

Τεχνολογία Υλικών

Ατέλειες Κρυσταλλικής Δομής

Επικ. Καθ. Α. Τσουκνίδας (tsouknidas@teiwm.gr)



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2. ΕΙΔΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

3. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

4. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ή
ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ

5. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ή ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

6. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κρύσταλλος



Το τμήμα της στερεάς ύλης, που σε όλη του την έκταση έχει την ίδια, συνεχή κρυσταλλική δομή.

«Τέλειος» Κρύσταλλος



Τα άτομα καταλαμβάνουν μία διάταξη στο χώρο που παρουσιάζει περιοδικότητα στις τρεις διαστάσεις
(Μόνο στους 0 K)

Τα άτομα δονούνται

«Πραγματικός» Κρύσταλλος



- Δεν καταλαμβάνονται όλες οι θέσεις (οπές)
- Τα άτομα μετακινούνται από τις ιδανικές θέσεις
- Οι ατέλεις μεταβάλουν τις ιδιότητες!!!

«ΤΕΛΕΙΟΙ» ΚΑΙ «ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΙ» ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2. ΕΙΔΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

3. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

4. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ή
ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ

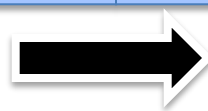
5. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ή ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

6. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

Ατέλειες μηδενικής διάστασης ή Σημειακές	Ατέλειες μίας διάστασης ή Γραμμικές	Ατέλειες δύο διαστάσεων ή Επίπεδες	Ατέλειες τριών διαστάσεων
Πλεγματικά κενά	Διαταραχές ακμής	Όρια κόκκων	Πόροι
Ένθετα άτομα μητρικής δομής	Διαταραχές κοχλία ή ελικοειδείς διαταραχές	Διδυμίες	Ρωγμές
Ξένα ένθετα άτομα	Μικτές διαταραχές	Σφάλματα επιστοιίβασης	Εγκλείσματα
Ατέλειες Schottky και Frenkel			Κατακρημνίσματα

Σημειακές



Αντιστρεπτές

Γραμμικές & Επίπεδες



Αναντιστρεπτές

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΒΑΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΜΟΡΦΗΣ ΤΟΥΣ

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΤΥΠΟΣ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ή ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ
Σημειακές	Κενά	Συγκέντρωση: $\approx 10^{-4}$ σε T_m $\approx 10^{-15}$ σε T_a	Διάχυση σε στερεά κατάσταση
	Διαπλεγματικές ατέλειες	Συγκέντρωση: $\approx 10^{-10}$ σε T_m $\approx 10^{-30}$ σε T_a	
	Ξένα άτομα		Μηχανικές ιδιότητες , ηλεκτρική αγωγιμότητα μονωτών και ημιαγωγών.
	Ατέλειες Frenkel, Schottky	Συγκέντρωση: $\approx 10^{-15}$ σε T_a	Ηλεκτρική αγωγιμότητα ιοντικών κρυστάλλων.
Γραμμικές	Διαταραχές ακμής και κοχλία, Μικτές διαταραχές	Πυκνότητα: $\approx 10^6 - 10^{12}$ cm/cm ³ (για μέταλλα)	Μηχανικές ιδιότητες, ολκιμότητα, στιβαρότητα.
Επίπεδες	Όρια κόκκων Διδυμίες Σφάλματα επιστοιίβασης	Μέγεθος κόκκων: Από 1μm έως 1cm	Μηχανικές ιδιότητες, ολκιμότητα, στιβαρότητα.
Τριών διαστάσεων	Πόροι, ρωγμές, εγκλείσματα, κατακρημνίσματα	Διαστάσεις: Από 5nm έως 0,1mm	Μηχανικές ιδιότητες, θερμικές κατεργασίες, μαγνητικές ιδιότητες

ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2. ΕΙΔΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

3. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

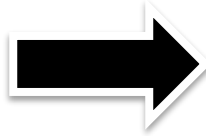
4. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ή
ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ

5. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ή ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

6. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

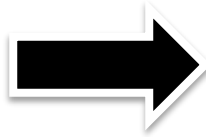
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

**Πλεγματικό κενό ή οπή
(vacancy)**



Πλεγματική θέση από την οποία εκλείπει το άτομο που θα έπρεπε να την καταλαμβάνει.

**Παρεμβολή
(interstitial atom defect)**



Κατάληψη παραπλεγματικής θέσης από κάποιο άτομο.

Υποπεριπτώσεις



Αυτοπαρεμβολή (self-interstitial).

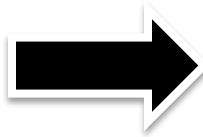
Κατάληψη παραπλεγματικής θέσης από άτομο μητρικής δομής.



Ετεροπαρεμβολή.

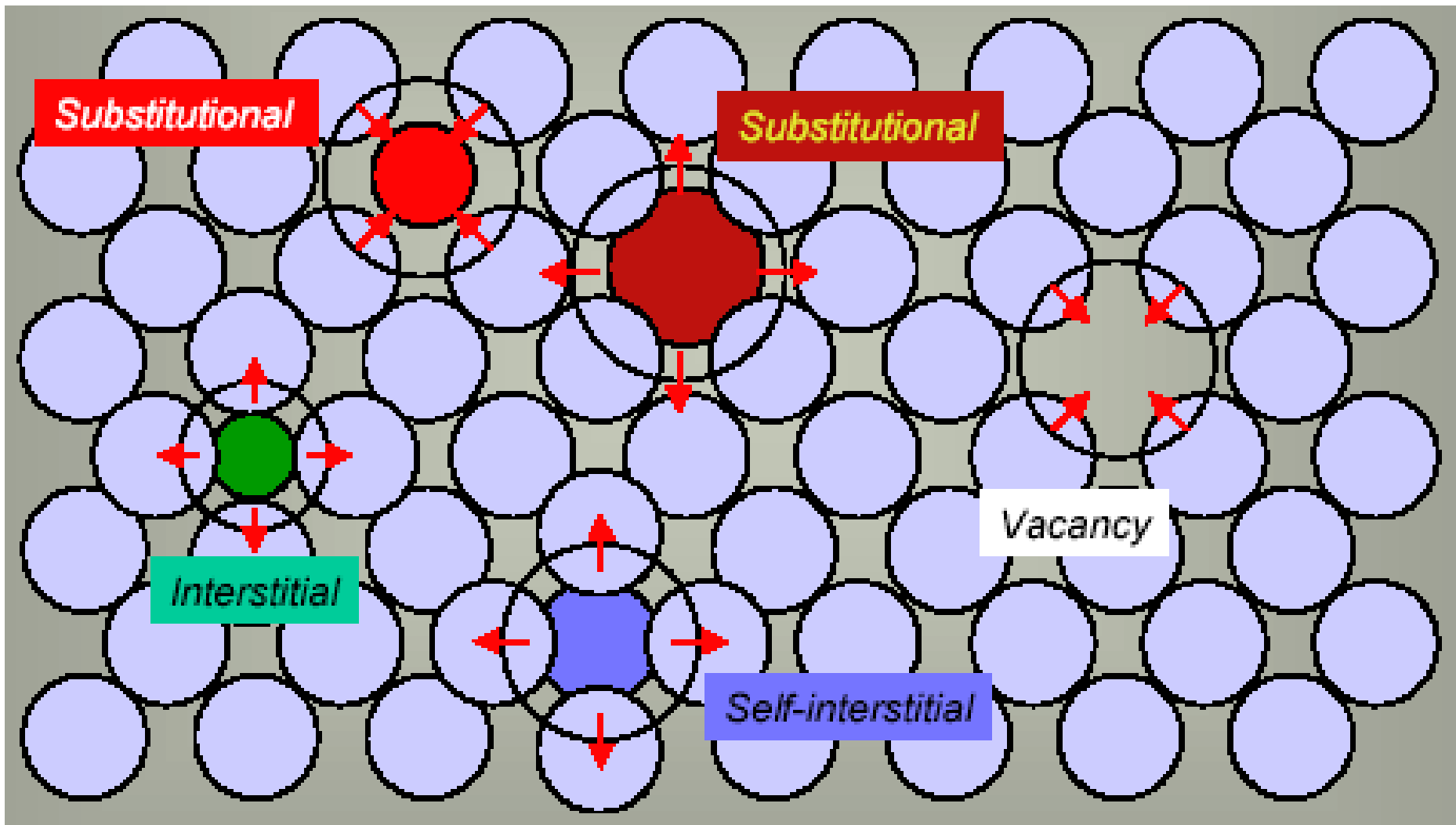
Κατάληψη παραπλεγματικής θέσης από ξένο άτομο.

