



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

# Υλικά Ι

## Ενότητα 6: Μηχανικές ιδιότητες

Δημήτρης Παπάζογλου  
Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

# Άδειες Χρήσης

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

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



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

# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# ΥΛΙΚΑ Ι

## ΠΑΡΟΝ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

# 6

## Μηχανικές ιδιότητες

# Μηχανικές Ιδιότητες

Τάση-παραμόρφωση

Ελαστική συμπεριφορά

Πλαστική συμπεριφορά

Αντοχή και ολκιμότητα

Σκληρότητα

# Μηχανική αντοχή

Αντοχή σε κάμψη



Αντοχή σε εφελκυσμό



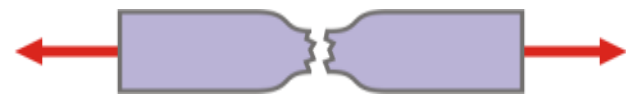
Αντοχή σε συμπίεση



Αντοχή σε διάτμηση

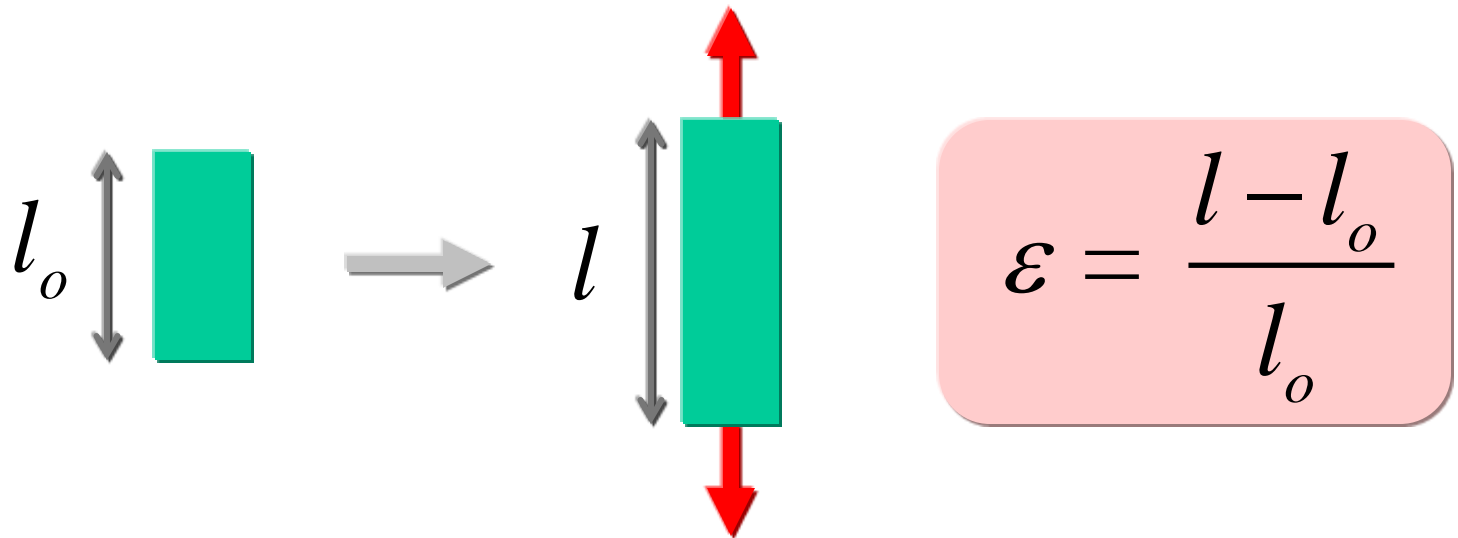


Αντοχή σε θραύση



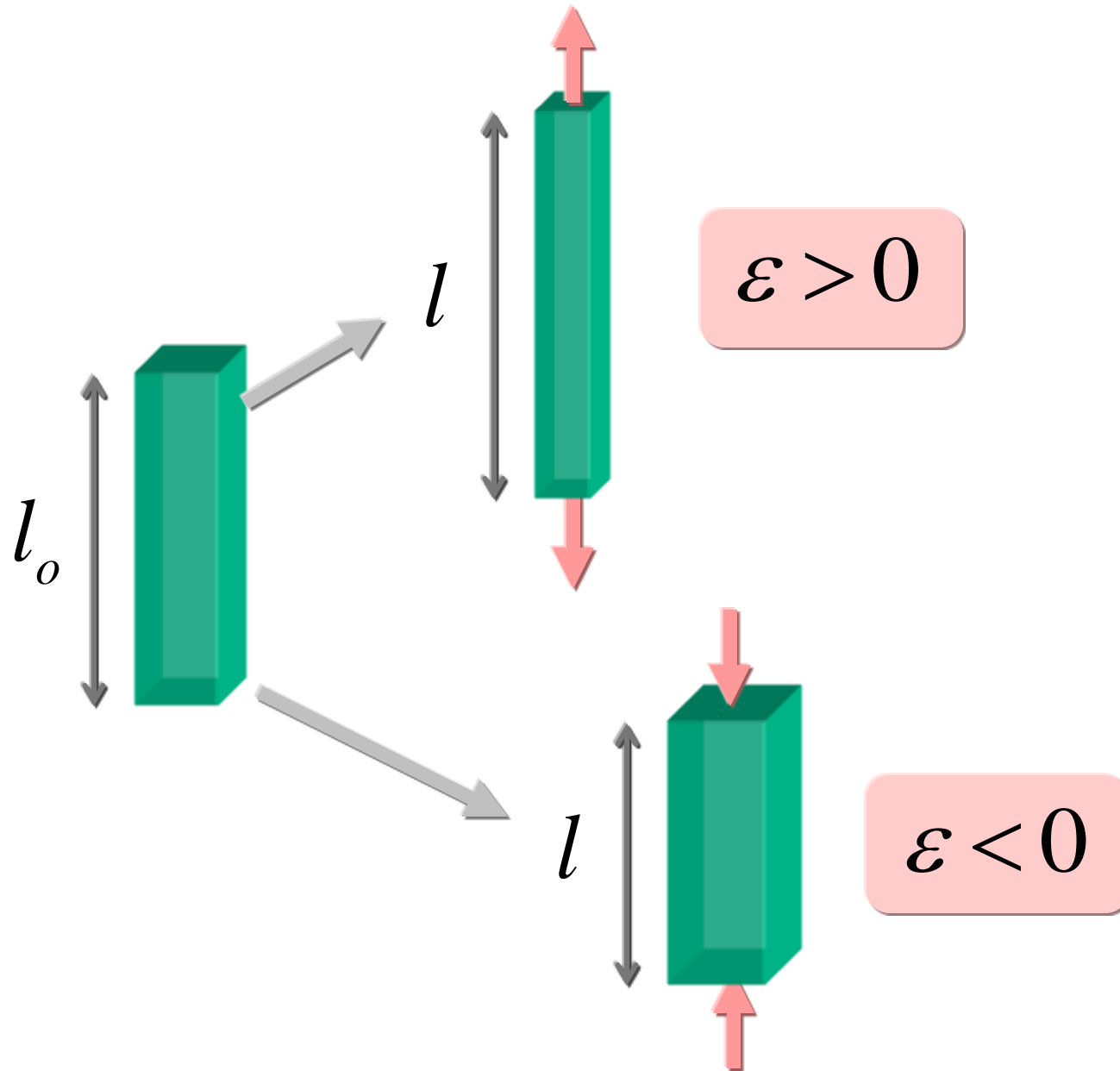
# Παραμόρφωση

Ως παραμόρφωση (deformation) ονομάζουμε την επιμήκυνση ανά μονάδα μήκους



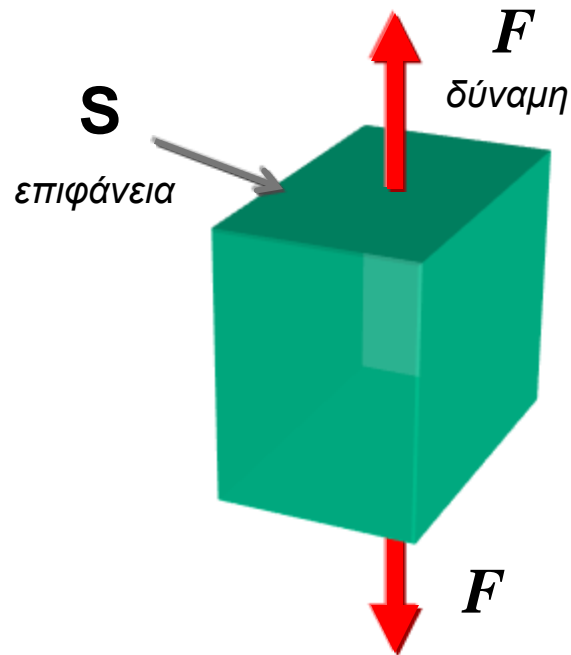
Η παραμόρφωση  $\varepsilon$  είναι αδιάστατο μέγεθος





# Τάση

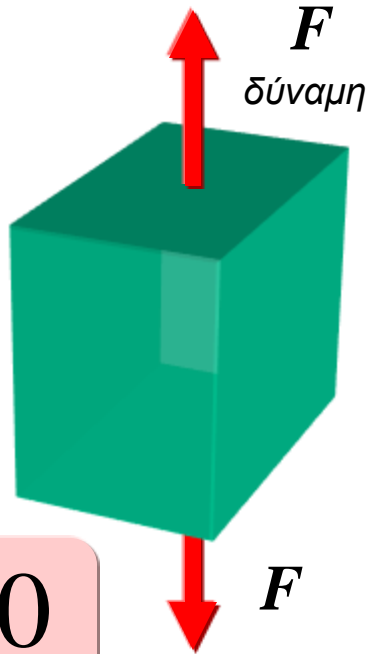
Ως τάση (stress) ονομάζουμε την δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας



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

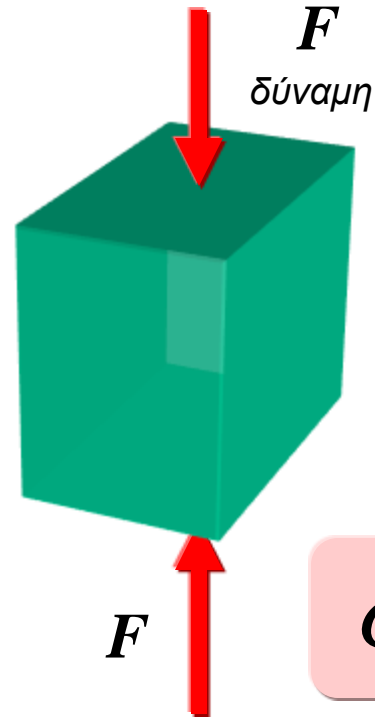
Η τάση  $\sigma$  μετριέται σε Newton/m<sup>2</sup> (= 1 Pa)

Εφελκυσμός



$$\sigma > 0$$

Θλίψη



$$\sigma < 0$$

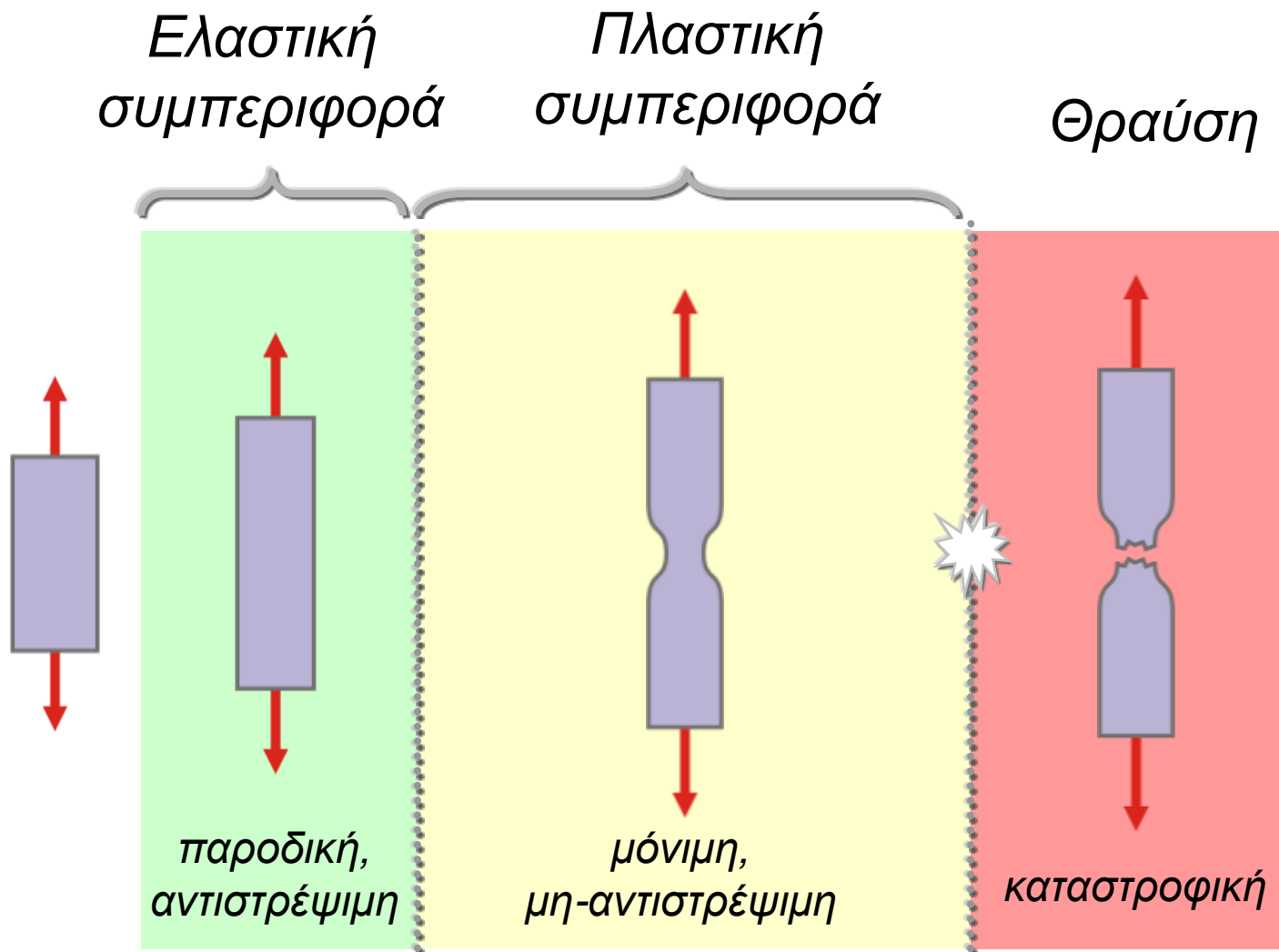
Η τάση  $\sigma$  μετριέται συνήθως σε MPa

