

Nauka o Materiałach

Wykład XI

Właściwości cieplne

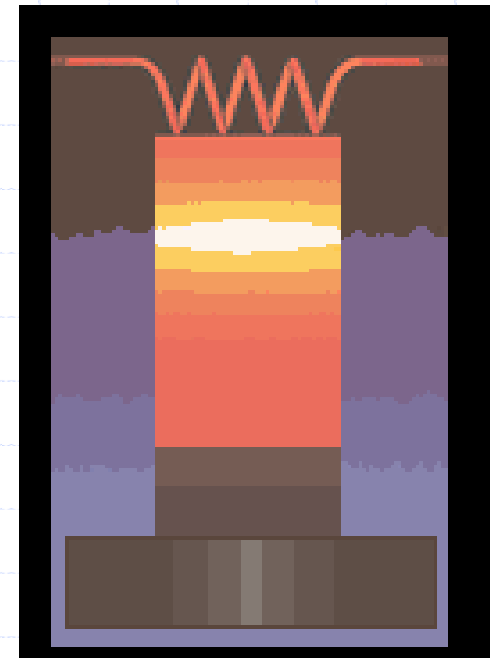
Jerzy Lis



Nauka o Materiałach

Treść wykładu:

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



Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Stabilność termiczna materiałów

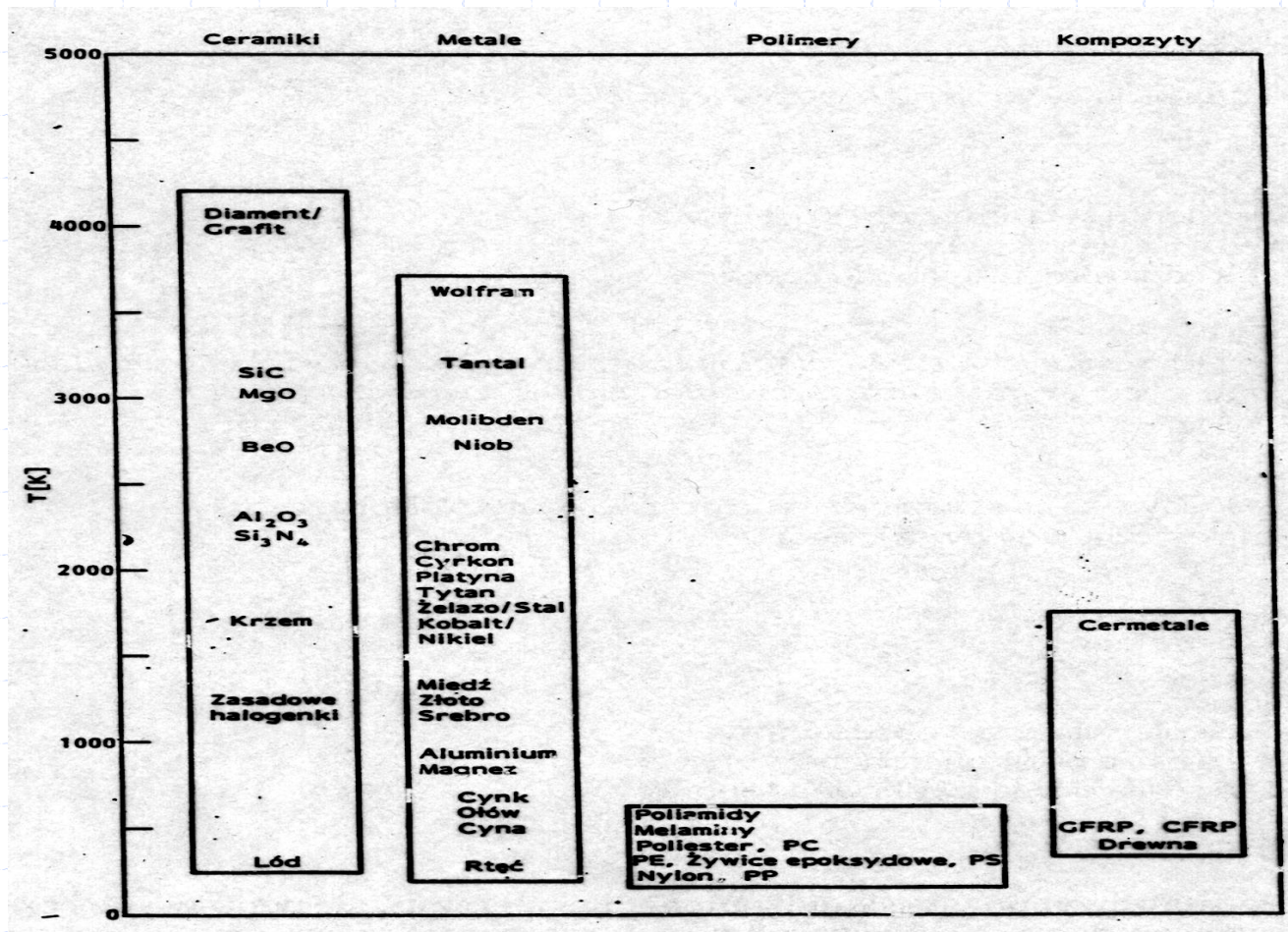
Materiał	T [K]	Materiał	T [K]
Diament, grafit	4000		
Wolfram	3680	Aluminium	933
Tantal	3250	Magnez	923
Węglik krzemu, SiC	3110	Szkło sodowe	700-900
Tlenek magnezu	3073	Cynk	692
Molibden	2880	Poliamid	580-630 ^(M)
Niob	2740	Ołów	600
Tlenek berylu, BeO	2700	Cyna	505
Tlenek aluminium, Al ₂ O ₃	2323	Melamina	400-450 ^(M)
Azotek krzemu, Si ₃ N ₄	2173	Poliestry	450-480 ^(M)
Chrom	2148	Poliwęglany	400 ^(M)
Cyrkon	2125	Polietylen – dużej gęstości	300 ^(M)
Platyna	2042	Polietylen – małej gęstości	360 ^(M)
Tytan	1943	Tworzywa piankowe, sztywne	300-380 ^(M)
Żelazo	1809	Epoksydy ogólnego przeznaczenia	340-380 ^(M)
Kobalt	1768	Polistyren	370-380 ^(M)
Nikiel	1726	Nylon	340-380 ^(M)
Cermetal	1700	Poliuretan	365 ^(M)
Krzem	1683	Akryl	350 ^(M)
Alkaliczne halogenki	800-1600	GFRP	340 ^(M)
Uran	1405	CFRP	340 ^(M)
Miedź	1356	Polipropylen	330 ^(M)
Złoto	1336	Lód	273
Srebro	1234	Rtęć	235