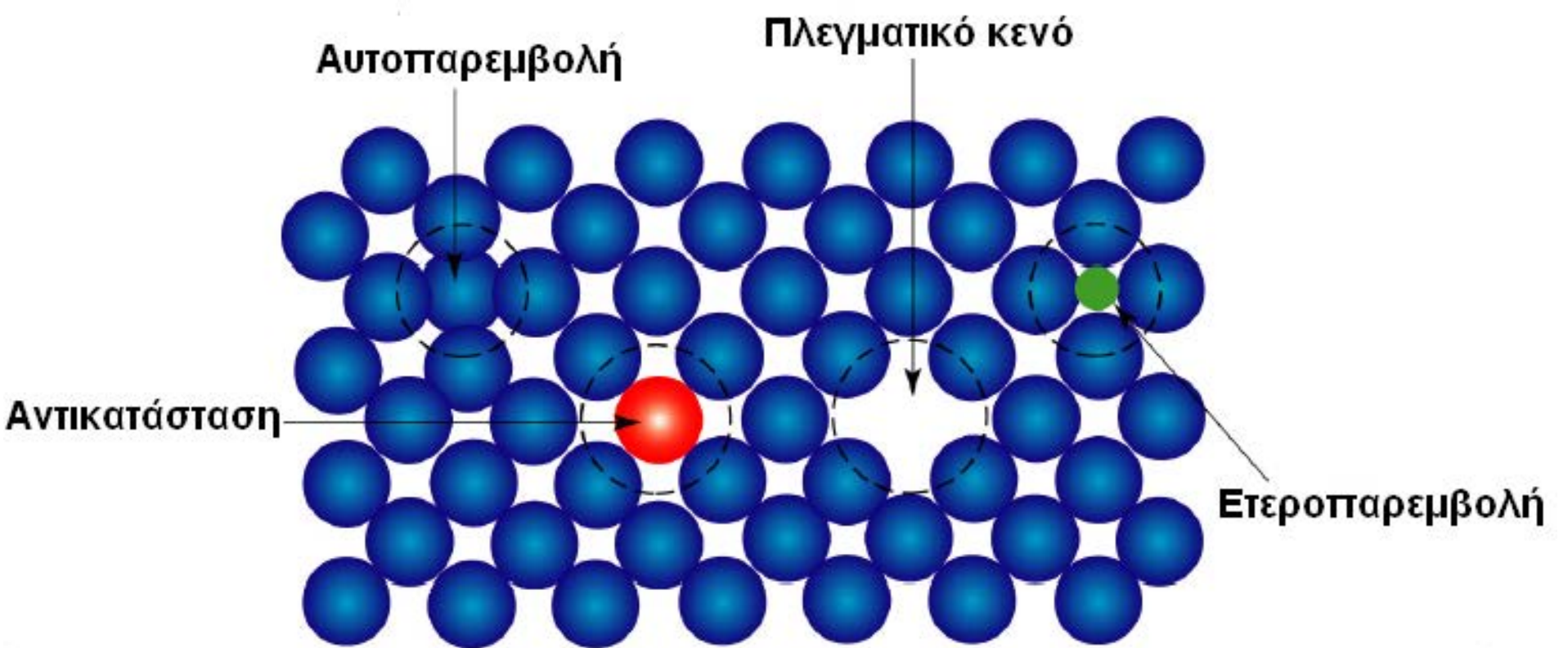
**Αντικατάσταση
(substitutional atom defect)**



Κατάληψη πλεγματικής θέσης από ξένο άτομο.

Σ Η Μ Ε Ι Α Κ Ε Σ Α Τ Ε Λ Ε Ι Ε Σ





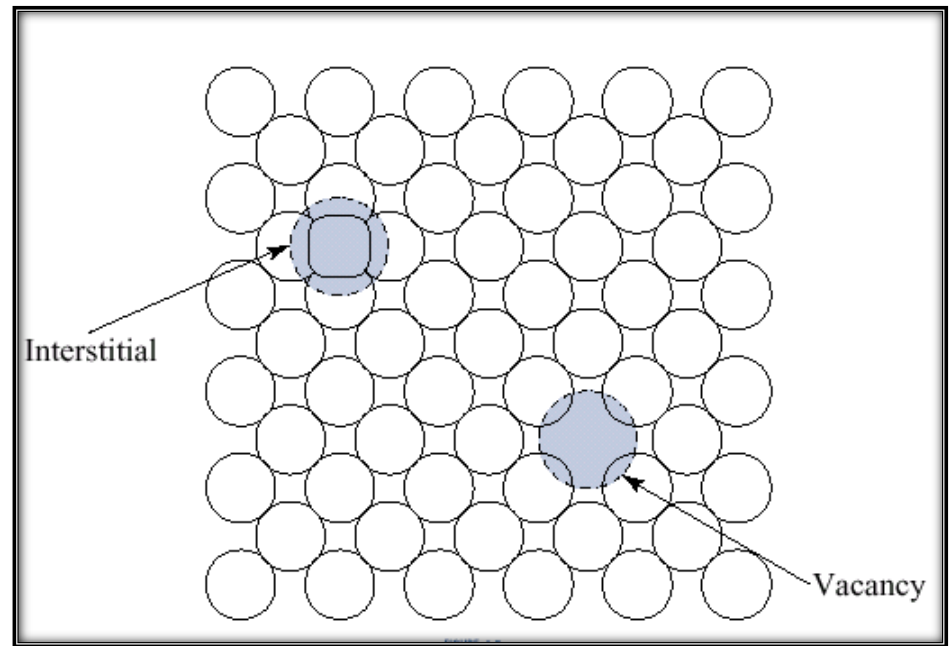
Ο αριθμός των πλεγματικών κενών
συναρτήσει της θερμοκρασίας
δίνεται από το
νόμο του Arrhenius

$$N_v = N \exp\left(-\frac{Q}{KT}\right)$$

ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ:

- Κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου
- Κατά τη διάχυση σε στερεά κατάσταση
- Κατά τη διάρκεια μηχανουργικών κατεργασιών
- Μετά το βομβαρδισμό από σωματίδια μεγάλης ενέργειας.

ΠΛΕΓΜΑΤΙΚΑ ΚΕΝΑ

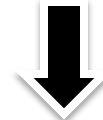


Πολύ χαμηλή συγκέντρωση
τέτοιου τύπου ατελειών

Όμως προκαλούν πολύ
μεγάλες παραμορφώσεις στο
κρυσταλλικό πλέγμα.



Άρα η
απαιτούμενη ενέργεια
σχηματισμού τους
είναι πολύ **μεγάλη** ($\approx 7\text{eV}$).



