



Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τεχνολογία Υλικών II

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Δρ. Σκλήρη Ευαγγελία

Θερμικές Ιδιότητες

Γιατί μελετάμε θερμικές ιδιότητες;

Τα υλικά αντιδρούν στη θερμότητα:

- αυξάνεται η θερμοκρασία
- αλλάζουν διαστάσεις
- μπορεί να σπάσουν

Τα κεραμικά είναι πιο ευαίσθητα → θερμικό σοκ (**thermal shock**)

➤ Η συμπεριφορά εξαρτάται από βασικές ιδιότητες:

- συντελεστή θερμικής διαστολής
- θερμική αγωγιμότητα - πόσο εύκολα μεταφέρεται η θερμότητα μέσα στο υλικό,
- μηχανικές ιδιότητες - πόσο ανθεκτικό είναι σε τάσεις

Στόχος:

πρόβλεψη συμπεριφοράς

αποφυγή αστοχίας

Θερμικές Ιδιότητες

➤ **Θερμικές συμπεριφορά είναι η απόκριση υλικού στη θερμότητα**

Όταν θερμαίνεται ένα στερεό:

- απορροφά ενέργεια
- αυξάνει θερμοκρασία
- διαστέλλεται

Η θερμότητα μπορεί:

- να μεταφερθεί από τις θερμότερες στις ψυχρότερες περιοχές
- να οδηγήσει σε τήξη

Σημαντικές ιδιότητες:

- **θερμοχωρητικότητα** - πόση ενέργεια χρειάζεται για να αυξηθεί η θερμοκρασία
- **θερμική αγωγιμότητα** - πόσο εύκολα μεταφέρεται η θερμότητα
- **θερμική διαστολή** - συνδέεται με την αλλαγή διαστάσεων

Θερμικές Ιδιότητες

☐ Θερμοχωρητικότητα (Heat Capacity)

Εκφράζει πόση θερμότητα χρειάζεται για αύξηση θερμοκρασίας

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

Όπου dQ είναι η ενέργεια που απαιτείται για προκληθεί θερμοκρασιακή μεταβολή κατά dT .

Μονάδες: $J/mol \cdot K$ ή $J/kg \cdot K$

Ειδική Θερμοχωρητικότητα (Specific Heat, c)

•Θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μάζας

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}$$

ή

$$Q = mc\Delta T$$

Μονάδες: $J/kg \cdot K$

Θερμικές Ιδιότητες

Η θερμοχωρητικότητα μπορεί να μετρηθεί με δύο τρόπους:

1. Θερμοχωρητικότητα σε σταθερό όγκο: C_v

• Δεν επιτρέπεται διαστολή του υλικού

2. Θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση: C_p

• Το υλικό μπορεί να διασταλεί

συνήθως, $C_p > C_v$

Στα στερεά (σε θερμοκρασία δωματίου) η διαφορά είναι **πολύ μικρή**

Άρα :

$$C_p = C_v$$

Η θερμοχωρητικότητα εκφράζεται σε μονάδες $\frac{J}{mol \cdot K}$

Θερμικές Ιδιότητες

Εξάρτηση θερμοχωρητικότητας από τη θερμοκρασία

Η θερμοχωρητικότητα C_v εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία

Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες:

$$C_v = AT^3$$

Αυξάνεται πολύ γρήγορα με T

- **C_v** : θερμοχωρητικότητα σε σταθερό όγκο (πόση θερμότητα χρειάζεται για αύξηση θερμοκρασίας)
- **T** : απόλυτη θερμοκρασία (σε Kelvin, K)
- **A** : σταθερά που εξαρτάται από το υλικό

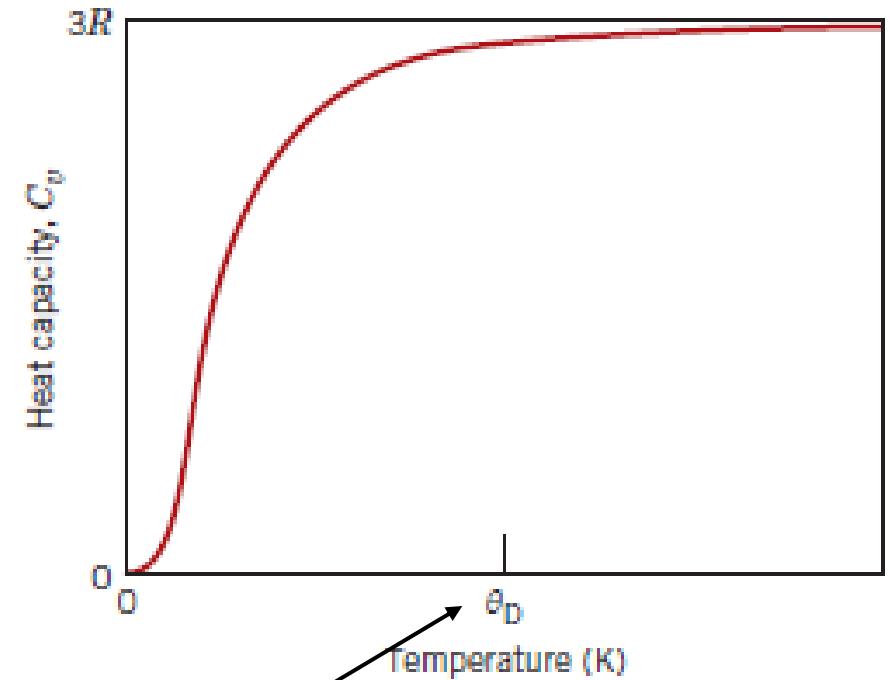
Σε υψηλές θερμοκρασίες

Η θερμοχωρητικότητα:

$$C_v \rightarrow 3R$$

Γίνεται σχεδόν σταθερή

R = Παγκόσμια σταθερά αερίου = 8.31 J/mol-K



Debye Temperature (συνήθως $T_{\delta\omega\mu\alpha\tau\acute{\iota}\omicron\upsilon}$)

