

# Bevezetés az anyagtudományba

## IX. előadás

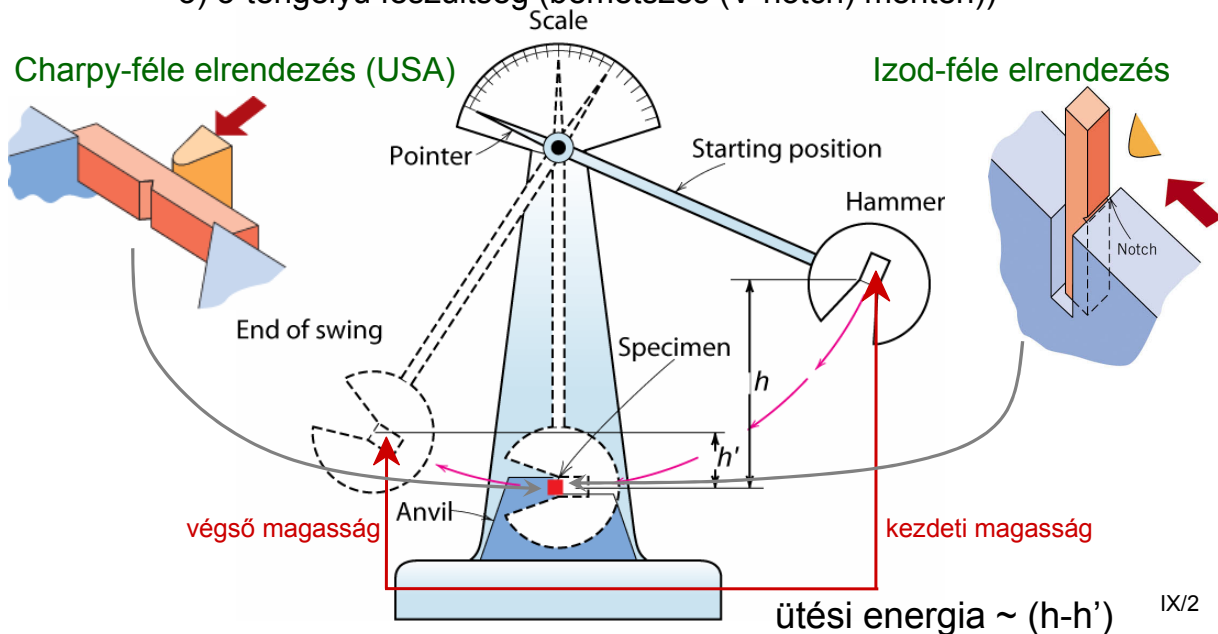
2010. április 1.

### Bemetszéses ütőpróba

A törés természetét vizsgáló szilárdsági vizsgálat:

egyszerűen megvalósítható, de *kvalitatív* (→ összehasonlításra jó)  
az anyag számára legelőnytelenebb körülmények között hajtjuk végre

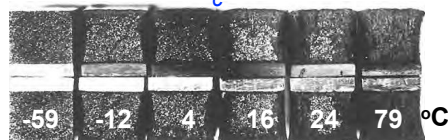
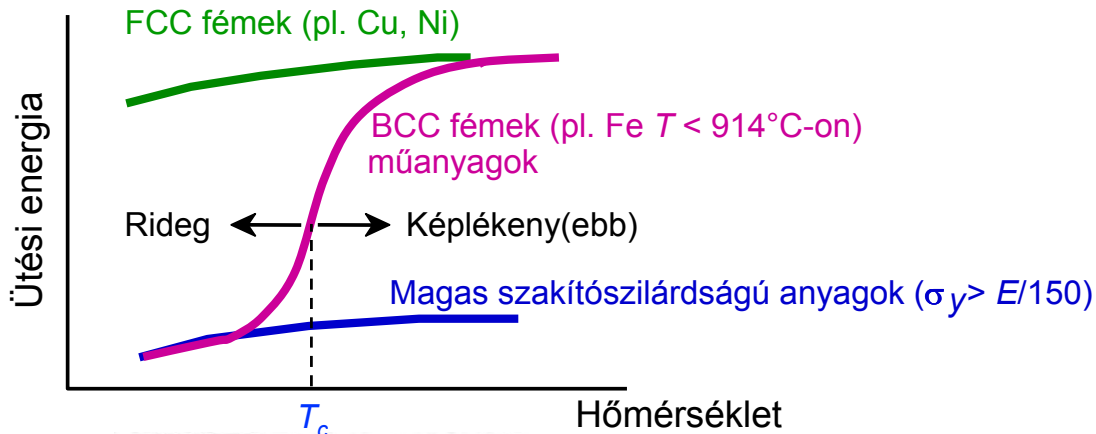
- 1) alacsony hőmérséklet,
- 2) nagy deformációs sebesség (ütésszerű igénybevétel),
- 3) 3-tengelyű feszültség (bemetszés (V-notch) mentén))



