



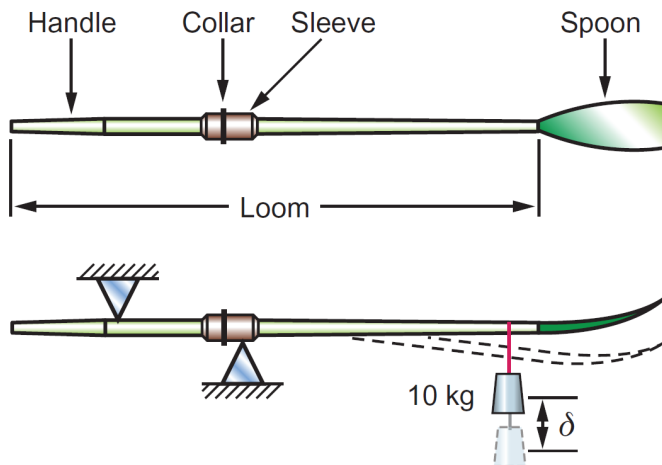
Επιλογή Υλικών στο Μηχανολογικό Σχεδιασμό



Διδάσκουσα: Δρ. Ε. Καμούτση

Case Studies-Επιλογή υλικού για Κουπιά

- Η επινόηση της βάρκας με κουπιά αποδίδεται στους Αιγυπτίους. Τα πρώτα σκάφη με κουπιά υπολογίζεται ότι εμφανίστηκαν στην Αίγυπτο μεταξύ 3300 και 3000 π.Χ.
- Μηχανικά μιλώντας, ένα κουπί είναι μια δοκός, η οποία φορτίζεται καμπτικά. Πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή ώστε να φέρει να καμπτικά φορτία χωρίς να σπάσει και ταυτοχρόνως να είναι όσο το δυνατόν πιο ελαφριά



Case Studies-Επιλογή υλικού για Κουπιά

- Η επινόηση της βάρκας με κουπιά αποδίδεται στους Αιγυπτίους. Τα πρώτα σκάφη με κουπιά υπολογίζεται ότι εμφανίστηκαν στην Αίγυπτο μεταξύ 3300 και 3000 π.Χ.
- Μηχανικά μιλώντας, ένα κουπί είναι μια δοκός, η οποία φορτίζεται καμπτικά. Πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή ώστε να φέρει να καμπτικά φορτία χωρίς να σπάσει και ταυτοχρόνως να είναι όσο το δυνατόν πιο ελαφριά

Λειτουργία	Παραλαβή καμπτικών φορτίων
Περιορισμοί	• Συγκεκριμένο μήκος L • Συγκεκριμένη ακαμψία S • Ψαθυρά υλικά απορρίπτονται
Στόχος	Ελαχιστοποίηση της μάζας
Ελεύθερες μεταβλητές	• Διατομή κονταριού • Επιλογή Υλικού

Case Studies-Επιλογή υλικού για Κουπίδι

Function

- *Oar – meaning light, stiff beam*

Constraints

- *Length L specified*
- *Bending stiffness S^* specified*
- *Toughness $G_{1c} > 1 \text{ kJ/m}^2$*

Objective

- *Minimize the mass m*

Free variables

- *Shaft diameter*
- *Choice of material*

$$S = \frac{C_1 \cdot E \cdot I}{L^3}$$

$$I = \frac{\pi R^4}{4}$$

$$G_{1c} = \frac{K_{1c}^2}{E} (1-\nu^2)$$

$$K_{1c} = Y \sigma_c \sqrt{\pi c}$$

Case Studies-Επιλογή υλικού για Κουπιά

$$m = \rho \cdot A \cdot L$$

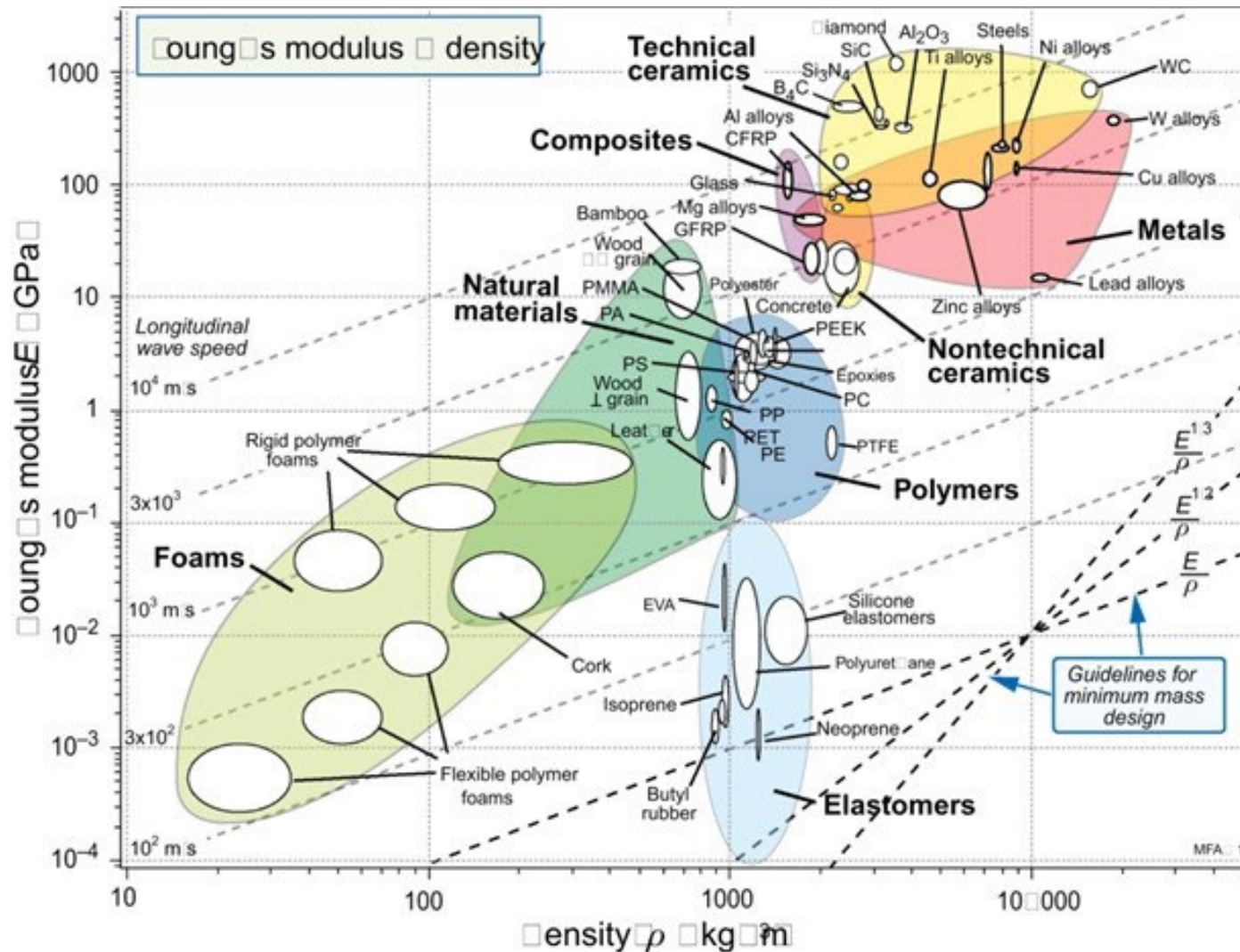
$$m = \pi \cdot R^2 \cdot L \cdot \rho \cdot A$$

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{F}{\delta} \\ \delta &= \frac{F \cdot L^3}{C_1 \cdot E \cdot I} \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} S &= \frac{C_1 \cdot E \cdot I}{L^3} \\ I &= \frac{\pi R^4}{4} \end{aligned} \right\} m = 2 \left(\frac{\pi S L^5}{C} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right)$$