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$145 \text{ psi} = 1 \text{ MPa}$$

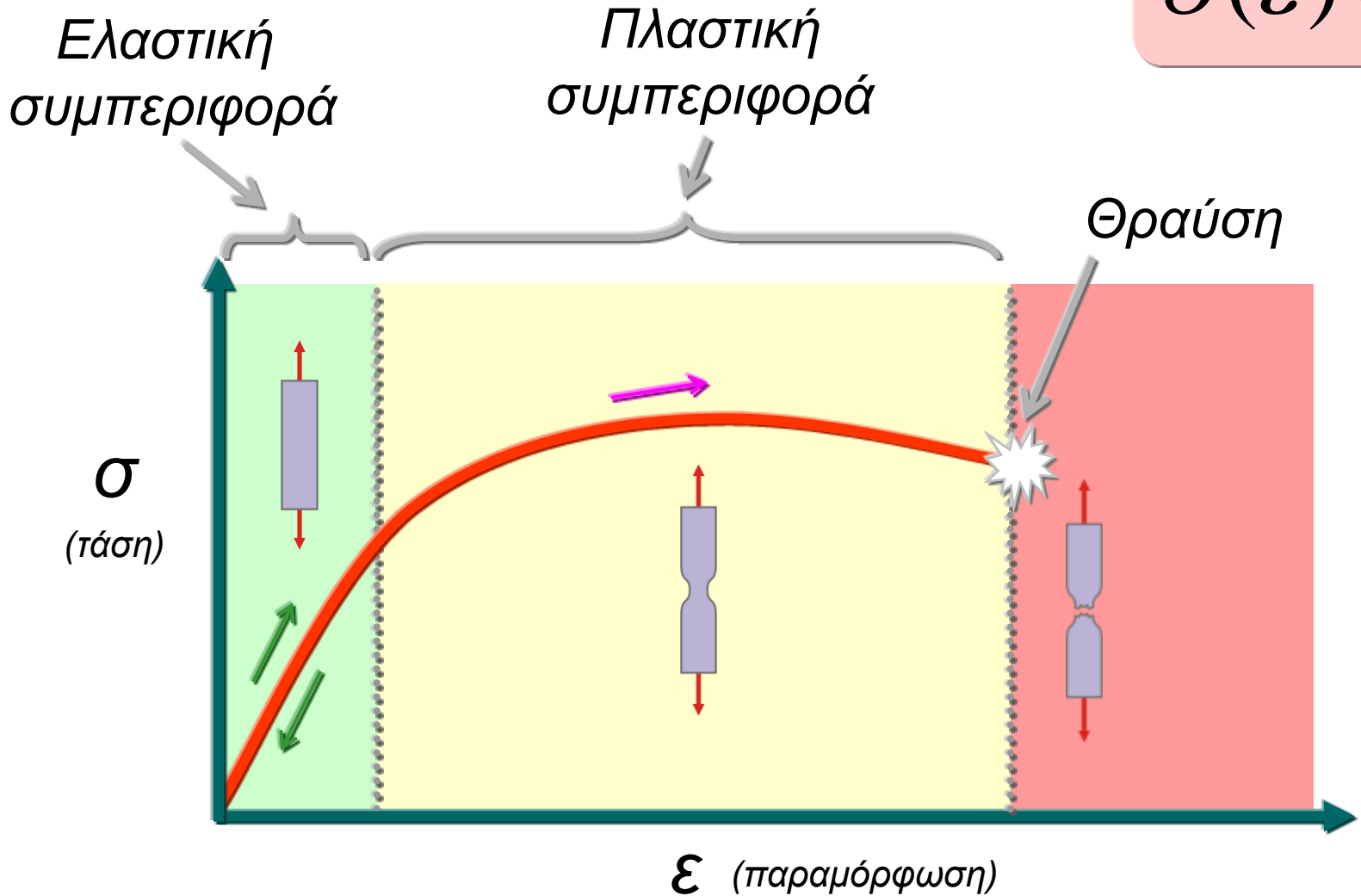
# Πως παραμορφώνεται ένα υλικό υπό συνεχώς αυξανόμενη εφελκυστική τάση;

Μηχανικές Ιδιότητες



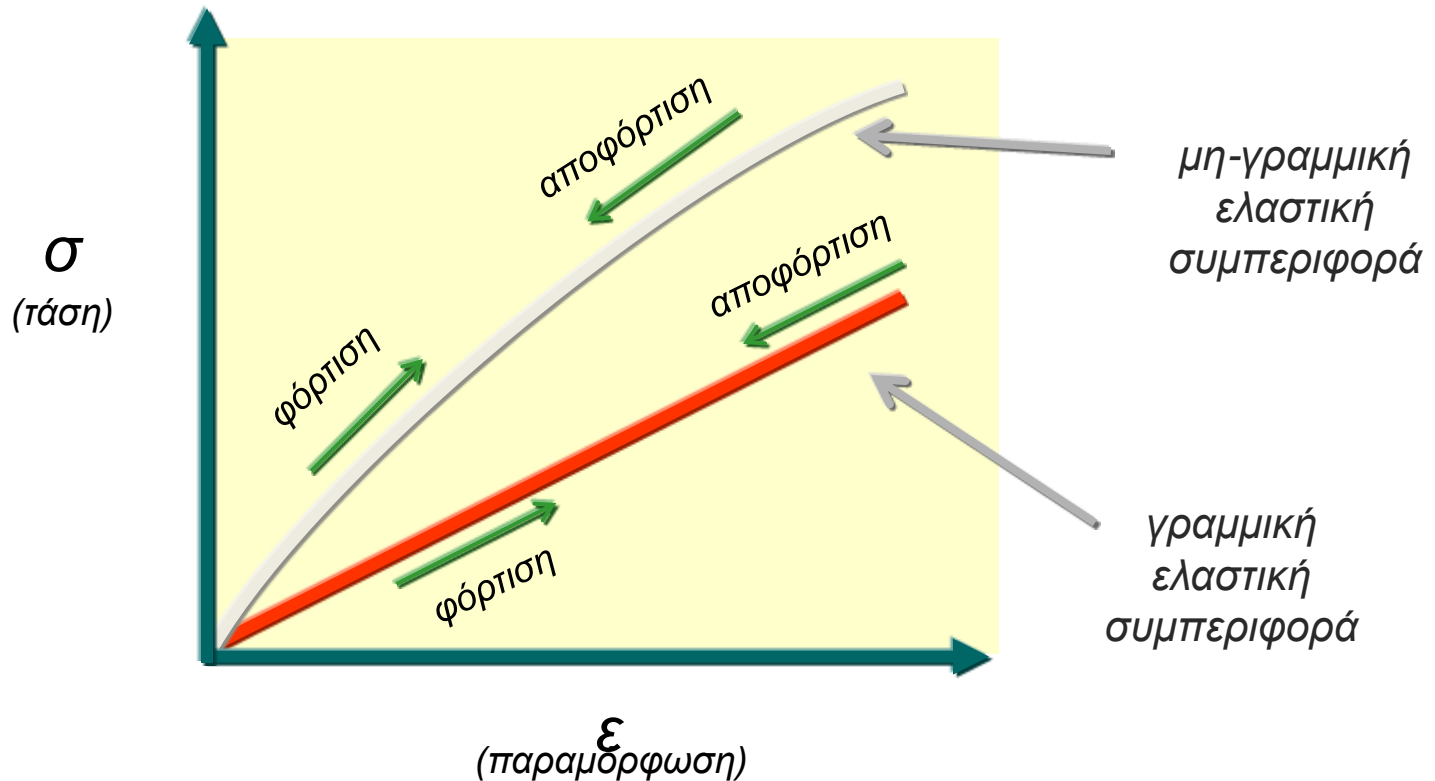
# Πως συνδέονται η τάση με την παραμόρφωση ;

$$\sigma(\varepsilon) = ?$$



# Ελαστική συμπεριφορά

Η ελαστική παραμόρφωση είναι παροδική και αντιστρέψιμη !  
(οφείλεται σε «τέντωμα» δεσμών)

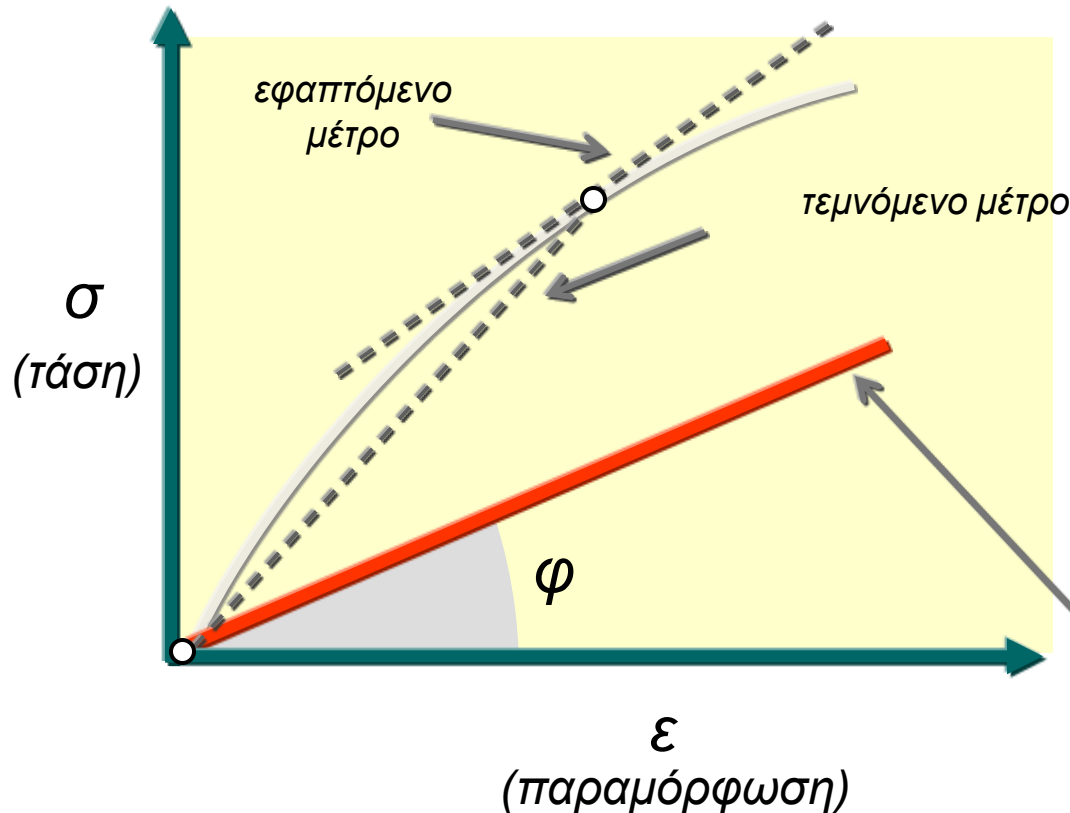


Στην γραμμική ελαστική συμπεριφορά η τάση είναι ανάλογη της παραμόρφωσης

$$\sigma \propto \varepsilon$$

# Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας  $E$  ορίζεται από την κλίση της καμπύλης  $\sigma(\varepsilon)$



$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

μέτρο ελαστικότητας

$$E = \tan \varphi$$

κλίση

Το μέτρο ελαστικότητας  $E$  μετριέται συνήθως σε **GPa**\*

Τυπικές τιμές

Πολυμερή

$\sim 10^{-3}$  έως  $\sim 4$

Μέταλλα

$\sim 45$  έως  $\sim 400$

Κεραμικά

$\sim 70$  έως  $\sim 1200$

$E$  (GPa)