# Képlékeny-rideg átmeneti hőmérséklet

## Növekvő hőmérséklettel

nő a duktilitás (pl. %EL) és ezzel együtt a képlékeny-rideg átmenethez tartozó kritikus hőmérséklet,  $T_c$  (DBTT, ductile-to-brittle transition temperature)

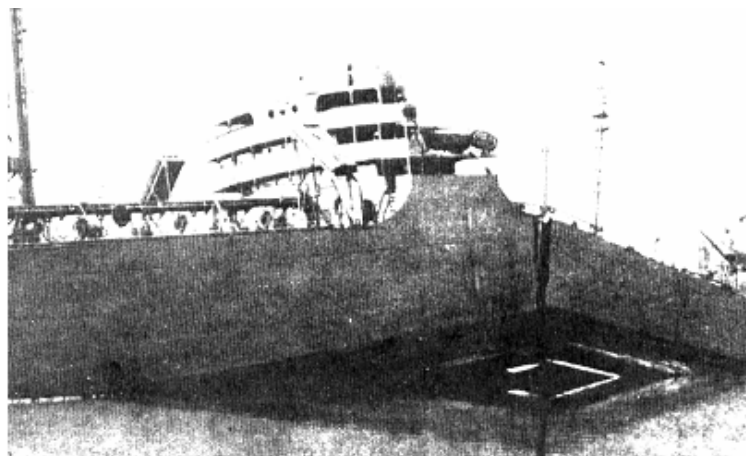


pl. A34 acél

pontos helyzete, azaz hogy  $T_c$  az átmeneti tartományon belül hol van, megállapítás kérdése; minél konzervatívabb egy szabvány, annál magasabb hőmérsékletre helyezi  $T_c$ -t

IX/3

## Ne használd az anyagot átmeneti hőmérséklete alatt!



A II. világháború "Liberty" sorozatú hajói olyan acélból készültek, melynek  $T_c \approx 20^\circ\text{C}$ . A  $4^\circ\text{C}$  körüli hőmérsékletű vizekben ezek rendszeresen "derékba törtek".

IX/4

# Kifáradás 1/2

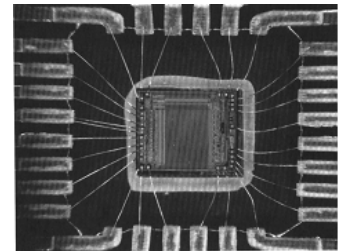
- **Kifáradás** = **ciklikus** (dinamikus, fluktuáló) feszültség hatására bekövetkező szakadás.



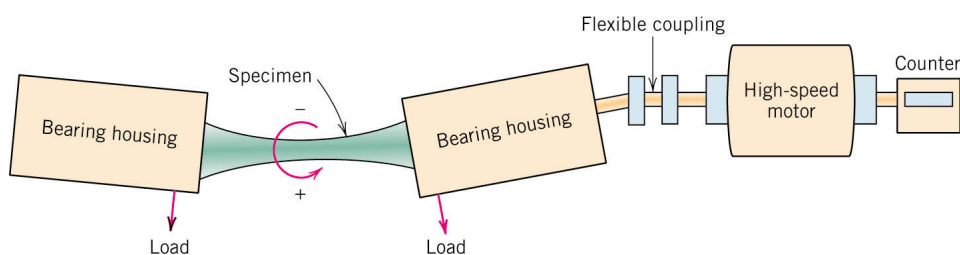
**Csípő protézis**  
ciklikus terhelés (járás).



**Hajó**  
ciklikus hullámterhelés.

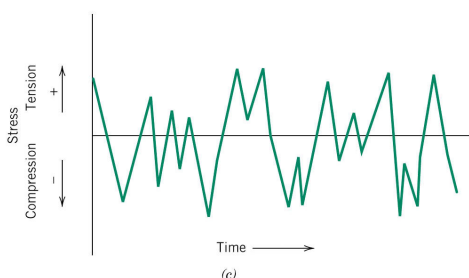
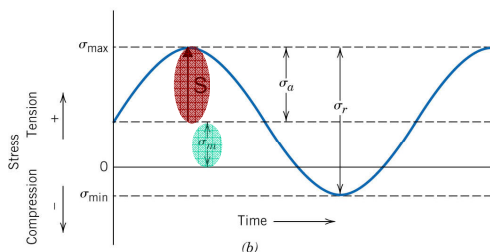
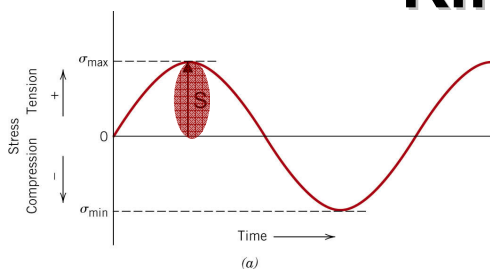


**Számítógép chip**  
ciklikus hőterhelés.



IX/5

# Kifáradás 2/2



A feszültség időben változik  
- kulcs paraméterek **S**,  $\sigma_m$ , és a frekvencia

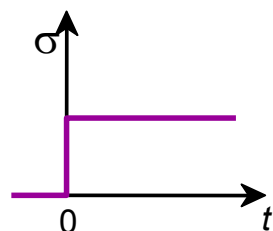
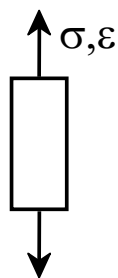
A kifáradás...

