

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΩΝ Ι

Πάτρα, 2022

Μηχανολογικός Σχεδιασμός

Περιλαμβάνει δύο στάδια:

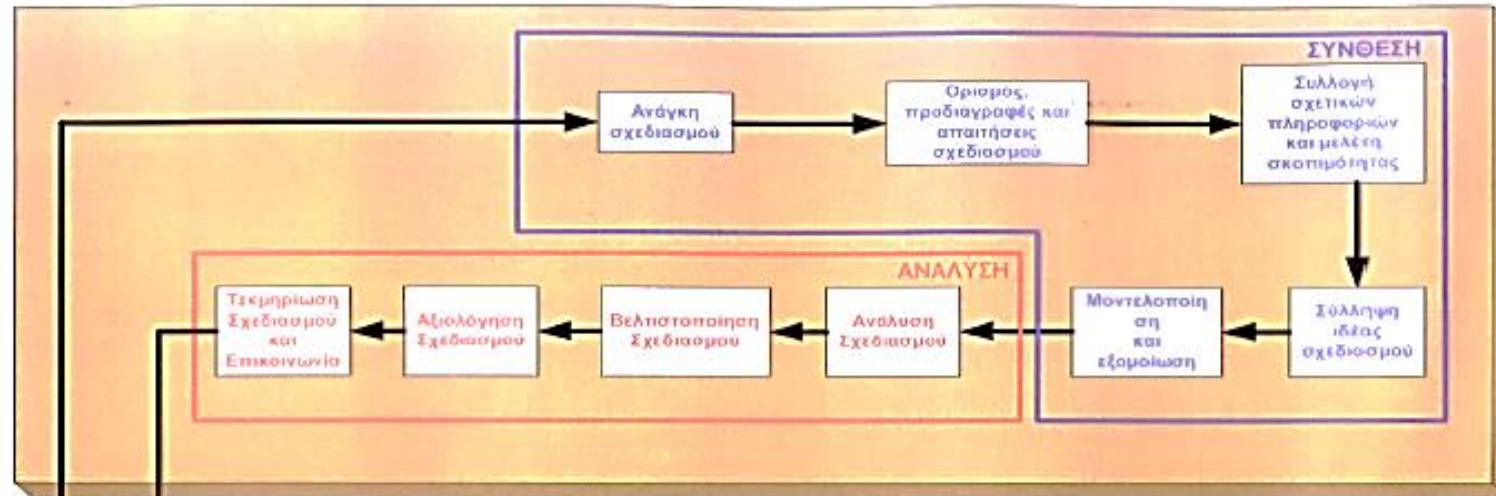
- Διαδικασία Σχεδιασμού
 - Σύνθεση και ανάλυση
- Διαδικασία Παραγωγής
 - Σχεδιασμός διαδικασιών, παραγωγή, ποιοτικός έλεγχος, διάθεση στην αγορά



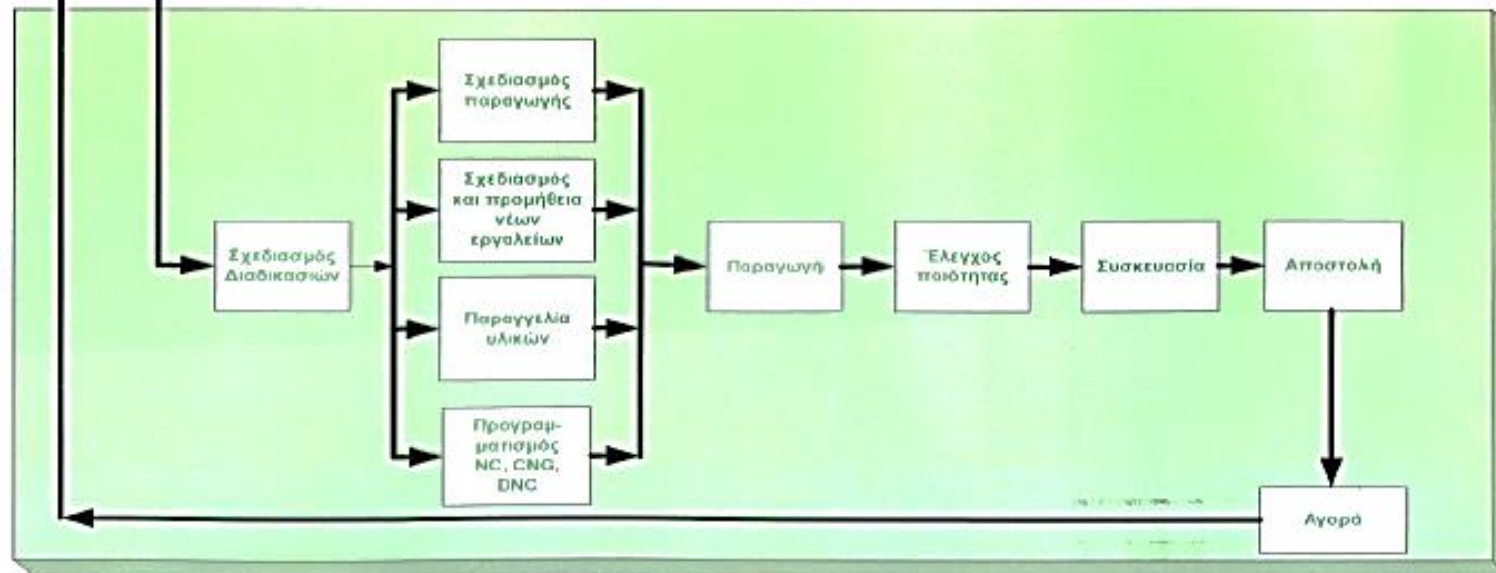
...Μηχανολογικός Σχεδιασμός

ΤΥΠΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ

Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

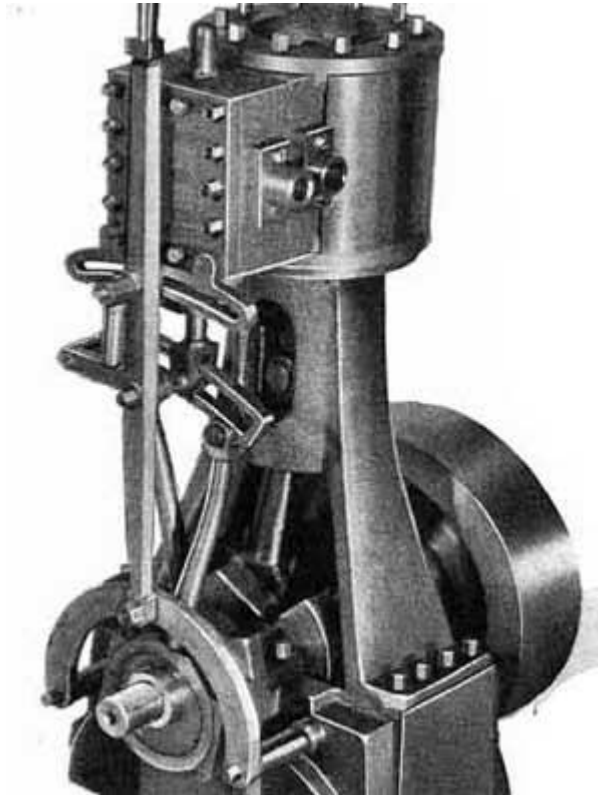


Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ



Μηχανή

Ο συνδυασμός εκείνων των **στοιχείων** και των μηχανισμών που μετασχηματίζουν, μεταφέρουν ή χρησιμοποιούν ενέργεια, φορτίο ή κίνηση για ένα συγκεκριμένο σκοπό



Στοιχεία Μηχανών

Στοιχειώδεις μηχανισμοί που απαρτίζουν μία Μηχανή:

Συναρμογών

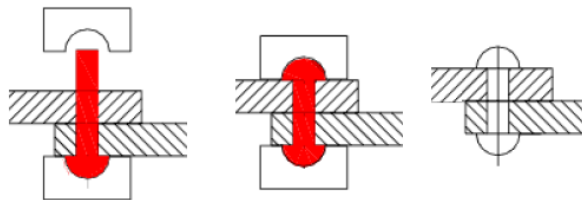
Κοχλίες →



Συγκολλήσεις →



Ηλώσεις →



Μεταφοράς Ισχύος

...Στοιχεία Μηχανών

Ελατήρια →



Άξονες →



Ιμάντες →



...Στοιχεία Μηχανών

Μεταφοράς Ισχύος

Αλυσίδες →



Φρένα →



Συμπλέκτες →



...Στοιχεία Μηχανών

Μεταφορά Ισχύος

Έδρανα ολίσθησης →



Έδρανα κύλισης →



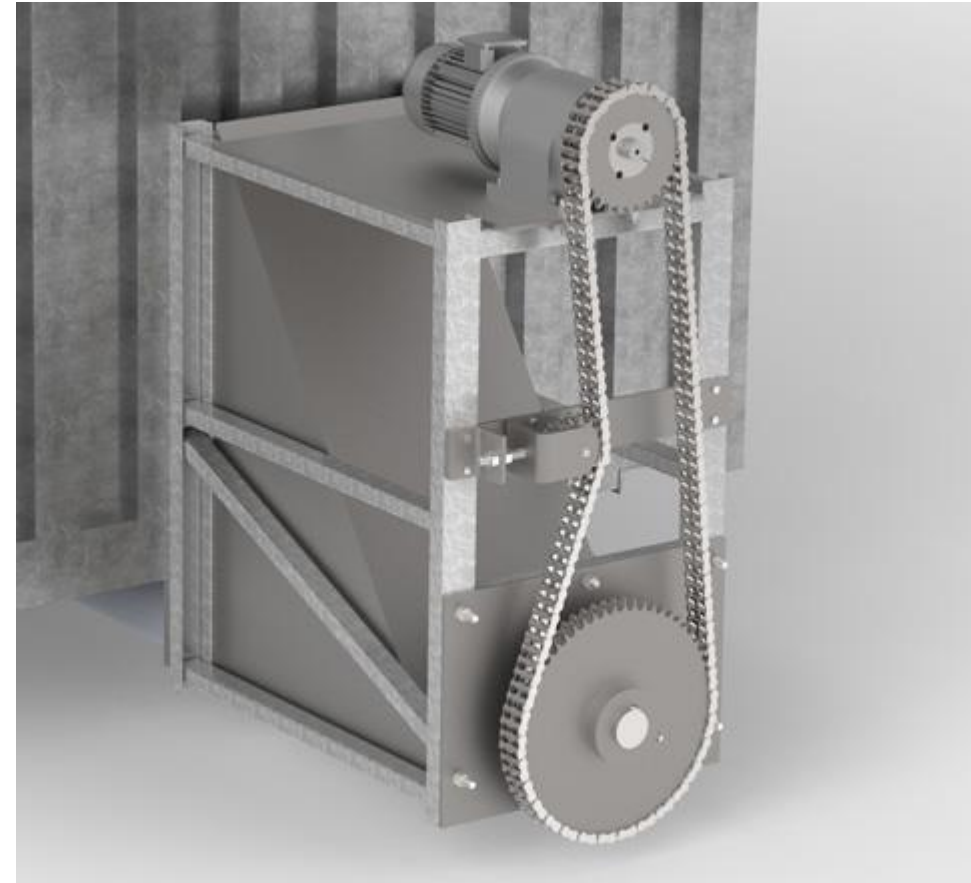
Οδοντωτοί τροχοί →



Μηχανολογικός Σχεδιασμός

Είναι η διαδικασία του μετασχηματισμού μιας νέας ιδέας ή μιας ανάγκης σε λεπτομερή πληροφορία,

μέσω της οποίας το στοιχείο της μηχανής, η μηχανή ή η παραγωγική διαδικασία που ικανοποιεί επιθυμητές ανάγκες, μπορεί να κατασκευαστεί.



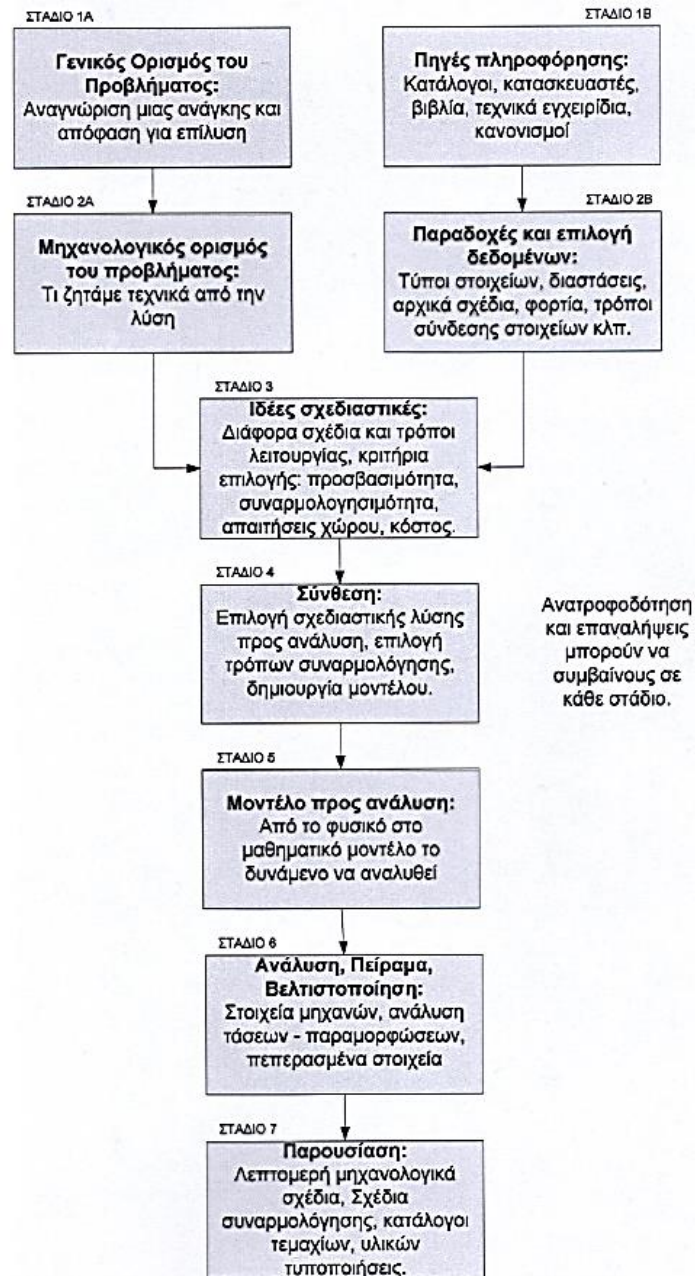
Περί Σχεδιασμού

- Σχεδιασμός με γνώμονα:
 - Λειτουργικότητα
 - Κόστος
 - Ασφάλεια
 - Περιβάλλον

Το καλό προϊόν πρέπει να:

- λειτουργεί πάντα σύμφωνα με τις προδιαγραφές του
- ικανοποιεί τα κριτήρια του κόστους
- είναι ανταγωνιστικό οικονομικά
- χρειάζεται λίγη ή καθόλου συντήρηση
- είναι ασφαλές στη χρήση ή στη λειτουργία του
- μην δημιουργεί ηθικά διλήμματα κατά την χρήση ή την εφαρμογή του.

Τα 7 στάδια του σχεδιασμού κατά Sandor (1964)



Είδη σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός προϊόντων μπορεί να καταταγεί σε δύο βασικά είδη:

- τον επαναστατικό
- τον εξελικτικό

Επαναστατικός Σχεδιασμός

Ο επαναστατικός σχεδιασμός καταλήγει σε μια εντελώς νέα ιδέα, τεχνολογία ή νέο προϊόν.



V-2 Rocket Wernhervon Braun, 1942, Germany

Εξελεγκτικός Σχεδιασμός

Ο εξελικτικός σχεδιασμός καταλήγει σε νέο προϊόν ή τεχνολογία που αποτελεί εξέλιξη προϋπάρχοντος προϊόντος ή τεχνολογίας.



Νέα έκδοση της Porsche 911

Οπτικές Γωνίες Μηχανολογικού Σχεδιασμού

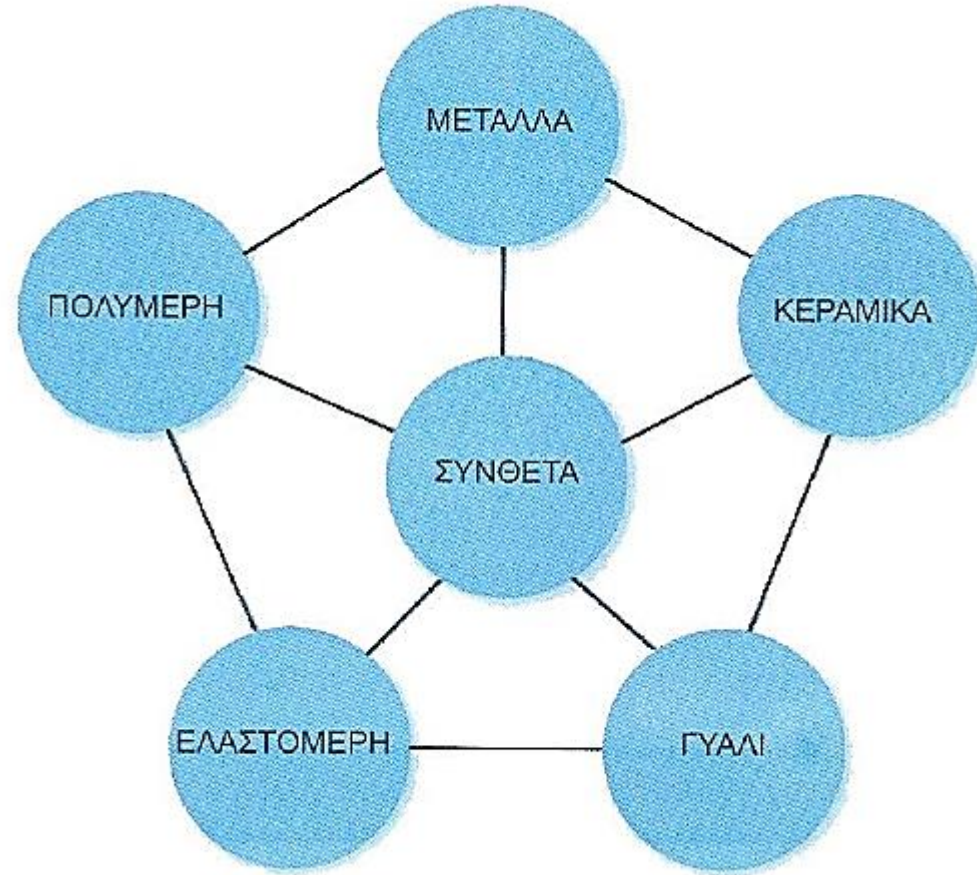
1	ΑΝΤΟΧΗ	12	ΚΟΣΤΟΣ
2	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ	13	ΛΙΠΑΝΣΗ
3	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	14	ΜΕΓΕΘΟΣ
4	ΒΑΡΟΣ	15	ΜΟΡΦΗ
5	ΔΙΑΒΡΩΣΗ	16	ΟΓΚΟΣ
6	ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ	17	ΣΤΙΒΑΡΟΤΗΤΑ
7	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	18	ΣΤΥΛ - ΕΜΦΑΝΙΣΗ
8	ΕΥΚΑΜΨΙΑ	19	ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ
9	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	20	ΤΡΙΒΗ
10	ΘΟΡΥΒΟΣ	21	ΦΘΟΡΑ
11	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	22	ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ

Ιδιότητες Υλικών

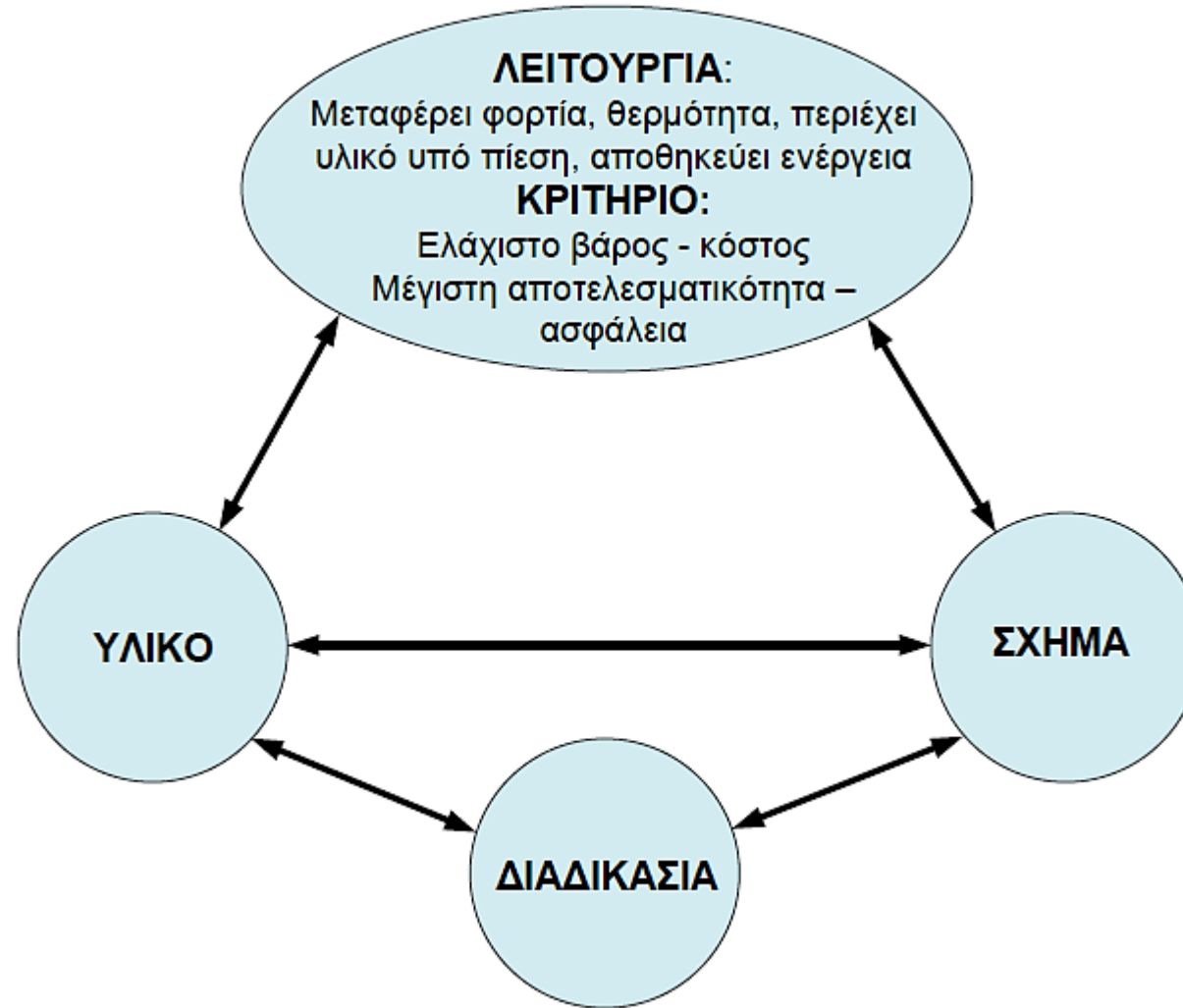
Οι ιδιότητες των υλικών γενικά χωρίζονται σε φυσικές ιδιότητες, σε μηχανικές και σε θερμικές.

- Φυσικές ιδιότητες είναι η πυκνότητα ρ (kg/m³), η θερμοκρασία τήξης (°C) και η θερμοκρασία βρασμού (°C).
- Μηχανικές ιδιότητες είναι το όριο θραύσης σε εφελκυσμό σ_u ή S_u (MPa), το όριο διαρροής σ_y ή S_y (MPa), η επιμήκυνση ή διάταση θραύσης δ %, το όριο της διαρκούς αντοχής ή της αντοχής σε κόπωση σ_e ή S_e (MPa), το Μέτρο Ελαστικότητας του Young E (GPa), το Μέτρο Διάτμησης ή Στρέψης G (GPa) και ο λόγος Poisson ν .
- Η σχέση που συνδέει τα τρία τελευταία μεγέθη είναι: $E=2G(1+\nu)$ για ισότροπα υλικά.
- Θερμικές ιδιότητες είναι ο συντελεστής γραμμικής διαστολής α (mm/(mm°C)), και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m°C).
- Το κόστος των υλικών (€/kg) είναι σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού και όπως και η αντίσταση στη φθορά και στη οξείδωση.

