

# ΥΛΙΚΑ Ι

## ΠΑΡΟΝ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

# 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.



# 6

## Μηχανικές ιδιότητες

# Μηχανικές Ιδιότητες

Τάση-παραμόρφωση

Ελαστική συμπεριφορά

Πλαστική συμπεριφορά

Αντοχή και ολκιμότητα

Σκληρότητα

# Μηχανική αντοχή

Αντοχή σε κάμψη



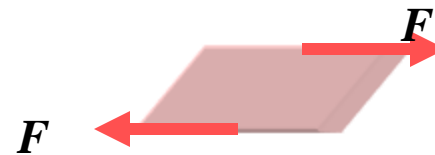
Αντοχή σε εφελκυσμό



Αντοχή σε συμπίεση



Αντοχή σε διάτμηση

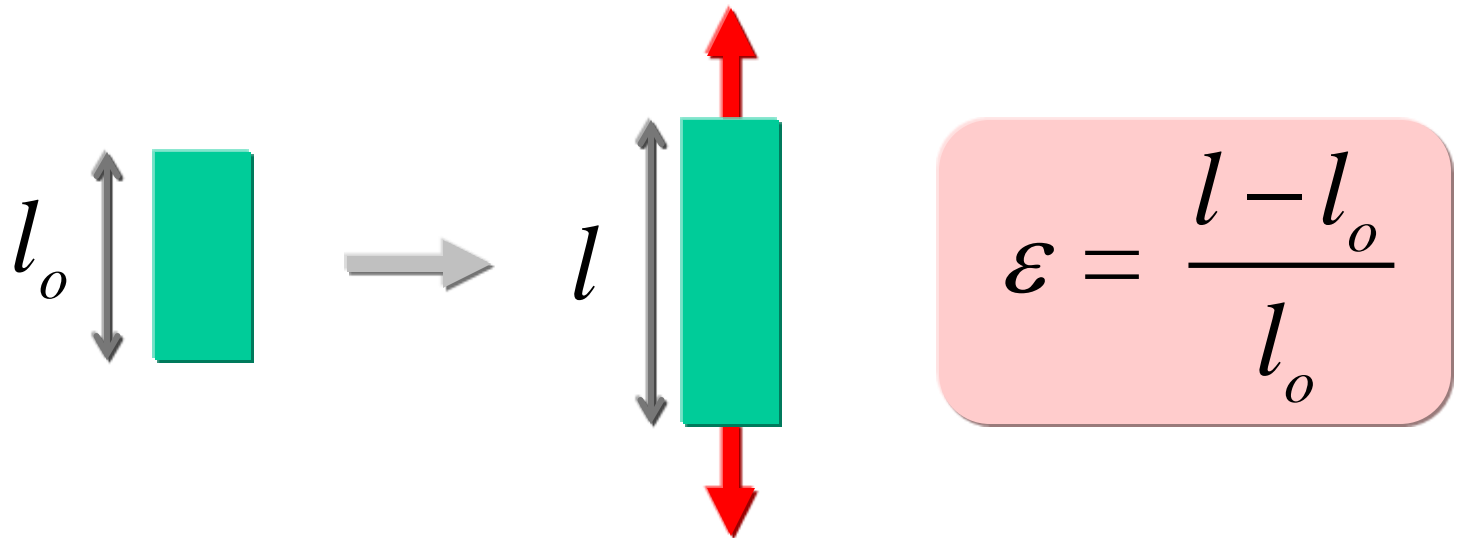


Αντοχή σε θραύση

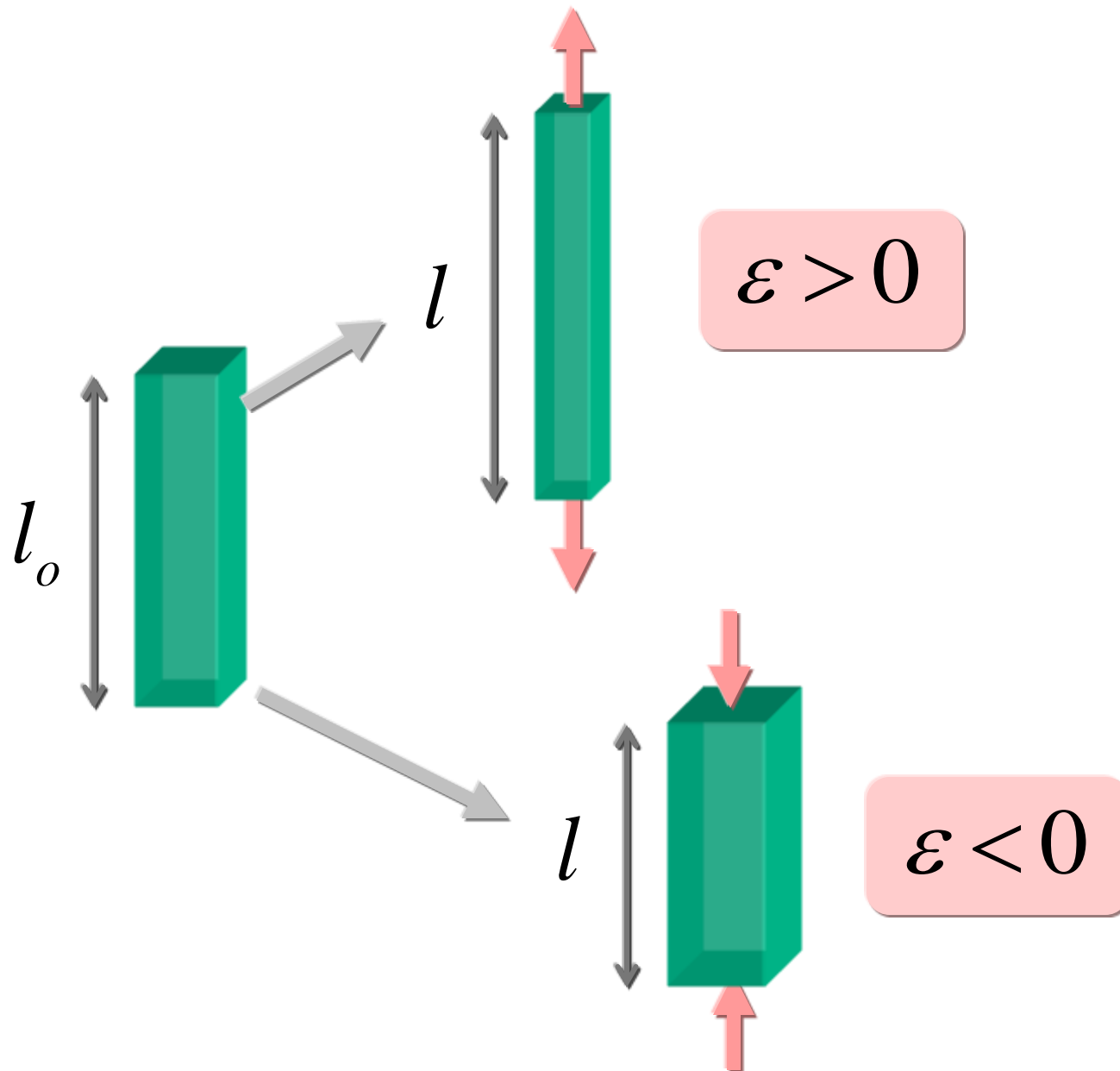


# Παραμόρφωση

Ως παραμόρφωση (deformation) ονομάζουμε την επιμήκυνση ανά μονάδα μήκους

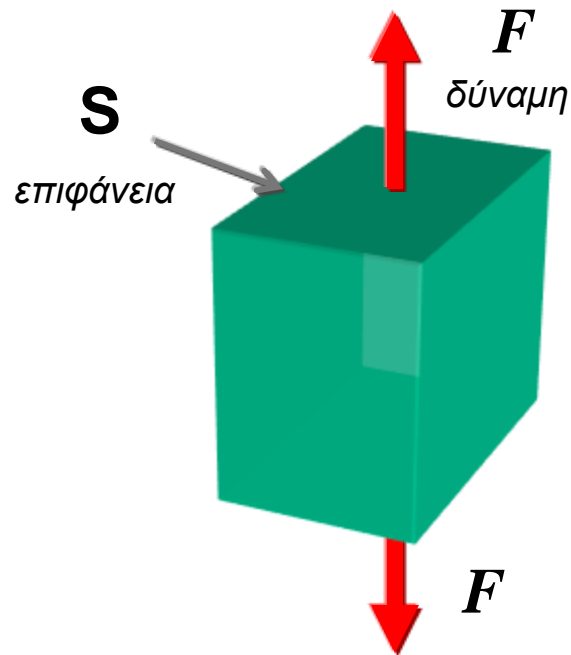


Η παραμόρφωση  $\epsilon$  είναι αδιάστατο μέγεθος



# Τάση

Ως τάση (stress) ονομάζουμε  
την δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας

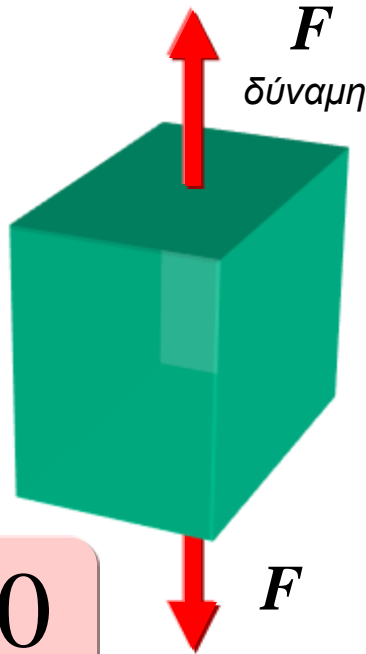


$$\sigma = \frac{F}{S}$$

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

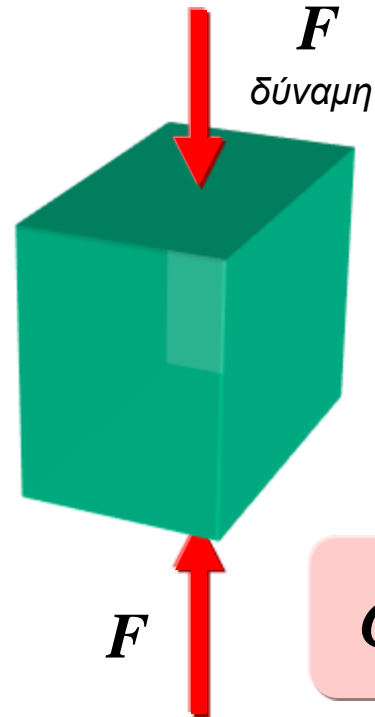


Εφελκυσμός



$$\sigma > 0$$

Θλίψη



$$\sigma < 0$$

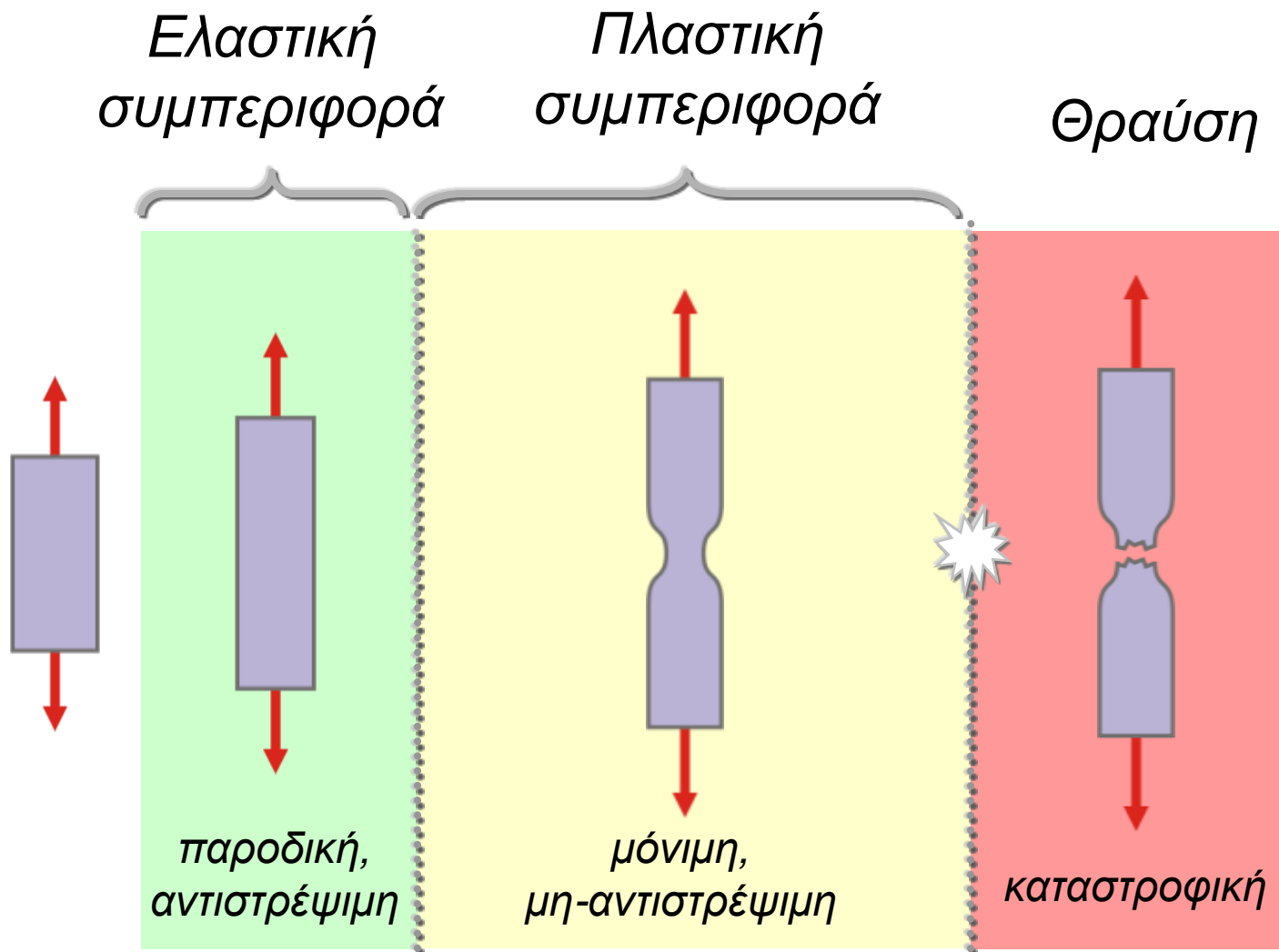
Η τάση  $\sigma$  μετριέται συνήθως σε MPa

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

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

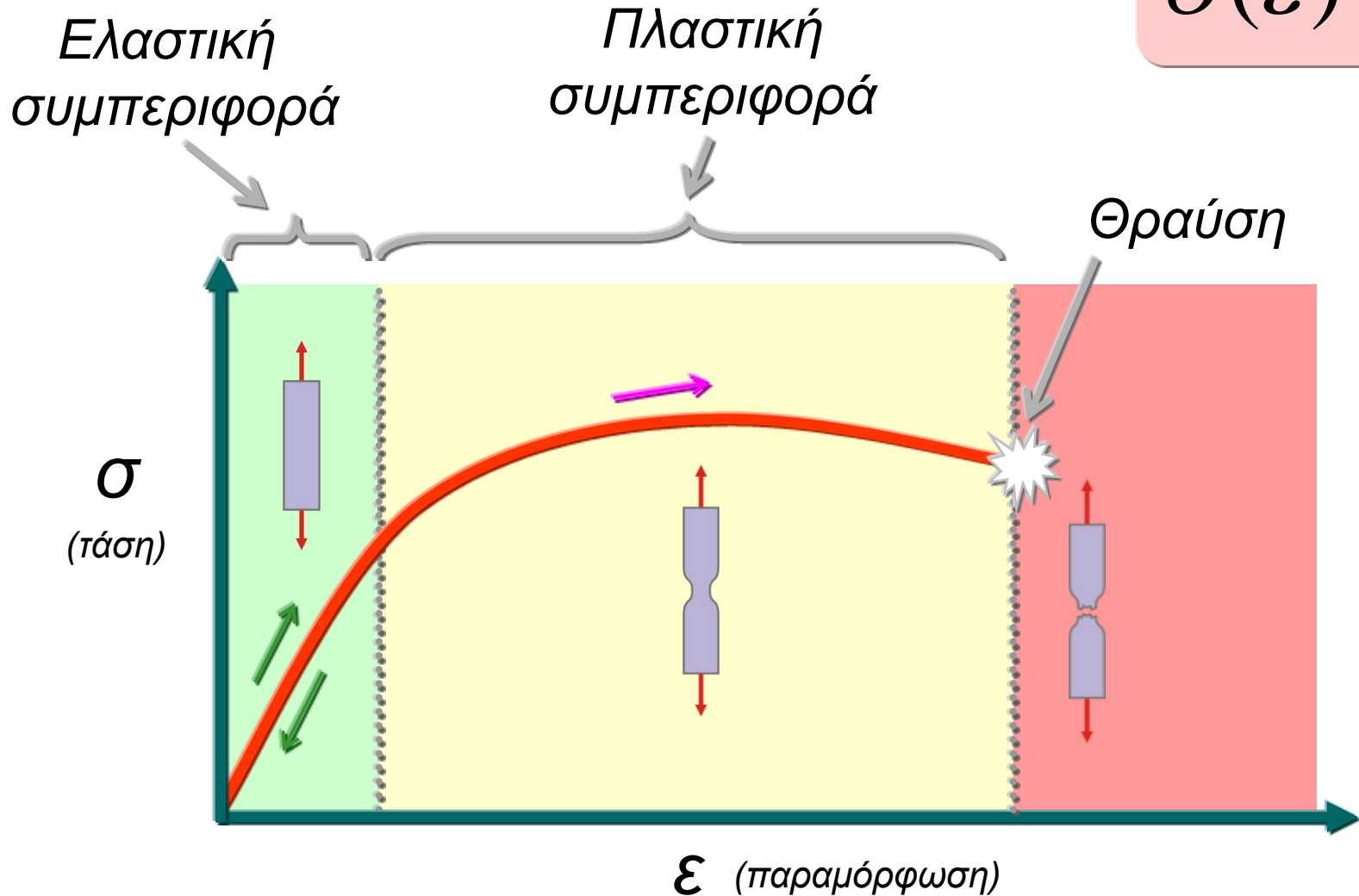
# Πως παραμορφώνεται ένα υλικό υπό συνεχώς αυξανόμενη εφελκυστική τάση;

Μηχανικές Ιδιότητες



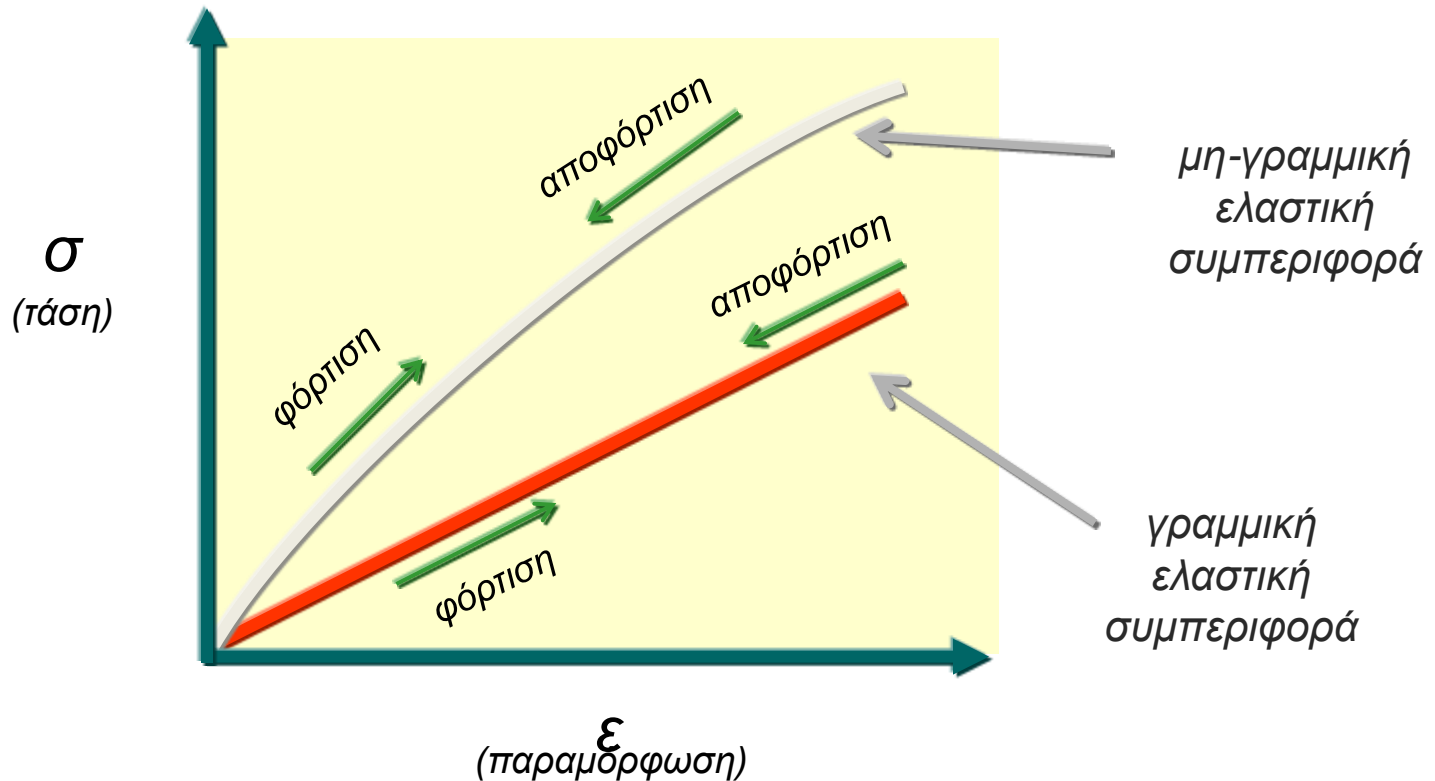
# Πως συνδέονται η τάση με την παραμόρφωση ;