- akkor is szakadáshoz vezethet, ha  $\sigma_{max} < \sigma_c$ .
- a mechanical balesetek 90%-át okozza.

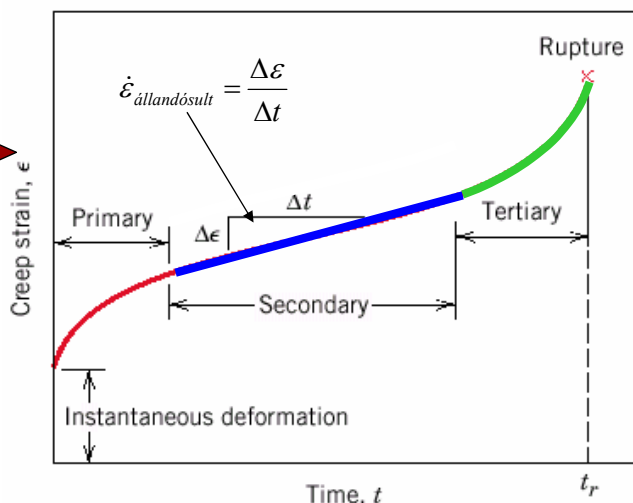
IX/6

# Kúszás, hidegfolyás 1/2

A minta magasabb hőmérsékleten, állandó  $\sigma$  feszültség hatására bekövetkező deformációjának időfüggését írja le.



A pillanatszerű deformációt követően a kúszásgörbe a következő szakaszokra bontható:



**Elsődleges kúszás:** a meredekség, vagy kúszási sebesség idővel csökken. (oka def. keményedés)

**Másodlagos kúszás:** állandósult, azaz állandó meredekségű/sebességű szakasz. (a def. keményedés és a megújulás kiegyenlített)

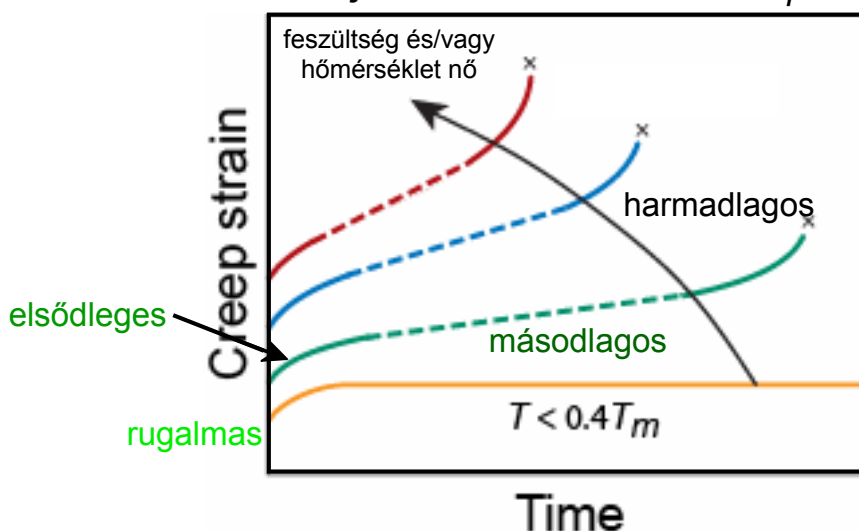
**Harmadlagos kúszás:** a meredekség, vagy kúszási sebesség idővel nő.

A kúszás jellemzői: a másodlagos, vagy állandósult kúszási sebesség ( $\dot{\epsilon}_{\text{állandósult}}$ ) és a kúszási élettartam, vagy szakadási idő ( $t_r$ ).

IX/7

# Kúszás 2/2

Fémek esetén akkor jelentős, ha  $T > 0.4 T_{op}$ .



$$\dot{\epsilon}_{\text{állandós}} = K_2 \sigma^n e^{\frac{Q}{RT}}$$

$\dot{\epsilon}_{\text{állandós}}$ : kúszási seb.  
 $K_2$ : konst.  
 $\sigma$ : alkalmazott feszültség  
 $n$ : feszültség kitevő (anyagi jellemző)  
 $Q$ : a kúszás aktivációs energiája (anyagi jellemző)  
 $R$ : gázállandó  
 $T$ : hőmérséklet

IX/8

# Hőtani alapok

Termikus tulajdonságok:

hogyan válaszol az anyag a hőközlésre.

Viselkedés különböző hőmérsékleteken, illetve kölcsönhatás

⇒ hőátadás/melegedés.

