

# ΥΛΙΚΑ Ι

## ΠΑΡΟΝ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

# Άδειες Χρήσης

-Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται στην άδεια χρήσης Creative Commons και ειδικότερα

*Αναφορά - Μη εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγο Έργο v. 3.0  
(Attribution – Non Commercial – Non-derivatives)*

- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# 7

## Θερμικές Ιδιότητες

# Θερμικές ιδιότητες

Θερμοχωρητικότητα

Θερμική διαστολή

Θερμική αγωγιμότητα

Θερμική τάση

# Θερμοχωρητικότητα

Η θερμοχωρητικότητα εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον

προσφερόμενη  
θερμότητα

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

$$\frac{J}{\text{mole} \cdot K}$$

μεταβολή  
θερμοκρασίας

Θερμοχωρητικότητα  
ανά μονάδα μάζας

Ειδική θερμότητα

$$c = \frac{C}{m}$$

$$C_V = \left( \frac{dQ}{dT} \right)_V$$

υπό σταθερό όγκο

$$C_P = \left( \frac{dQ}{dT} \right)_P$$

υπό σταθερή πίεση

Γενικά:  $C_P > C_V$

$C_V$

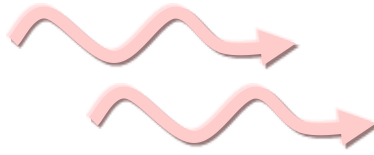
Όλη η απορροφούμενη θερμότητα οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας

$C_P$

Μέρος της απορροφούμενης θερμότητας ξοδεύεται στην αύξηση του όγκου

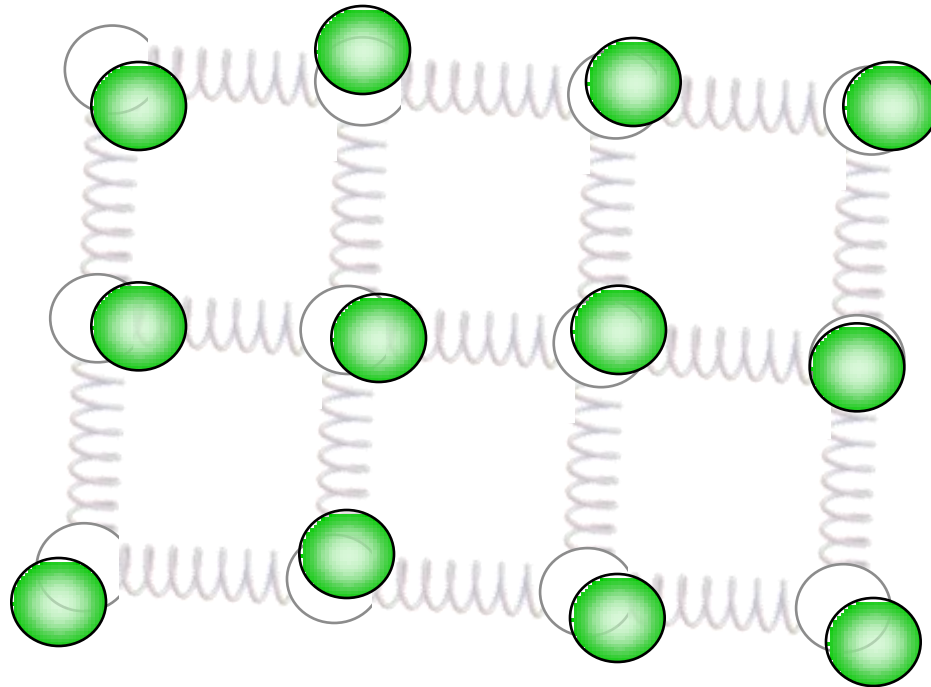
# Θερμοχωρητικότητα – ατομική κλίμακα

Θερμική  
ενέργεια



Αύξηση της  
θερμοκρασίας

Αύξηση της  
δονητικής ενέργειας



**Φωνόνια**

κβαντισμένη  
δονητική ενέργεια

*Ελαστικά κύματα στο  
κρυσταλλικό πλέγμα με  
μεγάλη συχνότητα &  
μικρό μήκος κύματος*

# Φωνόνια

$$k = 6\pi/6a \quad \lambda = 2.00a \quad \omega_k = 2.00\omega$$



$$k = 5\pi/6a \quad \lambda = 2.40a \quad \omega_k = 1.93\omega$$



$$k = 4\pi/6a \quad \lambda = 3.00a \quad \omega_k = 1.73\omega$$



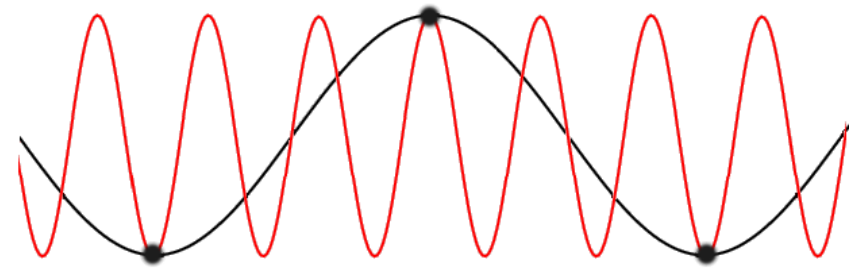
$$k = 3\pi/6a \quad \lambda = 4.00a \quad \omega_k = 1.41\omega$$