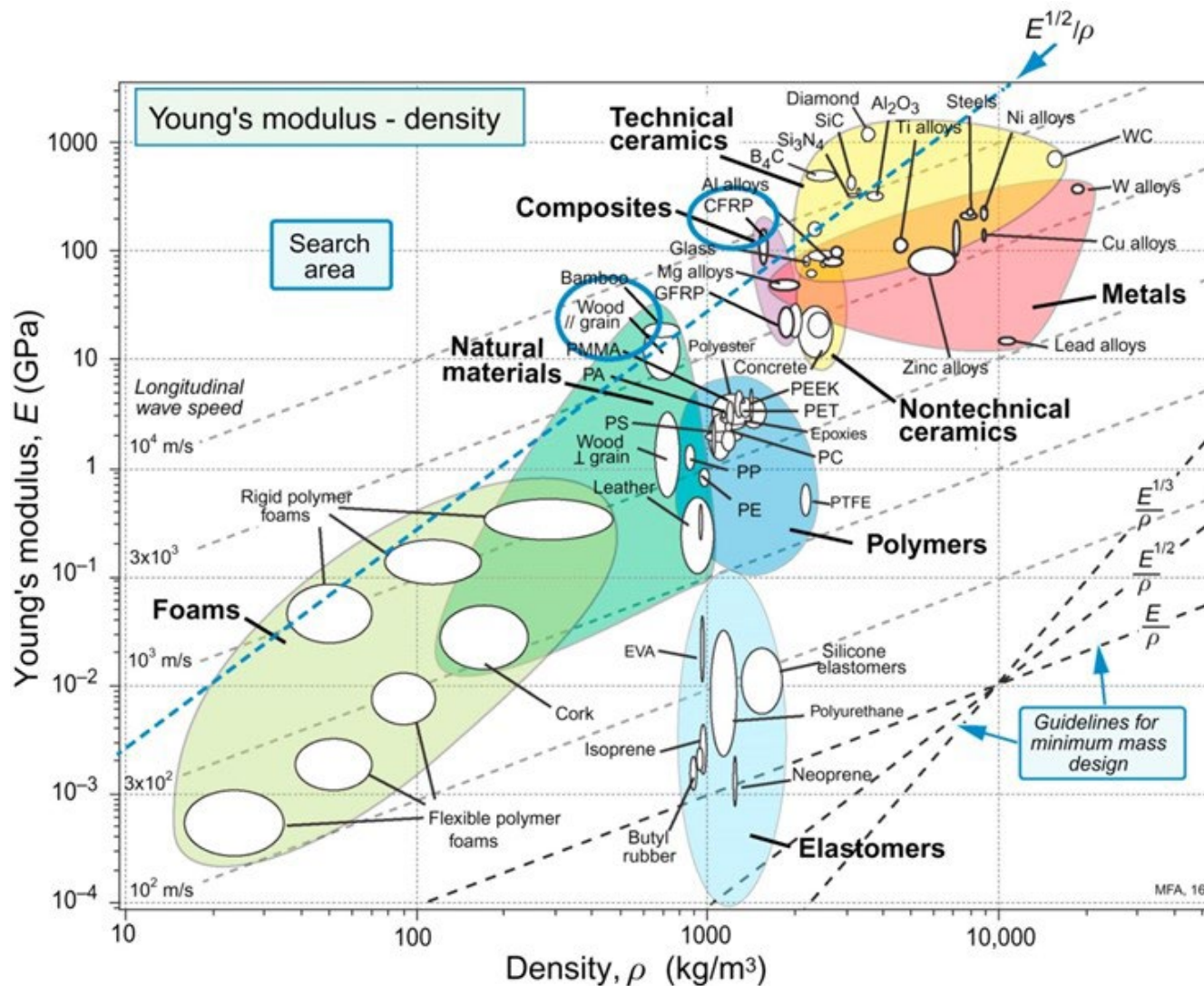
Αντικειμενική Συνάρτηση

δείκτης απόδοσης: $\frac{E^{1/2}}{\rho}$

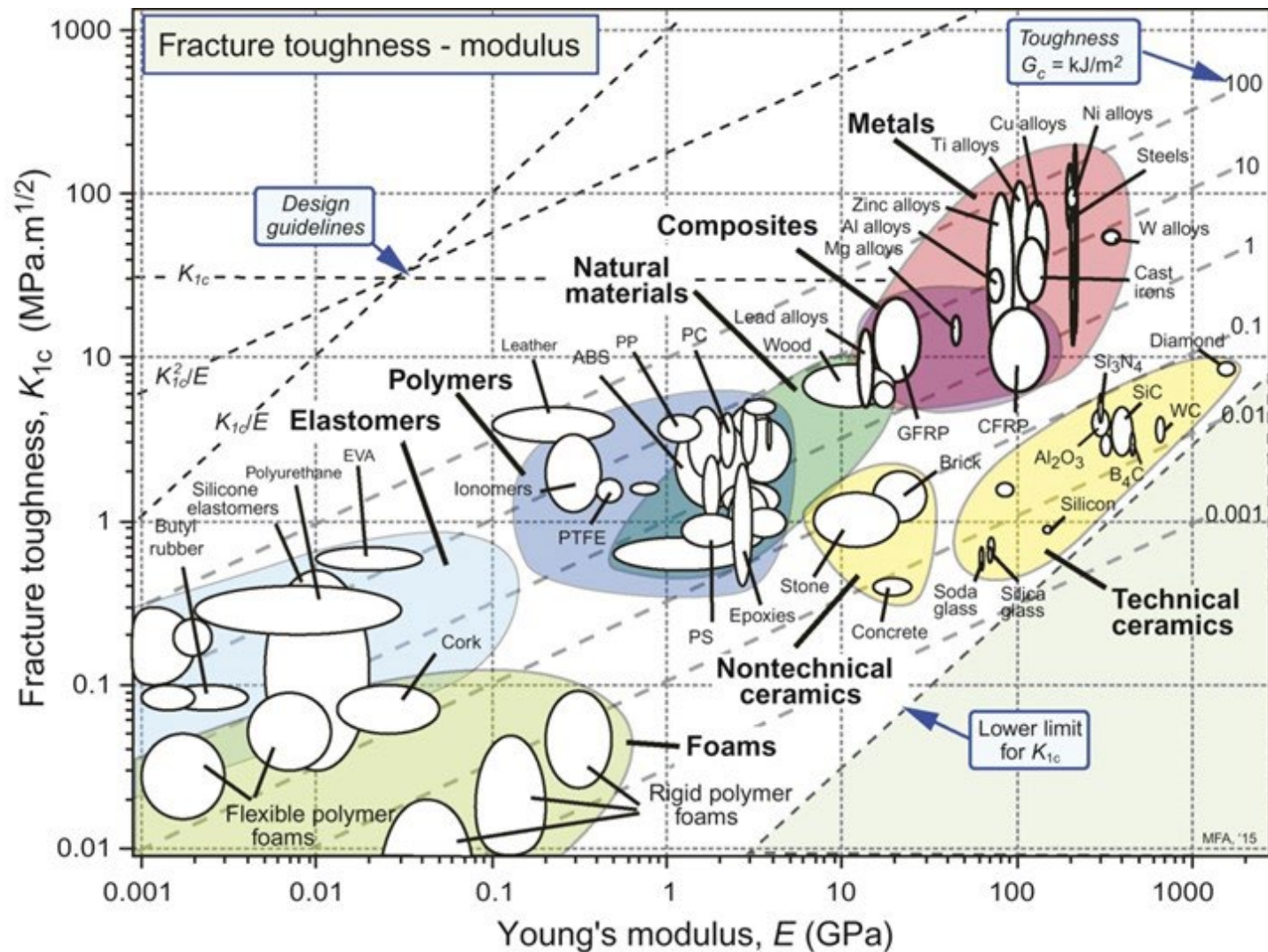
Case Studies-Επιλογή υλικού για Κουπιά



Case Studies-Επιλογή υλικού για Κουπιά



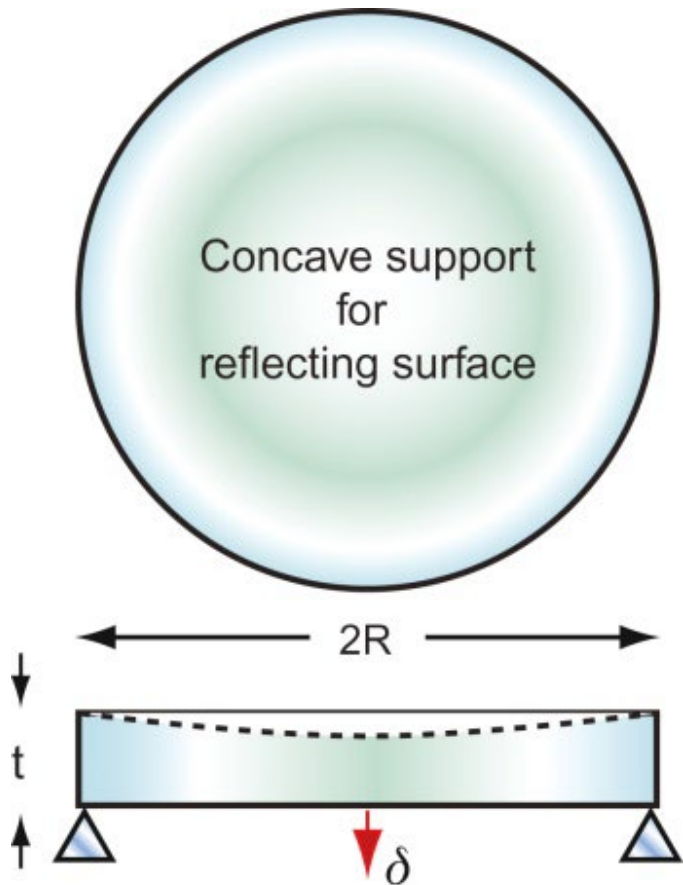
Case Studies-Επιλογή υλικού για Κουπιά



Case Studies-Επιλογή υλικού για Κουπιά

Material	Index M (GPa) ^{1/2} /(Mg/m ³)	Comment
<i>Bamboo</i>	4.0–4.5	The traditional material for oars for canoes
<i>Woods</i>	3.4–6.3	Cheap, traditional, but with natural variability
<i>CFRP</i>	5.3–7.9	As good as wood, more control of properties
<i>Ceramics</i>	4–8.9	Good M but toughness low and cost high

Case Studies-Επιλογή υλικού για Καθρέπτες Για Μεγάλα Τηλεσκόπια



Για να είναι αρκετά άκαμπτος, ο καθρέφτης είναι κατασκευασμένος από γυαλί πάχους περίπου 1 m και ζυγίζει 70 τόνους. Το συνολικό κόστος ενός μεγάλου τηλεσκοπίου (236 ιντσών) είναι, όπως το ίδιο το τηλεσκόπιο, αστρονομικό περίπου 300 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ. Ο ίδιος ο καθρέφτης αντιπροσωπεύει μόνο περίπου 5% αυτού του κόστους. Το υπόλοιπο είναι αυτό του μηχανισμού που κρατά, θέσεις και το μετακινεί καθώς ακολουθεί τον ουρανό.

