



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Υλικά

Ενότητα 7: Πλαστική συμπεριφορά άμορφων υλικών και πολυμερών

*Νικόλαος Ζαχαρόπουλος
Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης
Προϊόντων και Συστημάτων*



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- 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 Αιγαίου**» 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



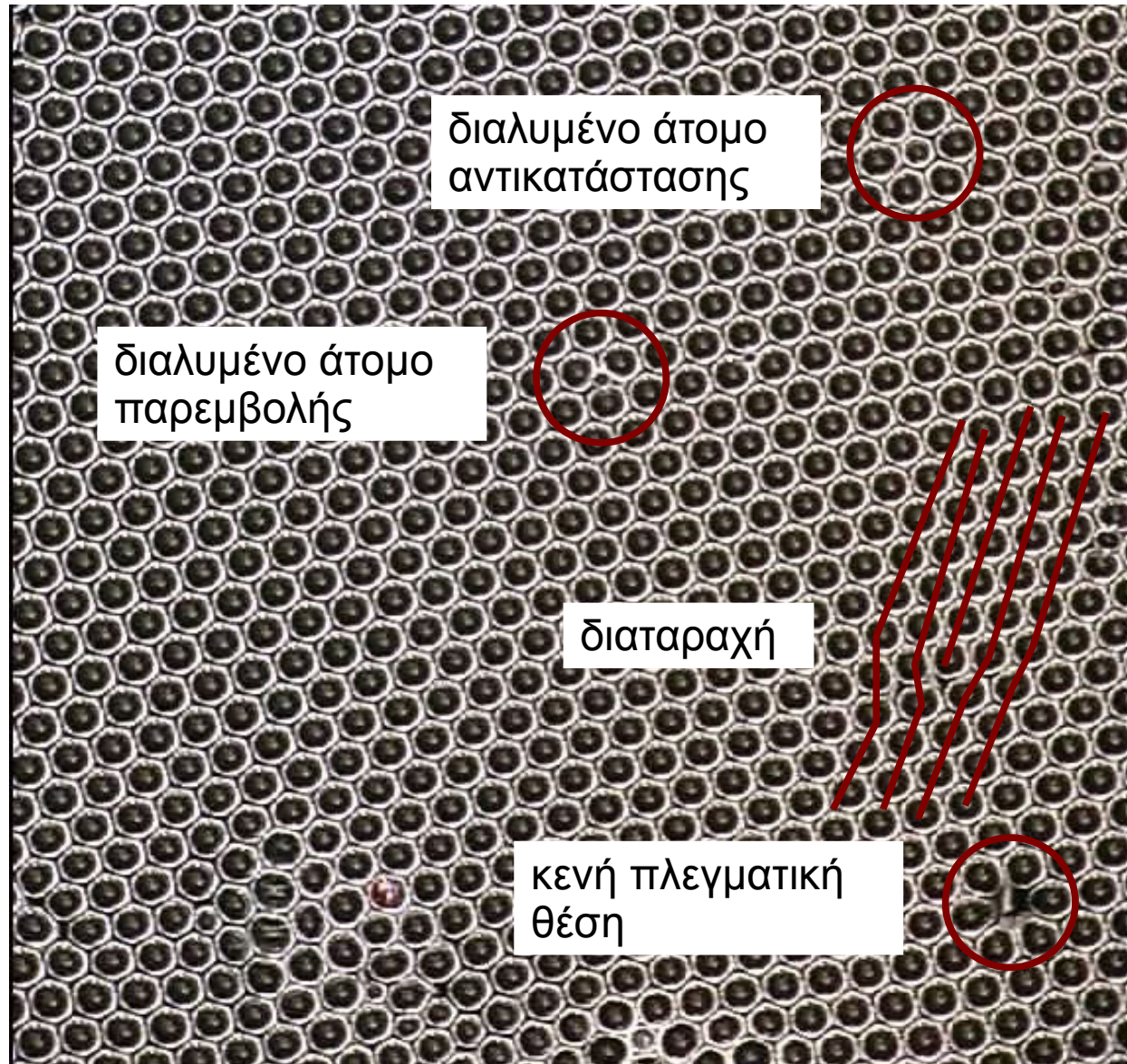
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

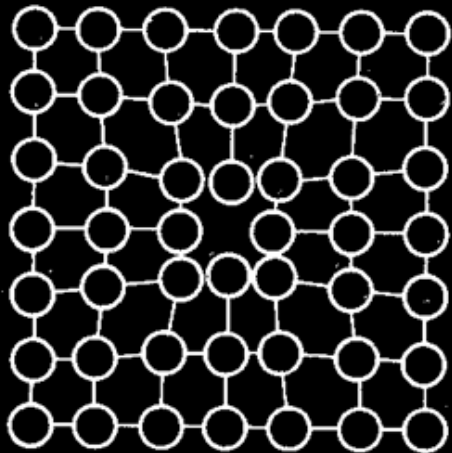


Ατέλειες πλέγματος

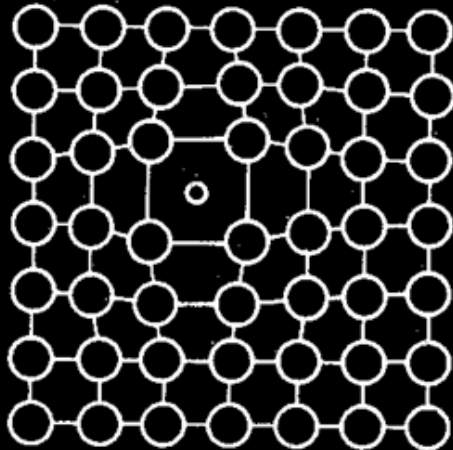
διδιάστατος “κρύσταλλος” φυσαλίδων (bubble raft)



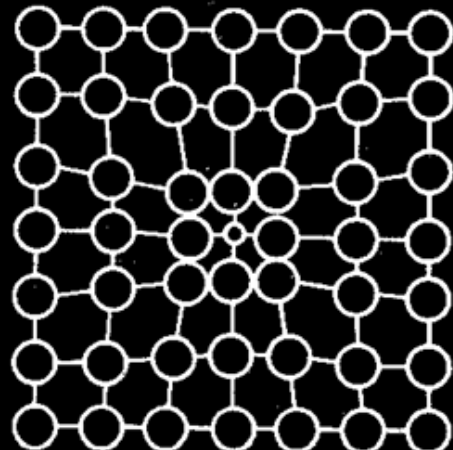
Σημειακές ατέλειες



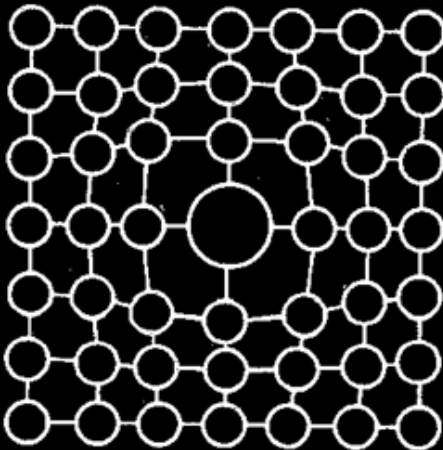
(a)



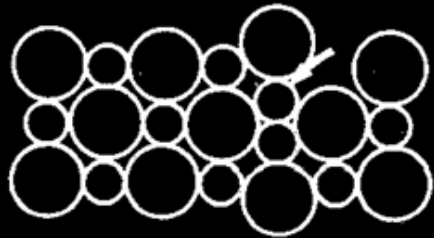
(b)



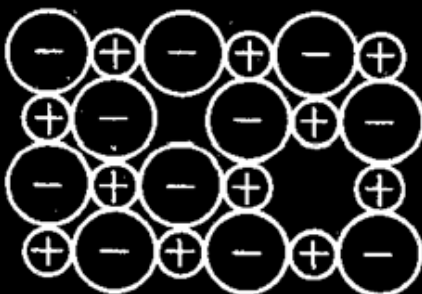
(c)



(d)



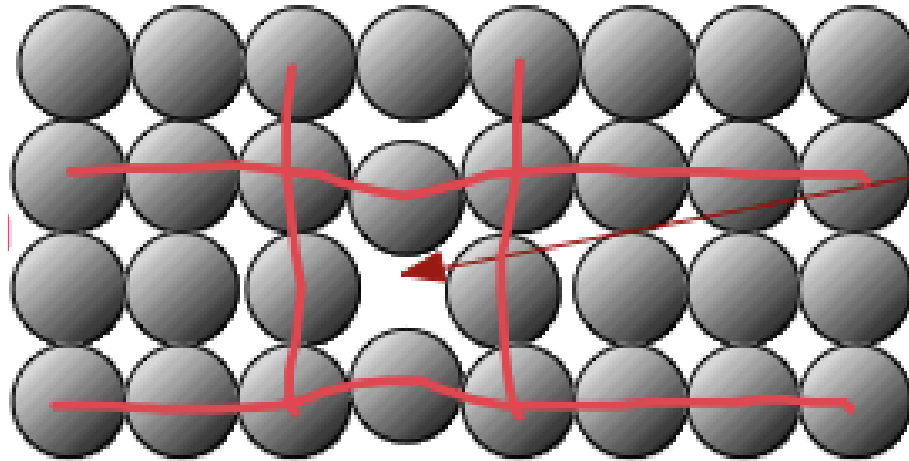
(e)



(f)

Καθαρό μέταλλο : κενές πλεγματικές θέσεις και άτομα αυτοπαρεμβολής

ελαστική παραμόρφωση κρυσταλλογραφικών επιπέδων



κενή πλεγματική θέση

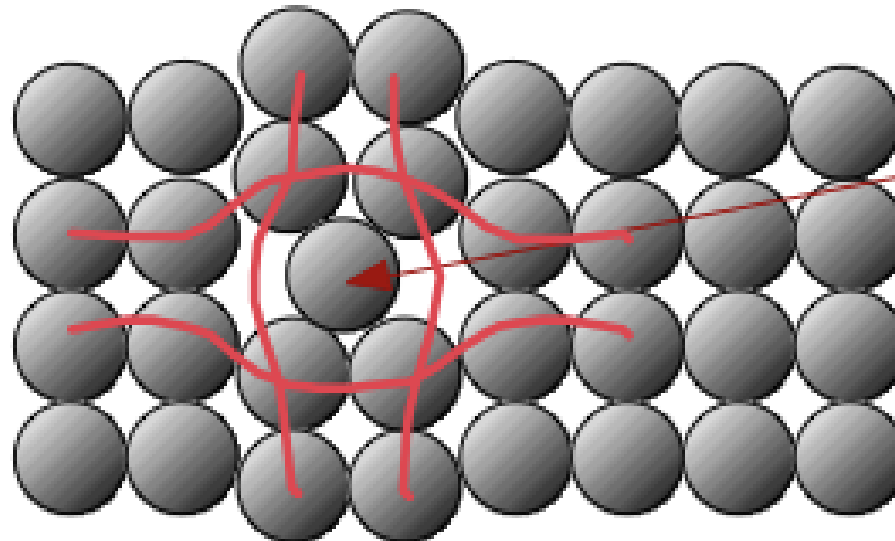
$$\frac{N_D}{N} = \exp\left(-\frac{Q_D}{kT}\right)$$

N_D : αριθμός κενών

N : αριθμός πλεγματικών

Q_D : ενέργεια ενεργοποίησης

ελαστική παραμόρφωση κρυσταλλογραφικών επιπέδων



άτομο αυτοπαρεμβολής :