Κατηγοριοποίηση Υλικών



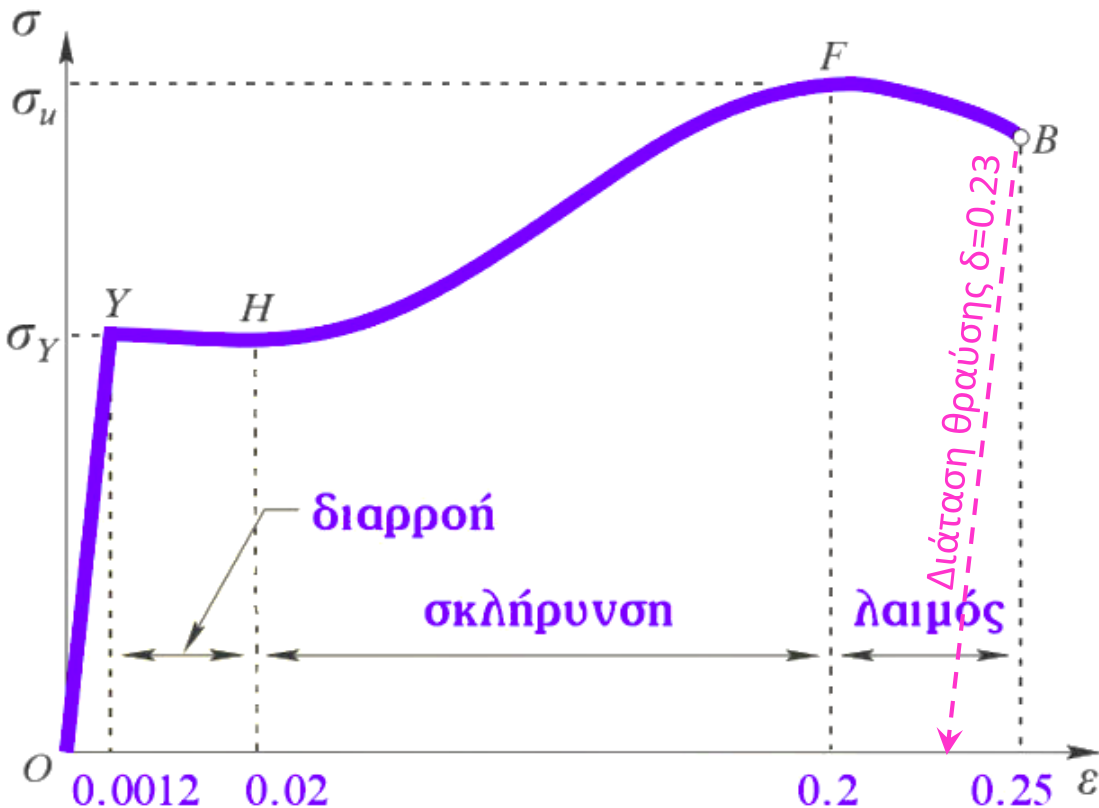
Επιλογή Υλικών



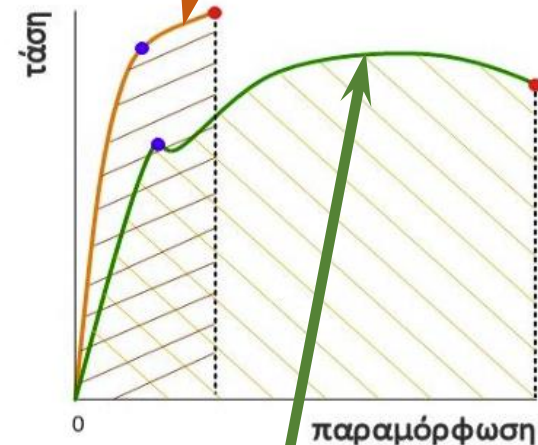
Διαγράμματα Τάσης-Παραμόρφωσης Μεταλλικών Υλικών

Αντοχή σε εφελκυσμό
ή όριο θραύσης

Όριο διαρροής

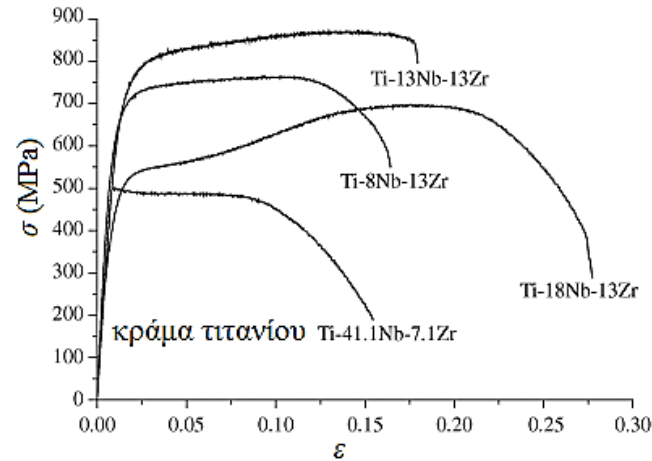
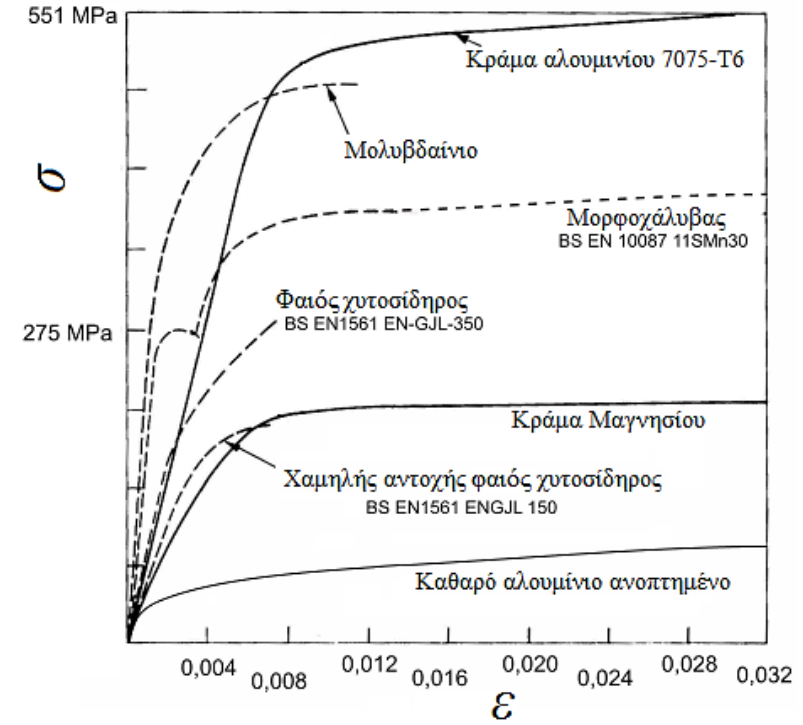
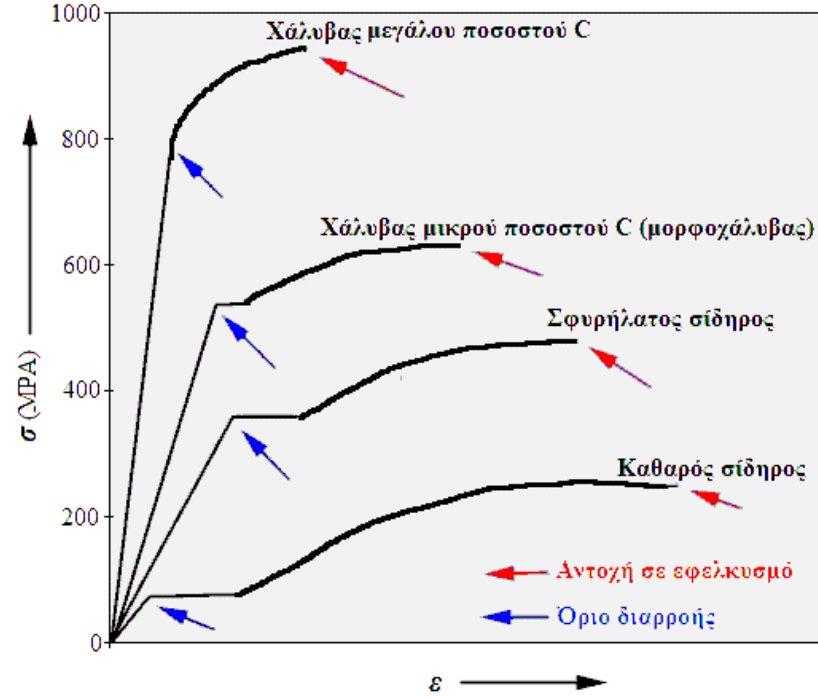


■ ψαθυρό υλικό
■ όλκιμο υλικό
● σημείο διαρροής
● σημείο θραύσης



Υλικό	Όριο διαρροής (MPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Διάταση θραύσης %	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Λόγος Poisson
1040 χάλυβας	350	520	30	207000	0.30
1080 χάλυβας	380	615	25	207000	0.30
2024 κράμα Al	100	200	18	72000	0.33
316 ανοξ. χάλυβας	210	550	60	195000	0.30
70/30 ορείχαλκος	75	300	70	110000	0.35
6-4 κράμα Ti	942	1000	14	107000	0.36
AZ80 κράμα Mg	285	340	11	45000	0.29

Τυπικές Καμπύλες Εφελκυσμού Μεταλλικών Υλικών



Τυπικές Τιμές Σκληρότητας Μεταλλικών Υλικών

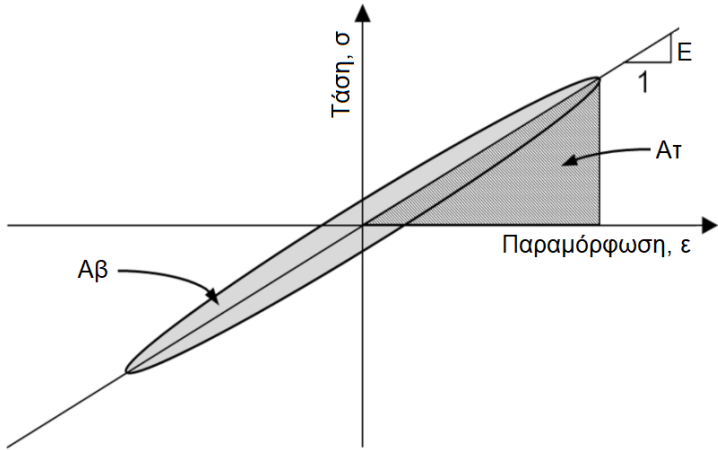


Εσωτερική Απόσβεση (Υλικών)

Λόγος απόσβεσης (damping ratio) = ζ

Συντελεστής απωλειών (loss factor) = $\eta = 2 \zeta = \tan \phi$

Μέθοδος βρόγχου υστέρησης τάσης-παραμόρφωσης



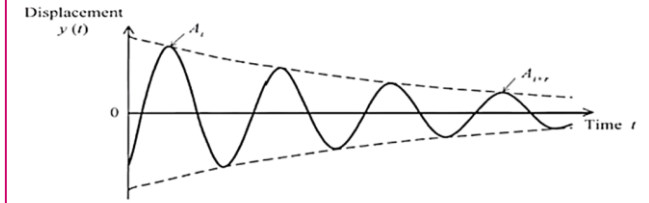
Ελαστική ενέργεια που παρέχεται = $U = A\tau =$ Επιφάνεια τριγώνου

Ενέργεια που χάνεται = $\Delta U = A\beta =$ Επιφάνεια βρόγχου

Συντελεστής απωλειών (loss factor) = $\eta = \Delta U / (2\pi U) = A\beta / (2\pi A\tau)$

Materials	Loss factor
Aluminum	2×10^{-5} to 2×10^{-3}
Concrete	0.02 to 0.06
Glass	0.001 to 0.002
Rubber	0.1 to 1.0
Steel	0.002 to 0.01
Wood	0.005 to 0.01

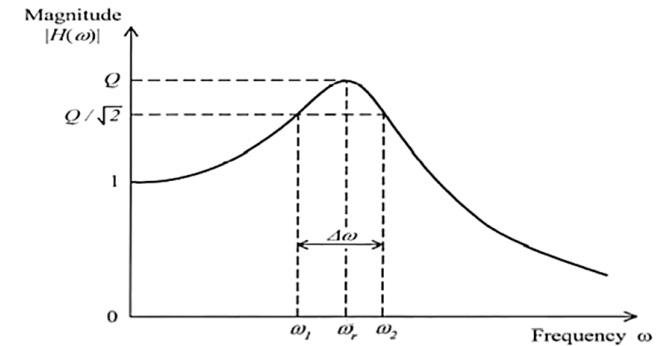
Μέθοδος λογαριθμικής μείωσης



$$\delta = \frac{1}{r} \ln \left(\frac{A_1}{A_{1+r}} \right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

Λόγος απόσβεσης (damping ratio) = $\zeta = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi/\delta)^2}}$

Μέθοδος μισής ισχύος



Λόγος απόσβεσης (damping ratio) = $\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_r}$

Ανθρακούχοι Χάλυβες

10ZZ	Κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες
11ZZ	Κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες επαναθειωμένοι για μηχανική επεξεργασία
15ZZ	Mn (1.00 - 1.65%)
40ZZ	Mo (0.20 - 0.30%)
43ZZ	Ni (1.65 - 2.00%), Cr (0.40 - 0.90%), Mo (0.20 - 0.30%)
44ZZ	Mo (0.5%)

όπου ZZ είναι το κ.β. % C επί 100

Παράδειγμα: Χάλυβας 1060 → Κοινός χάλυβας με 0.60% κ.β. C

...Τυποποίηση Χαλύβων κατά AISI-SAE

Κωδικοί X και Y
για έναν χάλυβα
ονόματι XYZZ



Ονοματολογία χαλύβων κατά AISI-SAE (Κωδικός X)

Σειρά χάλυβα	Οικογένεια χάλυβα
1YZZ	Κοινοί ή Μαγγανιούχοι χάλυβες
2YZZ	Νικελιούχοι χάλυβες
3YZZ	Νικελιοχρωμιούχοι χάλυβες
4YZZ	Μολυβδαινιούχοι ή Χρωμομολυβδαινιούχοι ή Νικελιομολυβδαινιούχοι ή Ni-Cr-Mo χάλυβες
5YZZ	Χρωμιούχοι χάλυβες
6YZZ	Χρωμοβαναδιούχοι χάλυβες
7YZZ	Χάλυβες Βολφραμίου-Χρωμίου
8YZZ	Χάλυβες Ni-Cr-Mo
9YZZ	Μαγγανιοπυριτιούχοι ή Ni-Cr-Mo χάλυβες

Ονοματολογία χαλύβων κατά AISI-SAE (Κωδικός Y, αντιπροσωπευτικοί τύποι)

Σειρά χάλυβα	Οικογένεια χάλυβα
10ZZ	Κοινοί χάλυβες
11ZZ	Κοινοί χάλυβες ελεύθερης κοπής (free-cutting) με S
12ZZ	Κοινοί χάλυβες ελεύθερης κοπής (free-cutting) με S και P
13ZZ	Χαλυβοκράματα μαγγανίου [$\pi(\text{Mn})=1.60-1.90\%$]
23ZZ	Χαλυβοκράματα νικελίου [$\pi(\text{Ni})=3.5\%$]
25ZZ	Χαλυβοκράματα νικελίου [$\pi(\text{Ni})=5\%$]
31ZZ	Χαλυβοκράματα νικελίου-χρωμίου [$\pi(\text{Ni})=1.25\%$, $\pi(\text{Cr})=0.60\%$]
32ZZ	Χαλυβοκράματα νικελίου-χρωμίου [$\pi(\text{Ni})=1.75\%$, $\pi(\text{Cr})=1\%$]
33ZZ	Χαλυβοκράματα νικελίου-χρωμίου [$\pi(\text{Ni})=3.50\%$, $\pi(\text{Cr})=1.50\%$]
40ZZ	Χαλυβοκράματα μολυβδαινίου [$\pi(\text{Mo})=0.25\%$]
41ZZ	Χαλυβοκράματα χρωμίου-μολυβδαινίου [$\pi(\text{Cr})=1\%$, $\pi(\text{Mo})=0.20\%$]
43ZZ	Χαλυβοκράματα νικελίου-χρωμίου-μολυβδαινίου
46ZZ	Χαλυβοκράματα νικελίου-μολυβδαινίου [$\pi(\text{Ni})=1.75\%$, $\pi(\text{Mo})=0.25\%$]
48ZZ	Χαλυβοκράματα νικελίου-μολυβδαινίου [$\pi(\text{Ni})=3.5\%$, $\pi(\text{Mo})=0.25\%$]
51ZZ	Χαλυβοκράματα χρωμίου [$\pi(\text{Cr})=0.80\%$]
52ZZ	Χαλυβοκράματα χρωμίου [$\pi(\text{Cr})=1.5\%$]
61ZZ	Χαλυβοκράματα χρωμίου-βαναδίου
86ZZ	Χαλυβοκράματα νικελίου-χρωμίου-μολυβδαινίου [$\pi(\text{Ni})=0.55\%$, $\pi(\text{Cr})=0.50\%$, $\pi(\text{Mo})=0.20\%$]
92ZZ	Χαλυβοκράματα μαγγανίου-πυριτίου [$\pi(\text{Mn})=0.80\%$, $\pi(\text{Si})=2\%$]
94ZZ	Χαλυβοκράματα μαγγανίου-πυριτίου- νικελίου-χρωμίου-μολυβδαινίου

Τυποποίηση Χαλύβων κατά DIN

Απλοί Χάλυβες:

Συμβολισμός: St XX(YY) όπου:

- St (από τη γερμανική λέξη Stahl = χάλυβας)
- XX η ελάχιστη αντοχή σε εφελκυσμό, εκφρασμένη σε daN/mm² (1 daN = 10 N)
- YY (προαιρετικά) αφορούν ειδικές (ποιοτικές) προδιαγραφές αντίστοιχου πίνακα DIN

Παράδειγμα: Ο χάλυβας St 3722, είναι κοινός χάλυβας ελάχιστης αντοχής σε εφελκυσμό 37 daN/mm² που ικανοποιεί τις προδιαγραφές του DIN 1622

Κοινοί χάλυβες για επιβελτίωση ή ενανθράκωση:

Συμβολισμός: C XX ή C XX K όπου:

- XX η περιεκτικότητα σε C πολλαπλασιασμένη επί 100
- K δηλώνει ότι το ποσοστό των ακαθαρσιών είναι πολύ μικρό

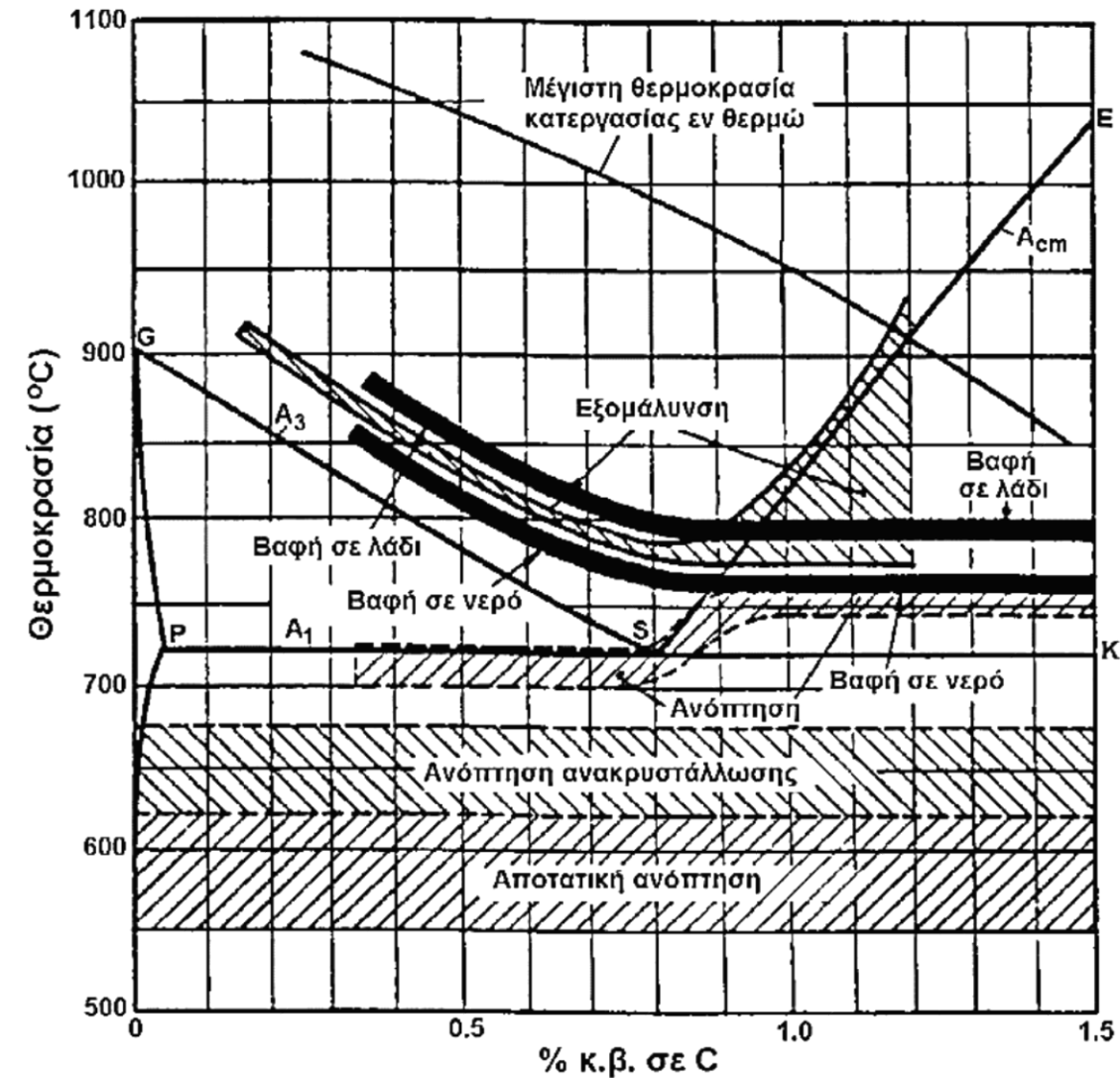
Παράδειγμα: Ο χάλυβας C 40 K, είναι κοινός χάλυβας με περιεκτικότητα κ.β. σε C 0.40% και εξαιρετικής καθαρότητας που προορίζεται για επιβελτίωση ή ενανθράκωση

Επεξήγηση προθέματος

Πρόθεμα	Μεταλλουργική διαδικασία παραγωγής χάλυβα
A	Κραματομένος χάλυβας σε κάμινο όξινης επένδυσης
B	Κοινός χάλυβας σε κάμινο Bessemer
C	Κοινός χάλυβας σε κάμινο ανοικτής εστίας με βασική επένδυση
D	Κοινός χάλυβας σε κάμινο ανοικτής εστίας με όξινη επένδυση
E	Χάλυβας σε ηλεκτρική κάμινο
X	Χάλυβας ειδικής σύστασης (εκτός προδιαγραφών)

Grade	Tensile strength (MPa)	Yield strength (Mpa) not less than		Elongation (%) not less than
		=16mm	>16mm	
St37.0	350-480	235	225	25
St44.0	420-550	275	265	21
St55	540-645	295	285	17
St52.0	500-650	355	345	21

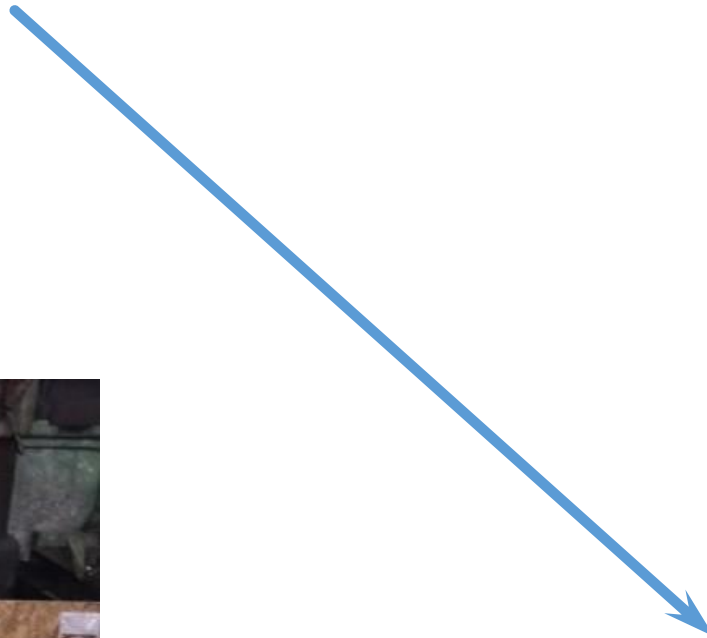
Θερμικές Κατεργασίες Χάλυβα Συνολικά



Είδος ανόπτησης	Θερμοκρασία θέρμανσης	Χρόνος παραμονής	Ψύξη	Αποτελέσματα
Ανόπτηση κατεργασίας	Συνήθως $\theta > \theta_{\text{ανακρυστάλλωσης}}$ (550-600° C)		Βραδεία απόψυξη	Εξάλειψη εσωτερικών τάσεων από ψυχρή κατεργασία Αύξηση ολκιμότητας
Ανόπτηση εξομάλυνσης	$A_{c3} + \theta$, $\theta = 55-85^\circ \text{C}$ ή $A_{cm} + \theta$ ανάλογα με την $\pi(\text{C})$	~1h	Σχετικά γρήγορη ψύξη στον αέρα	Εκλέπτυνση των κόκκων χυτοχάλυβα ή υπερθερμανθέντα χάλυβα. Απόκτηση ομοιόμορφης κυτταροειδούς, λεπτοκρυσταλλικής φερριτοπερλιτικής δομής Εξαφάνιση ανισοτροπίας Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων
(Πλήρης) Ανόπτηση	$A_{c3} + \theta$, $\theta = 15-40^\circ \text{C}$	Αρκετές h	Ψύξη μέσα στον κλίβανο με τον ίδιο ρυθμό θέρμανσης (~20° C/h)	Αποκατάσταση μικροδομής Βελτίωση αντοχής και δυσθραυστότητας χυτοχαλύβων Βελτίωση κατεργασιμότητας Εξάλειψη παραμενουσών τάσεων μετά από μηχανική κατεργασία εν θερμώ ή μετά από συγκόλληση Αύξηση μεγέθους οστενιτικών κόκκων προς διευκόλυνση της μαρτενιτικής βαφής
Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης	$\theta > \theta_{\text{ανακρυστάλλωσης}}$ και στην φερριτική περιοχή (600-700° C)		Ελεγχόμενη αργή απόψυξη στον αέρα	Εξάλειψη ιστού ενδοτράχυνσης στους εν ψυχρώ παραμορφωμένους χάλυβες Βελτίωση κατεργασιμότητας
Ανόπτηση αποκατάστασης	$\theta < \theta_{\text{ανακρυστάλλωσης}}$ και στην περιοχή 450-600° C		Αργή απόψυξη	Δεν μεταβάλλεται η μικρογραφική μορφή
Αποτακτική ανόπτηση	$\theta = 400-450^\circ \text{C}$ στη φερριτική περιοχή		Αργή απόψυξη	Εξάλειψη παραμενουσών τάσεων Δεν μεταβάλλεται η μικρογραφική μορφή
Ανόπτηση σφαιροποίησης	Λίγο μικρότερη της A_{c1} (~700° C). Ενδεικτική τιμή: $A_{c1} - 50^\circ \text{C}$.	~25h	Αργή απόψυξη σε φούρνο για πολλές ώρες (έως 25h)	Σφαιροποίηση σεμεντίτη Βελτίωση κατεργασιμότητας σε κοπή (μαλακότερο και ολκιμότερο υλικό)
Ταλαντευτική ανόπτηση	Περιοδικά μεταβαλλόμενη θέρμανση στην περιοχή $[A_{c1} - 50, A_{c1} + 50]$			Σφαιροποίηση σεμεντίτη