Temperatury topnienia lub mięknięcia różnych materiałów

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Stabilność termiczna materiałów



Temperatury topnienia lub mięknięcia różnych materiałów

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Pełzanie

- ❑ W podwyższonych temperaturach procesy dyfuzyjne w materiałach stają się tak intensywne, że mogą ich skutki wywoływać zmiany kształtu materiału pod wpływem niewielkich naprężeń
- ❑ Odkształcenie 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:
 - $T > 0,3 \text{ do } 0,4 T_m$ dla metali
 - $T > 0,4 \text{ do } 0,5 T_m$ dla ceramik

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Pełzanie

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

$$\varepsilon = f(\sigma, t, T) \text{ pełzanie}$$

W przeciwieństwie do pełzania odkształcenie sprężyste większości metali i ceramiki w temperaturze pokojowej praktycznie

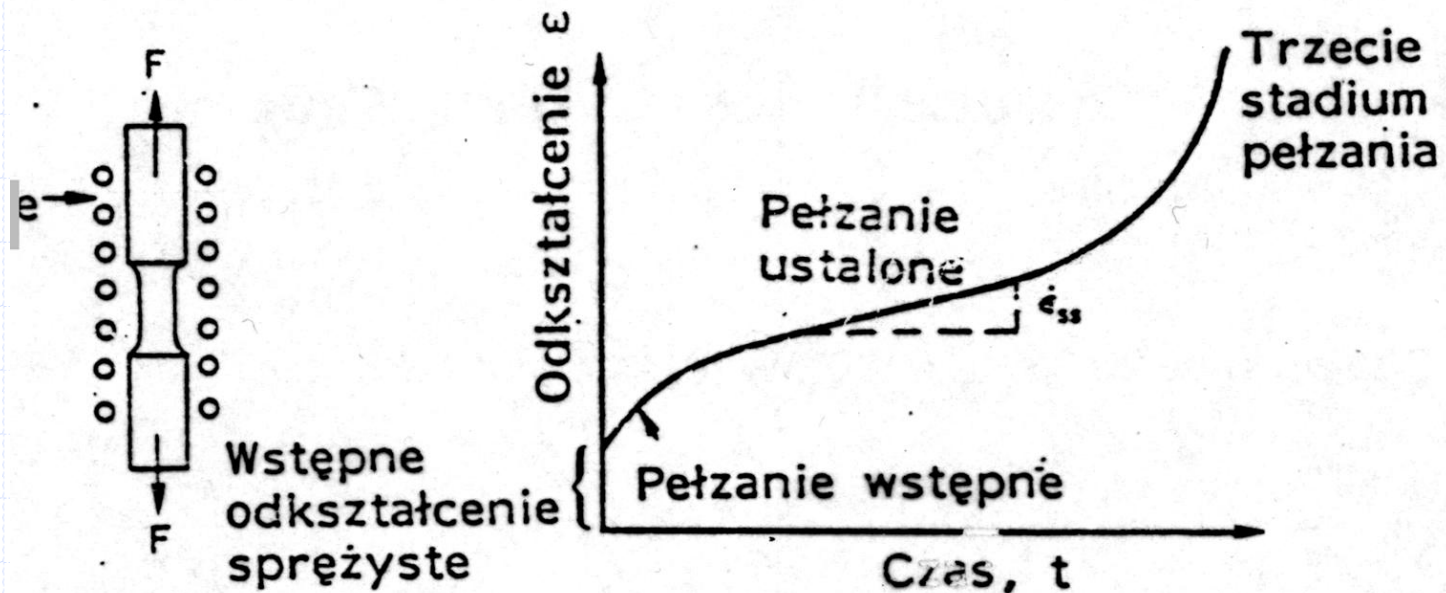
nie zależy od czasu

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

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Pełzanie



Charakterystyczna krzywa odkształcenia materiału w toku pełzania

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Pełzanie

W czasie pełzania ustalonego (II etap) szybkość pełzania jest stała

Równanie pełzania opisuje się zależnością analogiczną do odkształcenia lepkościowego