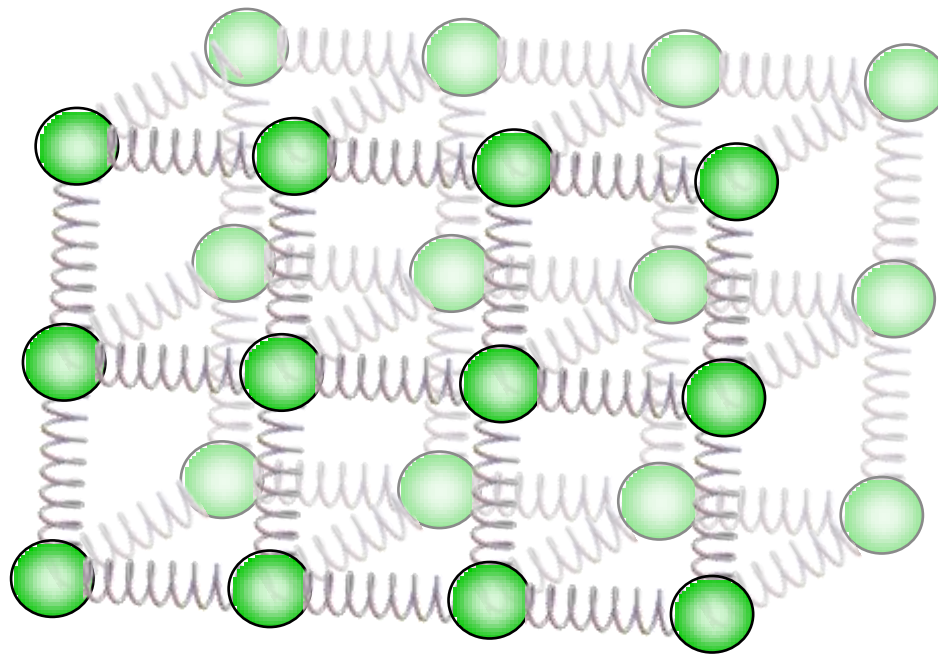


Το μέτρο ελαστικότητας  $E$  μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία (αυξάνεται στα πολυμερή)

\*  $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$

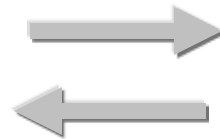


# Ελαστική συμπεριφορά – ατομική κλίμακα

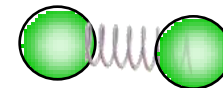
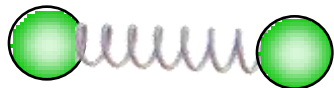


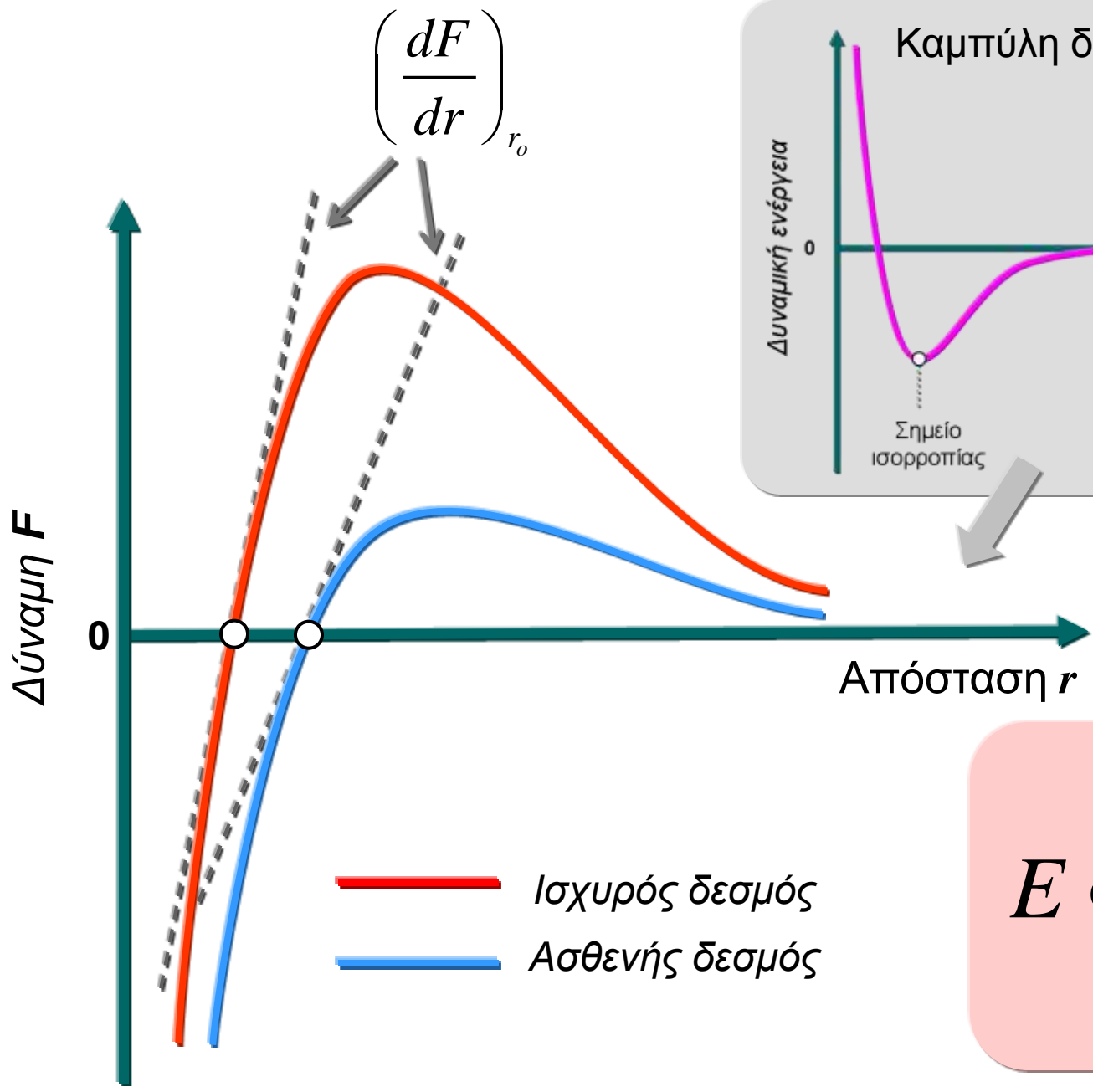
Μοντέλο ελατηρίων

Μακροσκοπική ελαστική παραμόρφωση



Αλλαγή στις διατομικές αποστάσεις





— Ισχυρός δεσμός  
— Ασθενής δεσμός

$$E \propto \left(\frac{dF}{dr}\right)_{r_0}$$

# Ανελαστικότητα

Η ανελαστικότητα αφορά την χρονική εξάρτηση της παραμόρφωσης. (Καθυστέρηση της επαναφοράς μετά την απομάκρυνση της τάσης)

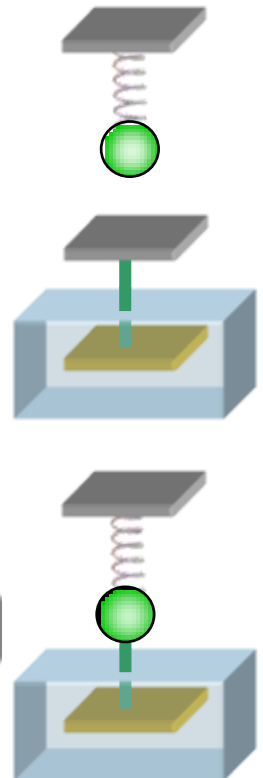
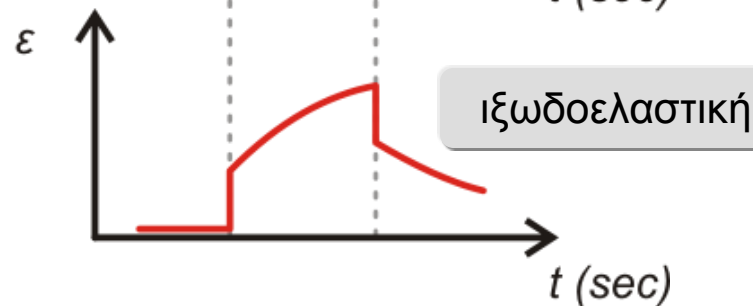
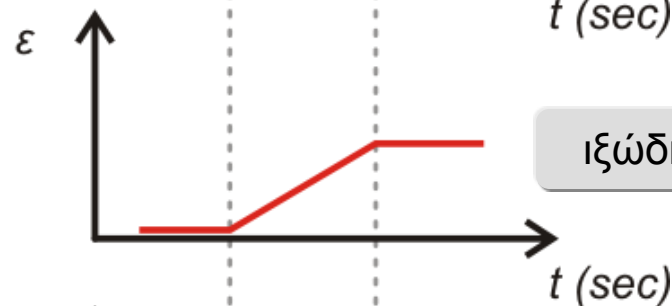
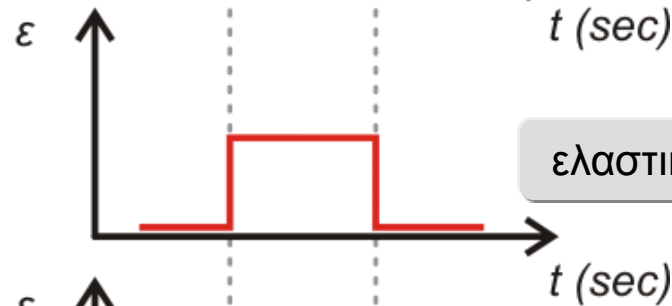
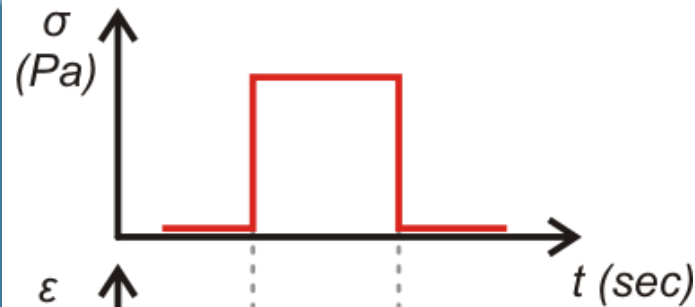
Κεραμικά

Πολύ μικρή

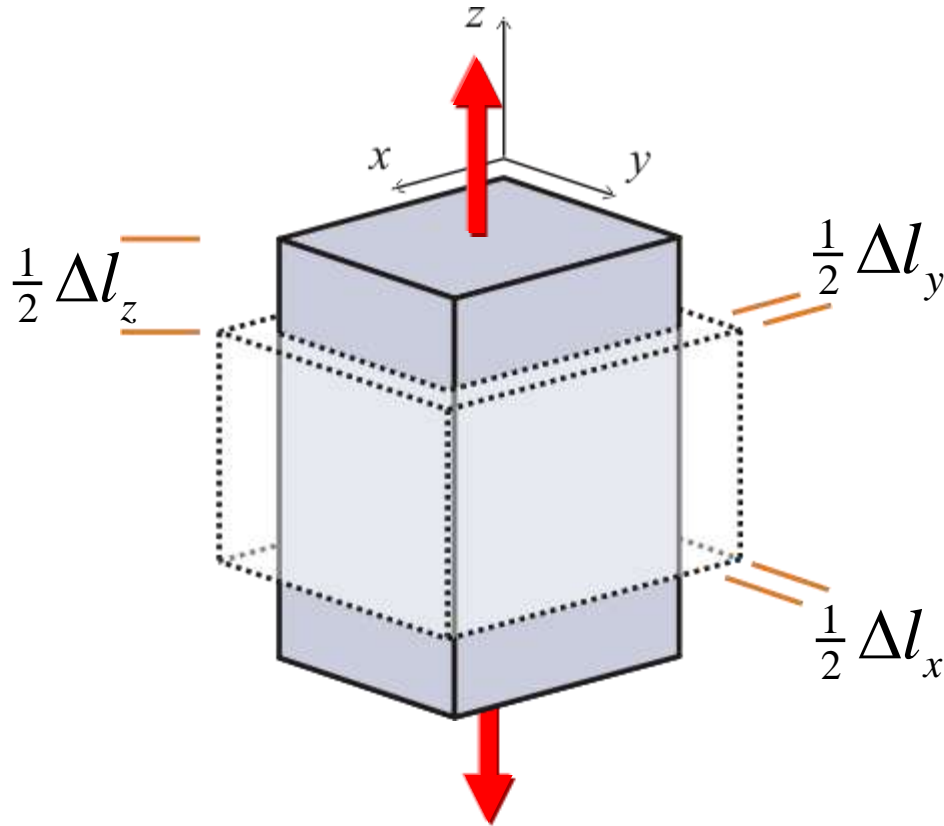
Μέταλλα

Πολυμερή

Σημαντική  
(ιξωδοελαστικότητα)



# Λόγος Poisson ( $\nu$ )



$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

Μέγιστη τιμή  $\nu = 0.5$   
(για αμετάβλητο όγκο)

$\nu \sim 0.25 - 0.35$   
(Μέταλλα)

