




AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

NAUKA O MATERIAŁACH

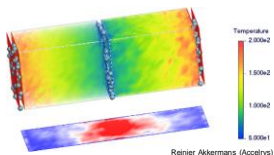
Wykład X: Właściwości cieplne

JERZY LIS
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki



Treść wykładu:

1. Stabilność termiczna materiałów
2. Pełzanie wysokotemperaturowe
3. Przewodnictwo cieplne
4. Rozszerzalność cieplna
5. Odporność na wstrząsy cieplne



Reinier Akkermans (Accelrys)

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

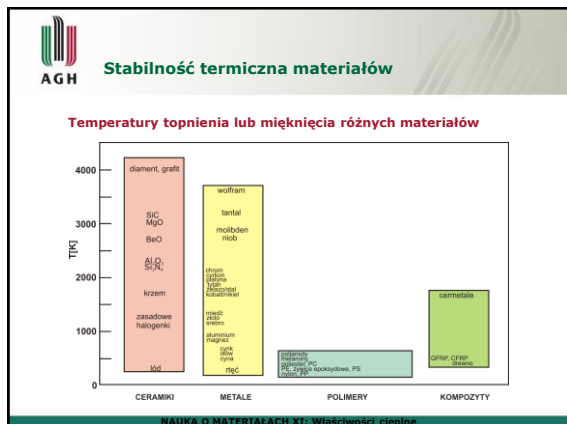


Stabilność termiczna materiałów

Temperatury topnienia lub mięknięcia^(M) różnych materiałów

Materiał	T [°K]	Materiał	T [°K]	Materiał	T [°K]
diamant, grafit	4000	żelazo	1809	poliestry	450-480 ^(M)
wolfram	3680	kobalt	1768	poliwęglany	400 ^(M)
tantal	3250	nikiel	1726	polietylen – mała gęstość	360 ^(M)
węgiel krzemowy, SiC	3110	cermet	1700	polietylen – duża gęstość	300 ^(M)
tlenek magnezu	3073	krzem	1683	tworzywa piankowe, sztywne	300-380 ^(M)
molibden	2880	alkaliczne halogenki	800-1600	epoksydy ogólnego przeznaczenia	340-380 ^(M)
niob	2740	uran	1405	polistyren	370-380 ^(M)
tlenek berylu, BeO	2700	miedź	1356	nylon	340-380 ^(M)
tlenek aluminium, Al ₂ O ₃	2323	złoto	1336	poliuretan	365 ^(M)
azotek krzemu, Si ₃ N ₄	2173	srebro	1234	akryl	350 ^(M)
chrom	2148	aluminium	933	GFRP	340 ^(M)
cyrkon	2125	magnez	923	CFRP	340 ^(M)
platyna	2042	szkło sodowe	700-900	polipropylen	330 ^(M)
tytan	1943	cynek	692	lód	273
		poliamid	580-630 ^(M)	rtęć	235

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne



AGH **Pełzanie wysokotemperaturowe**

Pełzanie wysokotemperaturowe

- W podwyższonych temperaturach procesy dyfuzyjne w materiałach stają się tak intensywne, że ich skutki mogą wywoływać zmiany kształtu materiału pod wpływem niewielkich naprężeń
- Odształcenie takie ma charakter odkształcenia (płynięcia) lepkościowego
- **Proces taki nazywamy pełzaniem wysokotemperaturowym**
- Temperatury w której materiał zaczyna pełzać, zależy od jego temperatury topnienia. Jako generalną zasadę należy przyjąć, że pełzanie rozpoczyna się gdy:
 - T > 0,3 do 0,4 T_m dla metali,
 - T > 0,4 do 0,5 T_m dla ceramiki

