



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

## NAUKA O MATERIAŁACH

### Wykład X: Właściwości cieplne

JERZY LIS  
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki  
Katedra Ceramiki i Materiałów Ogniotrwiałych

---

---

---

---

---


---

---

---

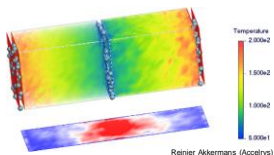
---

---



### Treść wykładu:

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



NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



### Stabilność termiczna materiałów

#### Temperatury topnienia lub mięknięcia<sup>(M)</sup> różnych materiałów

| Materiał   | T [ °K] | Materiał             | T [ °K]                | Materiał                        | T [ °K]                |
|--|---------|----------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|
| diamant, grafit                                  | 4000    | żelazo               | 1809                   | poliestry                       | 450-480 <sup>(M)</sup> |
| wolfram  | 3680    | kobalt               | 1768                   | poliwęglany                     | 400 <sup>(M)</sup>     |
| tantal   | 3250    | nikel                | 1726                   | polietylen – mała gęstość       | 360 <sup>(M)</sup>     |
| węgiel krzemowy, 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 ogólnego przeznaczenia | 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                    | GFRP                            | 340 <sup>(M)</sup>     |
| cyrkon   | 2125    | magnez               | 923                    | CFRP                            | 340 <sup>(M)</sup>     |
| platyna  | 2042    | szkło sodowe         | 700-900                | polipropylen                    | 330 <sup>(M)</sup>     |
| tytan  | 1943    | cynek                | 692                    | lód                             | 273                    |
|  |         | poliamid             | 580-630 <sup>(M)</sup> | rtęć                            | 235                    |

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

---

---

---

---

---

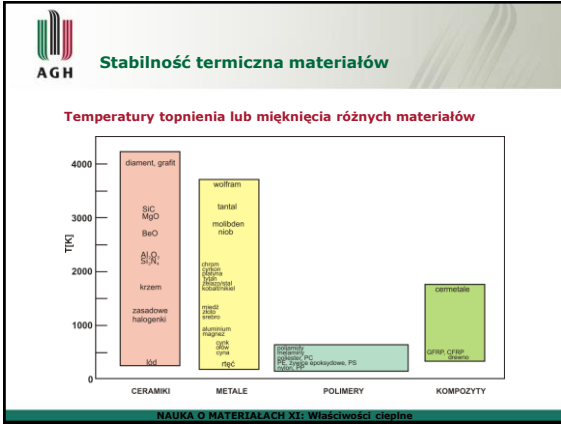
---

---

---

---

---




---



---



---



---



---



---



---



---

**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 odształcenia (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 XI: Właściwości cieplne

---



---



---



---



---



---



---



---

**AGH Treść wykładu:**

- Pełzanie jest to powolne i ciągłe odształcenie materiału w czasie pod wpływem niewielkich naprężeń niższych od granicy plastyczności.
- Wielkość odształcenia zależy od naprężenia temperatury i czasu  
 $\epsilon = f(\sigma, t, T) \Leftrightarrow$  pełzanie
- W przeciwieństwie do pełzania odształcenie sprężyste większości metali i ceramik w temperaturze pokojowej praktycznie nie zależy od czasu  
 $\epsilon = f(\sigma) \Leftrightarrow$  odształcenie sprężyste