Μέτρο  
ελαστικότητας

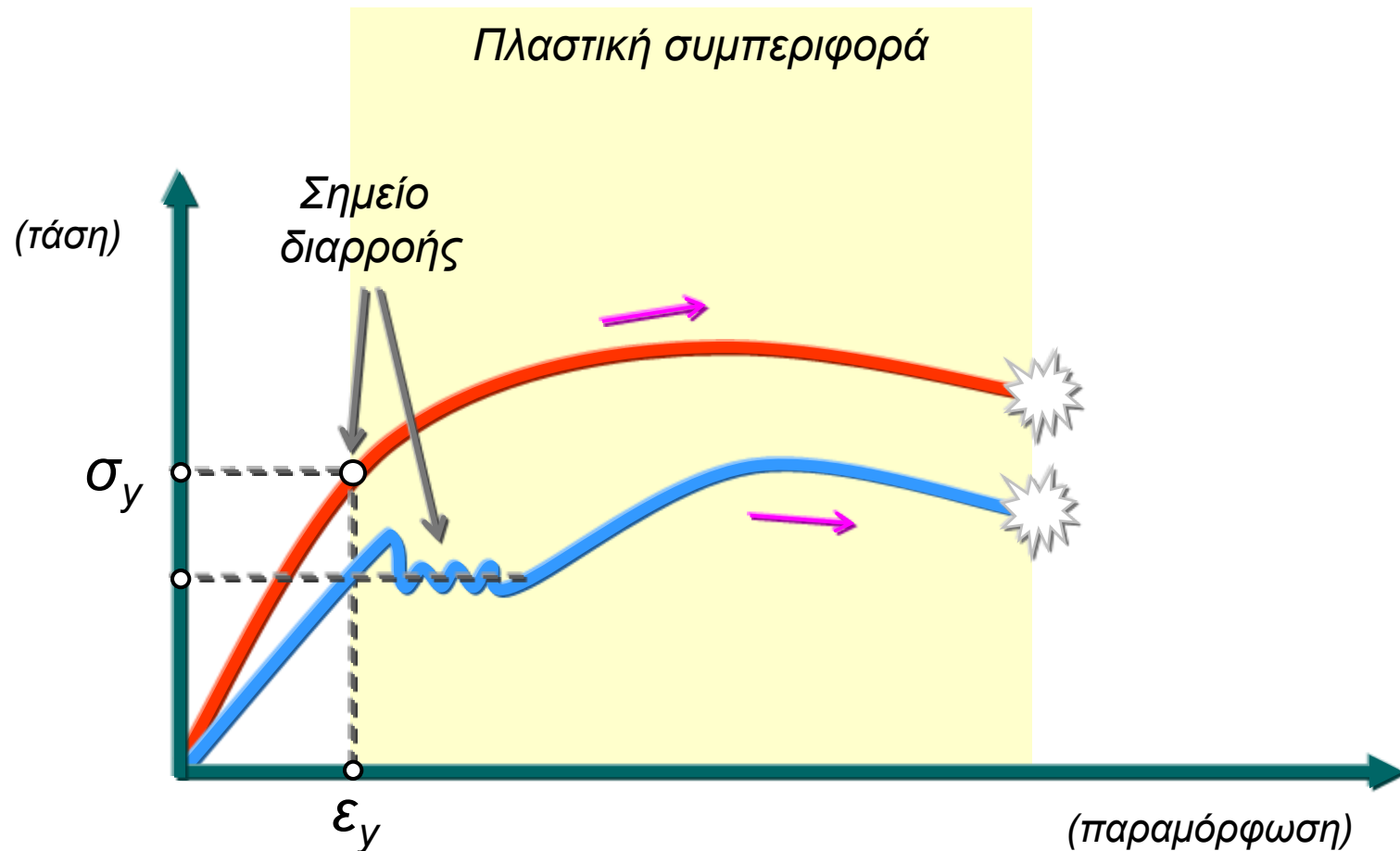
Λόγος  
Poisson

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Μέτρο  
διάτμησης

# Πλαστική συμπεριφορά

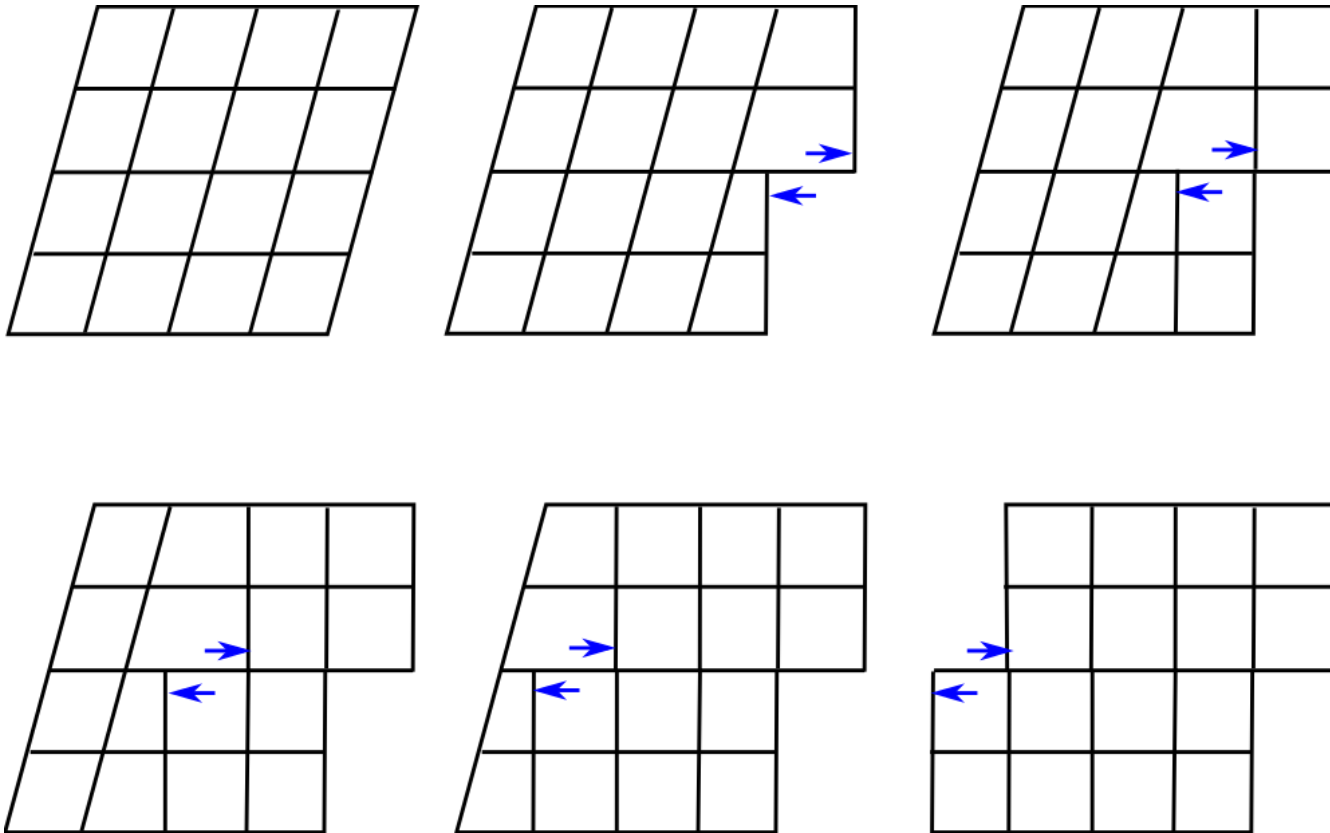
Η πλαστική παραμόρφωση είναι μόνιμη και μη-αντιστρέψιμη !  
(οφείλεται σε «σπάσιμο» και αναδιοργάνωση των δεσμών)



Μέταλλα

$$\epsilon_y \approx 0.005$$

Σπάσιμο δεσμών και δημιουργία νέων (οφείλεται σε ολίσθηση)



Ολίσθηση:  
κίνηση  
διαταραχών

Σχηματική απεικόνιση κίνησης μιας διαταραχής σε κρυσταλλικό πλέγμα, που οδηγεί τελικά σε πλαστική παραμόρφωση  
User: Cdang / Wikimedia Commons / Public Domain

**Κεραμικά**

Έχουμε συχνά θραύση πριν την πλαστική παραμόρφωση

**Κρυσταλλικά**

Μηχανισμός: ολίσθηση

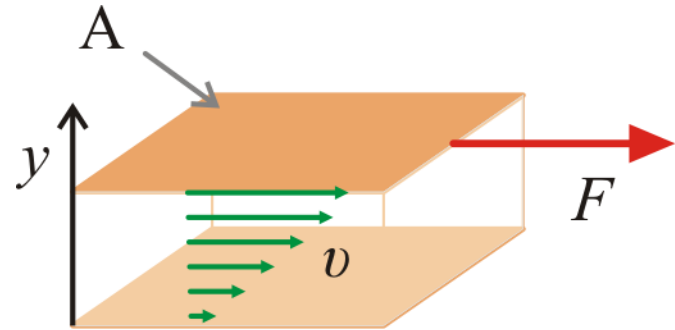
Δυσκολία στην ολίσθηση διότι υπάρχουν πολύ λίγα συστήματα ολίσθησης

**Μη-Κρυσταλλικά**

Μηχανισμός: ιξώδης ροή

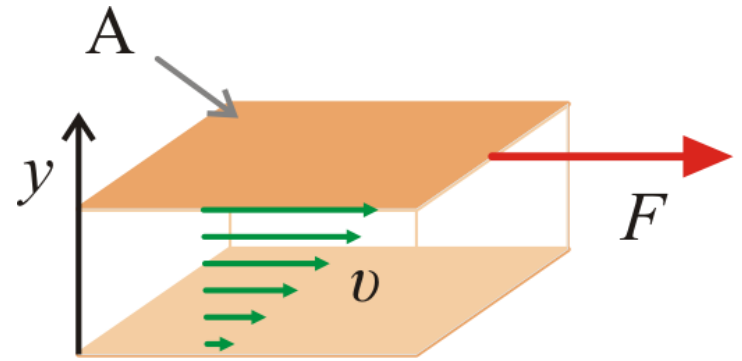
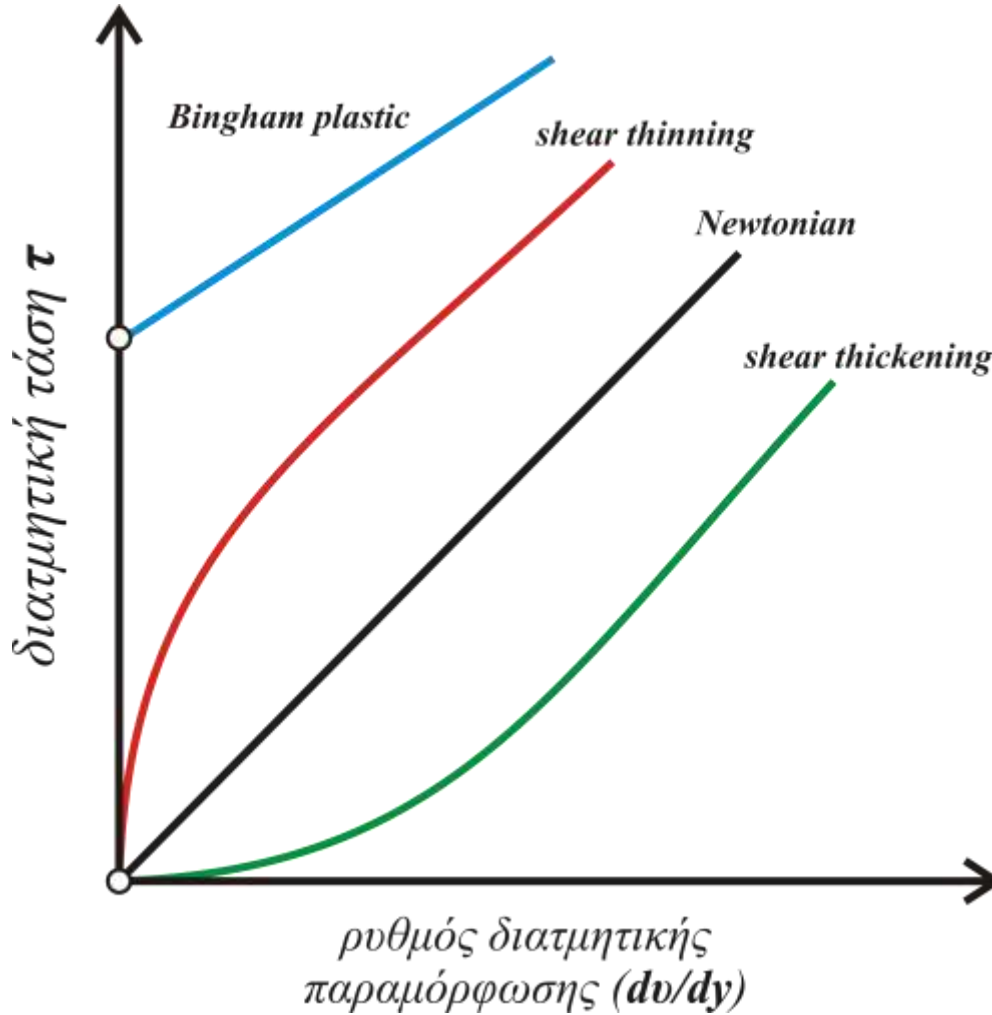
Ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι ανάλογος της τάσης

$$\eta = \frac{\tau}{(dv/dy)} = \frac{F/A}{(dv/dy)}$$



SI:  $\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  CGS: (poise)  $P=0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (νερό  $\eta \approx 1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )

## Ιξώδης Ροή



### Shear Thickening

Αύξηση του ιξώδους καθώς αυξάνεται ο ρυθμός παραμόρφωσης

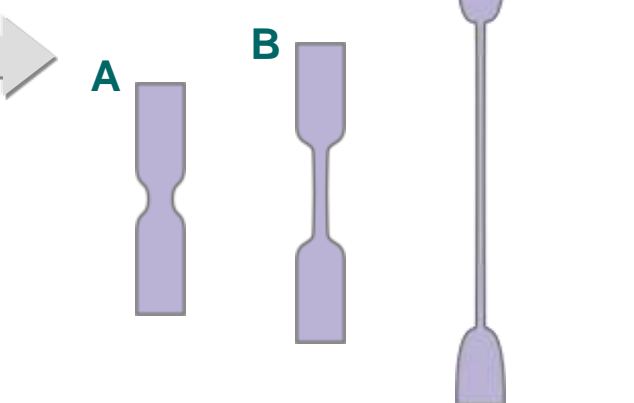
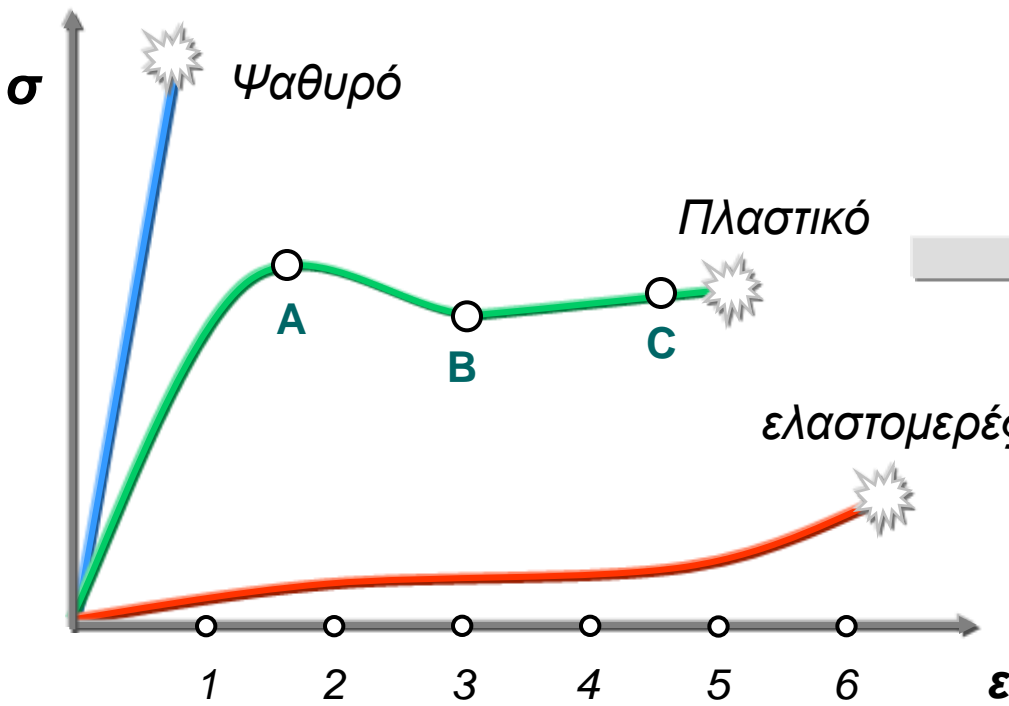
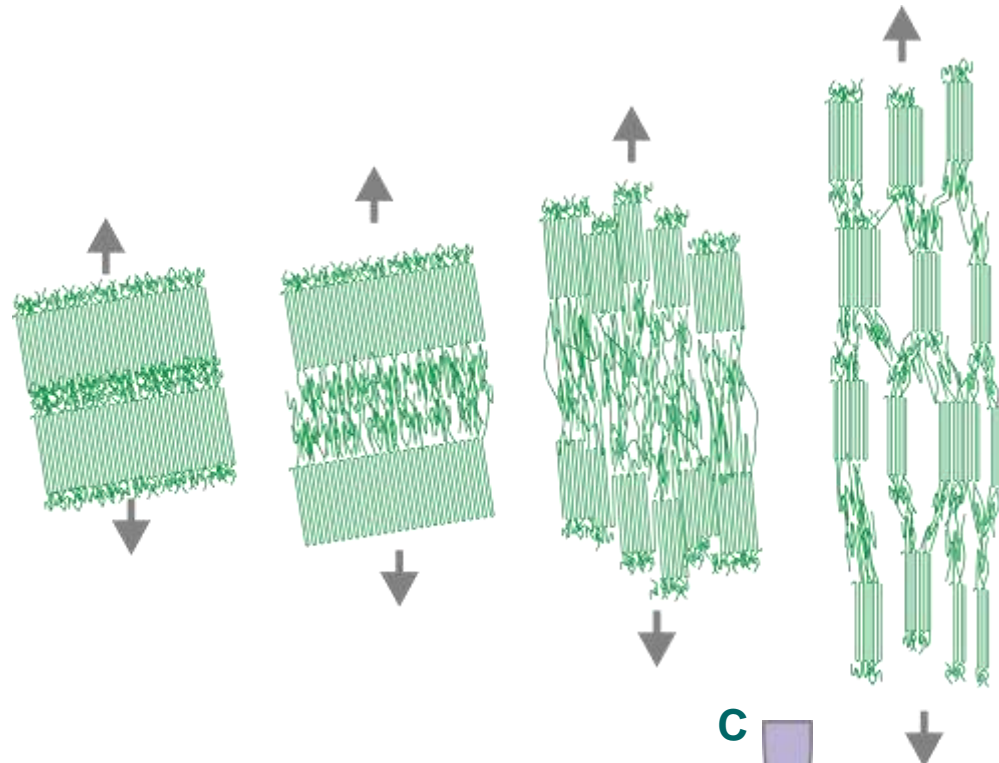
### Shear Thinning