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



# Ελαστική συμπεριφορά

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

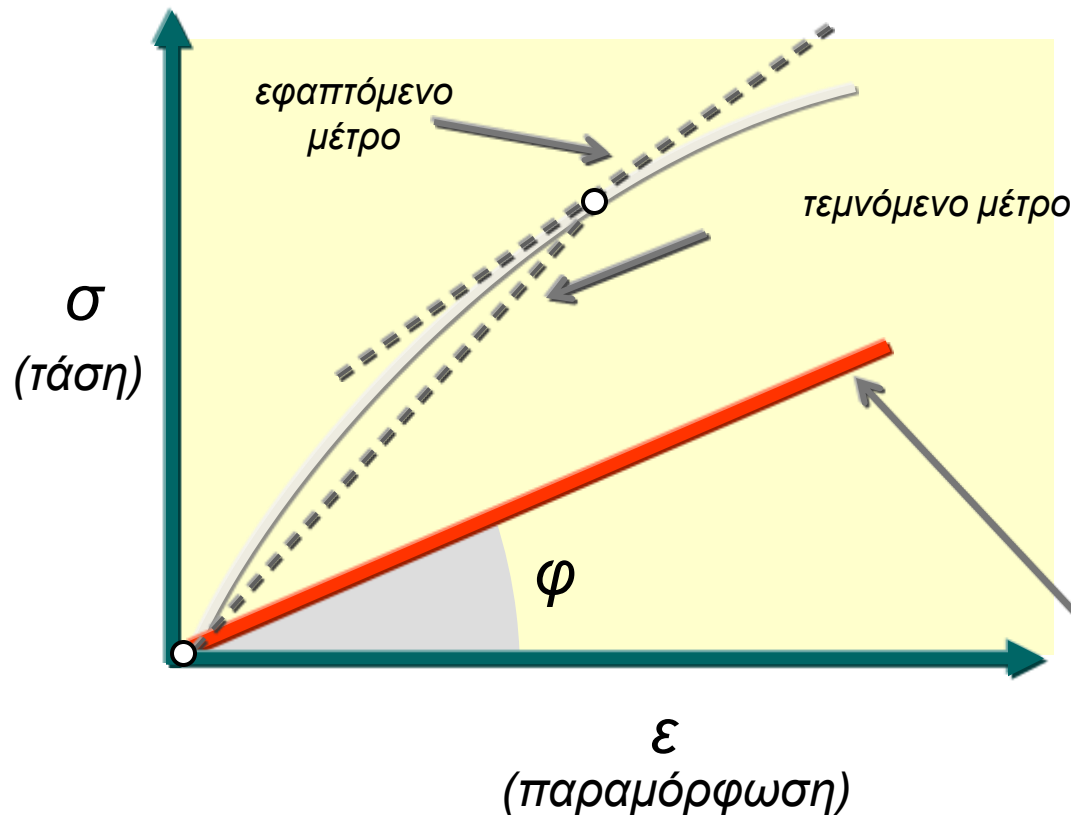


Στην γραμμική ελαστική συμπεριφορά η τάση είναι ανάλογη της παραμόρφωσης

$$\sigma \propto \varepsilon$$

# 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  $\sim 1200$

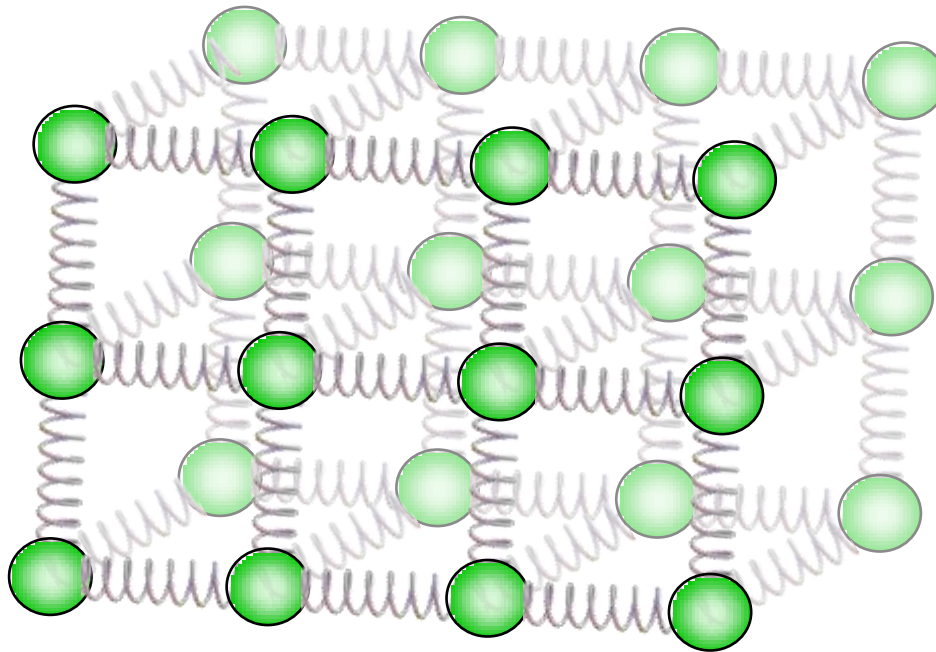
$E$  (GPa)



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

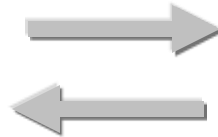
\*  $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$

# Ελαστική συμπεριφορά – ατομική κλίμακα



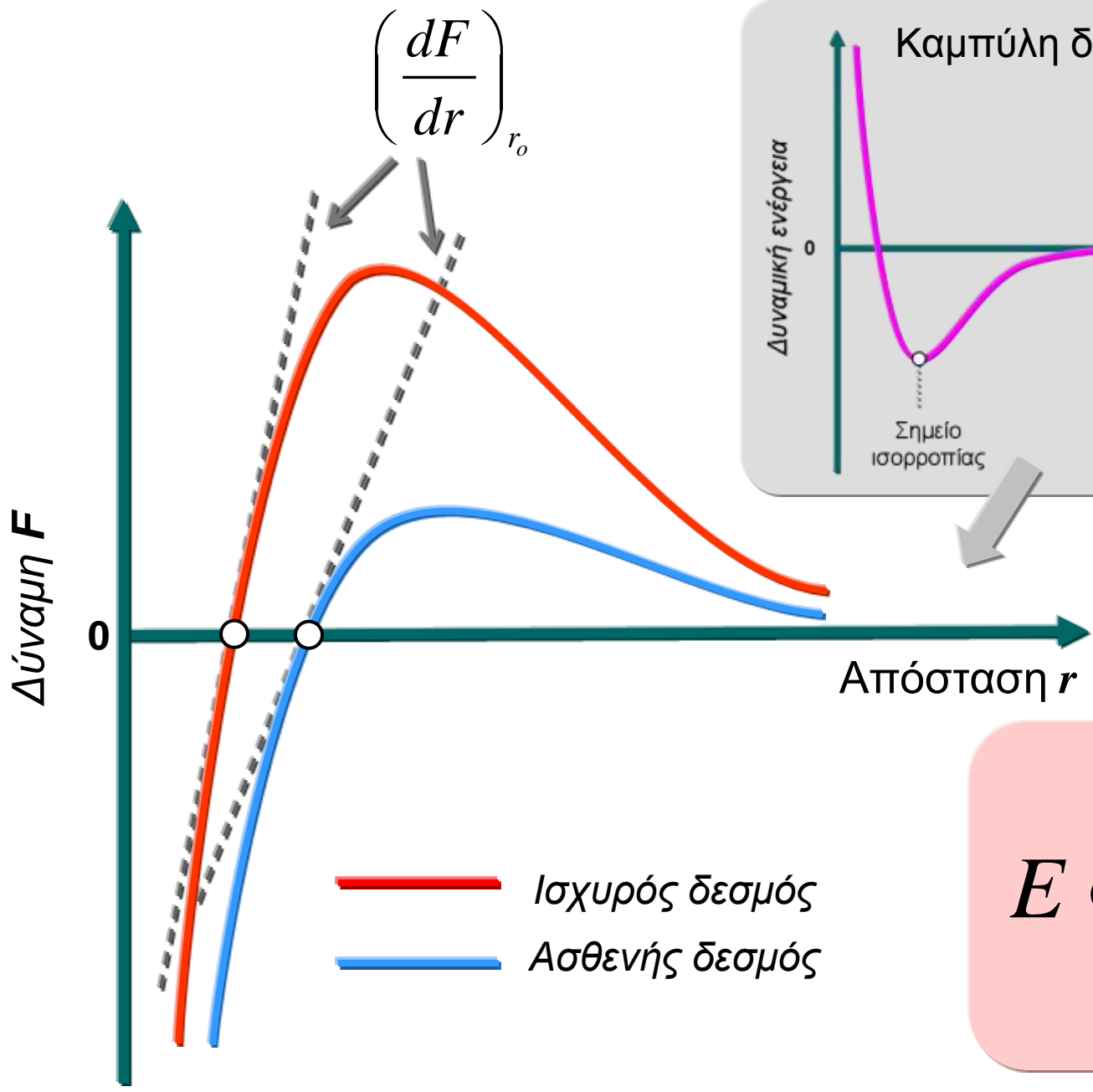
Μοντέλο ελατηρίων

Μακροσκοπική ελαστική παραμόρφωση



Αλλαγή στις διατομικές αποστάσεις





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



# Ανελαστικότητα

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

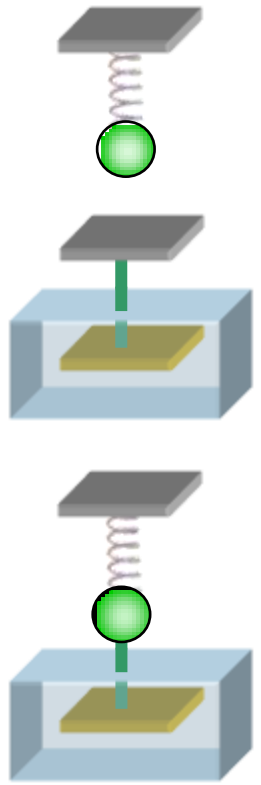
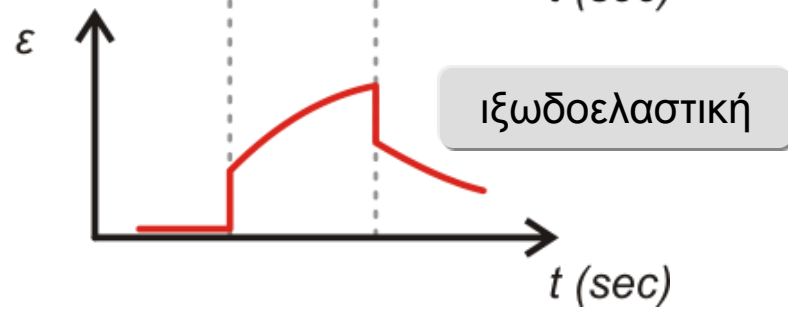
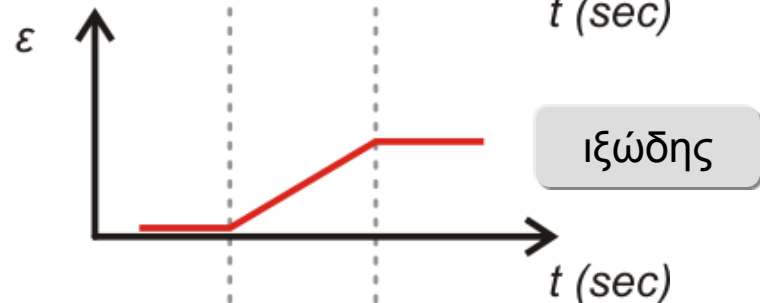
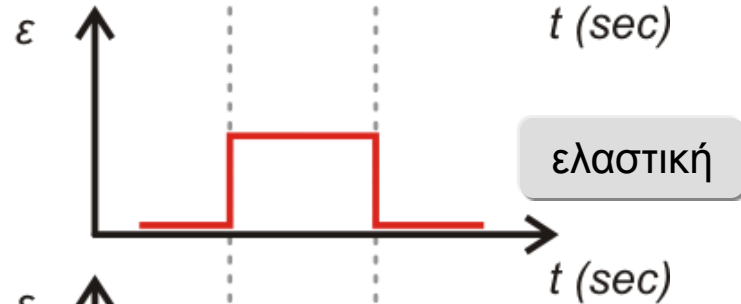
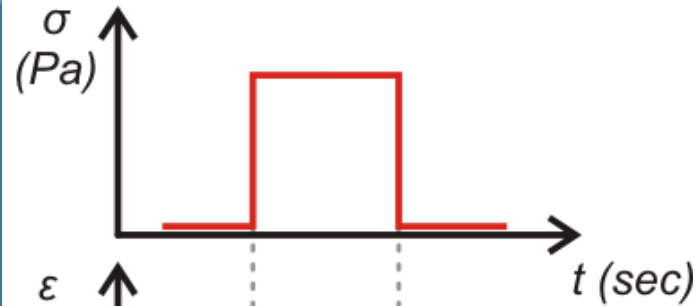
Κεραμικά