πολύ μικρότερη πιθανότητα σχηματισμού λόγω υψηλής ενέργειας

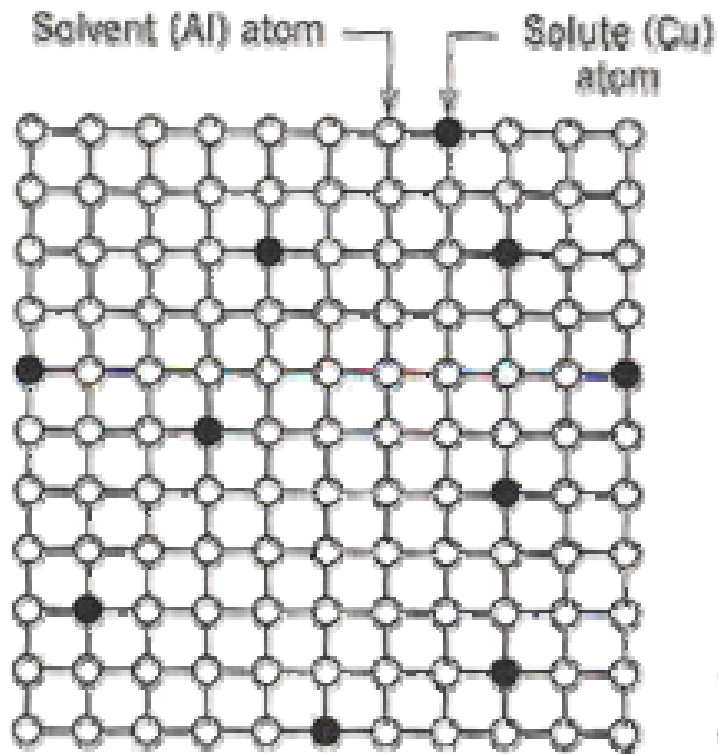
Προσμίξεις

πρόσμιξη : προσθήκη ατόμου διαφορετικού στοιχείου από αυτό της μήτρας

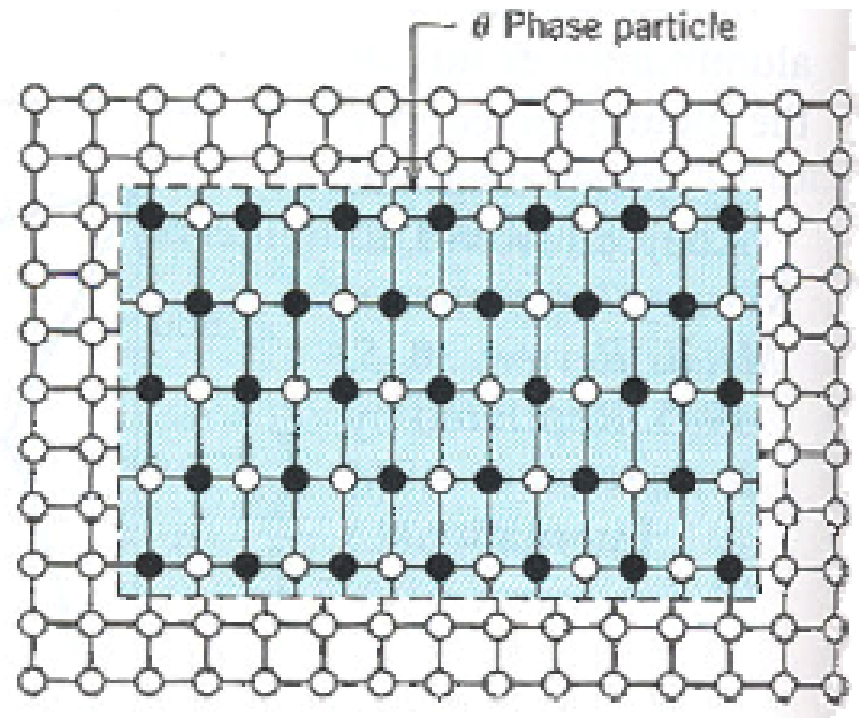
κράματα : σκόπιμη προσθήκη ατόμων διαφορετικού στοιχείου για την τροποποίηση των ιδιοτήτων της μήτρας – *σχεδίαση υλικών*

τα κράματα μπορεί να έχουν την ίδια κρυσταλλική δομή με την μήτρα ή όχι

τα κράματα μπορεί να καταλήξουν σε δευτερεύουσες φάσεις ή όχι



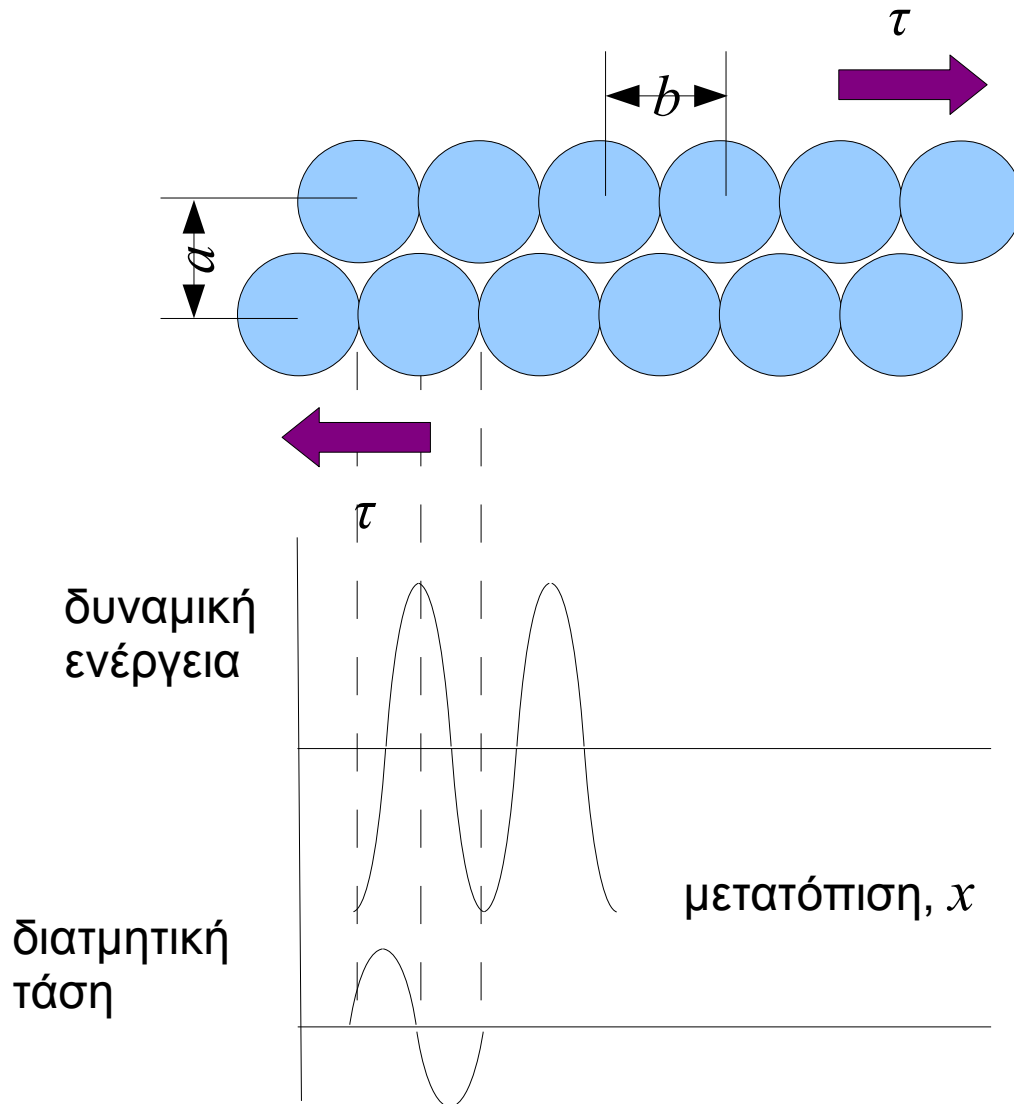
τυχαίο στερεό διάλυμα (μεταλλικοί δεσμοί)



διαμεταλλική ένωση (μικτοί δεσμοί)

Θεωρητική αντοχή

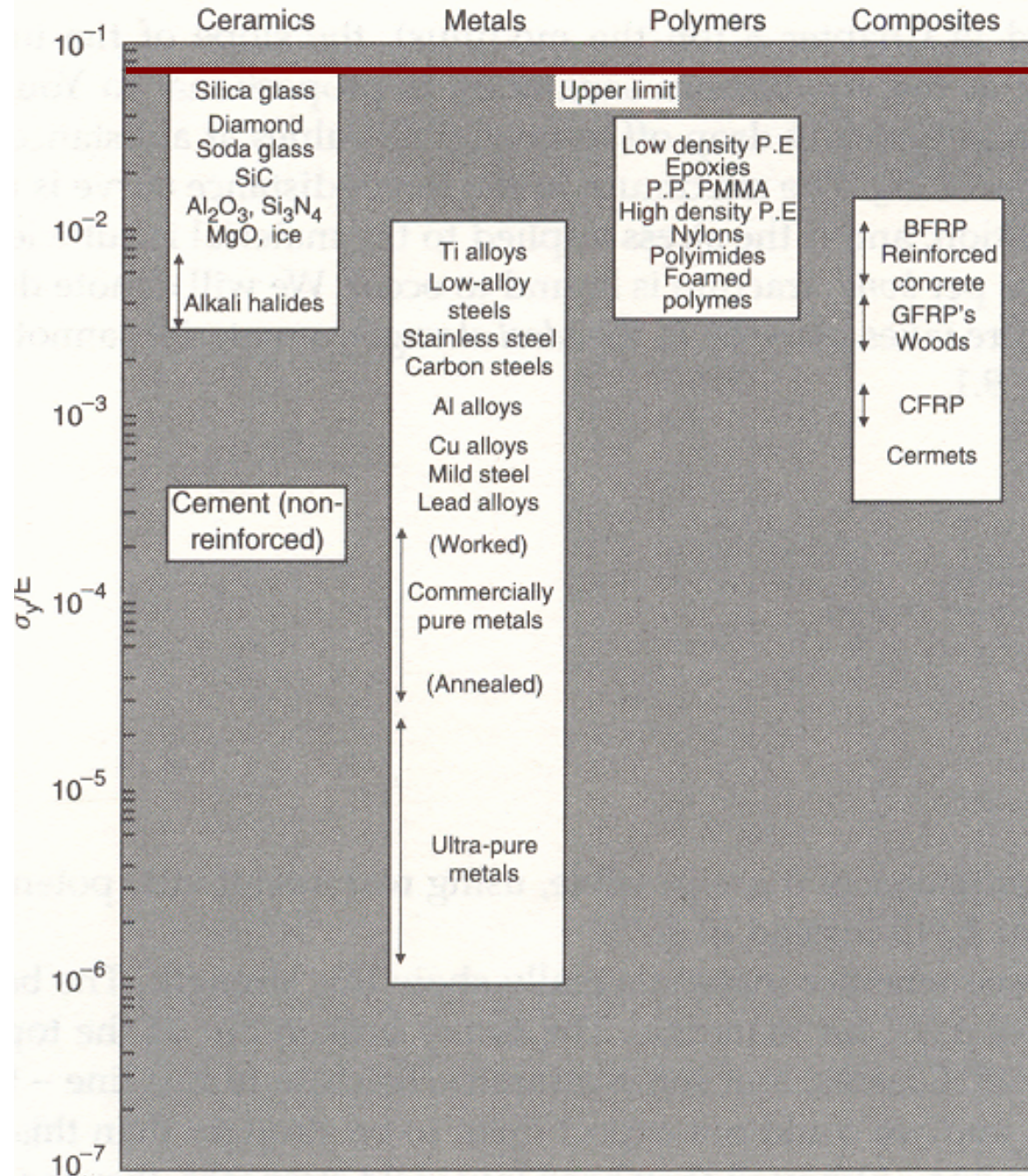
Θεωρητική αντοχή : η τάση που απαιτείται για το “σπάσιμο” των δεσμών και την σχετική μετακίνηση γειτονικών πλεγματικών επιπέδων (αντοχή τέλειου κρυστάλλου)



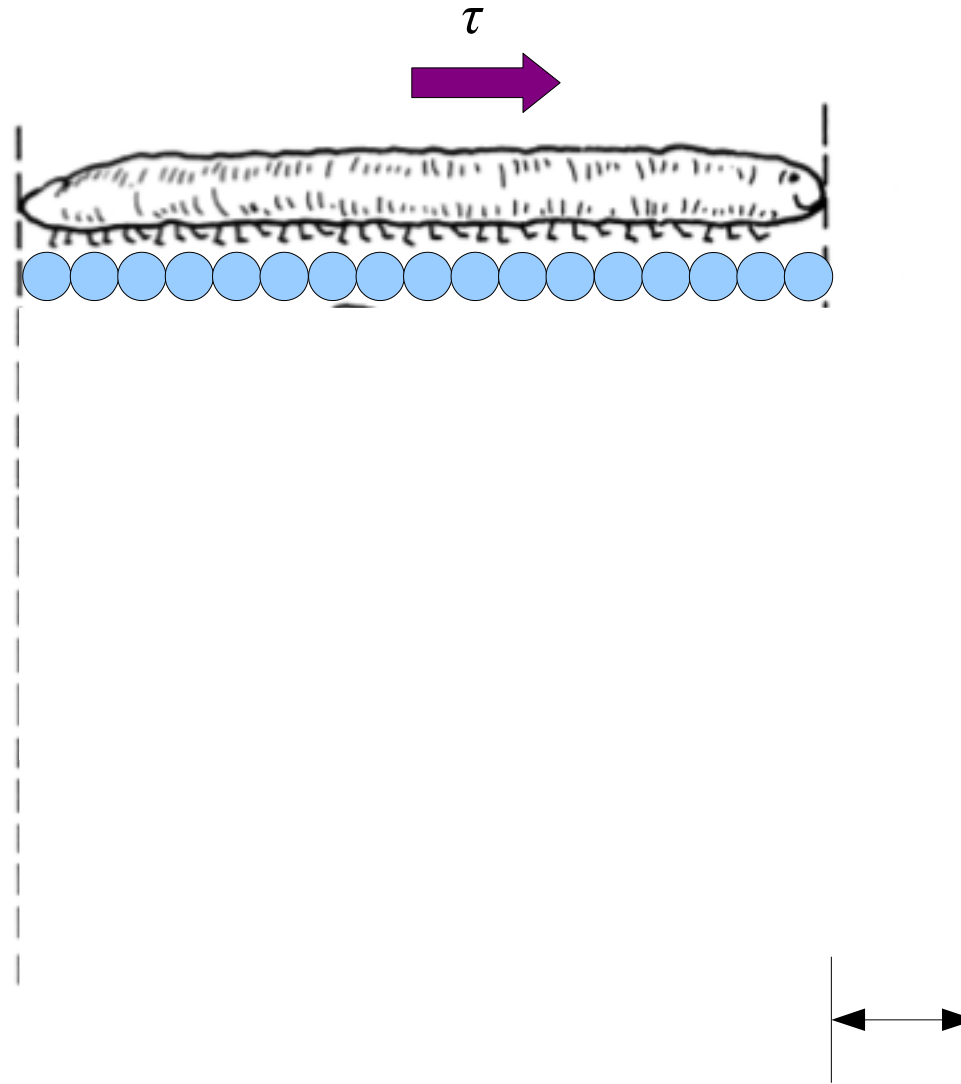
$$\tau = \frac{G b}{2 \pi a} \sin \frac{2 \pi x}{b}$$