Μείωση του ιξώδους καθώς αυξάνεται ο ρυθμός παραμόρφωσης



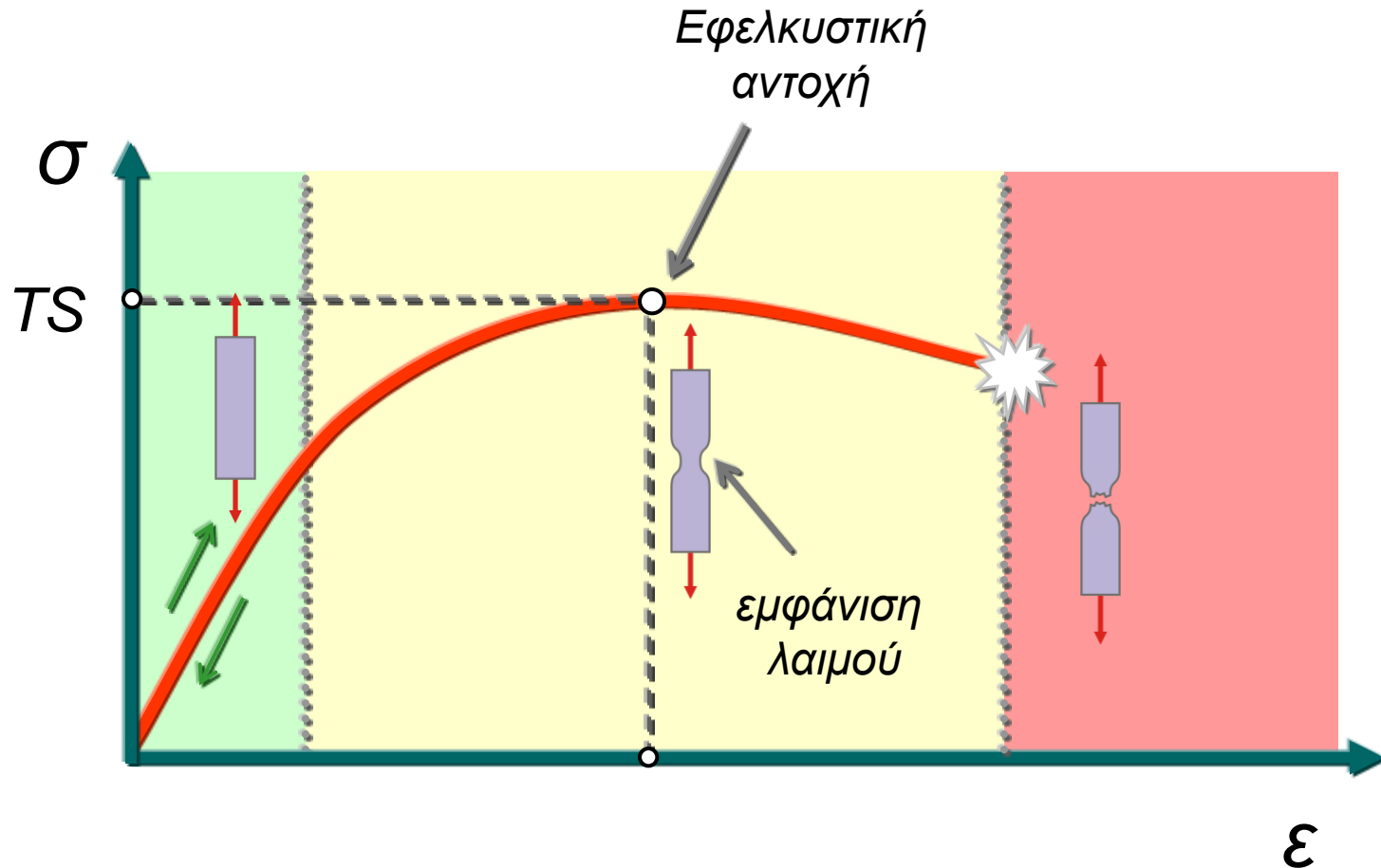
# Πολυμερή

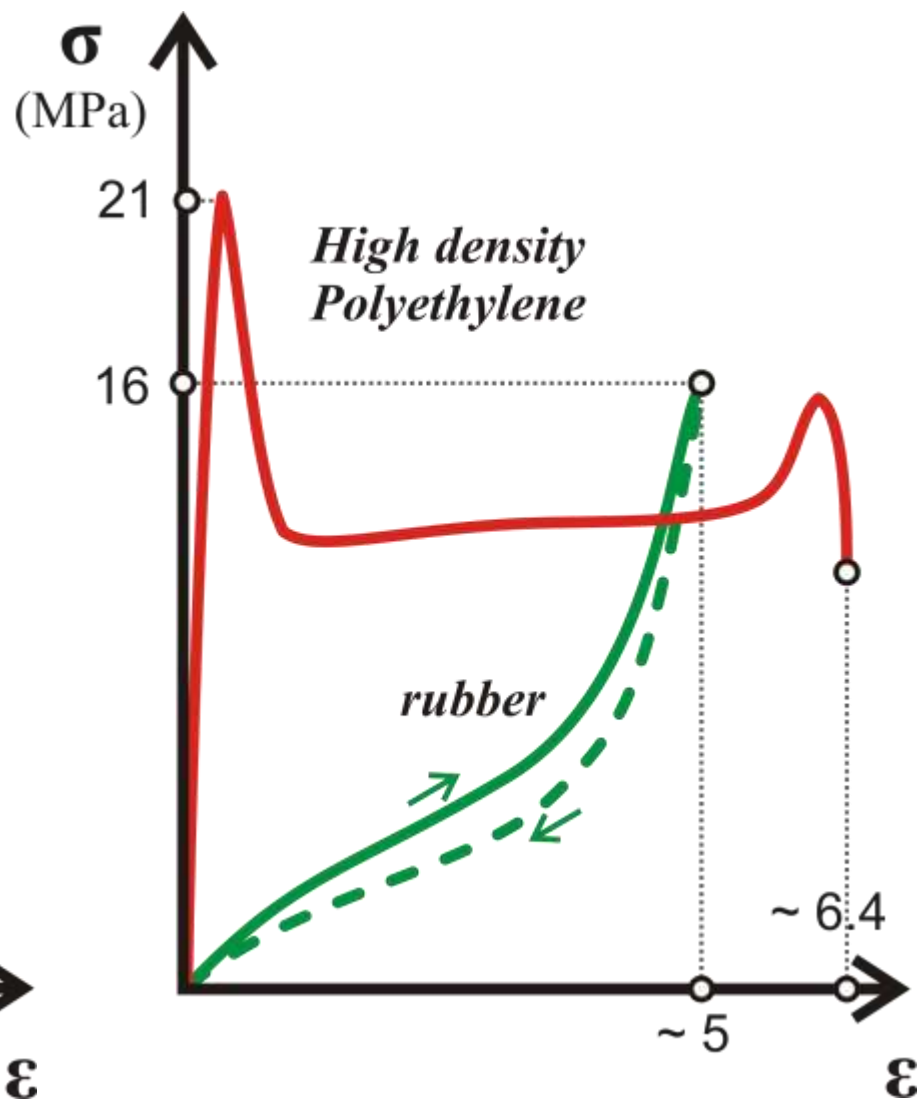
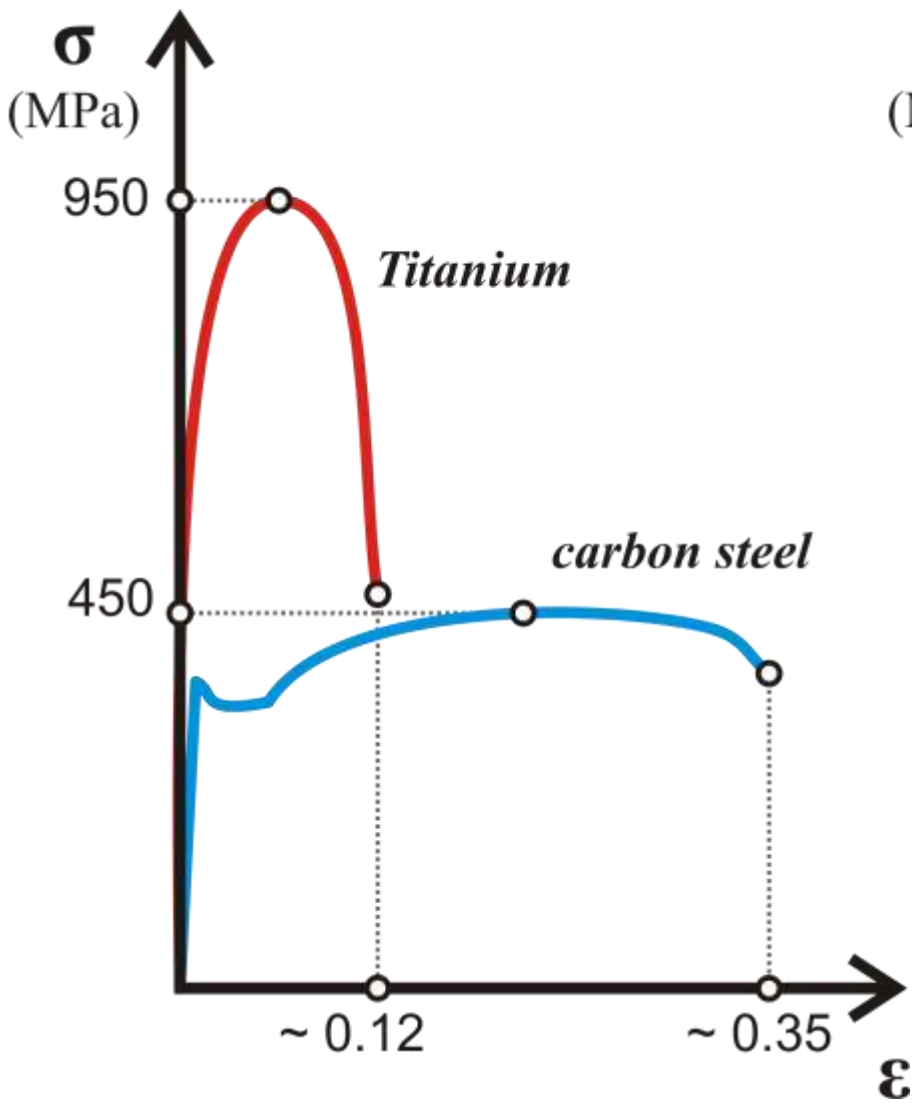
Αλληλεπίδραση μεταξύ  
φυλλωδών δομών  
και παρεμβαλλομένων  
άμορφων περιοχών



Αντίθετα από τα μέταλλα  
έχουμε διάδοση του λαιμού

# Αντοχή σε εφελκυσμό

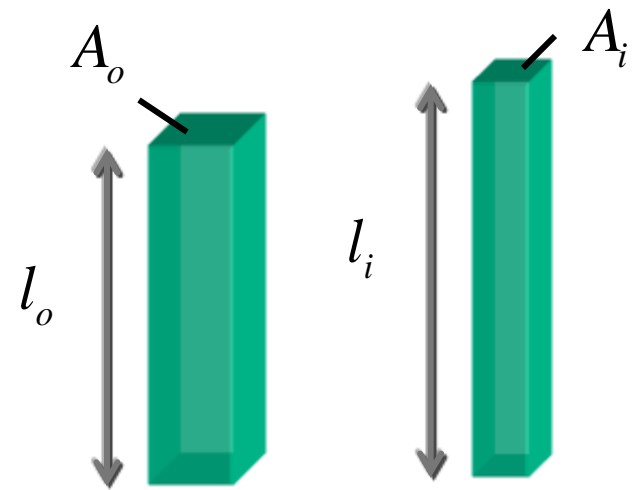
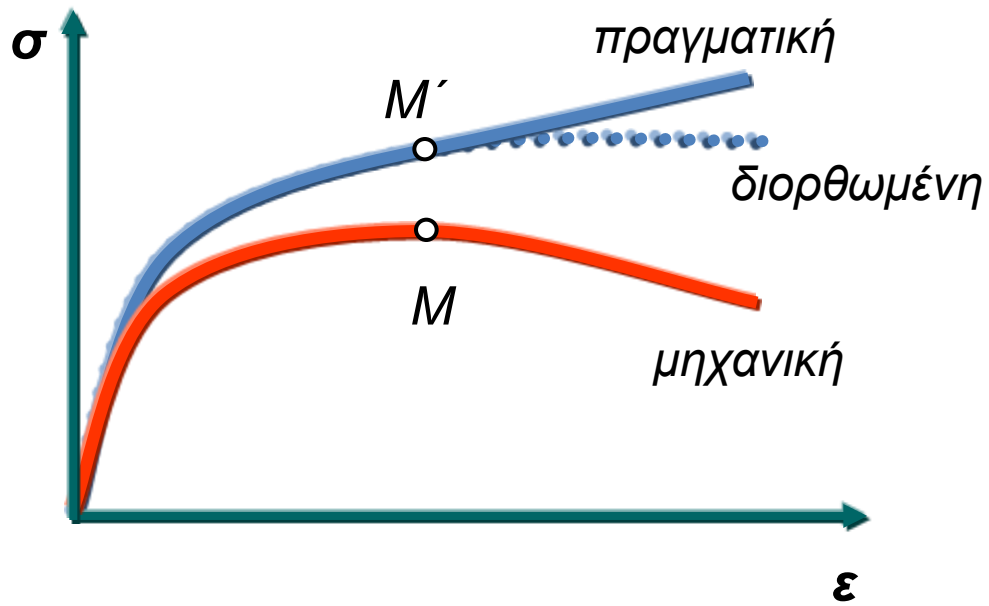




Τυπικές καμπύλες παραμόρφωσης – τάσης για μέταλλα και πολυμερή

# Πραγματική τάση και παραμόρφωση

Μηχανικές Ιδιότητες



Μηχανικά

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

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0}$$

Πραγματικά

$$\sigma_T = \frac{F}{A_i}$$

$$\varepsilon_T = \ln \frac{l_i}{l_0}$$



Μέχρι την έναρξη δημιουργίας λαιμού

Συντελεστής ενδοτράχυνσης

$$\sigma_T = K \varepsilon_T^n$$

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

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon)$$

# Υπολογισμός πραγματικής τάσης

$$\sigma_T \equiv \frac{F}{A_i}$$

Αν δεν έχουμε μεταβολή του όγκου:

$$\left. \begin{aligned} A_i \cdot l_i = A_o \cdot l_o &\Rightarrow \frac{l_i}{l_o} = \frac{A_o}{A_i} \\ \varepsilon \equiv \frac{l_i - l_o}{l_o} &\Rightarrow \frac{l_i}{l_o} = 1 + \varepsilon \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{1}{A_i} = \frac{1}{A_o} (1 + \varepsilon) \Rightarrow$$

$$\frac{\overset{\sigma_T}{F}}{A_i} = \frac{\overset{\sigma}{F}}{A_o} (1 + \varepsilon) \Rightarrow \sigma_T = \sigma (1 + \varepsilon)$$

# Υπολογισμός πραγματικής παραμόρφωσης

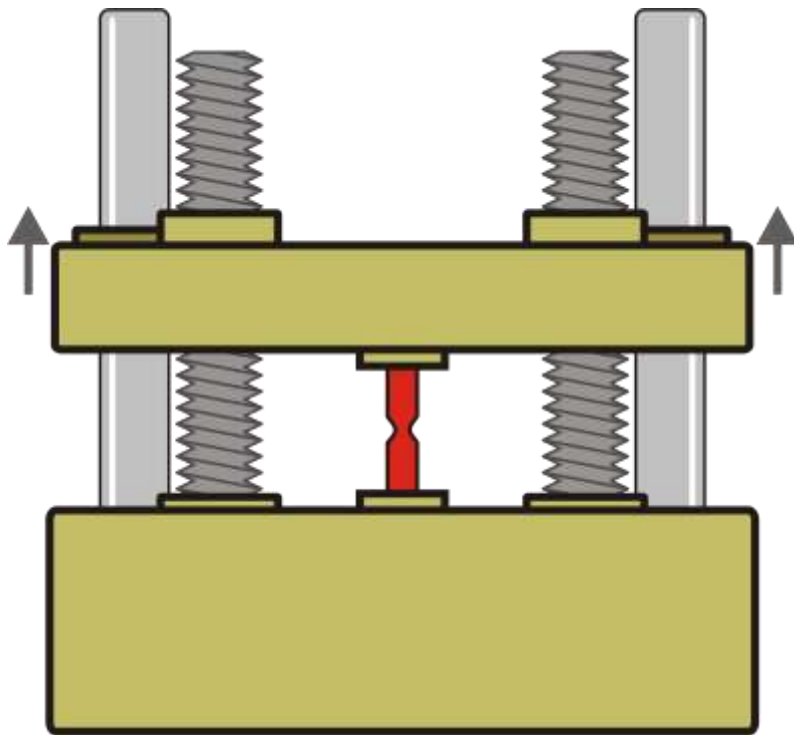
Η διαδικασία εφελκυσμού μπορεί να θεωρηθεί ως μια σειρά από διαδοχικές παραμορφώσεις:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l}$$

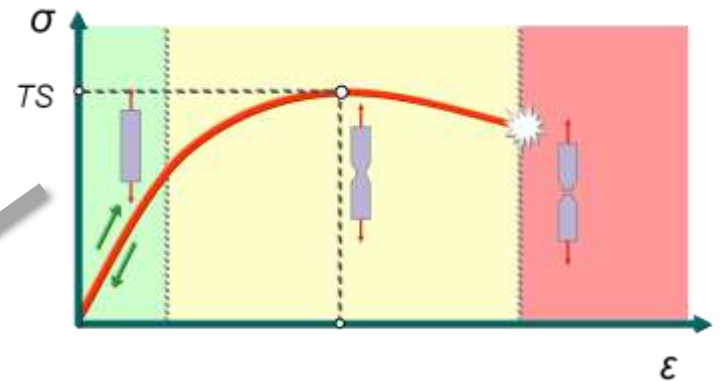
οπότε η συνολική πραγματική παραμόρφωση θα είναι:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_T &= \int_{l_o}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_i}{l_o}\right) \\ \varepsilon &\equiv \frac{l_i - l_o}{l_o} \Rightarrow \frac{l_i}{l_o} = \varepsilon + 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon)$$

# Μετρώντας την Μηχανική αντοχή



Σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής μηχανής μέτρησης μηχανικής αντοχής (βαρέως τύπου)



Μεταλλικό δοκίμιο μετά το τεστ μηχανικής αντοχής

User: Sigmund / Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0

## Καταστροφική μέθοδος

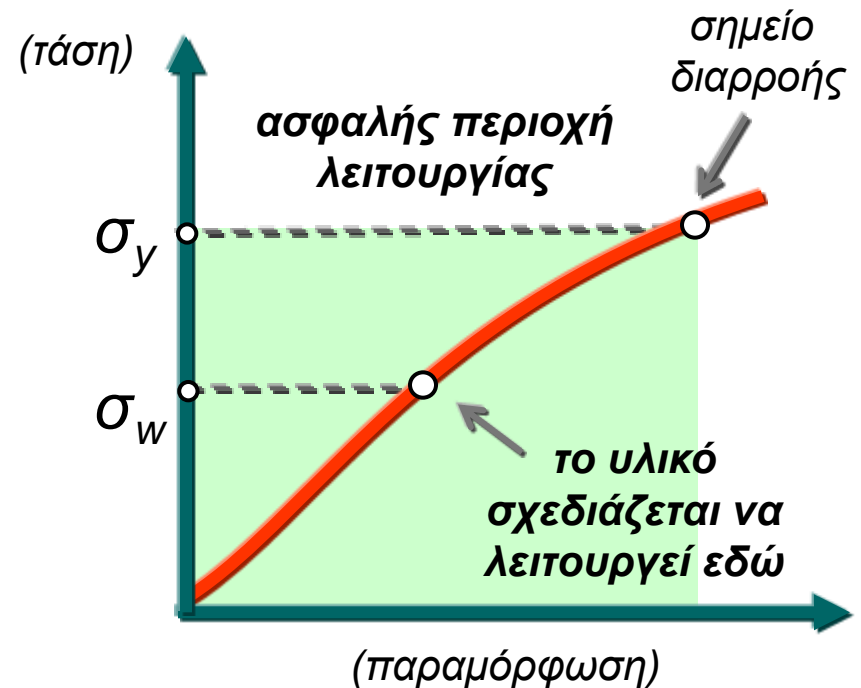
# Παράγοντας ασφαλείας

Σε κατασκευή τα υλικά πρέπει να καταπονούνται σε τέτοιο βαθμό που να λειτουργούν πάντα στην **ελαστική περιοχή**

