

# Μηχανικές Ιδιότητες

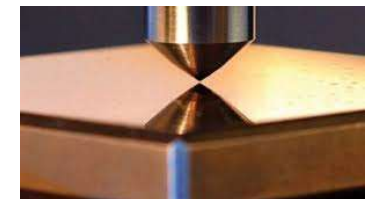


*Περιέχει περιεχόμενο και υλικό από τα συγγράμματα:*

Callister W. D., Rethwisch D. G. Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 10η Έκδοση, Εκδ. Α. Τζιόλα & Υιοί, 2022

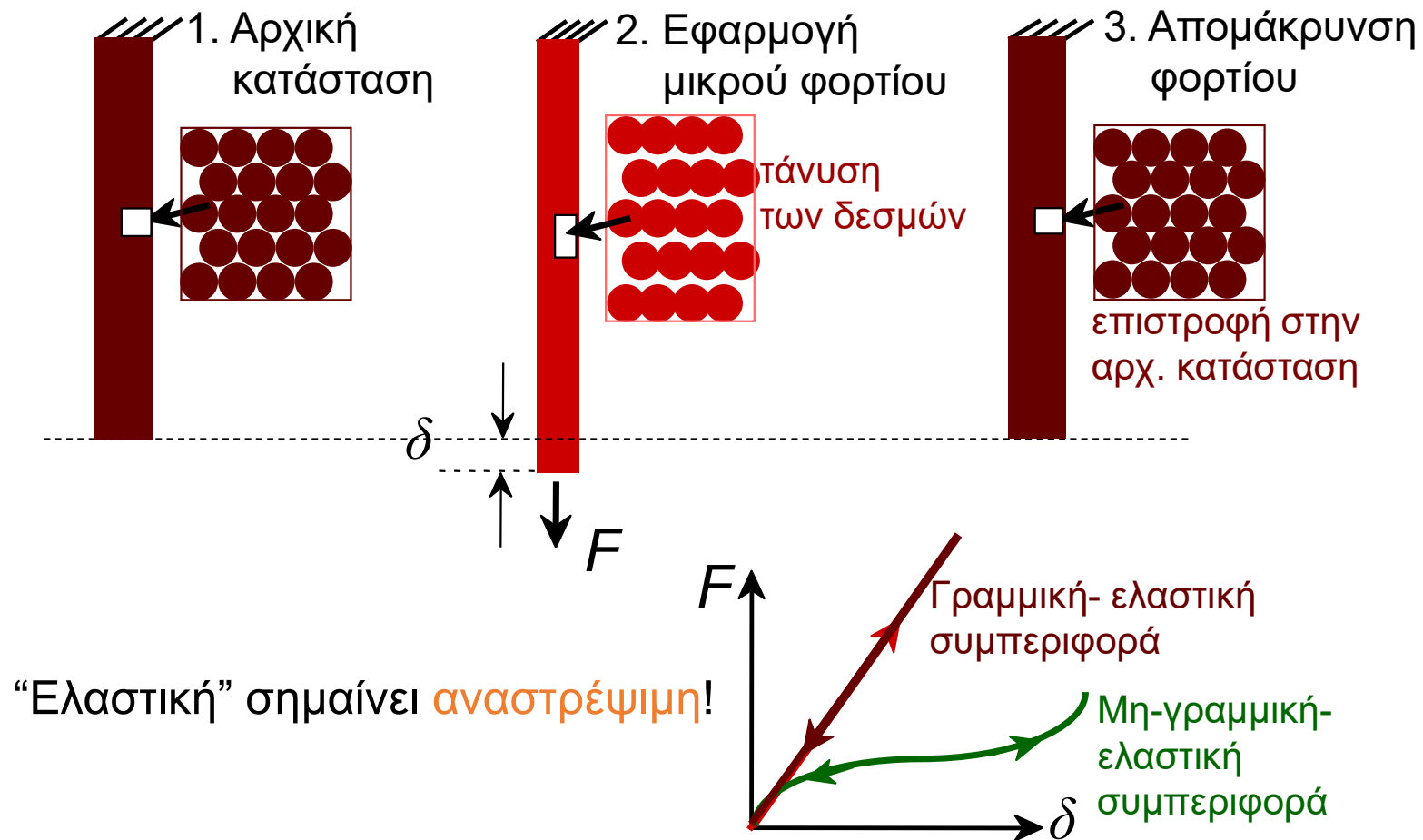
Β. Ζασπάλης, Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 2η Έκδοση, Εκδ. Α. Τζιόλα & Υιοί, 2020

- **Τάση, παραμόρφωση** και η σχέση τους με το εφαρμοζόμενο φορτίο.
- **Ελαστική** συμπεριφορά: Όταν τα φορτία είναι μικρά, πόση παραμόρφωση προκύπτει; Ποια υλικά παραμορφώνονται λιγότερο;
- **Πλαστική** συμπεριφορά: Σε ποιο σημείο προκύπτει μόνιμη παραμόρφωση; Ποια υλικά είναι περισσότερο ανθεκτικά σε μόνιμη παραμόρφωση;
- **Δυσθραυστότητα** και **ολκιμότητα**: Τι είναι και πώς τις μετράμε;

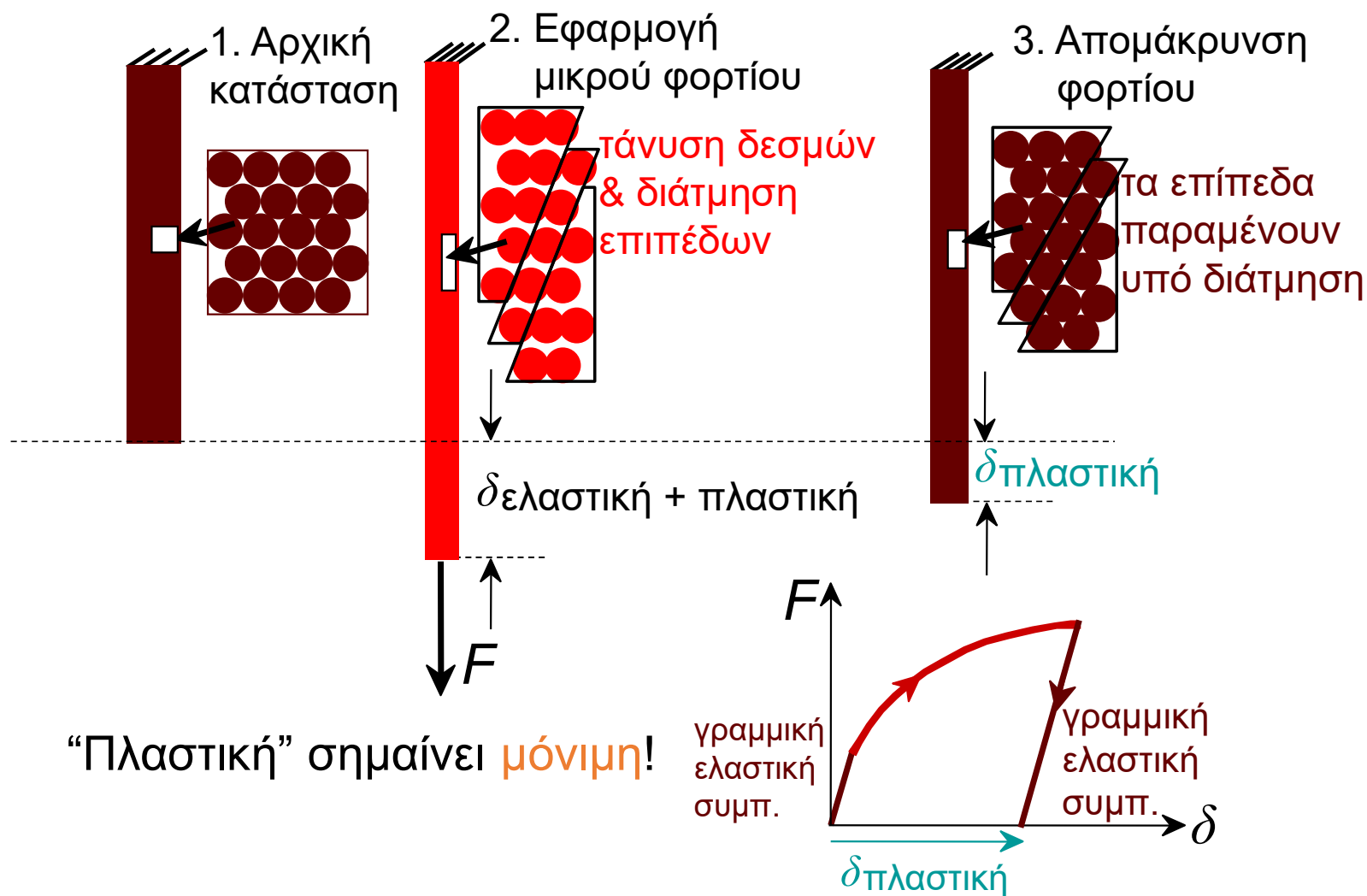


# ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

# Ελαστική παραμόρφωση

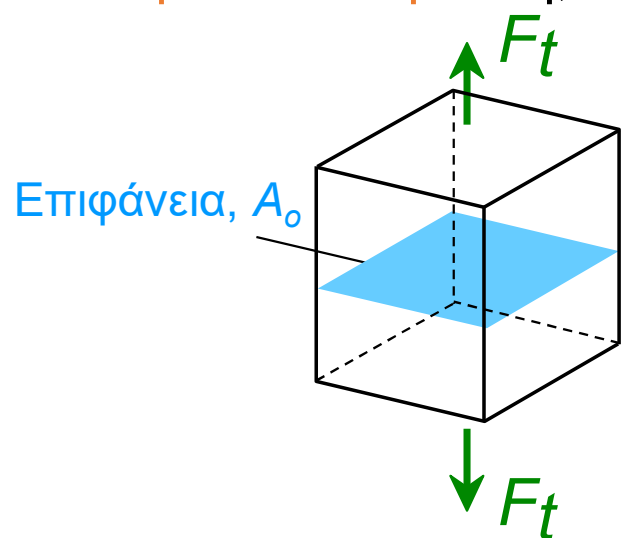


# Πλαστική παραμόρφωση (μέταλλα)



# Μηχανική ή συμβατική τάση (ή απλώς τάση)

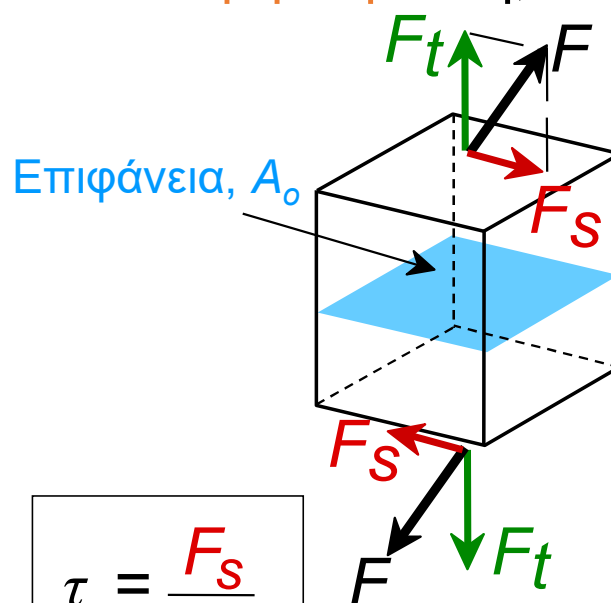
- Εφελκυστική τάση,  $\sigma$ :



$$\sigma = \frac{F_t}{A_o} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Αρχική επιφάνεια διατομής  
πριν από τη φόρτιση