Πολύ μικρή

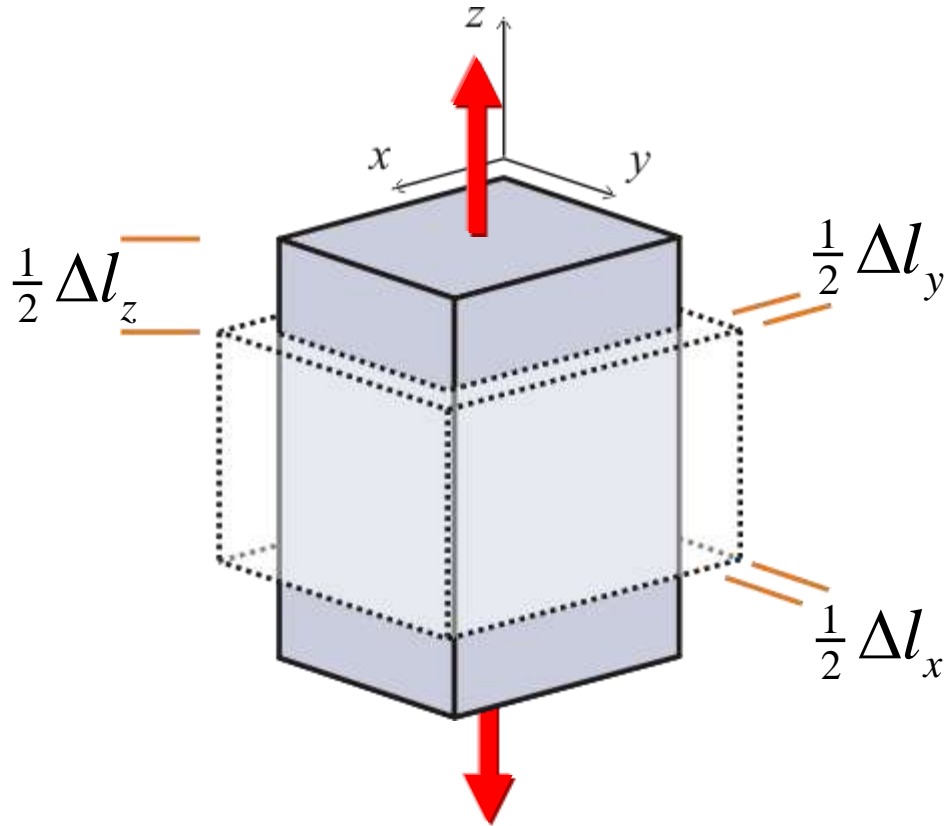
Μέταλλα

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

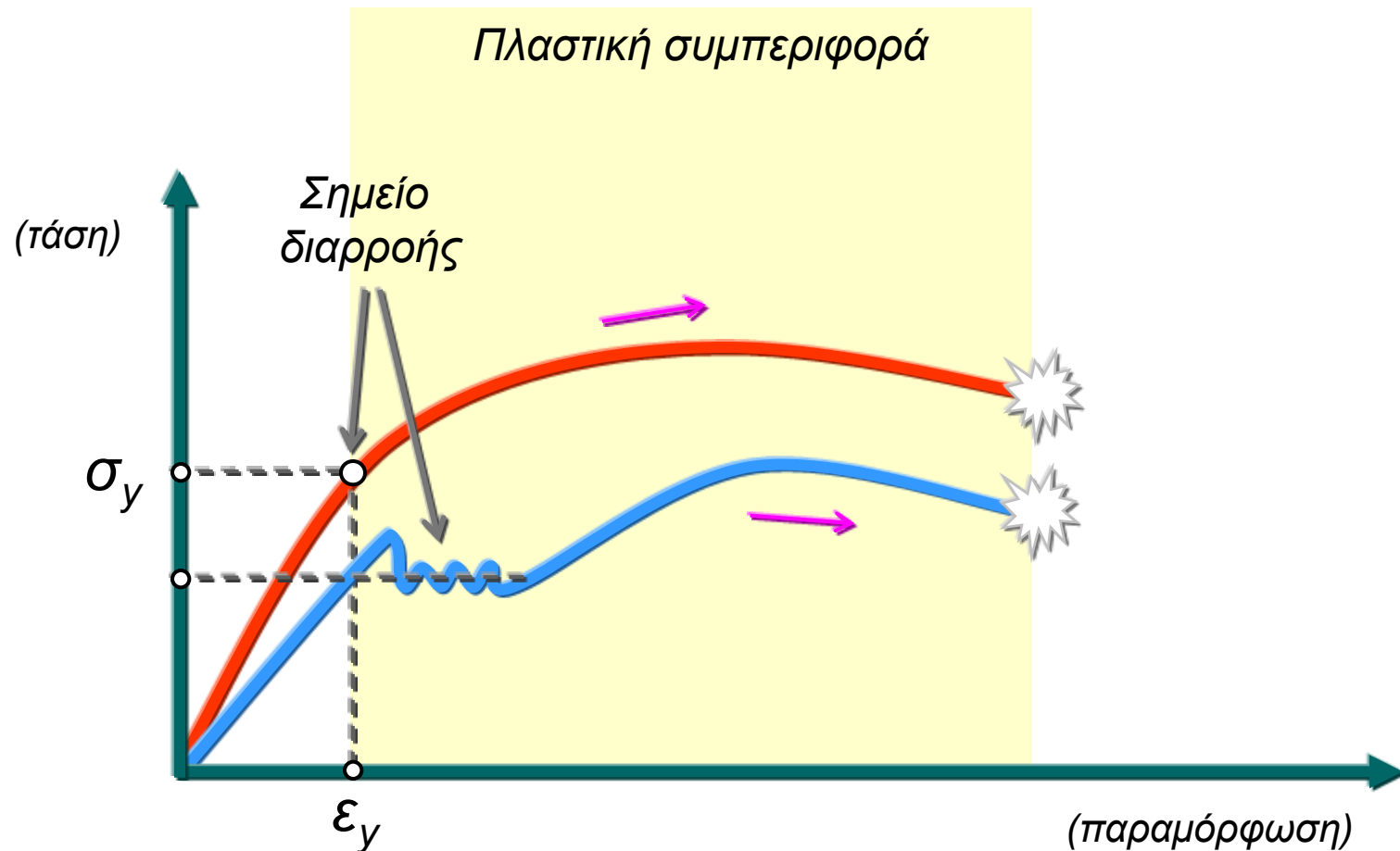
Λόγος  
Poisson

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

Μέτρο  
διάτμησης

# Πλαστική συμπεριφορά

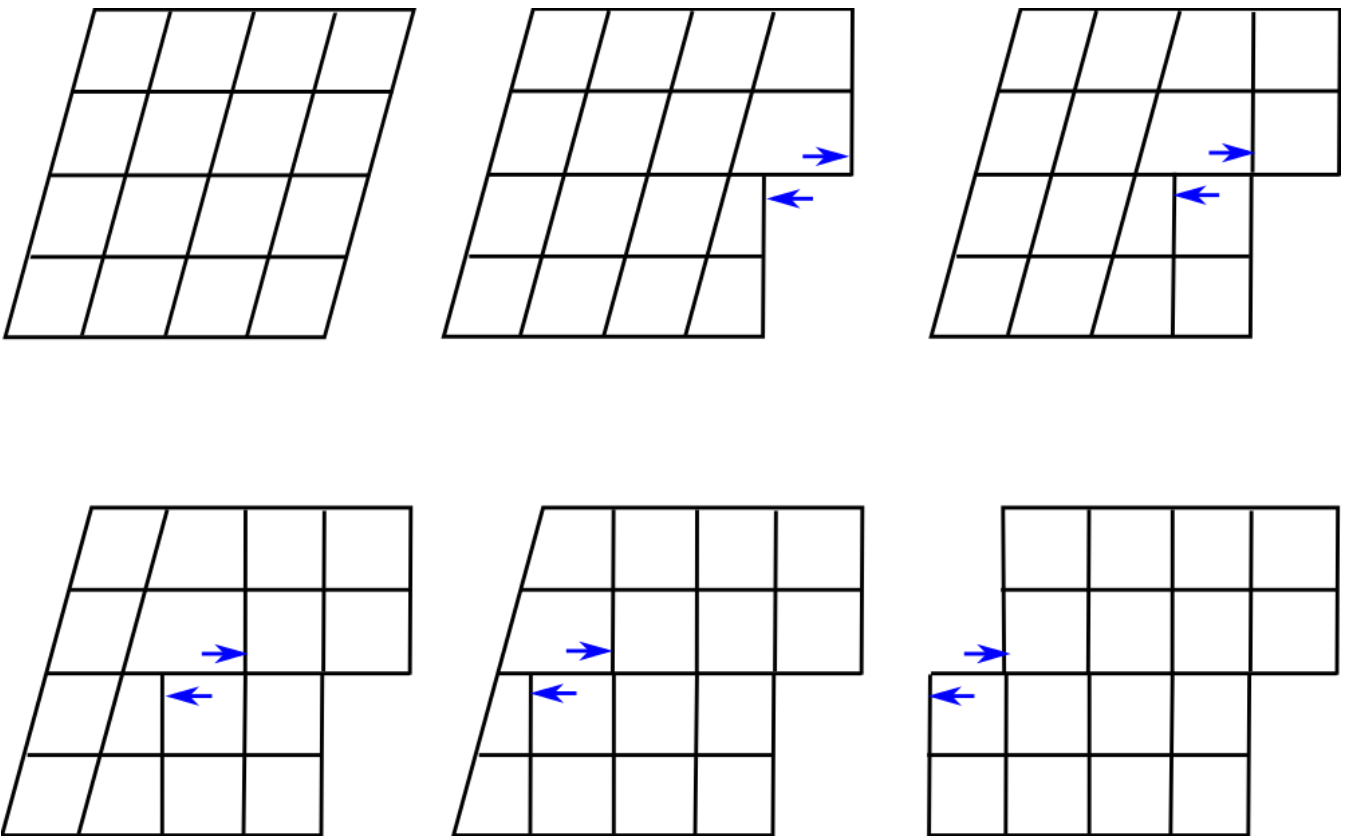
Η πλαστική παραμόρφωση είναι μόνιμη και μη-αντιστρέψιμη !  
(οφείλεται σε «σπάσιμο» και αναδιοργάνωση των δεσμών)



**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

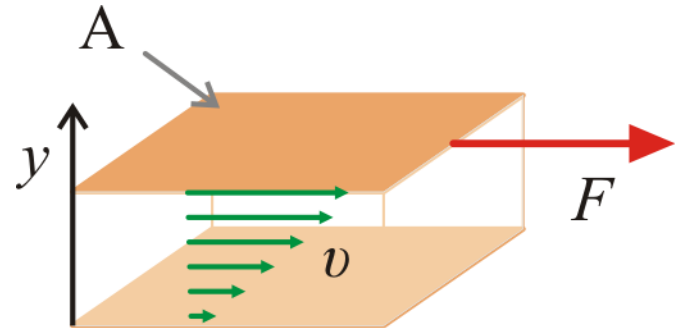
Δυσκολία στην ολίσθηση διότι υπάρχουν πολύ λίγα συστήματα ολίσθησης