Κατεργασίες Επιφανείας

- **Επιφανειακή Σκλήρυνση (Case Hardening)**
- **Ενανθράκωση (Carburising)**
- **Εναζώτωση (Nitriding)**



Θερμικές Ιδιότητες Υλικών - Συντελεστής Γραμμικής Διαστολής

Συντελεστής Γραμμικής Διαστολής a_l ($1/^\circ\text{C}$):

Περιγράφει τη σχετική μεταβολή μήκους – παραμόρφωση $\Delta l/l_0$ ενός υλικού μέσου αρχικού μήκους l_0 λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας του κατά ΔT :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = a_l \Delta T \Rightarrow a_l = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad (a_l \rightarrow 1/^\circ\text{C}, \Delta l \rightarrow \text{m}, l_0 \rightarrow \text{m}, \Delta T \rightarrow ^\circ\text{C})$$

Υφίσταται και συντελεστής διαστολής όγκου a_v που περιγράφει τη σχετική μεταβολή όγκου ενός υλικού μέσου αρχικού όγκου V_0 λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας του κατά ΔT :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = a_v \Delta T \Rightarrow a_v = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T} \quad (a_l \rightarrow 1/^\circ\text{C}, \Delta V \rightarrow \text{m}^3, V_0 \rightarrow \text{m}^3, \Delta T \rightarrow ^\circ\text{C})$$

Για ισότροπα υλικά ισχύει:

$$a_v = 3a_l$$

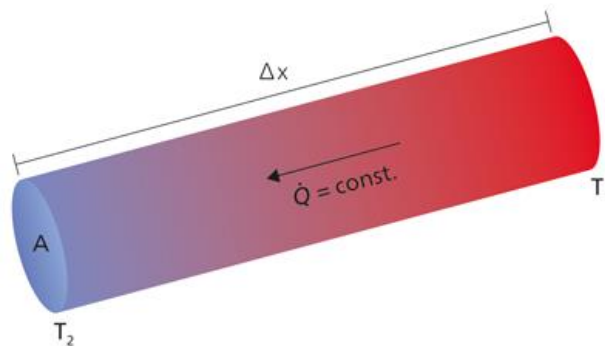


Θερμικές Ιδιότητες Υλικών - Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας

Συντελεστής θερμική αγωγιμότητας k :

Περιγράφει τη ροή θερμότητας ($q = dQ/dt$), μεταφορά θερμότητας κατά το μήκος ενός υλικού μέσου λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.

Για τη μεταφορά θερμότητας κατά το μήκος Δx ενός υλικού μέσου, επιφάνειας διατομής A , το οποίο έχει το ένα άκρο θερμό σε θερμοκρασία T_1 και το άλλο ψυχρό σε θερμοκρασία T_2 , ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k εκφράζεται ως εξής:



$$\frac{dQ}{dt} = q = -kA \frac{dT}{dx} \Rightarrow q = -kA \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \Rightarrow k = -\frac{q\Delta x}{A(T_2 - T_1)} \quad (k \rightarrow \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}), q \rightarrow \text{W}, \Delta x \rightarrow \text{m}, A \rightarrow \text{m}^2, T_2, T_1 \rightarrow \text{K})$$

Η ροή θερμότητας οφείλεται τόσο στην ταλάντωση των ατόμων κρυσταλλικού πλέγματος όσο και στην κίνηση των ηλεκτρονίων.

Θερμικές Ιδιότητες Δημοφιλών υλικών

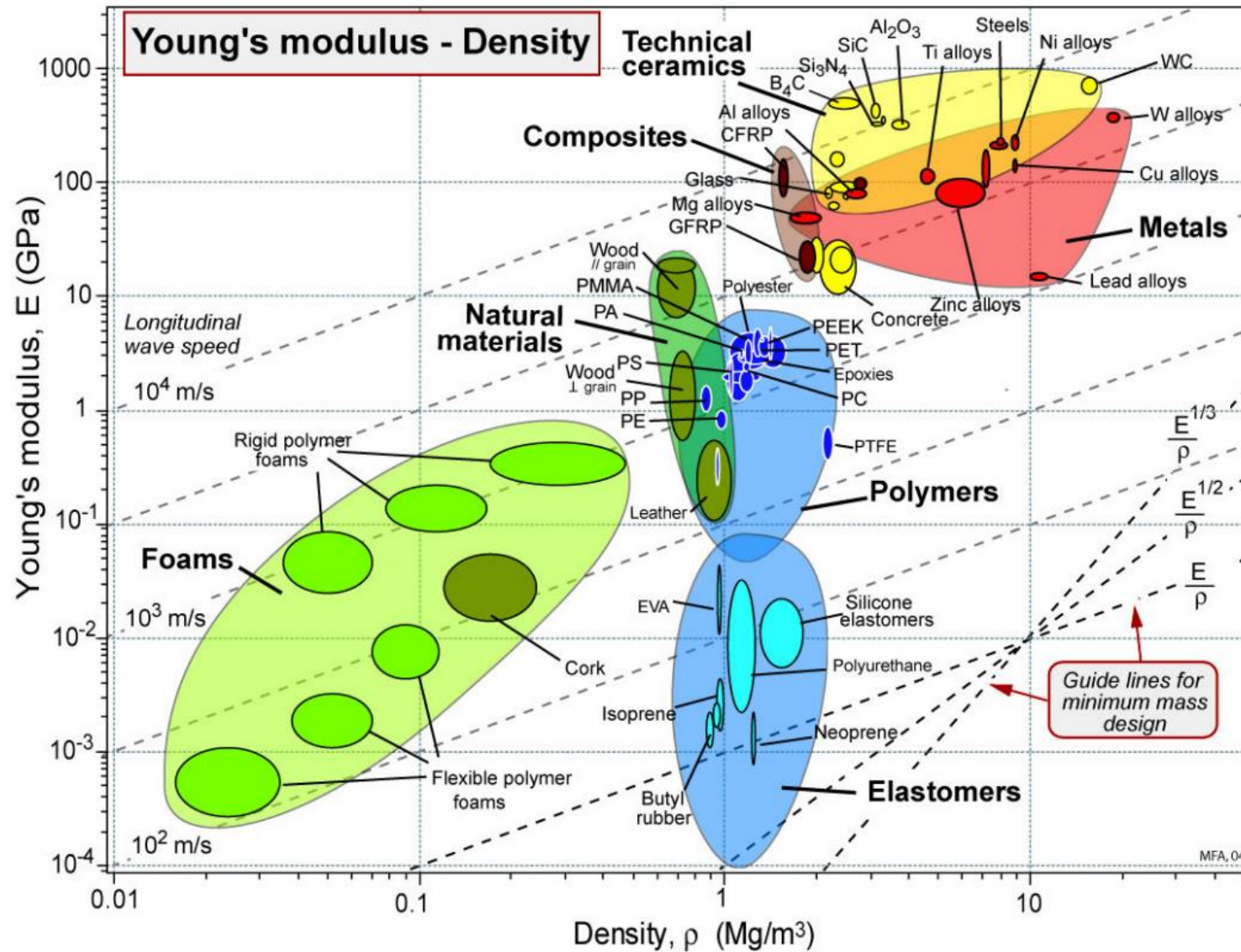
Υλικό	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση c_p (J/kg-K)	Συντελεστής θερμικής διαστολής α_l [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶]	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k (W/m-K)
<i>Πολυμερή</i>			
Πολυαιθυλένιο (υψηλής πυκνότητας)	1850	106–198	0.46–0.50
Πολυπροπυλένιο	1925	145–180	0.12
Πολυστυρένιο	1170	90–150	0.13
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο	1050	126–216	0.25
Φαινόλη-φορμαδεΐδη	1590–1760	122	0.15
Νάυλον 6,6	1670	144	0.24
Πολυισοπρένιο	—	220	0.14
<i>Μέταλλα</i>			
Αλουμίνιο	900	23.6	247
Χαλκός	386	17.0	398
Σίδηρος	448	11.8	80

Υλικό	α_l (10 ⁻⁶ /°C)	k (W/m/K)	C_v (J/kg/K)
Χάλυβες			
A36	11.7	51.9	486
1020	11.7	51.9	486
1040	11.3	51.9	486
Ανοξείδωτοι Χάλυβες			
304 (ανοπτημένος)	17.2	16.2	500
316 (ανοπτημένος)	15.9	16.2	500
405 (ανοπτημένος)	10.8	27	460
Χυτοσίδηροι			
Grade 60-40-18	11.2	36	544
Grade 80-55-06	10.6	36	544
Κράματα αλουμινίου (Al)			
1100	23.6	222	904
2024	22.9	190	875
6061	23.6	180	896
7075-T6	23.4	130	960
356.0-T6	21.5	151	963
Κράματα χαλκού (Cu)			
C11000	16.7	388	385
C17200	16.7	105-130	420
C26000	19.9	120	375
C38000	20.5	115	380
C71500	16.2	29	380
C93200	18	59	376
Κράματα μαγνησίου (Mg)			
AZ31B	26	96	1024
AZ91D	26	72	1050
Κράματα Ττανίου (Ti)			
Καθαρό ASTM grade 1	8.6	16	528
Ti-5Al-2.5Sn	9.4	7.6	470
Ti-6Al-4V	8.6	6.7	610
Κοινά Μέταλλα			
Μόλυβδος (Pb)	29.3	35	129
Ψευδάργυρος (Zn)	23-32.5	108	395
Κασσίτερος (Sn)	23.8	60.7	222
Πολύτιμα μέταλλα			
Χρυσός (Au)	14.2	315	130
Πλατίνα (Pt)	9.1	71	132
Αg (Αργυρος)	19.7	428	235
Πυρίμαχα μέταλλα			
Μολυβδαίνιο (Mo)	4.9	142	276
Ταντάλιο (Ta)	6.5	54.4	139
Βολφράμιο (W)	4.5	155	138
Διάφορα κράματα			
Νικέλιο 200 (Κράμα Ni-Fe-Mn)	13.3	70	456
Inconel 625 (κράμα Ni-Cr-Mo)	12.8	9.8	410
Monel 400 (κράμα Ni Cu)	13.9	21.8	427
Haynes 25 (κράμα Cr-W-Ni)	12.3	9.8	377
Invar (κράμα Ni-Fe)	1.6	10	500
Super Invar (κράμα Fe-Ni-Co)	0.72	10	500
Kovar (κράμα Fe-Ni-Co)	5.1	17	460
Μόλυβδος (Pb) με αντιμόνιο (Sb) 6%	27.2	29	135
Κράμα 60Sn-40Pb	24	50	150
Ζιρκόνιο grade 702	5.9	22	285

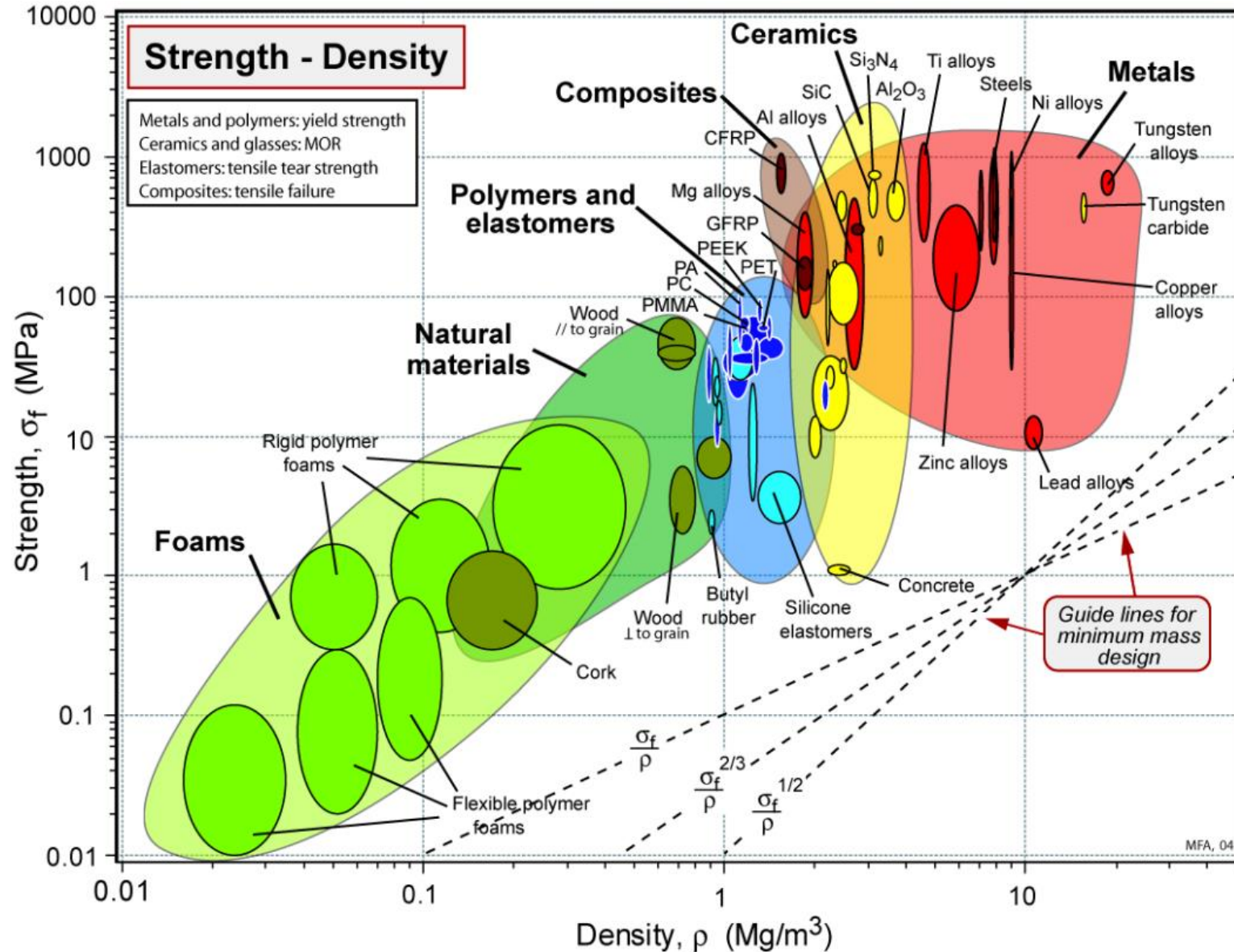
Επιλογή Υλικών από Συγκριτικά Διαγράμματα Ιδιοτήτων

- Για την επιλογή κατάλληλων υλικών απαιτούνται συγκριτικά διαγράμματα ιδιοτήτων οι οποίες έχουν κριθεί ότι είναι κρίσιμες για την εκάστοτε εφαρμογή.
 - Τα συγκριτικά διαγράμματα παρέχονται από τους προμηθευτές βιομηχανικών υλικών.
 - Τα συγκριτικά διαγράμματα διατίθενται στη βιβλιογραφία και σε ηλεκτρονικές βιβλιοθήκες.
 - Συχνά χρησιμοποιούνται οι χάρτες Ashby οι οποίοι παρουσιάζουν δύο ή περισσότερες ιδιότητες πολλών υλικών ή κατηγοριών υλικών, συμπεριλαμβανομένων και των πλαστικών. Αυτοί οι χάρτες είναι χρήσιμοι για τη σύγκριση της σχέσης μεταξύ διαφορετικών ιδιοτήτων.

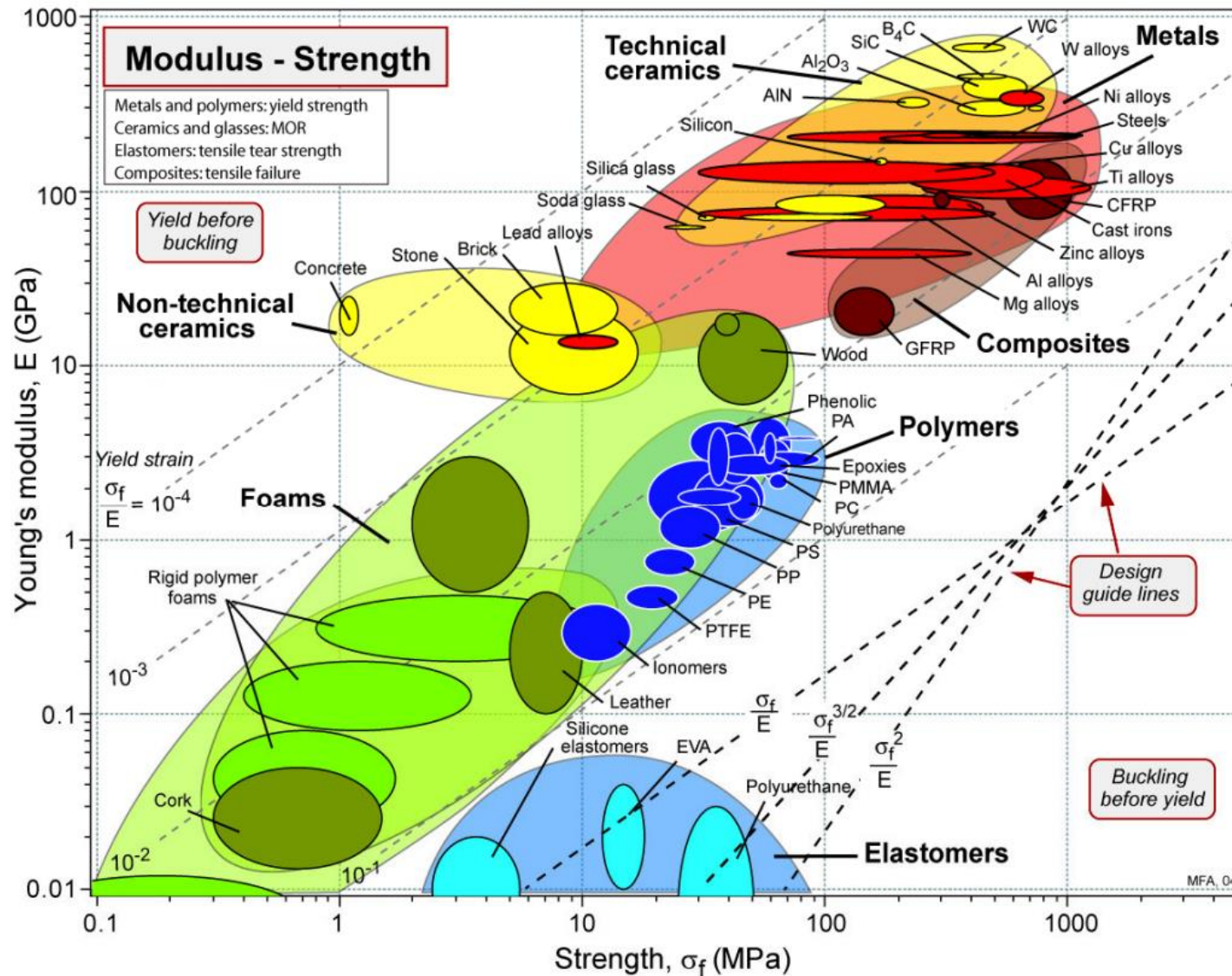
Διαγράμματα ASBHY: Μέτρο ελαστικότητας-πυκνότητα



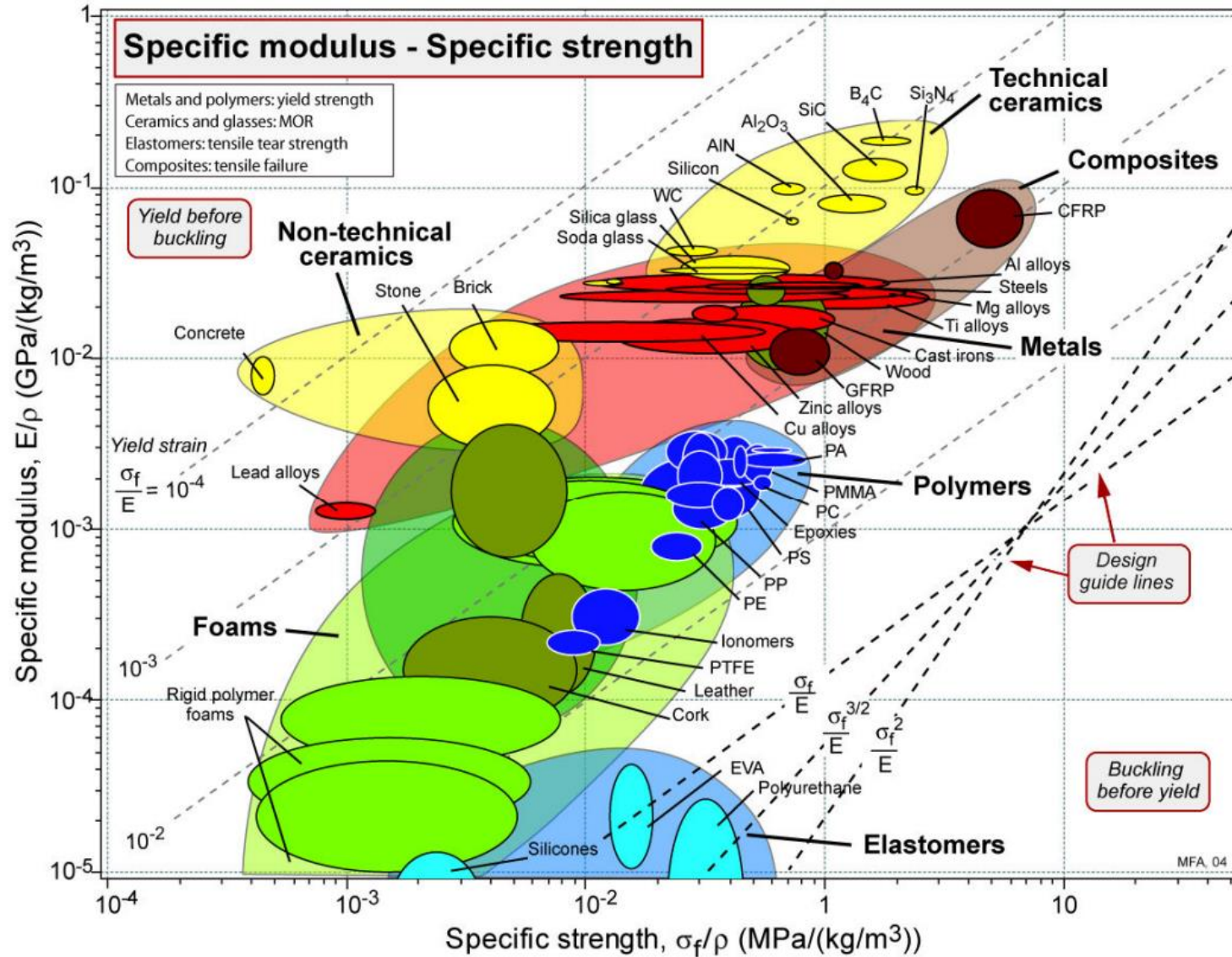
Διαγράμματα ASHBY: Αντοχή-πυκνότητα



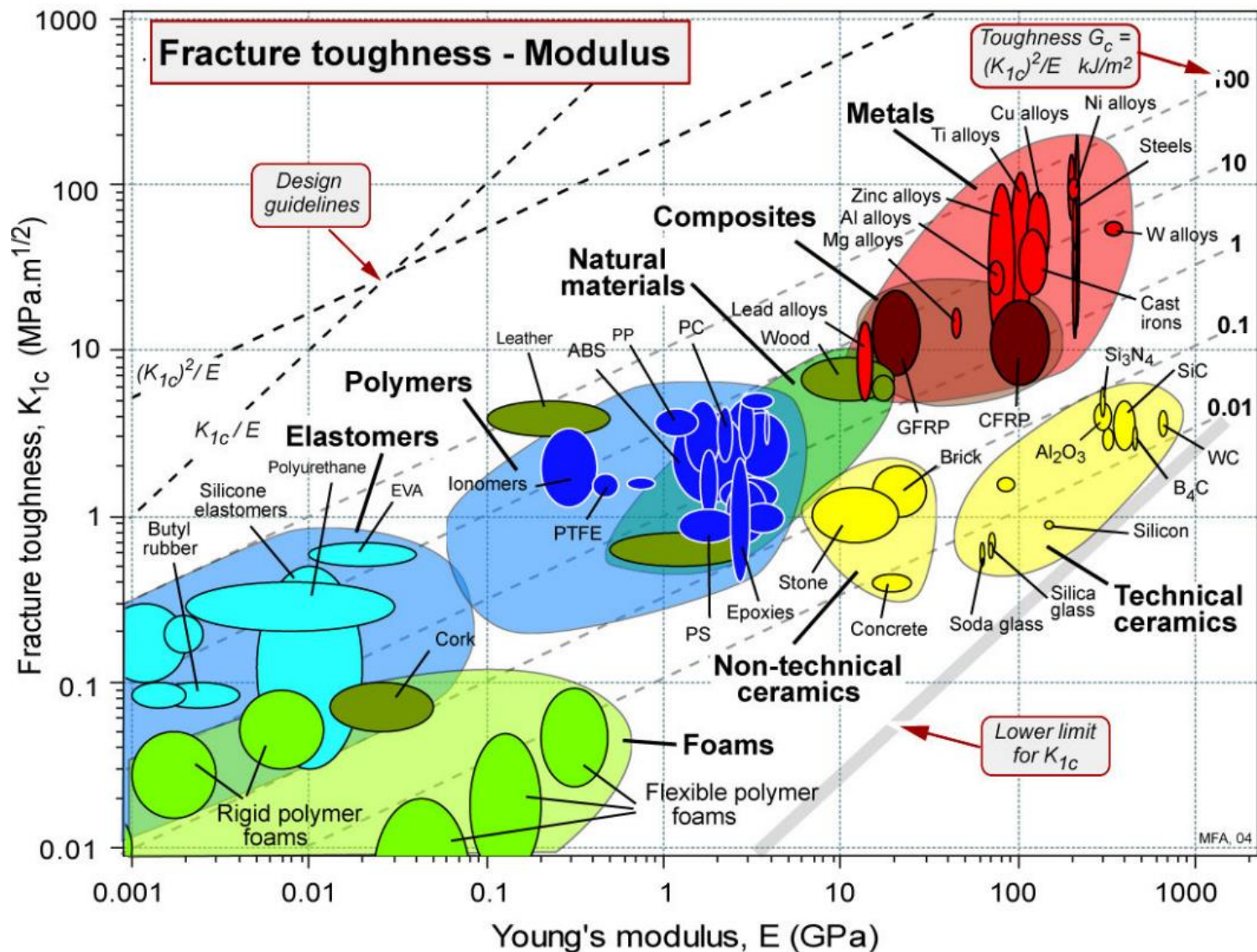
Διαγράμματα ASHBY: Μέτρο ελαστικότητας-αντοχή