$$k = 2\pi/6a \quad \lambda = 6.00a \quad \omega_k = 1.00\omega$$



$$k = \pi/6a \quad \lambda = 12.00a \quad \omega_k = 0.52\omega$$



Ακουστικά φωνόνια σε 1D κρυσταλλικό πλέγμα,

© User: Greg L / Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0

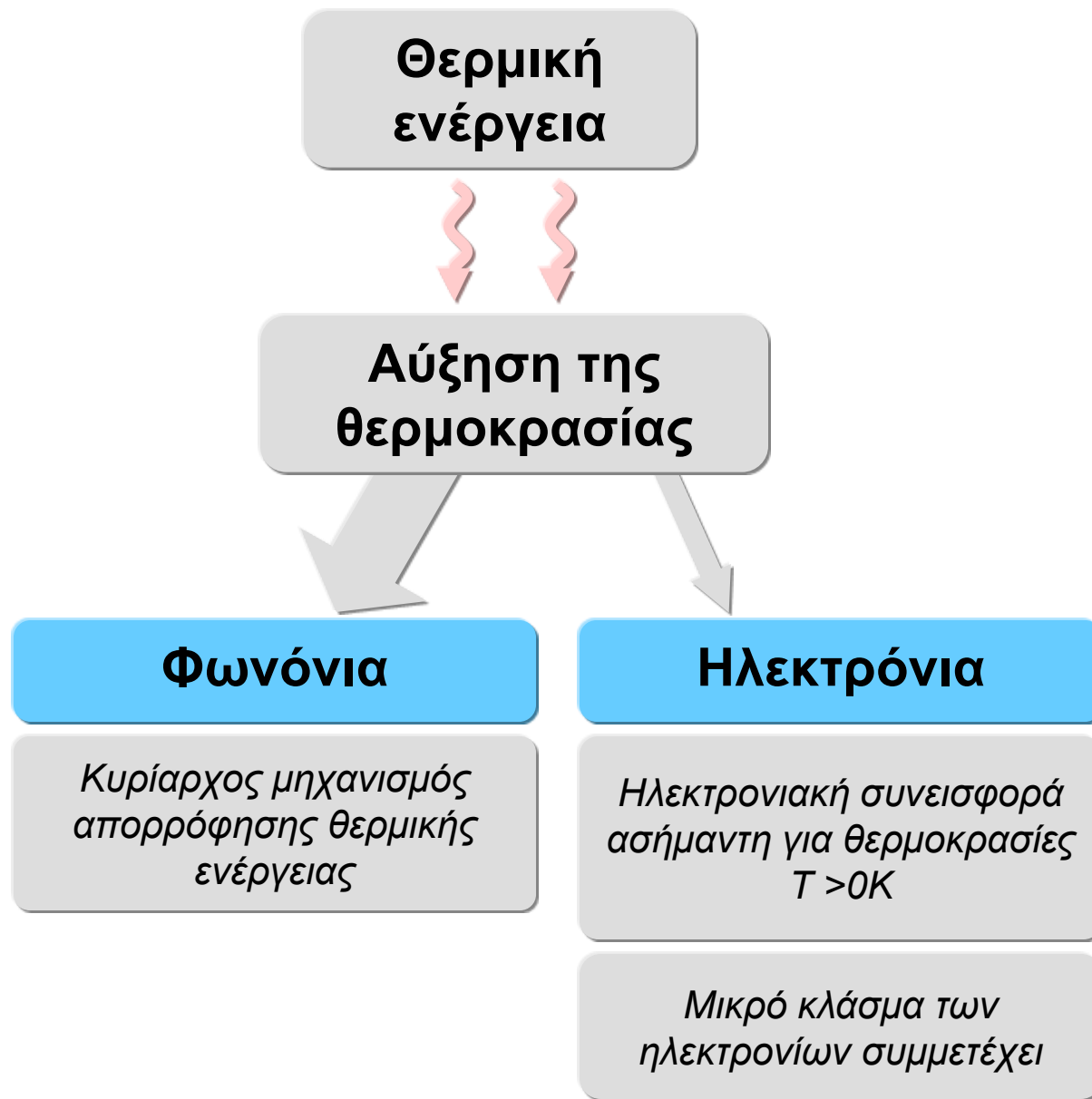
Οπτικά φωνόνια 1D κρυσταλλικό πλέγμα,

© User: Shaind / Wikipedia / Public Domain

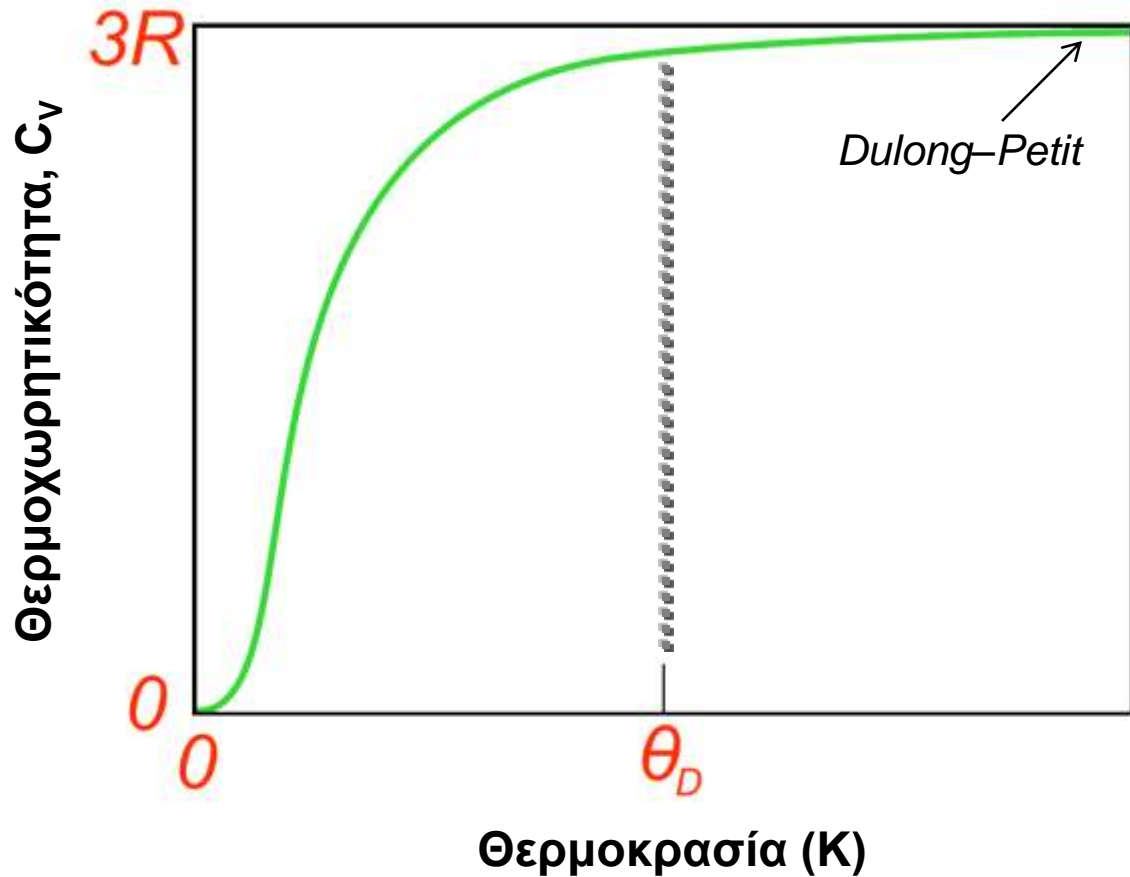
**Διαμήκη  
«Ακουστικά»**

**Εγκάρσια  
«Οπτικά»**





# Θερμοχωρητικότητα – εξάρτηση από θερμοκρασία



$$3R \approx 25 \text{ J}/(\text{mole K})$$

σε χαμηλή  
θερμοκρασία

$$C_V = AT^3$$