**Μη-Κρυσταλλικά**

Μηχανισμός: ιξώδης ροή

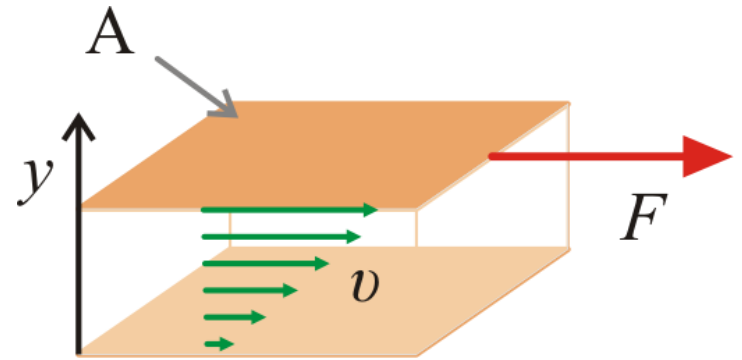
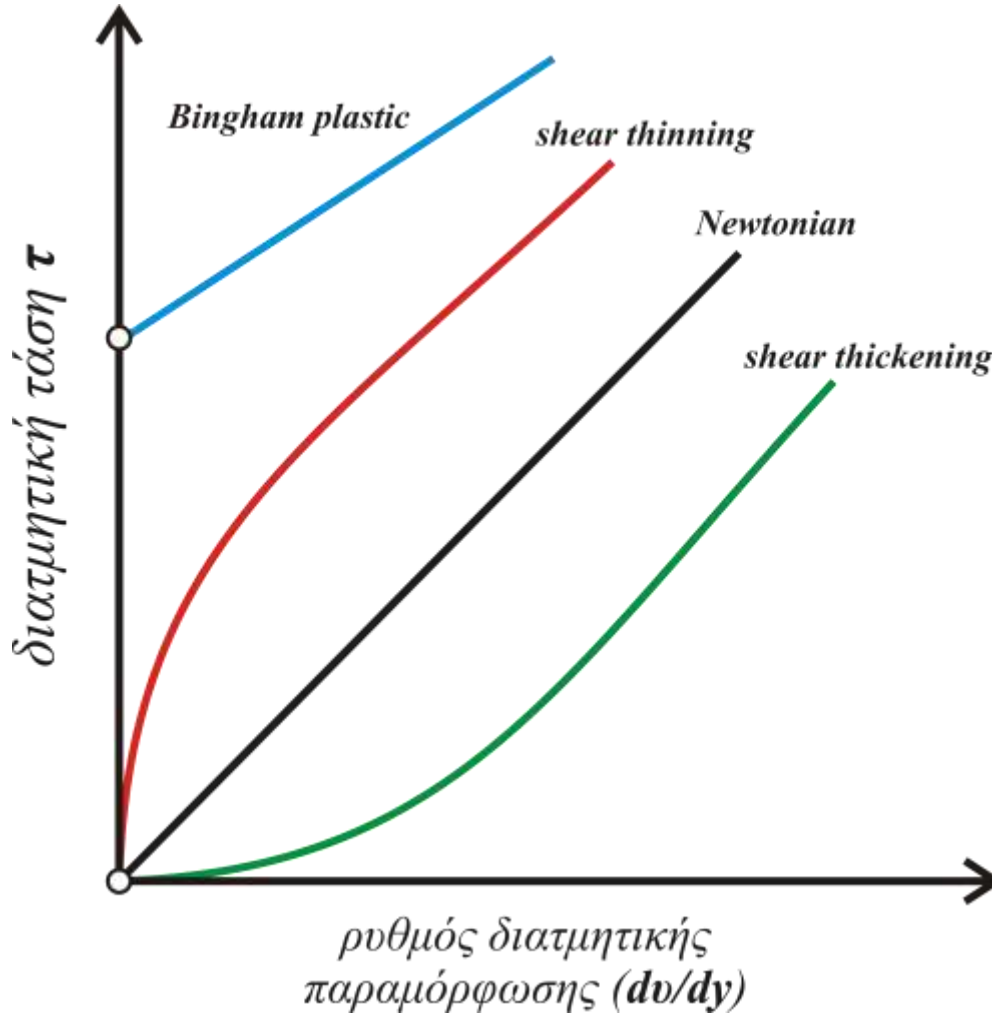
Ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι ανάλογος της τάσης

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



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

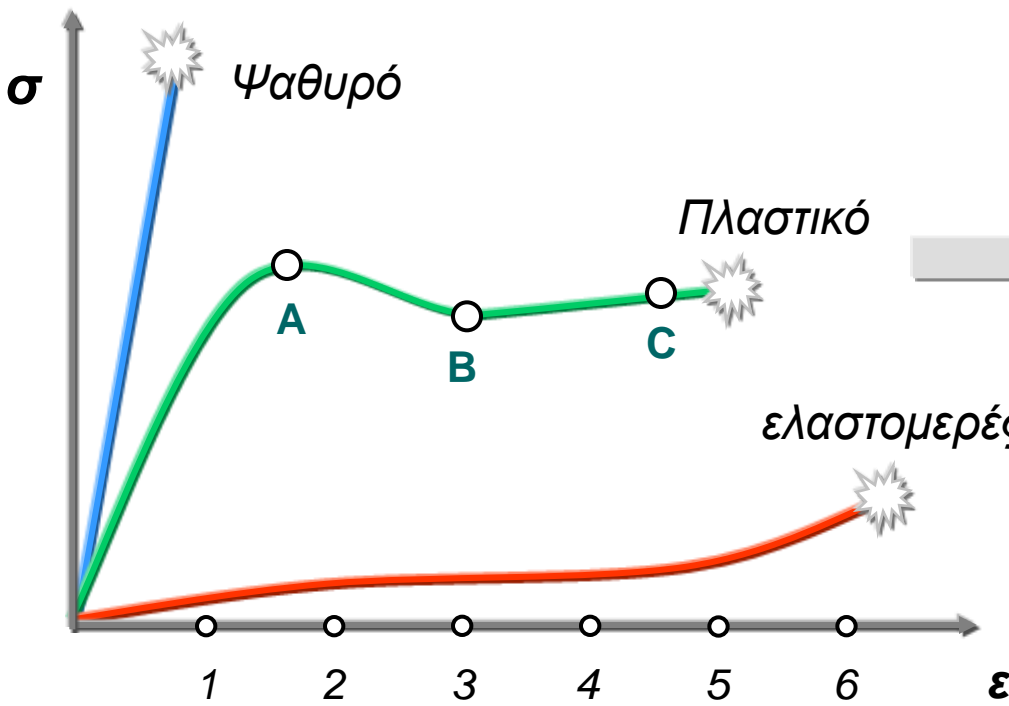
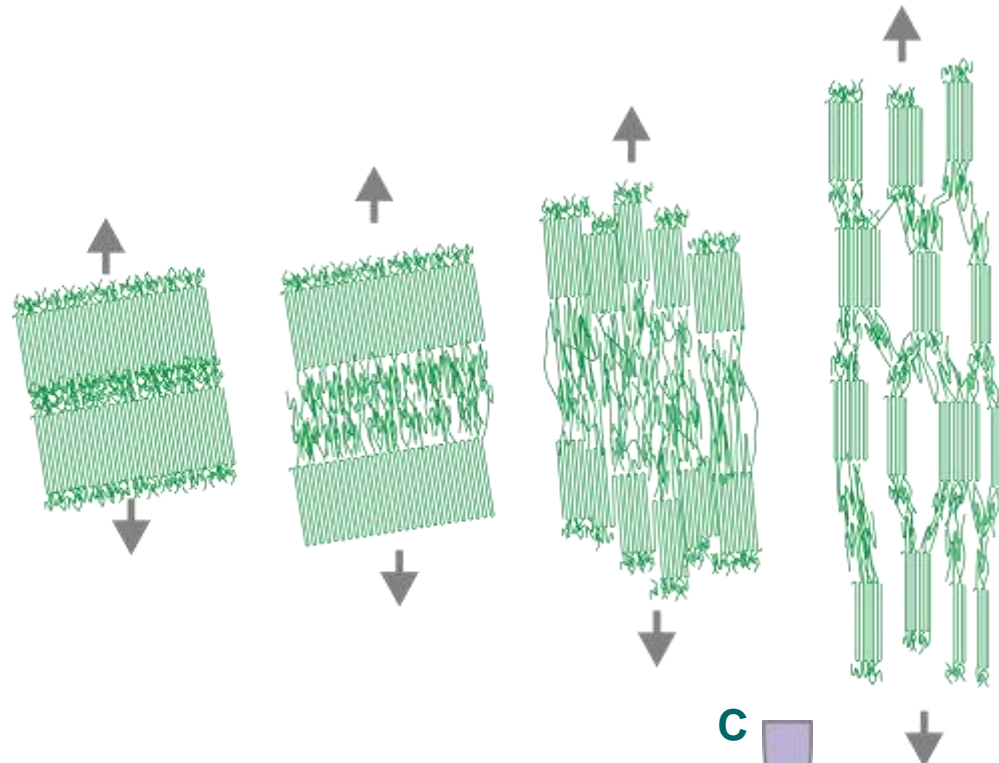
Αύξηση του ιξώδους καθώς αυξάνεται ο ρυθμός παραμόρφωσης

### Shear Thinning

Μείωση του ιξώδους καθώς αυξάνεται ο ρυθμός παραμόρφωσης

# Πολυμερή

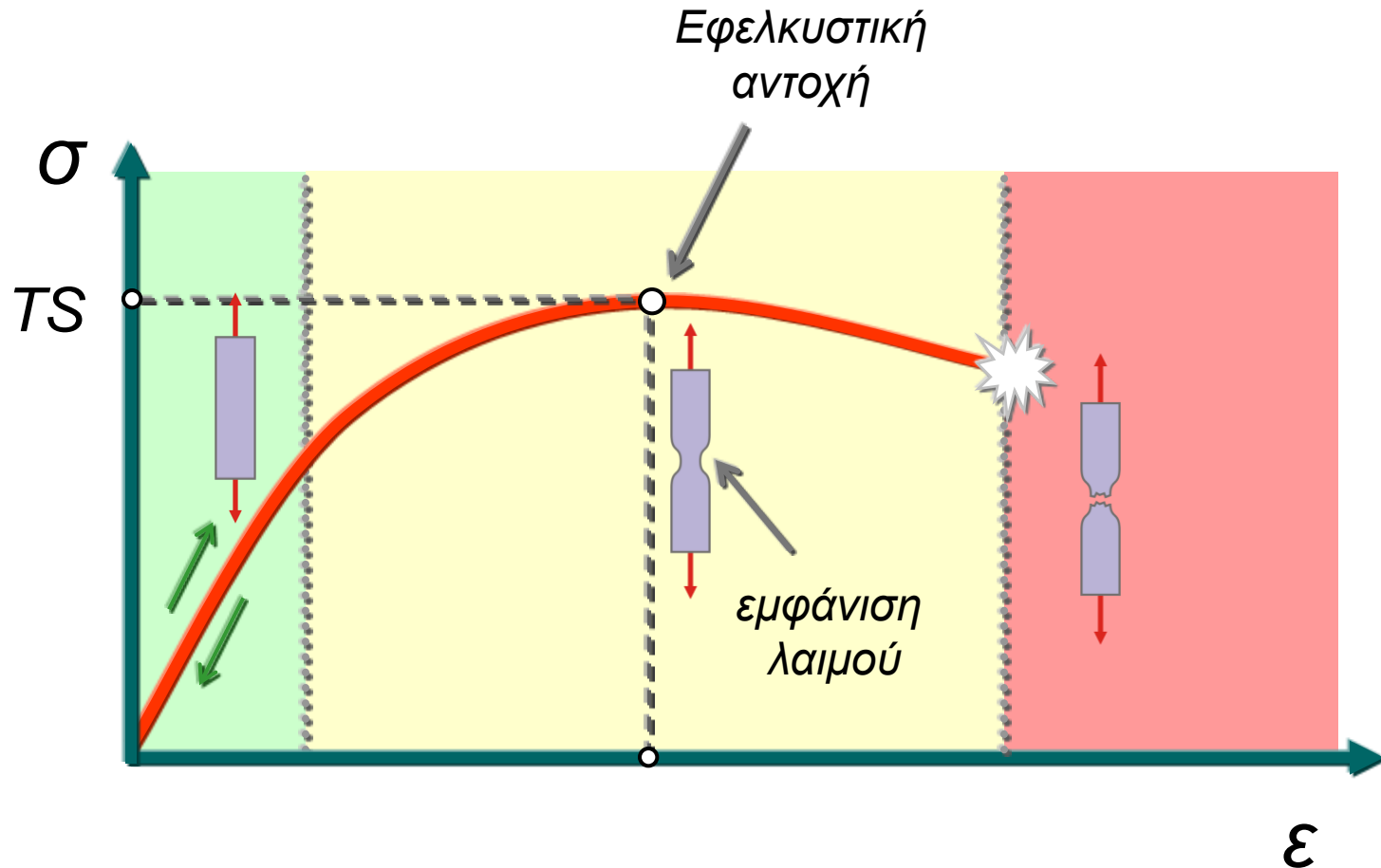
Αλληλεπίδραση μεταξύ  
φυλλωδών δομών  
και παρεμβαλλομένων  
άμορφων περιοχών