Mennyi hő szükséges egy adott válaszhoz: **hőkapacitás**

Hogyan (milyen gyorsan) reagál az anyag: **hővezetőképesség**

Milyen hatása van a hőközlésnek a méretre: **hőtágulás**

IX/9

## Hőkapacitás

Általánosan: Az anyag hőfelvevő/hőelnyelő képességének mértéke.  
Számértéke: A hőmérséklet 1 K-nel történő emeléséhez szükséges hőmennyiség.

$$\text{Hőkapacitás (J/K)} \rightarrow C = \frac{dQ}{dT}$$

(Hő)energia bevitel (J)

Hőmérsékletváltozás (K)

A hőközlés két módja: V vagy p állandó

$C_v$ : Állandó térfogaton mért hőkapacitás ⇒ belső energia

$C_p$ : Állandó nyomáson mért hőkapacitás ⇒ belső energia + térfogati munka

$$C_p > C_v$$

Tökéletes gázok esetében a kétféle **moláris** hőkapacitás közötti különbség az egyetemes gázállandó,  $c_p - c_v = R$  (8,314 J/mol·K) értékével egyenlő, szilárdtestek esetén (szobahőmérsékleten) az eltérés elhanyagolható.

IX/10

# Fajlagos hőkapacitás

A **fajlagos hőkapacitás** (régi nevén *fajhő*), megadja, hogy mennyi hőt kell közölni egységnyi **tömegű** anyaggal ahhoz, hogy hőmérséklete egy fokkal megemelkedjék.

Jele:  $c$ , mértékegysége:  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ .

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT} \quad \text{ahol } m \text{ a rendszer tömege.}$$

A **moláris hőkapacitás** (régi nevén *mólhő*), megadja, hogy mennyi hőt kell közölni egységnyi **anyagmennyiségű** anyaggal ahhoz, hogy hőmérséklete egy fokkal megemelkedjék.

Jele:  $c_m$ , mértékegysége:  $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ .

$$c_n = \frac{dQ}{n \cdot dT} \quad \text{ahol } n \text{ a rendszer anyagmennyisége.}$$

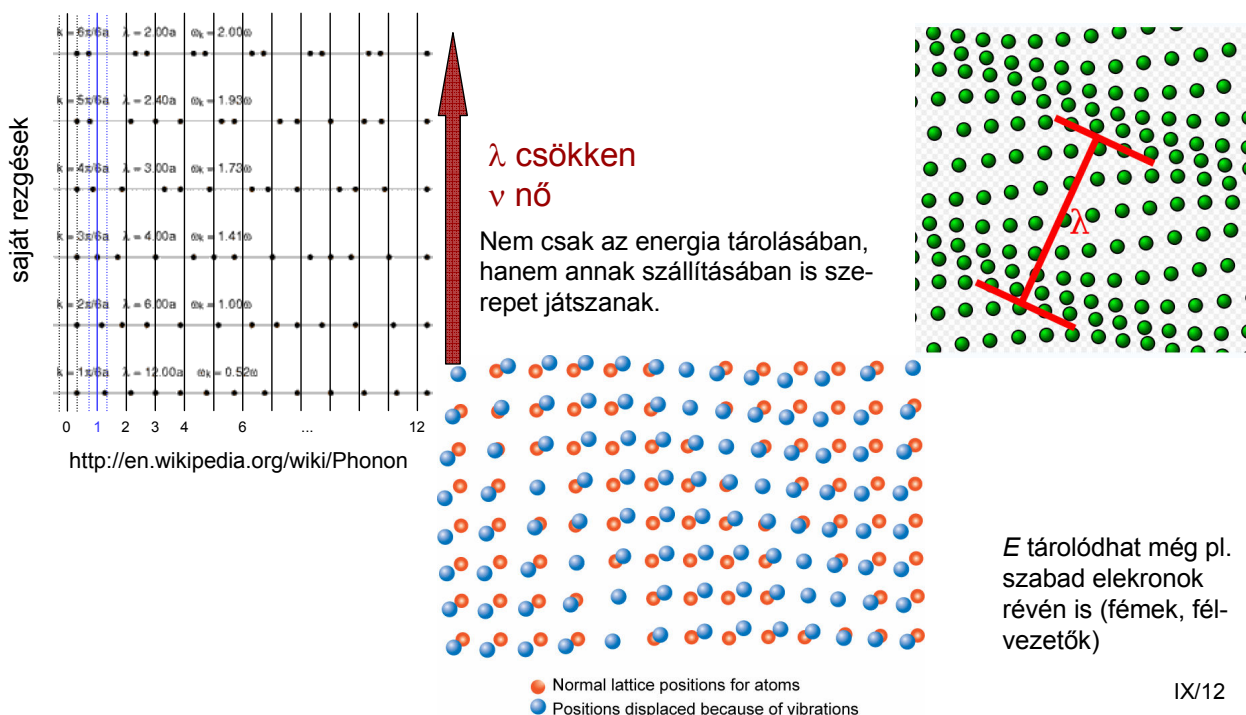
IX/11

# Rácsrezgések – Fononok

## (Hogyan raktározódik a hőenergia az anyagban?)

A rácsrezgések rugalmas hullámok, amelyek az adott anyagbeli hangsebességgel terjednek.