Πριν από έναν αιώνα, οι καθρέφτες κατασκευάζονταν από μέταλλο speculum (πυκνότητα: περίπου 8000 kg/m^3). Έκτοτε, είναι κατασκευασμένα από γυαλί (πυκνότητα: 2300 kg/m^3), ασημένια στην μπροστινή επιφάνεια, επομένως καμία από τις οπτικές ιδιότητες του γυαλιού δεν είναι μεταχειρισμένος. Το γυαλί επιλέγεται μόνο για τις μηχανικές του ιδιότητες. τους 70 τόνους γυαλιού είναι απλώς ένα πολύ περίτεχνο στήριγμα για 100 nm (περίπου 30 γραμμάρια) αργύρου

Case Studies-Επιλογή υλικού για Καθρέπτες για Μεγάλα Τηλεσκόπια

Function

- *Precision mirror*

Constraints

- *Radius R specified*
- *Must not distort more than δ under self-weight*
- *High dimensional stability: no creep, low thermal expansion*

Objective

- *Minimize the mass, m*

Free variables

- *Thickness of mirror, t*
- *Choice of material*

Case Studies-Επιλογή υλικού για Καθρέπτες για Μεγάλα Τηλεσκόπια

$$m = \pi R^2 t \rho$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\delta \leq 10 \text{ } \mu\text{m}$$

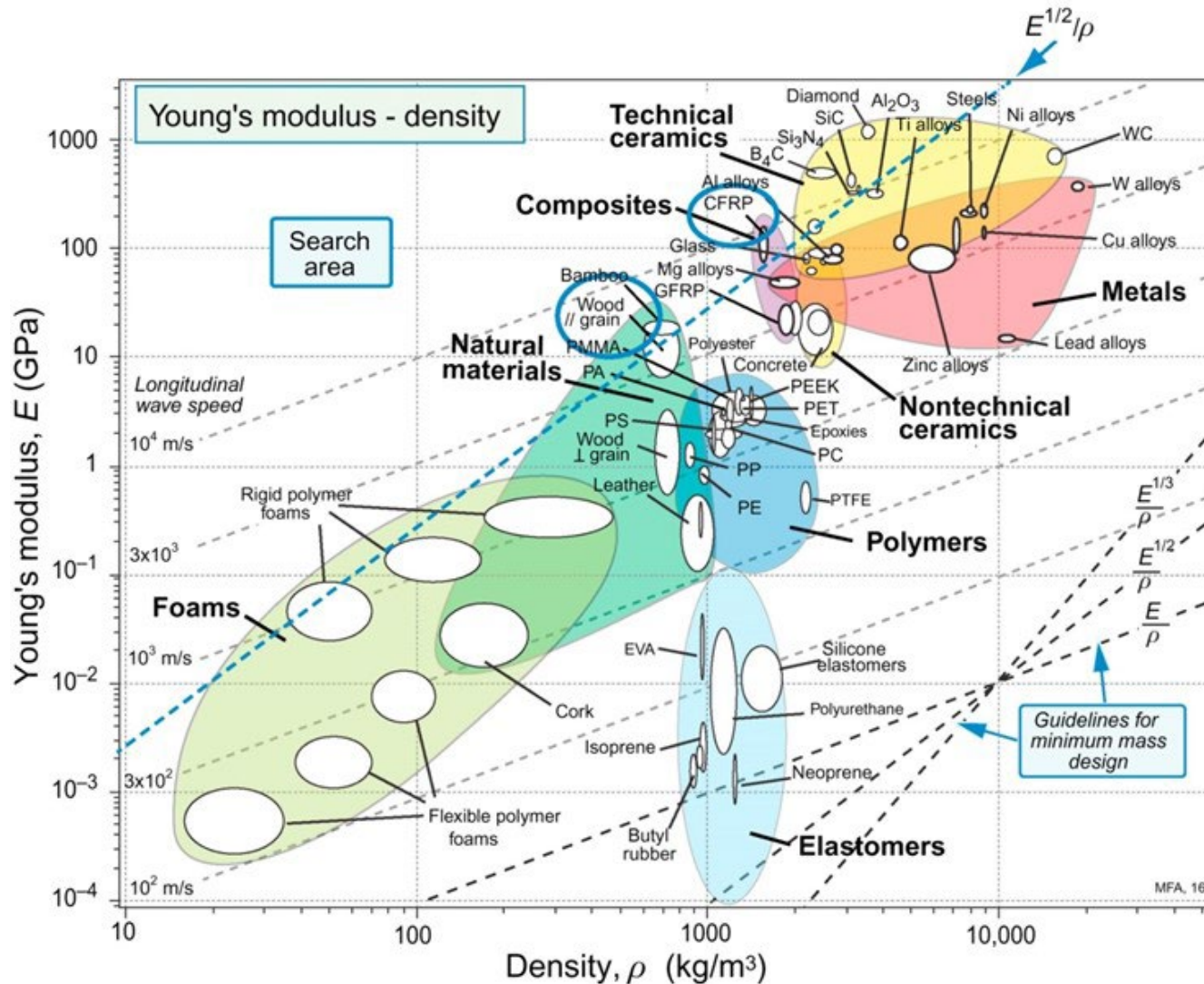
$$\delta = \frac{3}{4\pi} \frac{mgR^2}{Et^3}$$

$$m = \left(\frac{3g}{4\delta} \right)^{1/2} \pi R^4 \left[\frac{\rho}{E^{1/3}} \right]^{3/2}$$

$$M = \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

We treat the remaining constraints as attribute limits, requiring a melting point greater than 500°C to avoid creep, zero moisture take up, and a low thermal expansion coefficient ($\alpha < 20 \times 10^{-6}/\text{K}$).

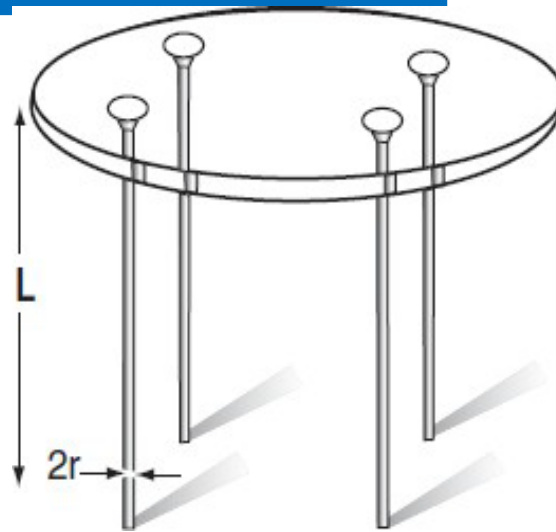
Case Studies-Επιλογή υλικού για Καθρέπτες για Μεγάλα Τηλεσκόπια



Case Studies-Επιλογή υλικού για Καθρέπτες για Μεγάλα Τηλεσκόπια

Material	$M = E^{1/3} / \rho$ (GPa) ^{1/3} · m ³ /Mg	m (tonne) $2R = 5.1 \text{ m}$ (from Eq. 5.4)	Comment
Steel (or speculum)	0.74	73.6	Very heavy. The original choice
GFRP	1.5	25.5	Not dimensionally stable enough – use for radio telescope
Al-alloys	1.6	23.1	Heavier than glass, and with high thermal expansion
Glass	1.7	21.6	The present choice
Mg-alloys	1.9	17.9	Lighter than glass but high thermal expansion
CFRP	3.0	9	Very light, but not dimensionally stable; use for radio telescopes
Foamed polystyrene	4.5	5	Very light, but dimensionally unstable. Foamed glass?

Case Studies- Επιλογή υλικού για πόδια τραπέζιου



Λειτουργία	Αντοχή σε θλιπτικά φορτία
Περιορισμοί	• Συγκεκριμένο μήκος L • Αντοχή σε λυγισμό • Αντοχή σε θραύση
Στόχος	Ελαχιστοποίηση της μάζας Ελαχιστοποίηση ακτίνας r
Ελεύθερες μεταβλητές	• Διάμετρος ποδιών $2r$ • Επιλογή Υλικού

Case Studies- Επιλογή υλικού για πόδια τραπεζιού

$$m = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot L$$

$$\left. \begin{array}{l} F \leq F_{cr} \\ F_{cr} = \frac{\eta \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_{xx}}{L^2} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} F = \frac{\eta \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_{xx}}{L^2} \\ I_{xx} = \frac{\pi \cdot r^4}{4} \end{array} \right\} r^2 = \frac{(4 \cdot F)^{1/2} \cdot L}{(\eta \cdot \pi^3)^{1/2} \cdot E^{1/2}}$$

$$\Rightarrow m = 2 \cdot F^{1/2} \cdot \left(\frac{L^4}{\eta \cdot \pi} \right)^{1/2} \frac{\rho}{E^{1/2}}$$

Αντικειμενική Συνάρτηση

δείκτης απόδοσης: $M_1 = \frac{E^{1/2}}{\rho}$

Case Studies - Επιλογή υλικού για πόδια τραπεζιού

$$F \leq F_{cr}$$

$$F_{cr} = \frac{\eta \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_{xx}}{L^2} \quad \left. \begin{array}{l} F = \frac{\eta \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_{xx}}{L^2} \\ I_{xx} = \frac{\pi \cdot r^4}{4} \end{array} \right\} \quad r^2 = \frac{(4 \cdot F)^{1/2} \cdot L}{(\eta \cdot \pi^3)^{1/2} \cdot E^{1/2}}$$