$$\tau_{max} = \frac{G b}{2 \pi a} \quad \sigma_{max} \approx \frac{E}{15}$$

Πειραματική αντοχή

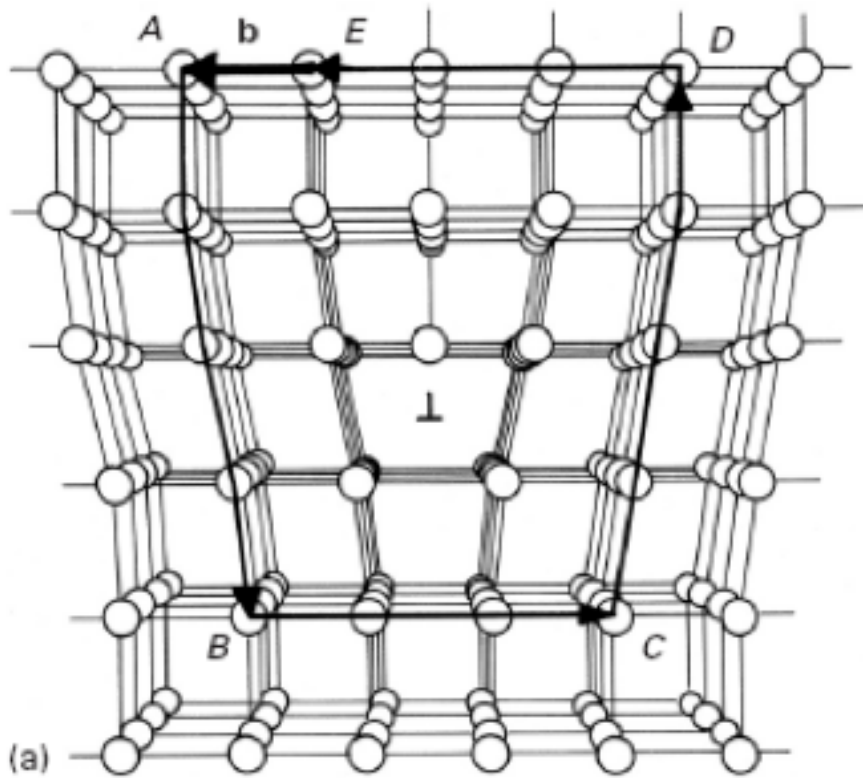


Γραμμικές ατέλειες

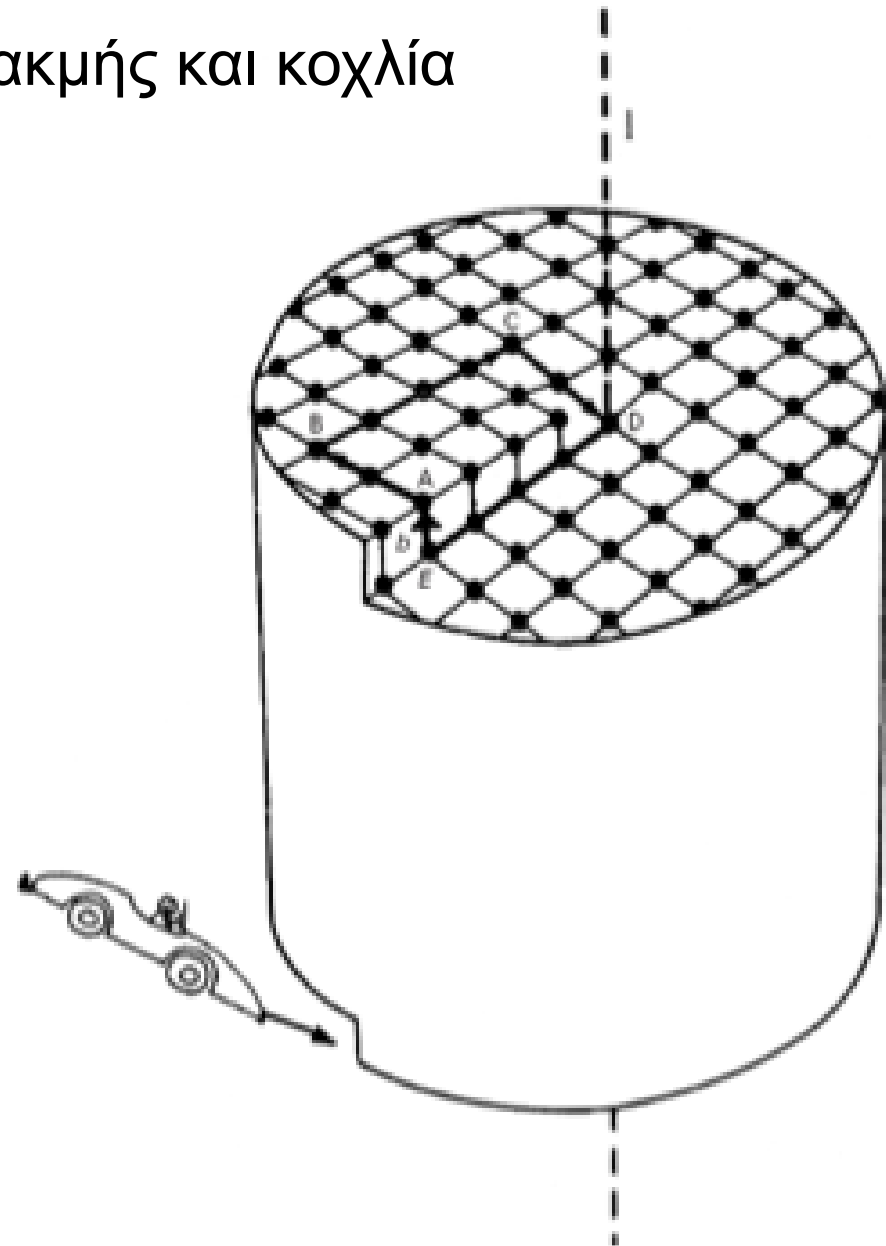


πλαστική μετατόπιση

Διαταραχές ακμής και κοχλία



ημιεπίπεδο τερματίζει στο εσωτερικό του κρυστάλλου – η ακμή του είναι η γραμμή της διαταραχής ακμής

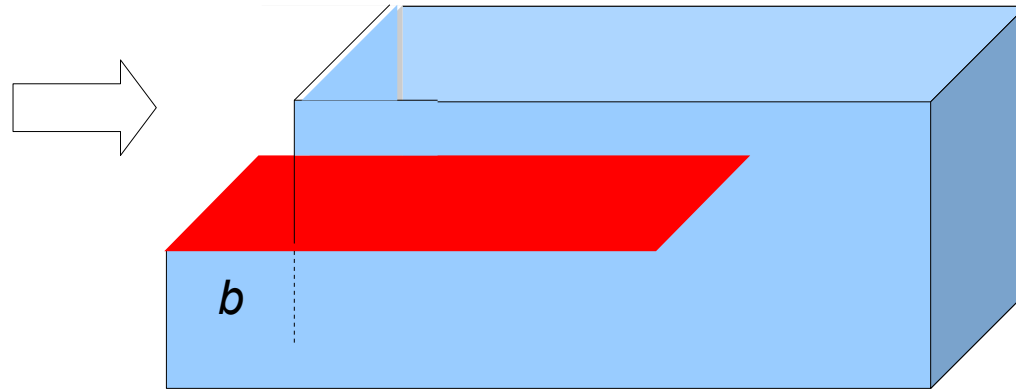


κίνηση πάνω στα κρυσταλλογραφικά επίπεδα γύρω από την γραμμή της διαταραχής κοχλία παράγει κίνηση στην διεύθυνση της γραμμής της διαταραχής

Συνταγή για διαταραχή ακμής (νοητικό πείραμα)

1. Παίρνουμε έναν “τέλειο” κρύσταλλο

2. Κόβουμε κάθετα σε μια έδρα μια βαθειά τομή



3. Μετακινούμε παράλληλα στην τομή το ένα μισό σε σχέση με το άλλο κατά απόσταση b

Ο κρύσταλλος περιέχει ένα ημιεπίπεδο που καταλήγει στο εσωτερικό του κρυστάλλο σε μια γραμμή – γραμμική ατέλεια (διαταραχή ακμής)

[Αν περιστρέψαμε το ένα μισό σε σχέση με το άλλο κατά b θα παράγαμε διαταραχή κοχλία.]

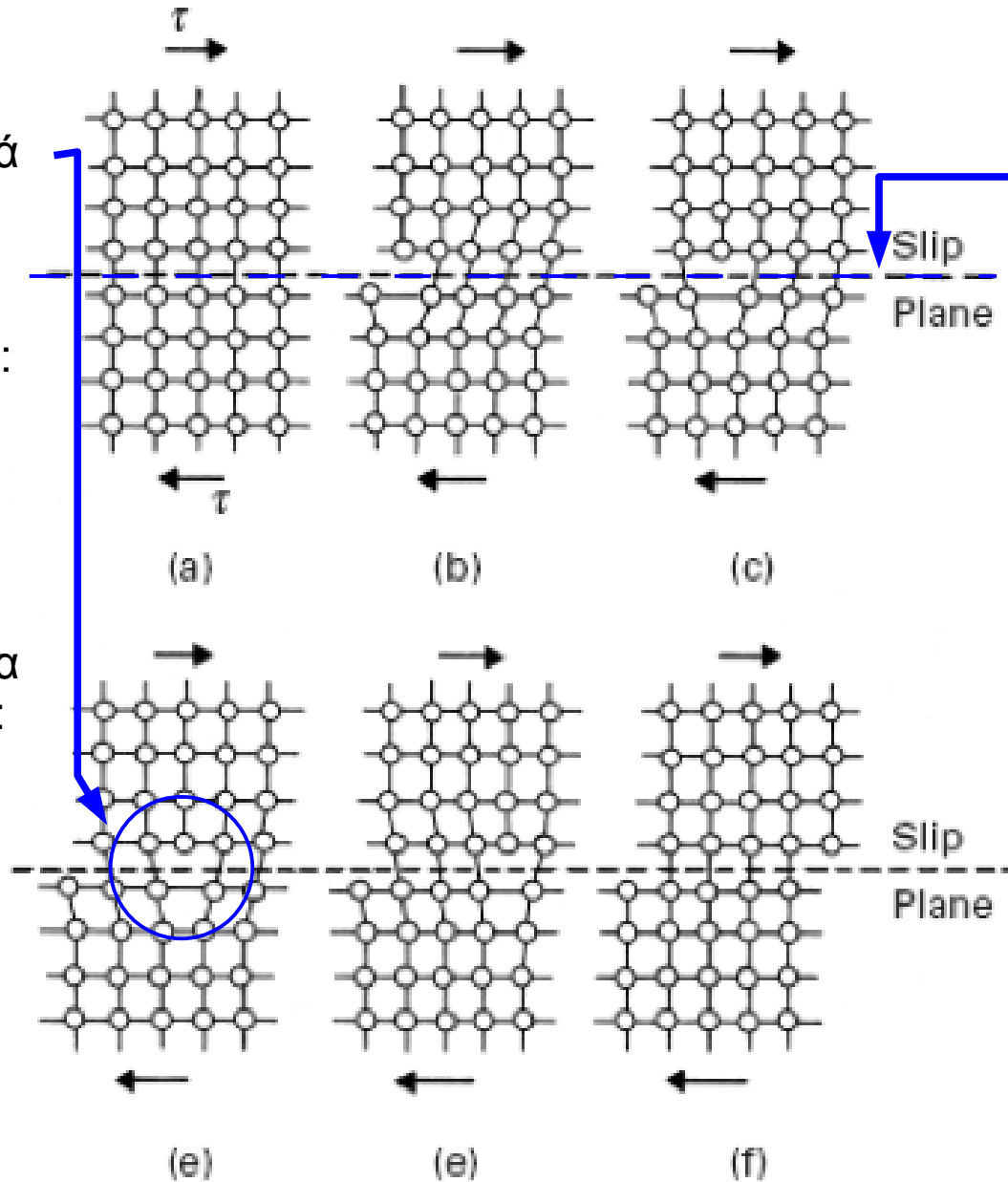
Η *κίνηση* της διαταραχής παράγει πλαστική παραμόρφωση