τάση εργασίας  $\sigma_w$   $\equiv \frac{F}{S} \leq \sigma_y$   $\sigma_y$  τάση διαρροής

Ως παράγοντα ασφαλείας **N** ορίζουμε τον λόγο:

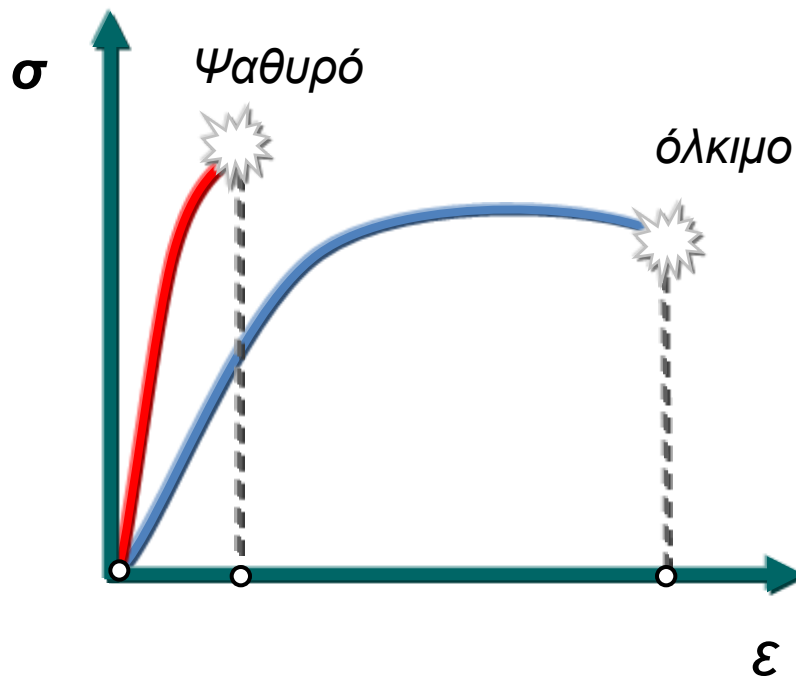
$$N \equiv \frac{\sigma_y}{\sigma_w} > 1$$





# Ολκιμότητα (Ductility)

Μέτρο του βαθμού πλαστικής παραμόρφωσης  
έως την θραύση



$$EL = \frac{l_f - l_o}{l_o}$$

εξαρτάται από το μήκος

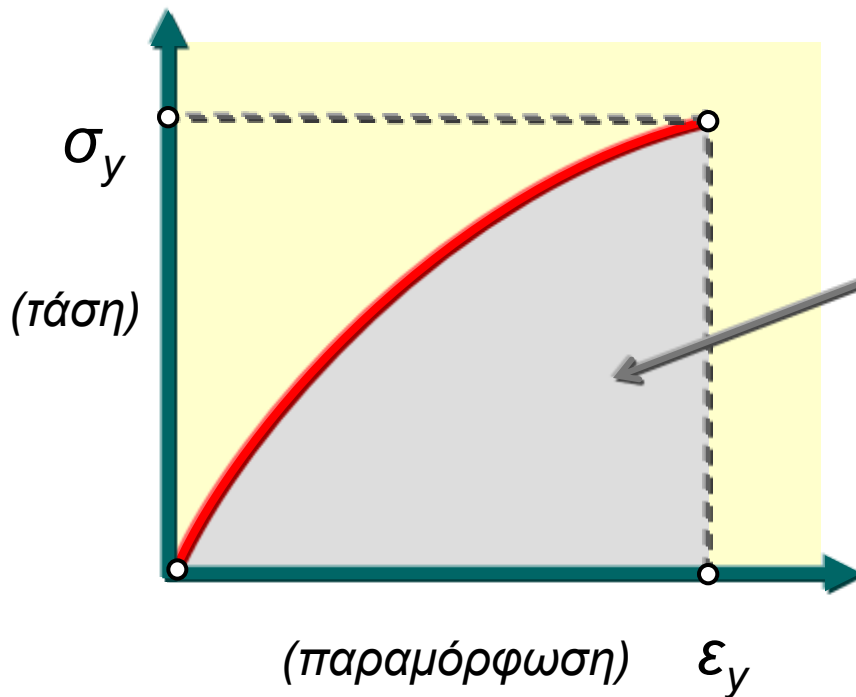
$$RA = \frac{A_o - A_f}{A_o}$$

δεν εξαρτάται από το μήκος

Ψαθυρά όσα έχουν παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon < 5\%$

# Επανάταξη (Resilience)

Η ικανότητα ενός υλικού να απορροφά ενέργεια όταν παραμορφώνεται



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

Γραμμική  
ελαστικότητα

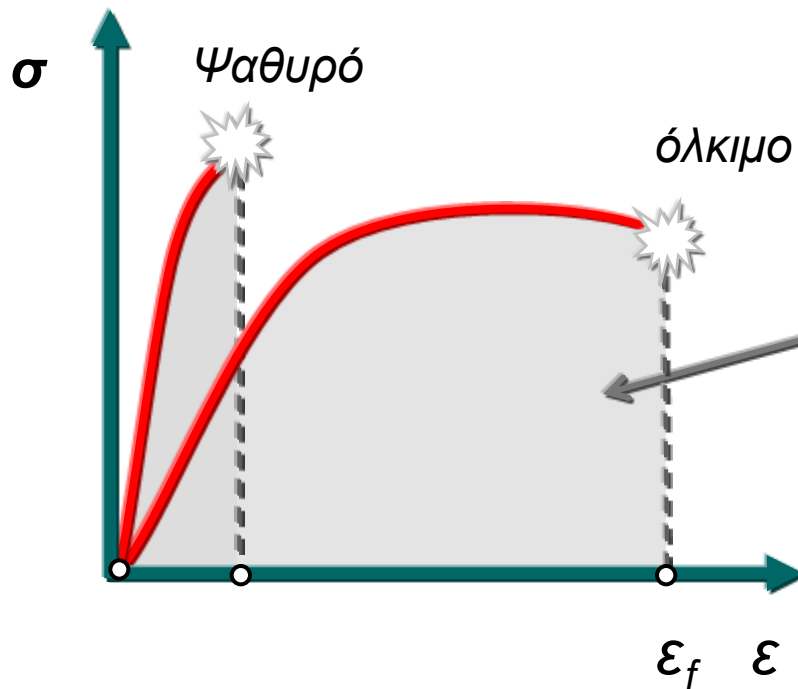
$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

Μονάδες πυκνότητας ενέργειας:

$$\frac{N}{m^2} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{J}{m^3}$$

# Δυσθραυστότητα (Toughness)

Μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να απορροφά ενέργεια έως την θραύση



$$U_T = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon$$

Μονάδες πυκνότητας ενέργειας:

$$\frac{N}{m^2} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{J}{m^3}$$

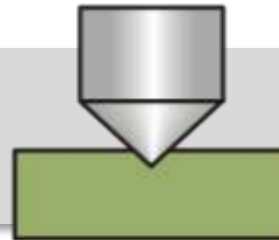
# Σκληρότητα (hardness)

Μέτρο της αντίστασης σε τοπική παραμόρφωση

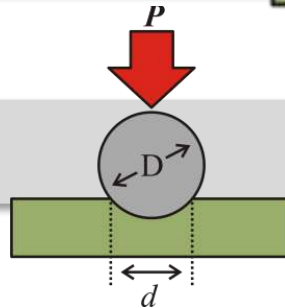


Σκληρόμετρο Rockwell  
User:Metrollberica/ Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0

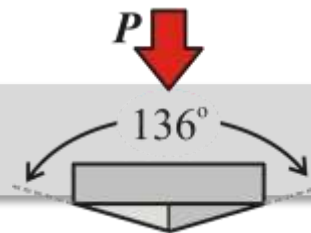
Rockwell and Superficial Rockwell



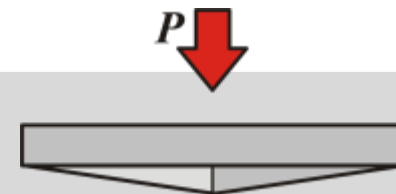
Brinell



Vickers



Κnoop

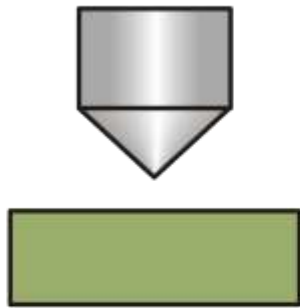


Micro-hardness

# Rockwell & Superficial Rockwell

Διαφορά βάθους διείσδυσης μικρού και μεγάλου φορτίου

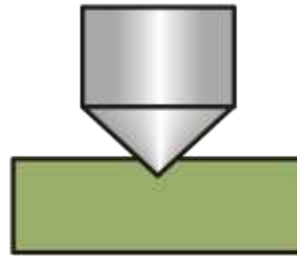
κωνική ακίδα  
ή ατσάλινο σφαιρίδιο



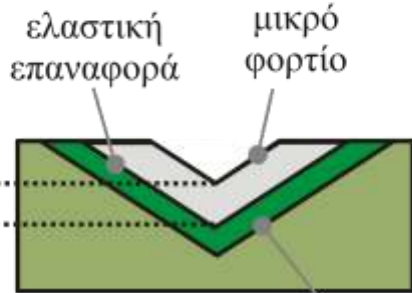
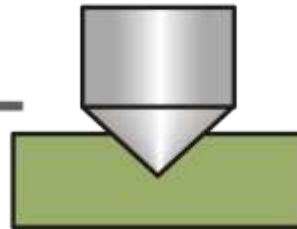
δείγμα

Μικρό φορτίο

Rockwell: 10 kg  
Επιφ. Rockwell: 3 kg



Μεγάλο φορτίο



Rockwell { 60 kg  
100 kg  
150 kg  
Superficial Rockwell { 15 kg  
30 kg  
45 kg

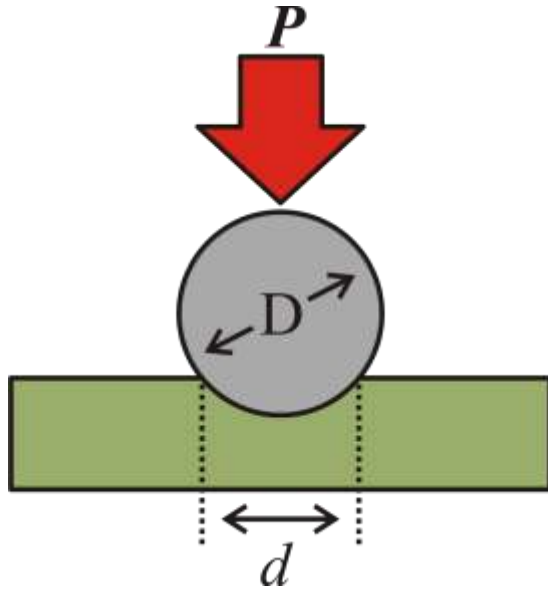
Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα της **άμεσης εκτίμησης της σκληρότητας** χωρίς χρήση υπολογισμών. Συνήθως χρησιμοποιείται στην **μηχανική** και την **μεταλλουργία**.

# Brinell

Μέτρηση αποτυπώματος  
σφαιρικής ακίδας και  
υπολογισμός μέσω σχέσης



Αποτύπωμα μέτρησης Brinell  
User:IGW/ Wikimedia Commons  
/ CC-BY-SA-3.0



$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

## Μεθοδολογία:

Η σφαιρική ακίδα πιέζεται πάνω στο δείγμα με ελεγχόμενη δύναμη. Το φορτίο παραμένει για περίπου 10-15 sec.

Μετά από αυτό τον χρόνο η ακίδα απομακρύνεται αφήνοντας ένα κυκλικό αποτύπωμα στο δείγμα.

Η διάμετρος  $d$  του αποτυπώματος μετρείται οπτικά (με μικροσκόπιο).