- θ_D : χαρακτηριστική θερμοκρασία υλικού
- κάτω από $\theta_D \rightarrow$ ισχυρή εξάρτηση από T
- πάνω από $\theta_D \rightarrow C_v =$ σταθερό

Θερμικές Ιδιότητες

Στα στερεά, η θερμότητα αποθηκεύεται κυρίως ως **δονητική ενέργεια ατόμων**

Τα άτομα:

- ταλαντώνονται γύρω από θέσεις ισορροπίας
- έχουν υψηλή συχνότητα και μικρό πλάτος

Οι ταλαντώσεις:

- **δεν είναι ανεξάρτητες**
- μεταδίδονται στο πλέγμα

Δημιουργούνται → **κύματα πλέγματος (lattice waves)**

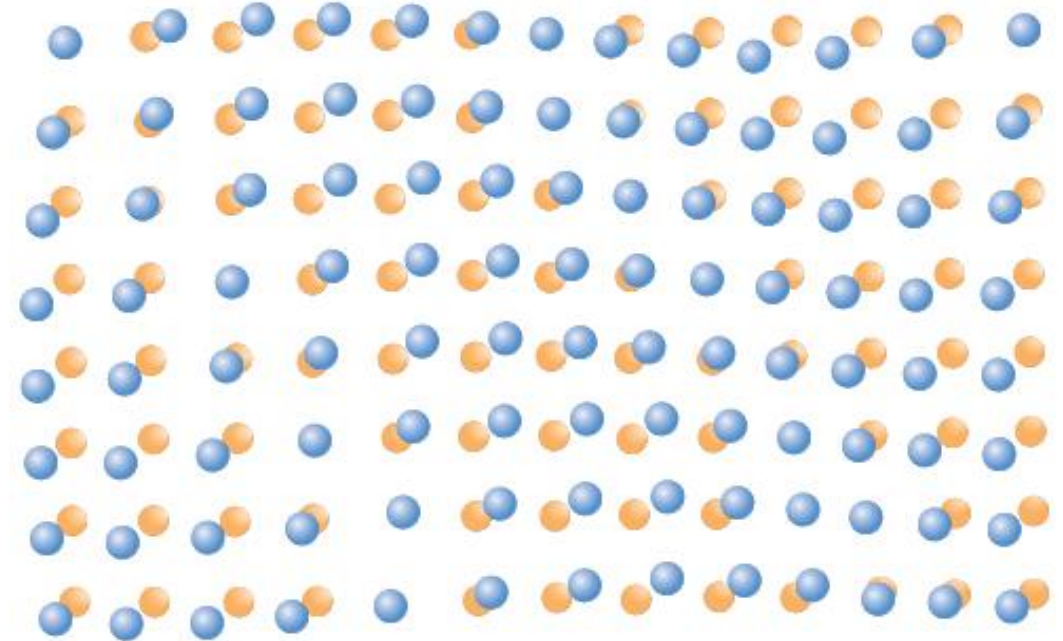
Φωνόνια (Phonons)

Μόνο συγκεκριμένες τιμές ενέργειας είναι επιτρεπτές – η ενέργεια είναι **κβαντισμένη**

• Κάθε μεμωνομένο πακέτο ενέργειας ταλάντωσης λέγεται **φωνόνιο**.

Ρόλος φωνονίων

- Μεταφέρουν θερμότητα
- Συμβάλλουν στη θερμική αγωγιμότητα
- Αλληλεπιδρούν με ηλεκτρόνια



● Normal lattice positions for atoms
● Positions displaced because of vibrations

Θερμικές Ιδιότητες

Ειδική θερμοχωρητικότητα σε θερμοκρασία δωματίου – c_p

$$c_p = \frac{dQ}{mdT}$$

Μέταλλα

- μέτρια c
 - υψηλή αγωγιμότητα
- Al : 900 J/kg·K
Au: 128 J/kg·K

Κεραμικά

- μέτρια–χαμηλή c
 - χαμηλή αγωγιμότητα
- Al₂O₃: 775 J/kg·K
MgO: 940 J/kg·K

Πολυμερή

- υψηλή c
 - πολύ χαμηλή αγωγιμότητα
- Teflon: 1050 J/kg·K
Πολυστυρένιο 1170 J/kg·K

Θερμικές Ιδιότητες

□ **Θερμική Διαστολή** - δηλαδή πώς αλλάζουν οι διαστάσεις ενός υλικού με τη θερμοκρασία.