- Διατμητική τάση,  $\tau$ :



$$\tau = \frac{F_s}{A_o}$$

∴ Η τάση εκφράζεται  
σε μονάδες  $\text{N/m}^2$

# ΚΟΙΝΕΣ ΕΝΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ (1)

- **Απλός** εφελκυσμός: καλώδιο



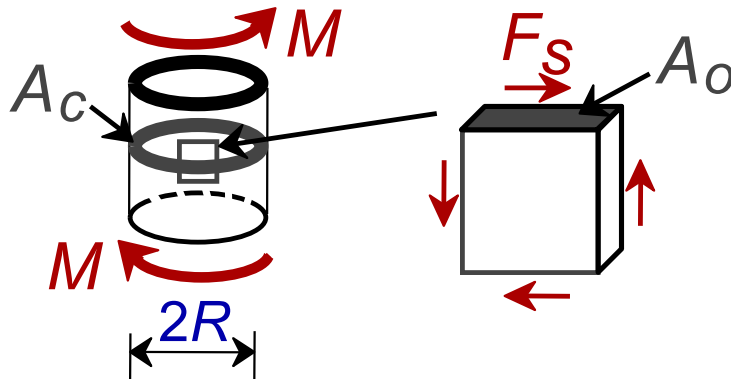
$A_0$  = επιφάνεια διατομής  
(χωρίς φορτίο)

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

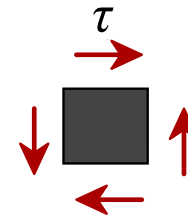


Σύστημα μεταφοράς  
σε πίστα σκι (ΦΩΤΟ:  
P.M. Anderson)

- **Στρέψη** (μορφή διάτμησης): κινητήριος άξονας



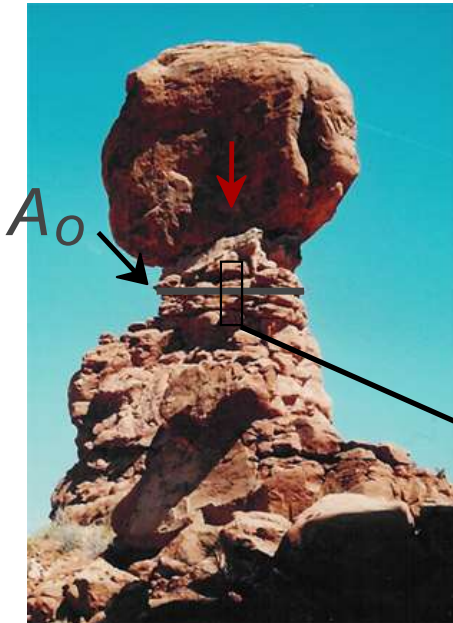
$$\tau = \frac{F_s}{A_0}$$



Σημείωση:  $\tau$  = εδώ,  $M/A_c R$

## ΚΟΙΝΕΣ ΕΝΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ (2)

- **Απλή** θλίψη:



Balanced Rock, Arches National Park  
(ΦΩΤΟ: P.M. Anderson)



Canyon Bridge, Los Alamos, NM  
(ΦΩΤΟ: P.M. Anderson)

$$\sigma = \frac{F}{A_o}$$



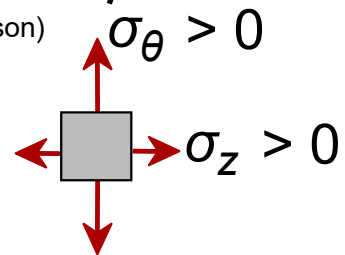
Σημείωση:  
Μέλος υπό θλίψη  
( $\sigma < 0$  εδώ).

## ΚΟΙΝΕΣ ΕΝΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ (3)

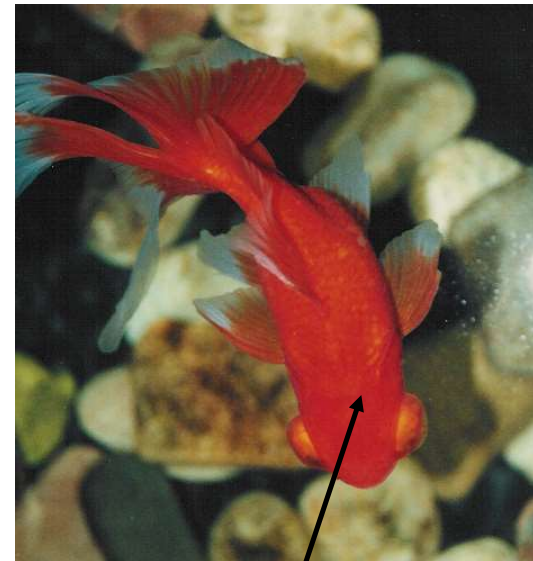
- **Δι-αξονικός** εφελκυσμός:



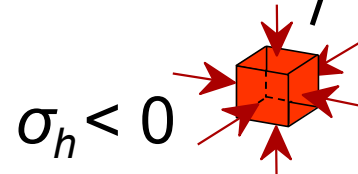
Δοχείο με περιεχόμενο  
υπό πίεση  
(ΦΩΤΟ: P.M. Anderson)



- **Υδροστατική** συμπίεση:



Ψάρι στο νερό  
(ΦΩΤΟ: P.M. Anderson)



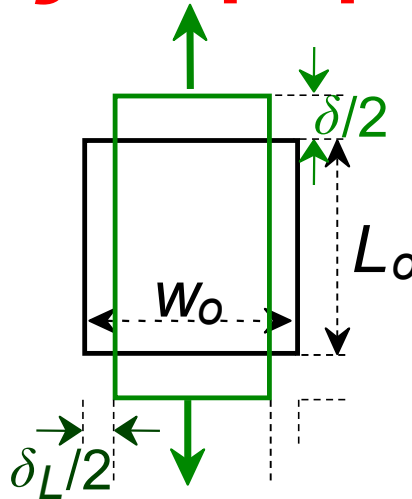
# Μηχανική ή συμβατική παραμόρφωση (ή απλώς παραμόρφωση)

- Εφελκυστική παραμόρφωση:

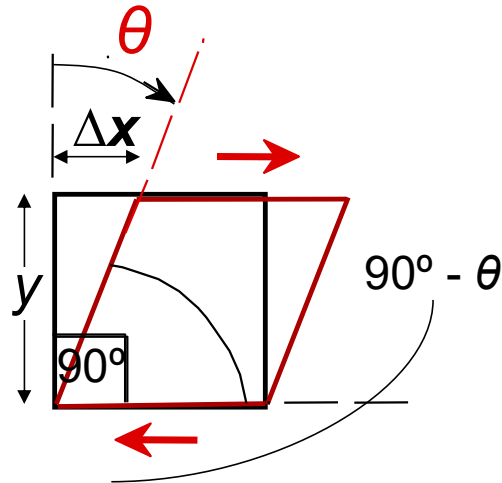
$$e = \frac{\delta}{L_o}$$

- Πλευρική παραμόρφωση:

$$e_L = -\frac{\delta_L}{W_o}$$



- Διατμητική παραμόρφωση:

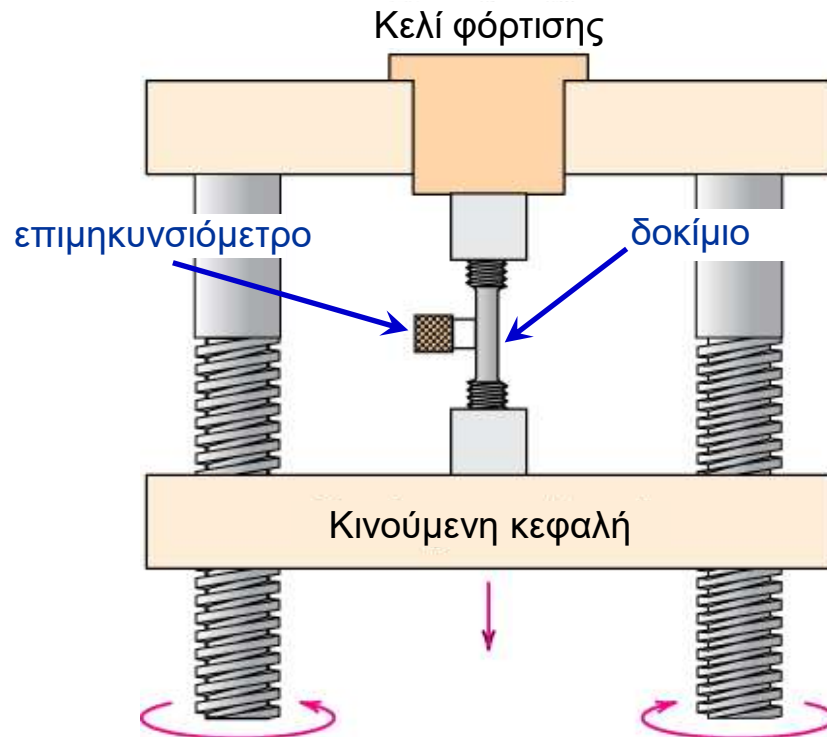


$$\gamma = \Delta x / y = \tan \theta$$

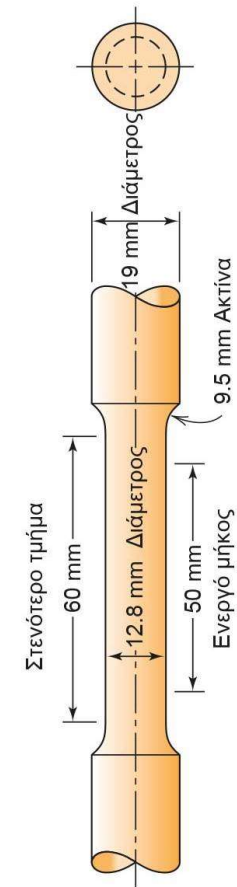
Η παραμόρφωση  
είναι πάντοτε  
αδιάστατο μέγεθος.

# Δοκιμές τάσης-παραμόρφωσης

- Τυπική διάταξη δοκιμών εφελκυσμού



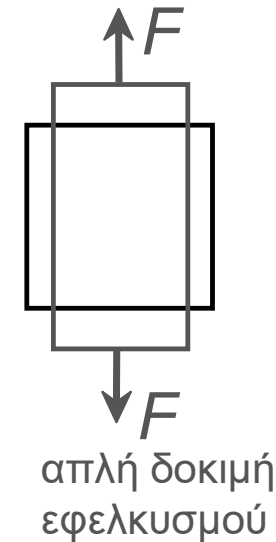
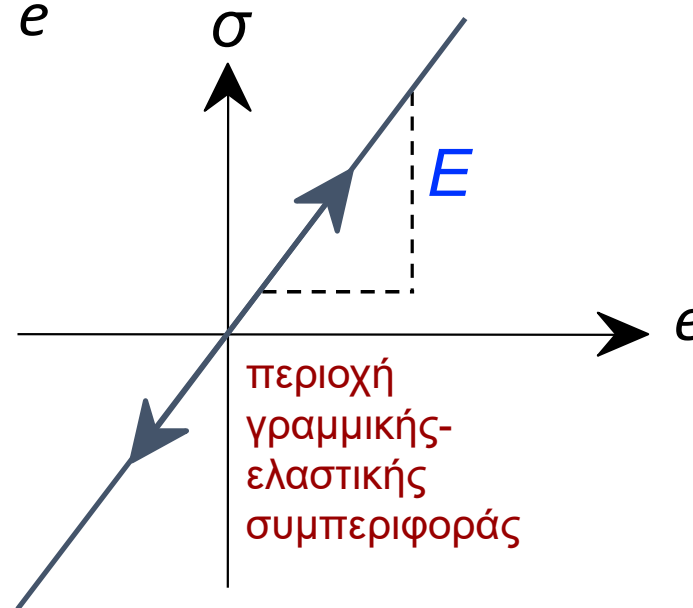
- Τυπικό δοκίμιο εφελκυσμού