Η κίνηση της διαταραχής παράγει πλαστική παραμόρφωση

τα άτομα στην γειτονιά του πυρήνα της διαταραχής είναι μετατοπισμένα από την θέση ισορροπίας : έχουν υψηλή (ελαστική) ενέργεια – η διαταραχή συμπεριφέρεται ως τεντωμένη χορδή με τάση χορδής (ενέργεια ανά μονάδα μήκους) :

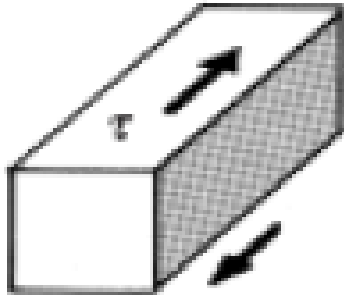
$$T = \frac{\pi}{8} G b^2$$

$$\approx \frac{G b^2}{2}$$

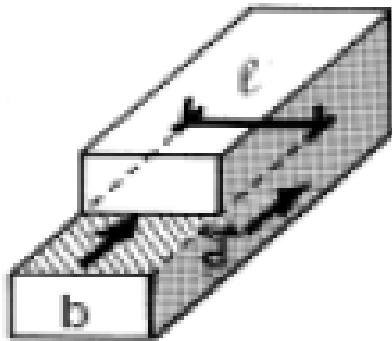
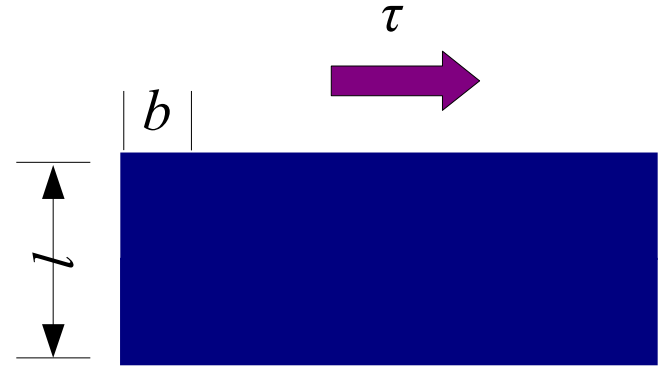
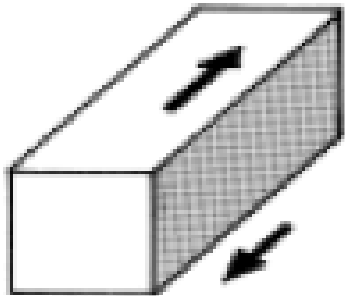


οι διαταραχές ολισθαίνουν πάντα πάνω σε κρυσταλλογραφικά επίπεδα

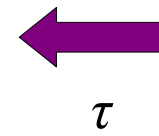
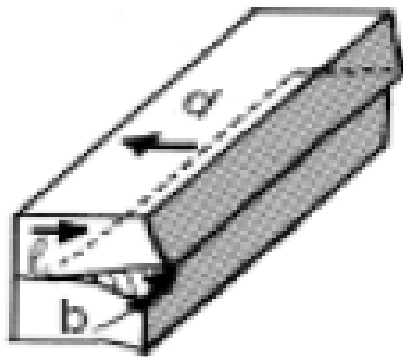
Μακροσκοπική παραμόρφωση από την κίνηση διαταραχών



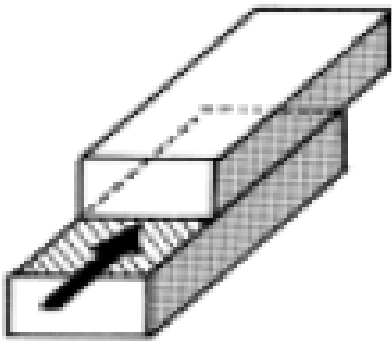
Unsheared



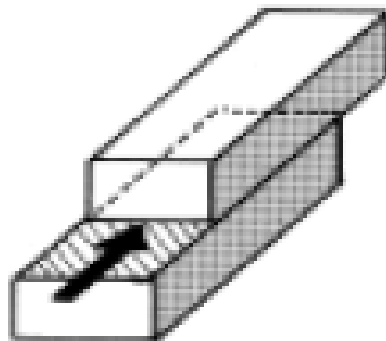
Partially sheared



$$\gamma = \frac{b}{l}$$

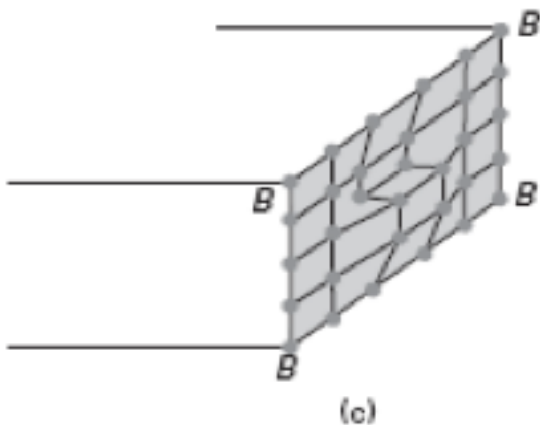
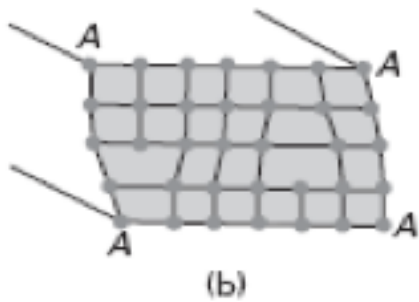
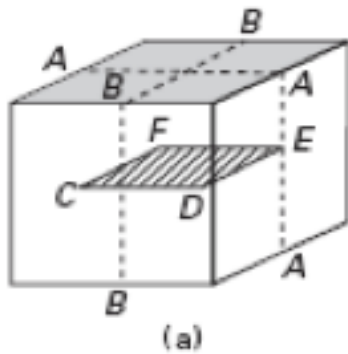


Completely sheared



Βρόχοι διαταραχών

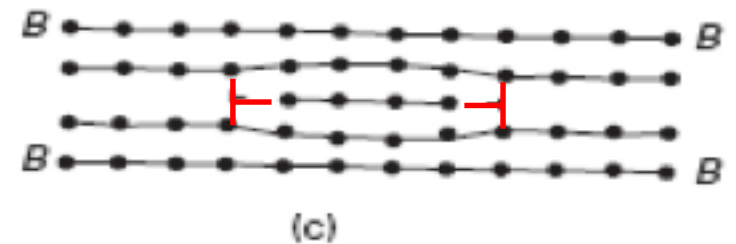
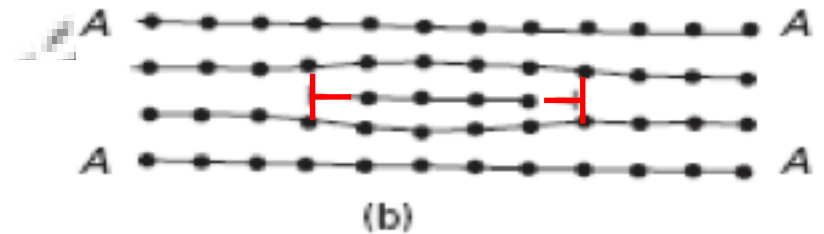
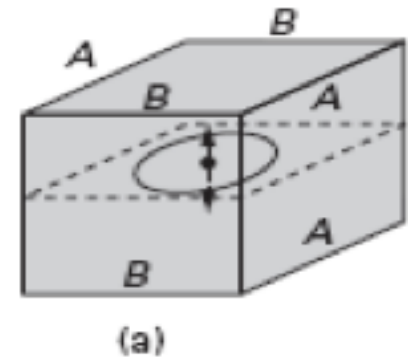
τετράγωνος



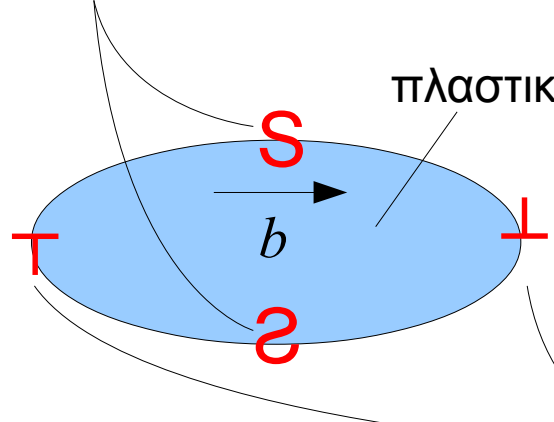
ελλειπτικός



πρισματικός



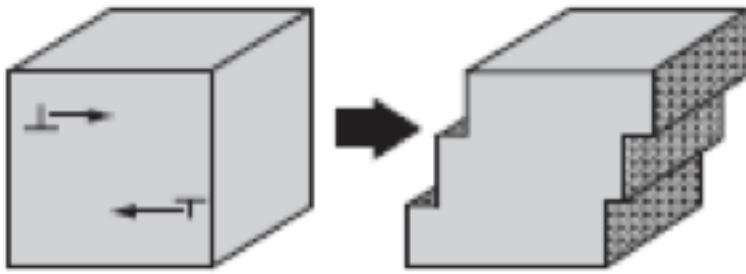
καθαρός κοχλίας



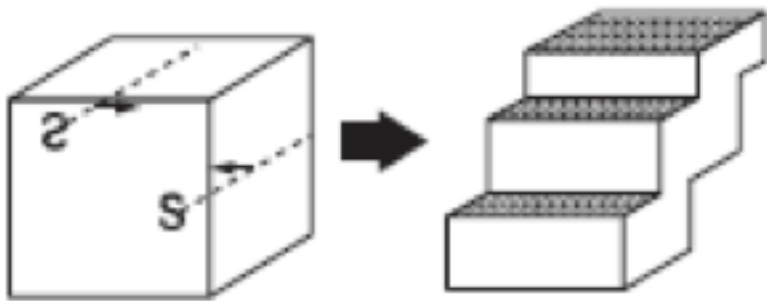
πλαστικά παραμορφωμένη περιοχή

καθαρή ακμή

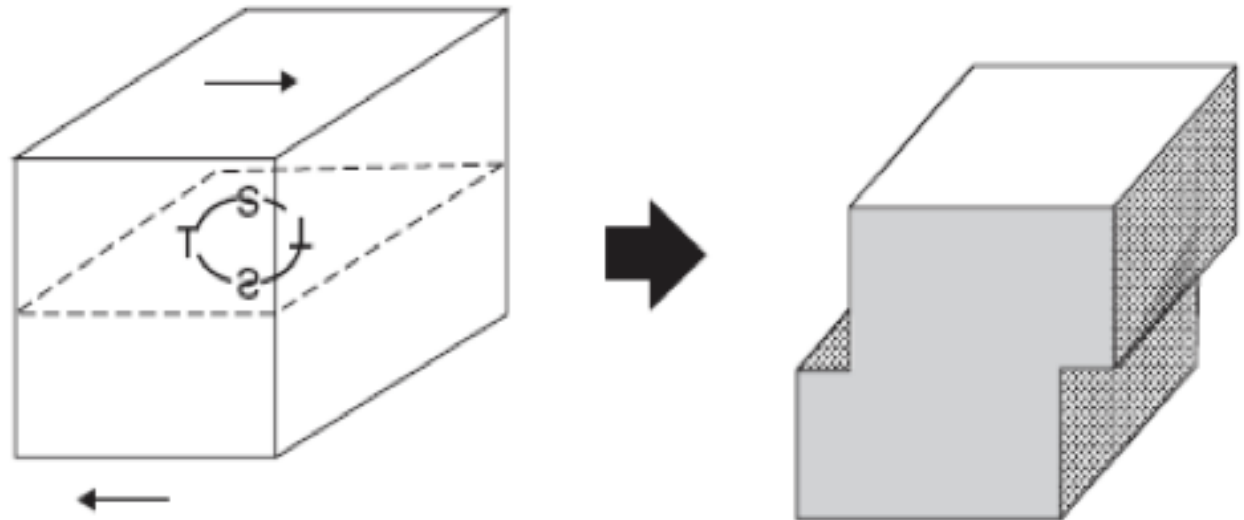
Ανάπτυξη των βρόχων



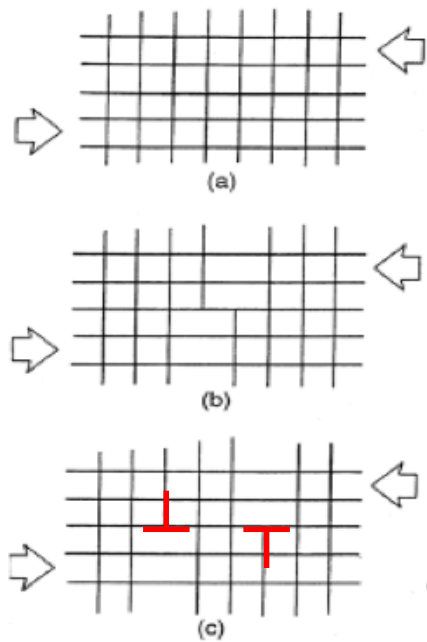
(a)