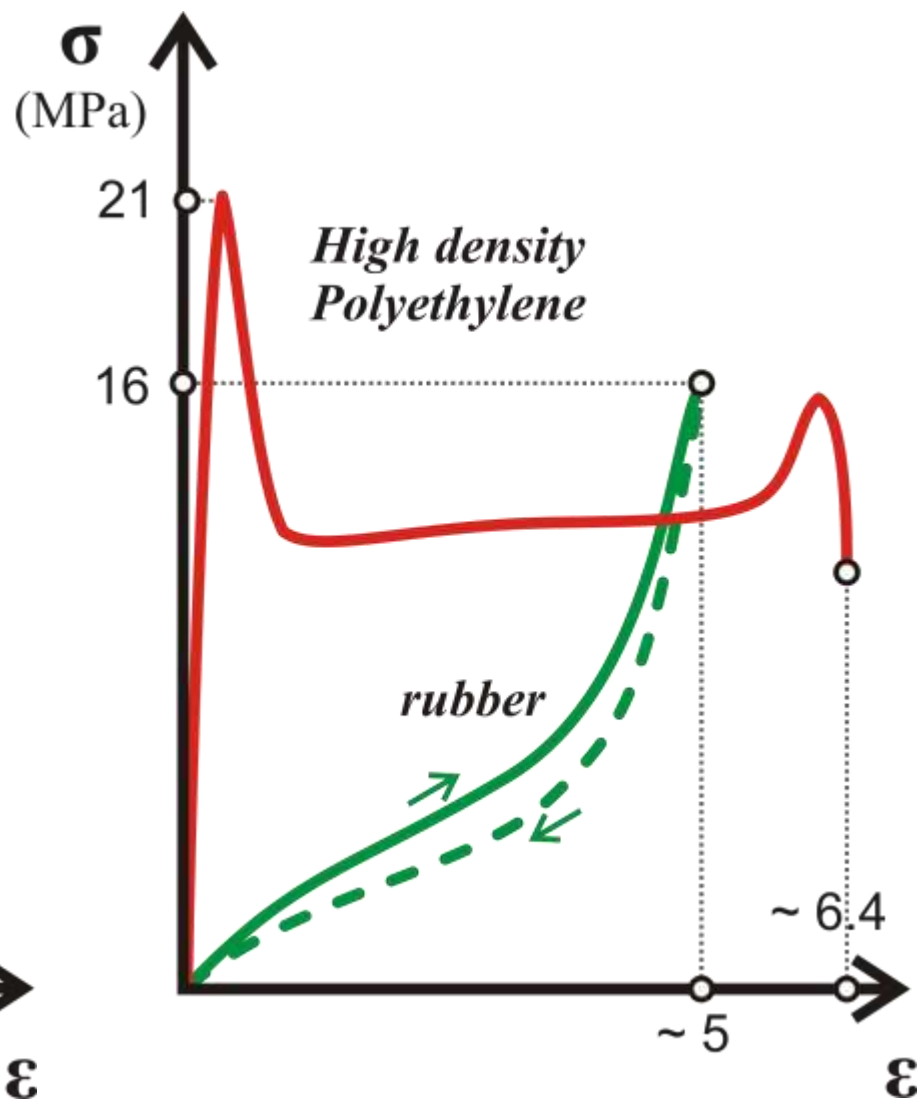
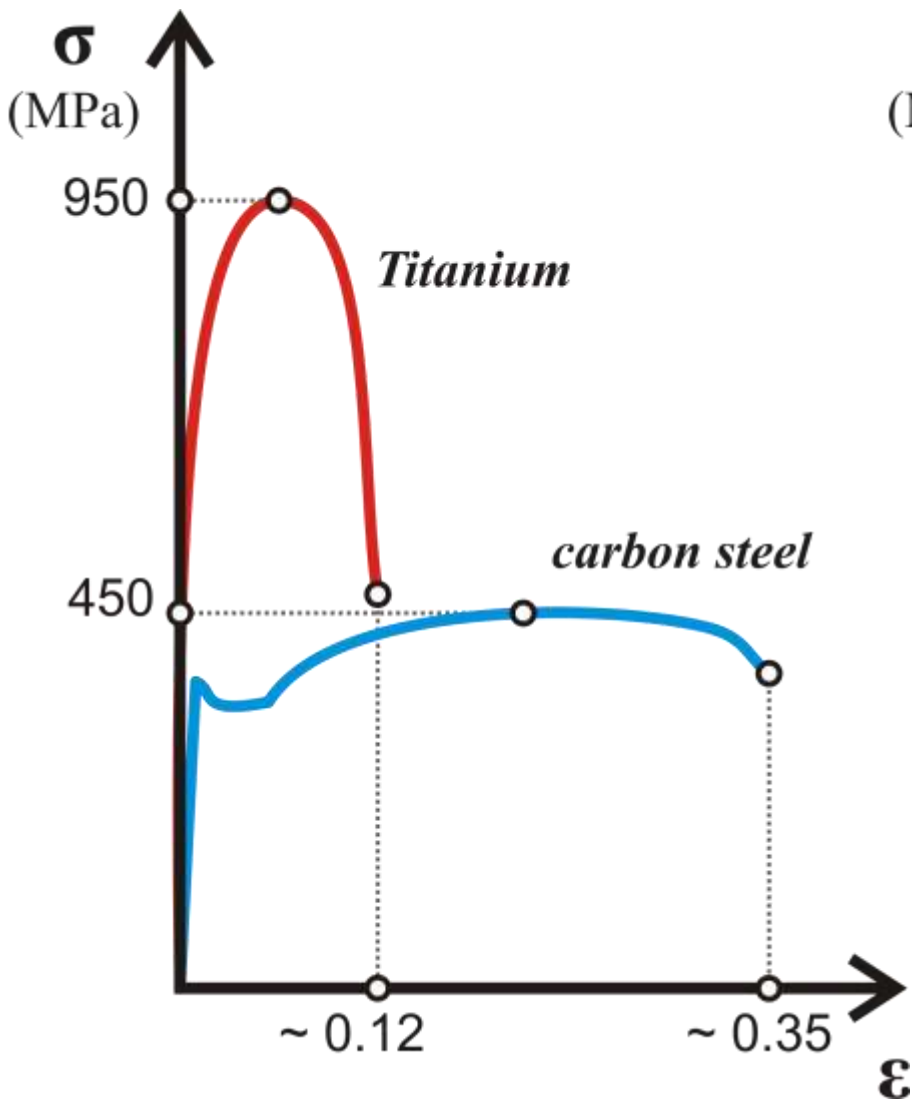
A B C

Αντίθετα από τα μέταλλα  
έχουμε διάδοση του λαιμού

# Αντοχή σε εφελκυσμό



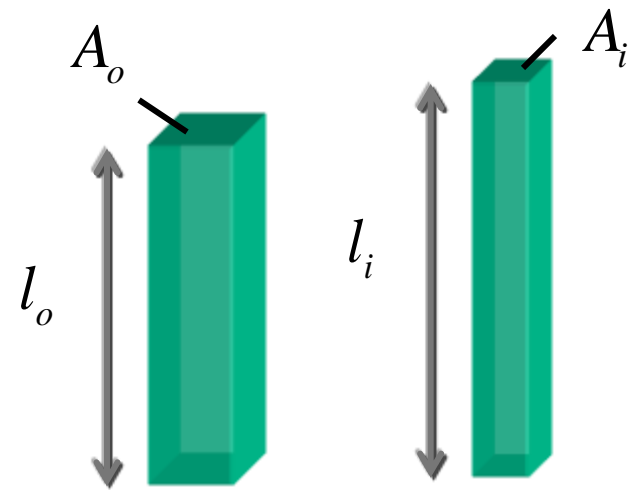
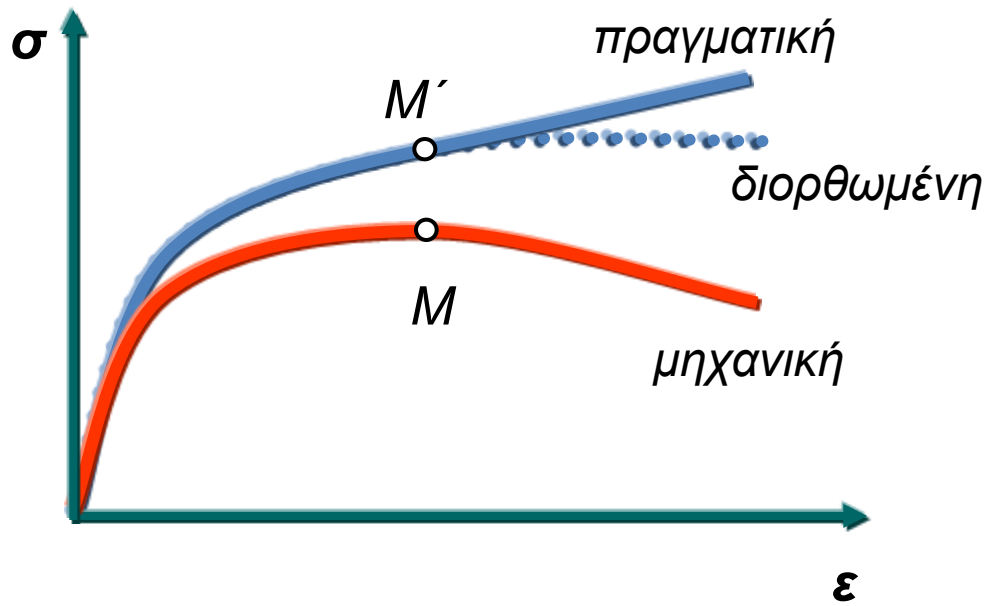




Τυπικές καμπύλες παραμόρφωσης – τάσης για μέταλλα και πολυμερή

# 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

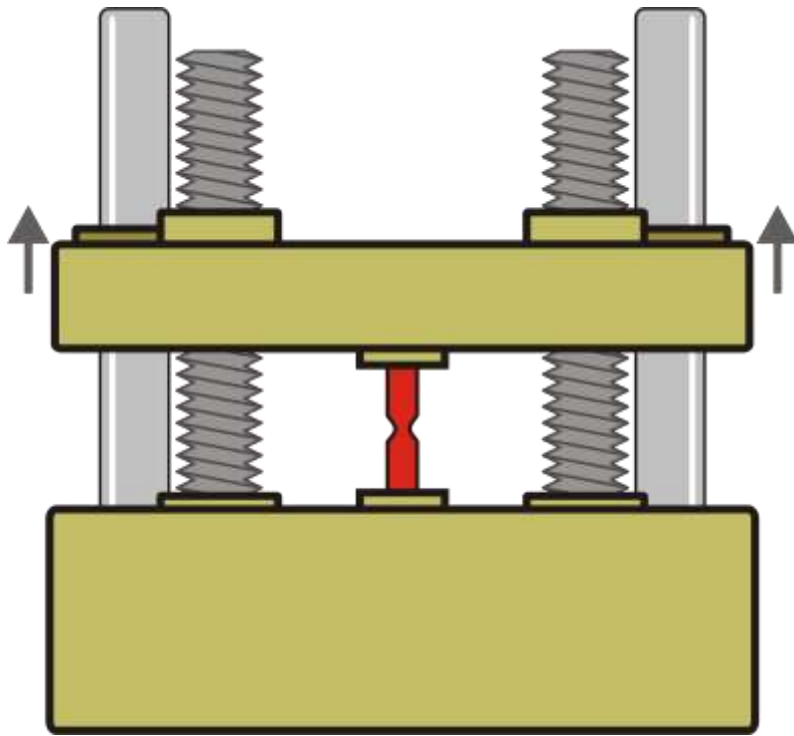
Η διαδικασία εφελκυσμού μπορεί να θεωρηθεί ως μια σειρά από διαδοχικές παραμορφώσεις:

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

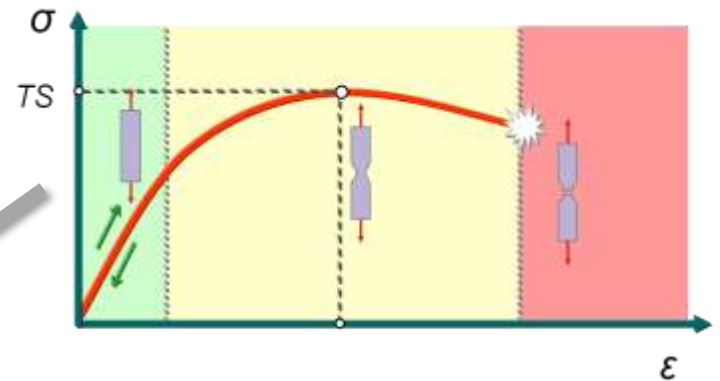
οπότε η συνολική πραγματική παραμόρφωση θα είναι:

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

# 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

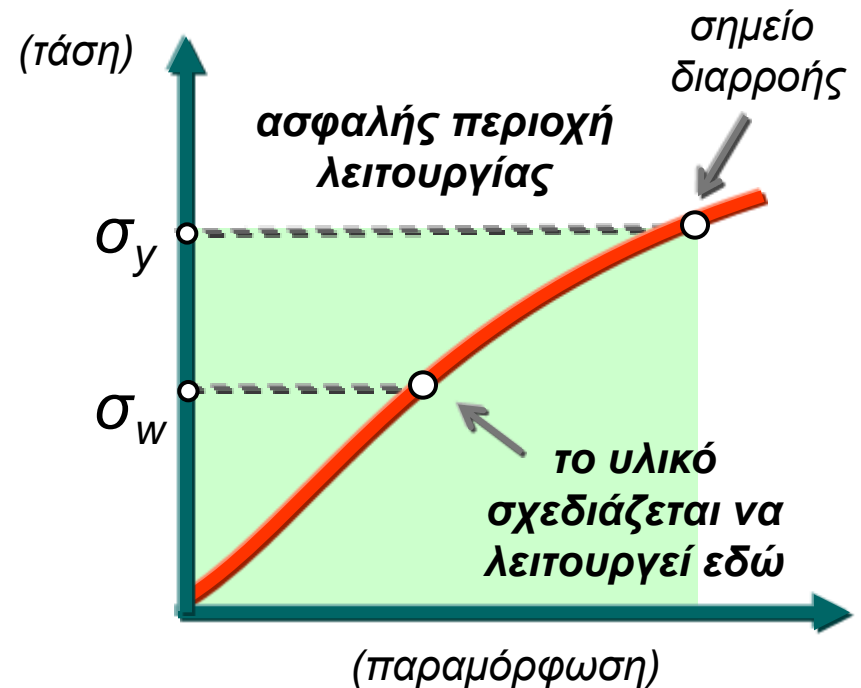
Σε κατασκευή τα υλικά πρέπει να καταπονούνται σε τέτοιο βαθμό που να λειτουργούν πάντα στην **ελαστική περιοχή**

$$\sigma_w \equiv \frac{F}{S} \leq \sigma_y$$

τάση εργασίας      τάση διαρροής

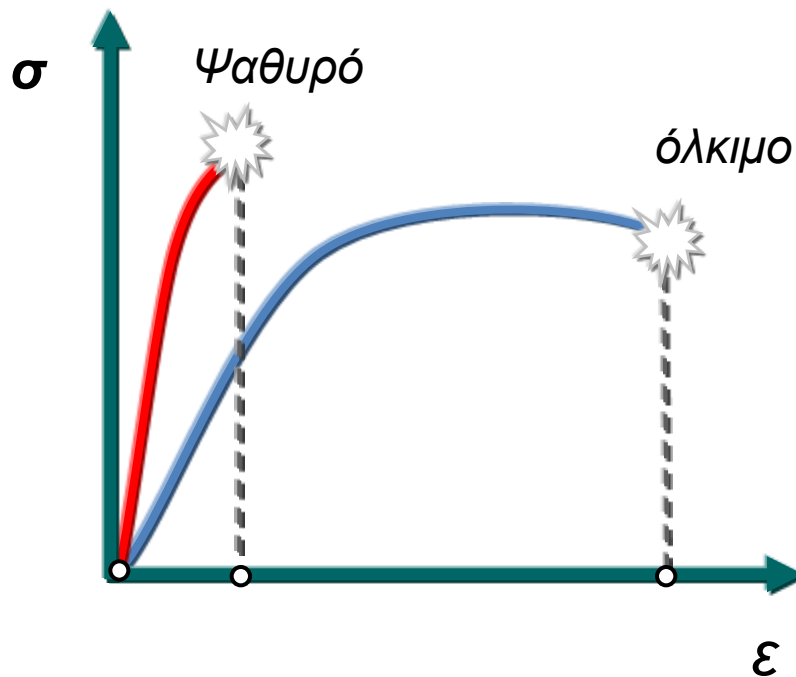
Ως παράγοντα ασφαλείας **N** ορίζουμε τον λόγο:

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



# Ολκιμότητα (Ductility)

Μέτρο του βαθμού πλαστικής παραμόρφωσης  
έως την θραύση



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

εξαρτάται από το μήκος

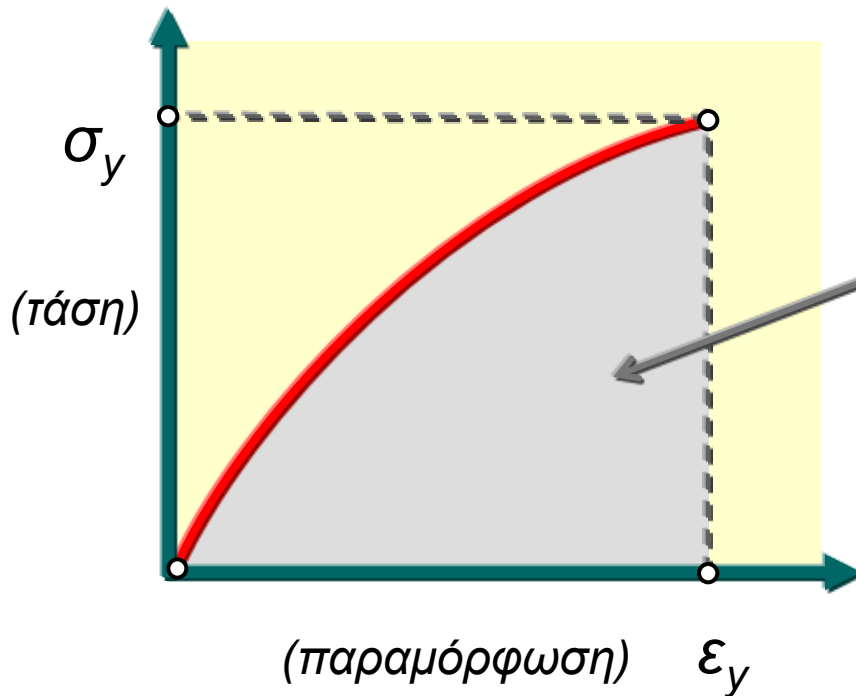
$$RA = \frac{A_o - A_f}{A_o}$$

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

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

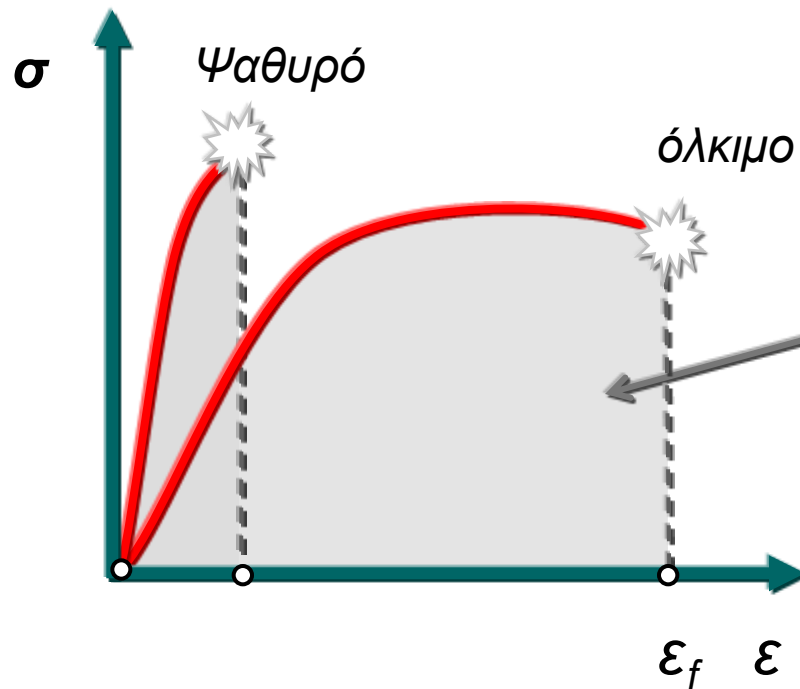
Μονάδες πυκνότητας ενέργειας:

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



# 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:

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

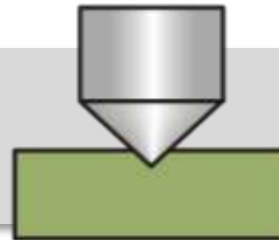
# Σκληρότητα (hardness)

Μέτρο της αντίστασης σε τοπική παραμόρφωση

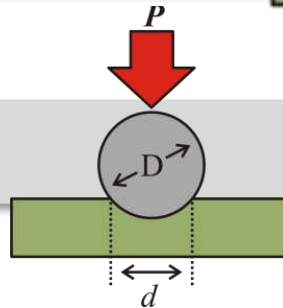


Σκληρόμετρο Rockwell  
User:Metrollberica/ Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0

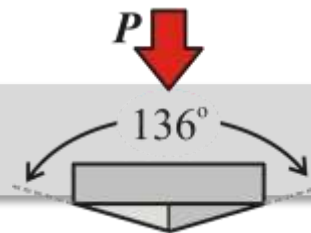
Rockwell and Superficial Rockwell



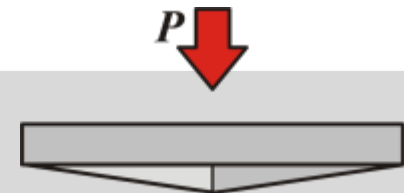
Brinell



Vickers



Knoop

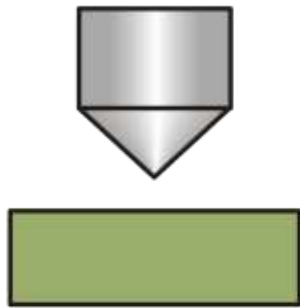


Micro-hardness

# Rockwell & Superficial Rockwell

Διαφορά βάθους διείσδυσης μικρού και μεγάλου φορτίου

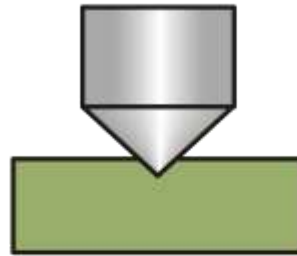
κωνική ακίδα  
ή ατσάλινο σφαιρίδιο



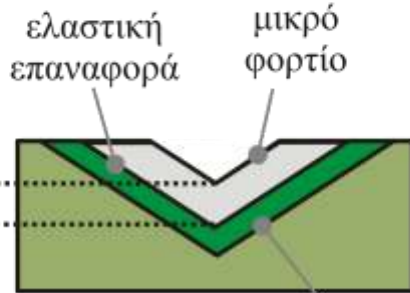
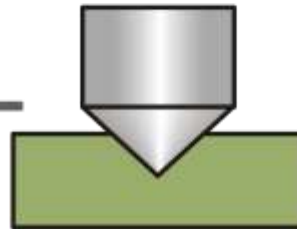
δείγμα

Μικρό φορτίο

Rockwell: 10 kg  
Επιφ. Rockwell: 3 kg



Μεγάλο φορτίο



μεγάλο φορτίο

Rockwell { 60 kg  
100 kg  
150 kg

Superficial Rockwell { 15 kg  
30 kg  
45 kg

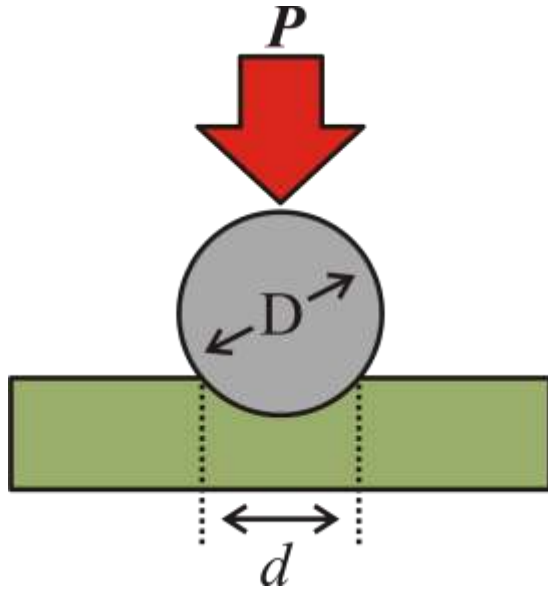
Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα της **άμεσης εκτίμησης της σκληρότητας** χωρίς χρήση υπολογισμών. Συνήθως χρησιμοποιείται στην **μηχανική** και την **μεταλλουργία**.