# Γραμμική-ελαστική συμπεριφορά: Ιδιότητες

- **Μέτρο ελαστικότητας,  $E$ :**  
(γνωστό επίσης ως μέτρο του Young)
- **Νόμος του Hooke:**

$$\sigma = E e$$



# Λόγος Poisson, $\nu$

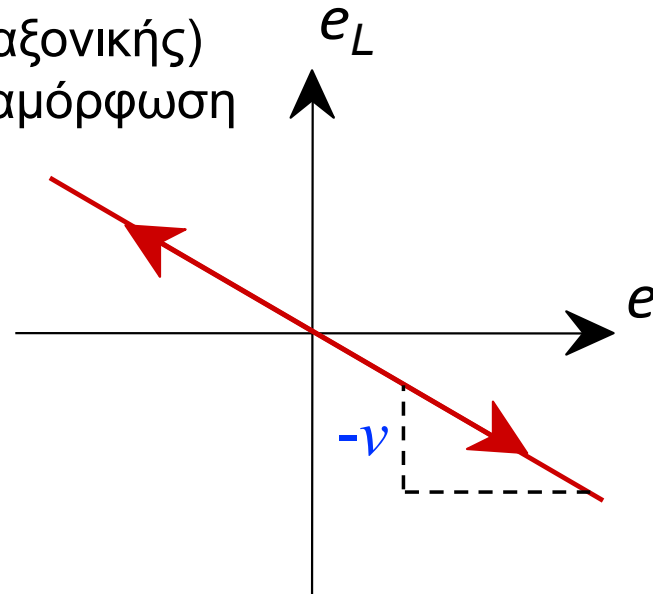
- Ο αρνητικός λόγος διαμήκους (αξονικής) προς εγκάρσια (πλευρική) παραμόρφωση

$$\nu = - \frac{e_L}{e}$$

μέταλλα:  $\nu \sim 0.33$

κεραμικά:  $\nu \sim 0.25$

πολυμερή:  $\nu \sim 0.40$



Μονάδες:

$E$ : [GPa] ή [psi]

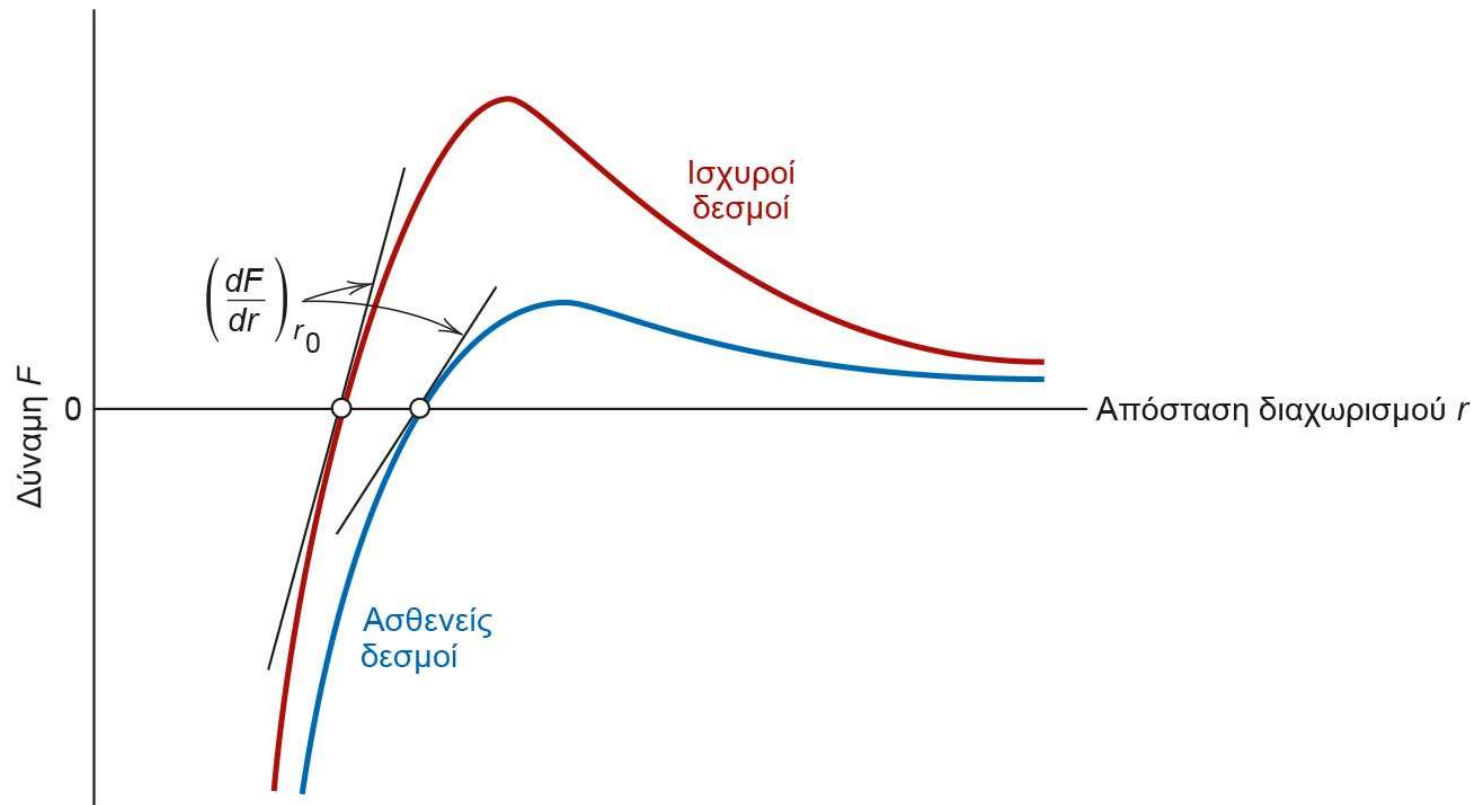
$\nu$ : αδιάστατο

$\nu > 0.50$  η πυκνότητα αυξάνεται

$\nu < 0.50$  η πυκνότητα μειώνεται  
(σχηματίζονται κενά)

# Μηχανικές ιδιότητες

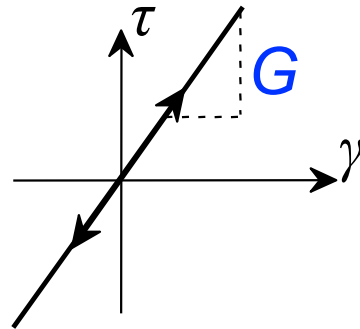
- Η κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης (η οποία είναι ανάλογη του μέτρου ελαστικότητας) εξαρτάται από την αντοχή των δεσμών του εκάστοτε μετάλλου



# Ελαστική συμπεριφορά: Άλλες ιδιότητες

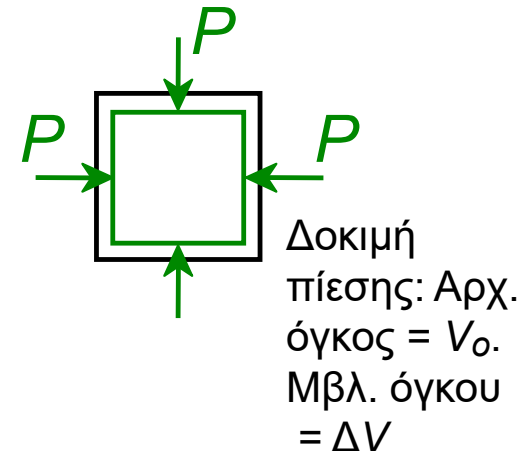
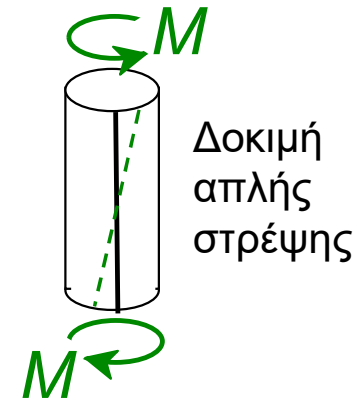
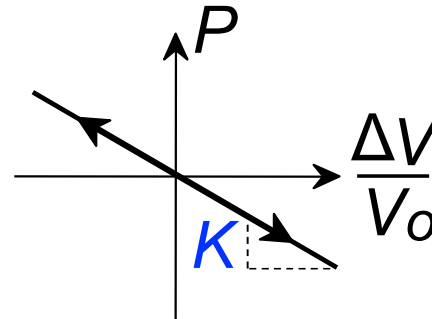
- Μέτρο **διάτμησης**,  $G$ :  
(μέτρο ελαστικότητας  
σε διάτμηση)

$$\tau = G \gamma$$



- Μέτρο **ελαστικότητας  
όγκου**,  $K$ :

$$P = -K \frac{\Delta V}{V_0}$$

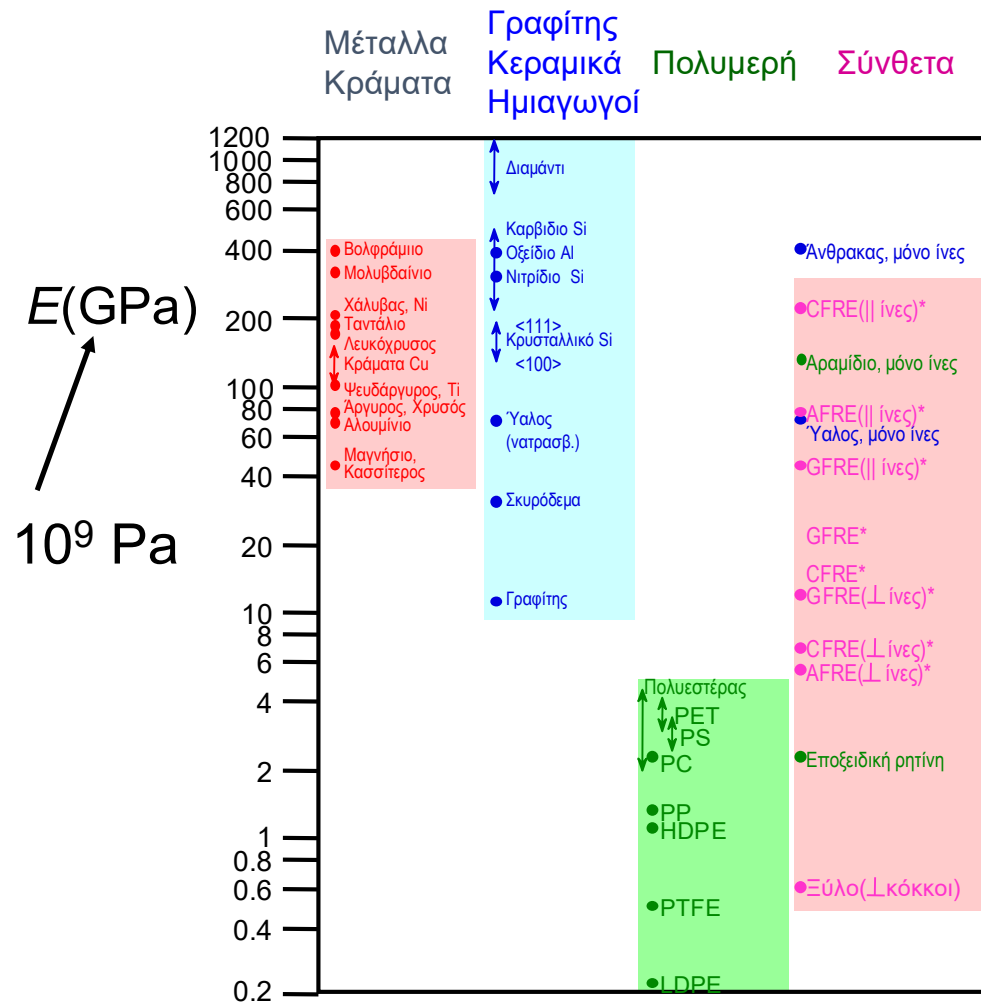


- Ειδικές σχέσεις για ισότροπα υλικά:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

# Μέτρο Young: Σύγκριση μεταξύ υλικών



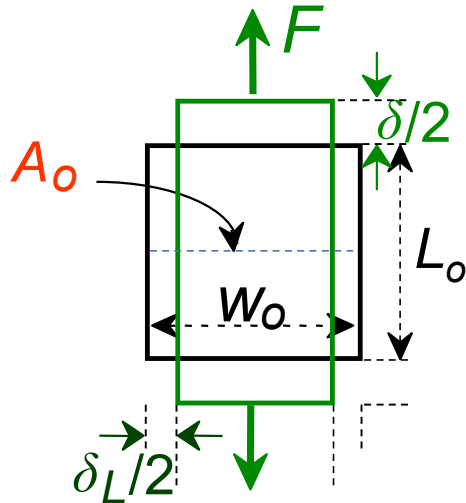
Σύνθετα υλικά: εποξειδική μήτρα ενισχυμένη με ευθυγραμμισμένες ίνες (60% κ.ό) από άνθρακα (CFRE), αραμίδιο (AFRE) & ύαλο (GFRE).