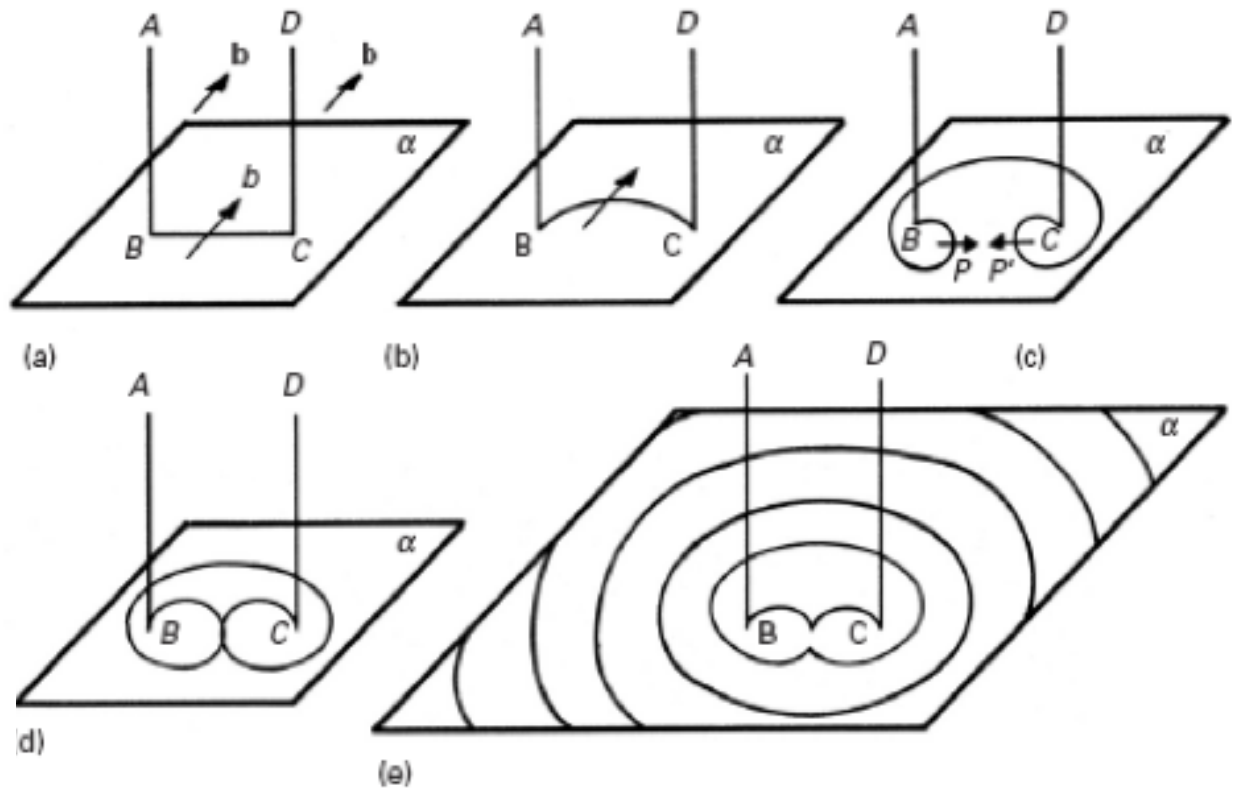
(b)



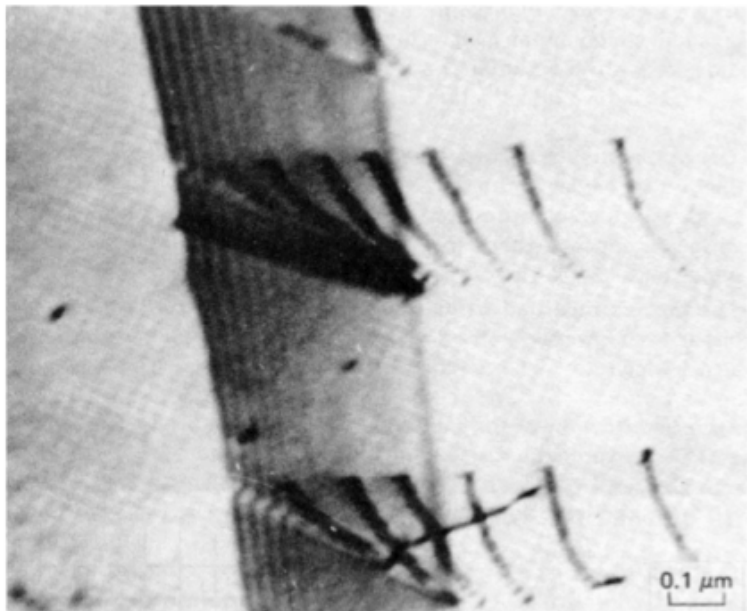
Πηγές διαταραχών



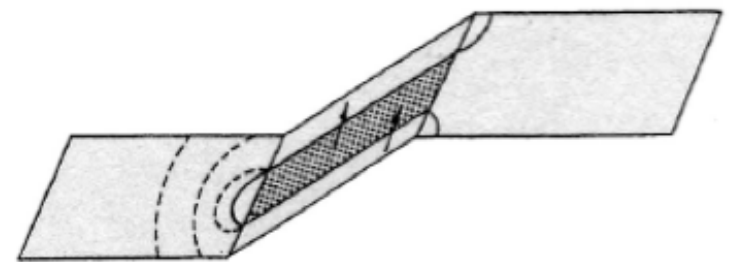
ομοιογενής



πηγή Frank – Read



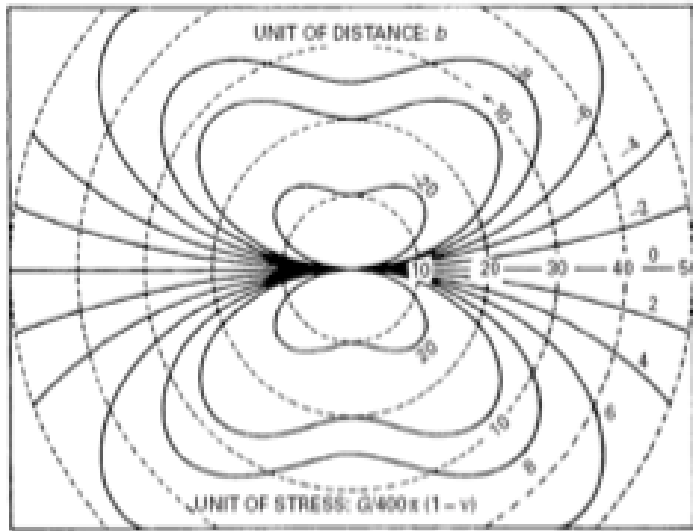
δρια κόκκων



ολίσθηση σε άλλο σύστημα
(cross – slip)

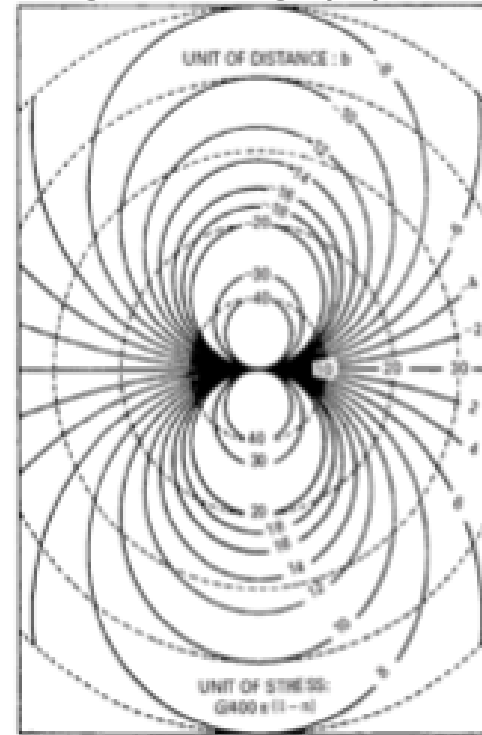
Ελαστικά πεδία διαταραχής ακμής (1)

σ_{xx}



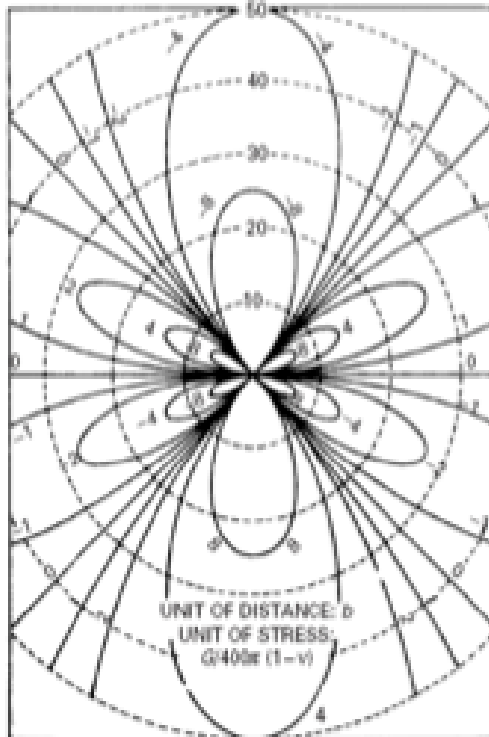
(a)

σ_{zz}



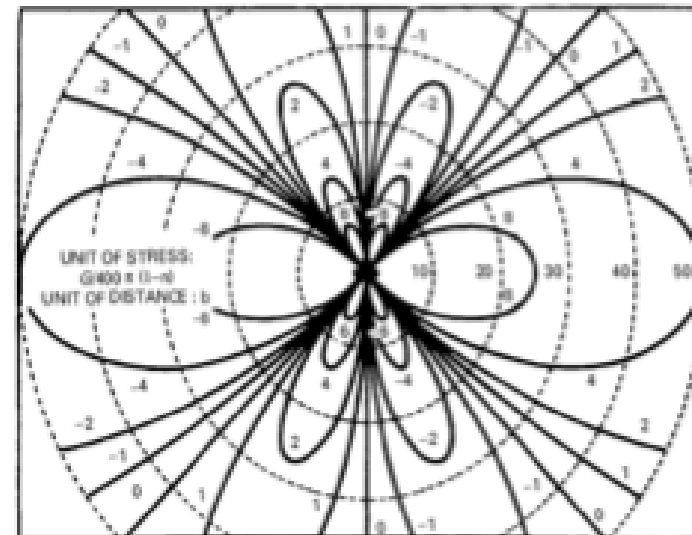
(c)