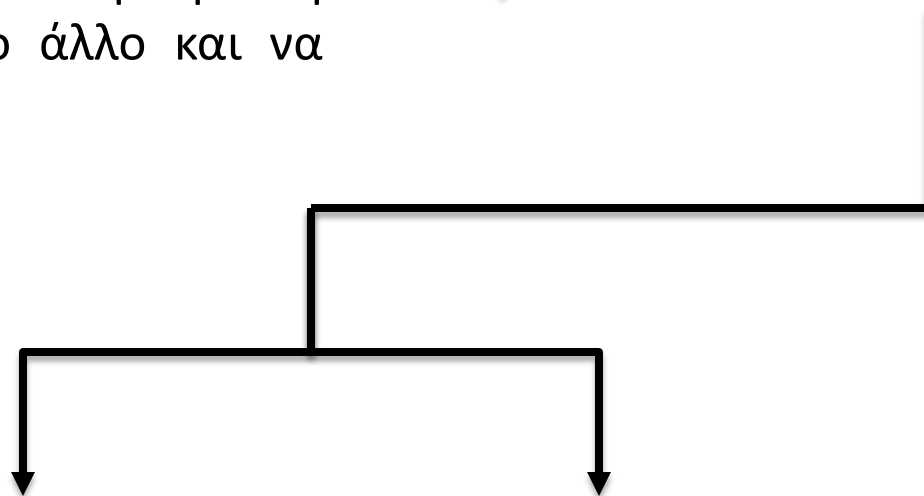
Εισάγονται στο κρυσταλλικό
πλέγμα με χρήση
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.

ΕΝΘΕΤΑ ΑΤΟΜΑ ΜΗΤΡΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

Ένα σώμα μπορεί να διαλύσει, -να συμπεριλάβει, δηλαδή, στο κρυσταλλικό του πλέγμα,- ένα ποσοστό από άλλο σώμα ή άλλο στοιχείο, ανάλογα με τη διαλυτότητα του ενός στο άλλο και να σχηματίσει έτσι



ΣΤΕΡΕΟ ΔΙΑΛΥΜΑ



Στερεά διαλύματα αντικατάστασης

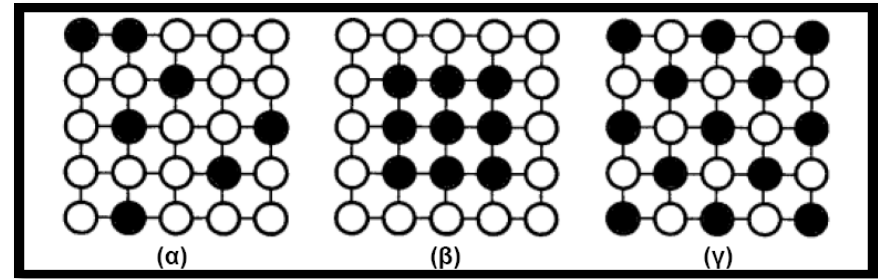
Αντικατάσταση ατόμων της μητρικής δομής από ξένα άτομα, σε πλεγματικές θέσεις

Στερεά διαλύματα παρεμβολής

Παρεμβολή των ξένων ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα της μητρικής δομής, σε παραπλεγματικές θέσεις

ΞΕΝΑ ΕΝΘΕΤΑ ΑΤΟΜΑ

Η αντικατάσταση ατόμου μητρικής δομής από ξένο άτομο διαφορετικής ατομικής ακτίνας εισάγει τοπικές παραμορφώσεις στο πλέγμα, προκαλώντας αύξηση της συνολικής ενέργειας του κρυστάλλου.



Τα ξένα άτομα καταλαμβάνουν τυχαίες θέσεις στο πλέγμα ή έχουν μορφή συγκεντρωμένου συγκροτήματος ή ακολουθούν συγκεκριμένη διάταξη.

Δομές διαλυμάτων αντικατάστασης

(α) Τυχαία διάταξη ατόμων

(β) Συγκρότημα ατόμων κραμάτωσης

(γ) Διατεταγμένο στερεό διάλυμα

Η αντικατάσταση διέπεται από τους **κανόνες των Hume-Rothery**, που περιγράφουν την επίδραση χαρακτηριστικών μεγεθών στο σχηματισμό διαλυμάτων αντικατάστασης.

ΣΤΕΡΕΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

1. Η επίδραση του μεγέθους ατόμων (Κανόνας του 15%):

Αν δ_A και δ_B οι διάμετροι μητρικών και ξένων ατόμων, αντίστοιχα, θα πρέπει να ισχύει:

$$0.85\delta_A < \delta_B < 1.14\delta_A$$

Δηλαδή, η διαφορά μεγέθους μεταξύ των ατόμων πρέπει να βρίσκεται στο διάστημα $\pm 15\%$, ενώ έξω από τα όρια αυτά η διαλυτότητα του B στο A είναι πολύ μικρή.

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά $|\delta_A - \delta_B|$, τόσο μεγαλύτερη παραμόρφωση υφίσταται το κρυσταλλικό πλέγμα, ενώ συγχρόνως αυξάνεται η ενεργειακή στάθμη του προκύπτοντος στερεού διαλύματος.

2. Η επίδραση της κρυσταλλικότητας

Για επίτευξη ικανοποιητικής διαλυτότητας προτιμάται τα δύο στοιχεία να έχουν **ίδια κρυσταλλική δομή**.

3. Η επίδραση του σθένους

Προτιμάται τα δύο μέταλλα να έχουν **ίδιο σθένος**.

Η διαλυτότητα του B στο A ευνοείται αν $(\sigma\theta\acute{\epsilon}\nu\omicron\varsigma)_B > (\sigma\theta\acute{\epsilon}\nu\omicron\varsigma)_A$, ενώ στην αντίθετη περίπτωση δυσχεραίνεται.

4. Η επίδραση της διαφοράς ηλεκτραρνητικότητας.

Επιδιώκεται η διαφορά ηλεκτραρνητικότητας να είναι περίπου μηδενική.

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά ηλεκτραρνητικότητας μεταξύ των A και B, τόσο μειώνεται ο μεταλλικός χαρακτήρας του δεσμού μεταξύ των ατόμων A και B.

Αύξηση της διαφοράς ηλεκτραρνητικότητας οδηγεί διαδοχικά από στερεό μεταλλικό διάλυμα A-B σε διατεταγμένο στερεό διάλυμα και, τελικά, σε διμεταλλική ένωση με μερικό ιοντικό δεσμό.

5. Η επίδραση της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων σθένους.

Αν e ο αριθμός ηλεκτρονίων σθένους ανά άτομο και a η ακμή της κυψελίδας, για να υπάρχει πλήρης διαλυτότητα θα πρέπει να ισχύει: $e/a \leq 1.4$.

Πλήρης αναμιξιμότητα σε οποιοδήποτε ποσοστό (διάλυμα πλήρους αναμιξιμότητας) επιτυγχάνεται όταν ισχύουν συγχρόνως: $e/a \leq 1.4$ και $|\delta_A - \delta_B| / \delta_A < 8\%$.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

Συνήθως, οι 4 πρώτοι κανόνες παρέχουν σαφείς ενδείξεις για την επιδιωκόμενη κραμάτωση.

Τα ξένα άτομα παρεμβάλλονται στο μητρικό κρυσταλλικό πλέγμα σε παρακρυσταλλικές θέσεις στα σχηματιζόμενα οκταεδρικά και τετραεδρικά κενά.

Η διάμετρος του ξένου ατόμου πρέπει να είναι πολύ μικρότερη αυτής του μητρικού ατόμου.

Συνηθέστερα στοιχεία παρεμβολής:
C, N, O, H, B.

Οι ευνοϊκές συνθήκες για την ετερο-παρεμβολή περιγράφονται από τους **κανόνες του Hagg**.