## Ελαστική απόκλιση (μετατόπιση)

- Απλός εφελκυσμός:

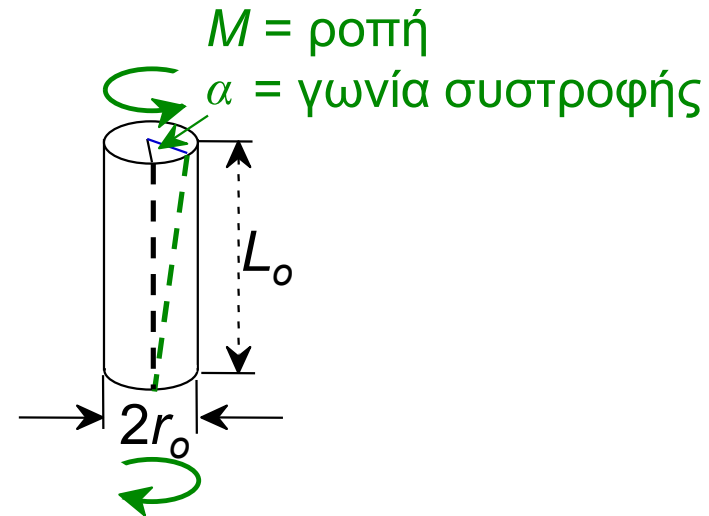
$$\delta = \frac{FL_o}{EA_o}$$

$$\delta_L = -\nu \frac{FW_o}{EA_o}$$



- Απλή στρέψη:

$$\alpha = \frac{2ML_o}{\pi r_o^4 G}$$



- Οι παράμετροι υλικού, γεωμετρίας και φόρτισης συνεισφέρουν στην ελαστική απόκλιση.
- Μεγαλύτερα μέτρα ελαστικότητας  $\Rightarrow$  ελαχιστοποίηση ελαστικής απόκλισης.

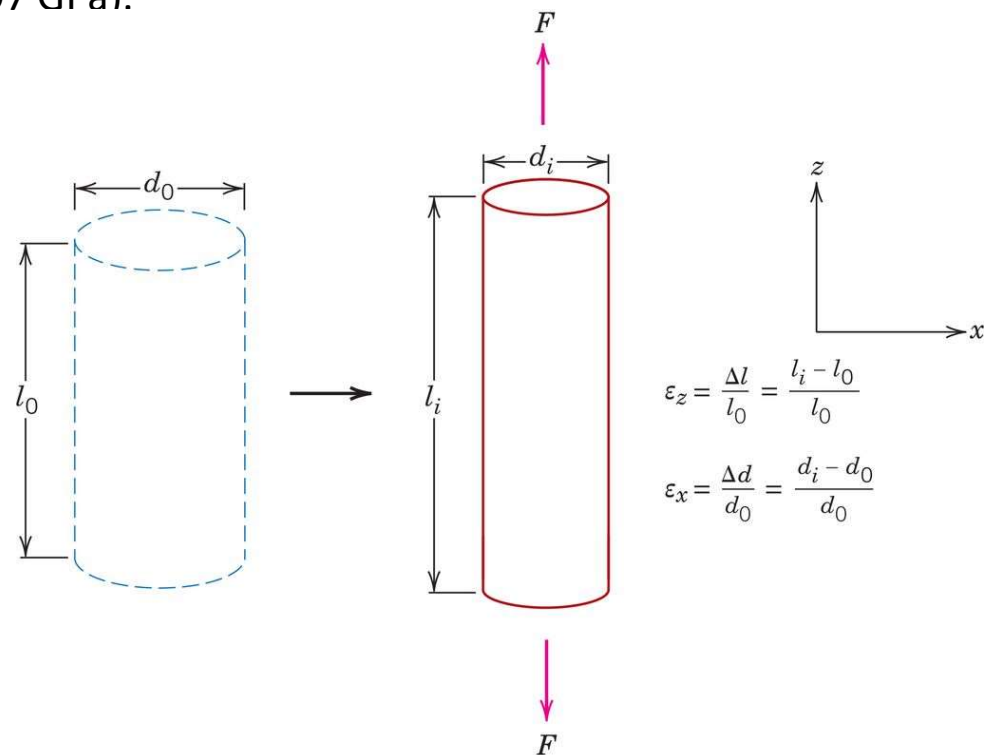


### Υπολογισμός (Ελαστικής) Επιμήκυνσης

Ένα κομμάτι χαλκού με αρχικό μήκος 305 mm υφίσταται εφελκυσμό με τάση 276 MPa. Εάν η παραμόρφωση είναι πλήρως ελαστική, να υπολογιστεί η προκύπτουσα επιμήκυνση (δίνεται  $E=110 \text{ GPa}$ ).

**EXAMPLE****Υπολογισμός του φορτίου που προκαλεί συγκεκριμένη μεταβολή διαμέτρου**

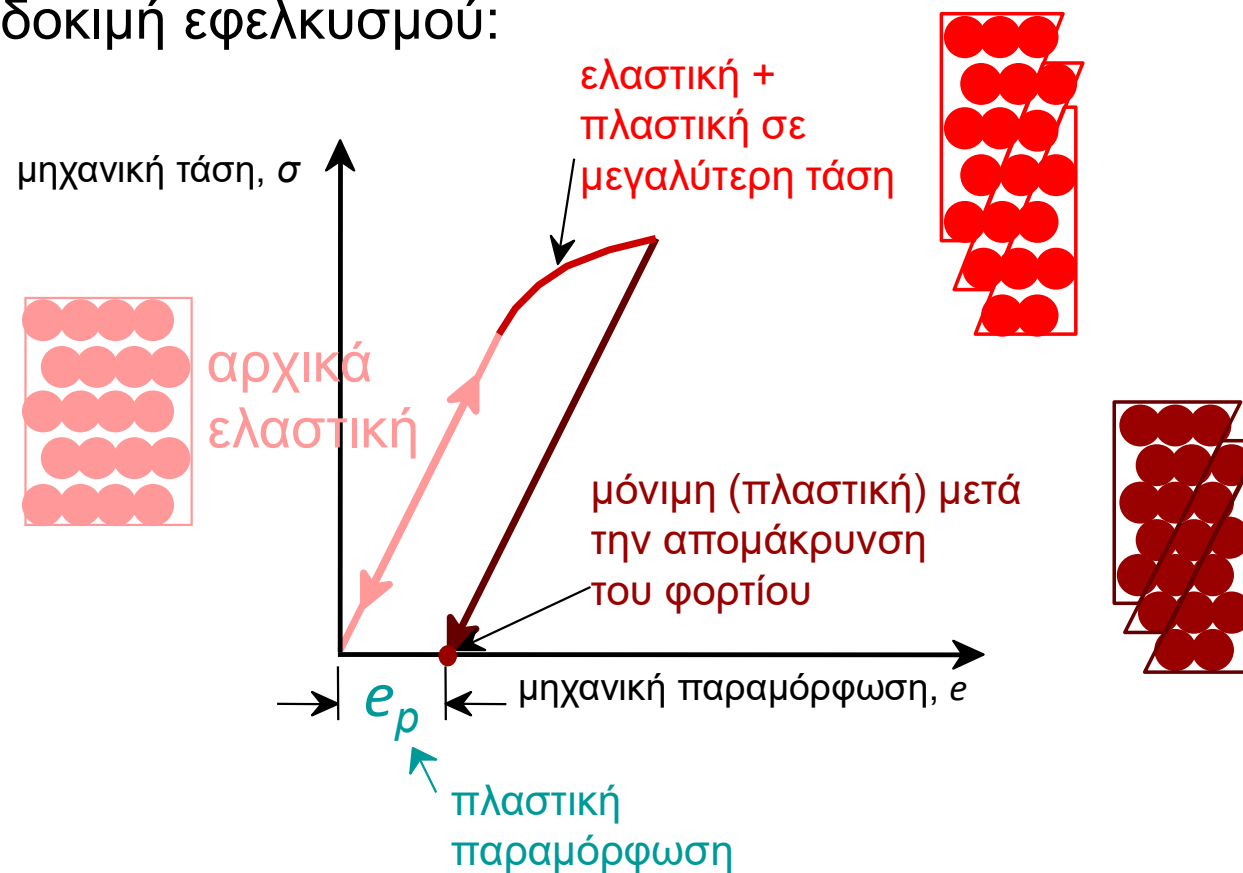
Σε κυλινδρική ράβδο από ορείχαλκο, διαμέτρου 10 mm, πρόκειται να εφαρμοστεί εφελκυστική τάση κατά μήκος του μεγάλου άξονά της. Υποθέτοντας πλήρως ελαστική παραμόρφωση, υπολογίστε το φορτίο που απαιτείται ώστε να προκύψει μεταβολή  $2.5 \times 10^{-3}$  mm στη διάμετρο της ράβδου (δίνεται ο λόγος Poisson για ορείχαλκο 0.34 και το μέτρο ελαστικότητας  $E=97$  GPa).



# Πλαστική (μόνιμη) παραμόρφωση

(σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, δηλ.  $T < T_{\tau\eta\sigma}/3$ )

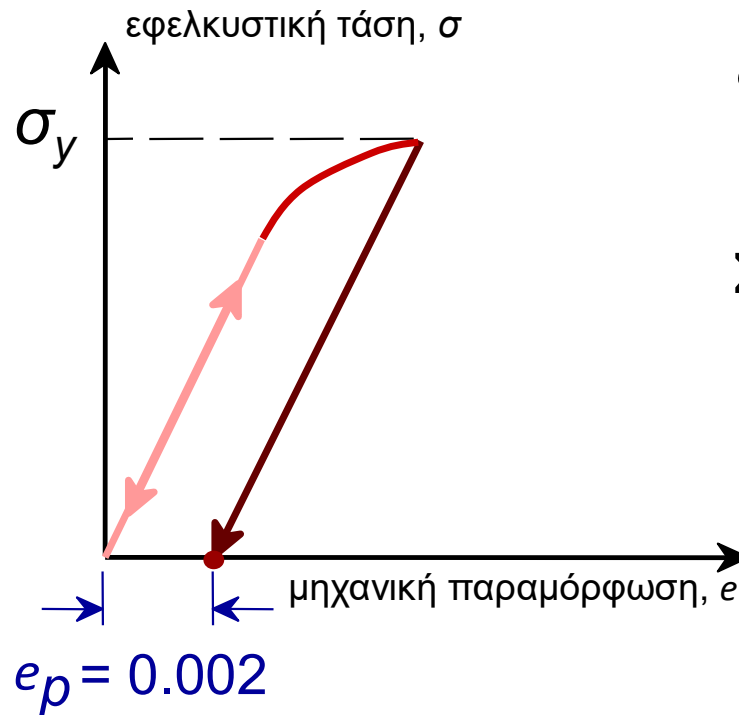
- Απλή δοκιμή εφελκυσμού:



# Αντοχή (όριο) διαρροής, $\sigma_y$

- Τάση στην οποία συμβαίνει **παρατηρήσιμη** πλαστική παραμόρφωση.