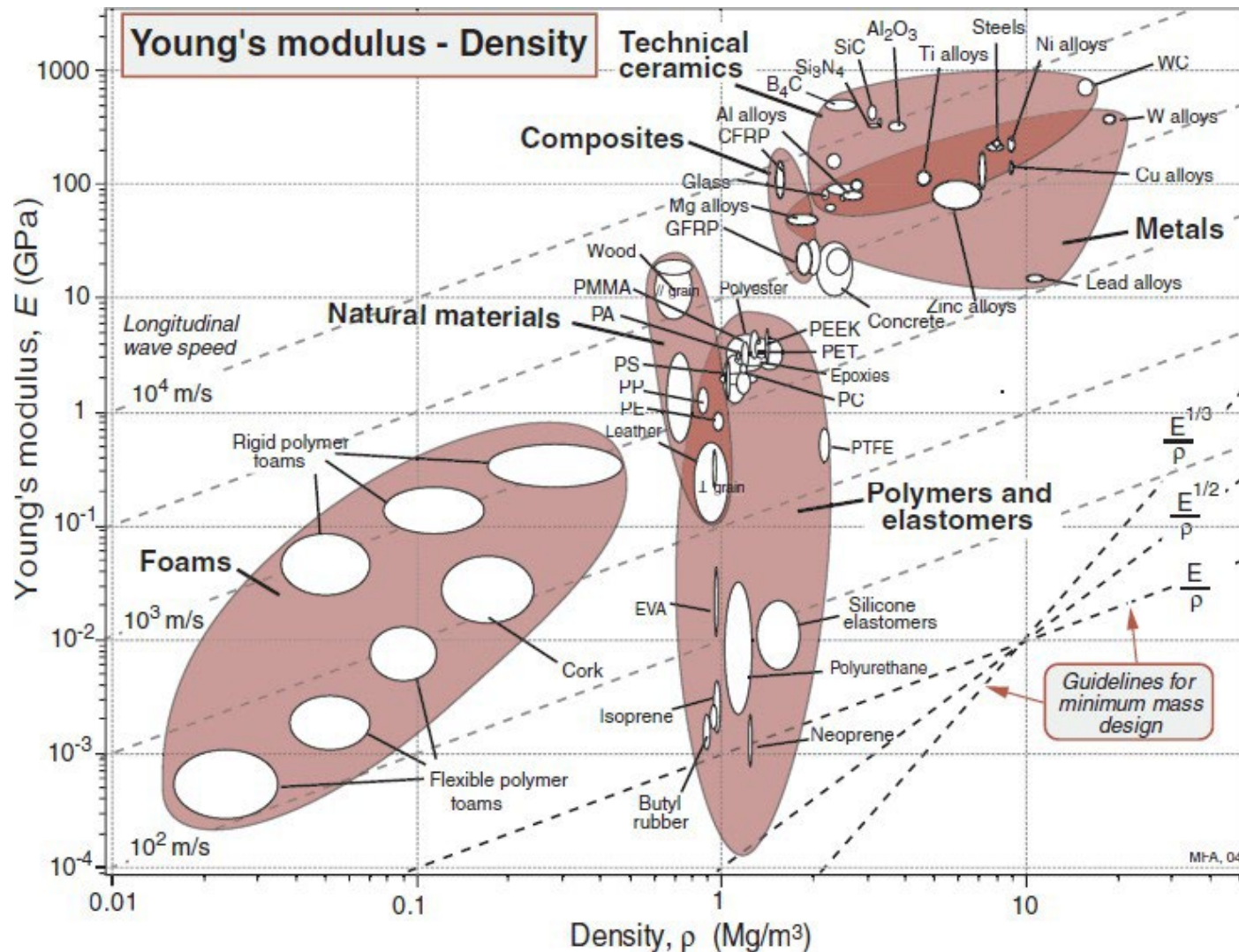
$$\Rightarrow r = \left(\frac{4 \cdot F}{\eta \cdot \pi^3} \right)^{1/4} L^{1/2} \left(\frac{1}{E} \right)^{1/4}$$

Αντικειμενική Συνάρτηση

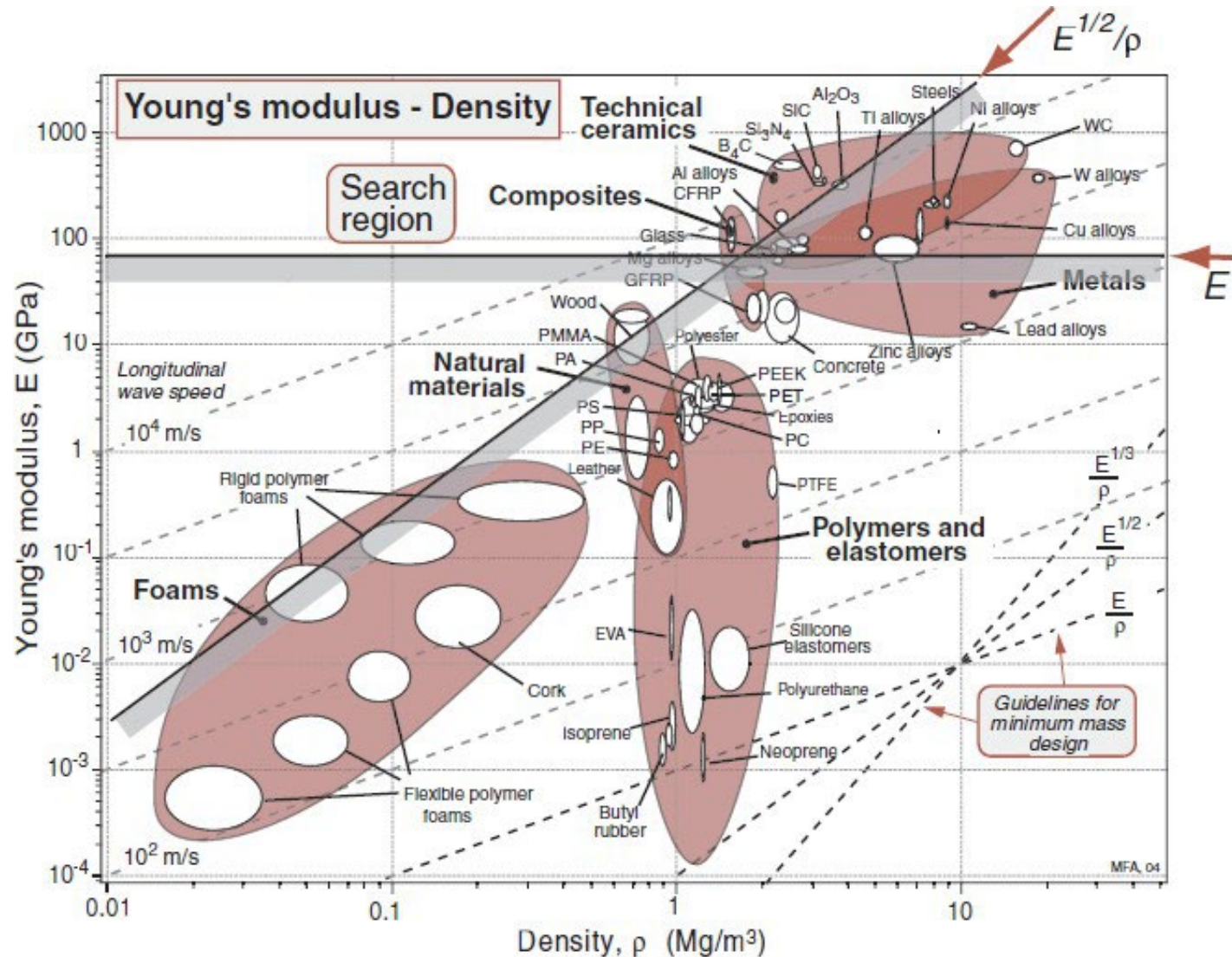
δείκτης απόδοσης:

$$M_2 = E$$

Case Studies - Επιλογή υλικού για πόδια τραπεζιού



Case Studies - Επιλογή υλικού για πόδια τραπεζιού

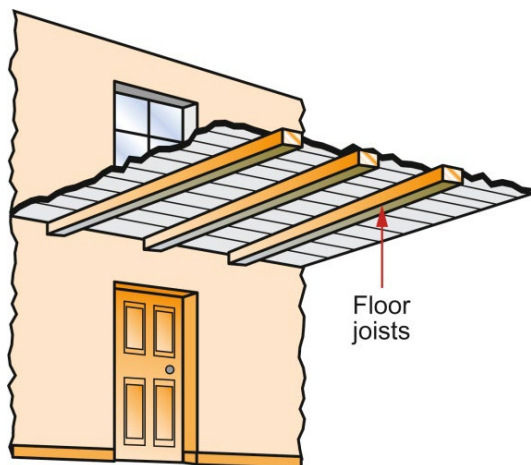




Material	Typical M_1 (GPa ^{1/2} · m ³ /Mg)	Typical M_2 GPa	Comment
<i>GFRP</i>	2.5	20	Cheaper than CFRP, but lower M_1 and M_2
<i>Woods</i>	4.5	10	Outstanding M_1 ; poor M_2 Cheap, traditional, reliable
<i>Ceramics</i>	6.3	300	Outstanding M_1 and M_2 . Eliminated by brittleness
<i>CFRP</i>	6.6	100	Outstanding M_1 and M_2 , but expensive

Case Studies - Επιλογή Υλικού για Δοκό Δαπέδου

Λειτουργία	Δοκός δαπέδου
Περιορισμοί	• Συγκεκριμένο μήκος L • Συγκεκριμένη ακαμψία S • Αντοχή σ_f δεν πρέπει να αστοχεί
Στόχος	Ελαχιστοποίηση του κόστους
Ελεύθερες μεταβλητές	• Διατομή Δοκού A • Επιλογή Υλικού



Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Δοκό Δαπέδου

$$C = m \cdot C_m = \rho \cdot A \cdot L \cdot C_m$$

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{F}{\delta} \\ \delta &= \frac{F \cdot L^3}{C_1 \cdot E \cdot I} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} S &= \frac{C_1 \cdot E \cdot I}{L^3} \\ I &= \frac{1}{12} b h^3 = \frac{1}{12} b^4 = \frac{1}{12} A^2 \end{aligned} \right\} A^2 = \frac{12 \cdot S \cdot L^3}{C_1 \cdot E}$$

$$\Rightarrow C = \rho \cdot \left(\frac{12 \cdot S \cdot L^3}{C_1 \cdot E} \right)^{1/2} \cdot L \cdot C_m = \left(\frac{12 \cdot S}{C_1} \right)^{1/2} \cdot L^{5/2} \cdot \frac{\rho \cdot C_m}{E^{1/2}}$$