Θερμική διαστολή μήκους

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

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \alpha (T_f - T_0)$$

- l_0 : αρχικό μήκος
 - Δl : μεταβολή μήκους
 - ΔT : μεταβολή θερμοκρασίας
 - α : συντελεστής θερμικής διαστολής
- Μονάδες α : K^{-1}

Θερμική διαστολή όγκου

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

- ΔV : μεταβολή όγκου (m^3)
- V_0 : αρχικός όγκος (m^3)
- α_v : συντελεστής θερμικής διαστολής όγκου (K^{-1} ή $^{\circ}C^{-1}$)
- ΔT : μεταβολή θερμοκρασίας (K ή $^{\circ}C$)

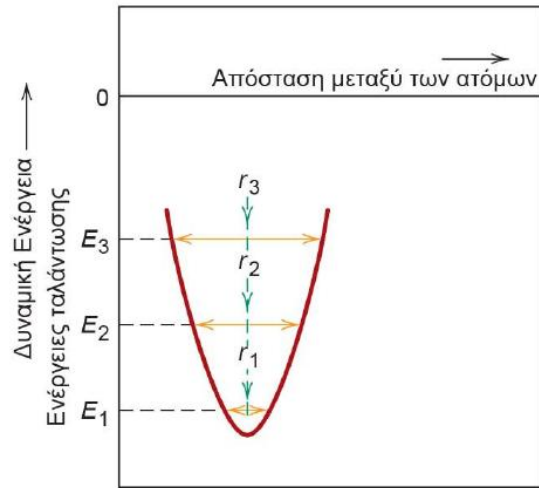
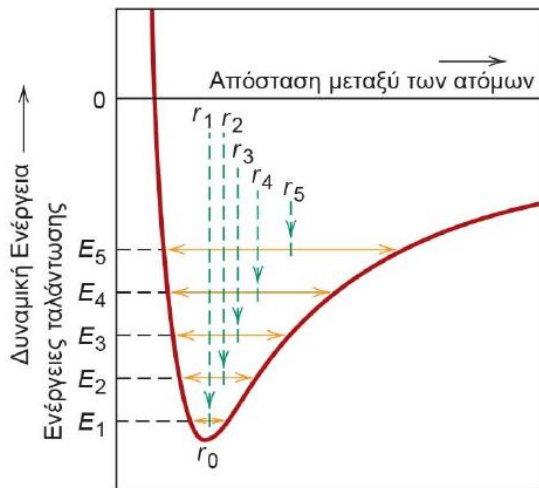
Για ισότροπα υλικά:

$$\alpha_v = 3\alpha$$

Όπου α ο γραμμικός συντελεστής

Θερμικές Ιδιότητες

□ Δυναμική ενέργεια συναρτήση απόστασης μεταξύ ατόμων



Η καμπύλη είναι **ασύμμετρη**

Το ελάχιστο $r_0 =$ θέση ισορροπίας στους 0 K

Τα άτομα αποκτούν περισσότερη ενέργεια ($E_1 \rightarrow E_5$)

Ταλαντώνονται πιο έντονα

Η ταλάντωση δεν είναι συμμετρική

Άρα η μέση απόσταση μετατοπίζεται προς τα δεξιά

$$r_0 \rightarrow r_1 \rightarrow r_2 \rightarrow r_3 \dots$$

Άρα υπάρχει θερμική διαστολή

Η καμπύλη είναι **συμμετρική**

Τα άτομα ταλαντώνονται συμμετρικά

Η μέση θέση δεν αλλάζει

Άρα **δεν υπάρχει διαστολή**

Θερμικές Ιδιότητες

Table 19.1 Thermal Properties for a Variety of Materials

Material	c_p (J/kg·K) ^a	α_l [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶] ^b	k (W/m·K) ^c	L [Ω·W/(K) ² × 10 ⁻⁸]
<i>Metals</i>				
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	—
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	—
Brass (70Cu–30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (54Fe–29Ni–17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe–36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe–32Ni–5Co)	500	0.72	10	2.68
<i>Ceramics</i>				
Alumina (Al ₂ O ₃)	775	7.6	39	—
Magnesia (MgO)	940	13.5 ^d	37.7	—
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	790	7.6 ^d	15.0 ^e	—
Fused silica (SiO ₂)	740	0.4	1.4	—
Soda–lime glass	840	9.0	1.7	—
Borosilicate (Pyrex) glass	850	3.3	1.4	—
<i>Polymers</i>				
Polyethylene (high density)	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polypropylene	1925	145–180	0.12	—
Polystyrene	1170	90–150	0.13	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	1050	126–216	0.25	—
Phenol-formaldehyde, phenolic	1590–1760	122	0.15	—
Nylon 6,6	1670	144	0.24	—
Polyisoprene	—	220	0.14	—

^aTo convert to cal/g·K, multiply by 2.39 × 10⁻⁴; to convert to Btu/lb_m·°F, multiply by 2.39 × 10⁻⁴.

^bTo convert to (°F)⁻¹, multiply by 0.56.

^cTo convert to cal/s·cm·K, multiply by 2.39 × 10⁻³; to convert to Btu/ft·h·°F, multiply by 0.578.

^dValue measured at 100°C.

^eMean value taken over the temperature range 0°C to 1000°C.