σ_{yy}



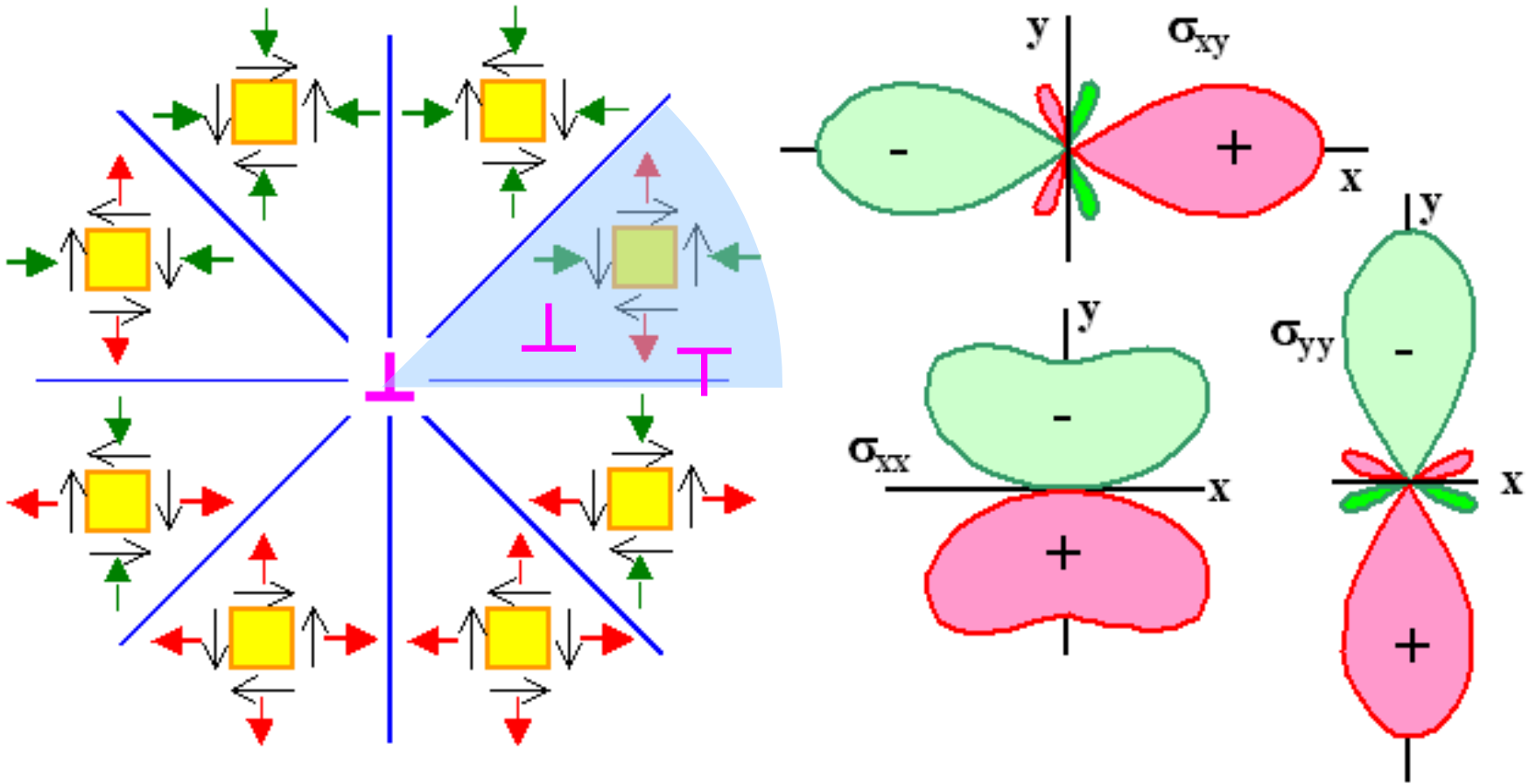
(b)

σ_{xy}



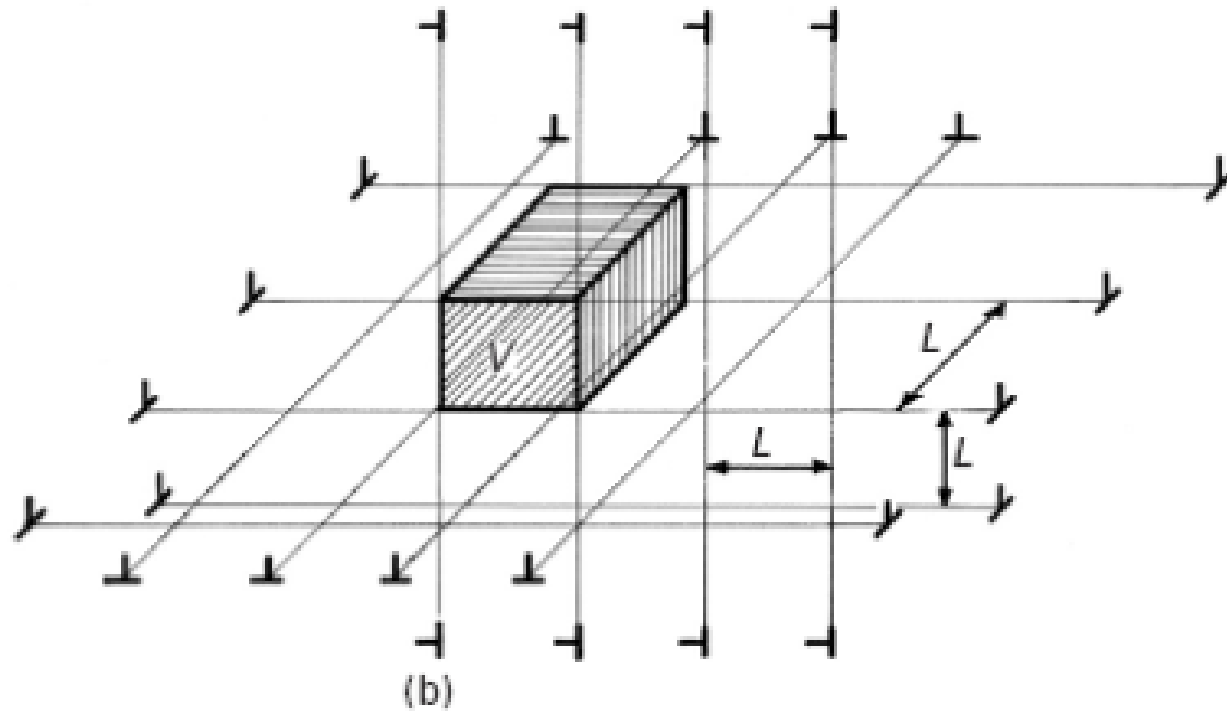
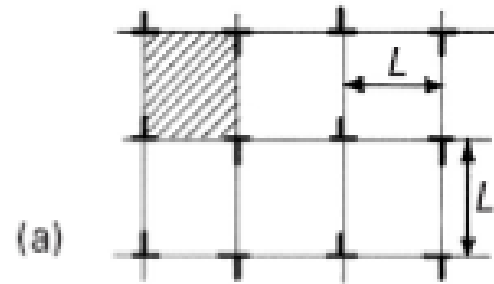
(d)

Ελαστικά πεδία διαταραχής ακμής (2)



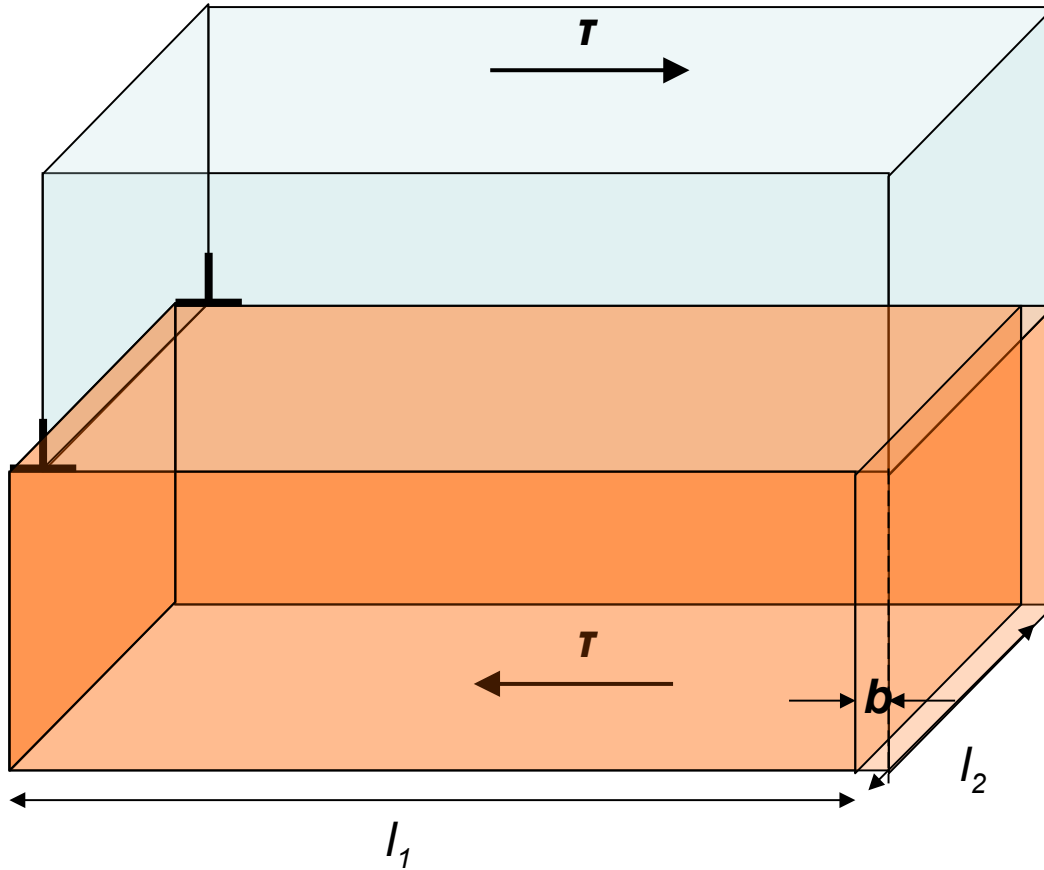
η διαταραχή παραμορφώνει ελαστικά το πλέγμα γύρω της – δημιουργεί ένα ελαστικό πεδίο
το ελαστικό πεδίο αλληλεπιδρά με το πεδίο των εξωτερικών τάσεων ή άλλων διαταραχών
η διαταραχή κινείται ανταποκρινόμενη στην αλληλεπίδραση των ελαστικών πεδίων

Δομές διαταραχών



οι διαταραχές, υπό την επίδραση των ελαστικών τους πεδίων, σχηματίζουν δομές (ώστε να ελαχιστοποιήσουν την ελαστική ενέργεια του κρυστάλλου)

Αντίσταση στην κίνηση διαταραχής

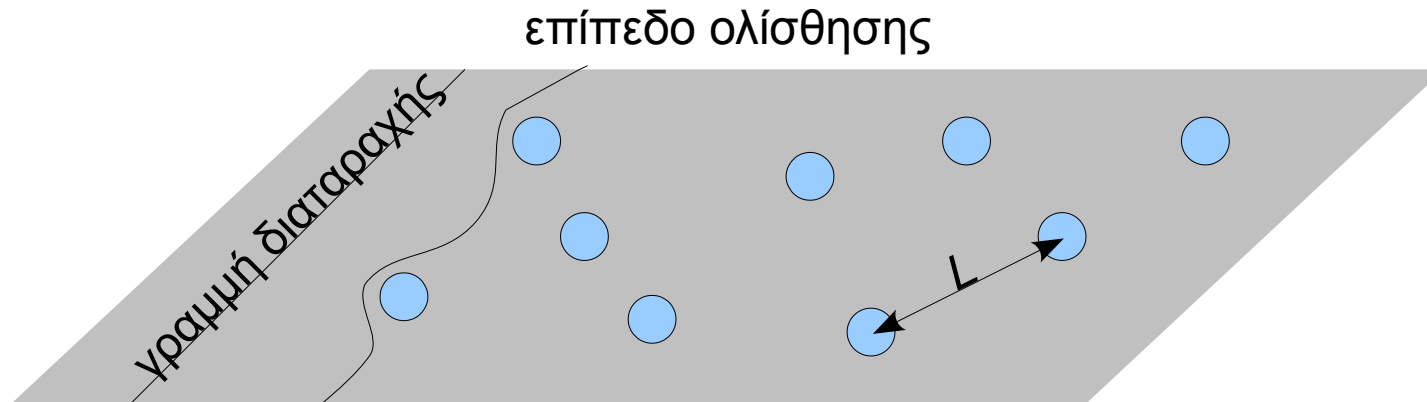


ισορροπία έργου :

$$F_{extern} \cdot b = F_{resist} \cdot l_1 \Rightarrow (\tau l_1 l_2) b = (f l_2) l_1$$

$$\Rightarrow \tau b = f \quad f: \text{δύναμη ανά μονάδα μήκους διαταραχής}$$

Εμπόδια στην κίνηση διαταραχών



L : μέση απόσταση εμποδίων

αριθμός εμποδίων ανά μονάδα μήκους διαταραχής: $N_L = \frac{1}{L}$

δύναμη εμποδίου ανά μονάδα μήκους διαταραχής: $f = \frac{p}{L}$

αύξηση στην αντίσταση κίνησης λόγω εμποδίων: $\Delta\tau = \frac{p}{bL}$

το εμπόδιο παραμορφώνει την διαταραχή ελαστικά: $p \sim Gb^2$

$$\Delta\tau = a \frac{Gb}{L}$$

όπου a αδιάστατη σταθερά που χαρακτηρίζει την ισχύ του εμποδίου

Όριο διαρροής μεμονωμένης διαταραχής σε μονοκρύσταλλο, τ_y

1) εγγενής αντίσταση πλέγματος, f_i : οφείλεται στην ισχύ των δεσμών

Διαμάντι, καρβίδια, νιτρίδια, οξειδία, πυριτιούχα (εργαλεία κοπής)