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

---



---



---



---



---



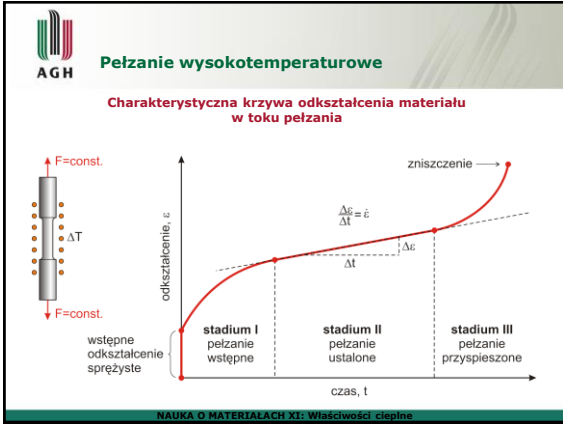
---



---



---




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

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

---

---

---

---

---

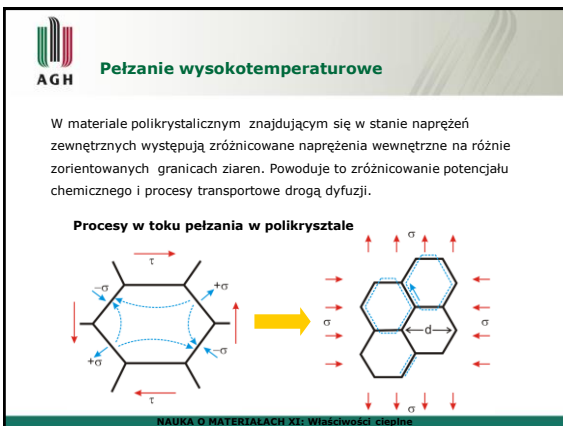
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** **Pełzanie wysokotemperaturowe**

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

---

---

---

---

---

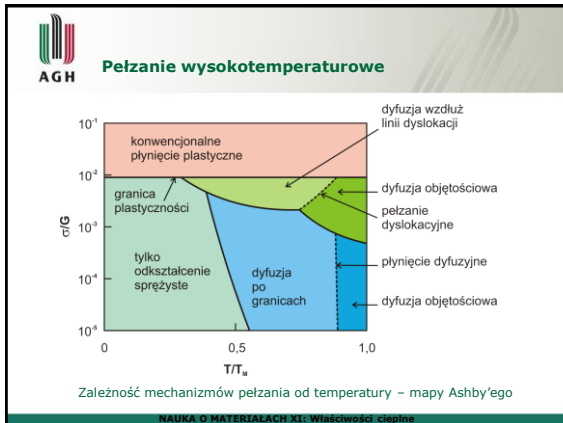
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**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  $\lambda$ - 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 <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                                     |
| 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  
 $\lambda_i$  – przewodnictwo ciepłe i-tej fazy  
 $\lambda_m$  – 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:

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

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

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Przewodnictwo ciepłe**

**Przewodzenie ciepła w materiałach wielofazowych**

$\lambda_1/\lambda_2 = 10$

$\lambda_2 = 0$

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. ZrO2-CaO  
 2. TiO2  
 3. MgO  
 4. BeO  
 5. SiC  
 6. B4C

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** 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 <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>2</sub> C               | 4,5   |
| β-SiC                          | 3,9   |
| α-SiC                          | 4,5   |
| WC                             | 5,1   |

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** Rozszerzalność cieplna

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

Efekt ten jest tym większy im mniejsza jest siła wiązania.

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** Odporność na wstrząsy cieplne

**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

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  $\alpha$  lub  $E$

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

---

---

---

---

---

---

---

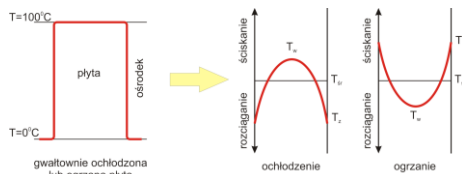
---

---

---

**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**

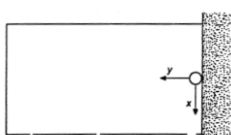
**Naprężenia ciepłe w ujęciu modelowym**

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:

$\Delta T = \Delta T_{\max}$  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

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** **Odporność na wstrząsy cieplne**

szkło                      polikryształ

σ                              σ

A B                              A B C

ΔT                              ΔT

ΔT<sub>(max)</sub>                      ΔT<sub>(max)</sub>                      ΔT

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)

Temperatura, T

1                              temperatura początkowa kształtki

3                              2

T<sub>0(t)</sub>

Odstępek od powierzchni, x

$\Delta T$  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  $\beta$

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

Naprężenia cieplne są funkcją liczby Biota

Funkcja ta ma różną postać w zależności od wielkości  $\beta$   
np.:

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

NAUKA O MATERIAŁACH XI: Właściwości cieplne

---

---

---

---

---

---

---

---



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZCZA W KRAKOWIE

**NAUKA O MATERIAŁACH**

**Dziękuję.**

JERZY LIS  
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki  
Katedra Ceramiki i Materiałów Ogniotrwałych

---

---

---

---

---

---

---

---