Για  $T > \theta_D$

$$C_V \approx 3R$$

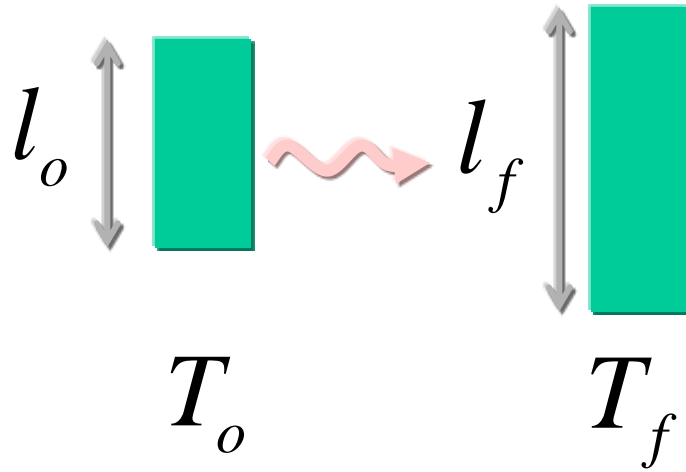
$\theta_D$  : θερμοκρασία Debye  
συνήθως μικρότερη από θερμοκρασία δωματίου

# Τυπικές Θερμοκρασίες Debye

Aluminium	428 K
Cadmium	209 K
Chromium	630 K
Copper	343.5 K
Gold	170 K
Iron	470 K
Lead	105 K
Manganese	410 K
Nickel	450 K
Platinum	240 K

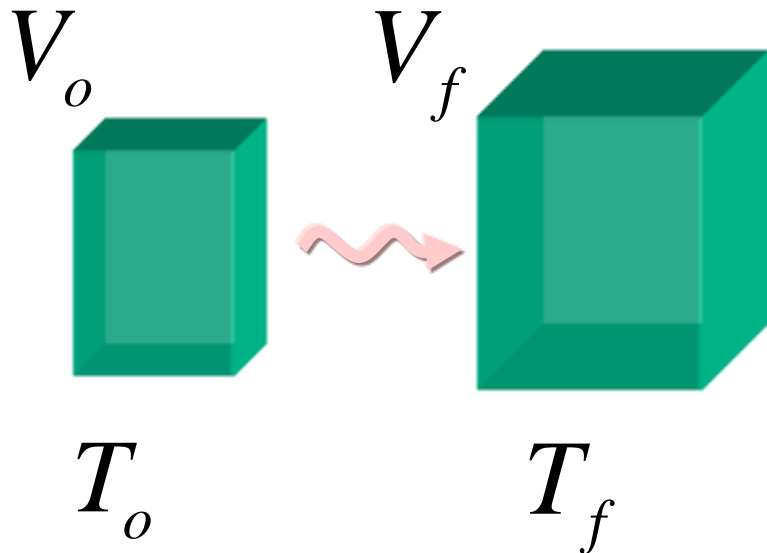
Silicon	645 K
Silver	215 K
Tantalum	240 K
Tin (white)	200 K
Titanium	420 K
Tungsten	400 K
Zinc	327 K
Carbon	2230 K
Ice	192 K

# Θερμική διαστολή



$$\alpha_l \Delta T \equiv \frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon$$