Θερμική διαστολή σε διαφορετικά υλικά

•Κεραμικά:

- ισχυροί δεσμοί → μικρή διαστολή

•Μέταλλα:

- μεταλλικός δεσμός → μέτρια διαστολή

•Πολυμερή:

- ασθενείς δεσμοί μεταξύ αλυσίδων → μεγάλη διαστολή

Ισχυροί δεσμοί → μικρές ταλαντώσεις → μικρή μετατόπιση
→ μικρότερη διαστολή

Θερμικές Ιδιότητες

☐ Θερμική Αγωγιμότητα

Θερμική αγωγή = μεταφορά θερμότητας από περιοχές υψηλής θερμοκρασίας σε περιοχές χαμηλής

Νόμος Fourier

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

Όπου:

- q : ροή θερμότητας (W/m^2)
- k : θερμική αγωγιμότητα ($W/m \cdot K$)
- $\frac{dT}{dx}$: θερμοκρασιακή κλίση, δηλαδή πόσο γρήγορα αλλάζει η θερμοκρασία στον χώρο

Το αρνητικό πρόσημο μπαίνει γιατί η θερμότητα ρέει από το ζεστό προς το κρύο, δηλαδή αντίθετα από την κατεύθυνση αύξησης της θερμοκρασίας

Θερμικές Ιδιότητες

Μηχανισμοί Θερμικής Αγωγής

Συνολική αγωγιμότητα

$$k = k_e + k_l$$

- k_e : αγωγή από ηλεκτρόνια
- k_l : αγωγή από φωνόνια (ταλαντώσεις πλέγματος)

Αγωγή μέσω φωνονίων

- Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω δονητικών κυμάτων του πλέγματος

Τα φωνόνια:

- μεταφέρουν ενέργεια
 - κινούνται από θερμό → ψυχρό
- κεραμικά & πολυμερή

Αγωγή μέσω ηλεκτρονίων

- Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια:
 - αποκτούν ενέργεια σε θερμές περιοχές
 - μετακινούνται σε ψυχρότερες
 - Μεταφέρουν θερμότητα μέσω συγκρούσεων με άτομα

Κυρίως σε μέταλλα

Περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια

μεγαλύτερο k_e

μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα

Θερμικές Ιδιότητες

Μέταλλα

Κυριαρχεί **ηλεκτρονική αγωγή (ke)**

Γιατί έχουν πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια και υψηλή κινητικότητα

Εξαιρετικά καλοί αγωγοί θερμότητας λόγω μεγάλου αριθμού ελεύθερων ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αγωγή της θερμότητας