Αντικειμενική Συνάρτηση

Δείκτης απόδοσης: $M_1 = \frac{E^{1/2}}{\rho \cdot C_m}$

Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Δοκό Δαπέδου

$$C = m \cdot C_m = \rho \cdot A \cdot L \cdot C_m$$

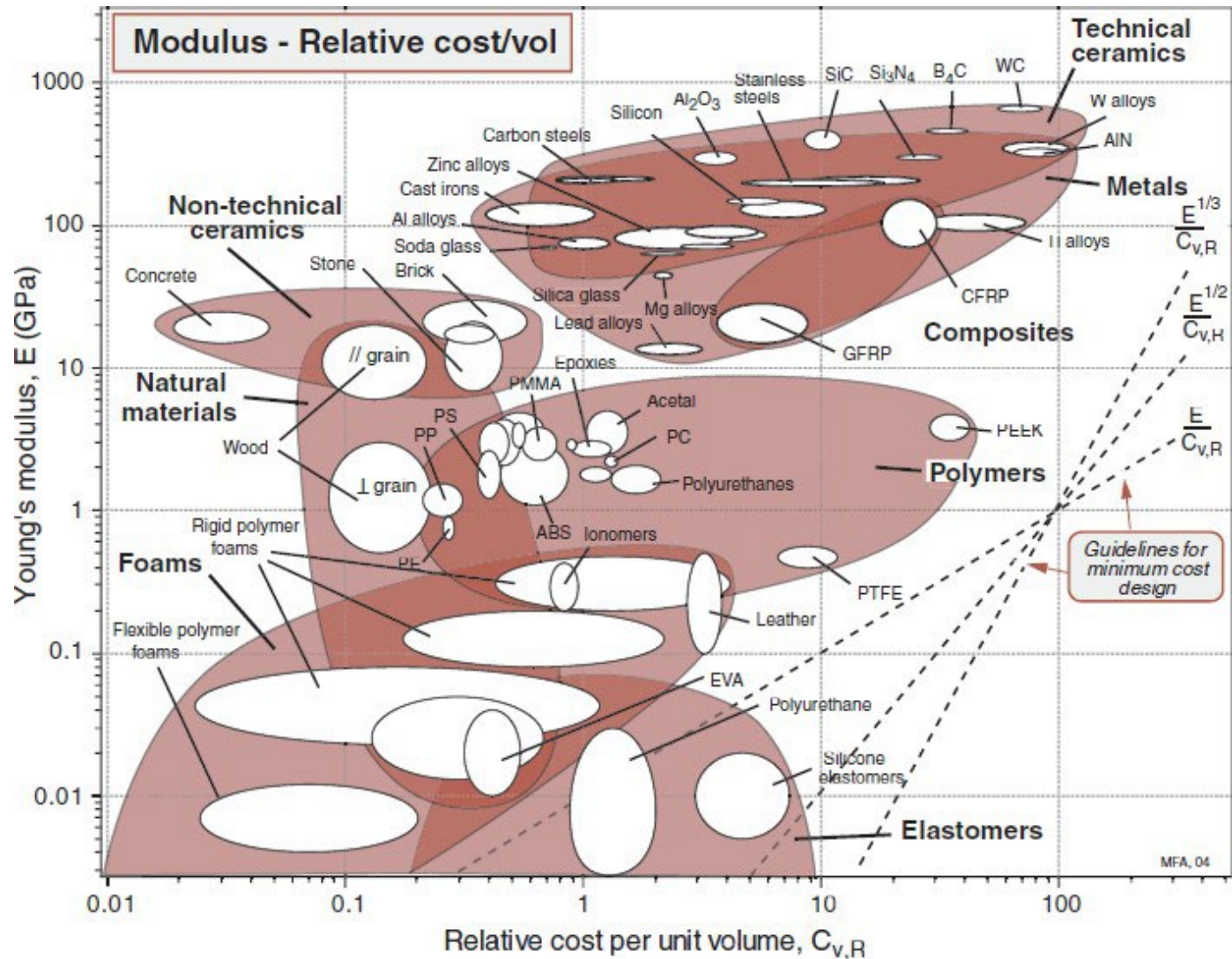
$$\left. \begin{aligned} F &\leq F_f \\ F_f &= C_2 \left(\frac{I}{y_m} \right) \frac{\sigma_f}{L} \\ \frac{I}{y_m} &= \frac{bh^2}{6} = \frac{b^3}{6} = \frac{A^{3/2}}{6} \end{aligned} \right\} F = C_2 \frac{A^{3/2}}{6} \frac{\sigma_f}{L} \Rightarrow A = \left(\frac{6 \cdot F \cdot L}{C_2 \cdot \sigma_f} \right)^{2/3}$$

$$\Rightarrow C = \rho \cdot \left(\frac{6 \cdot F \cdot L}{C_2 \cdot \sigma_f} \right)^{2/3} \cdot L \cdot C_m = \left(\frac{6 \cdot F \cdot L}{C_2} \right)^{2/3} \cdot L \cdot \frac{\rho \cdot C_m}{\sigma_f^{2/3}}$$

Αντικειμενική Συνάρτηση

Δείκτης απόδοσης: $M_2 = \frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho \cdot C_m}$