όταν  $e_p = 0.002$



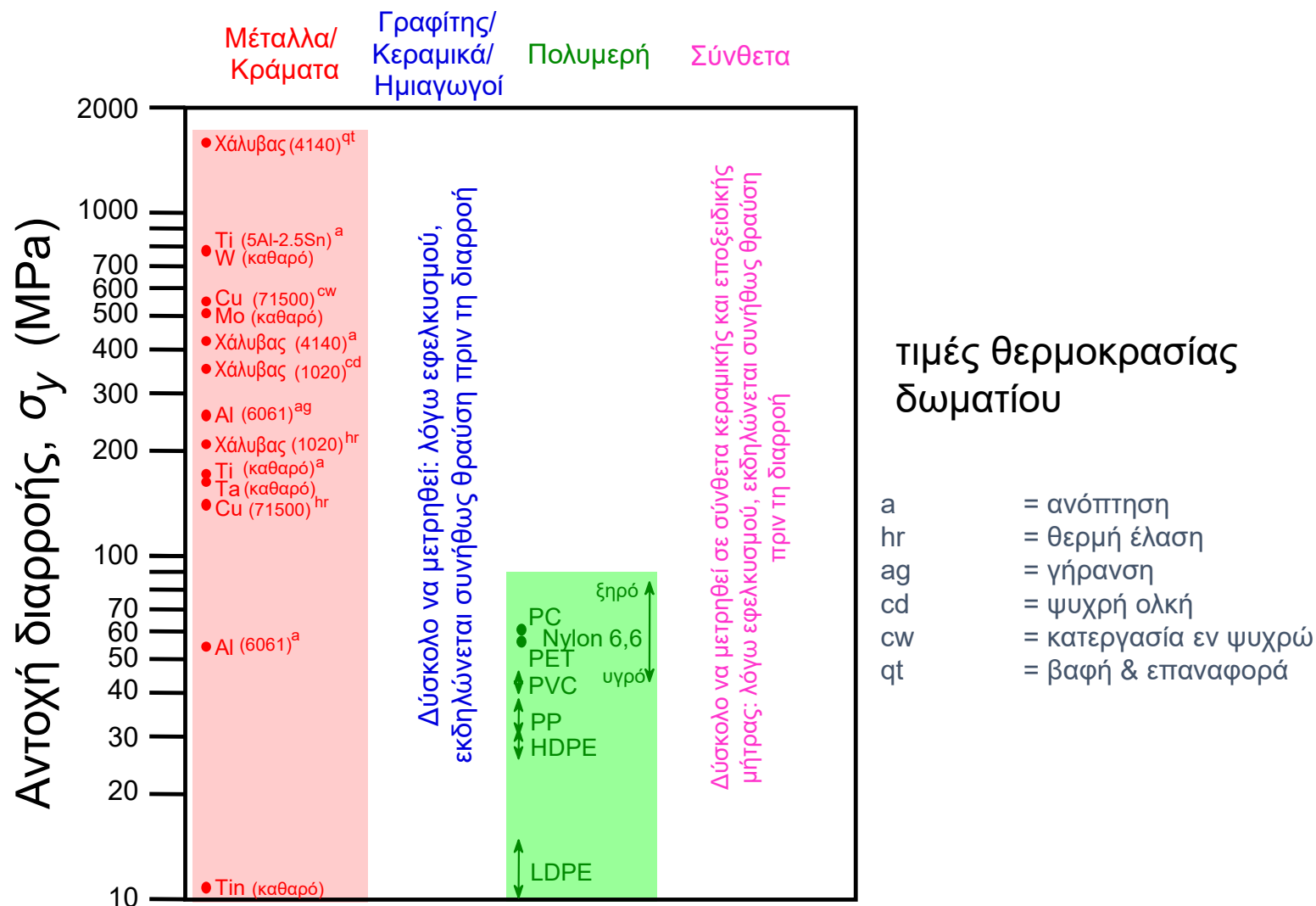
$\sigma_y$  = αντοχή διαρροής

Σημείωση: για δείγμα 2 ιντσών

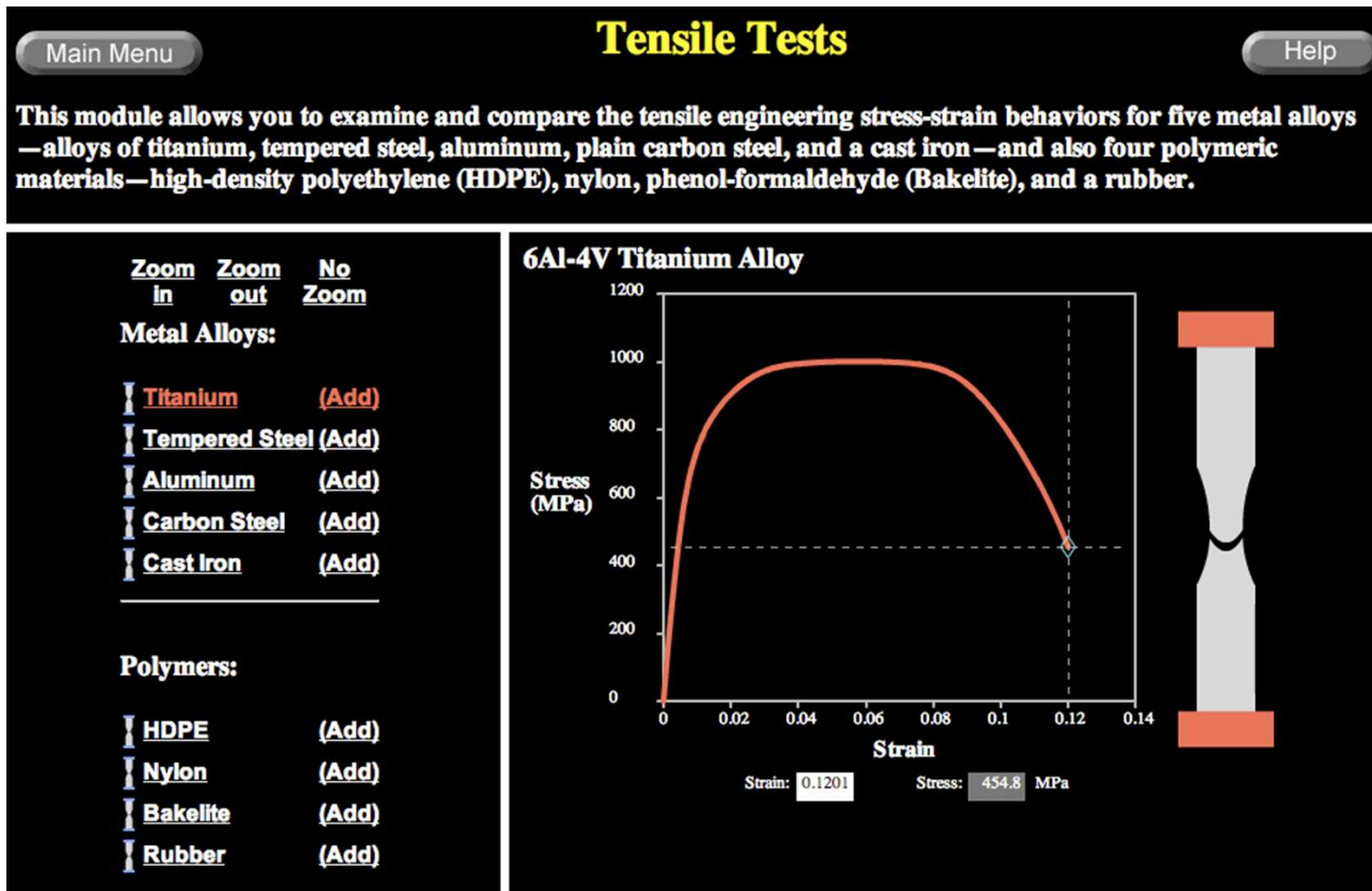
$$e = 0.002 = \Delta z / z$$

$$\therefore \Delta z = 0.004 \text{ in}$$

# Αντοχή διαρροής: Σύγκριση μεταξύ υλικών

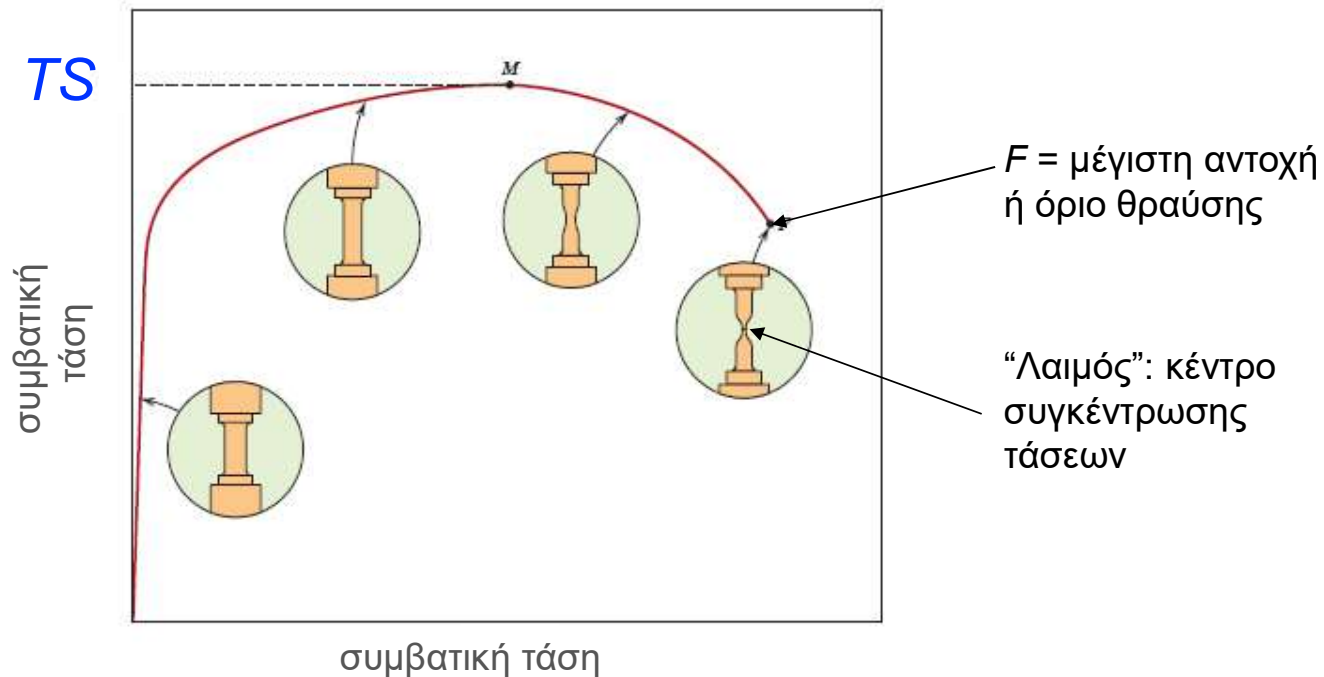


# Δοκιμή εφελκυσμού (προσομοίωση στο VMSE)



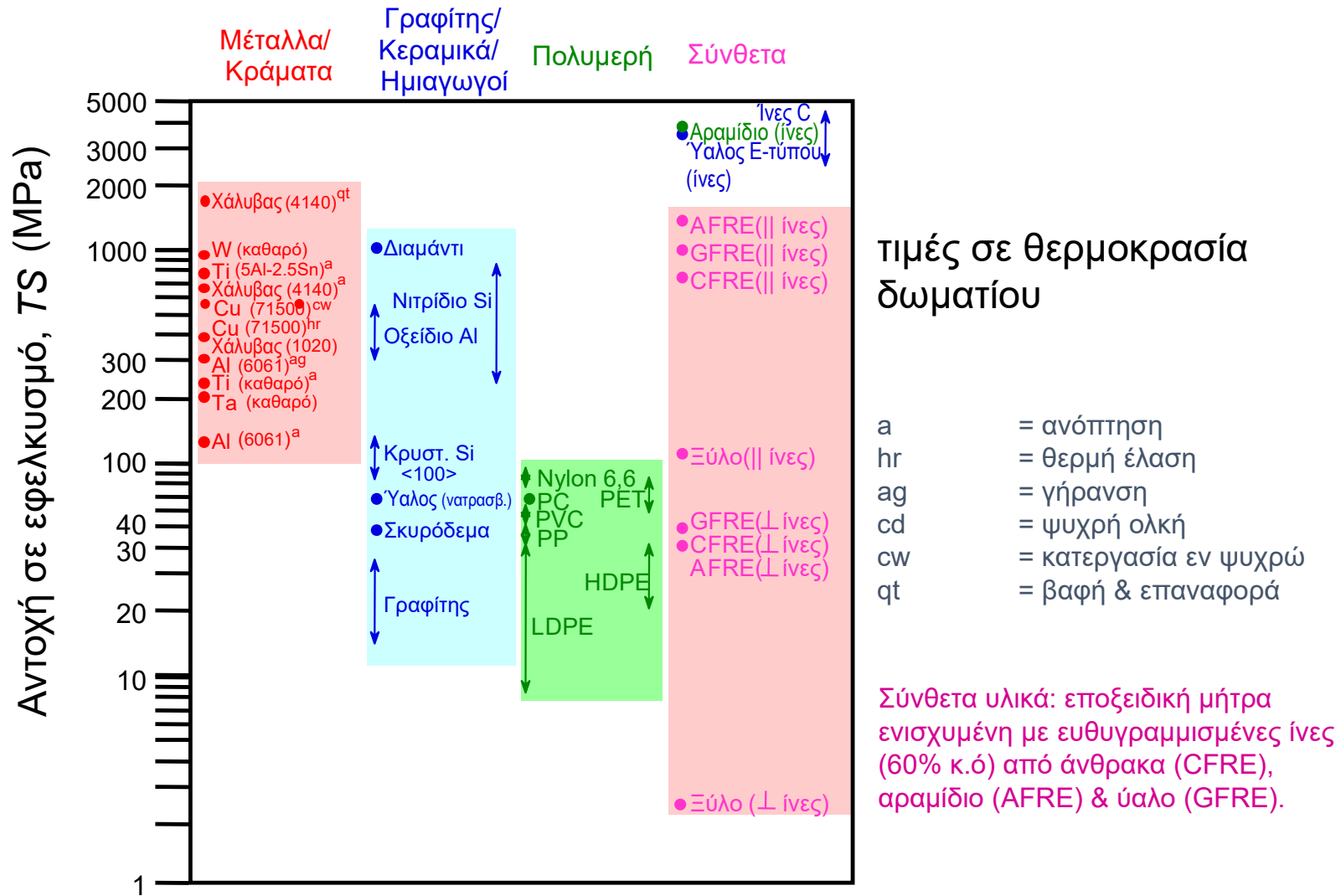
# Αντοχή σε εφελκυσμό, $TS$

- Μέγιστη τάση στην καμπύλη μηχανικής (συμβατικής) τάσης-παραμόρφωσης.



- Μέταλλα:** όταν αρχίζει να είναι ευδιάκριτος ο **σχηματισμός λαιμού**.
- Πολυμερή:** όταν οι **αλυσίδες του πολυμερικού κορμού** είναι ευθυγραμμισμένες και έτοιμες να "σπάσουν".

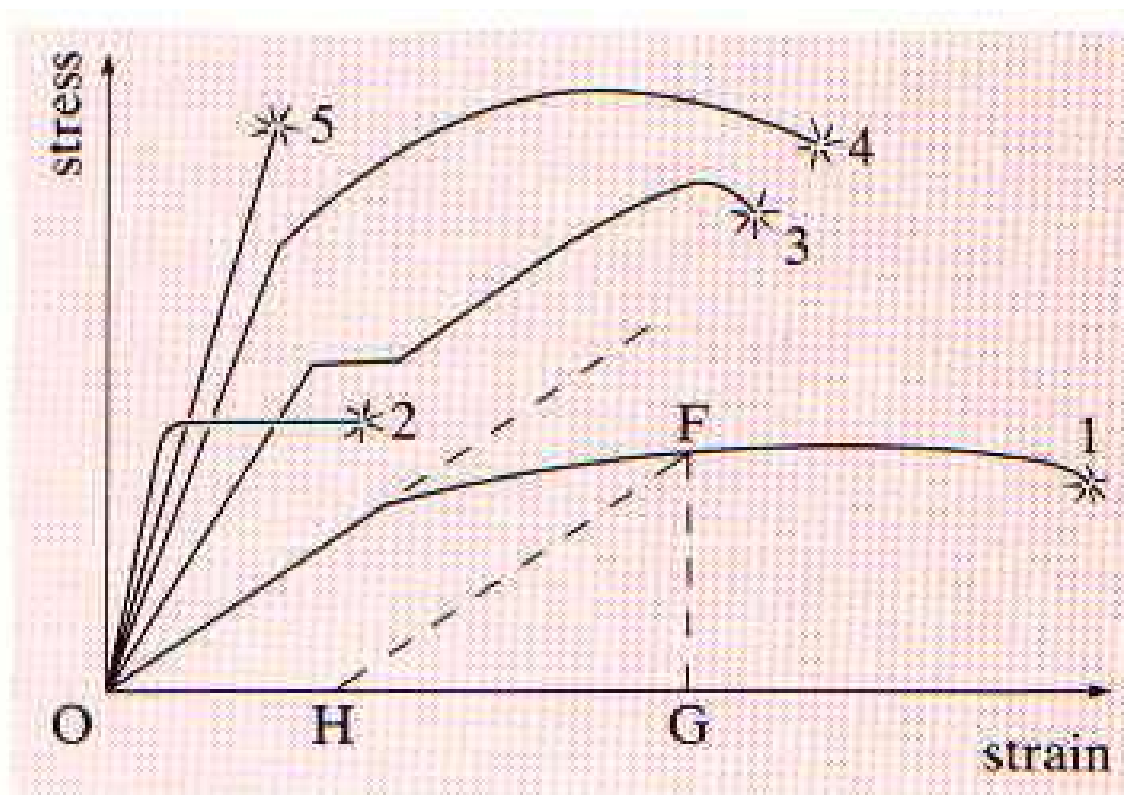
# Αντοχή σε εφελκυσμό: Σύγκριση μεταξύ υλικών





### Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης

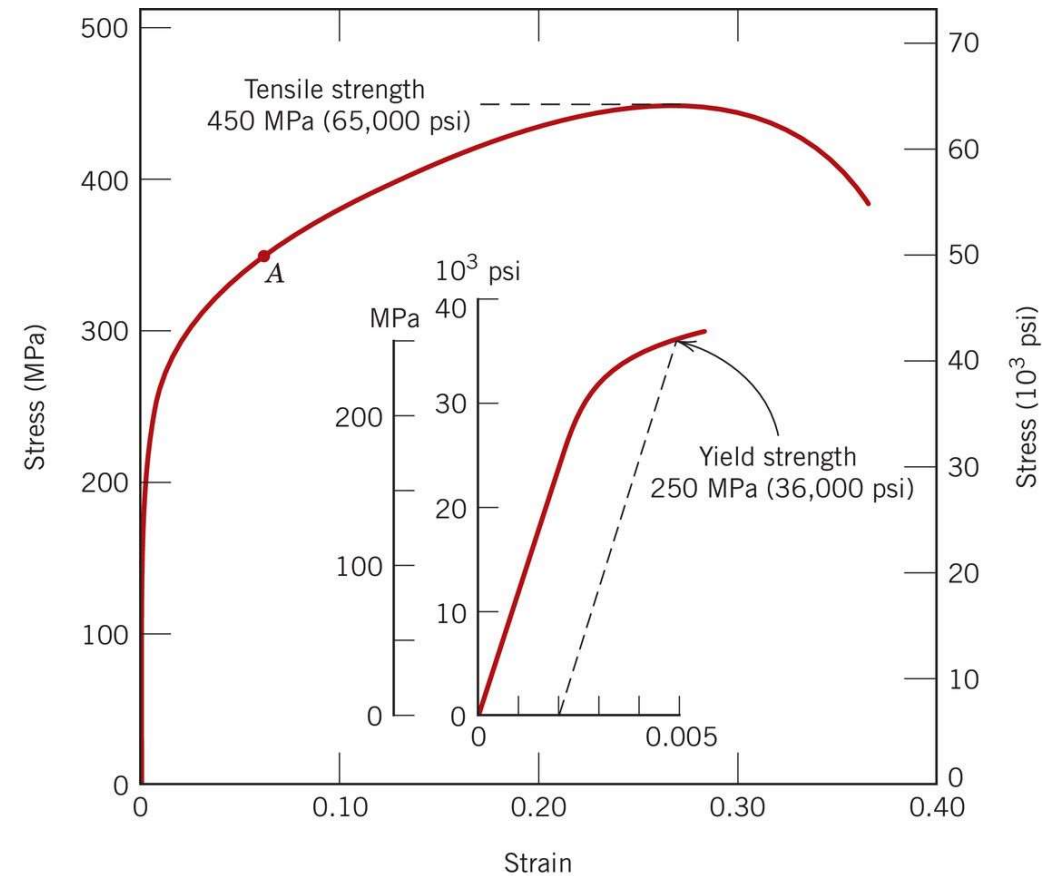