Άρα πολύ υψηλό k

Νόμος Wiedemann–Franz

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

• σ : ηλεκτρική αγωγιμότητα

• T : θερμοκρασία

• L : σταθερά

Συνδέει θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα

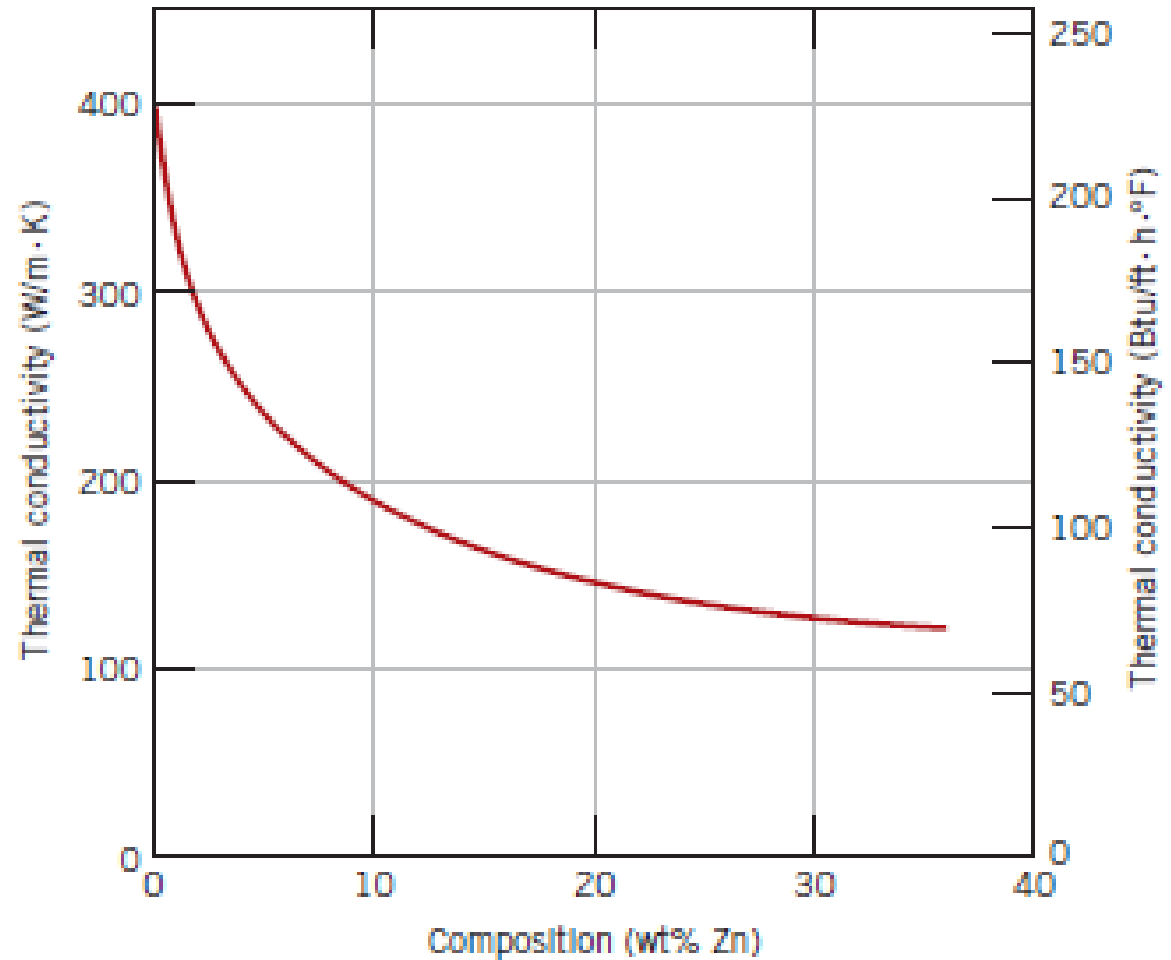
Θερμικές Ιδιότητες

Κράματα

Προσθήκη προσμίξεων μειώνει το k

Γιατί:

- σκέδαση ηλεκτρονίων
- μειώνεται η μεταφορά ενέργειας



Θερμικές Ιδιότητες

Κεραμικά

Δεν έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια

Άρα αγωγή μόνο με φωνόνια

Όμως τα φωνόνια είναι λιγότερο αποτελεσματικά από τα ηλεκτρόνια

Το k είναι χαμηλό

ατέλειες \rightarrow σκέδαση φωνονίων

άμορφα υλικά \rightarrow ακόμη μικρότερο k

Επίδραση θερμοκρασίας

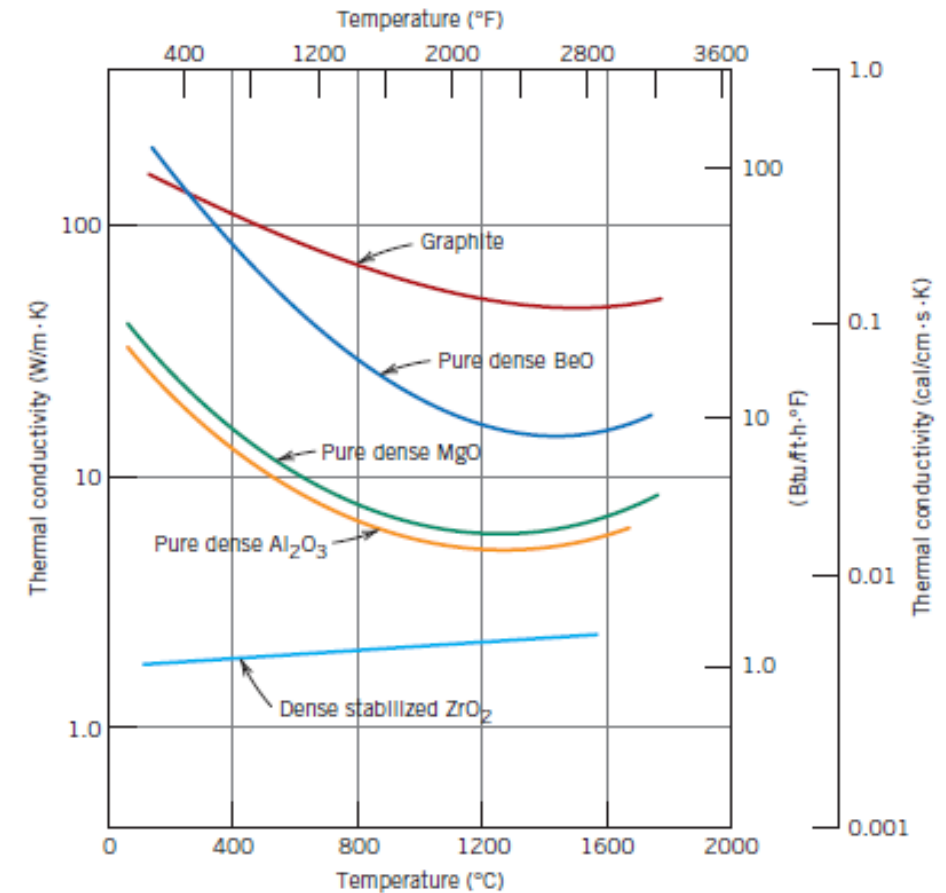
Σε κεραμικά k μειώνεται με αύξηση T

Γιατί αυξάνεται η σκέδαση φωνονίων

Σε πολύ υψηλές T :

Μεταφορά θερμότητας με υπέρυθρη ακτινοβολία

άρα το k μπορεί να **αυξηθεί ξανά**



Θερμικές Ιδιότητες

Επίδραση πορώδους στα κεραμικά

Περισσότεροι πόροι \rightarrow μικρότερο k

γιατί:

- ο αέρας έχει πολύ χαμηλή αγωγιμότητα ($\sim 0.02 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)
- η μεταφορά θερμότητας είναι δύσκολη

Πολυμερή

Πολύ χαμηλό k ($\sim 0.1\text{--}0.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)

Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται μέσω των μηχανισμών ταλαντώσης και περιστροφής αλυσίδων