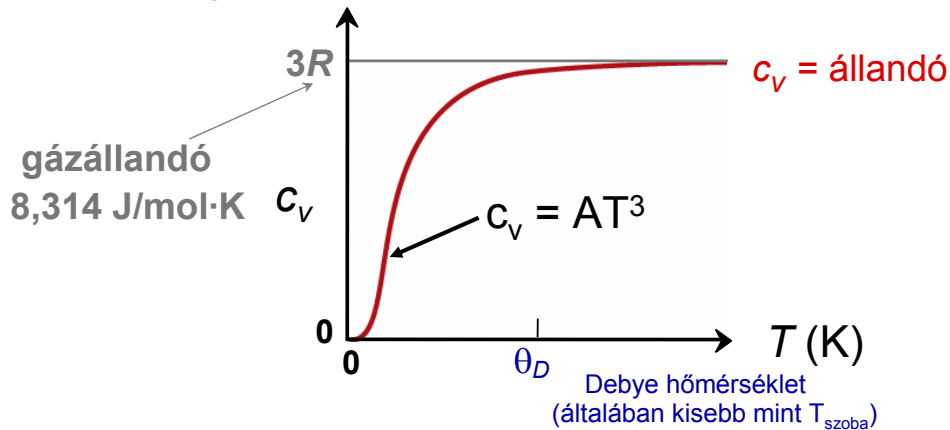
**Fonon:** a rácsrezgések kvantuma (néha maga a hullám)



IX/12

# A hőkapacitás hőmérsékletfüggése

A(z állandó térfogaton mért) hőkapacitás a hőmérséklet növekedésével  $3R$ -ig nő.



a legtöbb szilárd anyagra:  $c_v(T = 298K) \approx 25 \frac{J}{mol \cdot K}$

Az atomi kép:

Az energia rácsrezgések formájában tárolódik.

A  $T$  növekedésével a rezgések átlagos energiája nő.

IX/13

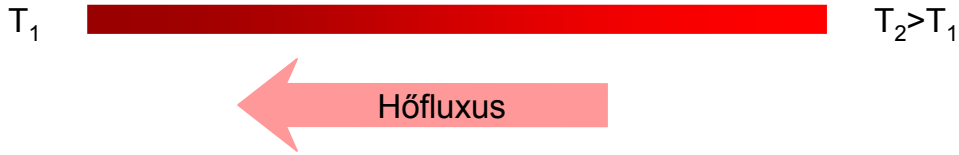
## Néhány anyag fajlagos hőkapacitása

	$c_p$ (J/kg·K) (szobahőmérsékleten)
• <u>Polimerek</u>	Polipropilén 1925
	Polietilén 1850
	Polisztirén 1170
	Teflon 1050
• <u>Kerámiák</u>	Magnézium-oxid (MgO) 940
	Korund ( $Al_2O_3$ ) 775
	Üveg 840
• <u>Fémek</u>	Alumínium 900
	Acél 486
	Volfrám 138
	Arany 128

növekvő  $c_p$

IX/14

# Hővezetőképesség



A **hővezetőképesség** ( $\lambda$ ) azt mondja meg, hogy az anyag két, egymással párhuzamos, egymástól  $L$  távolságban levő sík rétege között, egységnyi  $A$  felületen másodpercenként mekkora  $Q$  hőmennyiség áramlik át 1 K hőmérsékletkülönbség ( $\Delta T$ ) hatására.

hővezetőképesség = hőmennyiség  $\times$  távolság / (felület  $\times$  hőmérséklet különbség)

$$\lambda = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta T} = \frac{q}{\frac{dT}{dx}} \quad [Q]=W$$

A hővezetőképesség mértékegysége:  $[\lambda]=J/(m \cdot K \cdot s)$ , azaz  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , v.  $W/(m \cdot K)$ .

Szokásos:

hőfluxus,  $q$  ( $J/m^2 \cdot s$ ) = - hővezetőképesség ( $J/m \cdot K \cdot s$ )  $\cdot$  hőmérsékletgradiens ( $K/m$ )

$$q = -\lambda (\Delta T / \Delta x) \quad (\text{angol irodalom: } \lambda \equiv k)$$

IX/15

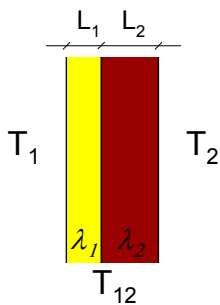
Feladat:

Mekkora a lyukacsos téglá és az expandált polisztirol (EPS)  $\lambda$ -ja? Miként viselkedik egy olyan fal, melynél 38cm-es téglát 8cm vastag EPS-sel szigetelünk?