Από τα υλικά που δίνονται στο παρακάτω σχήμα τάσης-παραμόρφωσης (stress-strain), βρείτε (και εξηγήστε!) ποιο υλικό παρουσιάζει το υψηλότερο: (i) μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ), (ii) μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό, (iii) όριο διαρροής ( $\sigma_y$ ) και (iv) παραμόρφωση θραύσης ( $\epsilon_f$ ) του πολυμερούς.



# EXAMPLE

## Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης

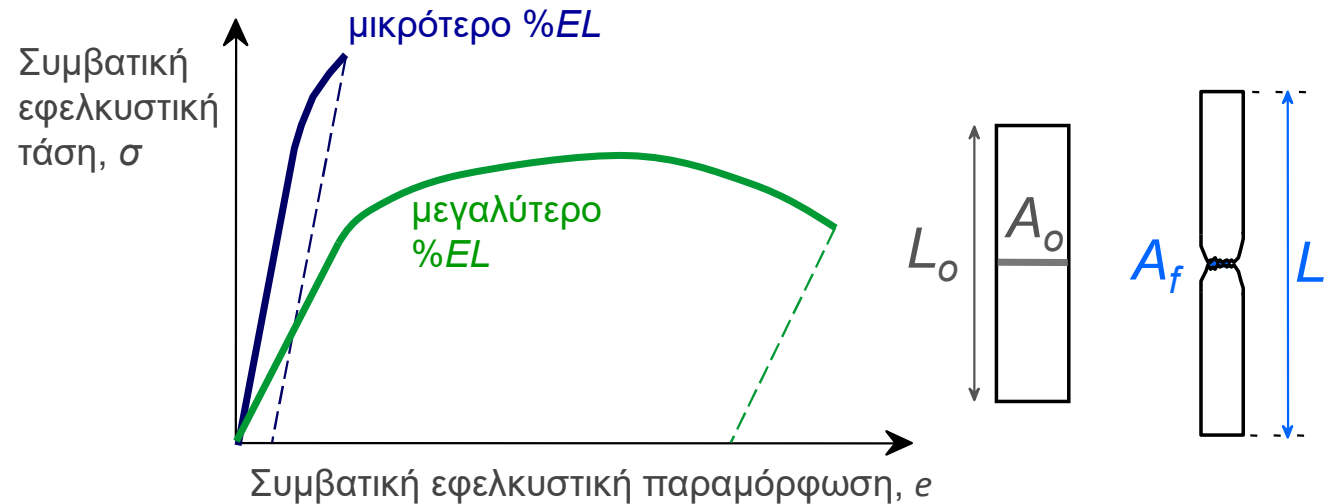
Από την συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης που φαίνεται στο Σχήμα για ένα δοκίμιο ορείχαλκου υπό εφελκυσμό με αρχικό μήκος 250 mm, προσδιορίστε: (α) μέτρο ελαστικότητας, (β) αντοχή διαρροής, υπολογισμένη στην συμβατική τιμή παραμόρφωσης 0.002, (γ) το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει το κυλινδρικό δοκίμιο, εάν η αρχική του διάμετρος είναι 12.8 mm, (δ) τη μεταβολή στο μήκος του δοκιμίου, όταν υποβάλλεται σε εφελκυστική τάση 345 MPa.



