




---

---

---

---

---

---

---

---

Podstawy Nauki o Materiałach – Właściwości cieplne

Stabilność termiczna materiałów  
Temperatury topnienia lub mięknienia<sup>(M)</sup> różnych materiałów

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

---

---

---

---

---

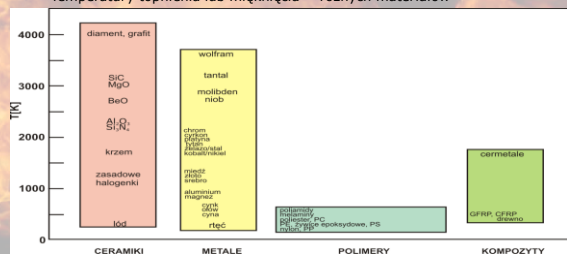
---

---

---

Podstawy Nauki o Materiałach – Właściwości cieplne

Stabilność termiczna materiałów  
Temperatury topnienia lub mięknienia<sup>(M)</sup> różnych materiałów




---

---

---

---

---

---

---

---

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

---

---

---

---

---

---

---

---

Pełzanie wysokotemperaturowe

- **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

$$\epsilon = f(\sigma, t, T) \quad \Leftarrow \text{pełzanie}$$

- W przeciwieństwie do pełzania odkształcenie sprężyste większości metali i ceramiki w temperaturze pokojowej praktycznie nie zależy od czasu

$$\epsilon = f(\sigma) \quad \Leftarrow \text{odkształcenie}$$

---

---

---

---

---

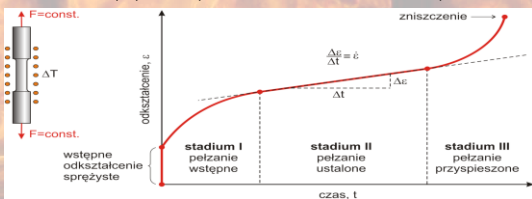
---

---

---

Pełzanie wysokotemperaturowe

Charakterystyczna krzywa odkształcenia materiału w toku pełzania




---

---

---

---

---

---

---

---

**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:

- a) Pełzanie Nabarro-Herringa typu dyfuzji objętościowej
- b) Pełzanie Cobla typu dyfuzji po granicach ziaren

---

---

---

---

---

---

---

---

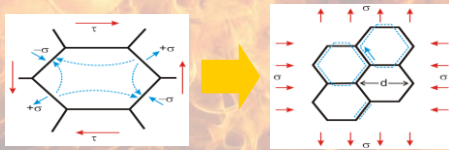
---

---

**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




---

---

---

---

---

---

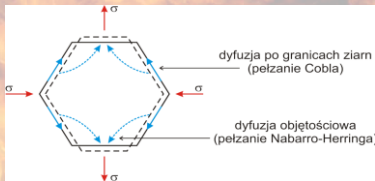
---

---

---

---

**Pełzanie wysokotemperaturowe**



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

---

---

---

---

---

---

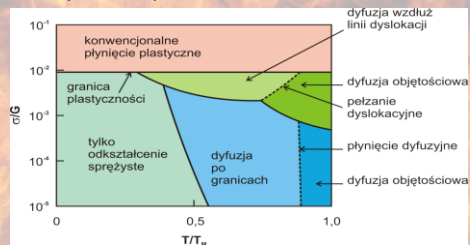
---

---

---

---

## Pełzanie wysokotemperaturowe



Zależność mechanizmów pełzania od temperatury - mapy Ashby'ego

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Przewodnictwo cieplne

## Przewodzenie ciepła

Gęstość strumienia ciepła przepływającego w jednostce czasu przez prostokątną 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  $\lambda$  - współczynnik przewodnictwa cieplnego. Jest to stała materiałowa zależna od temperatury.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Przewodnictwo cieplne

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

---

---

---

---

---

---

---

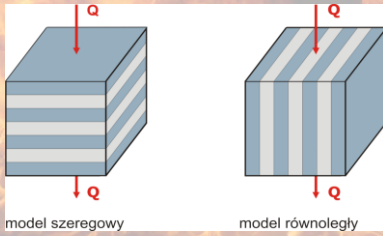
---

---

---

Przewodnictwo cieplne

Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych




---

---

---

---

---

---

---

---

Przewodnictwo cieplne

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:

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

gdzie:  
 $V_i$  – udział objętościowy i-tej fazy  
 $\lambda_i$  – przewodnictwo cieplne i-tej fazy  
 $\lambda_m$  – przewodnictwo cieplne całego układu

Dla układu dwufazowego równanie zapisujemy w następującej postaci:

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

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

---

---

---

---

---

---

---

---

Przewodnictwo cieplne

Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych

Jeśli przepływ 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  
 $\lambda_i$  – przewodnictwo cieplne i-tej fazy  
 $\lambda_m$  – 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:  $\lambda_m \approx \frac{\lambda_2}{V_2}$

---

---

---

---

---

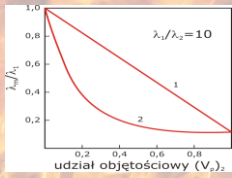
---

---

---

Przewodnictwo cieplne

Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych



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



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

---

---

---

---

---

---

---

---

---

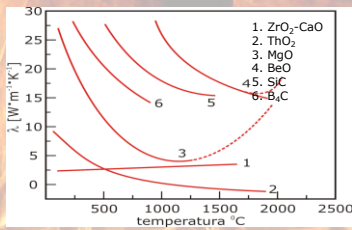
---

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




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

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 <sup>-1</sup> ·10 <sup>-6</sup> ]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,5
MgO	13,5
AlN	5,6
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3,0
Sialon	1,7
B <sub>4</sub> C	4,5
β-SiC	3,9
α-SiC	4,5
WC	5,1

---

---

---

---

---

---

---

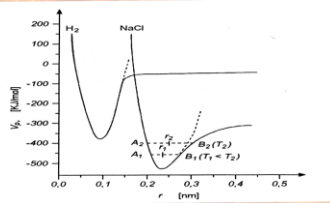
---

---

---

### 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.




---

---

---

---

---

---

---

---

### Wstrząs cieplny

#### Naprężenia cieplne

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

Efektom 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

---

---

---

---

---

---

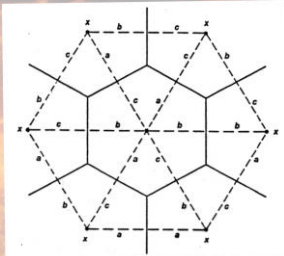
---

---

### Wstrząs cieplny

#### Naprężenia cieplne I rodzaju

W polikryształach jedno lub wielofazowym mogą wystąpić naprężenia na granicach ziaren wskutek anizotropii  $\alpha$  lub E




---

---

---

---

---

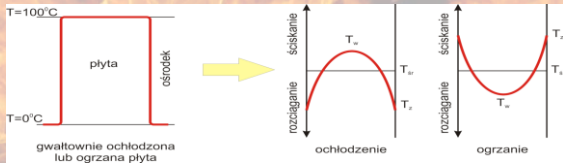
---

---

---

### Wstrząs cieplny

Naprężenia cieplne II rodzaju




---

---

---

---

---

---

---

---

### Wstrząs cieplny

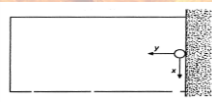
Naprężenia cieplne w ujęciu modelowym

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:

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




---

---

---

---

---

---

---

---

### Wstrząs cieplny

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

$\Delta T = \Delta T_{\max}$  gdy  $\sigma_{\text{cieplne}} = \sigma_{\text{wytrzymałość}}$   
 w ujęciu modelowym:

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

$\Delta T_{\max}$  rośnie gdy:

- rośnie wytrzymałość
- maleje rozszerzalność cieplna
- maleje E

---

---

---

---

---

---

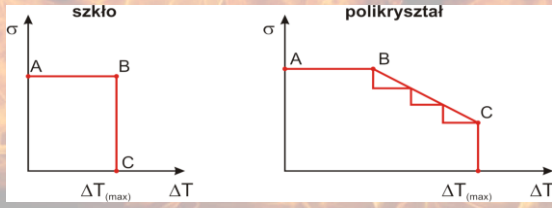
---

---



Wstrząs cieplny

Krzywa Hasellmana – eksperymentalnie wyznaczona zależność wytrzymałości od wielkości wstrząsu cieplnego  $\Delta T$




---

---

---

---

---

---

---

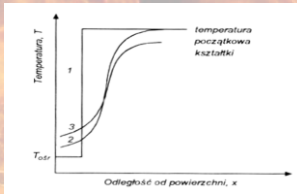
---

Wstrząs cieplny

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

- współczynnika wnikania ciepła do materiału ( $h$ )
- współczynnika przewodnictwa cieplnego ( $\lambda$ )
- wymiarów kształtki ( $r$ )

$\Delta T$  rośnie gdy:  
 $h$  rośnie,  $\lambda$  maleje,  $r$  maleje




---

---

---

---

---

---

---

---

Wstrząs cieplny

W warunkach niestacjonarnego przepływu warunki cieplne określa tzw. liczba Biota  $\beta$

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

Naprężenia cieplne są funkcją liczby Biota

Funkcja ta ma różną postać w zależności od wielkości  $\beta$  np.: gdy  $\beta < 1$  to:

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

---

---

---

---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---