ΚΑΝΟΝΕΣ ΤΟΥ HAGG

Η επίδραση του μεγέθους των ατόμων

$$\delta_B < 0.59 \delta_A$$

Η επίδραση του στοιχείου A

Η ετερο-παρεμβολή ευνοείται όταν το μητρικό στοιχείο A ανήκει στα μεταβατικά στοιχεία του Περιοδικού Συστήματος.

ΣΤΕΡΕΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ

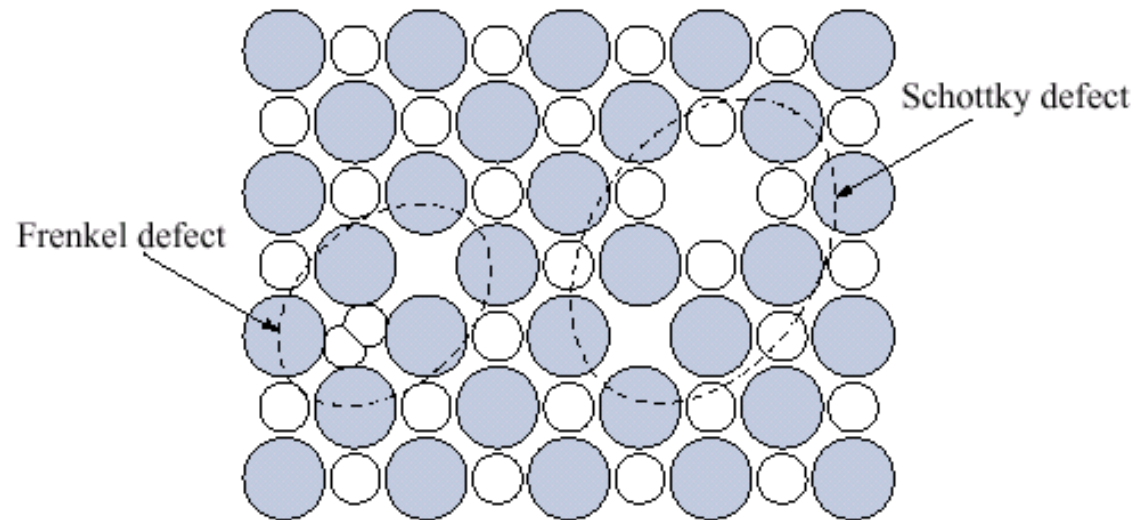
Κατιονικό κενό	δημιουργείται από την απουσία θετικού ιόντος	Για να επιτευχθεί ηλεκτροουδετερότητα σε ιοντικό στερεό ,
Ανιονικό κενό	δημιουργείται από την απουσία αρνητικού ιόντος	ένα κατιονικό κενό εξισορροπείται από την ταυτόχρονη παρουσία ανιονικού κενού στην περιοχή του.

Ατέλεια Schottky

είναι το ζεύγος κατιονικού και ανιονικού κενού

Ατέλεια Frenkel

είναι το ζεύγος κατιονικού κενού και παραπλεγματικού κατιόντος



Η παρουσία ατελειών Frenkel και Schottky προκαλεί αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του στερεού.

ΑΤΕΛΕΙΕΣ FRENKEL ΚΑΙ SCHOTTKY

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2. ΕΙΔΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

3. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

**4. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ή
ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ**

5. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ή ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

6. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

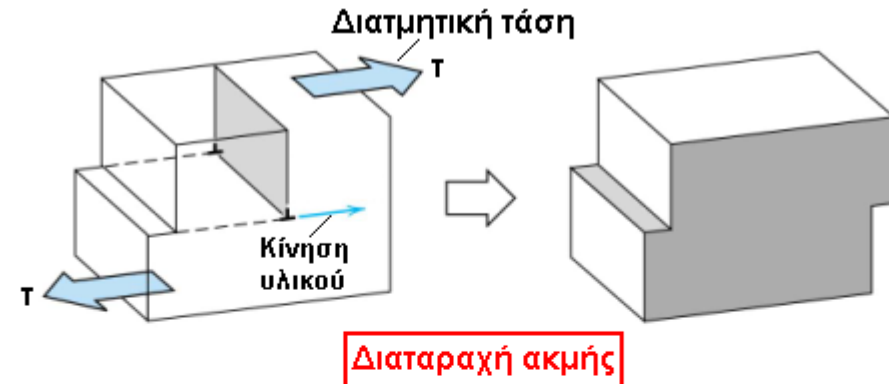
Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

Ορισμός

είναι ατέλειες της κρυσταλλικής δομής κατά μήκος μιας γραμμής, που χωρίζει ένα κρυσταλλικό επίπεδο σε δύο τμήματα με τέλεια κρυσταλλική δομή το καθένα, αλλά χωρίς να υπάρχει συνέχεια μεταξύ των δύο πλεγμάτων.

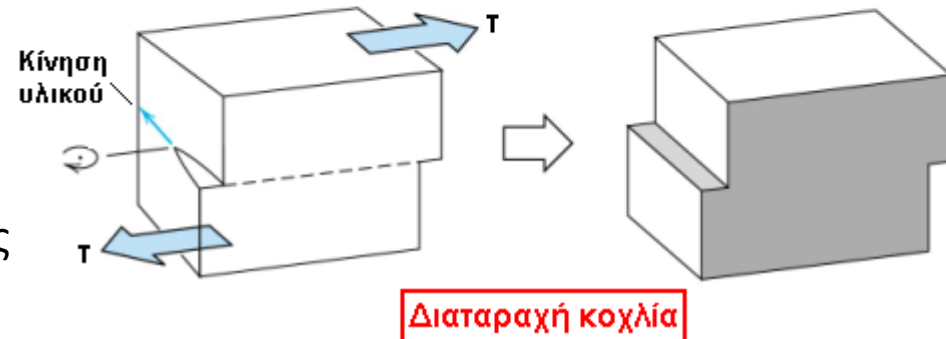
Δημιουργούνται

- κατά τη στερεοποίηση του στερεού (ανώμαλη ανάπτυξη κρυστάλλου)
- κατά την πλαστική παραμόρφωση (ολίσθηση κρυσταλλικού επιπέδου)