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

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:

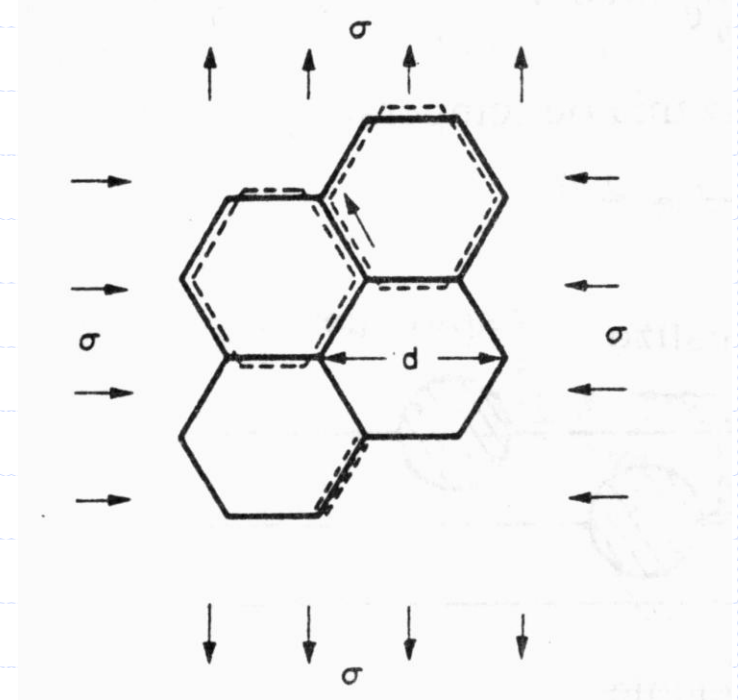
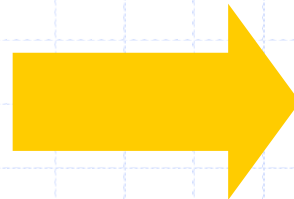
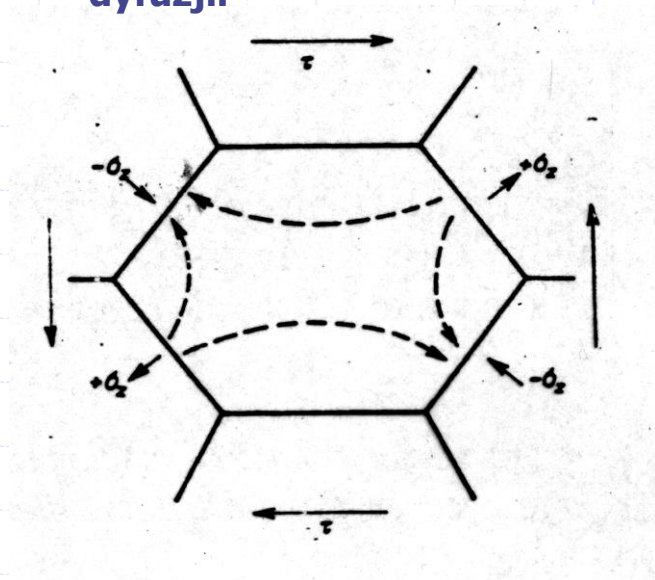
- I. Pełzanie Nabarro-Herringa typu dyfuzji objętościowej
- II. Pełzanie Cobla typu dyfuzji po granicach ziaren

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Pełzanie

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.