Építőipari anyagok adatlapjai szerint a hővezetőképességek a következők:

$$\lambda_{\text{téglá}} = 0.143 \frac{W}{mK} \quad \text{pl. Porotherm 38 HS}$$

$$\lambda_{\text{EPS}} = 0.048 \frac{W}{mK} \quad \text{pl. Austrotherm AT-N30}$$



Vizsgáljuk meg miként viselkedik hővezetőképesség szempontjából az ábrán látható rendszer, mely két egymással érintkező rétegből áll, melyek vastagságai és hővezetőképességei rendre  $L_1$ ,  $L_2$ , illetve  $\lambda_1$  és  $\lambda_2$ . Ha  $T_1 > T_2$ , az energia az ábrán balról jobbra terjed.

A hővezetőképességet definiáló egyenletből az időegység alatt átáramló energiát kifejezve:

$$\lambda = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta T} \quad \longrightarrow \quad Q = \lambda \cdot A \frac{\Delta T}{L}$$

Stacionárius állapotban a rétegek bármely felületén időegység alatt ugyanannyi energia kell átáramoljon. Ha nem így lenne, akkor bizonyos pontokban az energia felhalmozódhatna, vagy eltűnhetne. Ennek következtében az is igaz, hogy stacionárius állapotban egy időben állandó hőmérsékleteloszlás alakul a rendszer két szélső felülete, azaz a  $T_1$ , illetve  $T_2$  hőmérsékletű síkok között.

IX/16

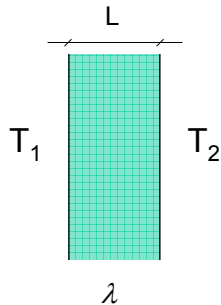


Ha  $T_{12}$ -vel jelöljük a téglá-eps határfelület közös hőmérsékletét

$$Q_1 = \lambda_1 \cdot A \frac{(T_1 - T_{12})}{L_1}, \text{ illetve } Q_2 = \lambda_2 \cdot A \frac{(T_{12} - T_2)}{L_2}$$

és  $Q_1 = Q_2 \longrightarrow T_{12} = \frac{\lambda_1 T_1 L_2 + \lambda_2 T_2 L_1}{\lambda_1 L_2 + \lambda_2 L_1}$

Az EPS+tégla rétegrendszert helyettesítő homogén rendszer hővezetőképessége legyen  $\lambda$ , vastagsága pedig  $L=L_1+L_2$ . Ez termikusan akkor lesz ekvivalens a kétréteg rendszerrel, ha felületén időegység alatt szintén  $Q=Q_1=Q_2$  energia áramlik át.



$$Q = \lambda \cdot A \frac{(T_1 - T_2)}{L} = Q_1 = Q_2$$

$$Q = \lambda \cdot A \frac{(T_1 - T_2)}{L} = \lambda_1 \cdot A \frac{(T_1 - T_{12})}{L_1} = Q_1$$

$$\lambda \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L} = \lambda_1 \cdot \frac{\left( T_1 - \frac{\lambda_1 T_1 L_2 + \lambda_2 T_2 L_1}{\lambda_1 L_2 + \lambda_2 L_1} \right)}{L_1}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 \frac{L_2}{L_1 + L_2} + \lambda_2 \frac{L_1}{L_1 + L_2}} = \frac{0.048 \frac{W}{mK} \cdot 0.143 \frac{W}{mK}}{0.048 \frac{W}{mK} \frac{38cm}{8cm + 38cm} + 0.143 \frac{W}{mK} \frac{8cm}{8cm + 38cm}} = 0.106 \frac{W}{mK}$$

Tehát a 8cm vastag hőszigetelés a falazat hővezetőképességét kb. 25%-kal csökkenti.

Egy ilyen hőszigetelt falazat hőátteresztése (felületegységre és időegységre vonatkoztatva) egy kb. 62cm vastag téglafal hőátteresztésével egyezik meg.

## Néhány anyag hővezetőképessége

	$\lambda$ (W/m·K)	Az energiaátadás módja	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-weight: bold; margin-right: 5px;">növekvő <math>\lambda</math></div> <div style="font-size: 2em;">↑</div> </div>	• <b>Fémek</b>		
	Alumínium	247	<b>Rácsrezgések (fononok) és szabad elektronok mozgása</b>
	Acél	52	
	Volfrám	178	
	Arany	315	
	• <b>Kerámiák</b>		
	MgO	38	<b>Rácsrezgések</b>
	Korund (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	39	
	Nátronüveg	1.7	
	krist. SiO <sub>2</sub>	1.4	
	• <b>Polimerek</b>		
	polipropilén	0.12	<b>Láncmolekulák rezgése/forgása</b>
polietilén	0.46-0.50		
polisztrén	0.13		
Teflon	0.25		

**Fémek:** a szabadelektronok hozzájárulása a hővezetéshez sokkal nagyobb, mint a fononoké. (Sokan vannak, gyorsabban mozognak és kevésbé szóródnak.)