# Ολκιμότητα

- $\%EL$  (ποσοστιαία επιμήκυνση):  
Μέτρο της πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται ένα υλικό στο όριο θραύσης:

$$\%EL = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

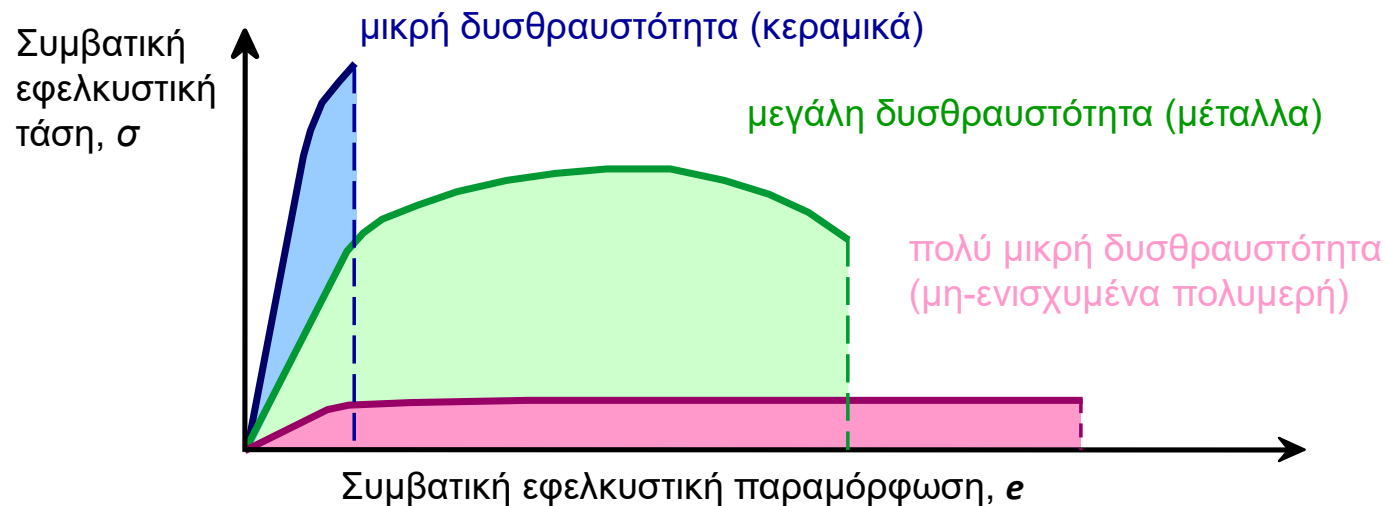


- $\%RA$  (ποσοστιαία μείωση επιφάνειας):  
Εναλλακτικό μέτρο της ολκιμότητας:

$$\%RA = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

# Δυσθραυστότητα

- Ενέργεια που απαιτείται για να οδηγηθεί σε θραύση μοναδιαίος όγκος ενός υλικού
- Προσεγγιστικά ίση με την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης.

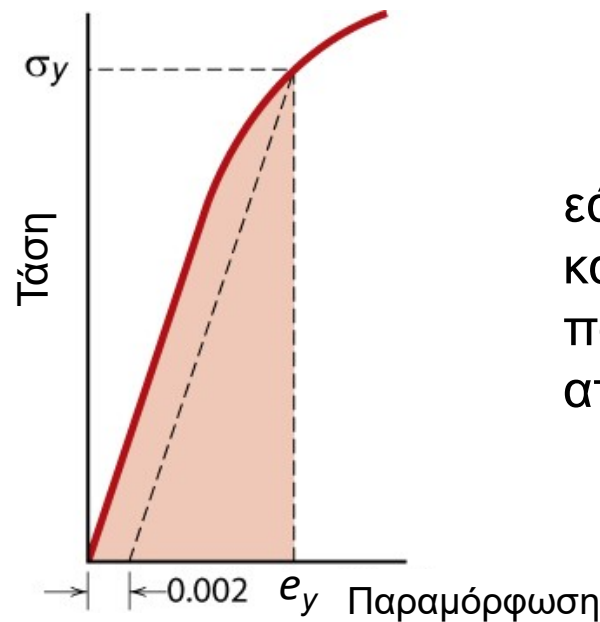


ψαθυρή θραύση: ελαστική ενέργεια

όλκιμη θραύση: ελαστική + πλαστική ενέργεια

# Επανάταξη, $U_r$

- Ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύει ενέργεια
  - βέλτιστη αποθήκευση ενέργειας στην ελαστική περιοχή

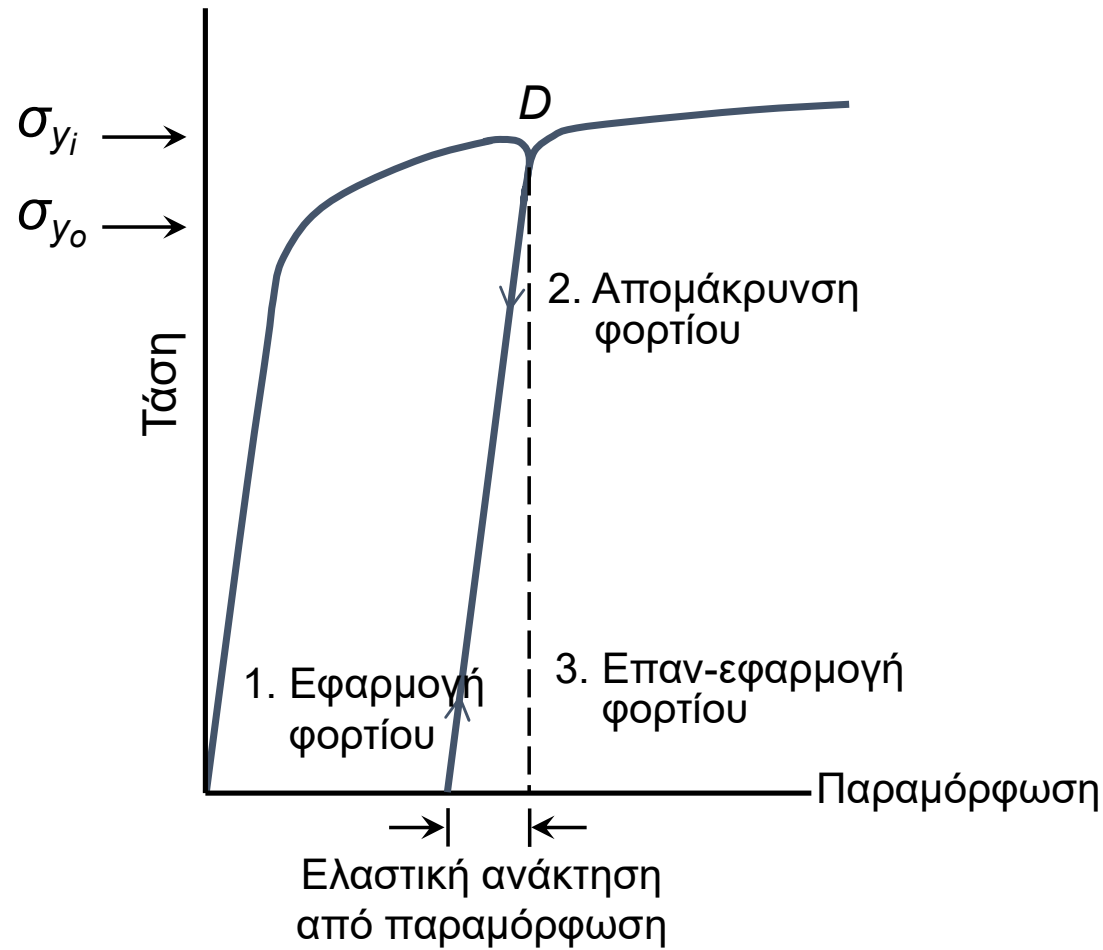


$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma \, d\epsilon$$

εάν υποθέσουμε γραμμική  
καμπύλη τάσης-  
παραμόρφωσης, η σχέση  
απλοποιείται στην

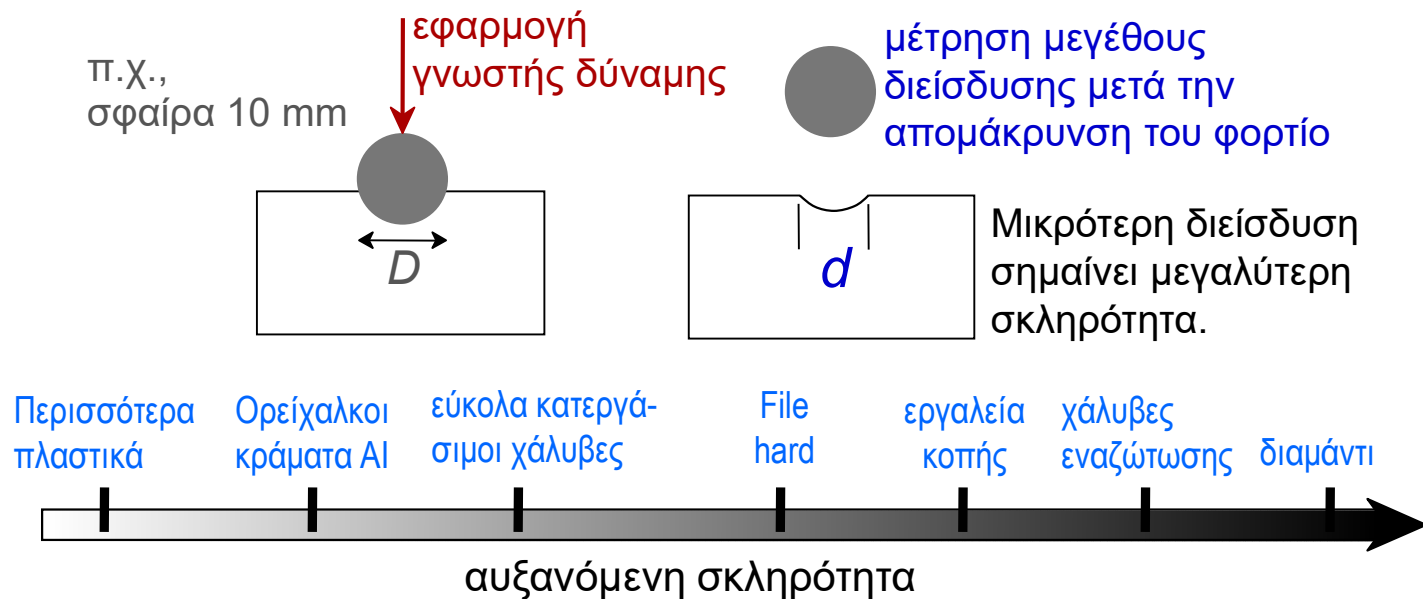
$$U_r \cong \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y$$

# Ελαστική ανάκτηση από παραμόρφωση



# Σκληρότητα

- Αντίσταση σε μόνιμη παραμόρφωση (διείσδυση) της επιφάνειας.
- Μεγάλη σκληρότητα σημαίνει:
  - αντίσταση σε πλαστική παραμόρφωση ή σχηματισμός ρωγμών in θλίψη.
  - καλύτερες ιδιότητες ως προς τη φθορά.