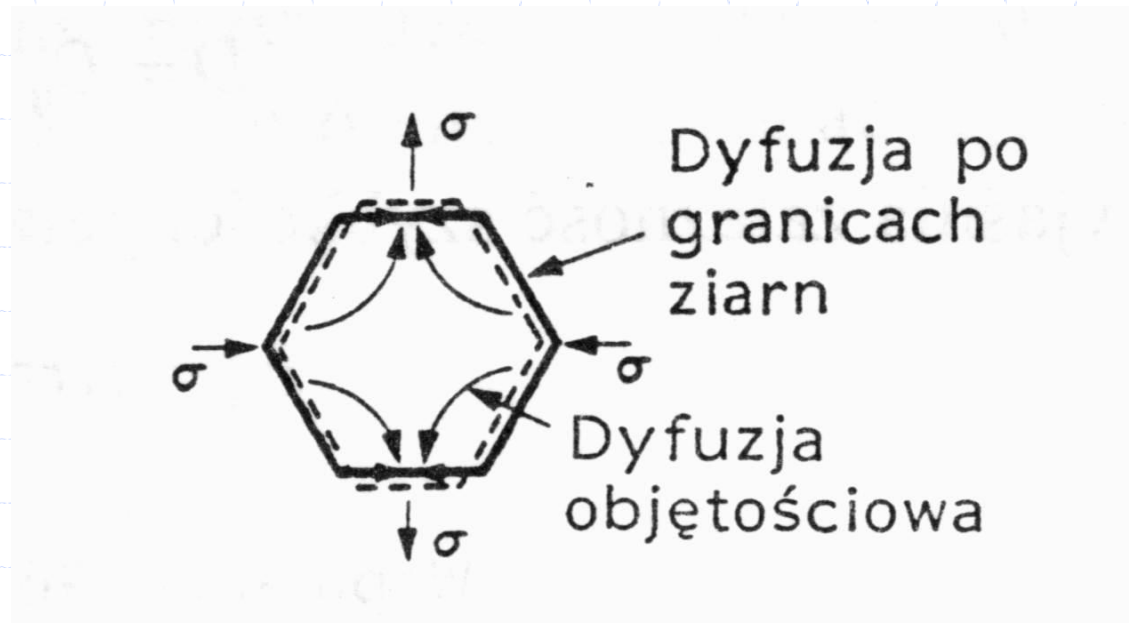


Procesy w toku pełzania w polikryształe

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Pełzanie



Pełzanie
Cobla

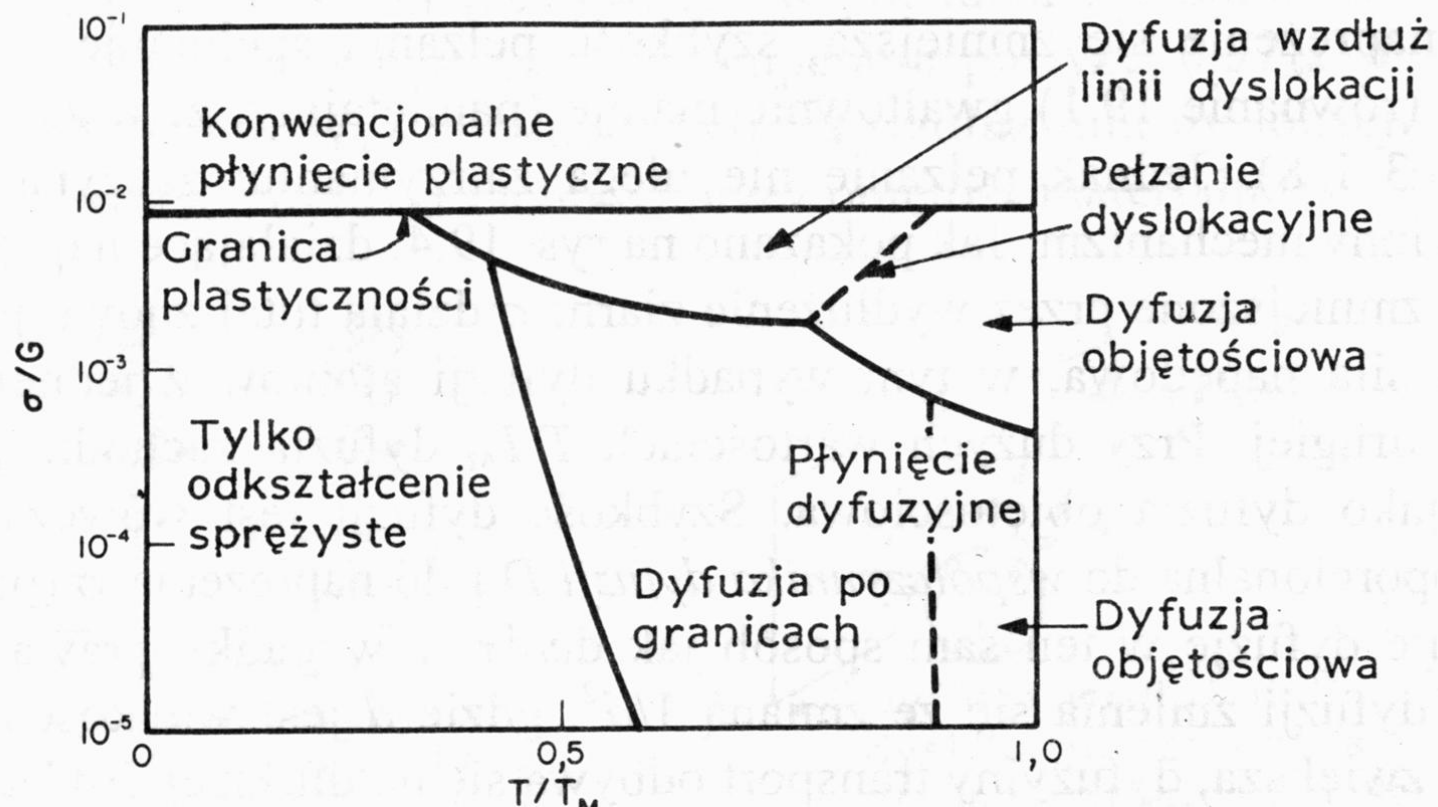
Pełzanie
Nabarro-
Herringa

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

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Pełzanie



Zależność mechanizmów pełzania od temperatury – mapy Ashby'ego

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Przewodnictwo ciepłe

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.