Γραμμικός συντελεστής  
θερμικής διαστολής  
Μονάδες:  $^{\circ}\text{C}^{-1}$



γενικά ανισότροπος

$$\alpha_V \Delta T \equiv \frac{\Delta V}{V_0}$$

Κατ' όγκο συντελεστής  
θερμικής διαστολής  
Μονάδες:  $^{\circ}\text{C}^{-1}$

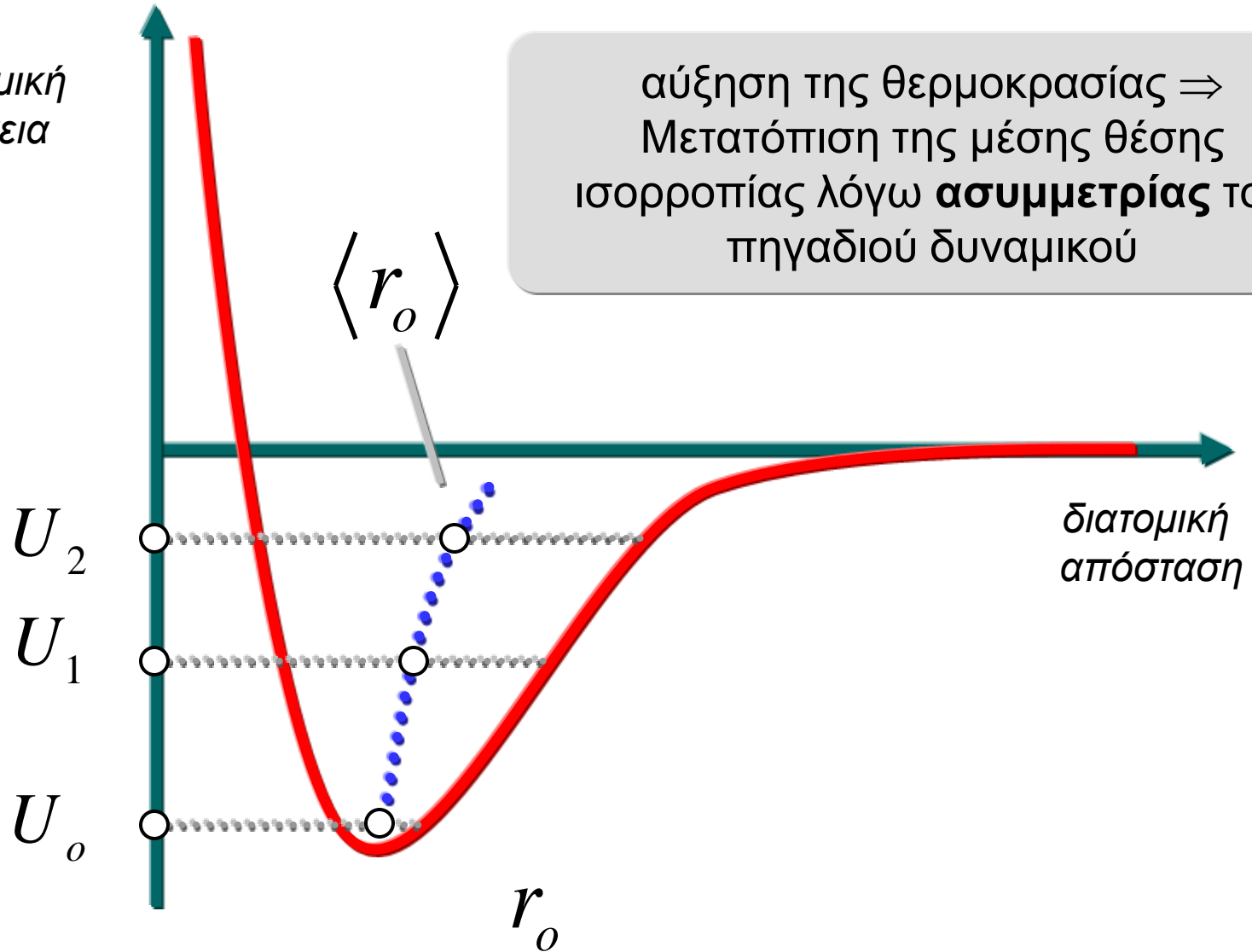
Ισότροπα υλικά

$$\alpha_V \approx 3\alpha_l$$

# Θερμική διαστολή – ατομική κλίμακα

Δυναμική  
ενέργεια

αύξηση της θερμοκρασίας  $\Rightarrow$   
Μετατόπιση της μέσης θέσης  
ισορροπίας λόγω **ασυμμετρίας** του  
πηγαδιού δυναμικού



Ισχυροί δεσμοί  $\Rightarrow$  μικρή διαστολή με την θερμοκρασία

Τυπικές τιμές συντελεστών θερμικής διαστολής

Κεραμικά

0.5 - 15 ( $\times 10^{-6}$ )

Μέταλλα\*

5 - 25 ( $\times 10^{-6}$ )

Πολυμερή

50 - 400 ( $\times 10^{-6}$ )