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

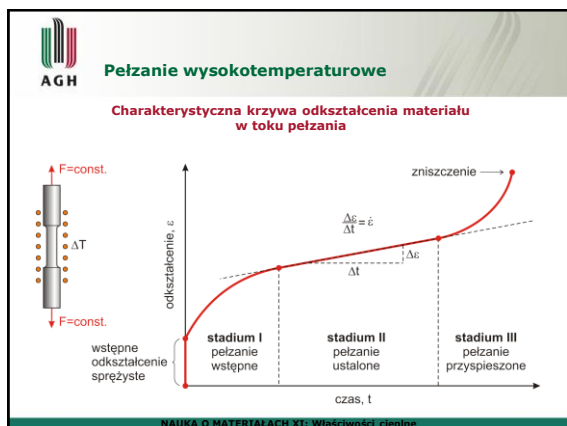
AGH **Treść wykładu:**

- **Pełzanie** jest to powolne i ciągłe odkształcenie materiału w czasie pod wpływem niewielkich naprężeń niższych od granicy plastyczności.
- Wielkość odkształcenia zależy od naprężenia, temperatury i czasu

$$\epsilon = f(\sigma, t, T) \Leftrightarrow \text{pełzanie}$$
- W przeciwieństwie do pełzania odkształcenie sprężyste większości metali i ceramiki w temperaturze pokojowej praktycznie nie zależy od czasu

$$\epsilon = f(\sigma) \Leftrightarrow \text{odkształcenie sprężyste}$$

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne



AGH **Pełzanie wysokotemperaturowe**

W czasie pełzania ustalonego (II stadium) prędkość pełzania jest stała. Równanie pełzania opisuje się zależnością analogiczną do odkształcenia lepkościowego

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^n$$

gdzie: B- stała typu współczynnika lepkości
n - stała zależna od „mechanizmu pełzania” czyli typu procesu zachodzącego w materiale

Dla procesów dyfuzyjnego pełzania najbardziej typowymi mechanizmami są:

- Pełzanie Nabarro-Herringa typu dyfuzji objętościowej
- Pełzanie Cobla typu dyfuzji po granicach ziaren

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH **Pełzanie wysokotemperaturowe**

W materiale polikrystalicznym znajdującym się w stanie naprężeń zewnętrznych występują zróżnicowane naprężenia wewnętrzne na różnie zorientowanych granicach ziaren. Powoduje to zróżnicowanie potencjału chemicznego i procesy transportowe drogą dyfuzji.

Procesy w toku pełzania w polikryształe

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

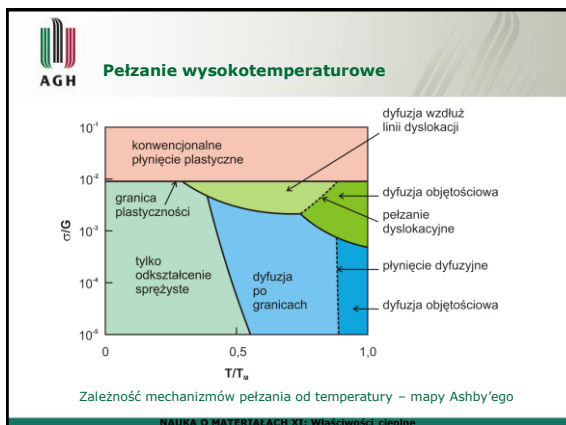
AGH **Pełzanie wysokotemperaturowe**

dyfuzja po granicach ziarn (pełzanie Cobla)

dyfuzja objętościowa (pełzanie Nabarro-Herringa)

Procesy te są aktywowane termicznie stąd szybkość pełzania rośnie z temperaturą.

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne



AGH **Przewodnictwo cieplne**

Przewodzenie ciepła

Gęstość strumienia ciepła przepływającego w jednostce czasu przez prostopadłą płaszczyznę o jednostkowej powierzchni pod wpływem gradientu temperatury można wyrazić następująco:

$$q_x = \frac{\partial Q}{\partial t} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

Równanie oznacza, że przy istnieniu gradientu temperatury przepływ ciepła jest do niego proporcjonalny.

Stałą proporcjonalności jest λ - współczynnik przewodnictwa cieplnego. Jest to stała materiałowa zależna od temperatury.