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Przewodnictwo cieplne

Przykłady współczynnika przewodnictwa cieplnego dla
wybranych materiałów

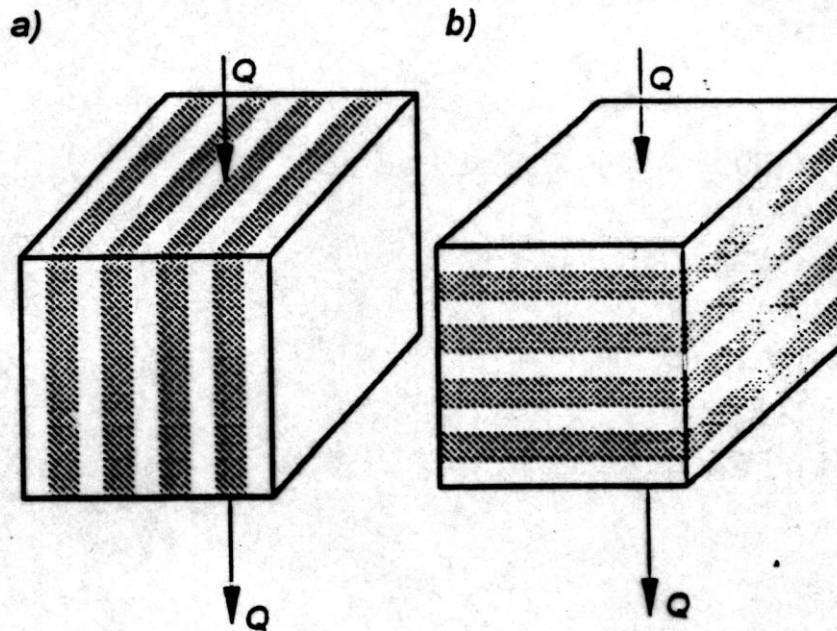
Rodzaj materiału	Współczynnik przewodnictwa cieplnego [W/mK]
Al	226
Ag	413
ZrO ₂	2
AlN	95-190
Si ₃ N ₄ ,	12-35
B ₄ C	40
SiC	110-180
TiB ₂	210
grafit	93-112
Diamant	2000

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Przewodnictwo ciepłe

Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych



Modele równoległy i szeregowy materiału wielofazowego

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Przewodnictwo cieplne

Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych

Jeśli przyływ 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.

$$\frac{1}{\lambda} = \sum_i \frac{V_i}{\lambda_i}$$

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:

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

gdy

$$\lambda_1 \gg \lambda_2$$

$$\lambda_m \approx \lambda_1 V_1$$

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Przewodnictwo cieplne

Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych

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

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

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

$$\lambda_1 \gg \lambda_2$$

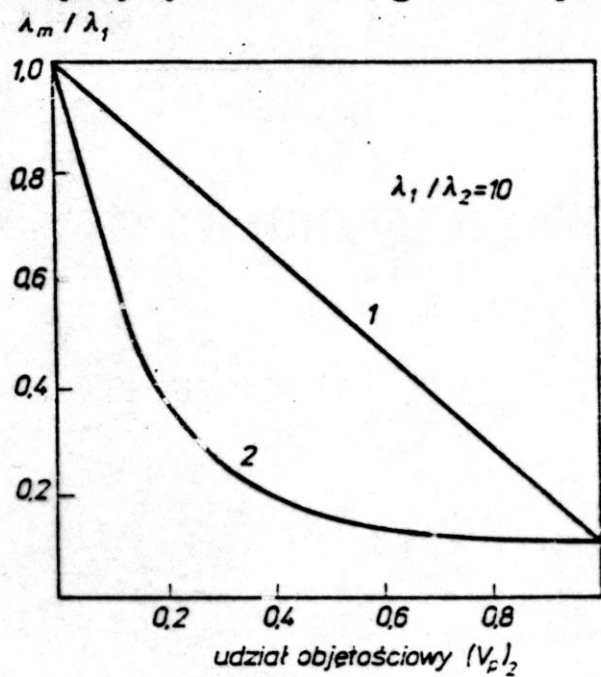
$$\lambda_m \approx \frac{\lambda_2}{V_2}$$

Nauka o materiałach

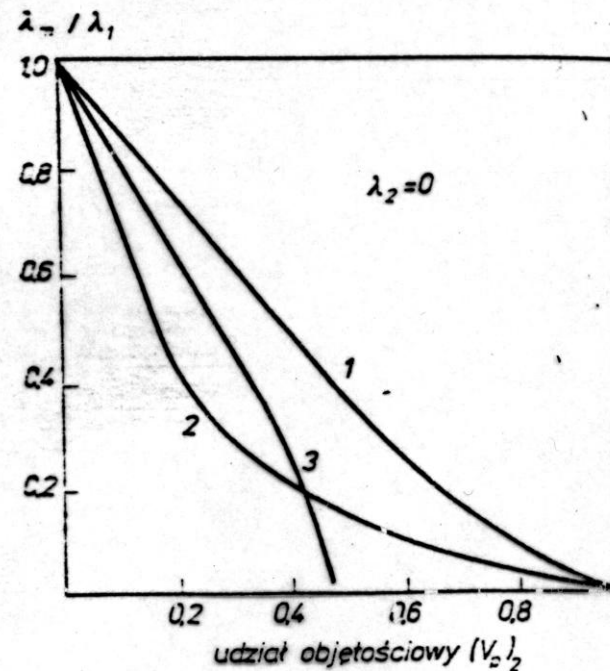
WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Przewodnictwo ciepłe

Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych



Przewodnictwo ciepłe dla: (1) modelu równoległego i (2) modelu szeregowego



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

Nauka o materiałach

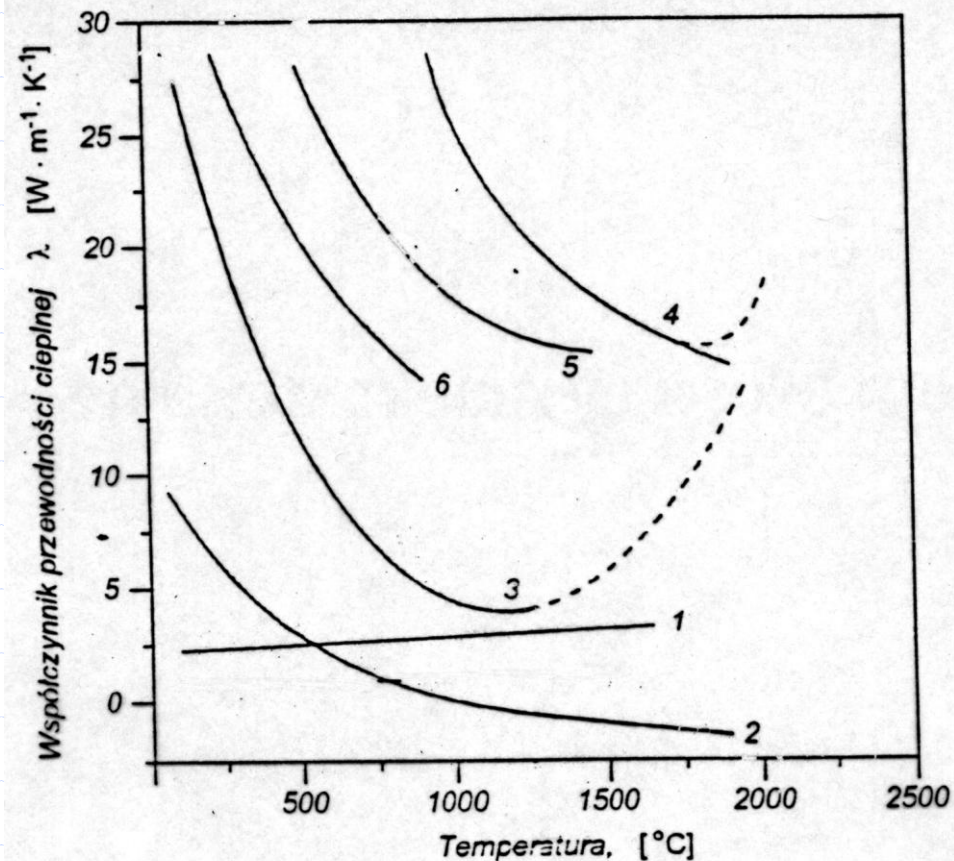
WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Przewodnictwo cieplne

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



Przewodnictwo cieplne dla:

1. $\text{ZrO}_2\text{-CaO}$
2. ThO_2
3. MgO
4. BeO
5. SiC
6. B_4C

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Rozszerzalność cieplna

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

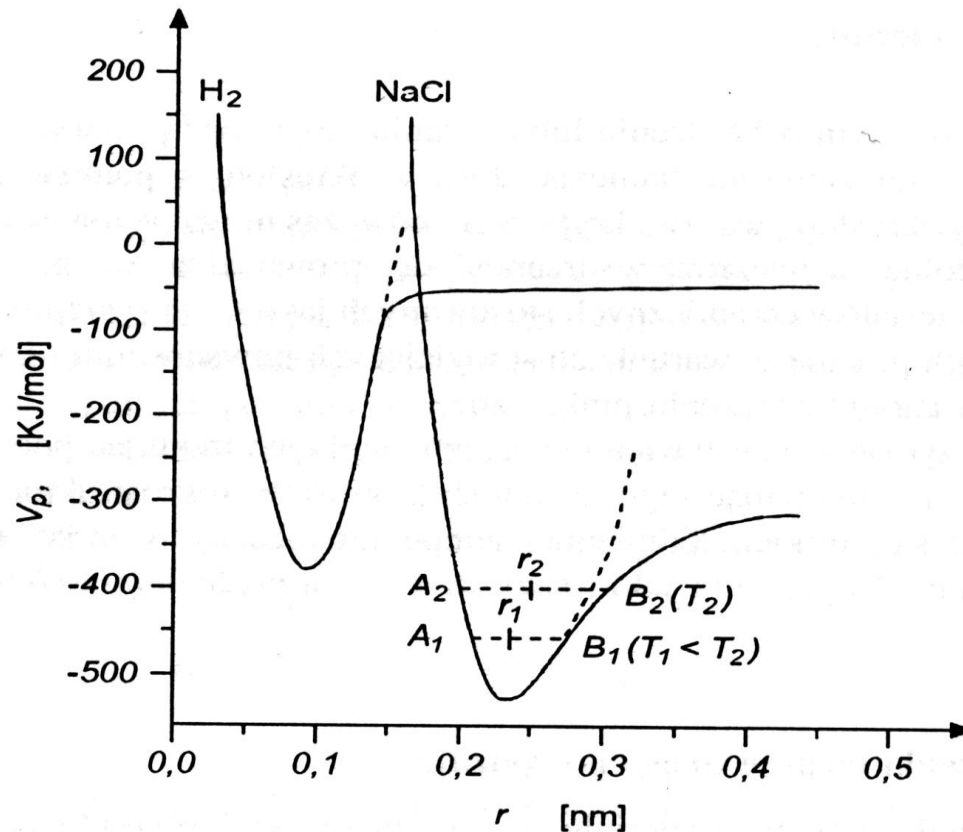
$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T}$$