2) σκλήρυνση στερεού διαλύματος : $\Delta\tau_{ss} = aG\sqrt{c}$

c ατομικό ποσοστό διαλυμένης ουσίας

Μονοφασικοί ορείχαλκοι, μπρούτζοι, ανοξείδωτοι χάλυβες

3) σκλήρυνση κατακρημνίσματος : $\Delta\tau_{ppt} \approx \frac{Gb}{L}$

Οι περισσότεροι χάλυβες, κράματα αλουμινίου με πολλά κραματικά στοιχεία

4) εργοσκλήρυνση : $\Delta\tau_{wh} \approx \frac{Gb}{2} \sqrt{\rho_d}$

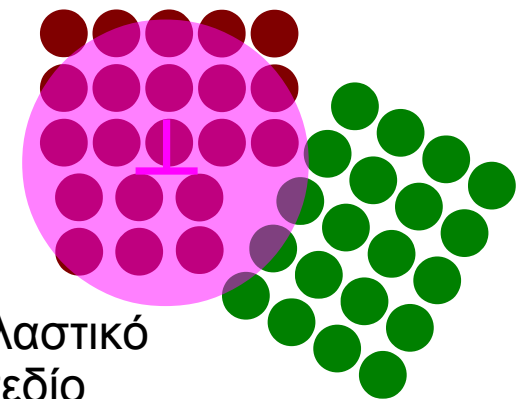
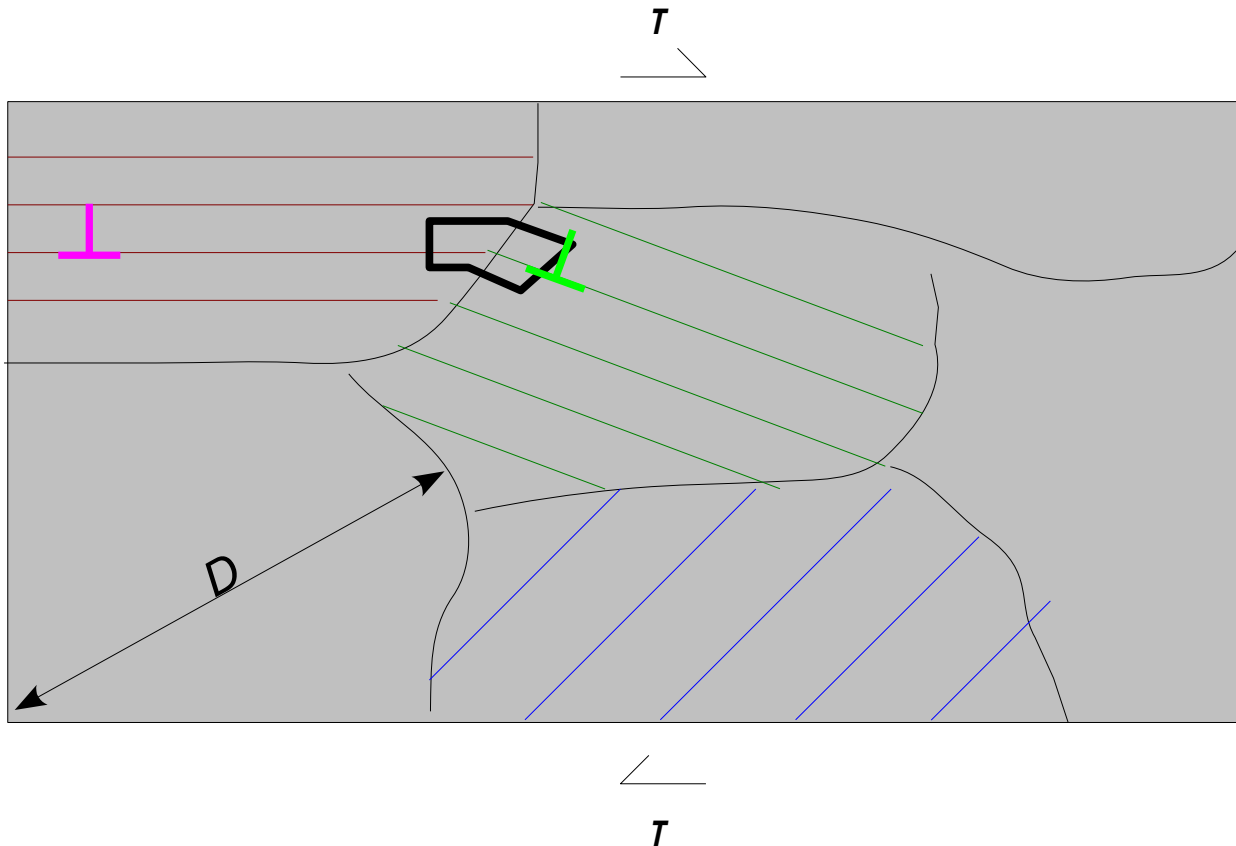
ρ_d πυκνότητα διαταραχών

Όλα τα όλκιμα μέταλλα

$$\tau_y = f_i / b + \Delta\tau_{ss} + \Delta\tau_{ppt} + \Delta\tau_{wh} \quad (\text{συνήθως μη γραμμική συνάρτηση})$$

Διαρροή σε πολυκρυστάλλους (1)

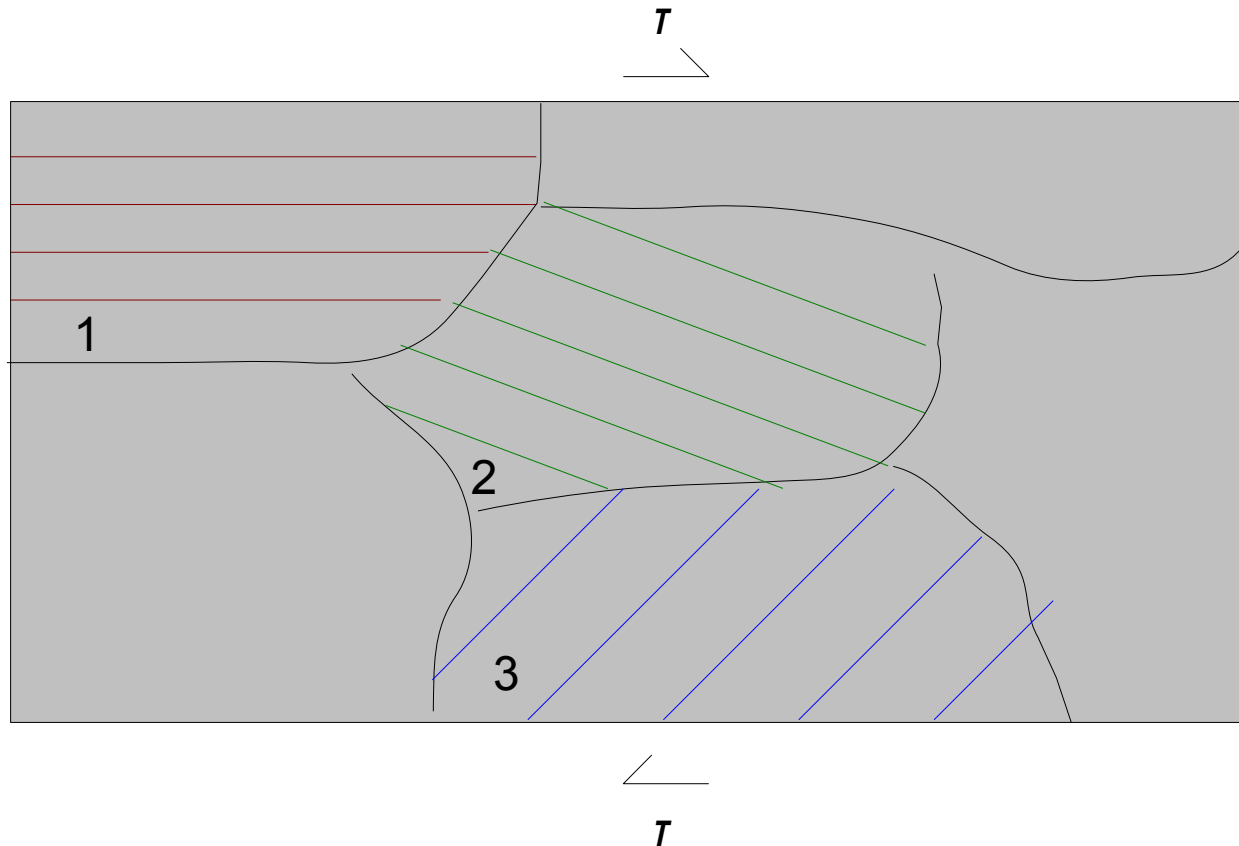
Οι κρύσταλλοι (κόκκοι) σε έναν πολυκρύσταλλο συναρμόζουν αλλά οι κρυσταλλικοί προσανατολισμοί τους διαφέρουν



ελαστικό
πεδίο
διαταραχής
δημιουργεί
διαταραχές
στον
γειτονικό
κόκκο

$$\Delta\tau_{gb} = \frac{k_p}{\sqrt{D}}$$

Διαρροή σε πολυκρυστάλλους (2)

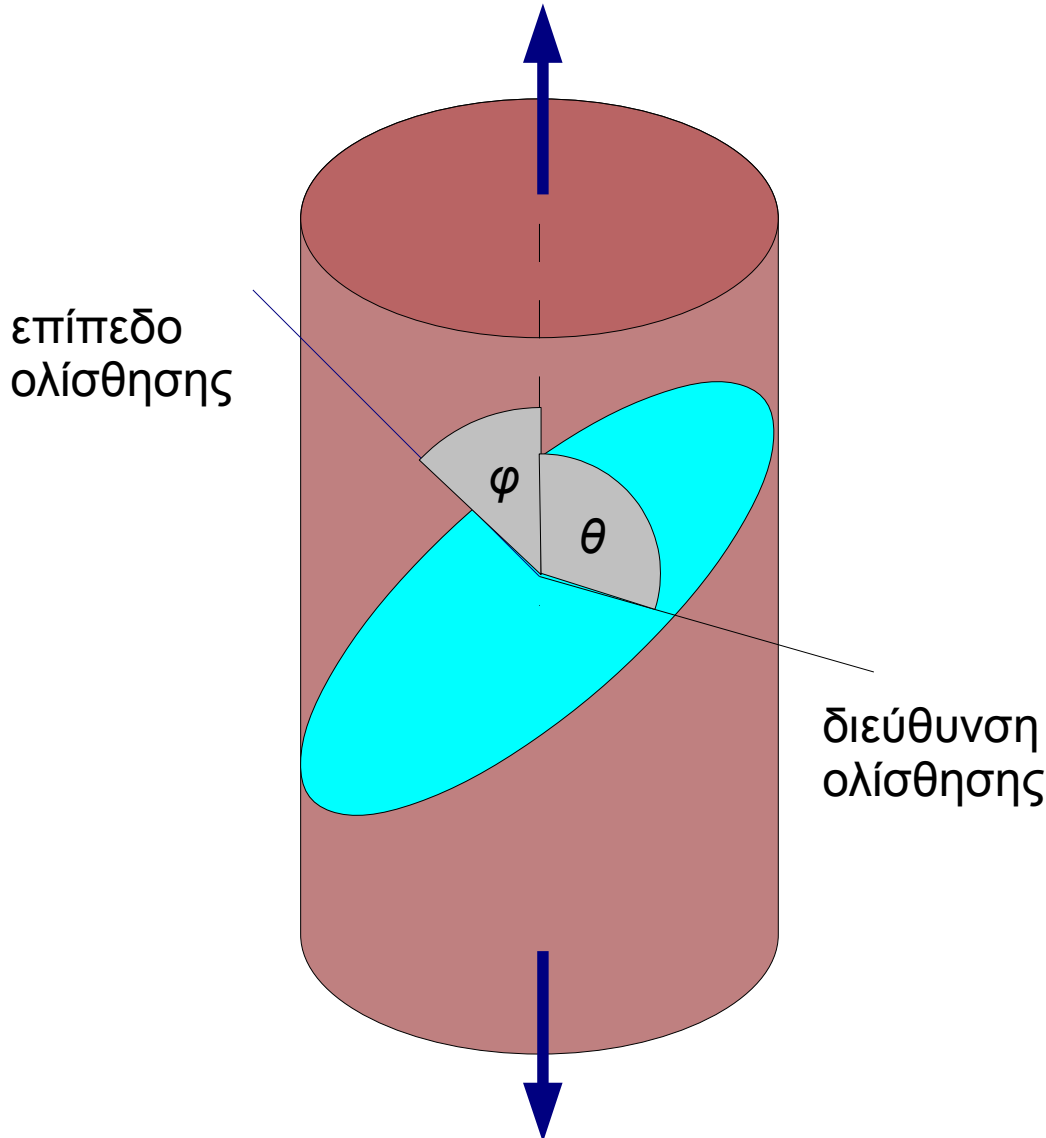


Η διαρροή σε πολυκρύσταλλο ξεκινάει από τον κόκκο με τον πιο ευνοϊκό προσανατολισμό των επιπέδων ολίσθησης ως προς την μέγιστη διατμητική τάση (1) και στην συνέχεια εκτείνεται στον κόκκο με λιγότερο ευνοϊκό προσανατολισμό (2) και μετά σε αυτόν με ακόμα χειρότερο προσανατολισμό (3) – η διαρροή δεν συμβαίνει ταυτόχρονα στον πολυκρύσταλλο κι έτσι δεν παρατηρείται σαφές όριο διαρροής στο διάγραμμα $\sigma - \epsilon : k \approx 1.5 \tau_y$

