przykłady mechanizmów podwyższania energii pękania
(tym samym odporności na pęknięcie i wytrzymałości)

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohezja

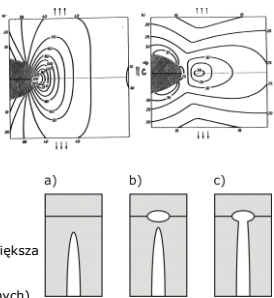
 **AGH Wytrzymałość rzeczywista materiałów**

Energia pękania

A. Wpływ granic ziarn
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 pęknięcia monokryształu (przykład tworzyw szkło - krystalicznych).



NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohezja

 **AGH Wytrzymałość rzeczywista materiałów**

Energia pękania

B. Hamowanie pęknięcia w kompozytach włóknistych



dojście pęknięcia do granicy rozdziału rozwarstwienia na granicy rozdziału pęknięcie włókien

Po dojściu pęknięcia do słabej granicy włókno-osnowa następuje rozwarstwienie granicy i następnie „mostkowanie” spękania przez bardziej wytrzymałe włókno i ewentualnie „wyciąganie” włókien z osnowy.
Mechanizmy te powodują podwyższenie energii pęknięcia kompozytu.

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohezja

AGH Wytrzymałość rzeczywista materiałów

Energia pękania

C. Hamowanie pęknięcia wskutek przemian fazowych wtrąceń ziarnistych

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

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Wytrzymałość rzeczywista materiałów

Energia pękania

Przy dochodzeniu spękania do wtrącenia następuje przemiana fazowa związana ze zwiększeniem się objętości. Dochodzi do: pochłaniania energii wskutek powstawania sieci spękań. Sumarycznie wzrasta energia pękania i odporność na kruche pęknięcie. Wytrzymałość PZT do 1 GPa zaś K_{Ic} do 15 MN/m^{3/2}

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Wpływ mikrostruktury na wytrzymałość

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 przybliżyć równaniami empirycznymi np. postaci

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

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

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Wpływ mikrostruktury na wytrzymałość

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** (trans ziarnowego).

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

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

II. Pękanie 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 X: Dekohesja

AGH 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 X: Dekohesja

AGH 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 X: Dekohesja

AGH Statystyczna teoria wytrzymałości

Im większa stała Weibulla tym materiał ma mniejszy rozrzut wytrzymałości.

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

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

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

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

$P(V_0) = 1 - \exp[-V_0((\sigma - \sigma_u)/\sigma_0)^m]$ dla $\sigma > \sigma_u$
 $P(V_0) = 0$ dla $\sigma < \sigma_u$

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Statystyczna teoria wytrzymałości

Przykłady wartości stałej Weibulla:

Materiał ceramiczny	Parametry Weibulla		Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{IC}
	m	s_0	
	[-]	[MPa]	[MPa/m ²]
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	-

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH 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 X: Dekohesja

AGH 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.

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH Statystyczna teoria wytrzymałości

Podniesienie wytrzymałości próbek metodą „testów próbnych (proof testing)”

NAUKA O MATERIAŁACH X: Dekohesja

AGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STĄSZICA W KRAKOWIE

NAUKA O MATERIAŁACH

Dziękuję.

JERZY LIS
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