# Μέτρηση σκληρότητας

- Δοκιμή Rockwell

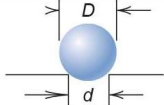
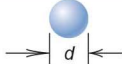
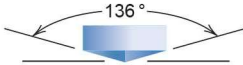
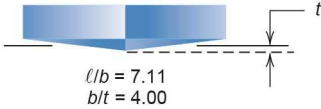
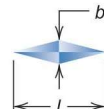
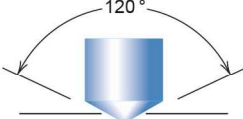
- Δεν προκαλεί εκτεταμένη καταστροφή του δείγματος
- Κάθε κλίμακα φτάνει έως το 130, αλλά είναι χρήσιμη μόνο στο εύρος τιμών 20-100.
- Μικρότερο φορτίο 10 kg
- Μεγαλύτερο φορτίο 60 (α), 100 (β) & 150 (γ) kg
  - Α = διαμάντι, Β = χαλύβδ. σφαίρα 1/16 in., Γ = διαμάντι

- HB = Σκληρότητα Brinell

- $TS \text{ (psia)} = 500 \times HB$
- $TS \text{ (MPa)} = 3.45 \times HB$

# Μέτρηση σκληρότητας (συνέχεια)

Πίνακας 6.5

| Δοκιμή                            | Διεισδυτής                                                                       | Σχήμα αποτύπωσης                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                | Φορτίο                                                                                         | Μαθηματικοί τύποι για τον αριθμό σκληρότητας <sup>a</sup> |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                                   |                                                                                  | Πλάγια όψη                                                                                                                                                                  | Κάτοψη                                                                                                                                                                         |                                                                                                |                                                           |
| Brinell                           | Σφαίρα 10 mm από χάλυβα ή καρβίδιο βολφραμίου                                    |                                                                                           |                                                                                             | $P$                                                                                            | $HB = \frac{2P}{\pi D [D - 2 \sqrt{D^2 - d^2}]}$          |
| Vickers μικροσκληρότητα           | Διαμαντένια πυραμίδα                                                             |                                                                                           |                                                                                             | $P$                                                                                            | $HV = 1.854 P/d_1^2$                                      |
| Κnoop μικροσκληρότητα             | Διαμαντένια πυραμίδα                                                             |                                                                                           |                                                                                             | $P$                                                                                            | $HK = 14.2 P/l^2$                                         |
| Rockwell και επιφανειακή Rockwell | Διαμαντένιος κώνος: χαλύβδινες σφαίρες διαμέτρου 1.588, 3.175, 6.350 και 12.70mm | <br> | <br> | 60 kg }<br>100 kg } Rockwell<br>150 kg }<br>15 kg }<br>30 kg } Επιφανειακή Rockwell<br>45 kg } |                                                           |

# Πραγματική τάση & πραγματική παραμόρφωση

- Πραγματική τάση

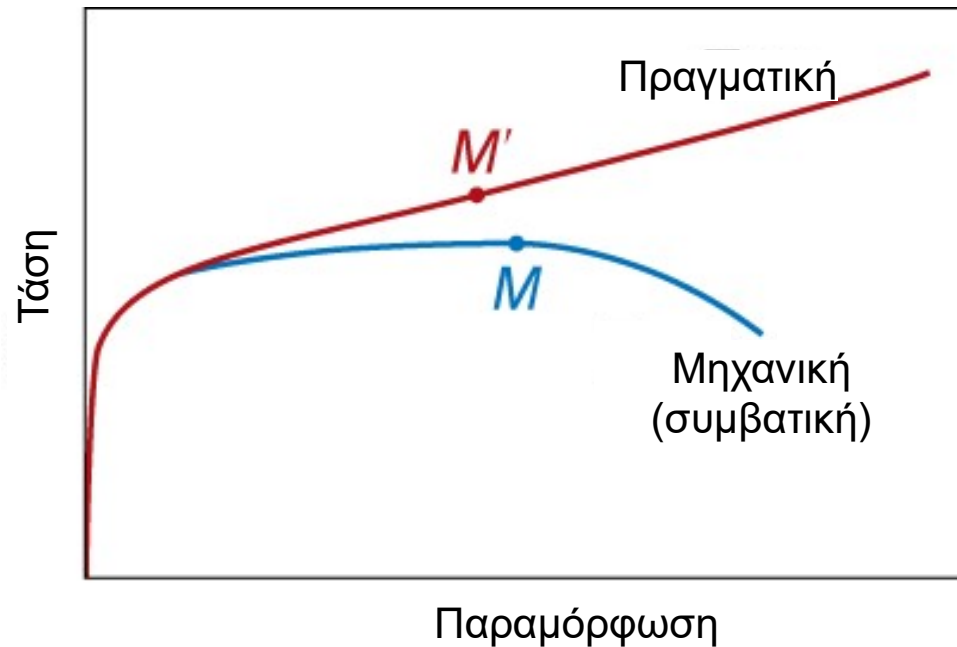
$$\sigma_T = F/A_i$$

- Πραγματική παραμόρφωση

$$\epsilon_T = \ln(\ell_i/\ell_o)$$

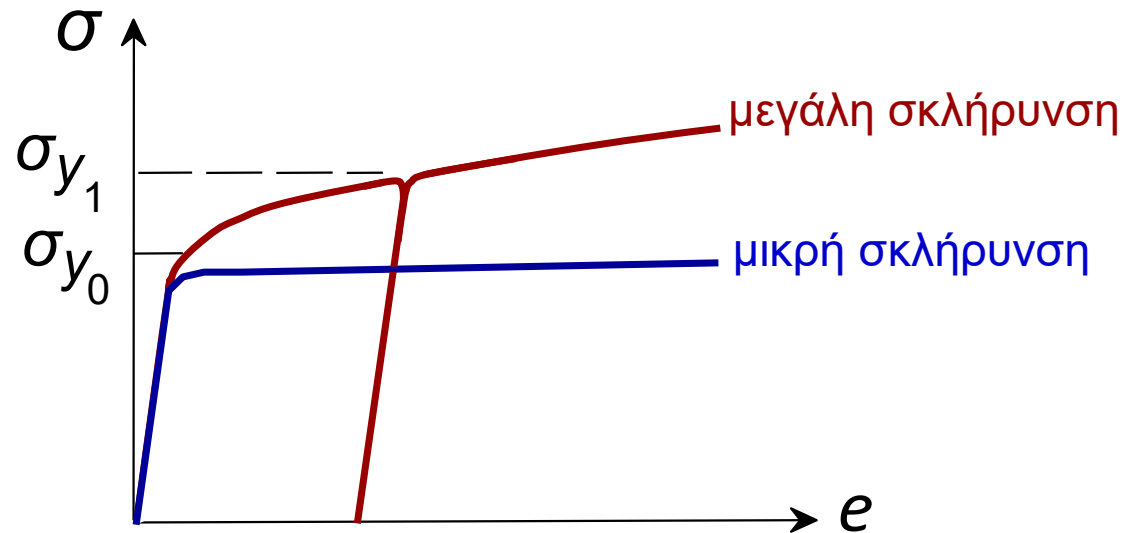
$$\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon)$$



# Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση (κράτυνση)

- Αύξηση της  $\sigma_y$  λόγω πλαστικής παραμόρφωσης.



- Προσαρμογή καμπύλης στην απόκριση τάσης-παραμόρφωσης:

$$\sigma_T = K(e_T)^n$$

εκθέτης ενδοτράχυνσης (κράτυνσης):  
 $n = 0.15$  (ορισμένοι χάλυβες)  
έως  $n = 0.5$  (ορισμένοι χαλκοί)

“πραγματική” τάση ( $F/A$ )

“πραγματική” παραμόρφωση:  $\ln(\ell/\ell_0)$

# Μεταβλητότητα των ιδιοτήτων των υλικών

- Το μέτρο ελαστικότητας είναι μία ιδιότητα των υλικών
- Οι “κρίσιμες” ιδιότητες εξαρτώνται, σε μεγάλο βαθμό, από τις ατέλειες του εκάστοτε δείγματος υλικού.
- Πιθανή μεγάλη μεταβλητότητα από δείγμα σε δείγμα.
- Συνυπολογίζεται μέσω στατιστικών μεγεθών

- Μέση τιμή

$$\bar{X} = \frac{\sum_{n=1}^n X_n}{n}$$

- Τυπική απόκλιση

$$S = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}}$$

όπου  $n$  το πλήθος των σημείων δεδομένων

# Σχεδιασμός και παράγοντες ασφαλείας

- Αβεβαιότητες στη φάση του σχεδιασμού, ανάγκη προστασίας έναντι αναπάντεχης αστοχίας.
- Παράγοντας ασφαλείας,  $N$

$$\sigma_{\text{λειτουργίας}} = \frac{\sigma_y}{N}$$

συνήθως μεταξύ 1.2 και 4

- Παράδειγμα: Να υπολογιστεί η απαιτούμενη διάμετρος για τη ράβδο από ανθρακοχάλυβα 1045, ώστε να αποκλειστεί πιθανή διαρροή, χρησιμοποιώντας παράγοντα ασφαλείας 5.

$$\sigma_{\text{λειτουργίας}} = \frac{\sigma_y}{N}$$

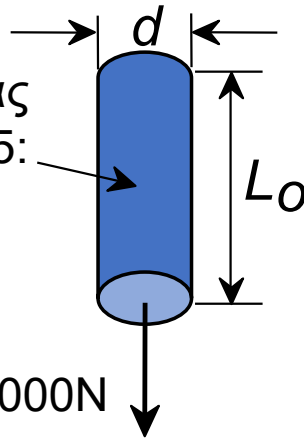
$\sigma_{\text{λειτουργίας}} = \frac{220,000\text{N}}{\pi(d^2/4)}$

$N = 5$

ανθρακοχάλυβας 1045:  
 $\sigma_y = 310 \text{ MPa}$   
 $TS = 565 \text{ MPa}$

$d = 0.067 \text{ m} = 6.7 \text{ cm}$

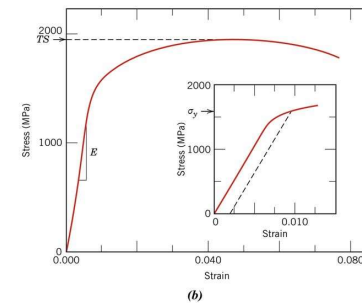
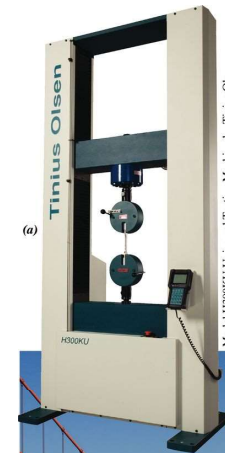
$F = 220,000\text{N}$





# ΣΥΝΟΨΗ

- **Τάση** και **παραμόρφωση**: Ανεξάρτητα από το μέγεθος μέτρα του φορτίου (καταπόνηση) και της απόκλισης (μετατόπισης), αντίστοιχα.
- **Ελαστική** συμπεριφορά: Αντιστρεπτή συμπεριφορά, συνήθως εκφράζεται με γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης. Για ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης, θα πρέπει να επιλέγεται υλικό με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας ( $E$  ή  $G$ ).
- **Πλαστική** συμπεριφορά: Μόνιμη παραμόρφωση, εμφανίζεται όταν η εφελκυστική (ή θλιπτική) μονοαξονική τάση φτάνει στο όριο  $\sigma_y$ .
- **Δυσθραυστότητα**: Η ενέργεια που απαιτείται για θραύση μοναδιαίου όγκου ενός υλικού.
- **Ολκιμότητα**: Βαθμός πλαστικής παραμόρφωσης ενός υλικού στο όριο θραύσης.



(c)

© Mr. Focus/Stockphoto