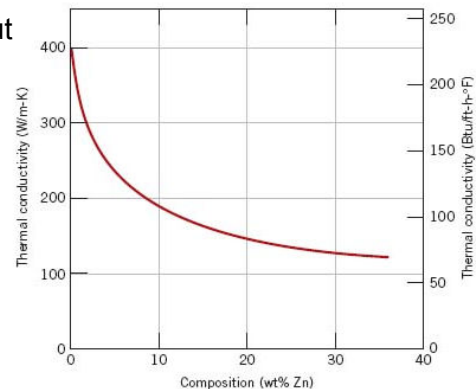
Ilyenkor igaz a **Wiedemann-Franz törvény:**

$$\frac{\lambda}{\sigma \cdot T} = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k_B}{e} \right)^2 = 2.44 \cdot 10^{-8} \frac{W \cdot \Omega}{K^2} = L \quad \text{Lorenz - szám}$$

ahol  $\sigma$  az elektromos vezetőképesség,  $T$  az abszolút hőmérséklet,  $\lambda$  a hővezetőképesség.

**Ötvözés:**

szórócentrumok  $\Rightarrow$  a hővezető-képesség (és az elektromos vezetőképesség) csökken.



Réz-cink ötvözet hővezetőképessége a cink tartalom függvényében

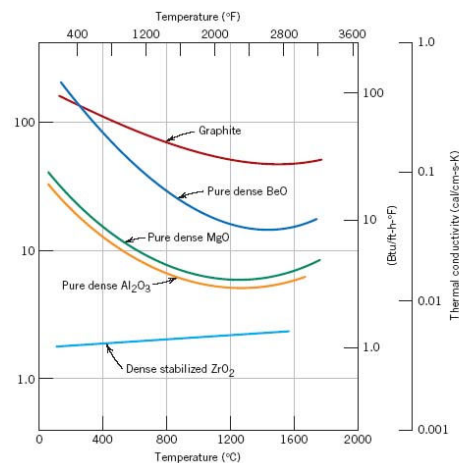
IX/19

**Kerámiák:** csak fononok  $\Rightarrow$  kisebb hővezetőképesség.

A szóródás szerepe:

Amorf forma:  $\lambda$  kisebb (ld. táblázat).

A szóródás  $T$ -vel növekszik  $\Rightarrow$



A levegő hővezetőképessége  $\sim 0,02 \text{ W/m}\cdot\text{K} \Rightarrow$

ha kis hővezetőképességet akarunk: porózus anyagok.  
A hőszigetelő anyagok többsége porózus kerámia.

Polimerek: néhány tized  $\text{W/m}\cdot\text{K} \Rightarrow$

alacsony hőmérsékleteken jó hőszigetelők (habosítás).

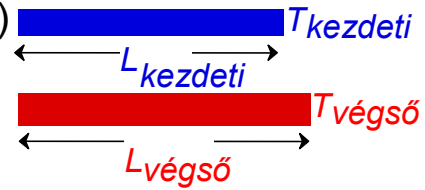
IX/20

# Hőtágulás

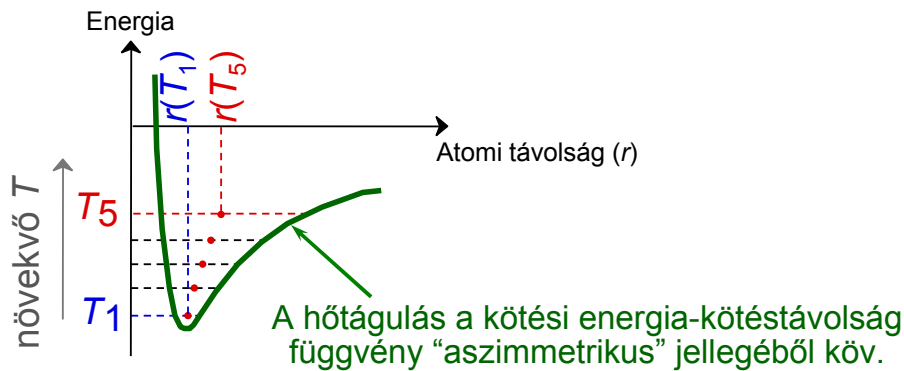
Hőmérsékletváltozás hatására az anyagok mérete megváltozik.

$$l_{\text{végső}} - l_{\text{kezdeti}} = \alpha_l \cdot l_{\text{kezdeti}} \cdot (T_{\text{végső}} - T_{\text{kezdeti}})$$

lineáris hőtágulási együttható  
 ( $[\alpha_l] = 1/\text{K}$  vagy  $1/^\circ\text{C}$ )



- Atomi szinten: az átlagos kötéstávolság ált. növekszik T-vel.