Przepływ ciepła w ośrodkach może zachodzić drogą: **przewodzenia, konwekcji lub promieniowania.**

Przewodzenie ciepła w ciałach stałych może mieć charakter **fononowy** i/tub **elektronowy.**

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH Przewodnictwo ciepłe

Przykłady współczynnika przewodnictwa ciepłego dla wybranych materiałów

Rodzaj materiału	Współczynnik przewodnictwa ciepłego [W/mK]
Al	226
Ag	413
ZrO ₂	2
AlN	95-190
Si ₃ N ₄	12-35
B ₂ C	40
SiC	110-180
TiB ₂	210
grafit	93-112
diamant	2000

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH Przewodnictwo ciepłe

Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych

Szeregowy i równoległy model materiału wielofazowego

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH Przewodnictwo ciepłe

Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych

Jeśli przepływ ciepła jest równoległy do granic rozdziału warstw a w całym układzie występuje ten sam gradient temperatury to odwrotność oporności układu równoległego jest ważoną sumą odwrotności poszczególnych warstw:

$$\frac{1}{\lambda_m} = \sum_i \frac{V_i}{\lambda_i} \quad \text{gdzie:}$$

V_i – udział objętościowy i-tej fazy
 λ_i – przewodnictwo ciepłe i-tej fazy
 λ_m – przewodnictwo ciepłe całego układu

Dla układu dwufazowego równanie zapisujemy w następującej postaci:

$$\lambda_m = \lambda_1 V_1 + \lambda_2 V_2$$

gdy: $\lambda_1 \gg \lambda_2$ wtedy: $\lambda_m \approx \lambda_1 V_1$

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH Przewodnictwo ciepłe

Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych

Jeśli przepływ ciepła jest prostopadły do granic rozdzielu warstw a w całym układzie występuje ta sama gęstość strumienia ciepła i całkowita oporność cieplna jest równa sumie oporności cieplnych warstw:

$$\frac{1}{\lambda_m} = \sum \frac{V_i}{\lambda_i}$$

gdzie:
 V_i – udział objętościowy i-tej fazy
 λ_i – przewodnictwo cieplne i-tej fazy
 λ_m – przewodnictwo cieplne całego układu

Dla układu dwufazowego równanie zapisujemy w następującej postaci:

$$\frac{1}{\lambda_m} = \frac{V_1}{\lambda_1} + \frac{V_2}{\lambda_2}$$

gdy: $\lambda_1 \gg \lambda_2$ wtedy: $\lambda_m \approx \frac{\lambda_2}{V_2}$

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH Przewodnictwo ciepłe

Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych

Przewodnictwo cieplne dla:
 (1) modelu równoległego
 (2) modelu szeregowego

Przewodnictwo cieplne materiałów porowatych: (1) piankowych (2) włóknistych (3) ziarnistych

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH Przewodnictwo ciepłe

Przewodzenie ciepła w funkcji temperatury

W niskich temperaturach w izolatorach dominuje przewodnictwo fononowe

W wysokich temperaturach może mieć znaczenie przewodnictwo elektronowe lub przewodzenie przez promieniowanie w porach materiału

1. ZrO_2-CaO
 2. ThO_2
 3. MgO
 4. BeO
 5. SiC
 6. B_4C

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne



Rozszerzalność cieplna

Współczynnik rozszerzalności liniowej

Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej wyraża względne wydłużenie materiału występujące podczas ogrzania materiału o jeden stopień

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T}$$

Rodzaj materiału	liniowy współczynnik rozszerzalności [K ⁻¹ ·10 ⁻⁶]
Al ₂ O ₃	8,5
MgO	13,5
AlN	5,6
Si ₃ N ₄	3,0
Sialon	1,7
B ₄ C	4,5
β-SiC	3,9
α-SiC	4,5
WC	5,1

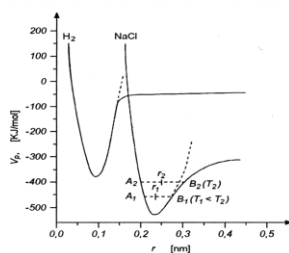
NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne



Rozszerzalność cieplna

Asymetria krzywej zależności energii potencjalnej od odległości międzyatomowej powoduje efekt zmian wymiarów kryształu z temperaturą.

Efekt ten jest tym większy im mniejsza jest siła wiązania.



NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne



Odporność na wstrząsy cieplne

Naprężenia cieplne

W materiałach poddawanych zmianom temperatury w obszarze odkształceń sprężystych możliwe jest nierównomierne rozszerzanie cieplne w różnych obszarach.

Efektem tego zjawiska jest powstawanie naprężeń cieplnych:

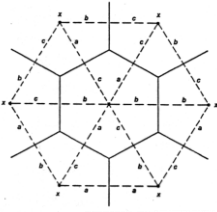
I rodzaju - naprężenia wynikają z anizotropii rozszerzalności poszczególnych ziaren lub anizotropii modułu Younga E

II rodzaju - naprężenia wynikające z nierównomiernego rozkładu temperatury w objętości

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH **Odporność na wstrząsy ciepłe**

Naprężenia ciepłe I rodzaju

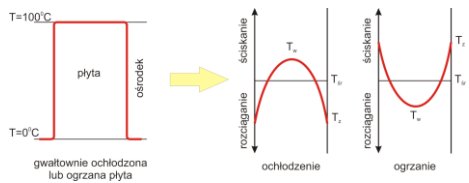


W polikrystalach jedno lub wielofazowym mogą wystąpić naprężenia na granicach ziaren wskutek anizotropii α lub E

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH **Odporność na wstrząsy ciepłe**

Naprężenia ciepłe II rodzaju



gwałtownie ochłodzona lub ogrzana płyta

ochłodzenie

ogrwanie

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH **Odporność na wstrząsy ciepłe**

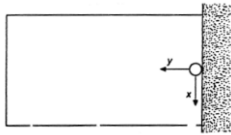
Naprężenia ciepłe w ujęciu modelowym

Sztwno umocowaną z jednego końca dwuwymiarową płytę ochładzamy od temperatury T_1 do T_2

Płyta ulega skurczowi
 $\epsilon = \alpha(T_1 - T_2) = \alpha \Delta T$

Wskutek sztywnego umocowania w płycie wystąpią naprężenia rozciągające w kierunku x :
 $\sigma = \epsilon E = E \alpha \Delta T$

Dla materiału 3D zgodnie z tzw. uogólnionym prawem Hooke'a:

$$\sigma = \frac{\epsilon E}{1 - \nu} = \frac{\alpha \Delta T E}{1 - \nu}$$


NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH **Odporność na wstrząsy cieplne**

Odporność na wstrząsy cieplne

Pod pojęciem odporności na wstrząs cieplny rozumie się maksymalną różnicę temperatur, przy której maksymalne naprężenia cieplne są równe wytrzymałości tworzywa, czyli:

$$\Delta T = \Delta T_{\max} \text{ gdy } \sigma_{\text{cieplne}} = \sigma_{\text{wytrzymałość}}$$

w ujęciu modelowym:

$$\Delta T_{\max} = \frac{\sigma(1-\nu)}{E\alpha}$$

ΔT_{\max} rośnie gdy:

- rośnie wytrzymałość
- maleje rozszerzalność cieplna
- maleje E

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH **Odporność na wstrząsy cieplne**

Krzywa Hasellmana – eksperymentalnie wyznaczona zależność wytrzymałości od wielkości wstrząsu cieplnego ΔT

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

AGH **Odporność na wstrząsy cieplne**


W warunkach niestacjonarnego przepływu rozkład temperatury w kształtce zależy od czasu oraz:

- współczynnika wnikania ciepła do materiału (h)
- współczynnika przewodnictwa cieplnego (λ)
- wymiarów kształtki (r)

ΔT rośnie gdy:

h rośnie; λ maleje ; r maleje

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne



Odporność na wstrząsy cieplne

W warunkach niestacjonarnego przepływu warunki cieplne określa tzw. liczba Biota β

$$\beta = \frac{r_m h}{\lambda}$$

Naprężenia cieplne są funkcją liczby Biota

Funkcja ta ma różną postać w zależności od wielkości β
np.:

gdy $\beta < 1$ to
$$\Delta T = \frac{\sigma(1-\nu)}{E\alpha} \cdot \frac{3,25}{\beta}$$

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

NAUKA O MATERIAŁACH

Dziękuję.

JERZY LIS
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