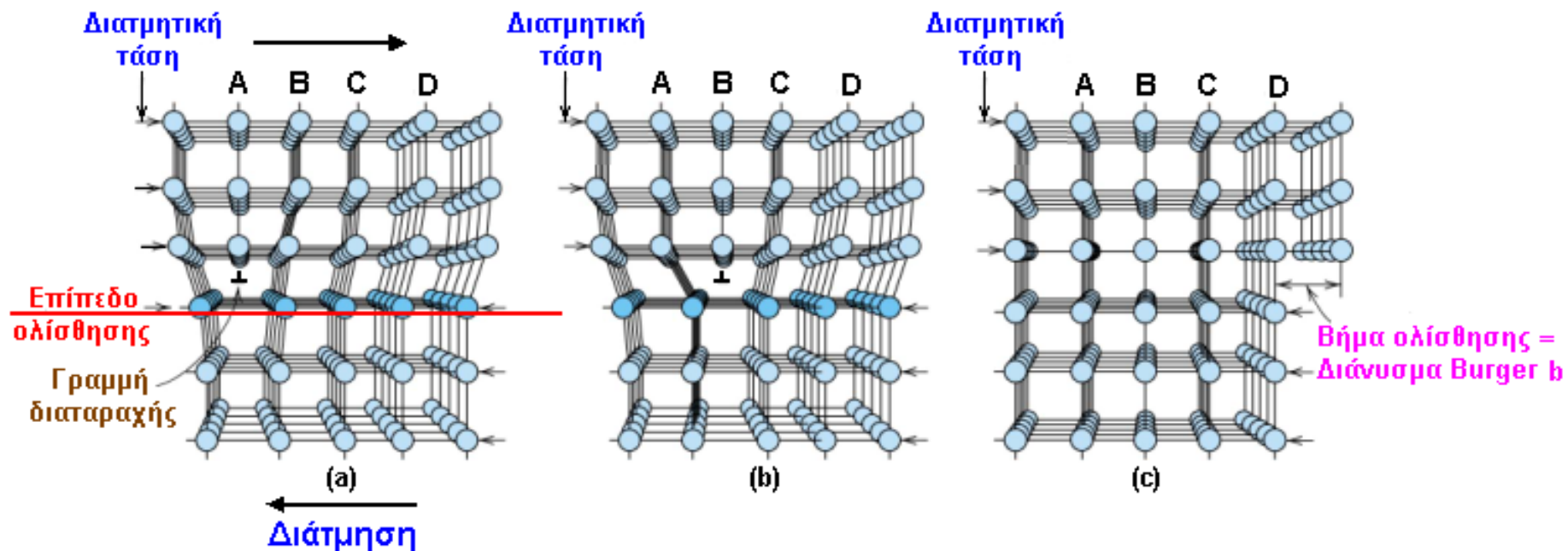


Είδη Γραμμικών ατελειών

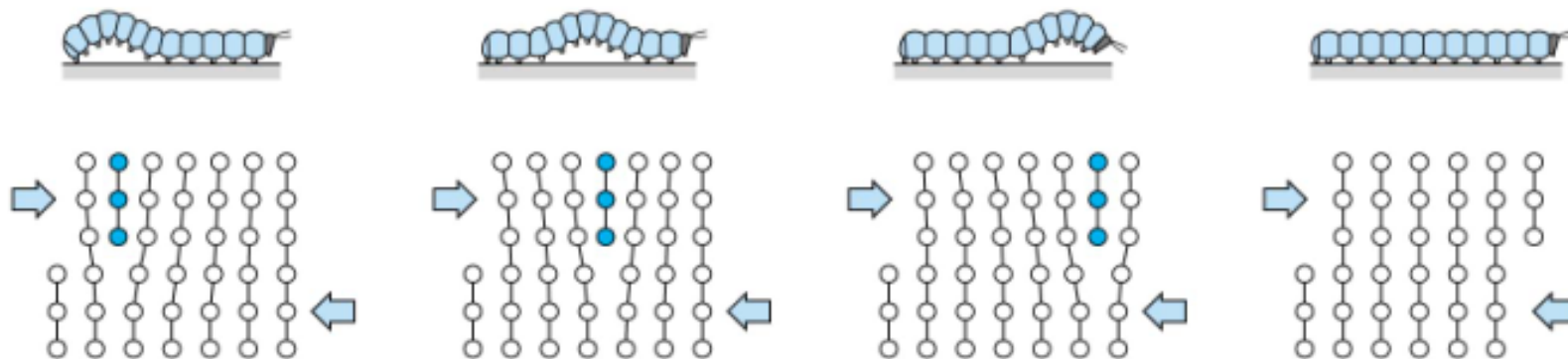
- Διαταραχή ακμής
- Διαταραχή κοχλία - ελικοειδείς διαταραχές
- Μικτές διαταραχές



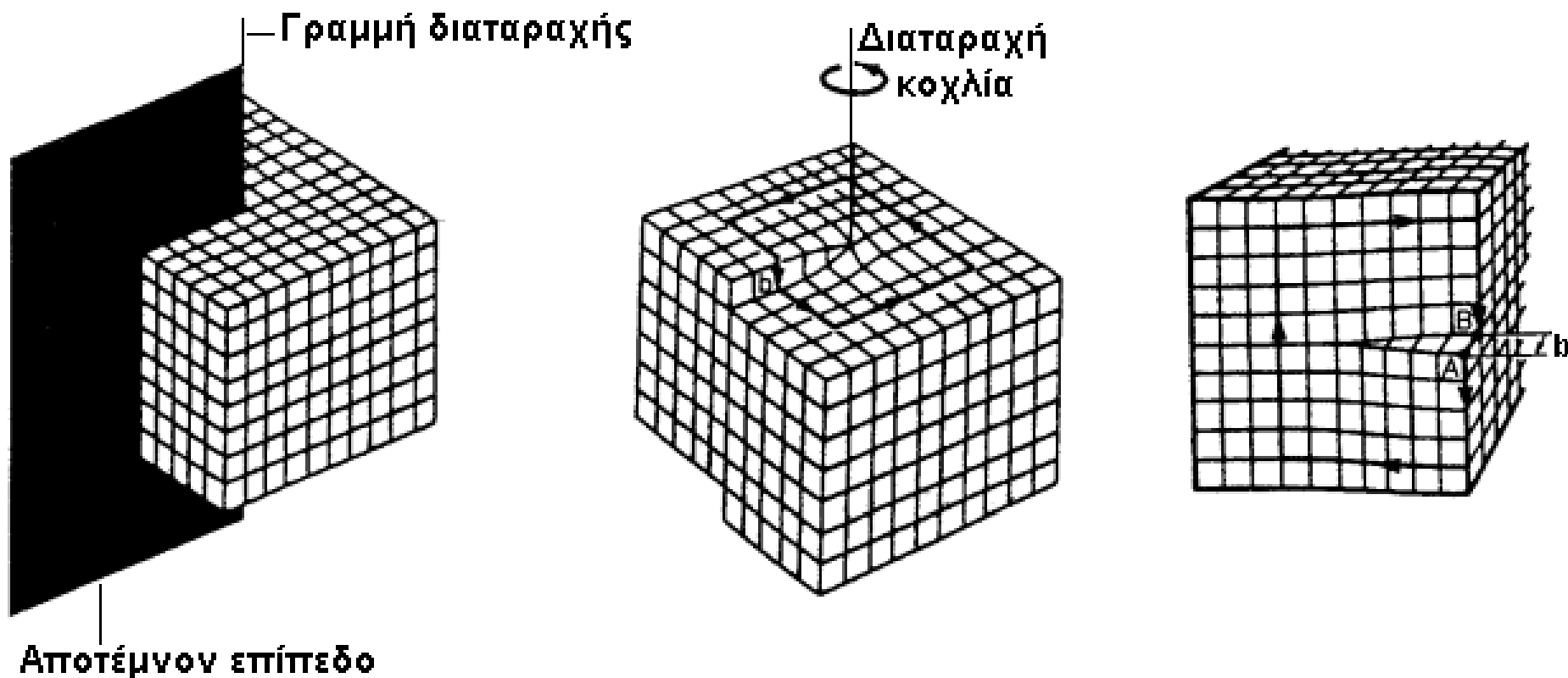
ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ή ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ



ΤΟ ΑΝΑΛΟΓΟ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΜΠΙΑΣ



ΚΙΝΗΣΗ ΜΙΑΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΑΚΜΗΣ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΤΟΥ
ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

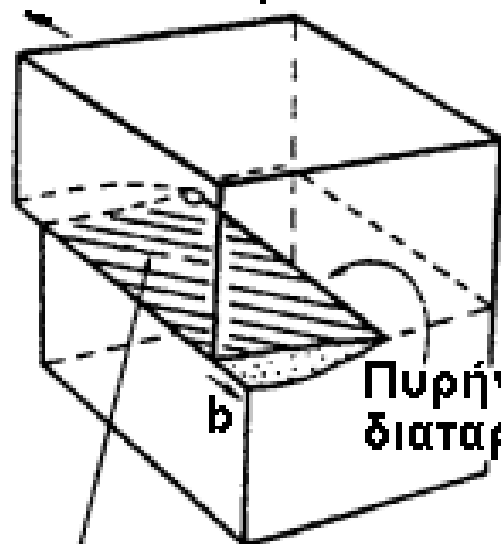


Σχηματισμός και χαρακτηριστικά διαταραχής κοχλία.