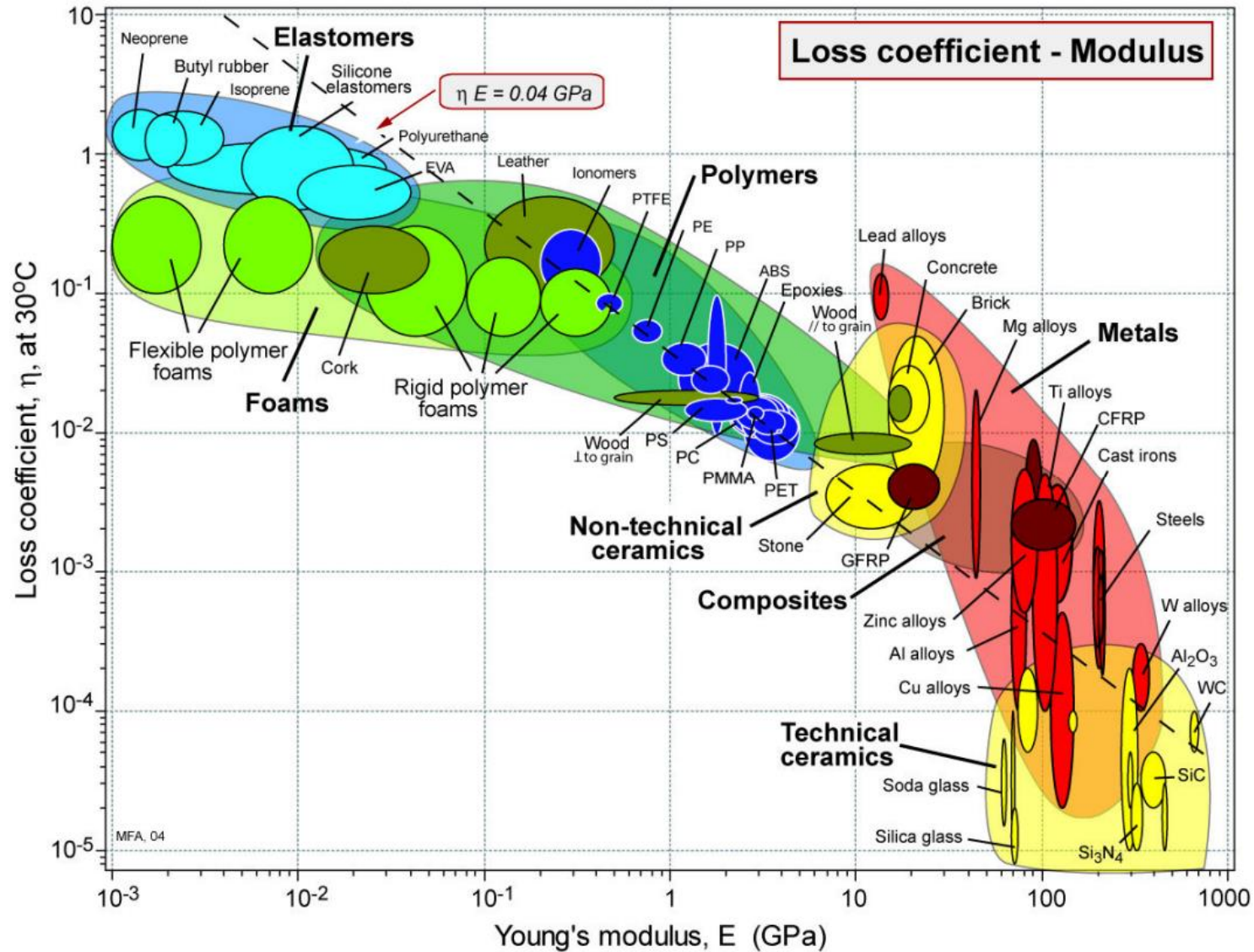
Διαγράμματα ASHBY: Ειδικό Μέτρο Ελαστικότητας – Ειδική Αντοχή



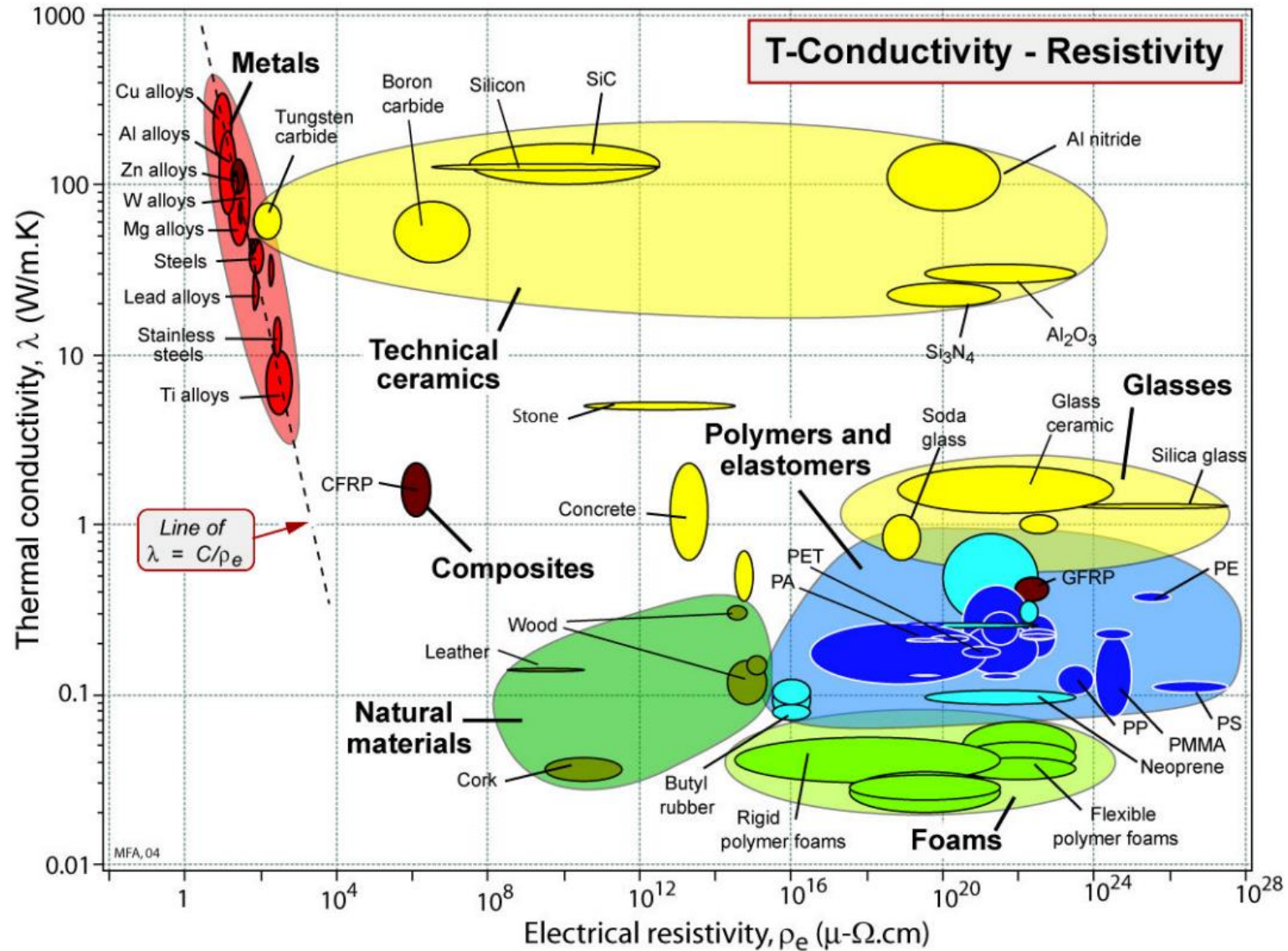
Διαγράμματα ASHBY: Αντοχή θραύσης - Μέτρο ελαστικότητας



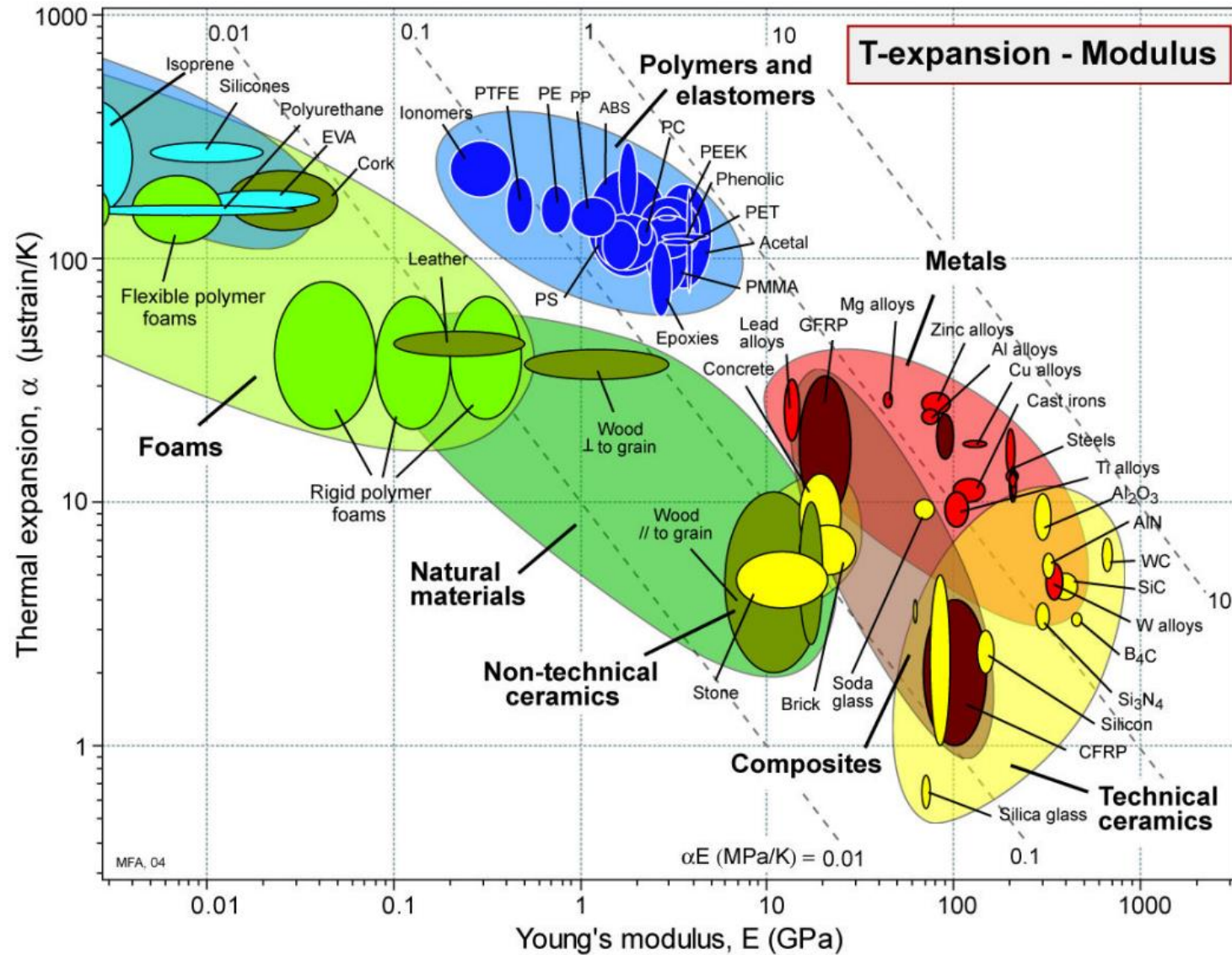
Διαγράμματα ASHBY: Συντελεστής απωλειών - Μέτρο ελαστικότητας



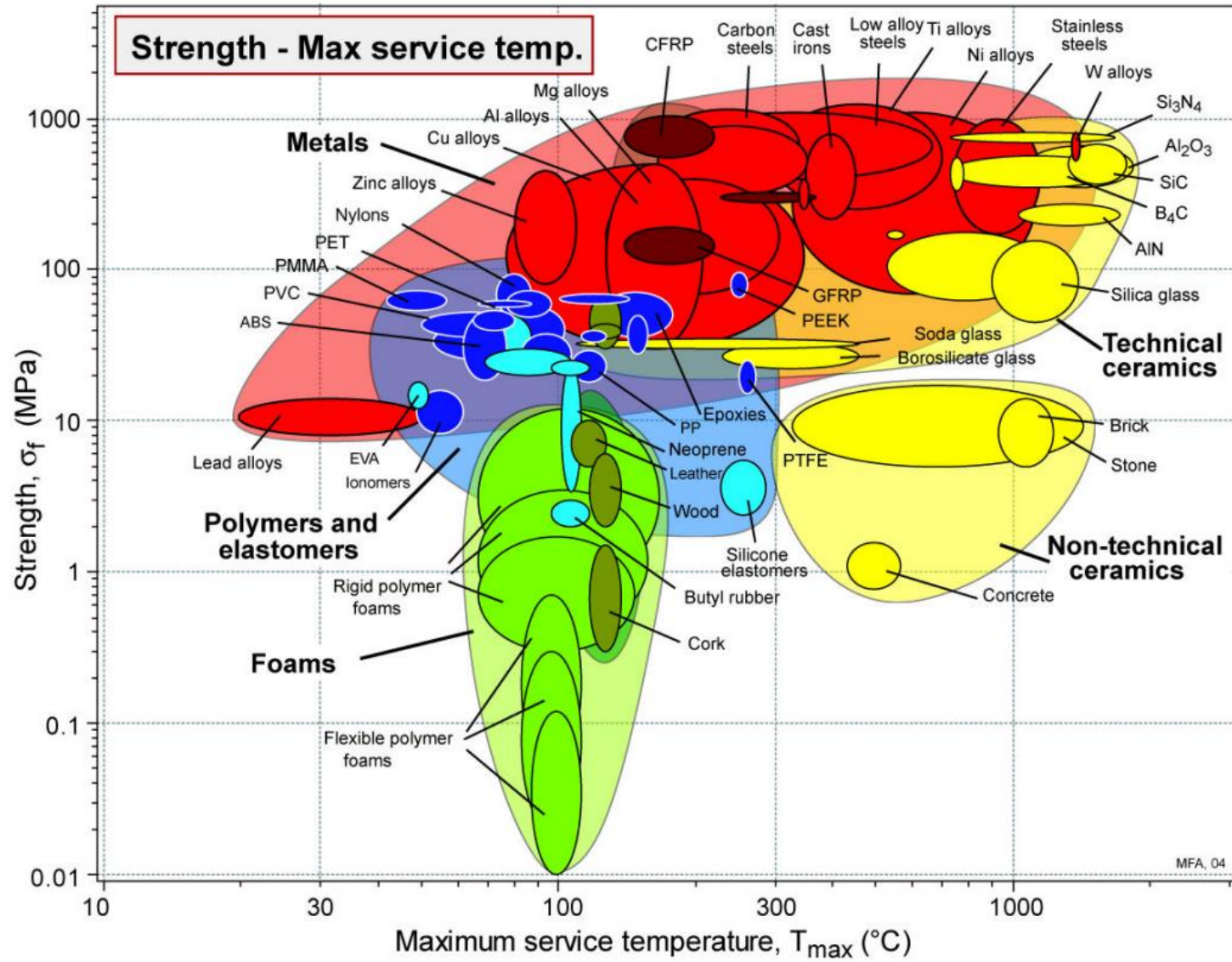
Διαγράμματα ASBY: Θερμική αγωγιμότητα - Ηλεκτρική αντίσταση



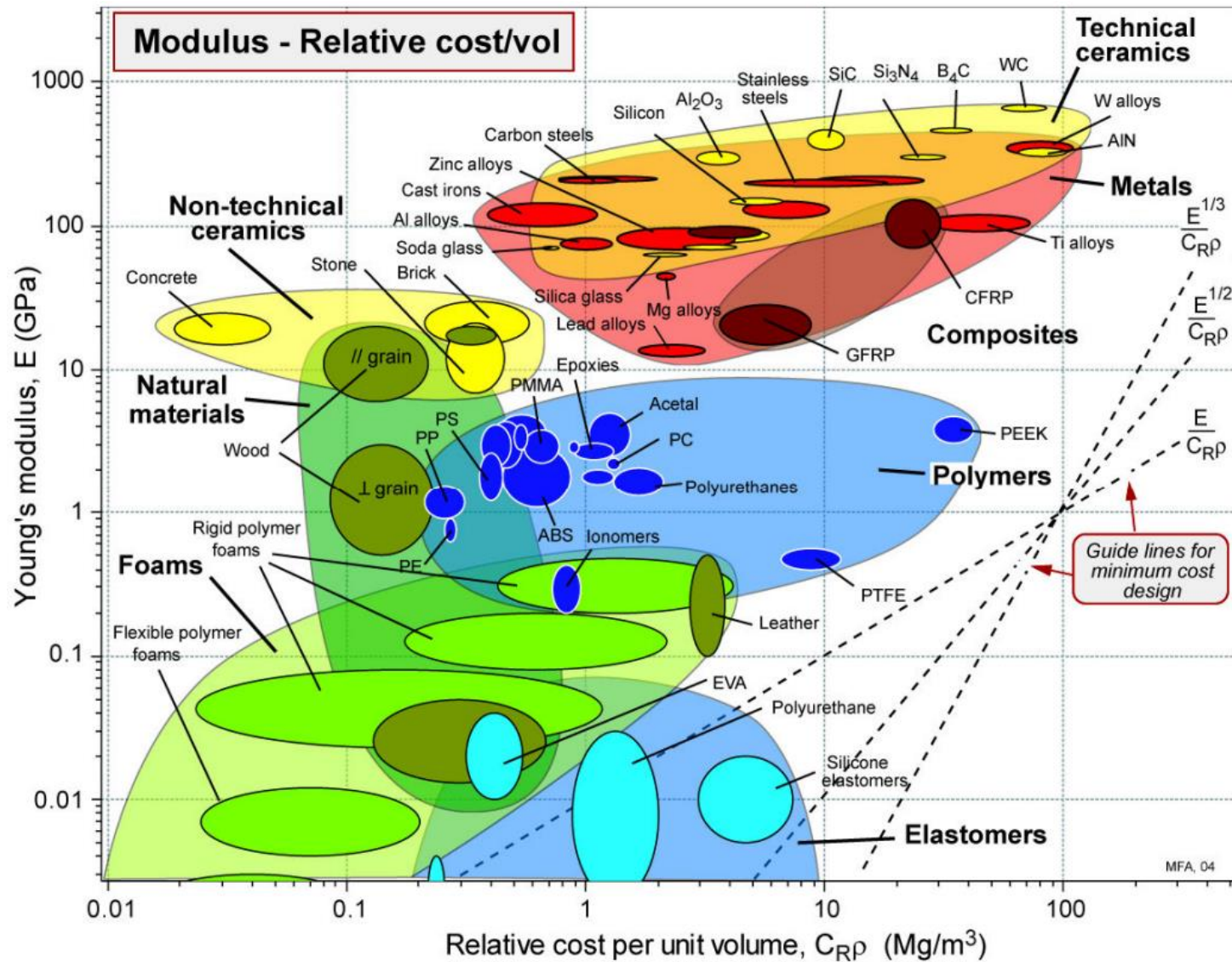
Διαγράμματα ASHBY: Συντ. θερμικής διαστολής - Μέτρο ελαστικότητας



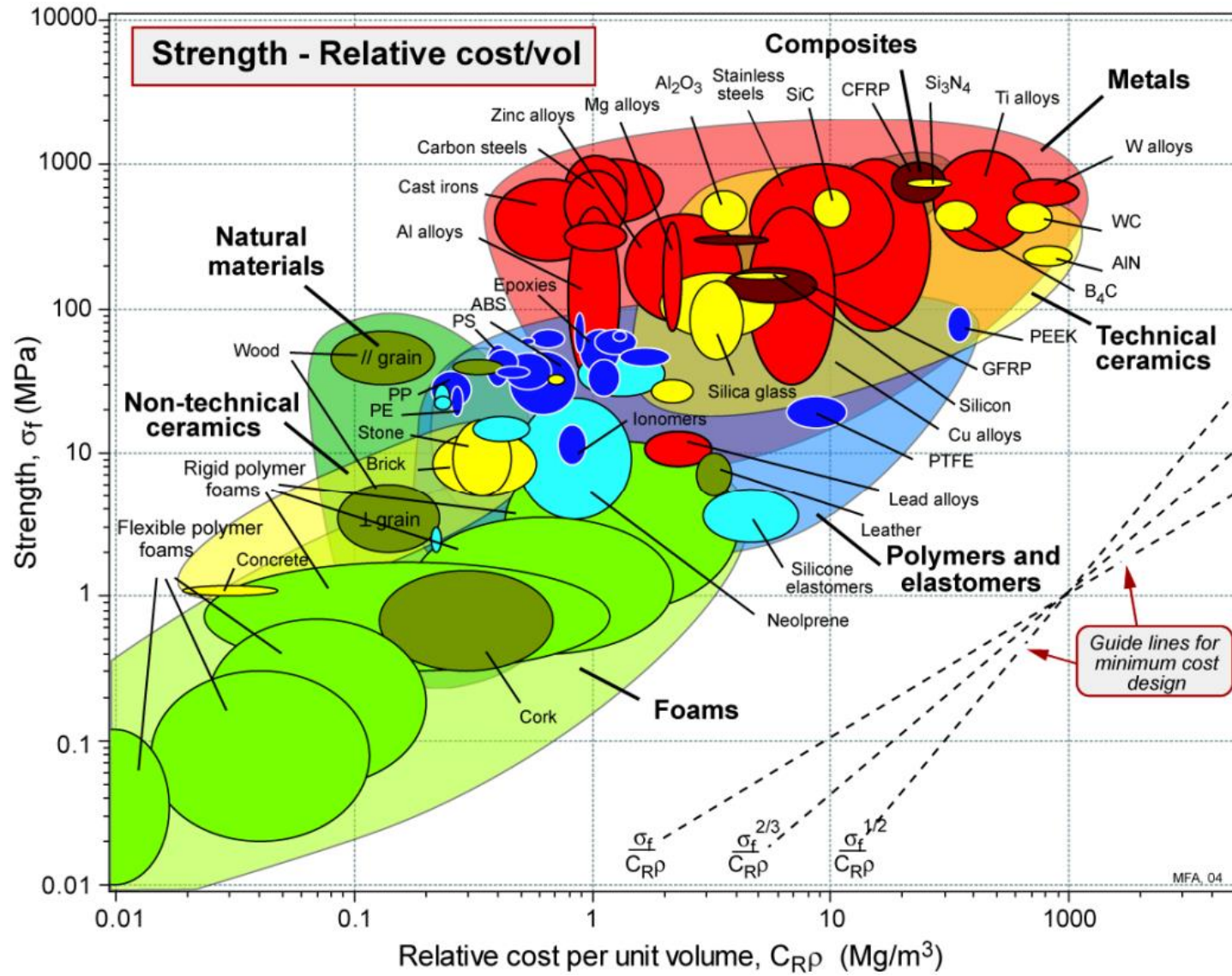
Διαγράμματα ASBY: Αντοχή-Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας



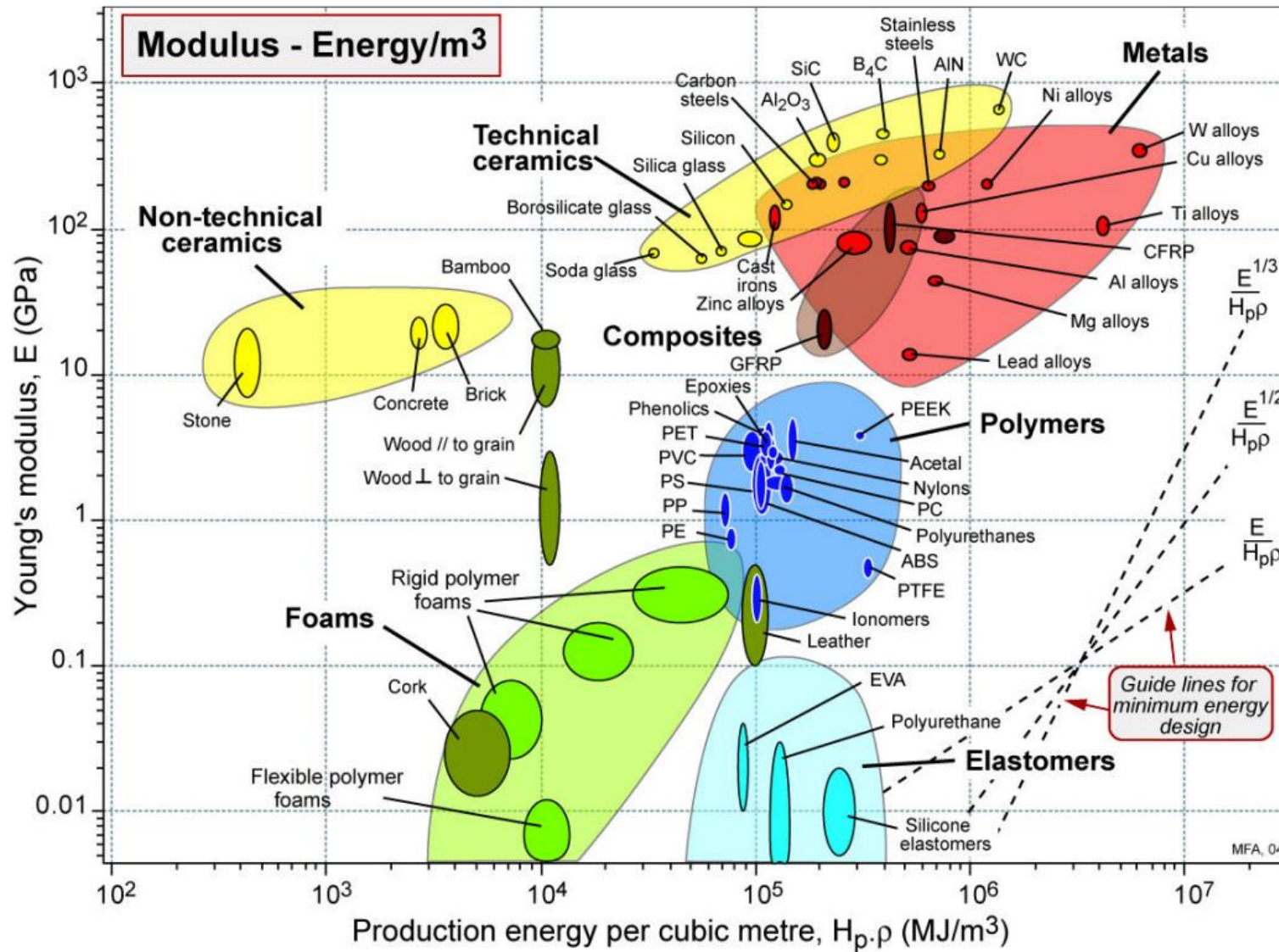
Διαγράμματα ASHBY: Μέτρο ελαστικότητας-κόστος



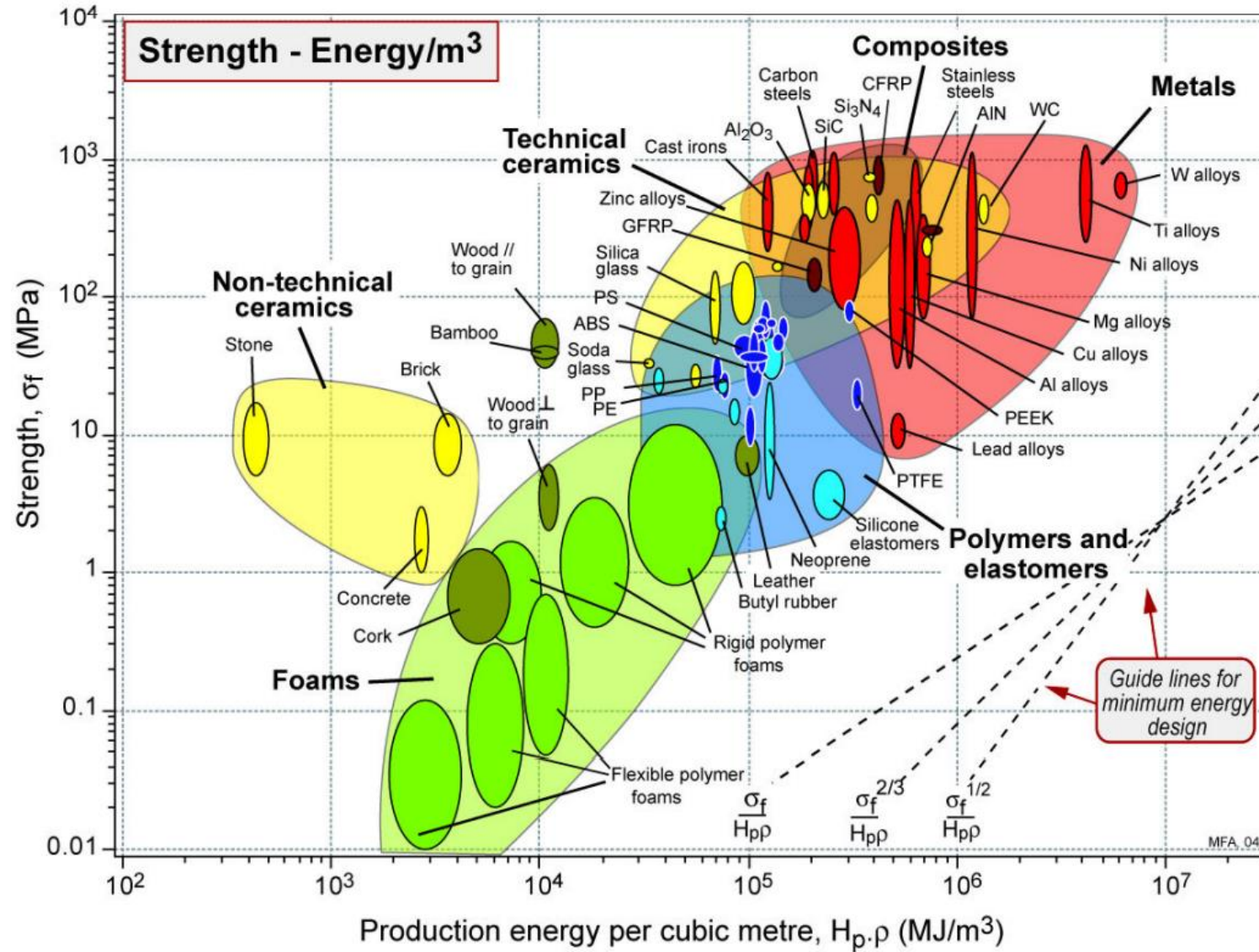
Διαγράμματα ASHBY: Αντοχή-κόστος



Διαγράμματα ASHBY: Μέτρο ελαστικότητας - Κατανάλωση ενέργειας



Διαγράμματα ASHBY: Αντοχή - κατανάλωση ενέργειας



Παράδειγμα: Ράβδος ελάχιστου βάρους - δοσμένης αντοχής

Να επιλεγεί υλικό για ράβδο μήκους L (γεωμετρική προδιαγραφή), με εφελκυστικό φορτίο F (λειτουργική προδιαγραφή) και συντελεστή ασφάλειας N , ώστε το βάρος της ράβδου να είναι ελάχιστο (αντικειμενική)

Μάζα ράβδου: $m = \rho V = \rho AL \quad (1)$

Επιφάνεια ικανή να φέρει το φορτίο: $\frac{F}{A} = \frac{S_y}{N} \quad (2)$

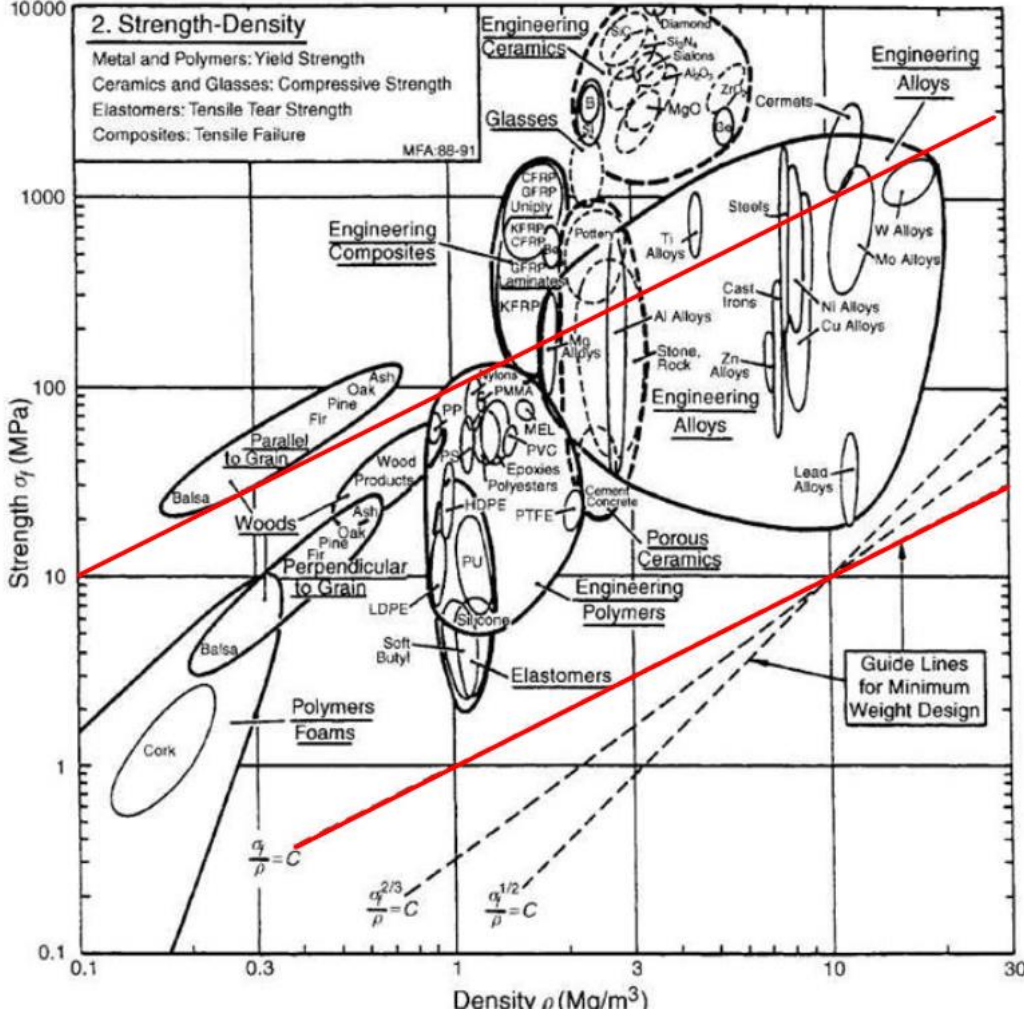
Από (1) και (2) έχουμε: $A = \frac{FN}{S_y} = \frac{m}{\rho L}$

$m = (FN) (L) \left(\frac{\rho}{S_y} \right) \quad (3)$

λειτουργικές προδιαγραφές
γεωμετρία
υλικό

Η μάζα ελαχιστοποιείται μεγιστοποιώντας τον συντελεστή συμπεριφοράς υλικού M : $M = \frac{S_y}{\rho}$

Βρίσκω το διάγραμμα του Ashby που περιέχει τη θέση κάθε κατηγορίας υλικού ανάλογα με την αντοχή και την πυκνότητα. Εντοπίζω την οδηγό γραμμή του $M = S_y / \rho$ (κάτω κόκκινη γραμμή), και την μετακινώ παράλληλα προς τα επάνω περιορίζοντας τις ομάδες των υλικών. Εδώ η πάνω κόκκινη γραμμή υποδεικνύει εκείνες τις ομάδες υλικών που έχουν σε σχέση με άλλες υψηλότερο λόγο M . Από αυτά τα υλικά θα επιλέξουμε ή αυτά τα υλικά θα τα κατατάξουμε ως προς την καταλληλότητά τους με κάποιο άλλο κριτήριο (πχ. κόστος)



Παράδειγμα: Κολώνα ελάχιστου βάρους σε λυγισμό

Να επιλεγεί υλικό για κολώνα ύψους L (γεωμετρική προδιαγραφή), με θλιπτικό φορτίο F στο ελεύθερο άκρο της (λειτουργική προδιαγραφή), ώστε να αντέχει σε λυγισμό (περιορισμός), ενώ η μάζα της δοκού να είναι η ελάχιστη δυνατή (αντικειμενική συνάρτηση).

$$\text{Σχέση Euler για λυγισμό: } F \leq \frac{F_{cr}}{N} = \frac{\pi^2 EI}{NL^2} = \frac{\pi^2 E \pi d^4}{NL^2 64} \quad (1)$$

$$\text{Η μάζα είναι: } m = AL\rho = \frac{\pi d^2}{4} L\rho \quad (2)$$

Λύνοντας την (1) ως προς τη διάμετρο και αντικαθιστώντας στην (2) έχουμε:

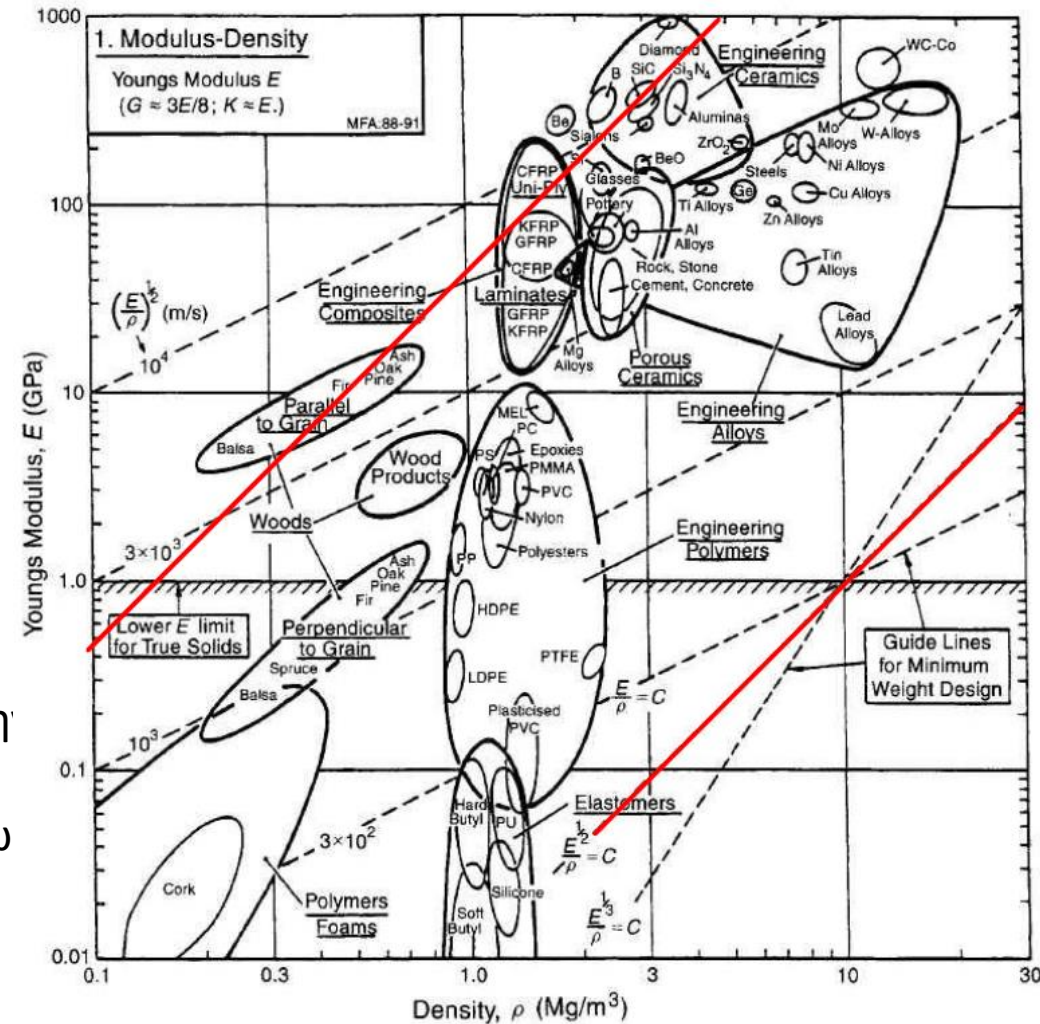
$$m = \sqrt{\frac{NF}{\pi}} (2L^2) \underbrace{\left(\frac{\rho}{\sqrt{E}}\right)}_{\text{υλικό}}$$

$\underbrace{\sqrt{\frac{NF}{\pi}}}_{\text{λειτουργικές προδιαγραφές}}$
 $\underbrace{(2L^2)}_{\text{γεωμετρία}}$

Η μάζα ελαχιστοποιείται όταν μεγιστοποιηθεί ο συντελεστής συμπεριφοράς του υλικού M :

$$M = \frac{\sqrt{E}}{\rho}$$

Βρίσκω το διάγραμμα του Ashby που περιέχει τη θέση κάθε κατηγορίας υλικού ανάλογα με το Μέτρο Ελαστικότητας και την πυκνότητα. Εντοπίζω τη οδηγό γραμμή του $M = E^{1/2}/\rho$ (κάτω κόκκινη γραμμή), και την μετακινώ παράλληλα προς τα επάνω περιορίζοντας τις ομάδες των υλικών. Εδώ πάνω από την πάνω κόκκινη γραμμή εντοπίζονται όλα εκείνα τα υλικά που έχουν σε σχέση με άλλα (κάτω από τη πάνω κόκκινη γραμμή) υψηλότερο λόγο M . Από αυτά τα υλικά θα επιλέξουμε ή αυτά τα υλικά θα τα κατατάξουμε ως προς την καταλληλότητά τους με κάποιο άλλο κριτήριο (πχ. κόστος)



Παράδειγμα: Δοκός ελάχιστου βάρους - δοσμένης δυσκαμψίας

Να επιλεγεί υλικό για πρόβολη δοκό διατομής $b \times b$ (γεωμετρική προδιαγραφή), μήκους L (γεωμετρική προδιαγραφή), με φορτίο F στο ελεύθερο άκρο της (λειτουργική προδιαγραφή), ώστε η μετατόπισή της να μην είναι μεγαλύτερη από δ (περιορισμός), ενώ η μάζα της δοκού να είναι η ελάχιστη δυνατή (αντικειμενική συνάρτηση).

$$\text{Η μετατόπιση της δοκού είναι: } \delta = \frac{F}{k} \quad (1)$$

$$\text{Η σταθερά ελατηρίου της δοκού είναι: } k = \frac{3EI}{L^3} \quad (2)$$

$$\text{Από τις εξισώσεις (1) και (2) έχουμε: } \delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (3)$$

$$\text{Επειδή } I = b^4/12 = A^2/12: \quad \delta = \frac{FL^3}{3E(A^2/12)} = \frac{4FL^3}{EA^2} \quad (4)$$

$$\text{Η μάζα της δοκού είναι: } m = \rho V = \rho AL \Rightarrow A = \frac{m}{\rho L} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{4FL^3}{E(m/\rho L)^2} \Rightarrow \delta = \frac{4FL^3 \rho^2 L^2}{Em^2} \Rightarrow$$

$$m = \frac{\sqrt{4FL^3} \rho}{\sqrt{E} \sqrt{\delta}} = \underbrace{\left(\sqrt{\frac{4k}{L}} \right)}_{\substack{\text{λειτουργικές} \\ \text{προδιαγραφές}}} \underbrace{(L^3)}_{\text{γεωμετρία}} \underbrace{\left(\frac{\rho}{\sqrt{E}} \right)}_{\text{υλικό}} \Rightarrow M = \frac{\sqrt{E}}{\rho} \rightarrow \max$$

Παραδείγματα δεικτών απόδοσης υλικών

Χάρτης αντοχής, σ_f σε σχέση με την πυκνότητα, ρ

Επιλογή δείκτη απόδοσης

(a) $\sigma_f \rho = C$
(σχεδιασμός χαμηλού βάρους για ανθεκτικές ταινίες, ράβδους, σχοινιά, κλπ.)

(b) $\sigma_f^{2/3} / \rho = C$
(σχεδιασμός χαμηλού βάρους για ανθεκτικές δοκούς, άξονες, κλπ.)

(c) $\sigma_f^{1/2} / \rho = C$
(σχεδιασμός χαμηλού βάρους για ανθεκτικές πλάκες, κλπ.)

Οι τιμές της σταθεράς C αυξάνονται όταν η οδηγός ευθεία κινείται προς τα άνω αριστερά.

Χάρτης μέτρου ελαστικότητας, E , σε σχέση με την πυκνότητα, ρ

Επιλογή δείκτη απόδοσης

(a) $E/\rho = C$
(σχεδιασμός χαμηλού βάρους για δύσκαμπτες ταινίες, ράβδους, σχοινιά, κλπ.)

(b) $E^{1/2}/\rho = C$
(σχεδιασμός χαμηλού βάρους για δύσκαμπτες δοκούς, άξονες, κλπ.)

(c) $E^{1/3}/\rho = C$
(σχεδιασμός χαμηλού βάρους για δύσκαμπτες πλάκες, κλπ.)

Οι τιμές της σταθεράς C αυξάνονται όταν η οδηγός ευθεία κινείται προς τα άνω αριστερά.

Χάρτης μέτρου ελαστικότητας, E , σε σχέση με το σχετικό κόστος, $C_R \rho$

Επιλογή δείκτη απόδοσης

(a) $E/C_{v,R} \rho = C$
(σχεδιασμός χαμηλού κόστους για δύσκαμπτες ταινίες, ράβδους, σχοινιά, κλπ.)

(b) $E^{1/2}/C_{v,R} \rho = C$
(σχεδιασμός χαμηλού κόστους για δύσκαμπτες δοκούς, άξονες, κλπ.)

(c) $E^{1/3}/C_{v,R} \rho = C$
(σχεδιασμός χαμηλού κόστους για δύσκαμπτες πλάκες, κλπ.)

Οι τιμές της σταθεράς C αυξάνονται όταν η οδηγός ευθεία κινείται προς τα άνω αριστερά.