Εξαρτάται από κρυσταλλικότητα

πιο κρυσταλλικά \rightarrow Συντονισμένες, συλλογικές ταλαντώσεις των μοριακών αλυσίδων στην κρυσταλλική

κατάσταση \rightarrow Συντονισμένες, συλλογικές ταλαντώσεις των μοριακών αλυσίδων στην κρυσταλλική κατάσταση

μεγαλύτερο \rightarrow μεγαλύτερο k

Θερμικές Ιδιότητες

Θερμικές τάσεις είναι οι τάσεις που δημιουργούνται λόγω μεταβολής θερμοκρασίας

Μπορούν να προκαλέσουν:

- θραύση
- πλαστική παραμόρφωση

Ας θεωρήσουμε μια ομογενή και ισότροπη συμπαγή ράβδο η οποία θερμαίνεται και ψύχεται ομοιόμορφα

Εάν η διαστολή ή συστολή είναι ελεύθερη → δεν θα αναπτυχθούν τάσεις στη ράβδο

Αν έχουμε περιορισμένη αξονική κίνηση της ράβδου (άκαμπτα στηρίγματα) → **θερμικές τάσεις**

□ Τύπος θερμικών τάσεων

$$\sigma = E \alpha_l (T_0 - T_f) = E \alpha_l \Delta T$$

Όπου:

- σ : θερμική τάση MPa
- E : μέτρο ελαστικότητας GPa
- α_l : συντελεστής διαστολής K^{-1} ή $^{\circ}C^{-1}$
- ΔT : μεταβολή θερμοκρασίας K ή $^{\circ}C$

- Θέρμανση $T_f > T_0 \rightarrow \sigma < 0$ έχουμε θλιπτικές τάσεις αν το υλικό δεν μπορεί να διασταλεί
- Ψύξη $T_f < T_0 \rightarrow \sigma > 0$ έχουμε εφελκυστικές τάσεις αν το υλικό δεν μπορεί να διασταλεί

σ είναι η τάση που απαιτείται για την επαναφορά της ράβδου στο αρχικό μήκος αν αρχικά είχε παραμορφωθεί ελεύθερα με τη θερμοκρασιακή μεταβολή από T_0 σε T_f

Τάσεις οφειλόμενες σε βαθμίδες θερμοκρασίας

Στερεό υλικό θερμαίνεται ή ψύχεται, η θερμοκρασιακή κατανομή εξαρτάται από:

- το μέγεθος του δοκιμίου
- το σχήμα του δοκιμίου
- τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού
- το ρυθμό της θερμοκρασιακής μεταβολής

Ταχεία θέρμανση ή ψύξη

- Η θερμοκρασία μεταβάλλεται ταχύτερα στο εξωτερικό μέρος του σώματος από ότι το εσωτερικό του
- Άρα δημιουργείται διαφορά θερμοκρασίας (βαθμίδες θερμοκρασίας) μέσα στο σώμα.
- Το αποτέλεσμα είναι ότι διαφορετικά σημεία θέλουν να διασταλούν ή να συσταλούν διαφορετικά.
- περιορισμούς στην ελεύθερη διαστολή ή συστολή → δημιουργούνται θερμικές τάσεις → θερμικό σοκ

Θερμικές Ιδιότητες

Θερμικό σοκ (Thermal Shock)

Είναι απότομη μεταβολή θερμοκρασίας → ρωγμές
Συμβαίνει κυρίως σε κεραμικά (ψαθυρά)

Γιατί είναι επικίνδυνο;

- δεν υπάρχει πλαστική παραμόρφωση
- οι ρωγμές εξαπλώνονται εύκολα

Αντοχή σε θερμικό σοκ

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

Όπου:

- σ_f : αντοχή θραύσης (**Pa**)
- k : θερμική αγωγιμότητα ($W / (m \cdot K)$)
- E : μέτρο ελαστικότητας (**Pa**)
- α : συντελεστής διαστολής (K^{-1})

Πώς αυξάνεται το TSR

- ✓ υψηλό αντοχή θραύσης
- ✓ υψηλό k (καλή κατανομή θερμότητας)
- ✓ χαμηλό E (λιγότερες τάσεις)
- ✓ χαμηλό α (μικρή διαστολή)

Πρακτικές λύσεις

- Μείωση θερμοκρασιακών μεταβολών
- Ομοιόμορφη θέρμανση/ψύξη
- Επιλογή υλικών με χαμηλό α (π.χ. Pyrex)

Θερμικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Να υπολογιστεί η ενέργεια που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία 2 kg από 20°C σε 100°C για τα εξής υλικά:

- αλουμίνιο
- χάλυβας
- γυαλί soda–lime
- πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)

Δίνονται:

$$\text{Al: } c_p = 900 \text{ J/kg K}$$

$$\text{Steel: } c_p = 486 \text{ J/kg K}$$

$$\text{Glass: } c_p = 840 \text{ J/kg K}$$

$$\text{HDPE: } c_p = 1850 \text{ J/kg K}$$

Θερμικές Ιδιότητες

Απάντηση:

Ειδική θερμοχωρητικότητα:

$$Q = mc_p\Delta T$$

Αλουμίνιο

$$Q = 2 \cdot 900 \cdot 80 = 144000 \text{ J} = 144 \text{ kJ}$$

Χάλυβας

$$Q = 2 \cdot 486 \cdot 80 = 77760 \text{ J} \approx 77.8 \text{ kJ}$$

Γυαλί (soda–lime)

$$Q = 2 \cdot 840 \cdot 80 = 134400 \text{ J} = 134.4 \text{ kJ}$$

Πολυαιθυλένιο (HDPE)

$$Q = 2 \cdot 1850 \cdot 80 = 296000 \text{ J} = 296 \text{ kJ}$$

Θερμικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Για το αλουμίνιο, η θερμοχωρητικότητα σταθερού όγκου C_v στους **30 K** είναι 0.81 J/mol K , και η θερμοκρασία Debye είναι **375 K**.