(καθορισμός γραμμής διαταραχής και διανύσματος Burgers – το διάνυσμα Burgers είναι παράλληλο προς τη γραμμή διαταραχής, η οποία συμπίπτει με τον άξονα του κοχλία).

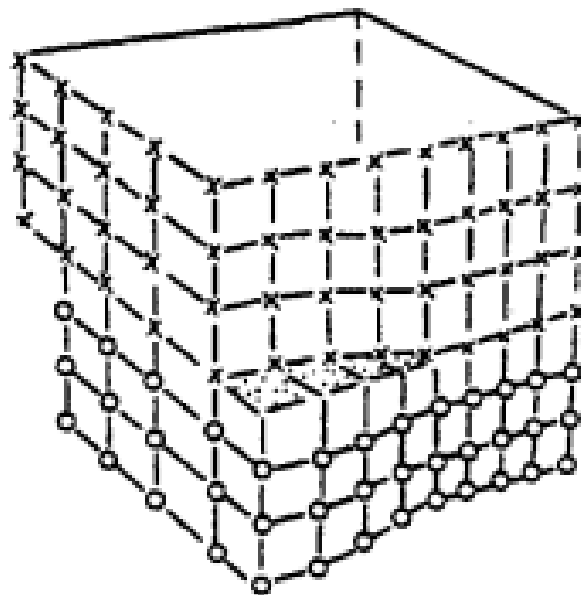
ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ ΚΟΧΛΙΑ

Μετατόπιση

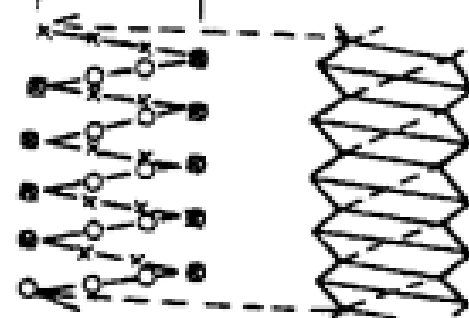
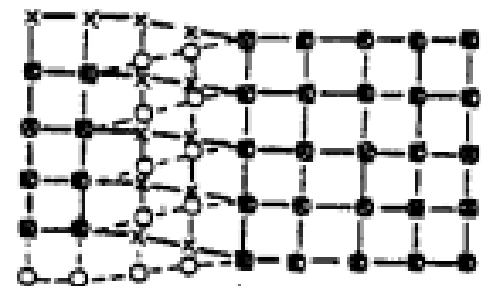


Πυρήνας
διαταραχής

Αποτέμνον
επίπεδο



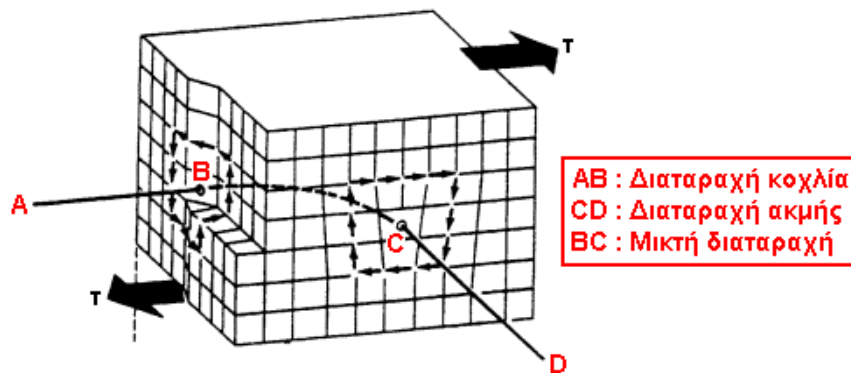
x Άτομα πάνω από το επίπεδο
o Άτομα κάτω από το επίπεδο



Μορφή κοχλία

Μακροσκοπική μορφή της διαταραχής κοχλία με τα άτομα τοποθετημένα πλησίον της διαταραχής (απεικόνιση της μορφής κοχλία).

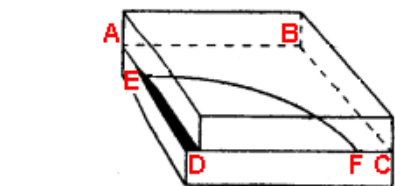
ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ ΚΟΧΛΙΑ



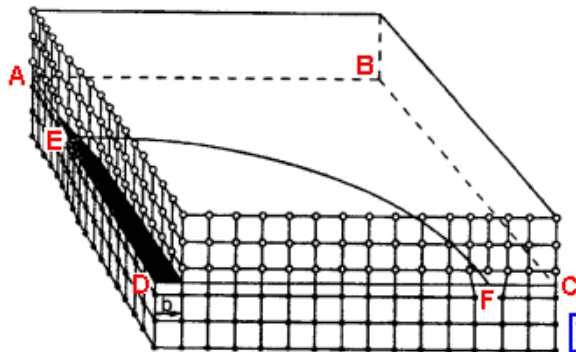
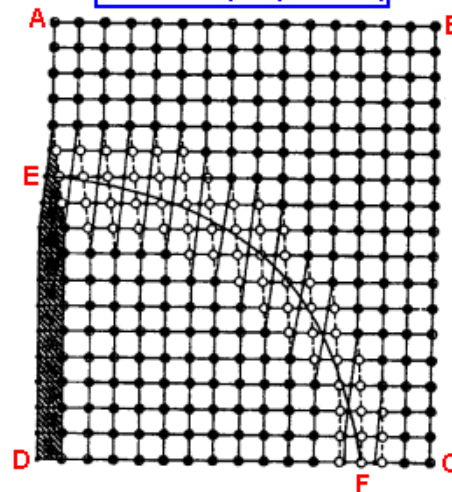
Αναλυτική παράσταση μικτής διαταραχής

Όταν η διεύθυνση της ολίσθησης μετά από διατμητική καταπόνηση σχηματίζει τυχαία γωνία με τη γραμμή της διαταραχής, τότε η προκαλούμενη διαταραχή ονομάζεται

ΜΙΚΤΗ



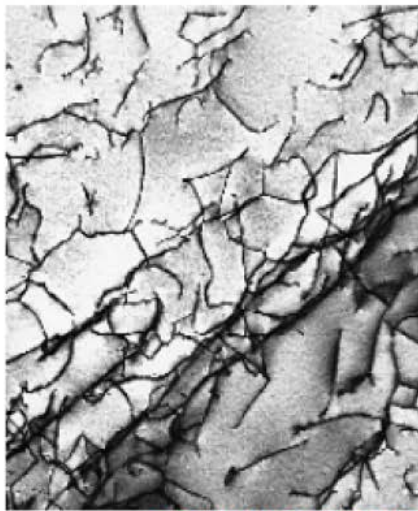
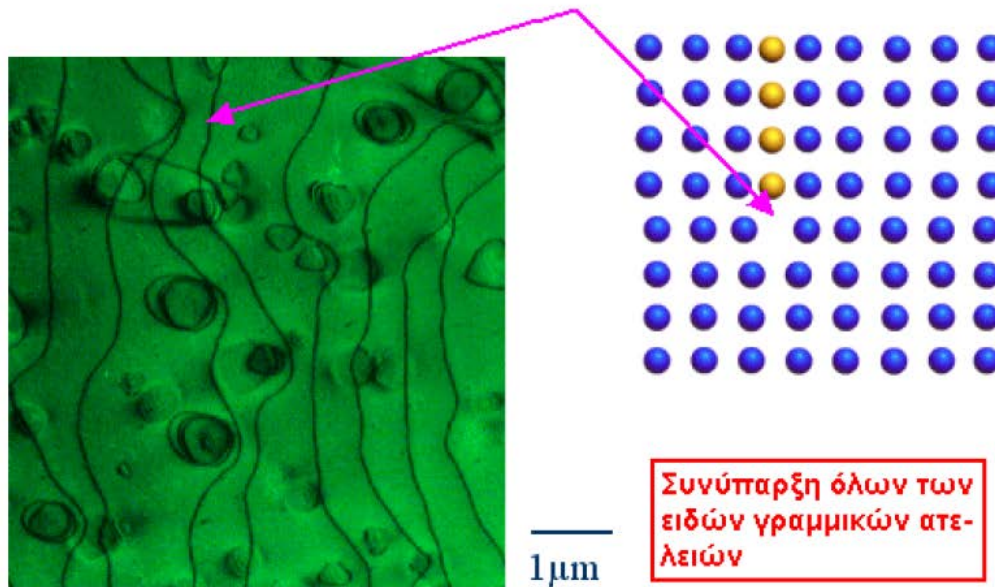
Διδιάστατη παράσταση