Examples of material indices

<i>Function, Objective and Constraint</i>	<i>Index</i>
Tie , minimum weight, stiffness prescribed	$\frac{E}{\rho}$
Beam , minimum weight, stiffness prescribed	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
Beam , minimum weight, strength prescribed	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$
Beam , minimum cost, stiffness prescribed	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
Beam , minimum cost, strength prescribed	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{C_m \rho}$
Column , minimum cost, buckling load prescribed	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
Spring , minimum weight for given energy storage	$\frac{\sigma_y^2}{E \rho}$
Thermal insulation , minimum cost, heat flux prescribed	$\frac{1}{\lambda C_m \rho}$
Electromagnet , maximum field, temperature rise prescribed	$\kappa C_p \rho$

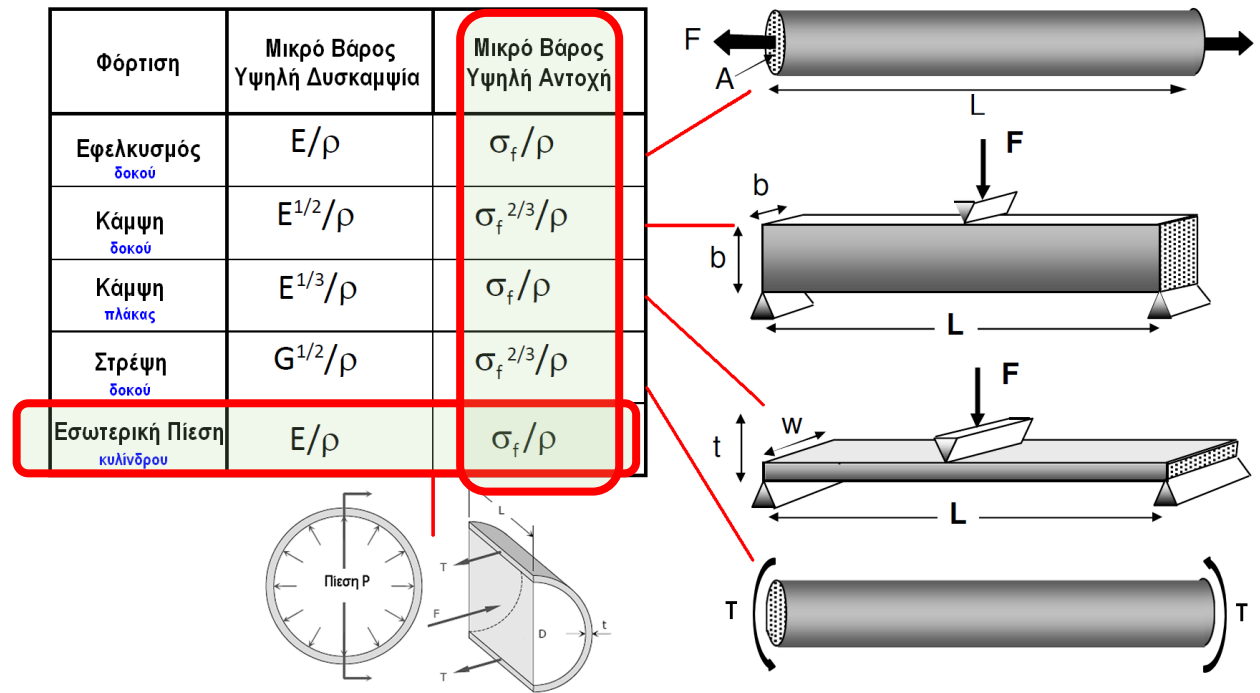
(ρ = density; E = Young's modulus; σ_y = elastic limit; C_m = cost/kg; λ = thermal conductivity; κ = electrical conductivity; C_p = specific heat)

Άσκηση 01 (Χρήση Διαγραμμάτων ASHBY)

Να επιλεγεί ανθεκτικό και ελαφρύ πλαστικό για τη κατασκευή σωλήνα μεταφοράς αερίου υπό πίεση.

Λύση:

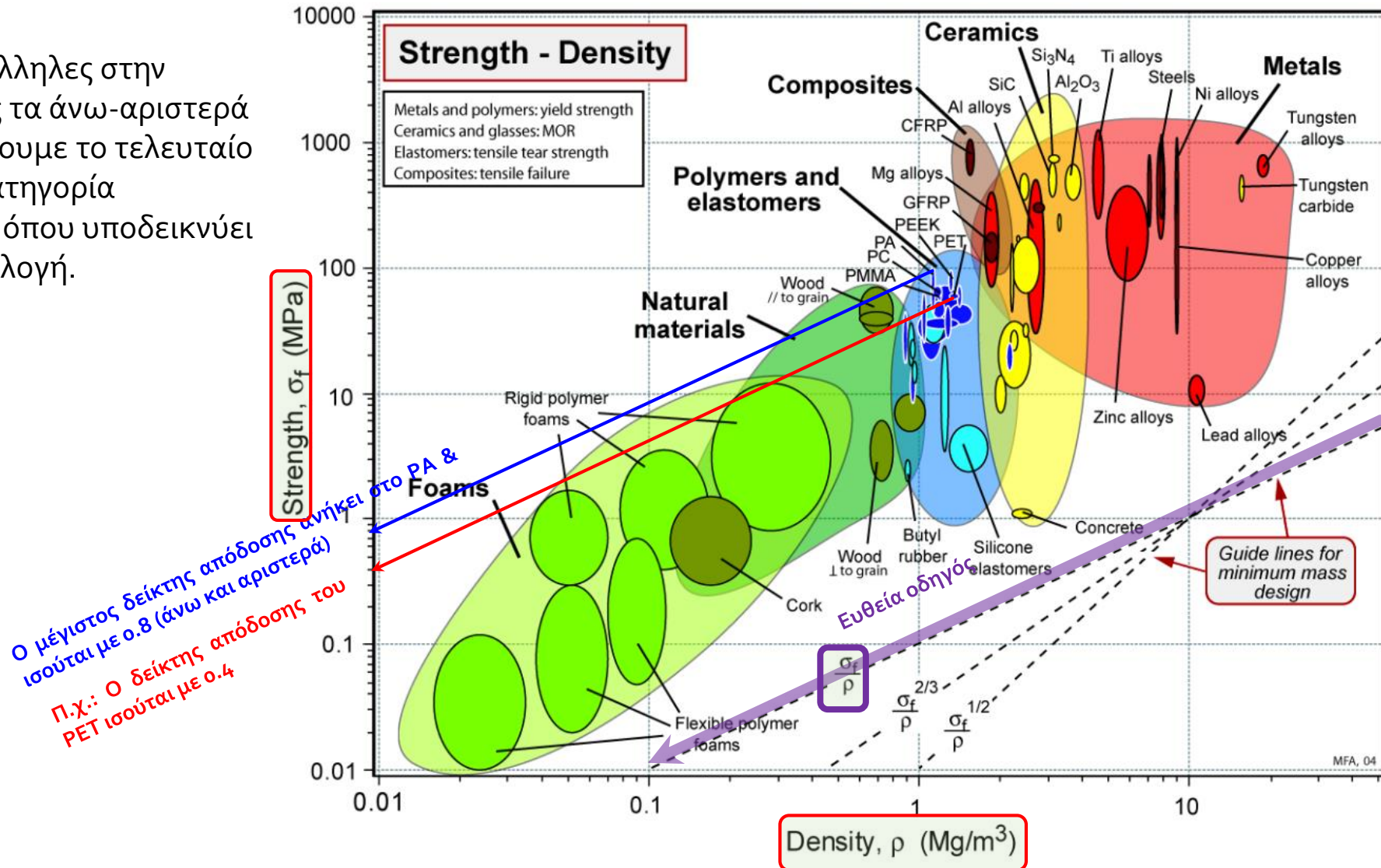
- Ανάλογα με το υπό εξέταση πρόβλημα, επιλέγεται κατάλληλος (προς μεγιστοποίηση) δείκτης απόδοσης στα διαγράμματα ASHBY με τη βοήθεια διατιθέμενων πινάκων. Εδώ στόχος είναι η υψηλή αντοχή (σ_f) σε συνδυασμό με μικρή πυκνότητα (ρ):



Σημείωση: Η πυκνότητα, στους άνω δείκτες, αντικαθίσταται από το σχετικό κόστος ανά μονάδα όγκου στη περίπτωση που απαιτείται ελαχιστοποίηση κόστους.

...Άσκηση 01 (Χρήση Διαγραμμάτων ASHBY)

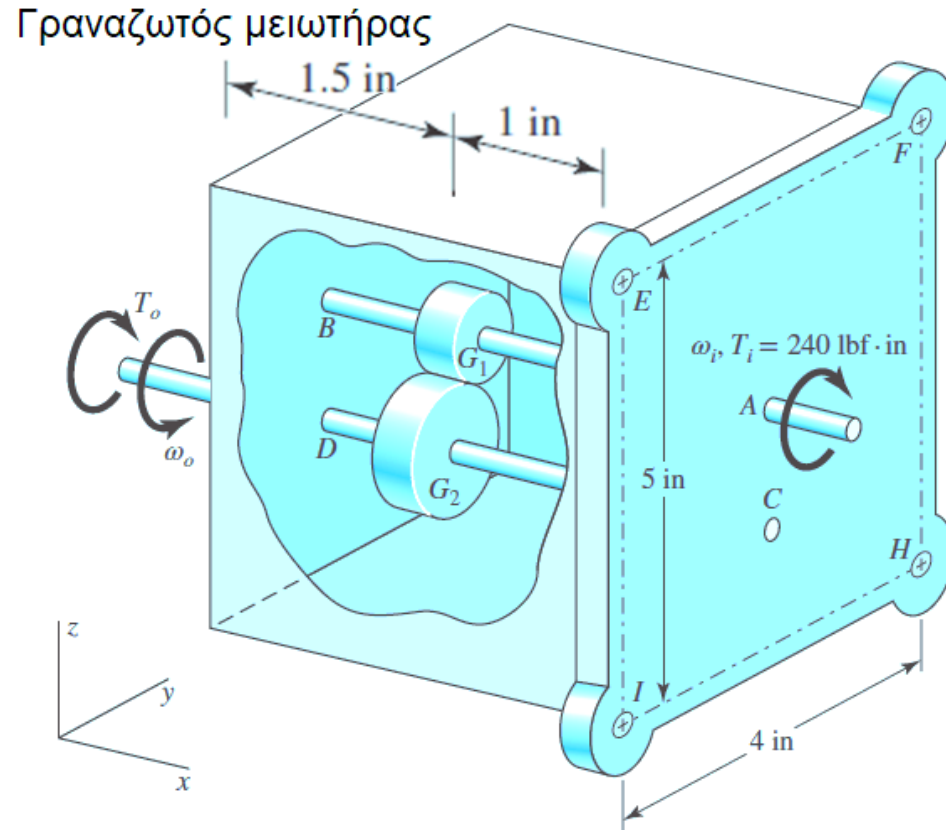
- Επιλέγουμε το κατάλληλο διάγραμμα ASHBY, δηλαδή τον χάρτη Αντοχής (σ_f) – πυκνότητας (ρ), και εντοπίζουμε την κατάλληλη ευθεία-οδηγό που αντιστοιχεί στον επιλεγμένο δείκτη απόδοσης.
- Χαράσσουμε παράλληλες στην ευθεία-οδηγό προς τα άνω-αριστερά μέχρι να συναντήσουμε το τελευταίο μπλε υποχωρίο (κατηγορία πλαστικού υλικού) όπου υποδεικνύει και τη βέλτιστη επιλογή.



Άσκηση 02 (Στατική ανάλυση – διαγράμματα ελευθέρου σώματος)

Το Σχήμα δείχνει ένα μειωτήρα γραναζιών όπου οι άξονες εισόδου και εξόδου AB και CD περιστρέφονται με σταθερές ταχύτητες ω_i και ω_o , αντίστοιχα. Οι ροπές εισόδου και εξόδου (στρεπτικές ροπές) είναι $T_i = 240 \text{ lbf} \cdot \text{in}$ και T_o , αντίστοιχα. Οι άξονες στηρίζονται στο περίβλημα από ρουλεμάν στα A, B, C και D. Οι ακτίνες βήματος των γραναζιών G_1 και G_2 είναι $r_1 = 0,75 \text{ in}$ και $r_2 = 1,5 \text{ in}$, αντίστοιχα. Σχεδιάστε τα διαγράμματα ελεύθερου σώματος κάθε μέλους και προσδιορίστε τις καθαρές δυνάμεις και ροπές αντίδρασης σε όλα τα σημεία.

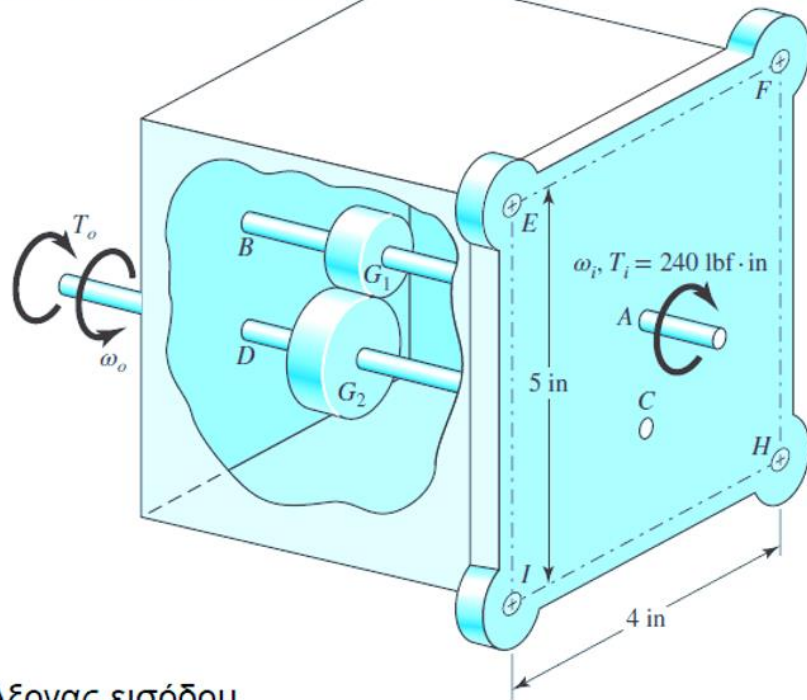
- Τα γρανάζια G_1 και G_2 είναι απλά γρανάζια με τυπική γωνία πίεσης $\phi = 20^\circ$.
- Τα ρουλεμάν είναι αυτό-ευθυγραμμιζόμενα και οι άξονες μπορούν να θεωρηθούν ότι στηρίζονται απλά.
- Το βάρος κάθε μέλους είναι αμελητέο.
- Η τριβή είναι αμελητέα.
- Οι κοχλίες στερέωσης στα E, F, H και I έχουν το ίδιο μέγεθος.



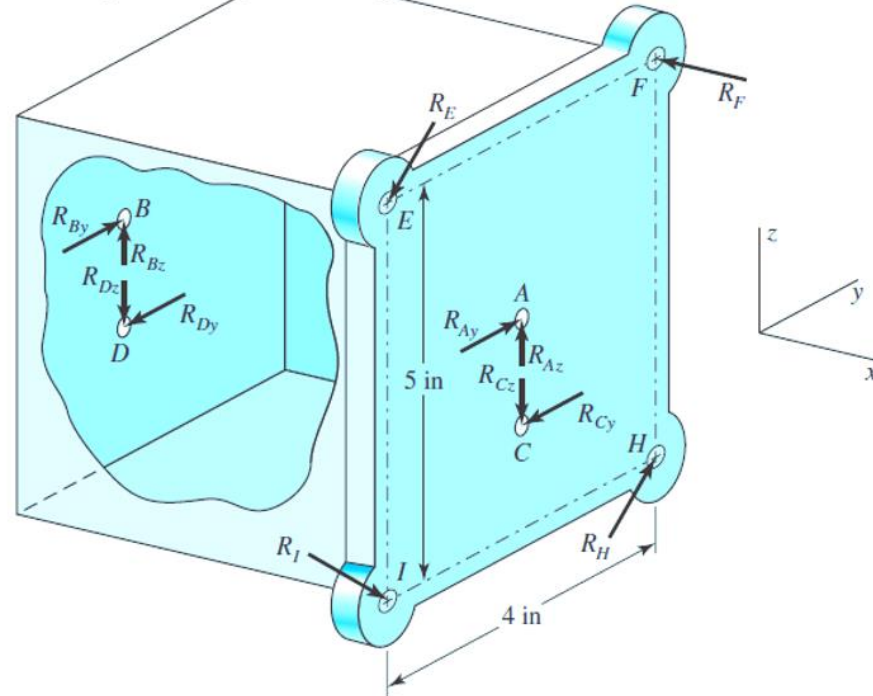
...Άσκηση 02 (Στατική ανάλυση – διαγράμματα ελευθέρου σώματος)

Διαγράμματα ελευθέρου σώματος:

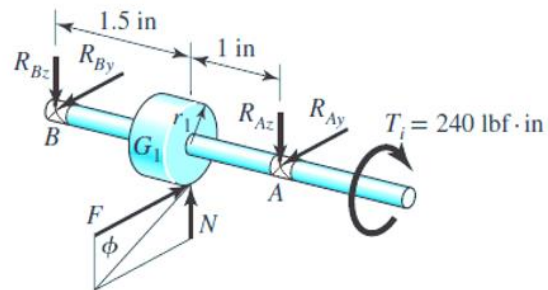
Γραναζωτός μειωτήρας



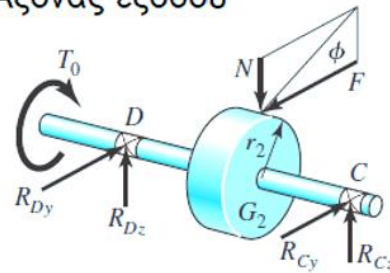
Κιβώτιο



Άξονας εισόδου

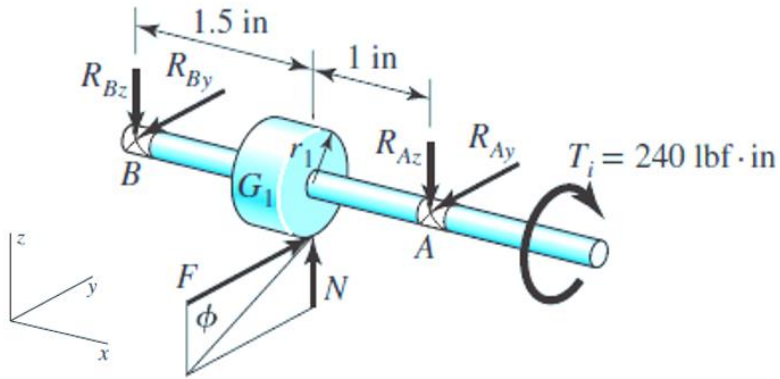


Άξονας εξόδου



...Άσκηση 02 (Στατική ανάλυση – διαγράμματα ελευθέρου σώματος)

Άξονας εισόδου



Εξισώσεις ισορροπίας για άξονα εισόδου:

$$\Sigma M_x^B = 0 \Rightarrow -T_i + F \times r_1 = 0 \Rightarrow -240 + F \times 0.75_1 = 0 \Rightarrow F = 320 \text{ lbf}$$

$$\tan \phi = \frac{N}{F} \Rightarrow N = F \tan \phi = 320 \tan 20^\circ = 116.5 \text{ lbf}$$

$$\Sigma M_z^B = 0 \Rightarrow F \times 1.5 - R_{Ay} (1.5 + 1) = 0 \Rightarrow 320 \times 1.5 - R_{Ay} 2.5 = 0 \Rightarrow R_{Ay} = 192 \text{ lbf}$$

$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow -R_{By} + F - R_{Ay} = 0 \Rightarrow -R_{By} + 320 - 192 = 0 \Rightarrow R_{By} = 128 \text{ lbf}$$

$$\Sigma M_y^B = 0 \Rightarrow -N \times 1.5 + R_{Az} (1.5 + 1) = 0 \Rightarrow -116.5 \times 1.5 + R_{Az} 2.5 = 0 \Rightarrow R_{Az} = 69.9 \text{ lbf}$$

$$\Sigma F_z = 0 \Rightarrow -R_{Bz} + N - R_{Az} = 0 \Rightarrow -R_{Bz} + 116.5 - 69.9 = 0 \Rightarrow R_{Bz} = 46.6 \text{ lbf}$$

Εξισώσεις ισορροπίας για άξονα εισόδου:

$$\Sigma M_x^D = 0 \Rightarrow -T_0 + F \times r_2 = 0 \Rightarrow -T_0 + 320 \times 1.5 = 0 \Rightarrow T_0 = 480 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

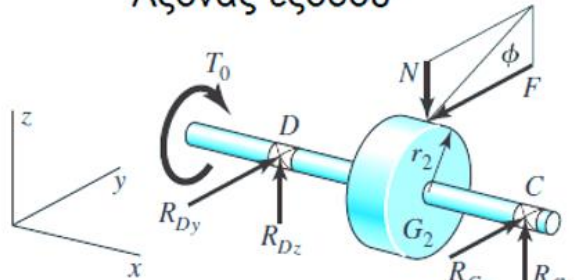
$$\Sigma M_z^D = 0 \Rightarrow -F \times 1.5 + R_{Cy} (1.5 + 1) = 0 \Rightarrow -320 \times 1.5 + R_{Cy} 2.5 = 0 \Rightarrow R_{Cy} = 192 \text{ lbf}$$

$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow R_{Dy} - F + R_{Cy} = 0 \Rightarrow R_{Dy} - 320 + 192 = 0 \Rightarrow R_{Dy} = 128 \text{ lbf}$$

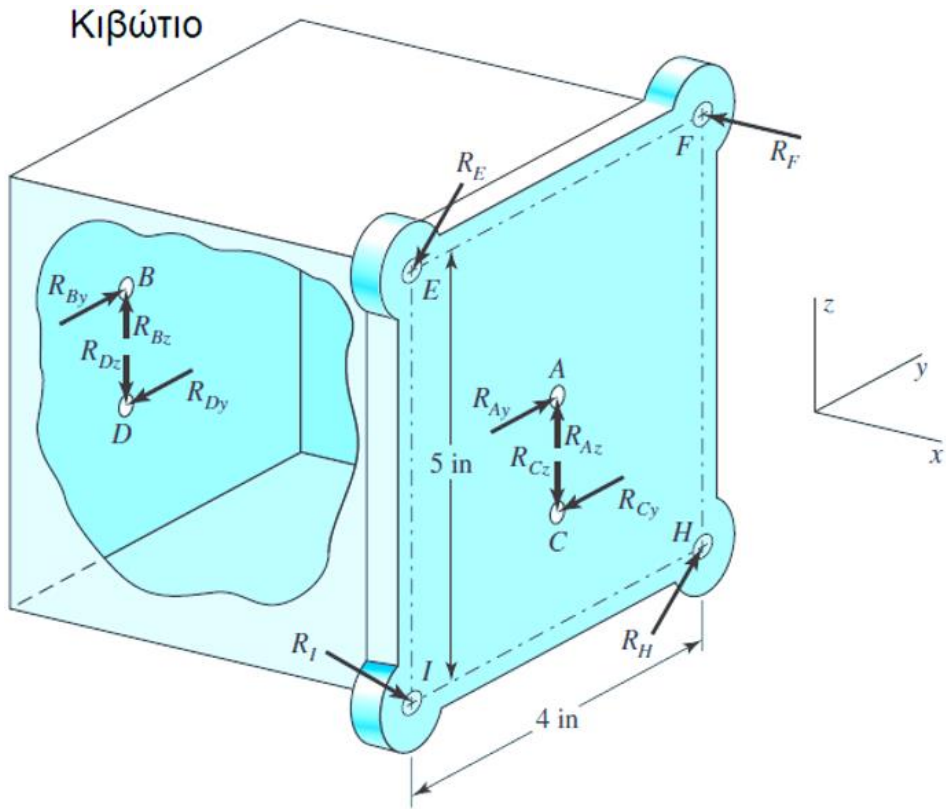
$$\Sigma M_y^D = 0 \Rightarrow N \times 1.5 - R_{Cz} (1.5 + 1) = 0 \Rightarrow 116.5 \times 1.5 - R_{Cz} 2.5 = 0 \Rightarrow R_{Cz} = 69.9 \text{ lbf}$$

$$\Sigma F_z = 0 \Rightarrow R_{Dz} - N + R_{Cz} = 0 \Rightarrow R_{Dz} - 116.5 + 69.9 = 0 \Rightarrow R_{Dz} = 46.6 \text{ lbf}$$

Άξονας εξόδου



...Άσκηση 03 (Στατική ανάλυση – διαγράμματα ελευθέρου σώματος)



Εισώσεις ισοροπίας για κιβώτιο:

$$\sum M_x^{\text{κέντρο}} = 0 \Rightarrow$$

$$R_{By} \frac{(1.5+0.75)}{2} + R_{Dy} \frac{(1.5+0.75)}{2} + R_{Ay} \frac{(1.5+0.75)}{2} + R_{Cy} \frac{(1.5+0.75)}{2} - 4R_E \sqrt{\left(\frac{4}{2}\right)^2 + \left(\frac{5}{2}\right)^2} = 0 \Rightarrow$$