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

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

WŁAŚCIWOŚCI 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:

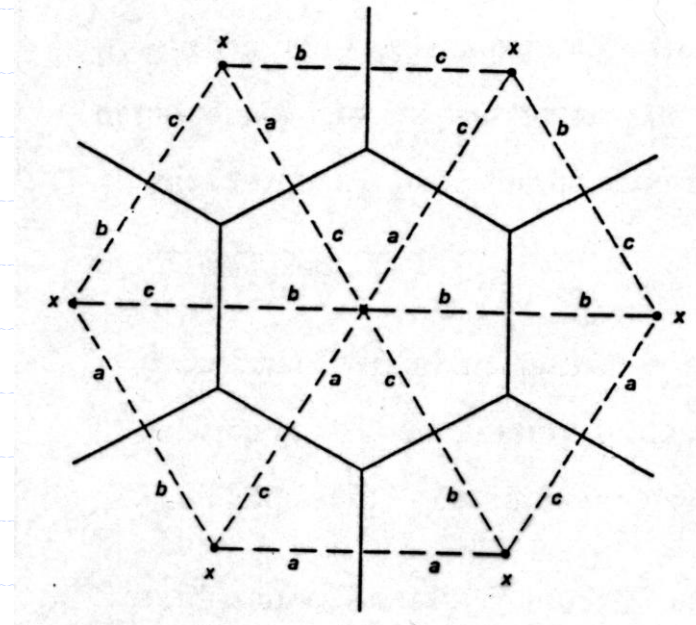
I rodzaju - naprężenia wynikają z anizotropii rozszerzalności poszczególnych ziaren lub anizotropii modułu Younga E

II rodzaju - naprężenia wynikające z nierównomiernego rozkładu temperatury w objętości

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Naprężenia cieplne I rodzaju

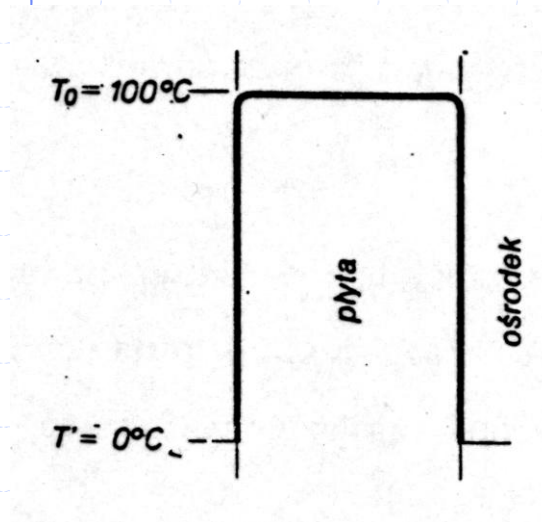


W polikryształach jedno lub wielofazowych mogą wystąpić naprężenia na granicach ziaren wskutek anizotropii α lub E

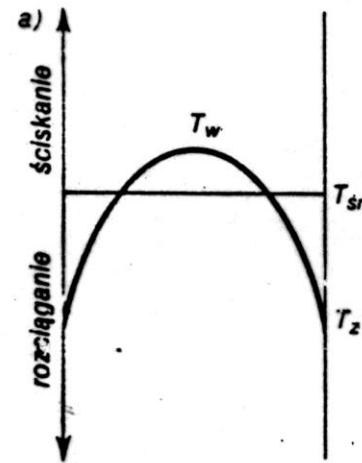
Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