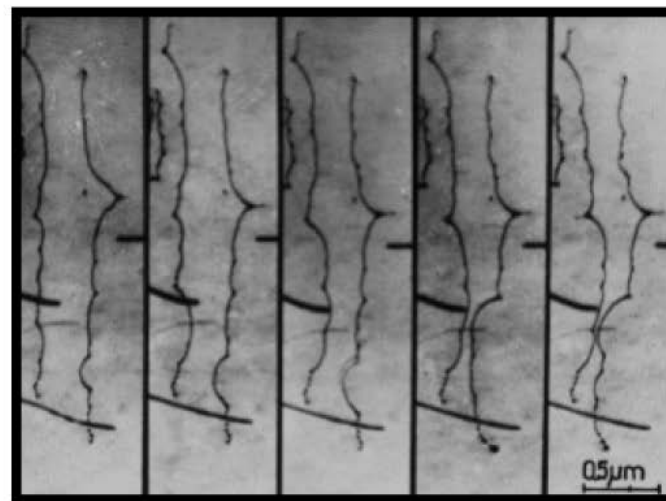
Τρισδιάστατη παράσταση

Πως μεταβάλλεται π.χ. από διαταραχή κοχλία σε διαταραχή ακμής?

ΜΙΚΤΕΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ



Γραμμικές ατέλειες
σε κράμα Ti



Κίνηση αταξιών κοχλία σε μονοκρυστάλλο MgO

ΜΙΚΡΟ-ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ή
ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2. ΕΙΔΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

3. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

4. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ή
ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ

5. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ή ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

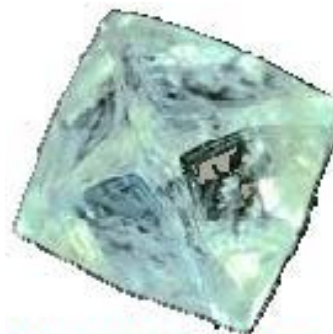
6. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Διακρίνονται σε:

- Διαχωριστικές περατωτικές επιφάνειες κόκκων ή Όρια κόκκων (grain boundaries)
- Διδυμίες (twinning)
- Σφάλματα επιστοίβασης (stacking defects)

Τα κρυσταλλικά υλικά μπορεί να εμφανίζονται ως **μονο-κρύσταλλοι** (σπάνια) ή ως **πολυκρυσταλλικά** υλικά (κατά κανόνα).

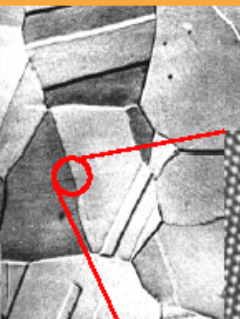


**Μονοκρύσταλλος
διαμαντιού**

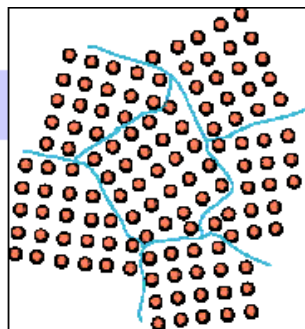


**Πλίνθωμα αλουμινίου
πολυκρυσταλλικής δομής**

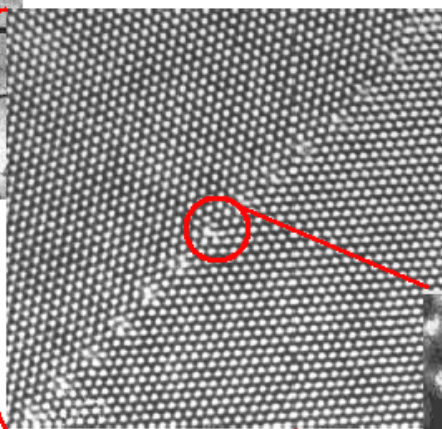
ΟΡΙΑ ΚΟΚΚΩΝ



Οι κόκκοι στον πολυκρυσταλλικό Cu έχουν διαφορετική διεύθυνση

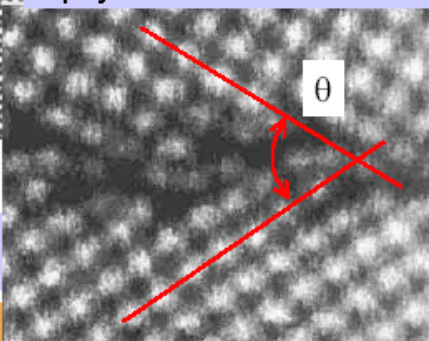


Οι ιδιότητες των ορίων κόκκων μεταβάλλονται ανάλογα με την γωνία θ και το βαθμό συνεκτικότητας



Τα όρια κόκκων χαρακτηρίζονται από μη κανονική διάταξη και χαμηλή πυκνότητα σώρευσης ατόμων

Τα όρια κόκκων ανακόπτουν την κίνηση αταξιών



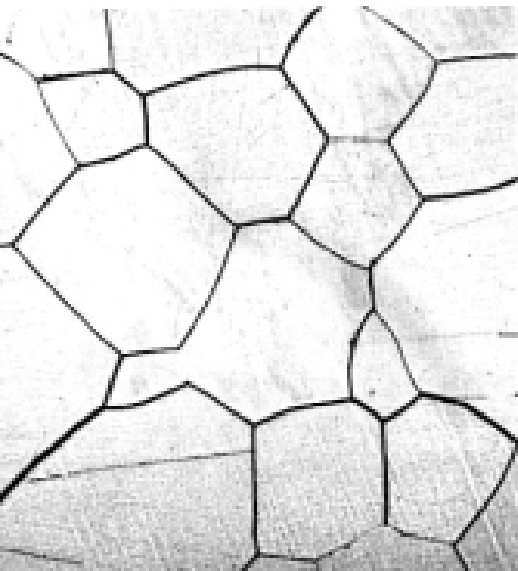
Κάθε πολυκρυσταλλικό μεταλλικό υλικό αποτελείται από μεγάλο αριθμό κρυστάλλων, που βρίσκονται τοποθετημένοι ο ένας δίπλα στον άλλο – με δικό του προσανατολισμό ο καθένας – και σχηματίζουν ένα συνεχές σύνολο.