Να εκτιμηθεί η ειδική θερμότητα για:

- (a) 50 K
- (b) 425 K

Θερμικές Ιδιότητες

Απάντηση:

Χαμηλές θερμοκρασίες ($T \ll \theta_D$)

$$C_v = AT^3$$

Υψηλές θερμοκρασίες ($T > \theta_D$)

$$C_v = 3R$$

Υπολογισμός σταθεράς A

Στους 30 K:

$$C_v = AT^3 \Rightarrow 0.81 = A(30)^3$$
$$A = \frac{0.81}{27000} = 3.0 \times 10^{-5} \text{ J/mol K}$$

(a) Για 50 K

$$C_v = AT^3 = (3.0 \times 10^{-5}) \cdot (50)^3$$

$$C_v = 3.0 \times 10^{-5} \cdot 125000 = 3.75 \text{ J/mol K}$$

b) Για 425 K

Επειδή:

$$425\text{K} > \theta_D = 375\text{K}$$

Ισχύει:

$$C_v = 3R$$

$$C_v = 3 \cdot 8.314 = 24,9 \text{ J/mol K}$$

Άσκηση:

Ένα σύρμα αλουμινίου μήκους 10 m ψύχεται από 38°C σε -1°C. Πόση μεγάλη θα είναι η μεταβολή του μήκους του?

Δίνεται: $\alpha_l = 23.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Απάντηση:

$$\Delta l = l_0 \alpha_l \Delta T = l_0 \alpha_l (T_f - T_0)$$

$$= (10 \text{ m}) \left[23.6 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right] (-1\text{°C} - 38\text{°C})$$

$$= -9.2 \times 10^{-3} \text{ m} = -9.2 \text{ mm}$$

Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει **συστολή (μείωση μήκους)**

Θερμικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Μία ράβδος μήκους 0.1 m επιμηκύνεται κατά 0.2 mm όταν θερμαίνεται από 20°C σε 100°C.

Να υπολογιστεί ο γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής α .

Θερμικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Μία ράβδος μήκους 0.1 m επιμηκύνεται κατά 0.2 mm όταν θερμαίνεται από 20°C σε 100°C.

Να υπολογιστεί ο γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής α .

Απάντηση:

$$\alpha_l = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} = \frac{\Delta l}{l_0 (T_f - T_0)} = \frac{0.2 \times 10^{-3} \text{ m}}{(0.1 \text{ m})(100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}$$
$$= 25.0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$$

Άσκηση:

Να υπολογιστεί η ροή θερμότητας μέσα από ένα φύλλο χάλυβα πάχους 10 mm, όταν οι θερμοκρασίες των δύο πλευρών είναι 300°C και 100°C. Να θεωρηθεί μόνιμη κατάσταση (steady-state heat flow).

Απάντηση:

$$\begin{aligned} q &= -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \\ &= -(51.9 \text{ W/m-K}) \left[\frac{(100 + 273 \text{ K}) - (300 + 273 \text{ K})}{10 \times 10^{-3} \text{ m}} \right] \\ &= 1.04 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Η θερμότητα ρέει από την περιοχή υψηλής θερμοκρασίας προς την περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας και όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά, τόσο μεγαλύτερη είναι η ροή θερμότητας.

Άσκηση:

Για κάθε ένα από τα παρακάτω ζεύγη υλικών, να προσδιορίσετε ποιο έχει τη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Να αιτιολογήσετε τις επιλογές σας.

- (a) Καθαρός χαλκός – κράμα αλουμινίου-χαλκού (95 wt% Cu – 5 wt% Al)
- (b) άμορφο πυρίτιο τήγματος (fused silica) – κρυσταλλικός χαλαζίας (quartz)
- (c) Γραμμικό πολυαιθυλένιο - διακλαδισμένο πολυαιθυλένιο
- (d) Τυχαίο συμπολυμερές πολυστυρενίου-βουταδιενίου - εναλλασσόμενο συμπολυμερές πολυστυρενίου-βουταδιενίου

Θερμικές Ιδιότητες

Απάντηση:

(α) Ο καθαρός χαλκός έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από το κράμα αλουμινίου-χαλκού, επειδή τα άτομα προσμίξεων στο κράμα αλουμινίου-χαλκού προκαλούν αυξημένη σκέδαση των ελεύθερων ηλεκτρονίων.

(β) Ο χαλαζίας έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από τηγμένη silica, επειδή η τηγμένη silica είναι άμορφη (μη κρυσταλλικό), ενώ ο χαλαζίας είναι κρυσταλλικός, και οι ταλαντώσεις του πλέγματος (φωνόνια) σκεδάζονται πιο έντονα στα άμορφα υλικά.