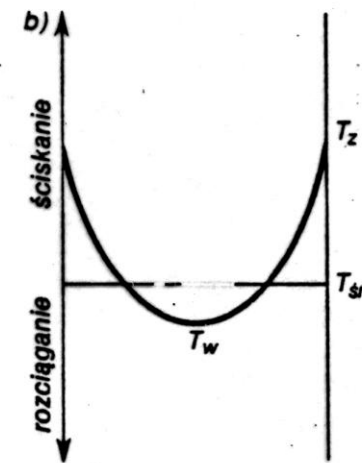
Naprężenia cieplne II rodzaju



Gwałtownie ochłodzona lub ogrzana płyta



Ochłodzenie



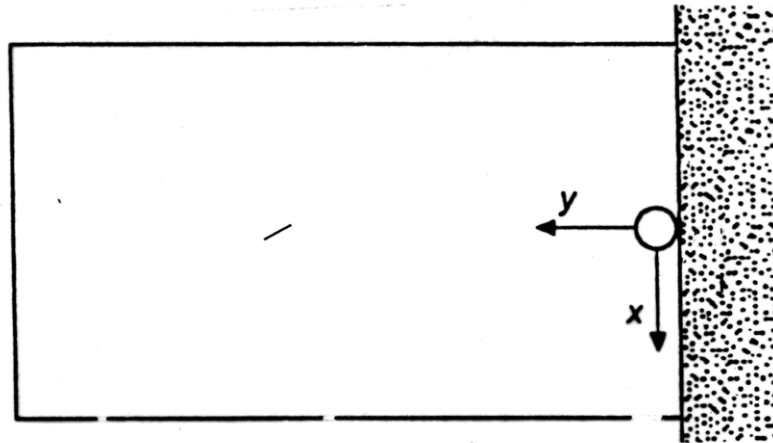
Ogrzanie

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Wstrząsy cieplne

Naprężenia cieplne w ujęciu modelowym



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

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

Wskutek sztywnego umocowania w płycie wystąpią naprężenia rozciągające w kierunku x

$$\sigma = \varepsilon E = E\alpha\Delta T$$

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

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

WŁAŚCIWOŚCI 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

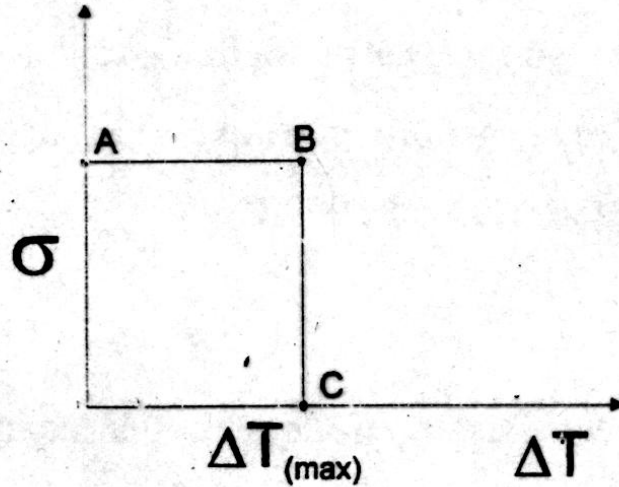
Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

Odporność na wstrząsy cieplne

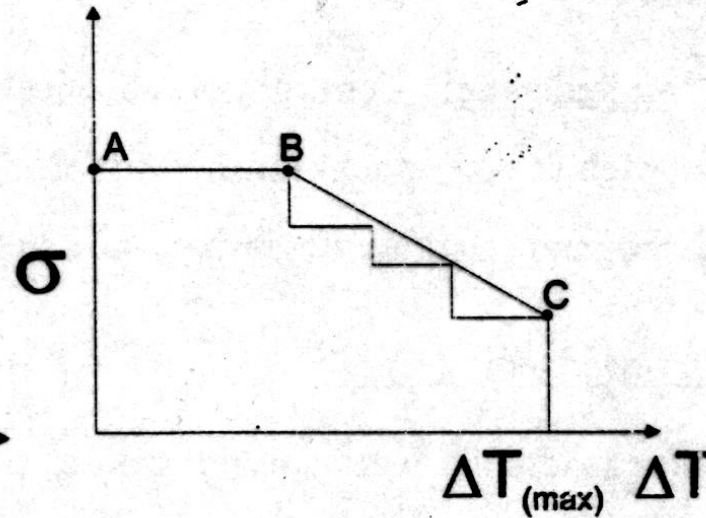
Krzywa Hasellmana – eksperymentalnie wyznaczona zależność wytrzymałości od wielkości wstrząsu cieplnego ΔT

a)



Szkło

b)

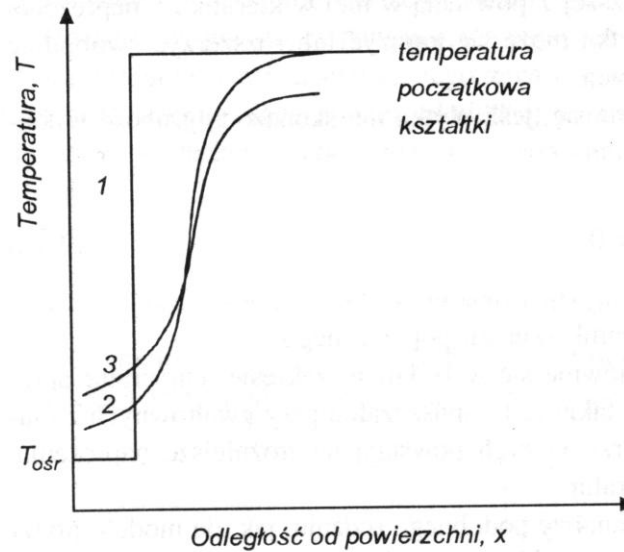


Polikryształ

Nauka o materiałach

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE

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

$\Delta T \uparrow$ gdy: $h \uparrow$; $\lambda \downarrow$; $r \downarrow$

Nauka o materiałach

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. :

$\beta < 1$ to
$$\Delta T = \frac{\sigma(1-\nu)}{E\alpha} \cdot \frac{3.25}{\beta}$$

Dziękuję

do zobaczenia za
tydzień