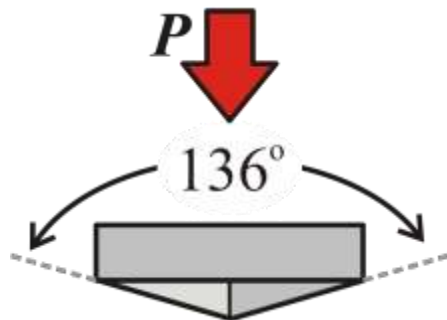
**Πλεονεκτήματα:** Καλύπτει όλη την περιοχή σκληροτήτων

**Μειονεκτήματα:** είναι αργή, χρειάζεται μικροσκόπιο

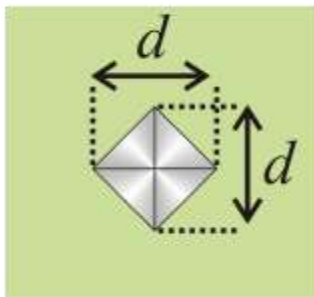
# Vickers

*microhardness*

Μέτρηση αποτυπώματος διαμαντένιας πυραμίδας και υπολογισμός μέσω σχέσης



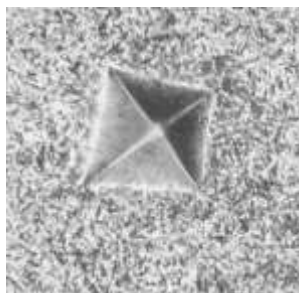
αποτύπωμα



$$HV = \frac{1.854 P}{d^2}$$



Διαμαντένια πυραμίδα  
R. Tanaka/ Wikimedia Commons  
/ CC-BY-3.0



Αποτύπωμα μέτρησης Vickers  
Dennis M. Clarke/ Wikimedia Commons  
/ CC-BY-SA-3.0

## Μεθοδολογία:

Η ακίδα πιέζεται πάνω στο δείγμα με ελεγχόμενη δύναμη (<20 N).

Το φορτίο παραμένει για περίπου 10-15 sec.

Μετά από αυτό τον χρόνο η ακίδα απομακρύνεται αφήνοντας ένα ρομβοειδές αποτύπωμα στο δείγμα.

Η διάμετρος  $l$  του αποτυπώματος μετρείται οπτικά (με μικροσκόπιο).

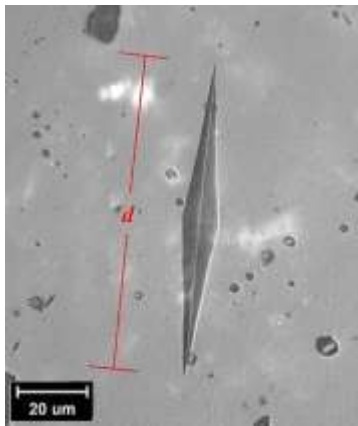
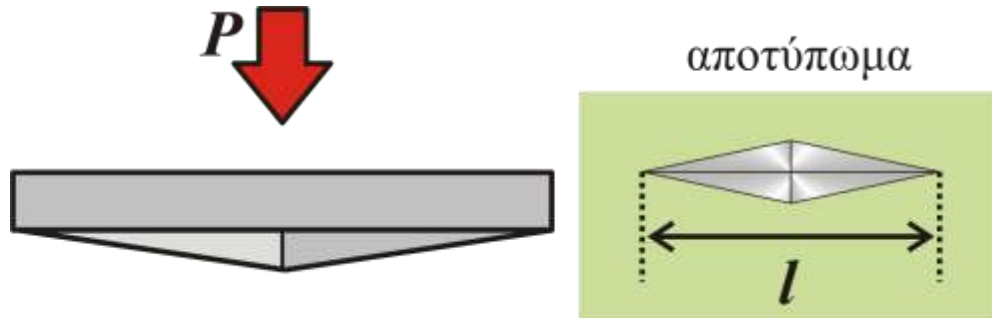
**Πλεονεκτήματα:** Ιδανική για μικρά ή λεπτά δείγματα.

**Μειονεκτήματα:** είναι αργή, χρειάζεται μικροσκόπιο

# Κνοορ

Μέτρηση αποτυπώματος διαμαντένιας πυραμίδας και υπολογισμός μέσω σχέσης

*microhardness*



Αποτύπωμα μέτρησης Κνοορ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

User: His Manliness / Wikimedia Commons / CC-BY-3.0

$$HK = \frac{14.2P}{l^2}$$

## Μεθοδολογία:

Η ακίδα πιέζεται πάνω στο δείγμα με ελεγχόμενη δύναμη (<10 N).

Το φορτίο παραμένει για περίπου 10-15 sec.

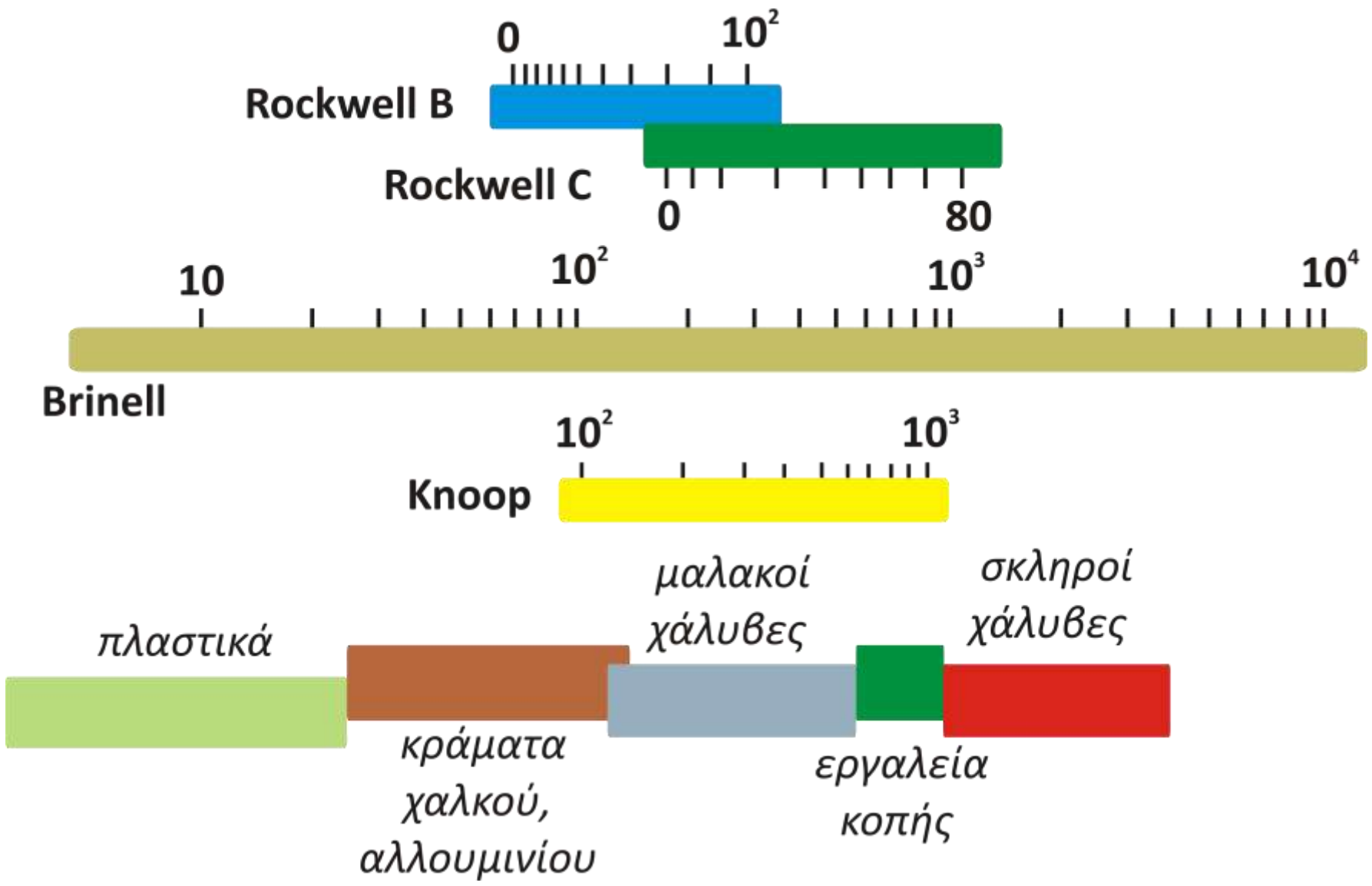
Μετά από αυτό τον χρόνο η ακίδα απομακρύνεται αφήνοντας ένα ρομβοειδές αποτύπωμα στο δείγμα.

Η διάμετρος  $l$  του αποτυπώματος μετρείται οπτικά (με μικροσκόπιο).

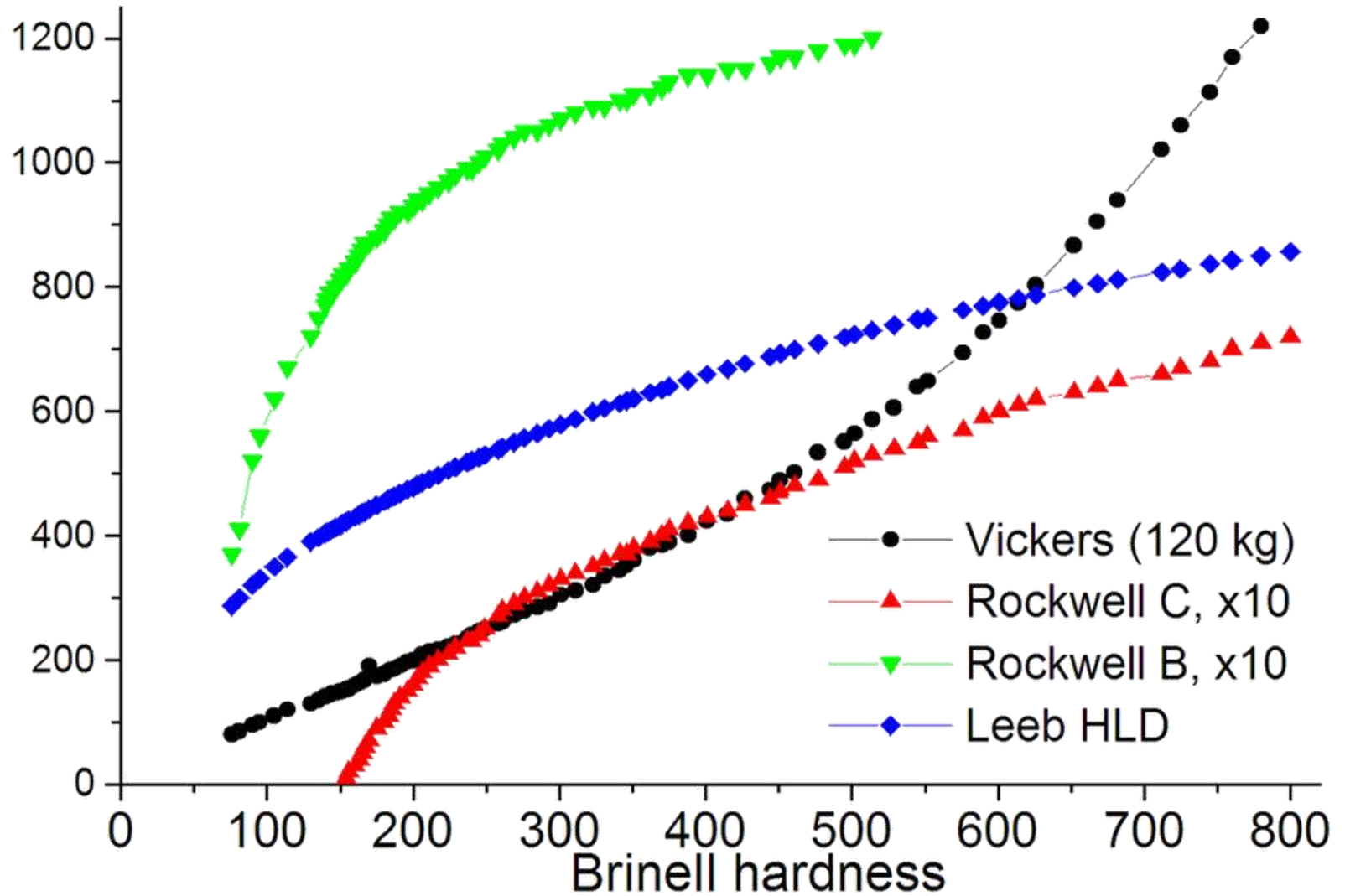
**Πλεονεκτήματα:** Ιδανική για ψαθυρά υλικά (~ μισή διείσδυση από την Vickers)  
**Μειονεκτήματα:** είναι αργή, χρειάζεται μικροσκόπιο



Μηχανικές Ιδιότητες - Σκληρότητα



Τυπικές περιοχές τιμών σκληρότητας για διάφορες κατηγορίες υλικών



Σύγκριση τιμών σκληρότητας από διάφορες μεθόδους

User: Materialscientist/Wikipedia/ CC-BY-SA\_3.0

Στην περίπτωση των μετάλλων η τιμή της σκληρότητας σχετίζεται γραμμικά με την αντοχή στον εφελκυσμό !

Μετρώντας **σκληρότητα** (εύκολη, «μη-καταστροφική» μέτρηση) μπορούμε να εκτιμήσουμε την τιμή της **αντοχής στον εφελκυσμό (TS)** (δύσκολη, καταστροφική μέτρηση)

$$(TS) \cong 3.45 (HB)$$

Συσχέτιση μεταξύ σκληρότητας (HB) και αντοχής στον εφελκυσμό (TS) για χάλυβες

# Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