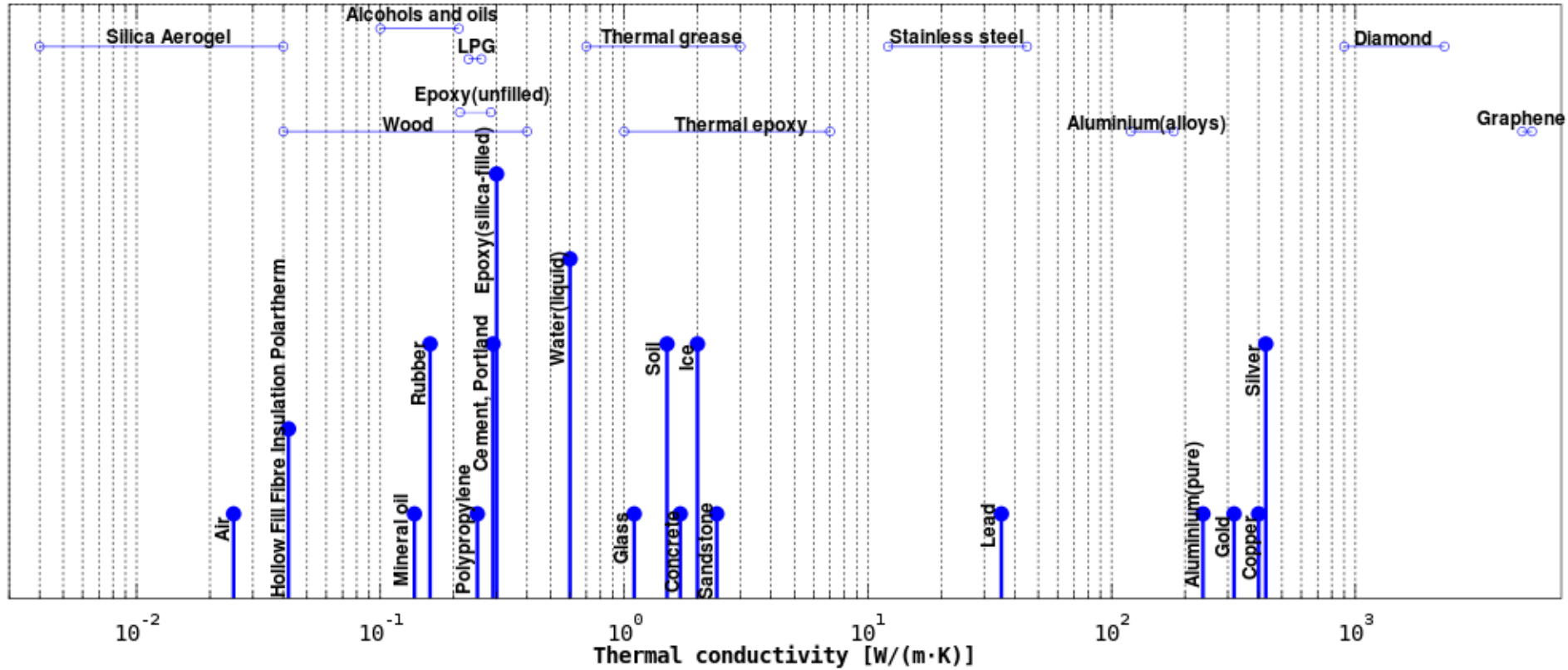
$\alpha_l$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

Κρυσταλλικά :  $\alpha_l$  ανισότροπο, άμορφα:  $\alpha_l$  ισότροπο

\*

κράμα KOVAR Fe-Ni-Co:  $\alpha_l = 1 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

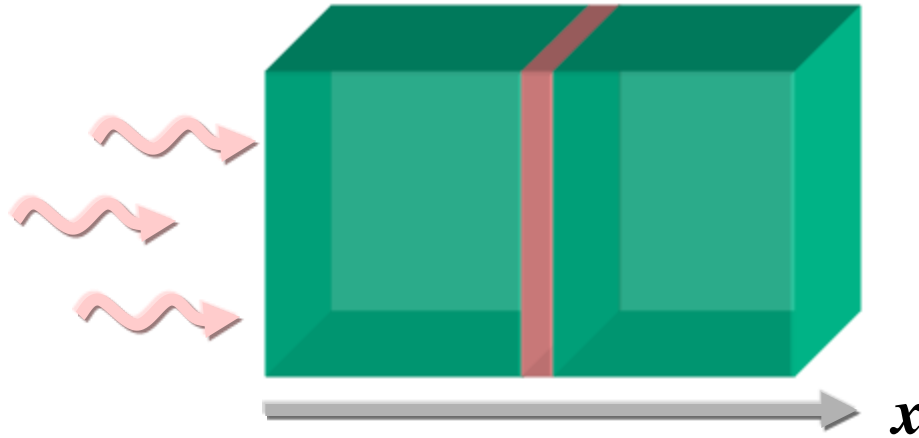
## Experimental values of thermal conductivity



Τυπικές πειραματικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας

Grzegorz Knor/ Wikimedia Commons / Public Domain

# Θερμική αγωγιμότητα



Ροή θερμότητας  
ανά μονάδα  
χρόνου και  
επιφάνειας

Μονάδες:

$$\frac{W}{m^2} \quad \text{ή} \quad \frac{Btu}{ft^2 \cdot h}$$

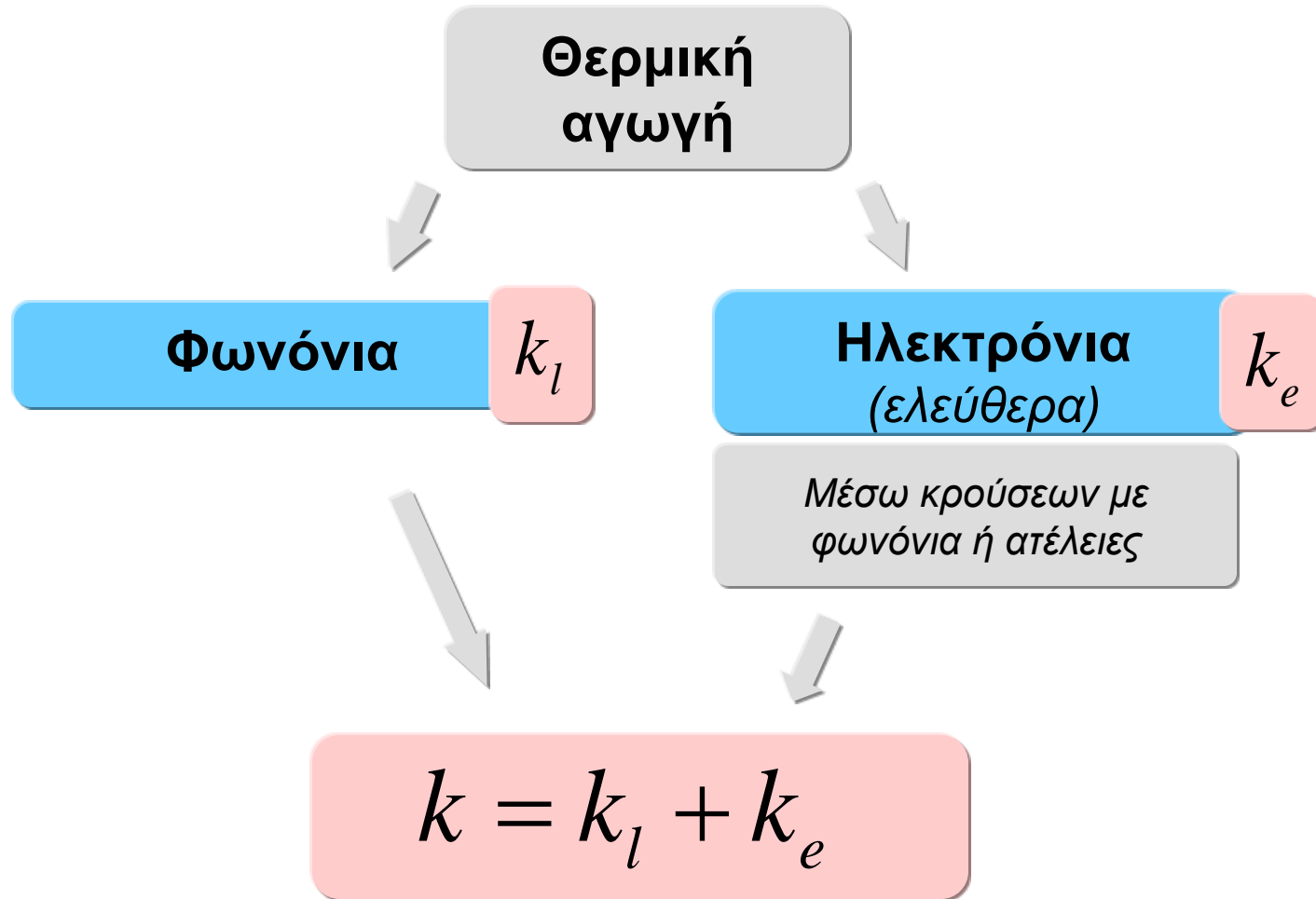
$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

Θερμική αγωγιμότητα

Μονάδες:  $\frac{W}{m \cdot K}$



# Μηχανισμοί θερμικής αγωγής



Συνήθως ένας μηχανισμός υπερισχύει

**Μέταλλα**

$$k_e \gg k_l$$

$$k : 20 - 400 \frac{W}{m \cdot K}$$

Στα μέταλλα ο ηλεκτρονικός μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι πιο αποδοτικός από την φωνονική συνεισφορά

Στα μέταλλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι υπεύθυνα και για ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Νόμος Wiedemann-Franz

σταθερά

$$2.44 \cdot 10^{-8} \frac{\Omega m \cdot W}{K^2}$$

$$L = \frac{k}{\sigma \cdot T}$$

Θερμική αγωγιμότητα  $\frac{W}{m \cdot K}$

Ηλεκτρική αγωγιμότητα  
 $1/\Omega m \cdot m$

Θερμοκρασία  
 $K$

## Μέταλλα – θερμικές ιδιότητες

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα $W/(m \cdot K)$	Ειδική θερμότητα $J/(Kg \cdot K)$	Συντελεστής θερμικής διαστολής $\times 10^{-6} (^{\circ}C)^{-1}$
Aluminium	247	900	23.6
Copper	398	386	17
Gold	315	128	14.2
Iron	80	448	11.8
Silver	428	235	19.7
Kovar (54Fe -29 Ni-17Co)	17	460	5.1

Πηγή: *Wikipedia*

Κράματα: Η παρουσία προσμίξεων οδηγεί σε μείωση της θερμικής αγωγιμότητας εξαιτίας της δράσης των προσμίξεων ως κέντρων σκέδασης

## Κεραμικά

$$k_l \gg k_e$$

$$k : 2 - 50 \frac{W}{m \cdot K}$$

Στα κεραμικά υλικά τα φωνόνια είναι κατά κύριο λόγο υπεύθυνα για την θερμική αγωγιμότητα.