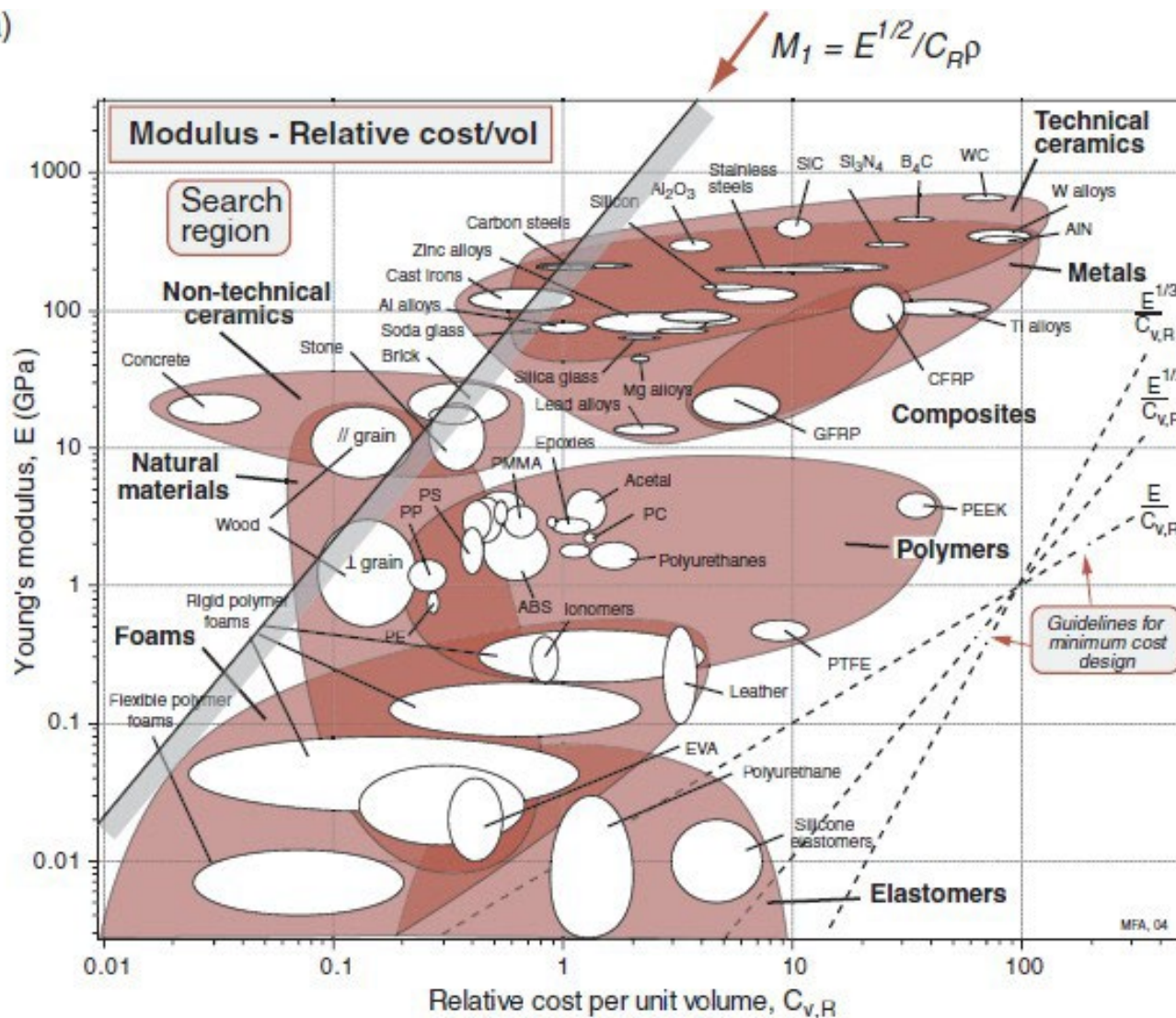
Επιλογή Υλικού για Δοκό Δαπέδου



Παράδειγμα

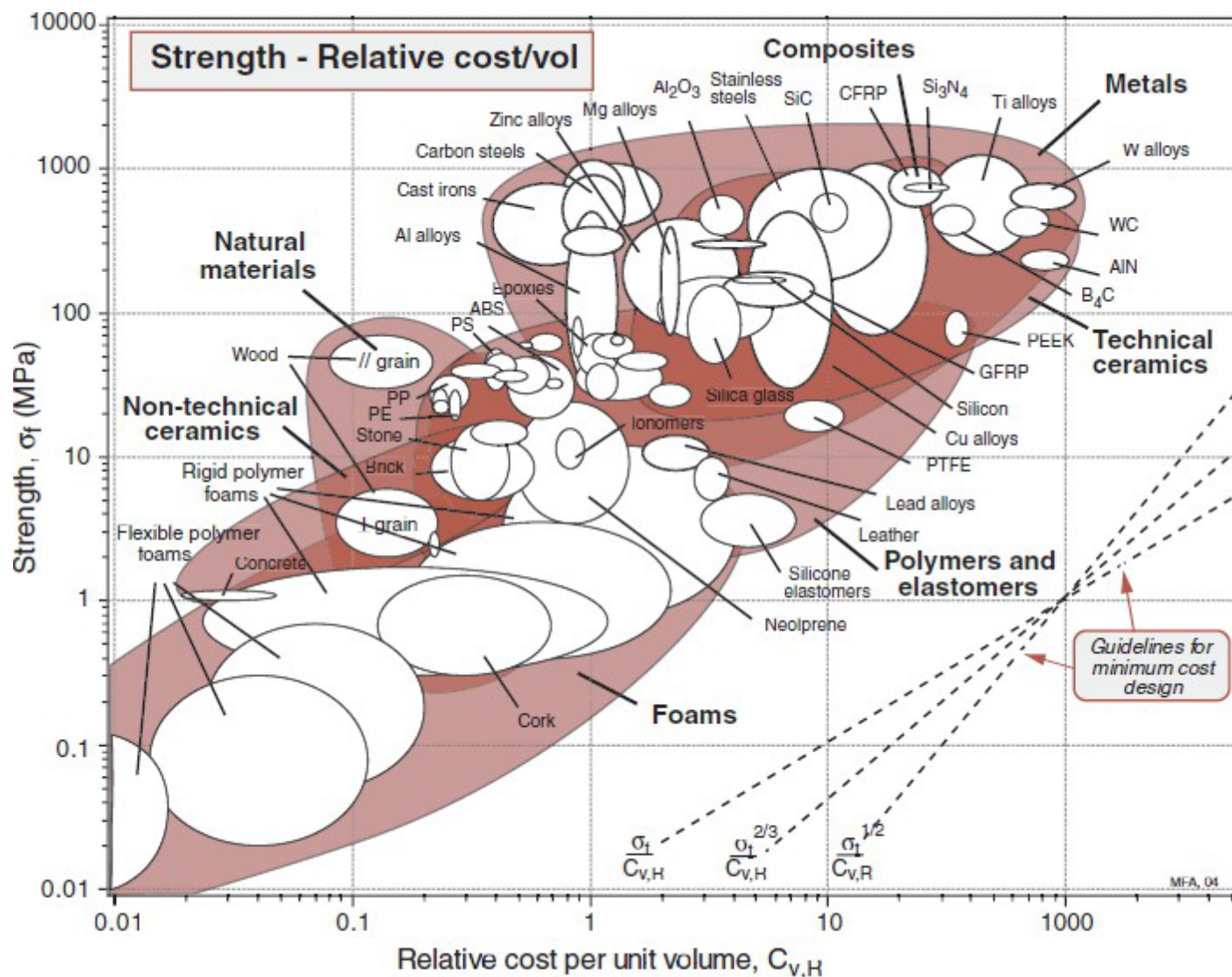
Επιλογή Υλικού για Δοκό Δαπέδου

(a)



Παράδειγμα

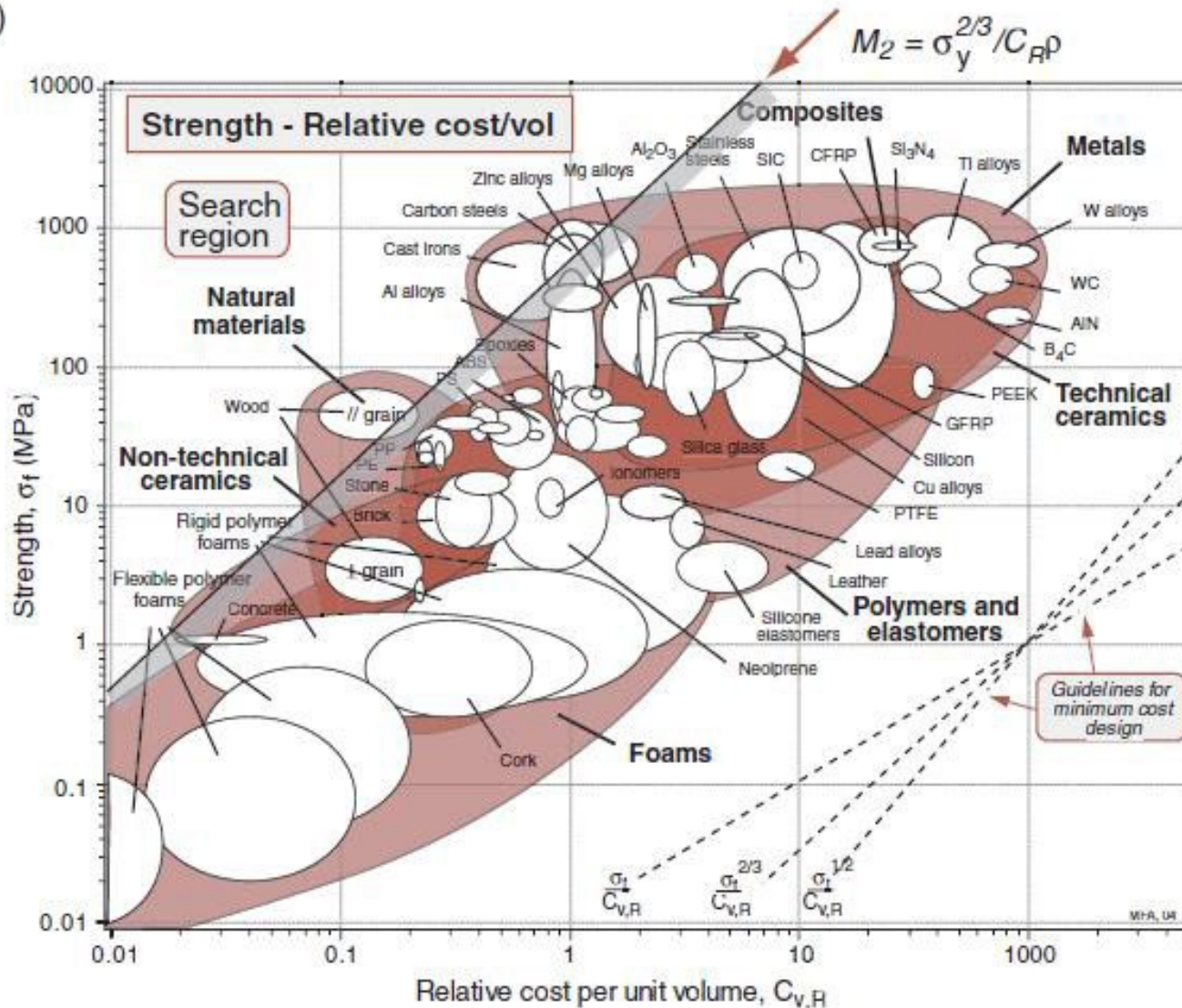
Επιλογή Υλικού για Δοκό Δαπέδου



Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Δοκό Δαπέδου

(b)





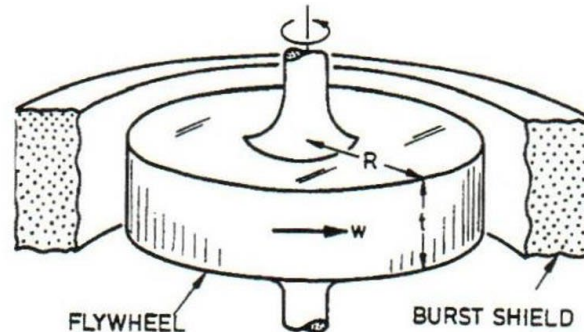
Material	Typical M_1 (GPa ^{1/2} · m ³ /Mg)	Typical M_2 GPa	Comment
<i>GFRP</i>	2.5	20	Cheaper than CFRP, but lower M_1 and M_2
<i>Woods</i>	4.5	10	Outstanding M_1 ; poor M_2 Cheap, traditional, reliable
<i>Ceramics</i>	6.3	300	Outstanding M_1 and M_2 . Eliminated by brittleness
<i>CFRP</i>	6.6	100	Outstanding M_1 and M_2 , but expensive

Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Σφονδύλους

Case study 2: Υλικά για σφονδύλους

Οι σφόνδυλοι (βολάν) αποθηκεύουν κινητική ενέργεια. Οι μικροί σφόνδυλοι, που βρίσκονται στα παιδικά παιχνίδια, είναι κατασκευασμένοι από μολύβι. Οι παλιές ατμομηχανές έχουν σφόνδυλο από μαντέμι. Πρόσφατα προτάθηκε η χρήση σφονδύλων για αποθήκευση ενέργειας και για αναγεννητική πέδηση (regenerative braking) στα οχήματα. Μερικοί έχουν ήδη κατασκευαστεί από χάλυβα, χυτοσίδηρο, μολύβι αλλά και από σύνθετα υλικά. Ποια είναι όμως η καλύτερη επιλογή υλικού για σφονδύλους; Θεωρείστε ότι ένας αποδοτικός σφόνδυλος πρέπει να αποθηκεύει όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα μάζας, χωρίς να αστοχεί. Επίσης θεωρείστε ότι ο σφόνδυλος είναι δίσκος με ακτίνα R και πάχος t , που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω .



Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Σφονδύλους

Λειτουργία	Αποθήκευση κινητικής ενέργειας
Περιορισμοί	• Συγκεκριμένη ακτίνα R • Να μην αστοχεί, συγκεκριμένο σ_f • Αντοχή σε θραύση (μεγάλο K_{Ic})
Στόχος	Μεγιστοποίηση κινητικής ενέργειας ανά μονάδα μάζας

Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Σφονδύλους

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{\pi}{4} \rho \cdot t \cdot \omega^2 \cdot R^4 \\ m &= \pi \cdot R^2 \cdot t \cdot \rho \end{aligned} \right\} \frac{U}{m} = \frac{1}{4} \omega^2 \cdot R^2$$

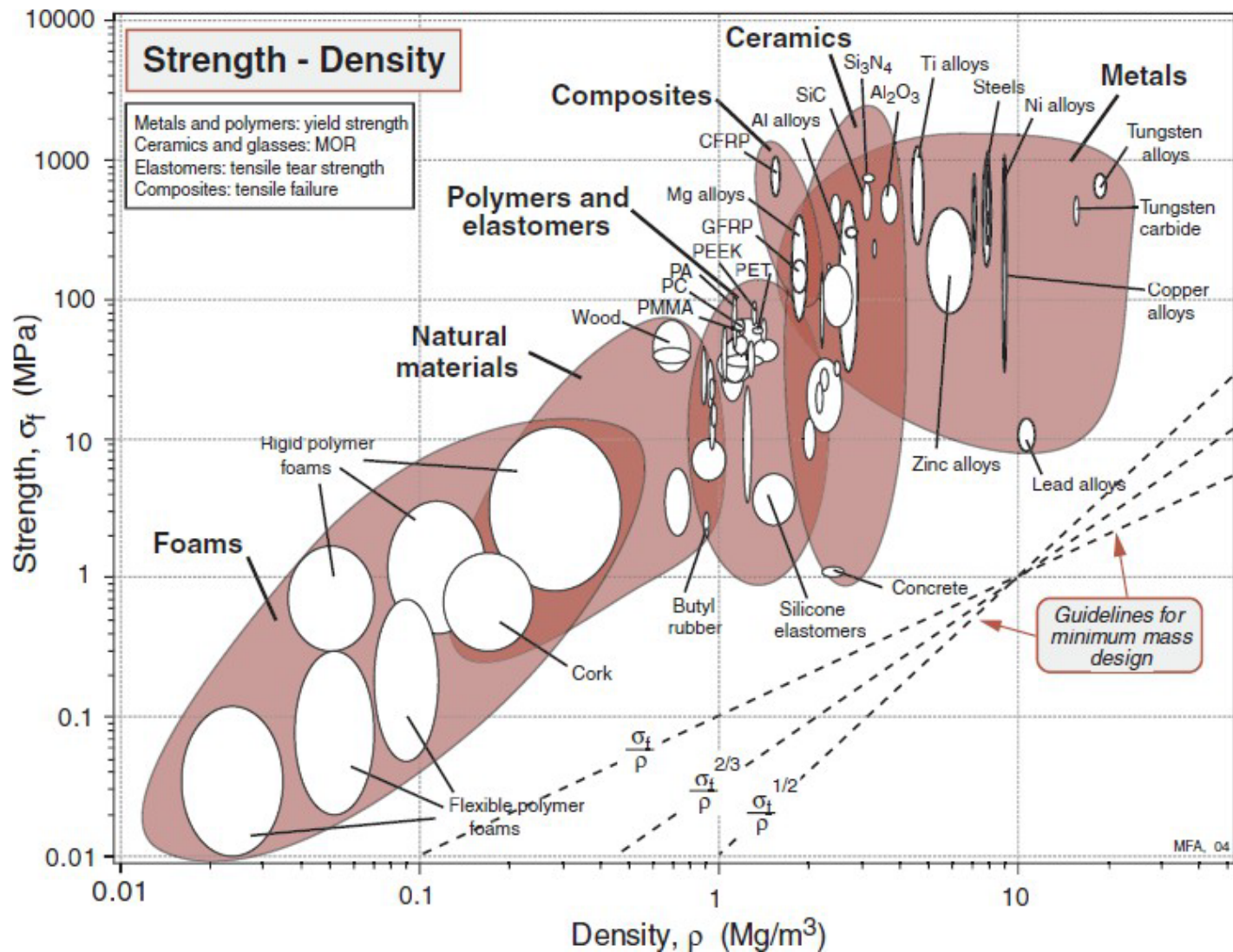
$$\left. \begin{aligned} \sigma &\leq \sigma_f \\ \sigma &= \frac{3+\nu}{8} \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 \approx \frac{1}{2} \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 \end{aligned} \right\} \sigma_f = \frac{1}{2} \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 \Rightarrow \omega^2 = \frac{2 \cdot \sigma_f}{\rho \cdot R^2}$$

$$\Rightarrow \frac{U}{m} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_f}{\rho} \quad \textbf{\underline{Αντικειμενική Συνάρτηση}}$$

δείκτης απόδοσης: $M_1 = \frac{\sigma_f}{\rho}$

Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Σφονδύλους



Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Σφονδύλους

Λειτουργία	Αποθήκευση κινητικής ενέργειας
Περιορισμοί	• Συγκεκριμένη ακτίνα R • Να μην αστοχεί, συγκεκριμένο σ_f • Αντοχή σε θραύση (μεγάλο K_{Ic}) • Δεδομένη γωνιακή ταχύτητα ω
Στόχος	Μεγιστοποίηση κινητικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου

Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Σφονδύλους

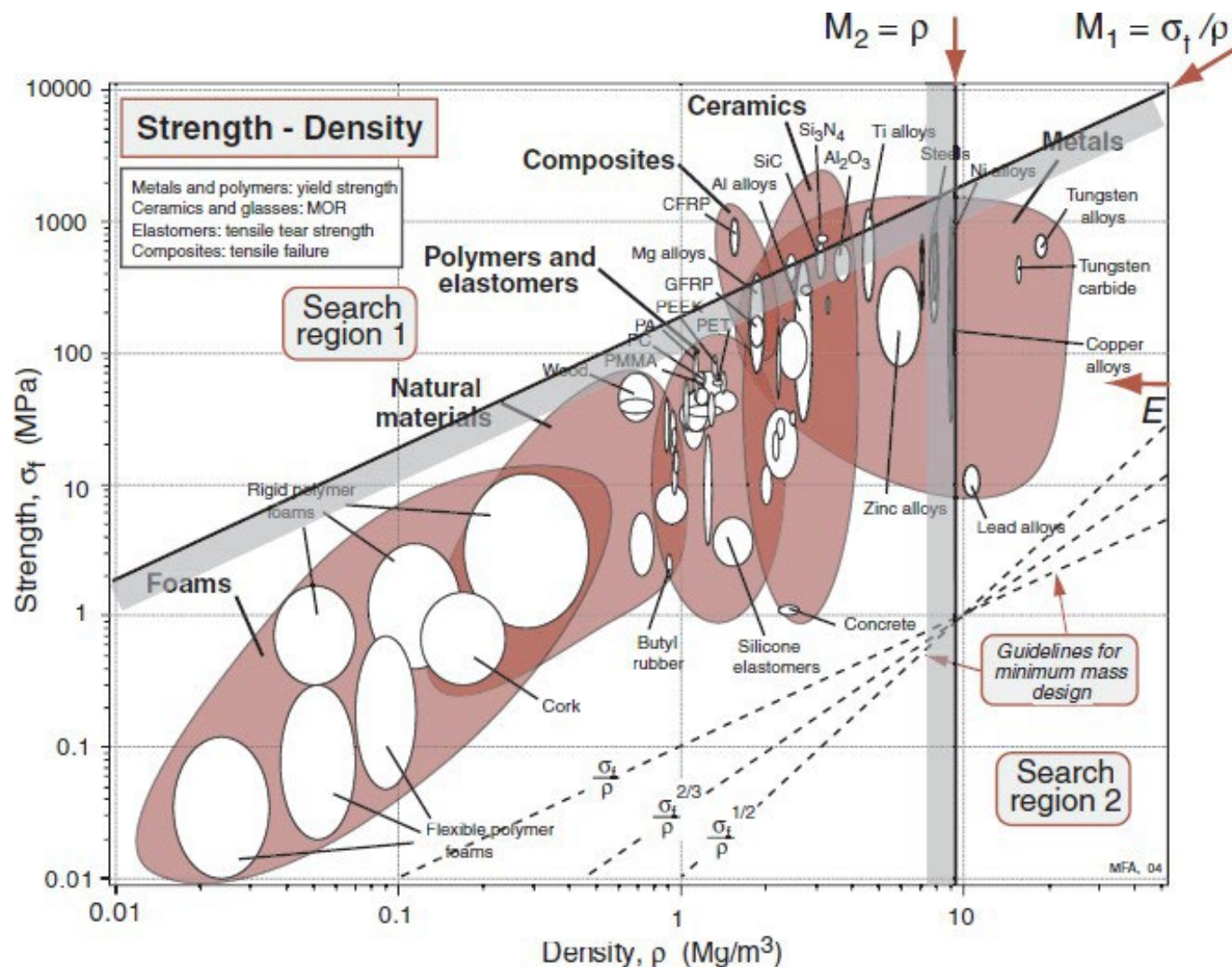
$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{\pi}{4} \rho \cdot t \cdot \omega^2 \cdot R^4 \\ V &= \frac{m}{\rho} = \pi \cdot R^2 \cdot t \end{aligned} \right\} \frac{U}{V} = \frac{1}{4} \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2$$

Αντικειμενική Συνάρτηση

δείκτης απόδοσης: $M_2 = \rho$

Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Σφονδύλους

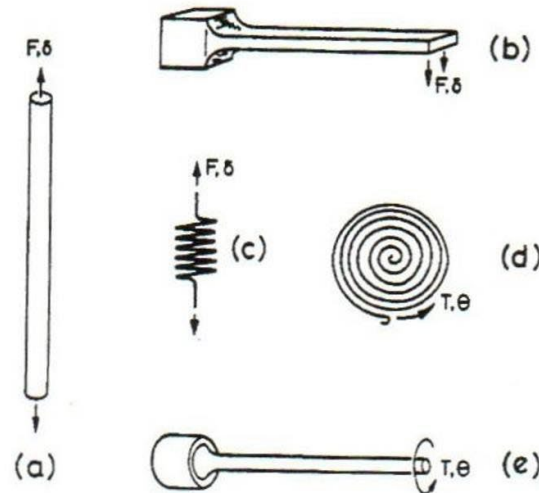


Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Ελατήρια

Case study 4: Υλικά για ελατήρια

Τα ελατήρια κατασκευάζονται σε πολλές μορφές και για διάφορους σκοπούς: αξονικά, φυλλοειδή και ελικοειδή ελατήρια ή αντιστρεπτικές ράβδοι κ.λ.π. Όλα όμως πρέπει να αποθηκεύουν ελαστική ενέργεια χωρίς να αστοχούν. Ποια είναι όμως τα καταλληλότερα υλικά για την κατασκευή τους. Χρησιμοποιείτε ως κριτήρια την ελαχιστοποίηση του βάρους ή του όγκου τους.



Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Ελατήρια

Λειτουργία	Ελατήριο
Περιορισμοί	• Να μην αστοχεί, συγκεκριμένο σf
Στόχος	• Μεγιστοποίηση της αποθηκευμένης ελαστικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου • Μεγιστοποίηση της αποθηκευμένης ελαστικής ενέργειας ανά μονάδα μάζας

Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Ελατήρια

- Ελαστική ενέργεια ανά μονάδα όγκου

$$U = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{E}$$

$$\sigma \leq \sigma_f \Rightarrow \sigma = \sigma_f$$



$$U = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_f^2}{E}$$

Αντικειμενική Συνάρτηση

δείκτης απόδοσης: $M_1 = \frac{\sigma_f^2}{E}$

Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Ελατήρια

- Ελαστική ενέργεια ανά μονάδα μάζας

$$\frac{U}{\rho} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{\rho \cdot E}$$

$$\sigma \leq \sigma_f \Rightarrow \sigma = \sigma_f$$



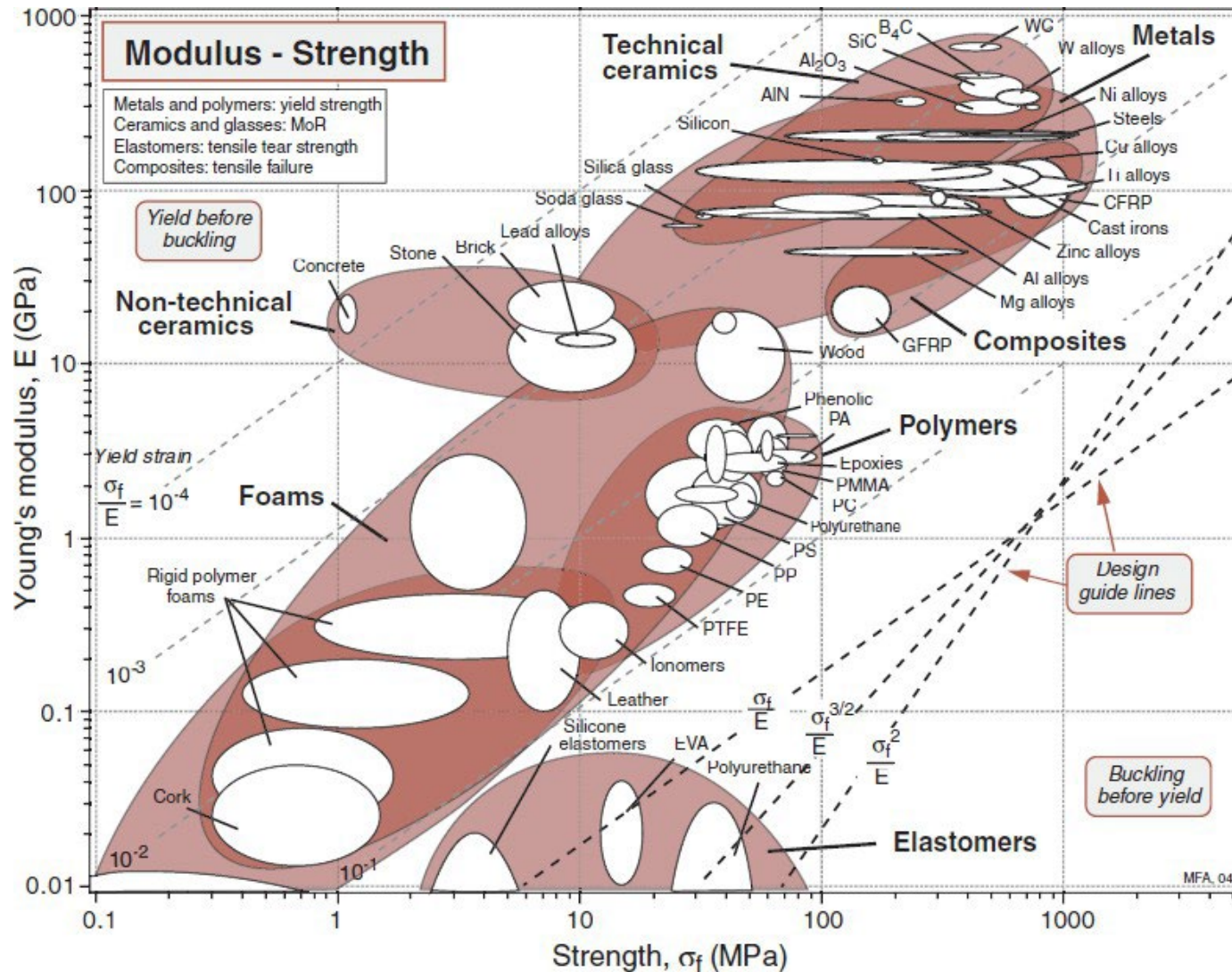
$$\frac{U}{\rho} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_f^2}{\rho \cdot E}$$

Αντικειμενική Συνάρτηση

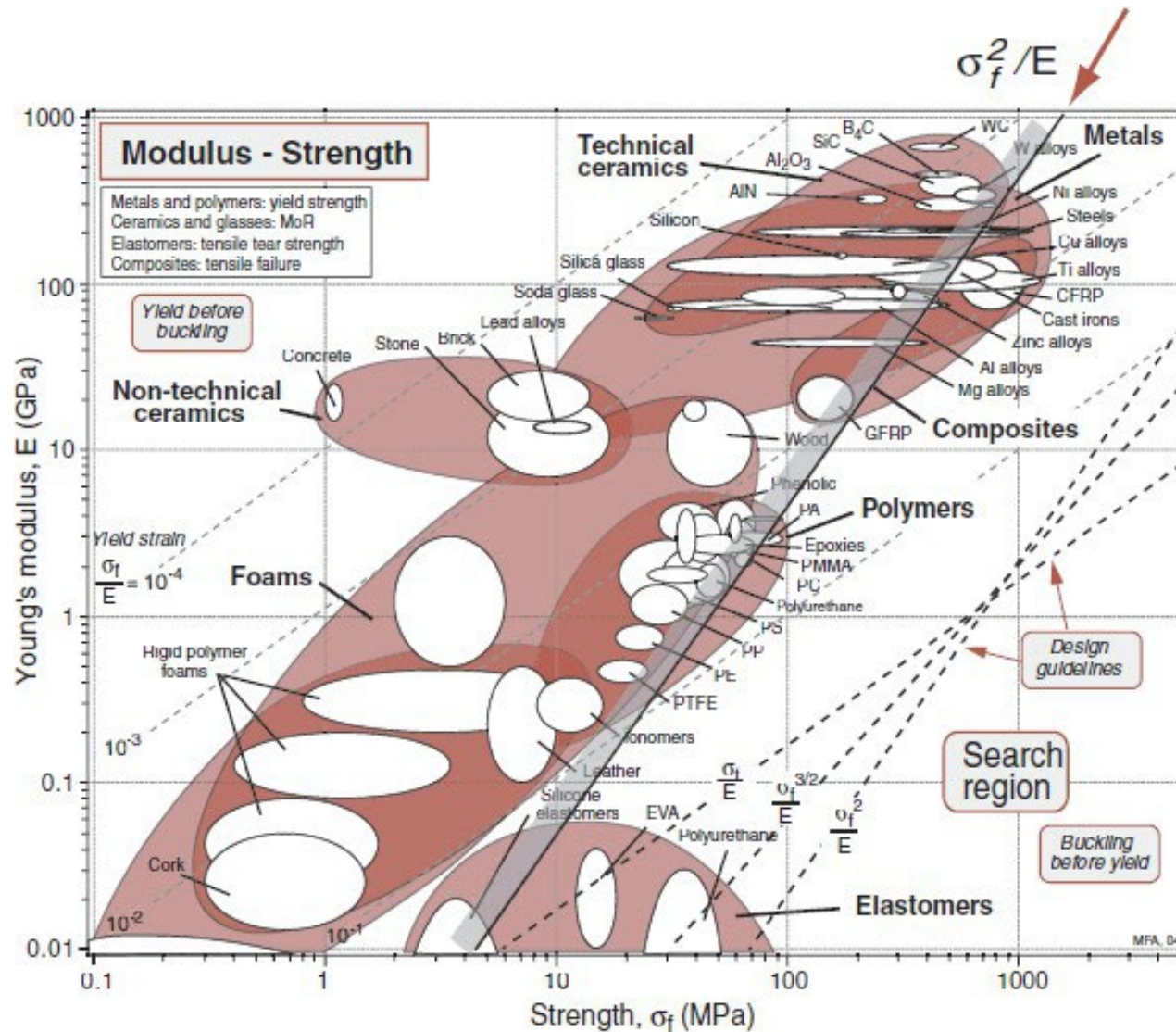
δείκτης απόδοσης: $M_2 = \frac{\sigma_f^2}{\rho \cdot E}$

Παράδειγμα

Επιλογή Υλικού για Ελατήρια



Επιλογή Υλικού για Ελατήρια









Case Studies-Επιλογή υλικού για Κουπί

Function

Oar-meaning light, stiff beam

Objective

Minimize the mass, m

$$m = AL\rho$$

$$m = \pi R^2 L \rho$$

Constraints

Length L specified

Bending stiffness S^* specified

Toughness $G_{1c} > 1\text{kJ/m}^2$

$$S = \frac{CEI}{L^3}$$

$$I = \pi R^4 / 4$$

Free
variables

Shaft diameter

Choice of material