(γ) Το γραμμικό πολυαιθυλένιο έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από το διακλαδισμένο, επειδή έχει μεγαλύτερο βαθμό κρυσταλλικότητας.

Τα γραμμικά πολυμερή είναι πιο κρυσταλλικά από τα διακλαδισμένα.

Δεδομένου ότι η μεταφορά θερμότητας γίνεται μέσω ταλαντώσεων των αλυσίδων και η συντονισμένη ταλάντωση αυξάνεται με την κρυσταλλικότητα, όσο μεγαλύτερη η κρυσταλλικότητα τόσο μεγαλύτερη η θερμική αγωγιμότητα.

(δ) Το εναλλασσόμενο συμπολυμερές έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από το τυχαίο, επειδή έχει μεγαλύτερη κρυσταλλικότητα.

Τα εναλλασσόμενα συμπολυμερή κρυσταλλώνονται πιο εύκολα από τα τυχαία.

Θερμικές Ιδιότητες

Άσκηση:

(α) Μια ράβδος χάλυβα 1025 μήκους 0.5 m θερμαίνεται από 20°C σε 80°C, ενώ τα άκρα της παραμένουν σταθερά (δεν μπορεί να διασταλεί).

Να υπολογιστεί το είδος της τάσης και το μέτρο της τάσης

Δίνεται ότι στους 20°C η ράβδος είναι χωρίς τάσεις.

(β) Ποια θα είναι η τάση αν το μήκος της ράβδου είναι 1 m;

(γ) Αν η ράβδος του (α) ψυχθεί από 20°C σε -10°C, ποιο είδος και μέτρο τάσης αναπτύσσεται;

Δίνεται:

Μέτρο ελαστικότητας: $E = 207 \text{ GPa}$

Συντελεστής διαστολής: $\alpha_l = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Θερμικές Ιδιότητες

Απάντηση:

(α) Θέρμανση 20°C → 80°C άρα το υλικό θέλει να διασταλεί αλλά μπορεί επομένως συμπιέζεται άρα θλιπτική τάση

$$\begin{aligned}\sigma &= E\alpha_l(T_0 - T_f) \\ &= (207 \times 10^3 \text{ MPa}) \left[12.0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right] (20\text{°C} - 80\text{°C}) \\ &= -150 \text{ MPa}\end{aligned}$$

(β) Αν το μήκος γίνει 1 m δεν επηρεάζεται γιατί δεν εμφανίζεται στον τύπο το μήκος

Άρα ίδια τάση

$$\sigma = -150 \text{ MPa}$$

(γ) Ψύξη 20°C → -10°C άρα το υλικό θέλει να συσταλεί αλλά δεν μπορεί, άρα **εφελκυστική τάση**

$$\begin{aligned}\sigma &= E\alpha_l(T_0 - T_f) \\ &= (207 \times 10^3 \text{ MPa}) \left[12.0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right] \left[(20\text{°C} - (-10\text{°C})) \right] \\ &= +74.5 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Άσκηση – Θερμικό Σοκ

(α) Να προσδιορίσετε τις μονάδες της παραμέτρου αντοχής σε θερμικό σοκ (**TSR**), δεδομένου ότι:

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

(β) Να υπολογίσετε και να ταξινομήσετε τα παρακάτω κεραμικά υλικά ως προς την αντοχή τους σε θερμικό σοκ (TSR)

Glass-ceramic (Pyroceram) $\sigma_f = 247 \text{ MPa}$, $k = \frac{3.3 \text{ W}}{\text{mK}}$, $E = 120 \text{ GPa}$, $\alpha = 6.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Partially stabilized zirconia $\sigma_f = 1150 \text{ MPa}$, $k = \frac{2.7 \text{ W}}{\text{mK}}$, $E = 205 \text{ GPa}$, $\alpha = 9.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Borosilicate glass (Pyrex) $\sigma_f = 69 \text{ MPa}$, $k = \frac{1.4 \text{ W}}{\text{mK}}$, $E = 70 \text{ GPa}$, $\alpha = 3.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

(α) Μονάδες TSR

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

Μονάδες:

- $\sigma_f \rightarrow \text{Pa}$
- $k \rightarrow \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- $E \rightarrow \text{Pa}$
- $\alpha \rightarrow \text{K}^{-1}$

Άρα:

$$TSR = \frac{\text{Pa} \cdot \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})}{\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}} = \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

(β)

Glass-ceramic

$$TSR = \frac{(247)(3.3)}{(120 \times 10^3)(6.5 \times 10^{-6})} = 1045 \text{W/m}$$

Zirconia

$$TSR = \frac{(1150)(2.7)}{(205 \times 10^3)(9.6 \times 10^{-6})} = 1578 \text{W/m}$$

Borosilicate glass

$$TSR = \frac{(69)(1.4)}{(70 \times 10^3)(3.3 \times 10^{-6})} = 418 \text{W/m}$$

Καλύτερη αντοχή σε θερμικό σοκ

Zirconia > Glass-ceramic > Borosilicate glass

Figures adapted from:

Materials Science and Engineering: An Introduction (W. D. Callister Jr. & D. Rethwisch),
10th ed., Chapter 19.