Τα φωνόνια δεν είναι τόσο **αποδοτικά** στην μεταφορά θερμότητας όσο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επειδή **σκεδάζονται** έντονα από τις **ατέλειες** του πλέγματος

### Θερμικές ιδιότητες

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα $W/(m \cdot K)$	Ειδική θερμότητα $J/(Kg \cdot K)$	Συντελεστής θερμικής διαστολής $\times 10^{-6} (^\circ C)^{-1}$
Fused Silica ( $SiO_2$ )	1.4	850	0.4
Soda-lime glass	1.7	840	9.0
Borosilicate glass ( <i>Pyrex</i> )	1.4	850	3.3
Alumina ( $Al_2O_3$ )	39	775	7.6

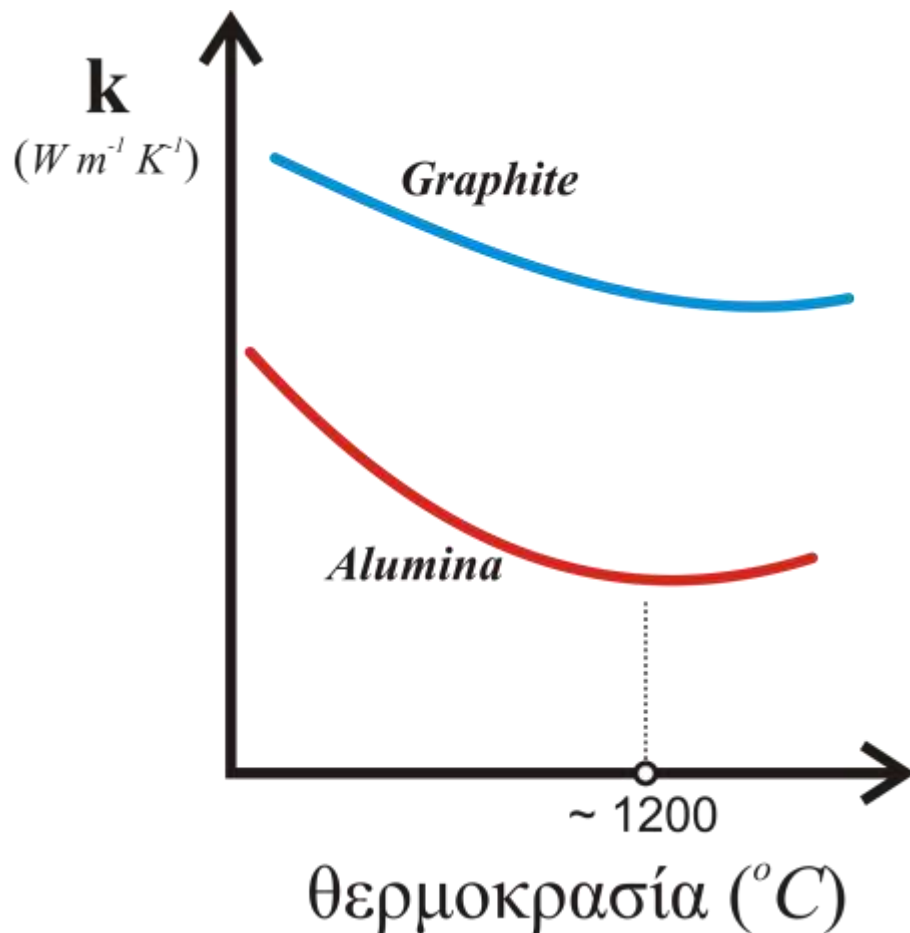
Πηγή: *Wikipedia*

Υλικά I, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, Διδάσκων: Δημήτρης Παπάζογλου

## Κεραμικά

σε χαμηλές θερμοκρασίες η θερμική αγωγιμότητα κατά κανόνα **μειώνεται** με την αύξηση της θερμοκρασίας

σε υψηλές θερμοκρασίες η θερμική αγωγιμότητα **αυξάνεται** λόγω της μεταφοράς θερμότητας με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία



Τα άμορφα κεραμικά είναι λιγότερο αγωγίμα από κρυσταλλικά

Το πορώδες **ελαττώνει** τη θερμική αγωγιμότητα  
(θερμική αγωγιμότητα αέρα  $0.02 W/m \cdot K$ )

## Πολυμερή

$$k \approx 0.3 \frac{W}{m \cdot K}$$

Στα πολυμερή η θερμική αγωγιμότητα επιτυγχάνεται με την δόνηση και περιστροφή των μοριακών αλυσίδων. Η αύξηση του βαθμού κρυσταλλικότητας ενός πολυμερούς οδηγεί στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας!