# 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).

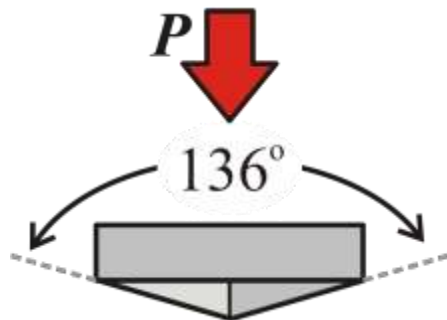
**Πλεονεκτήματα:** Καλύπτει όλη την περιοχή σκληροτήτων

**Μειονεκτήματα:** είναι αργή, χρειάζεται μικροσκόπιο

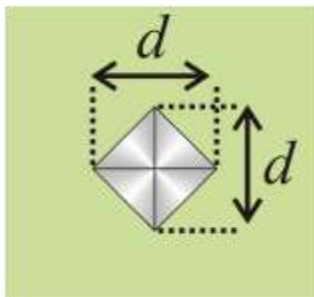
# Vickers

*microhardness*

Μέτρηση αποτυπώματος διαμαντένιας πυραμίδας και υπολογισμός μέσω σχέσης



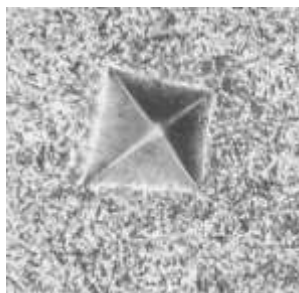
αποτύπωμα



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



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).

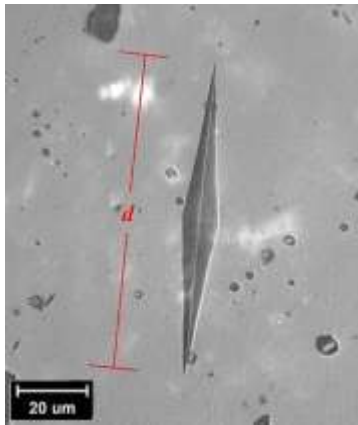
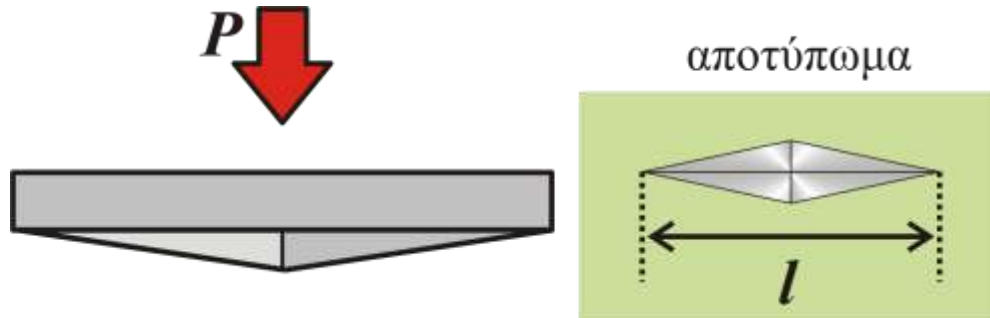
**Πλεονεκτήματα:** Ιδανική για μικρά ή λεπτά δείγματα.

**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).

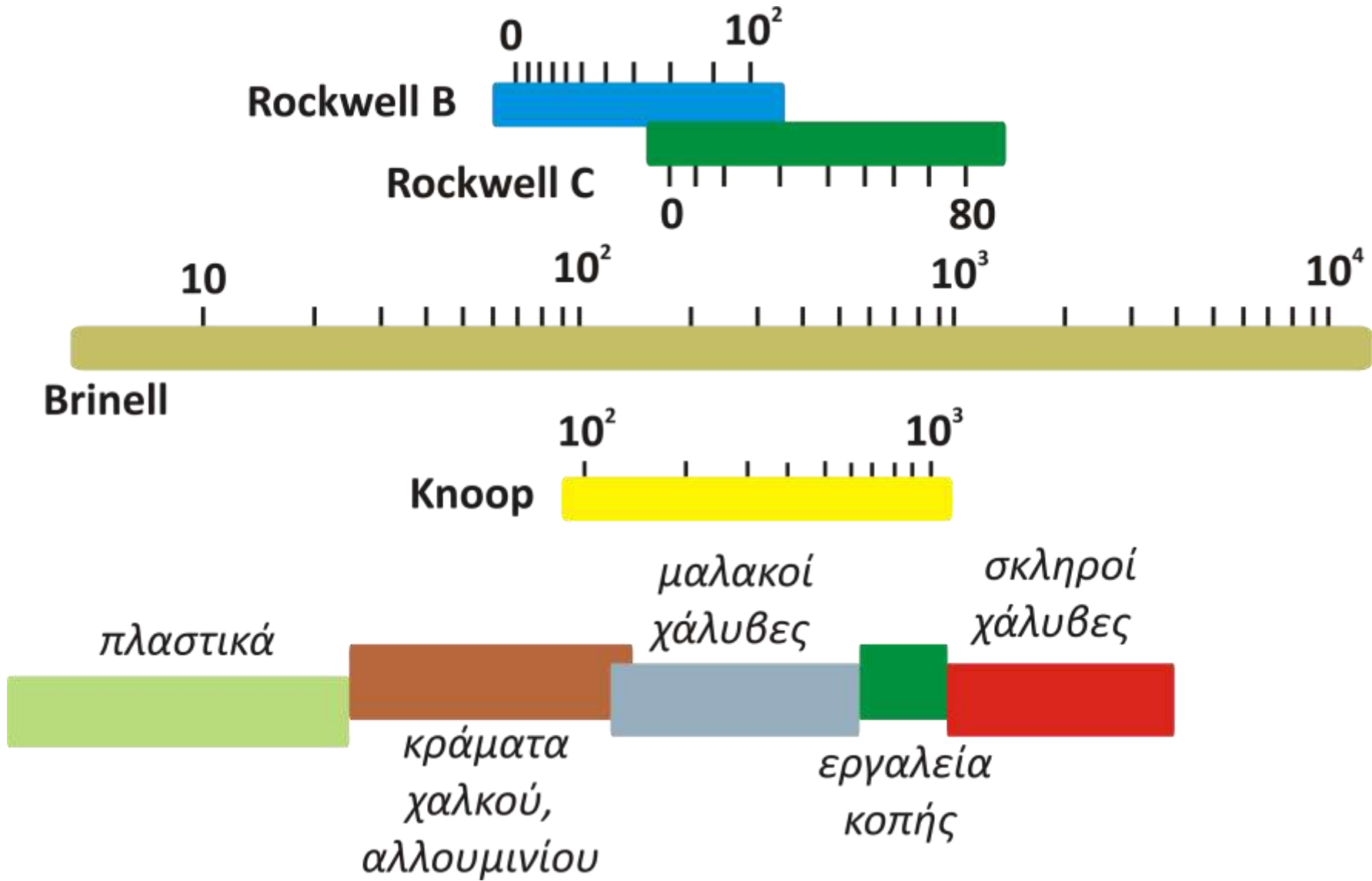
Το φορτίο παραμένει για περίπου 10-15 sec.

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

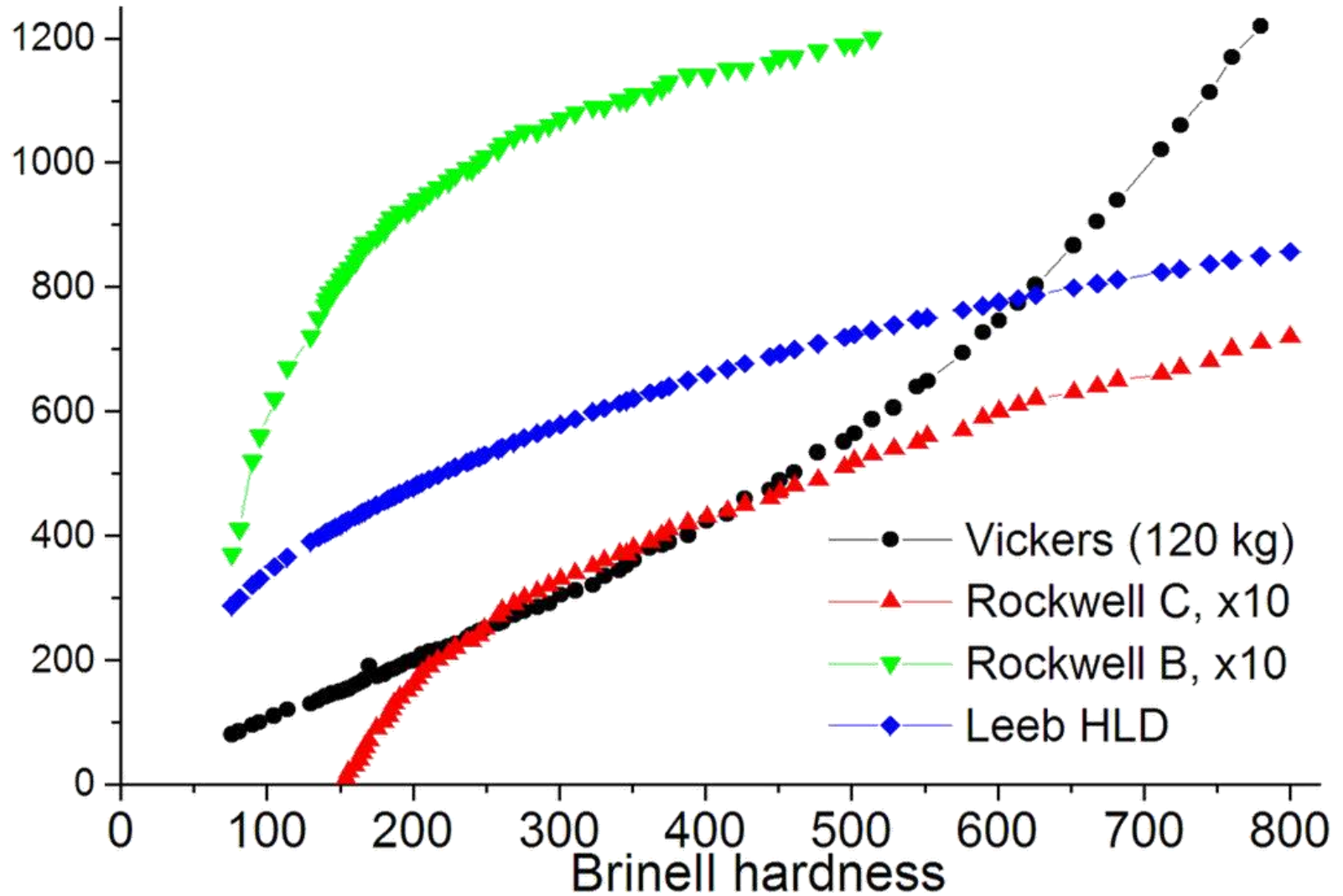
Η διάμετρος  $l$  του αποτυπώματος μετρείται οπτικά (με μικροσκόπιο).

**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