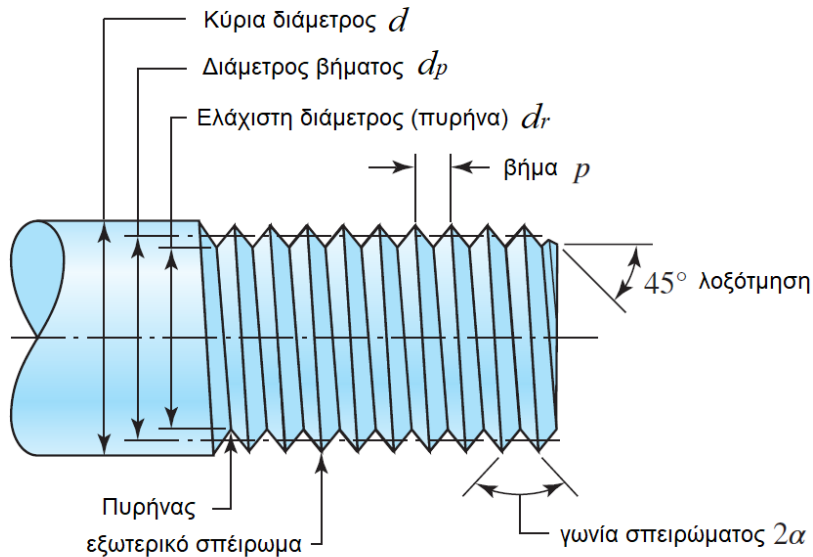
$$\Rightarrow 128(1.5+0.75) + 192(1.5+0.75) = 4R_E \sqrt{\left(\frac{4}{2}\right)^2 + \left(\frac{5}{2}\right)^2}$$

$$\Rightarrow 288 + 432 = 12.81R_E \Rightarrow R_E = \frac{720}{12.81} \text{ lbf} \Rightarrow R_E = 56.2 \text{ lbf}$$

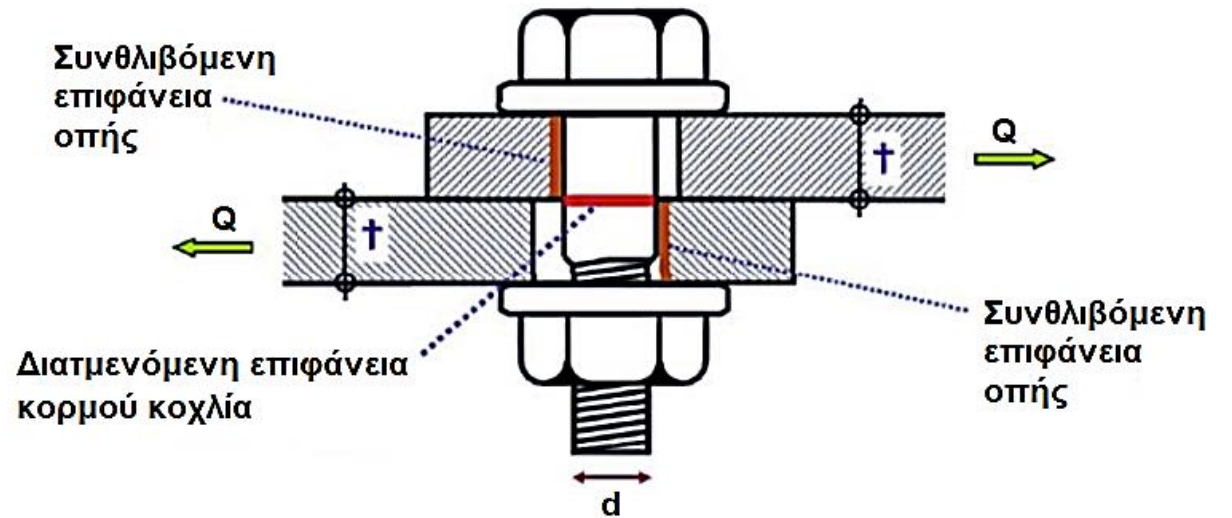
Λόγω συμμετρίας : $R_E = R_F = R_H = R_I = 56.2 \text{ lbf}$

...Άσκηση 03 (Στατική ανάλυση – διαγράμματα ελευθέρου σώματος)

Να επιλεγούν κατάλληλοι κοχλίες στερέωσης (ίδιου μεγέθους) κλάσης 4.6 στα σημεία E, F, H και I.



Φόρτιση υπό διάτμηση σε κάθε σημείο:

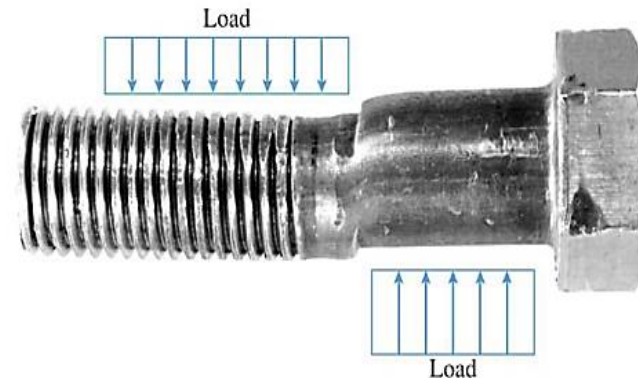


Διάτμηση κορμού (πυρήνα) κοχλίας:

$$A = \frac{\pi(d_r)^2}{4}$$

$$Q = R_E = R_F = R_H = R_I = 56.2 \text{ lbf} = 56.2 \times 4.44822162 \text{ N} = 250 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \Rightarrow \tau = \frac{Q}{\frac{\pi(d_r)^2}{4}} \Rightarrow \tau = \frac{4Q}{\pi(d_r)^2}$$



...Άσκηση 03 (Στατική ανάλυση – διαγράμματα ελευθέρου σώματος)

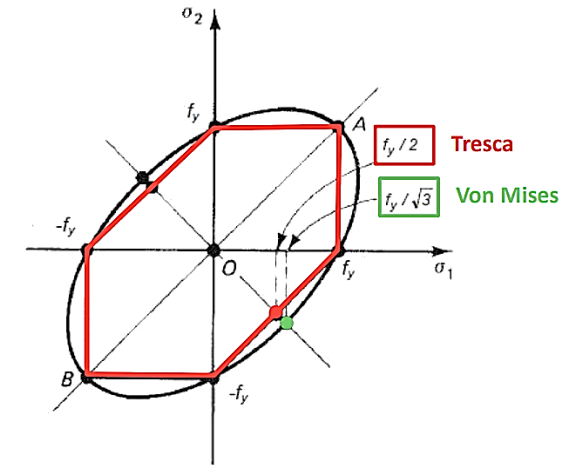
Συνήθως για καθαρή διάτμηση σε όλκιμα υλικά:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_y}{2} \Rightarrow (\text{κλάση 4.6}) \Rightarrow \tau_{\max} = \frac{240}{2} \text{ MPa} \Rightarrow \tau_{\max} = 120 \text{ MPa}$$

Θεωρώντας συντελεστή ασφάλειας $N = 3$, θα πρέπει:

$$\tau \leq \frac{\tau_{\max}}{N} \Rightarrow \tau \leq \frac{\tau_{\max}}{3} \Rightarrow \frac{4Q}{\pi(d_r)^2} \leq \frac{\tau_{\max}}{3} \Rightarrow 12Q \leq \tau_{\max} \pi(d_r)^2 \Rightarrow d_r \geq \sqrt{\frac{12Q}{\tau_{\max} \pi}}$$

$$d_r \geq \sqrt{\frac{12 \cdot 250 \text{ N}}{120 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \pi}} \Rightarrow d_r \geq 2.82 \text{ mm} \Rightarrow d_{r,\min} = 2.82 \text{ mm} \rightarrow \text{επιλέγω M4 με } d_{r,\min} = 3.4 \text{ mm}$$



Metric Threads: BS 3643.

NOMINAL SIZE	PITCH	CORE DIAMETER	MAJOR DIAMETER	STRESS AREA MM ²	TAPPING DRILL 'B'	CLEARANCE DRILL 'A'	TAPPING DEPTH 'C'	DRILL DEPTH 'D'
M3	0.50	2.40	3.0	5.0	2.5	3.4	4	6
M4	0.70	3.40	4.0	8.8	3.3	4.5	5	9
M5	0.80	4.00	5.0	14.2	4.2	5.5	6	10
M6	1.00	4.80	6.0	20.1	5.0	6.6	8	12
M8	1.25	6.50	8.0	36.6	6.8	9.0	10	16
M10	1.50	8.16	10.0	58.0	8.5	11.0	12	19
M12	1.75	9.85	12.0	84.3	10.2	14.0	15	23
M14	2.00	11.55	14.0	115.0	12.2	16.0	17	26
M16	2.00	14.55	16.0	157.0	14.0	18.0	20	28
M18	2.50	15.63	18.0	192.0	15.8	22.0	22	33
M20	2.50	16.93	20.0	245.0	17.5	26.0	24	35
M22	2.50	18.93	22.0	203.0	19.8	24.0	27	37
M24	3.00	20.32	24.0	353.0	21.0	26.0	29	42
M27	3.00	23.32	27.0	259.0	24.3	29.0	33	45
M30	3.50	25.70	30.0	561.0	26.5	33.0	36	51
M33	3.50	28.71	33.0	694.0	30.0	35.0	40	54
M36	4.00	31.09	36.0	817.0	32.0	39.0	44	60
M39	4.00	34.09	39.0	769.0	35.5	41.0	47	63
M42	4.00	36.48	42.0	1120.0	37.5	45.0	51	69

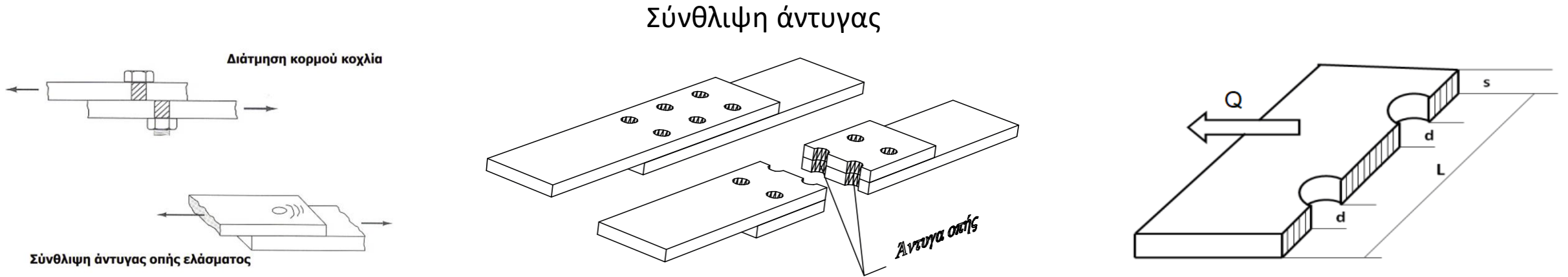
Τυποποίηση μεγεθών κοχλιών

Property Class	Size Range, Inclusive	Minimum Proof Strength,* MPa	Minimum Tensile Strength,* MPa	Minimum Yield Strength,* MPa	Material	Head Marking
4.6	M5–M36	225	400	240	Low or medium carbon	4.6
4.8	M1.6–M16	310	420	340	Low or medium carbon	4.8
5.8	M5–M24	380	520	420	Low or medium carbon	5.8
8.8	M16–M36	600	830	660	Medium carbon, Q&T	8.8
9.8	M1.6–M16	650	900	720	Medium carbon, Q&T	9.8
10.9	M5–M36	830	1040	940	Low-carbon martensite, Q&T	10.9
12.9	M1.6–M36	970	1220	1100	Alloy, Q&T	12.9

Κλάση υλικών κοχλιών

...Άσκηση 03 (Στατική ανάλυση – διαγράμματα ελευθέρου σώματος)

Να βρεθεί το ελάχιστο πάχος ελάσματος κιβωτίου αν το κιβώτιο είναι κατασκευασμένο από ανθρακούχο μορφοχάλυβα, και γύρω από τις οπές υπάρχει μεγάλη επιφάνεια ελάσματος .



Θεωρώντας μόνο τη σύνθλιψη άντυγας (οι κοχλιώσεις είναι μακριά μεταξύ τους και ακτινικά γύρω τους υπάρχει πολύ μήκος ελάσματος), η τάση σύνθλιψης είναι:

$$\sigma_{\text{συνθ}} = \frac{Q}{A_{\text{συνθ}}} \Rightarrow \sigma_{\text{συνθ}} = \frac{Q}{sd_{\text{οπής}}}$$

Συνήθως για σύνθλιψη : $\sigma_{\text{max}} = 2.5\sigma_y \Rightarrow \sigma_{\text{max}} = 2.5 \cdot 240 \text{ MPa} \Rightarrow \sigma_{\text{max}} = 600 \text{ MPa}$

$$\sigma_{\text{συνθ}} \leq \frac{\sigma_{\text{max}}}{N} \Rightarrow \sigma_{\text{συνθ}} \leq \frac{\sigma_{\text{max}}}{3} \Rightarrow \frac{Q}{sd_{\text{οπής}}} \leq \frac{\tau_{\text{max}}}{3} \Rightarrow 3Q \leq \sigma_{\text{max}} sd_{\text{οπής}} \Rightarrow s \geq \frac{3Q}{\sigma_{\text{max}} d_{\text{οπής}}}$$

$$s \geq \frac{3 \cdot 250 \text{ N}}{600 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \Rightarrow s \geq 0.25 \text{ mm} \Rightarrow s_{\text{min}} = 0.25 \text{ mm}$$

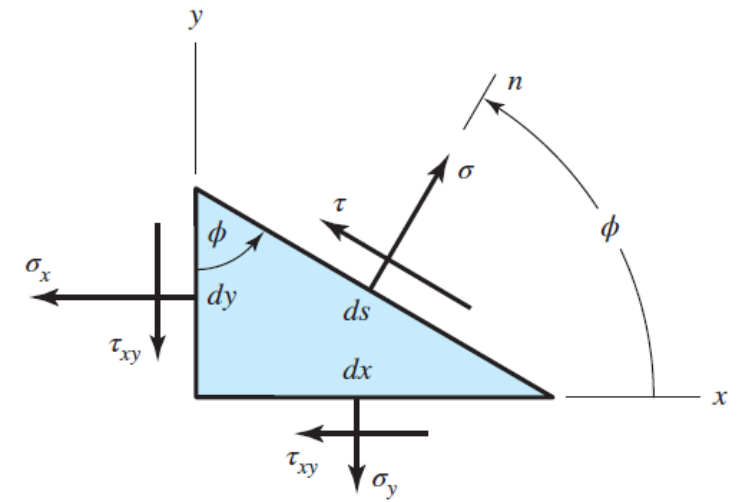
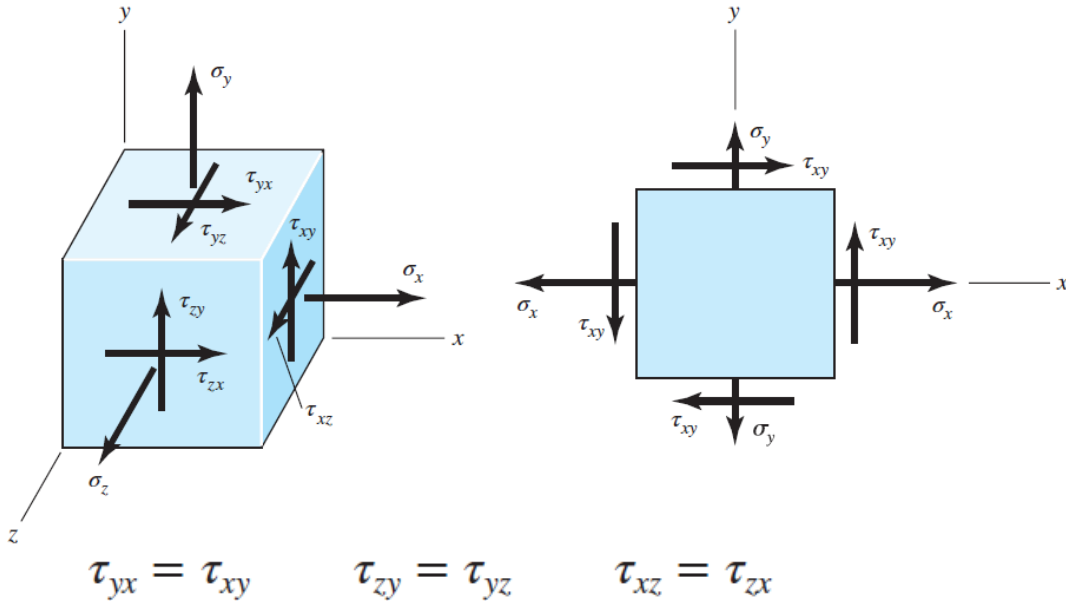
Η διάμετρος της οπής στην οποία διέρχεται ένας κοχλίας συνήθως λαμβάνεται ίση με την ονομαστική διάμετρο του κοχλίας συν 1 mm

Καρτεσιανές συνιστώσες τάσης

3 διαστάσεις

2 διαστάσεις

(κατάσταση επίπεδης τάσης-plane stress, $\sigma_z=0$)



Με βάση τις εξισώσεις ισορροπίας μετασχηματίζονται οι τάσεις στο νέο επικλινές επίπεδο ως εξής:

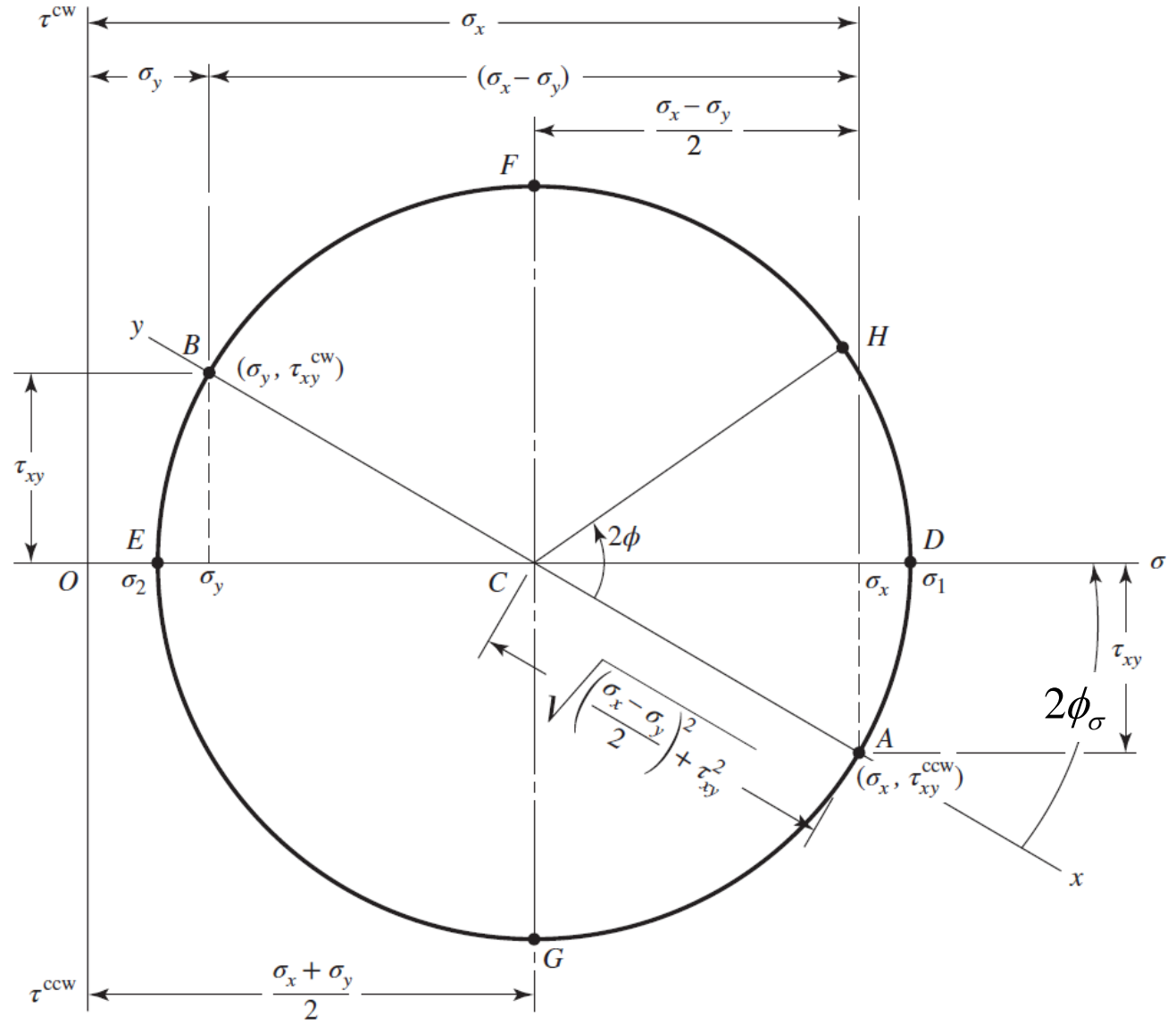
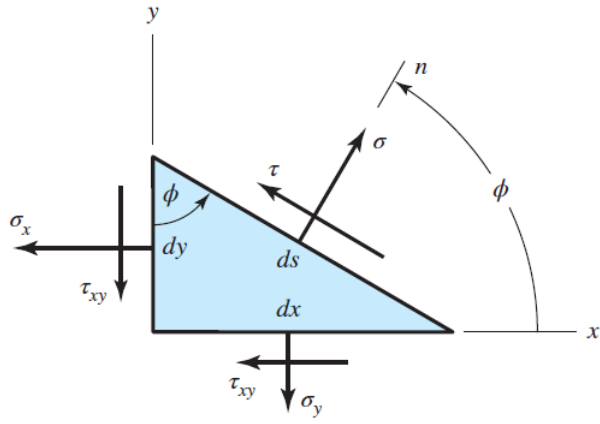
$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\phi + \tau_{xy} \sin 2\phi \quad (1)$$

$$\tau = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\phi + \tau_{xy} \cos 2\phi \quad (2)$$

Παράγωγος της (1) ως προς $\phi = 0 \Rightarrow \tan 2\phi_\sigma = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \Rightarrow$ Κύριες ορθές τάσεις $\Rightarrow \sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$

Παράγωγος της (2) ως προς $\phi = 0 \Rightarrow \tan 2\phi_\tau = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} \Rightarrow$ Κύριες διατμητικές τάσεις $\Rightarrow \tau_1, \tau_2 = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$

Γραφική αναπαράσταση καρτεσιανών και ορθών τάσεων με κύκλο Mohr



Γραφική αναπαράσταση κύριων τάσεων στις 3 διαστάσεις

Οι κύριες ορθές τάσεις προκύπτουν από επίλυση της εξίσωσης (3^{ου} βαθμού):

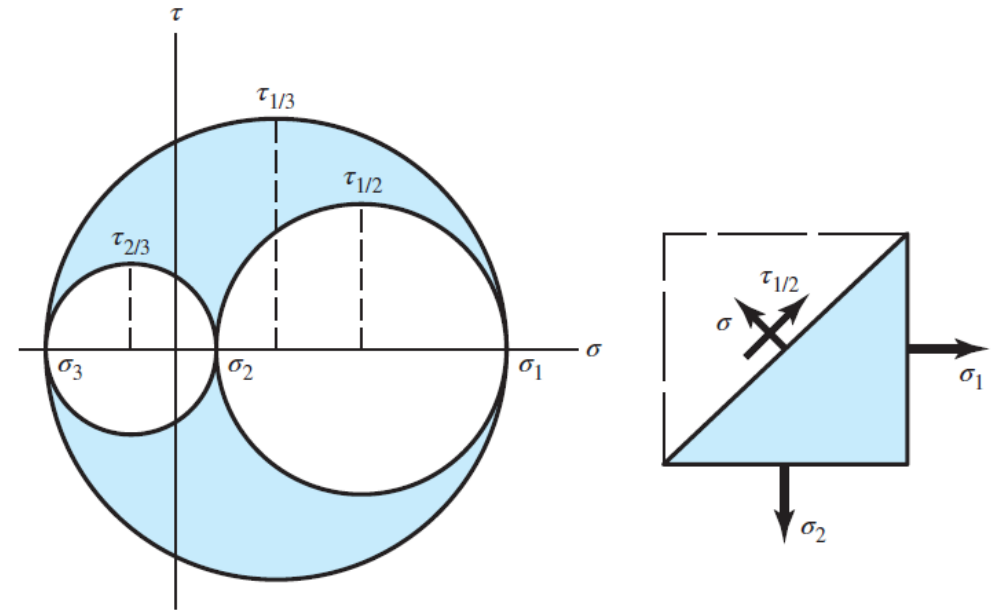
$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2)\sigma - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0$$