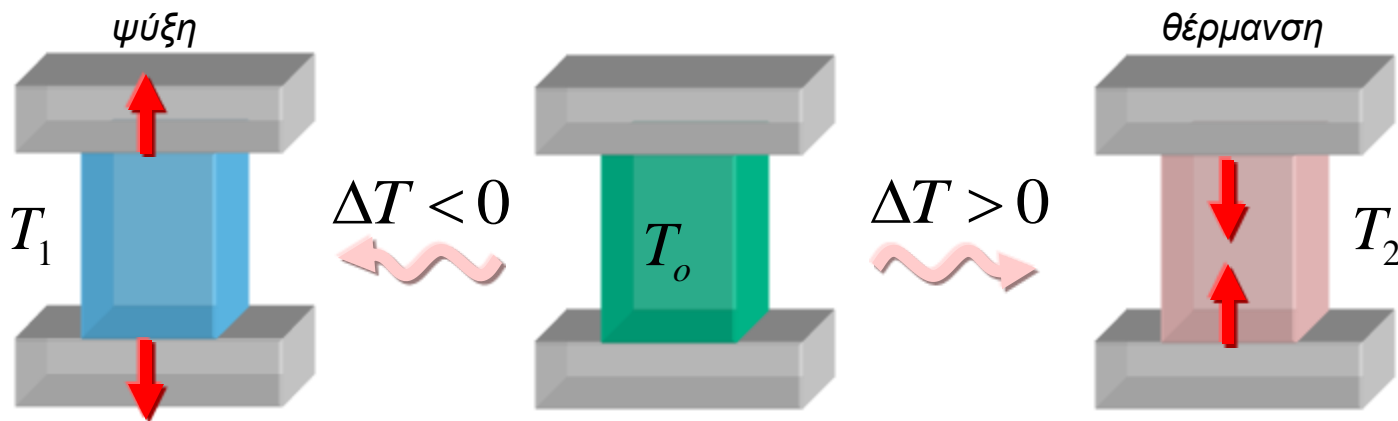
### Θερμικές ιδιότητες

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα $W/(m \cdot K)$	Ειδική θερμότητα $J/(Kg \cdot K)$	Συντελεστής θερμικής διαστολής $\times 10^{-6} (^\circ C)^{-1}$
PE ( <i>Polyethylene</i> )	<b>0.5</b>	<b>1850</b>	<b>~150</b>
Teflon/PTFE ( <i>Polytetrafluoroethylene</i> )	<b>0.25</b>	<b>1050</b>	<b>~190</b>
PP ( <i>Polypropylene</i> )	<b>0.12</b>	<b>1925</b>	<b>~160</b>

Πηγή: *Wikipedia*

# Θερμική τάση

Όταν ένα υλικό θερμαίνεται ή ψύχεται ενώ βρίσκεται σε περιορισμό αναπτύσσονται θερμικές τάσεις



«Θερμική»  
τάση

$$\sigma = -E \cdot a_l \cdot \Delta T$$

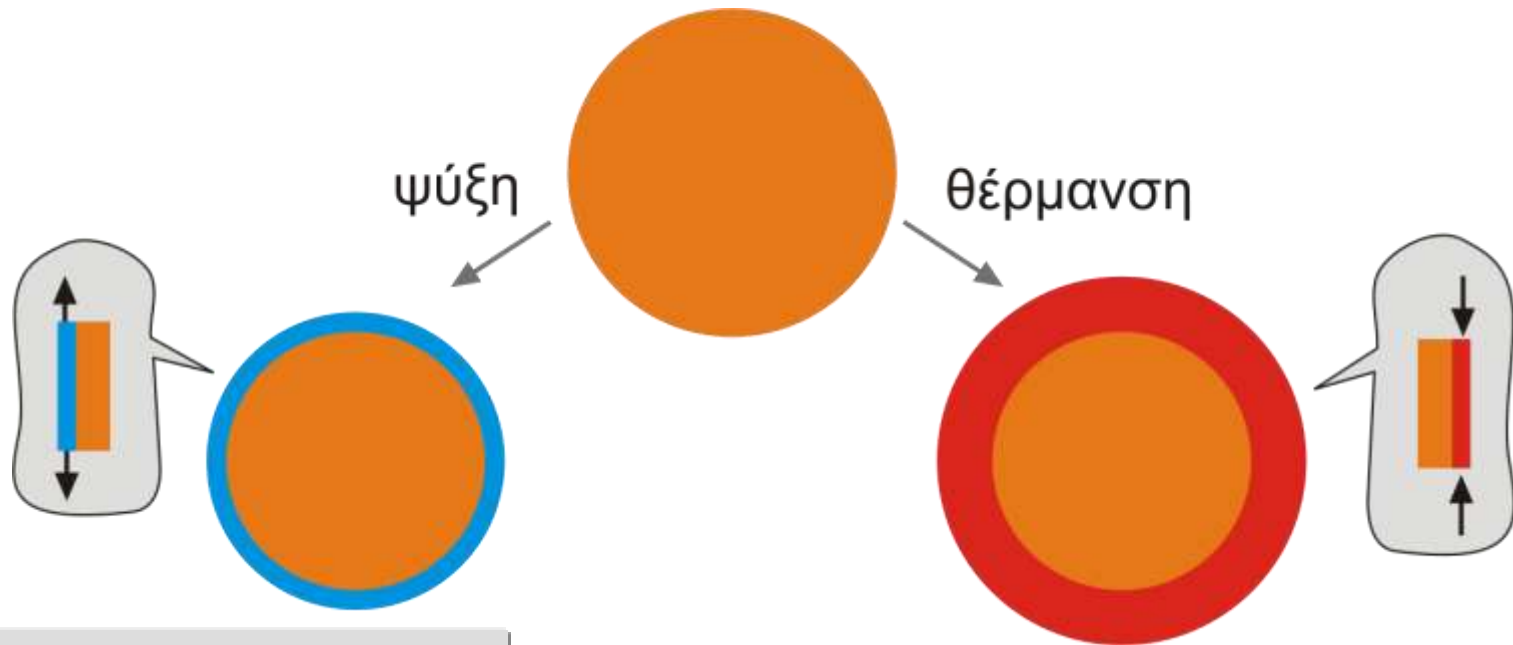
Μεταβολή  
θερμοκρασίας

Μέτρο  
ελαστικότητας

Συντελεστής  
γραμμικής διαστολής

# Αντοχή σε θερμικό σοκ

Θερμικό σοκ: απότομη ψύξη ή θέρμανση



Εφελκυστικές  
θερμικές τάσεις

Θλιπτικές  
θερμικές τάσεις

Οδηγούν σε θραύση μέσω του  
σχηματισμού ρωγμών !



## Όλκιμα υλικά

Οι τάσεις που αναπτύσσονται από το θερμικό σοκ οδηγούν σε πλαστική παραμόρφωση

## Ψαθυρά υλικά

Οι τάσεις που αναπτύσσονται από το θερμικό σοκ οδηγούν σε θραύση !

***TSR*: αντίσταση στο θερμικό σοκ**

$$TSR = \frac{\sigma_f k}{E \alpha_l}$$

Βελτιώνεται με μεγάλη αντοχή στη θραύση,  
Μικρό μέτρο ελαστικότητας,  
Μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής,  
Μεγάλη θερμική αγωγιμότητα