IX/21

## Néhány anyag hőtágulási együtthatója

$\alpha_l (10^{-6}/\text{K})$   
 szobahőmérsékleten

• <u>Polimerek</u>	
Polipropilén	145-180
Polietilén	106-198
Polisztiirén	90-150
Teflon	126-216
• <u>Fémek</u>	
Alumínium	23.6
Acél	12
Volfrám	4.5
Arany	14.2
• <u>Kerámiák</u>	
Magnesia (MgO)	13.5
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.6
Nátronüveg	9
Krist. SiO <sub>2</sub>	0.4

Erős kötés  $\Rightarrow$  meredek  
 potenciálgödör  $\Rightarrow$  kicsi  $\alpha_l$   
 Gyenge kötés  $\Rightarrow$  nagy  $\alpha_l$   
 (pl. polimerek)

Fém-kerámia kötés:  
 Kovar/Invar + Pyrex

Kerámiák esetén anizotróp.  
 feszültség  $\Rightarrow$  törés  
 Ha izotróp: OK.

IX/22

# Hőtágulás 2

Hőmérsékletváltozás hatására az anyagok térfogata is megváltozik.

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T$$

térfogati hőtágulási együttható  
( $[\alpha_i]=[\beta]=1/K$  vagy  $1/^\circ C$ )

A legtöbb anyagra a hőtágulás irányfüggő (anizotróp).  
Azokra az anyagokra, melyekre izotróp:

$$\beta \approx 3\alpha_1$$

IX/23

## Hőmérsékletváltozás/hőterhelés hatására kialakuló feszültség

Esetek:

- Szabadon álló homogén, izotróp anyag, egyenletes hűtés, melegítés (nincs hőmérsékletgradiens)  $\Rightarrow$  feszültségmentes
- Valamely irányban rögzített/kitámasztott homogén, izotróp anyag, egyenletes hűtés/melegítés (nincs hőmérsékletgradiens)  $\Rightarrow$  feszültség

$$\sigma = E \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T$$



FIGURE 15.14 Thermal expansion. The extreme heat of a July day in Asbury Park, New Jersey, caused the buckling of these railroad tracks. (Wide World Photos)

- Szabadon álló homogén, izotróp anyag, gyors hűtése/melegítése hatására az *anyagban* hőmérsékletgradiens *alakul ki*  $\Rightarrow$  feszültség  
Amikor előnytelen a kicsi hővezetőképesség: kerámiák

Thermal Shock Resistance parameter,  $TSR \approx \sigma_f \cdot \lambda / E \cdot \alpha_1$

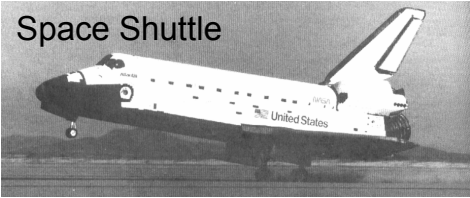
A hősokkal szemben ellenálló anyagot:

**nagy** hővezetőképesség ( $\lambda$ ) és törési szilárdság ( $\sigma_f$ ), valamint  
**kicsi** Young modulus ( $E$ ) és hőtágulási együttható ( $\alpha_1$ ) jellemzi.

pl. üveg – boroszilikát üveg: Pyrex.

IX/24

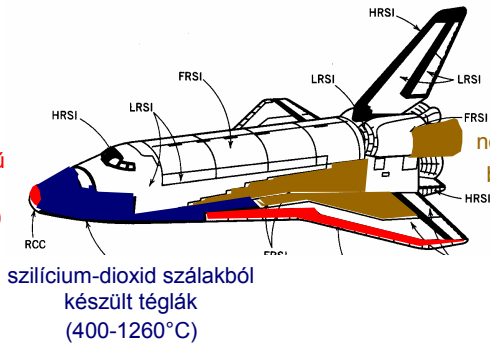
Space Shuttle



# Milyen anyagokból legyen a hővédő pajzs?

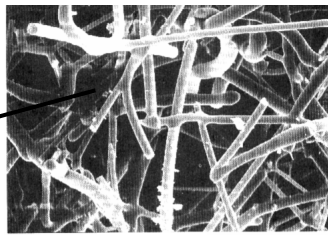
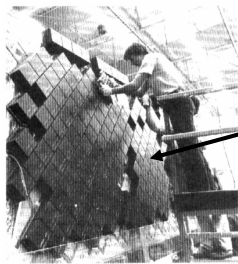
Az ideális anyag(ok):  
nagy op., nagy fajhő, kis hővezetőképesség, kis hőtágulás

szén-szál erősítésű grafit (1650°C)



nejlon, szilikongumi borítás (400°C)

RCC=Reinforced carbon-carbon (>1260°C)  
HRSI=High-temperature Reusable Surface Insulation (<1260°C)  
LRSI=Low-temperature Reusable Surface Insulation (<649°C)  
FRSI=Felt Reusable Surface Insulation (<371°C)



100 μm

~90% porozitás!  
SiO<sub>x</sub> szálak,  
a szerkezetet hőkezeléssel alakítják ki



belül T=1250°C

IX/25