Οι κύριες διατμητικές είναι:

$$\tau_{1/2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad \tau_{2/3} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \quad \tau_{1/3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Από τον κύκλο Mohr είναι:

$$\tau_{\max} = \tau_{1/3}$$



Άσκηση 04 (Εύρεσης κυρίων τάσεων με κύκλο Mohr και εξισώσεις)

$$\phi_{\sigma} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2(-50)}{80} \right) = -25.7^{\circ}, 64.3^{\circ}$$

$$\phi_{\sigma} = -25.7^{\circ}, \quad \sigma = \frac{80 + 0}{2} + \frac{80 - 0}{2} \cos[2(-25.7)] + (-50) \sin[2(-25.7)] = 104.03 \text{ MPa}$$

$$\tau = -\frac{80 - 0}{2} \sin[2(-25.7)] + (-50) \cos[2(-25.7)] = 0 \text{ MPa}$$

$$\phi_{\sigma} = 64.3^{\circ}, \quad \sigma = \frac{80 + 0}{2} + \frac{80 - 0}{2} \cos[2(64.3)] + (-50) \sin[2(64.3)] = -24.03 \text{ MPa}$$

$$\tau = 0$$

$$\phi_{\tau} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} \right) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{80}{2(-50)} \right) = 19.3^{\circ}, 109.3^{\circ}$$

$$\phi_{\tau} = 19.3^{\circ},$$

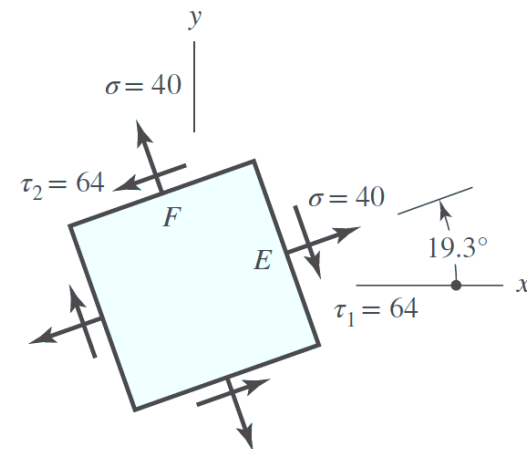
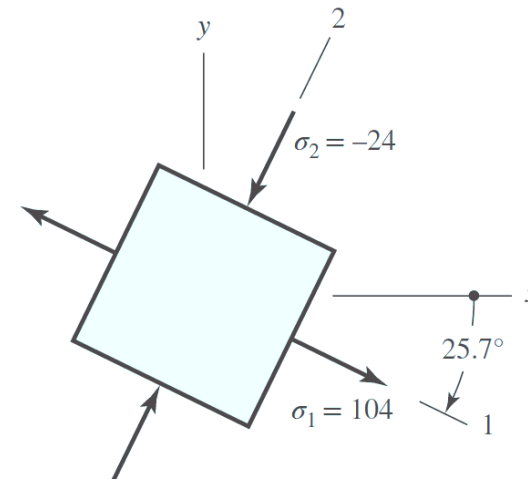
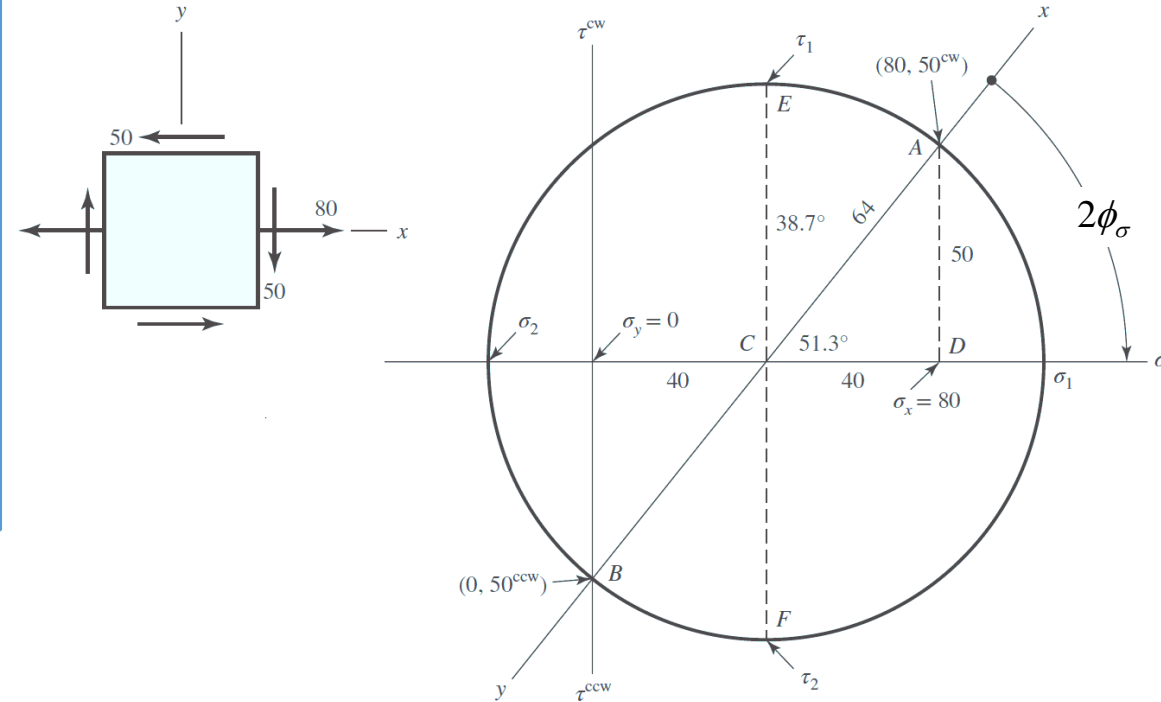
$$\sigma = \frac{80 + 0}{2} + \frac{80 - 0}{2} \cos[2(19.3)] + (-50) \sin[2(19.3)] = 40.0 \text{ MPa}$$

$$\tau = -\frac{80 - 0}{2} \sin[2(19.3)] + (-50) \cos[2(19.3)] = -64.0 \text{ MPa}$$

$$\phi_{\tau} = 109.3^{\circ},$$

$$\sigma = 40.0 \text{ MPa}$$

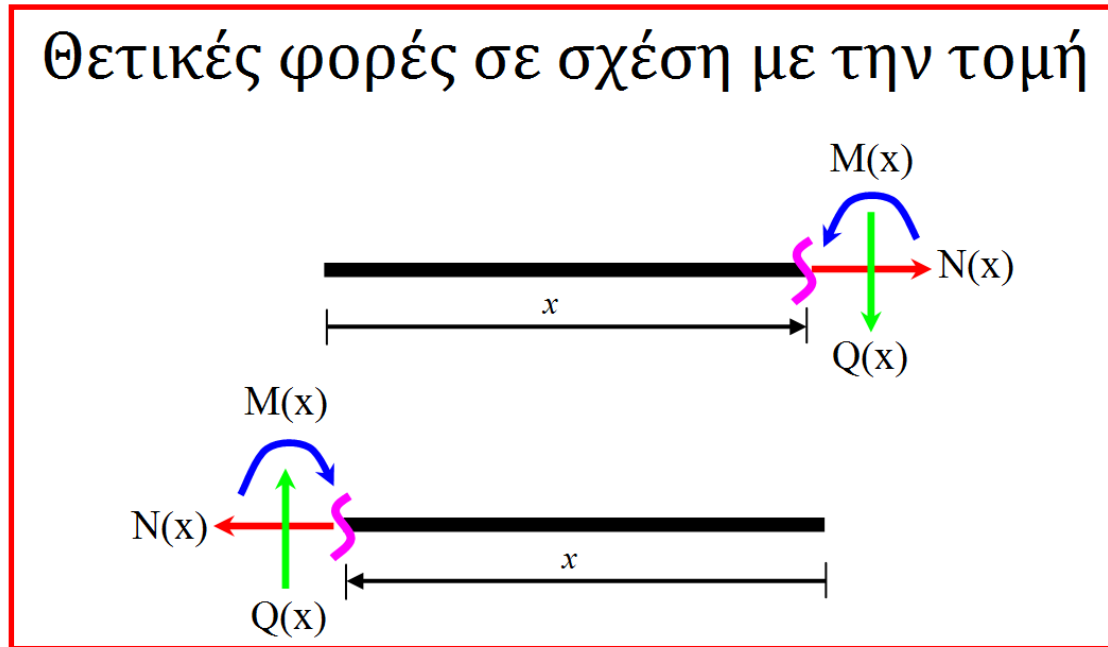
$$\tau = +64.0 \text{ MPa}$$



Εντατικά Μεγέθη

Είναι τα εσωτερικά φορτία τα οποία εμφανίζονται σε μια τυχαία τομή της δοκού στο σημείο x :

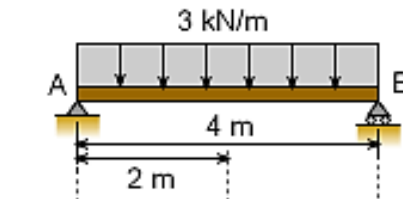
- Αξονική δύναμη $N(x)$
- Τέμνουσα δύναμη $Q(x)$
- Καμπτική ροπή $M(x)$



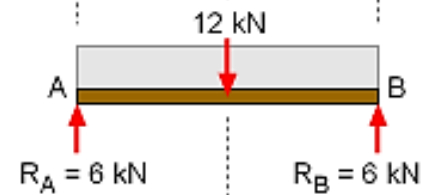
Διαγράμματα Εντατικών Μεγεθών

Είναι η γραφική απεικόνιση των συναρτήσεων $N(x)$, $Q(x)$, $M(x)$ κατά μήκος της δοκού.

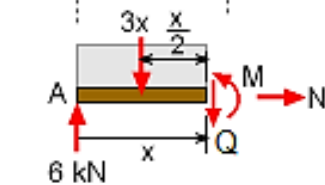
Ορισμός προβλήματος



Υπολογισμός αντιδράσεων

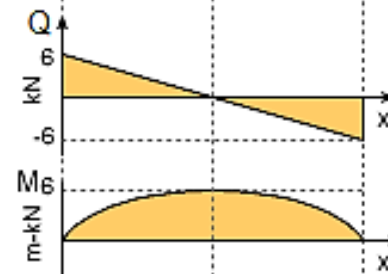


Υπολογισμός N, Q, M σε σχέση με την απόσταση x



$$N = 0$$

Διαγράμματα



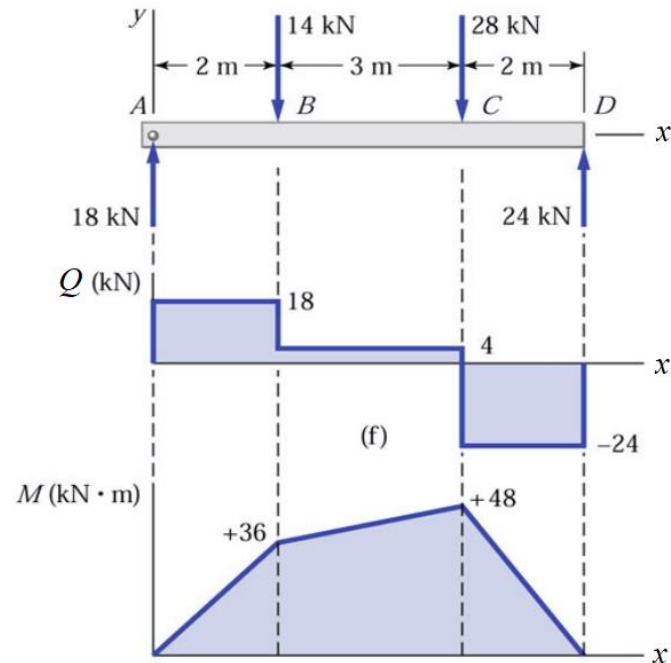
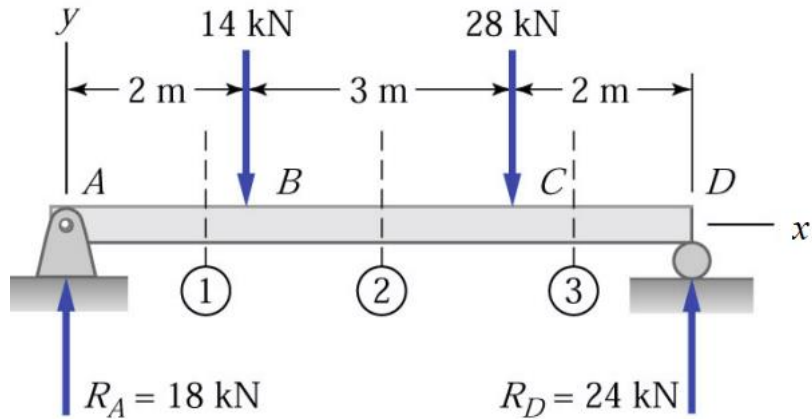
Χάραξη Διαγραμμάτων Εντατικών Μεγεθών

- 1) Αντικαθιστούμε τις στηρίξεις με τις αντιδράσεις τους και σχεδιάζουμε το Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος (Δ.Ε.Σ).
- 2) Υπολογίζουμε τις αντιδράσεις στήριξης από τις εξισώσεις ισορροπίας.
- 3) Καθορίζουμε τα χαρακτηριστικά σημεία του φορέα όπως τα:
 - άκρα φορέα
 - σημεία που ασκούνται συγκεντρωμένες φορτίσεις
 - σημεία που αρχίζουν και τελειώνουν κατανεμημένα φορτία
- 4) Σε κάθε περιοχή μεταξύ δυο διαδοχικών χαρακτηριστικών σημείων κάνουμε μία τομή σε τυχαία θέση που απέχει απόσταση x από το άκρο της δοκού.
- 5) Υπολογίζουμε τις συναρτήσεις $N(x)$, $Q(x)$, $M(x)$ από τις εξισώσεις ισορροπίας ενός από τα δύο τμήματα που προκύπτουν από την τομή, λαμβάνοντας υπόψη τη θετική φορά των εντατικών μεγεθών στη τομή.

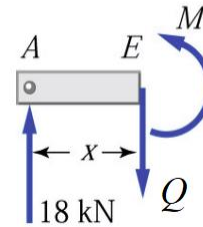
Χαρακτηριστικά Διαγραμμάτων Εντατικών Μεγεθών

- 1) Το διάγραμμα $N(x)$ παρουσιάζει ασυνέχεια στα σημεία εμφάνισης οριζόντιων συγκεντρωμένων δυνάμεων.
- 2) Το διάγραμμα $Q(x)$ παρουσιάζει ασυνέχεια στα σημεία εμφάνισης κατακόρυφων συγκεντρωμένων δυνάμεων.
- 3) Το διάγραμμα $M(x)$ παρουσιάζει ασυνέχεια στα σημεία εμφάνισης συγκεντρωμένων ροπών.
- 4) Η κλίση του $M(x)$ σε μια θέση ισούται με την τιμή του $Q(x)$ στη θέση αυτή:
 - (i) $Q > 0 \rightarrow M$ αυξάνει
 - (ii) $Q < 0 \rightarrow M$ ελαττώνεται
- 5) Αν ένα τμήμα είναι ενδιάμεσα αφόρτιστο τότε τα $N(x)$ και $Q(x)$ είναι σταθερά ενώ το $M(x)$ 1ου βαθμού.
- 6) Αν ένα τμήμα φέρει ομοιόμορφα κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο τότε το $N(x)$ είναι σταθερό, το $Q(x)$ είναι 1ου βαθμού ενώ το $M(x)$ 2ου βαθμού.
- 7) Αν ένα τμήμα φέρει τριγωνικό κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο τότε το $N(x)$ είναι σταθερό, το $Q(x)$ είναι 2ου βαθμού ενώ το $M(x)$ 3ου βαθμού.

Άσκηση 05 (Εύρεση διαγραμμάτων ΝQM ισοστατικών φορέα)

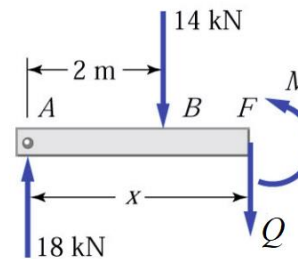


AB ($0 < x < 2$ m)



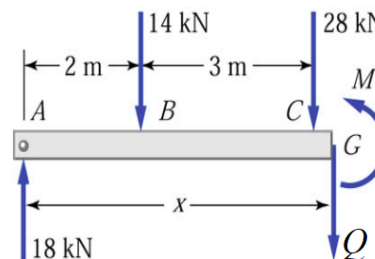
$$\begin{aligned} \Sigma F_y = 0 + \uparrow \quad & 18 - Q = 0 \\ & Q = +18 \text{ kN} \\ \Sigma M_E = 0 + \curvearrowright \quad & -18x + M = 0 \\ & M = +18x \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

AB ($2 < x < 5$ m)



$$\begin{aligned} \Sigma F_y = 0 + \uparrow \quad & 18 - 14 - Q = 0 \\ & Q = +18 - 14 = +4 \text{ kN} \\ \Sigma M_E = 0 + \curvearrowright \quad & -18x + 14(x-2) + M = 0 \\ & M = +18x - 14(x-2) = 4x + 28 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

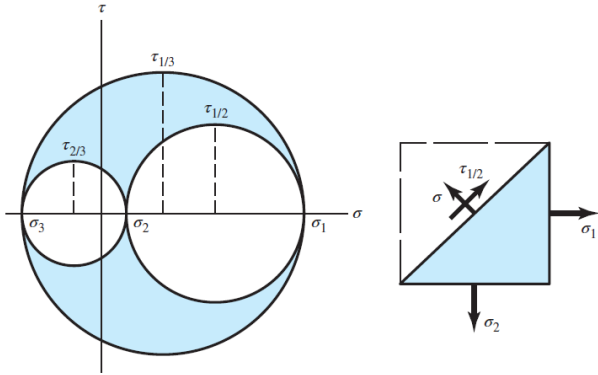
CD ($5 \text{ m} < x < 7$ m)



$$\begin{aligned} \Sigma F_y = 0 + \uparrow \quad & 18 - 14 - 28 - Q = 0 \\ & Q = +18 - 14 - 28 = -24 \text{ kN} \\ \Sigma M_G = 0 + \curvearrowright \quad & -18x + 14(x-2) + 28(x-5) + M = 0 \\ & M = +18x - 14(x-2) - (x-5) = -24x + 168 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Κριτήρια αστοχίας για όλκιμα

Κριτήριο μέγιστης διατμητικής τάσης $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$

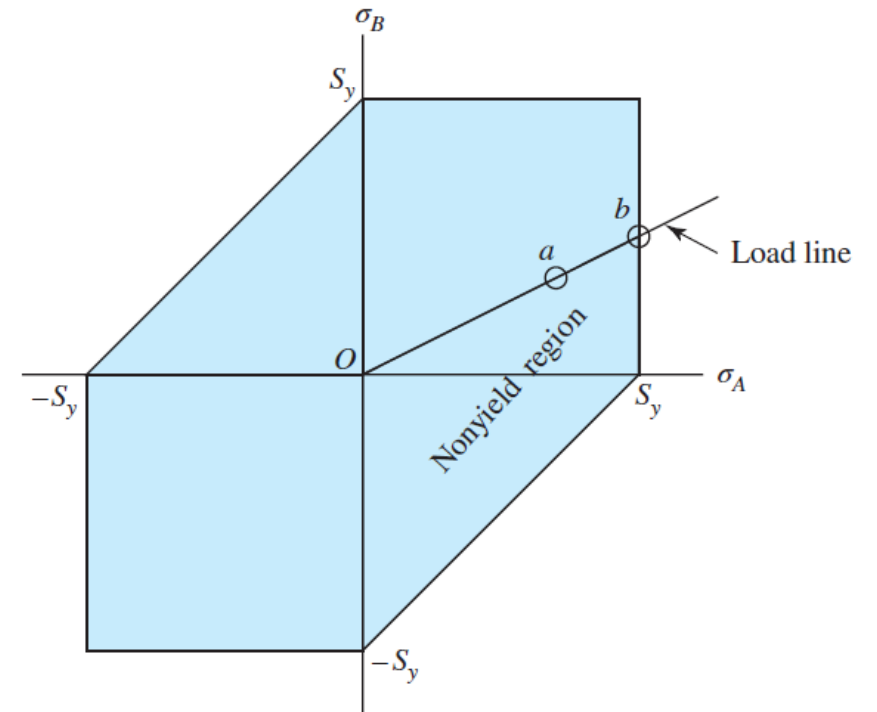


$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2} \quad \tau_{\max} = \frac{S_y}{2n}$$

$S_{sy} = 0.5S_y$

Αν μία ορθή από τις τρεις είναι μηδενική:

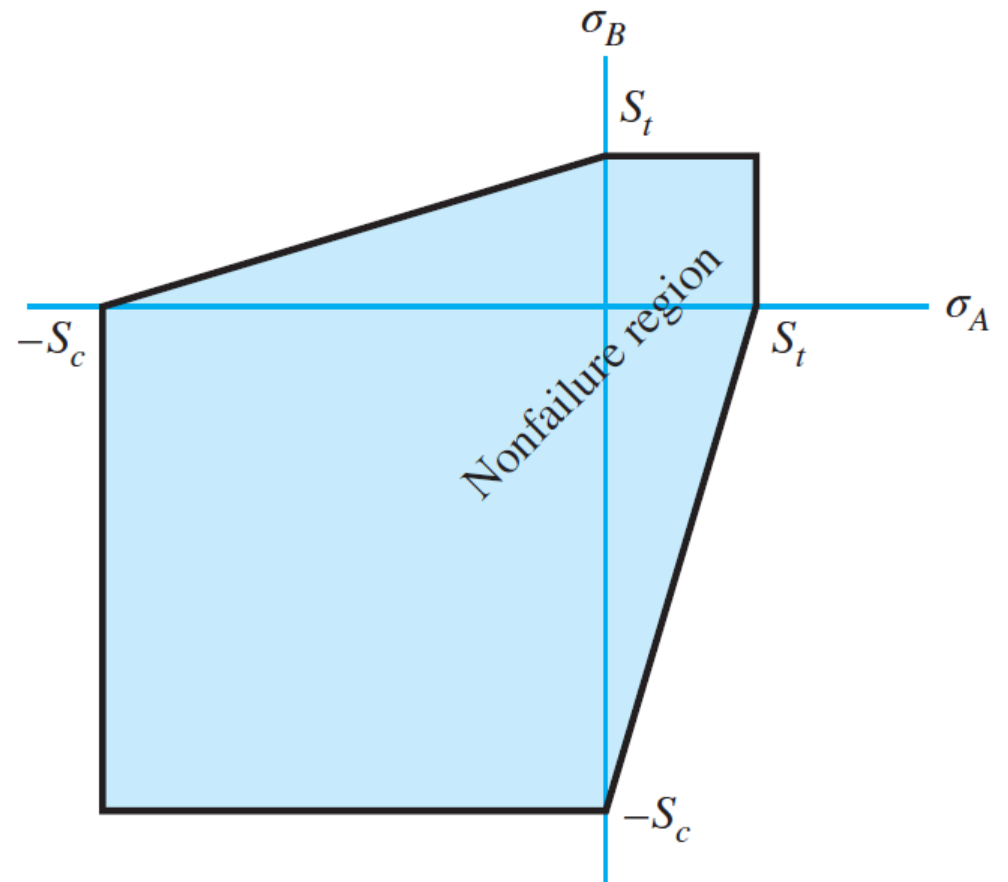
$$n = Ob/Oa$$



...Κριτήρια αστοχίας για όλκιμα υλικά

Κριτήριο Mohr-Coulomb

S_t = όριο διαρροής σε εφελκυσμό (tension)
 S_c = όριο διαρροής σε θλίψη (compression)



....Κριτήρια αστοχίας για όλκιμα υλικά

Κριτήριο θεωρίας έργου παραμόρφωσης (στις 3 διαστάσεις)

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq S_y$$

Ισοδύναμη τάση von Mises (στις 3 διαστάσεις)

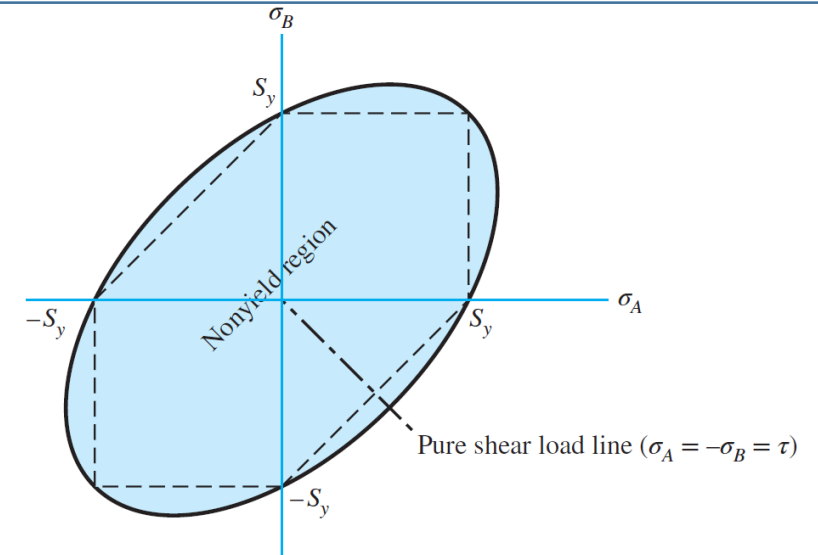
Με βάση τις κύριες ορθές τάσεις: $\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$

Με βάση τις καρτεσιανές τάσεις: $\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2}$

Αν μία ορθή από τις τρεις είναι μηδενική (2 διαστάσεις)

$$\sigma' = (\sigma_A^2 - \sigma_A \sigma_B + \sigma_B^2)^{1/2}$$

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2}$$



Κριτήρια αστοχίας για ψαθυρά υλικά

Κριτήριο Mohr-Coulomb

S_{ut} = όριο αντοχής σε εφελκυσμό
 S_{uc} = όριο αντοχής σε θλίψη