όριο διαρροής σε διάτμηση

Περιγραφή συνεχούς μέσου της πλαστικής ροής

Η πλαστική ροή πραγματοποιείται μέσω διάτμησης



$$\tau = \frac{F \cos \theta}{A / \cos \varphi} = \frac{F}{A} \cos \theta \cos \varphi$$
$$\Rightarrow \tau_{crss} = \sigma_y \cos \theta \cos \varphi$$

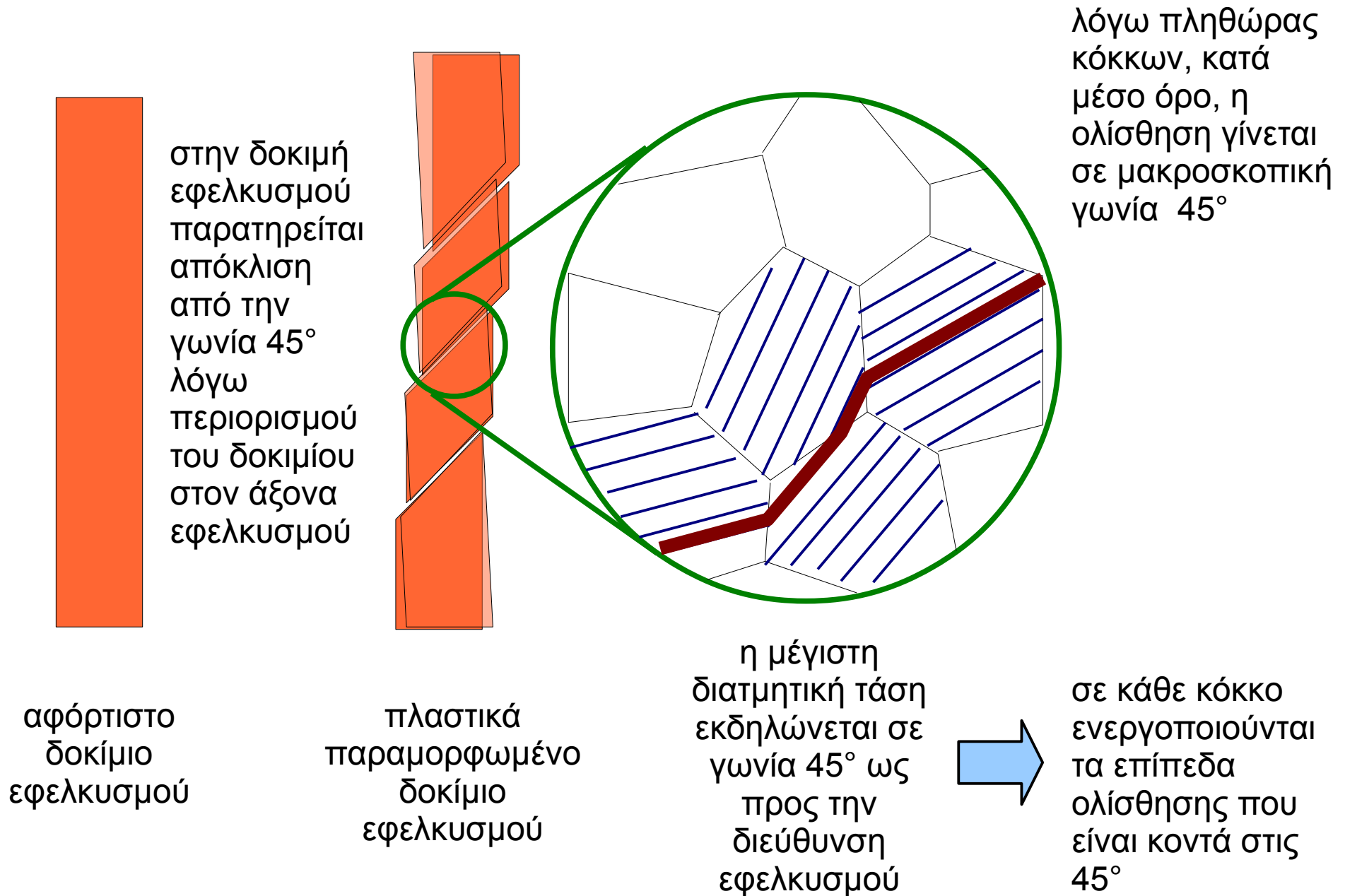
όταν $\theta = \pi/2 - \varphi$:

$$\tau_{crss} = \sigma_y \sin \varphi \cos \varphi$$

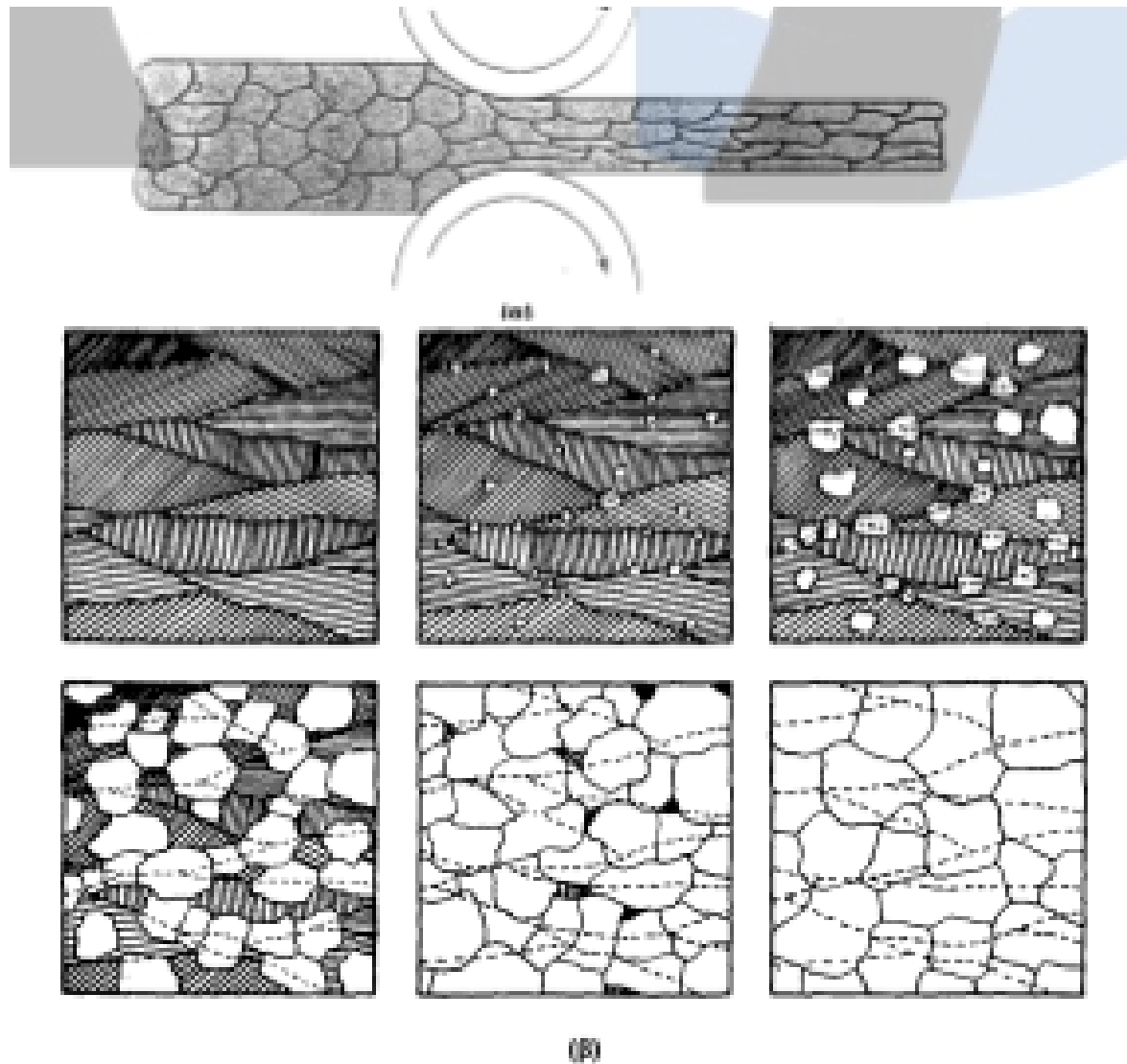
και η μέγιστη διατμητική τάση εμφανίζεται στις 45° :

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_y}{2} = k$$

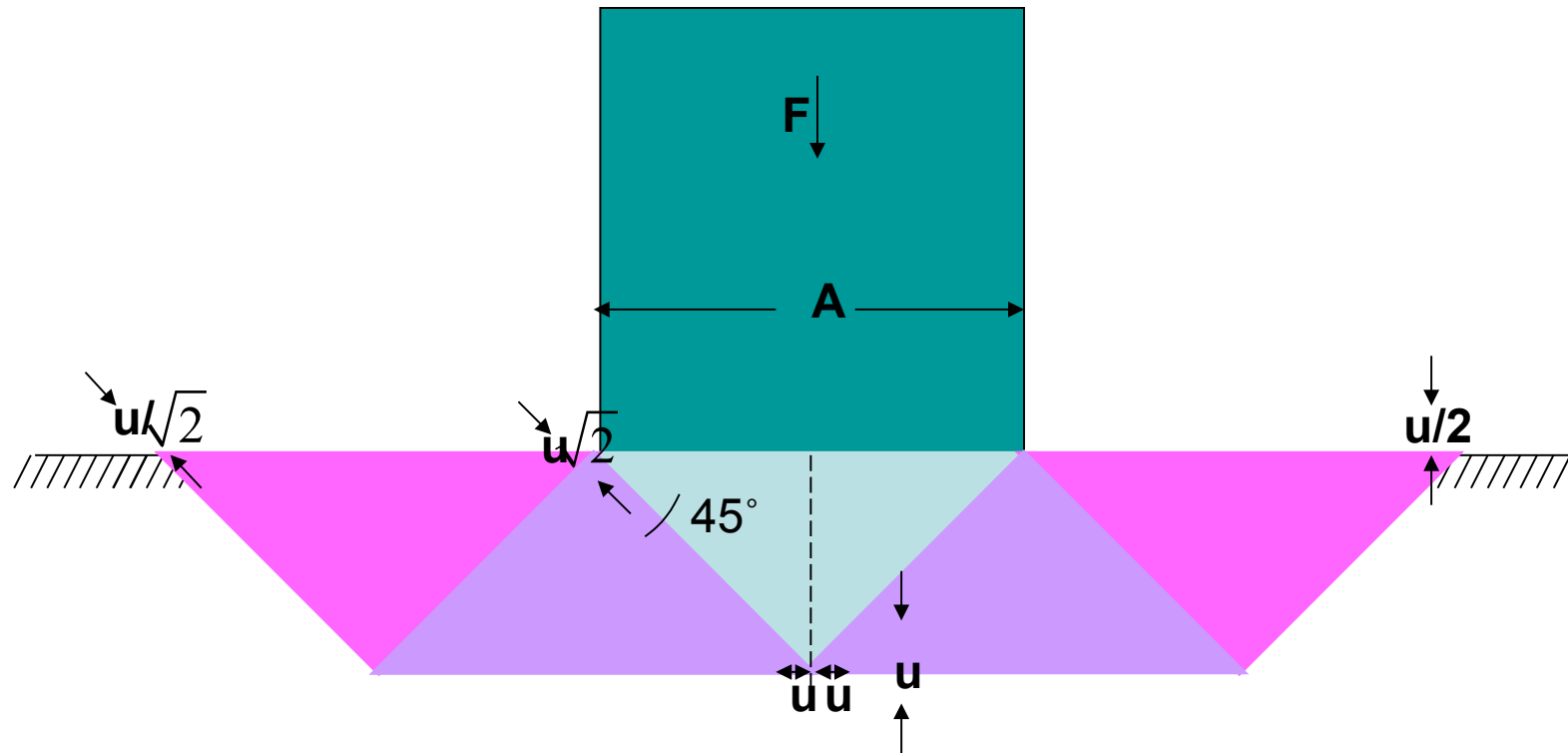
Πλαστική παραμόρφωση πολυκρυστάλλου



Ανόπτηση, ανακρυστάλλωση, μεγέθυνση κόκκων



Παράδειγμα ολίσθησης : υπολογισμός σκληρότητας



Ισορροπία έργου:

$$Fu = 2 \frac{Ak}{\sqrt{2}} u \sqrt{2} + 2Aku + 4 \frac{Ak}{\sqrt{2}} \frac{u}{\sqrt{2}}$$

$$\Rightarrow H \equiv \frac{F}{A} = 6k = 3\sigma_y$$