ΟΡΙΑ ΚΟΚΚΩΝ

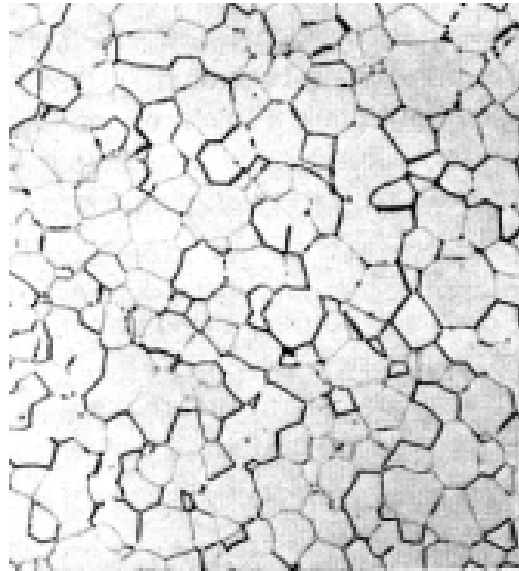
Το μέγεθος κόκκου ενός μετάλλου εξαρτάται από τη μέθοδο παραγωγής του και τις κατεργασίες που έχει υποστεί στη συνέχεια

Λαμβάνει τιμές μικρότερες του 1 μm έως μερικά cm και τυποποιείται κατά ASTM σύμφωνα με τη σχέση:

$$N = 2^{n-1}$$



Χονδρόκοκκο



Λεπτόκοκκο

όπου

N ο αριθμός κοκκομετρίας, που εκφράζει τον αριθμό κόκκων/ in^2 σε μεταλλογραφική παρατήρηση υπό μεγέθυνση 100 και

n αριθμός από 1-10

υλικά με $n=1-3$



χονδρόκοκκα

υλικά με $n>7$



λεπτόκοκκα

ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΟΚΚΟΥ

Τα άτομα στην περιοχή των ορίων των κόκκων κατέχουν ενδιάμεσες θέσεις μεταξύ των κόμβων των γειτονικών πλεγμάτων διατηρώντας τους υπάρχοντες ατομικούς δεσμούς.

Για τη συνένωση δύο κόκκων αναπτύσσονται στην περιοχή των ορίων τους τάσεις, οι οποίες απαιτούν την δέσμευση μιας διεπιφανειακής ενέργειας, η οποία αυξάνεται με αύξηση της διαφοράς προσανατολισμού των συνδεομένων κόκκων. Άρα, τα όρια των κόκκων είναι ζώνες ατόμων με υψηλότερη ενέργεια από τα γειτονικά τους άτομα

Εμφανίζουν το φαινόμενο της μεγέθυνσης των κόκκων, που εκδηλώνεται υπό ορισμένες συνθήκες με μετακίνηση των ορίων των μεγαλύτερων κόκκων σε βάρος των μικρότερων κόκκων, μέχρις ότου οι τελευταίοι εξαφανιστούν.

ΟΡΙΑ ΚΟΚΚΩΝ



ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

- Κατά την επίδραση με χημικό αντιδραστήριο σε μεταλλογραφικό δοκίμιο, τα όρια των κόκκων υφίστανται επιλεκτική διάβρωση, διευκολύνοντας τη μικροσκοπική παρατήρηση της δομής.
- Η τήξη των καθαρών μετάλλων εκκινεί από τα όρια κόκκων (έχουν χαμηλότερο Σ.Τ.)
- Η διάχυση των ατόμων γίνεται ευκολότερα μέσω των ορίων των κόκκων
- Η ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων οφείλεται σε μεγάλο ποσοστό στα όρια των κόκκων
- Κατά τη στερεοποίηση τήγματος μετάλλου, οι μικροακαθαρσίες συγκεντρώνονται στα όρια των κόκκων
- Οι μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων κατά την πλαστική παραμόρφωση τους επηρεάζονται σημαντικά από τα όρια των κόκκων

➤ Θερμοκρασία:

Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της κινητικότητας των ατόμων, με αποτέλεσμα να ευνοείται η διάχυση των ατόμων μέσω των ορίων τους και κατά συνέπεια να επιταχύνεται η μεγέθυνση των κόκκων

➤ Ομοιομορφία μεγέθους κόκκων:

Σε ισομεγέθεις κόκκους, το φαινόμενο της μεγέθυνσης είναι ασήμαντο. Αντίθετα, σε ανισομεγέθεις κόκκους το φαινόμενο της μεγέθυνσης ευνοείται

➤ Αρχικό μέσο μέγεθος κόκκων:

Η μεγέθυνση κόκκων είναι εντονότερη σε λεπτόκοκκα μέταλλα (μεγαλύτερο μήκος ορίων ανά μονάδα επιφάνειας).

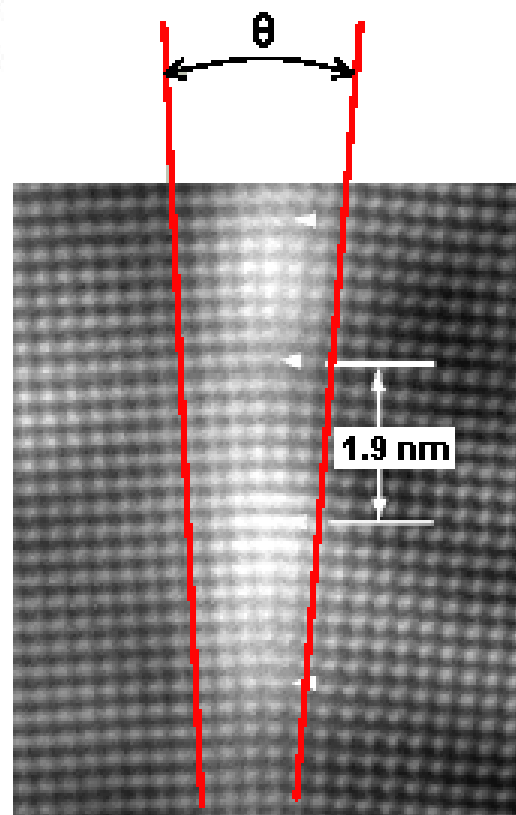
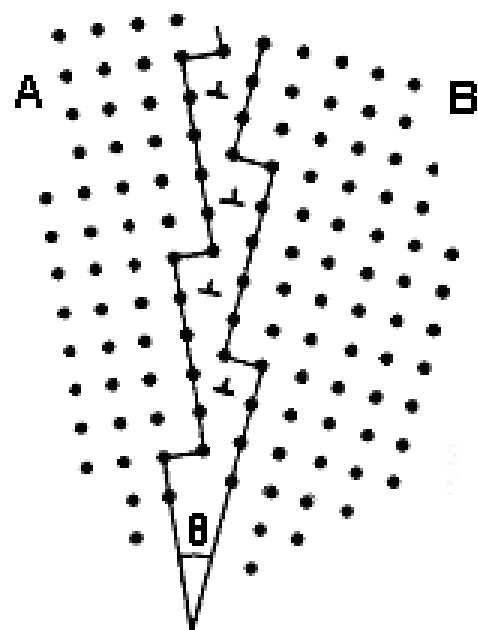
➤ Μικροακαθαρσίες:

Αυτές συσσωρεύονται στα όρια των κόκκων και εμποδίζουν την ελεύθερη μετακίνηση των ατόμων και τη διάχυσή τους μέσω των ορίων. Άρα, η μεγέθυνση των κόκκων δυσχεραίνεται από την παρουσία μικροακαθαρσιών

ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ

Όρια κόκκων μικρής γωνίας θ

Τα μικρής γωνίας όρια έχουν
λογχοειδή μορφή (tilt boundary)
και αποτελούνται στην ουσία
από ένα τοίχωμα αταξιών ακμής



Η συνεκτικότητα εξαρτάται από
τον αριθμό των κοινών ατόμων
στα όρια των κόκκων, τα οποία
χαρακτηρίζονται ως:

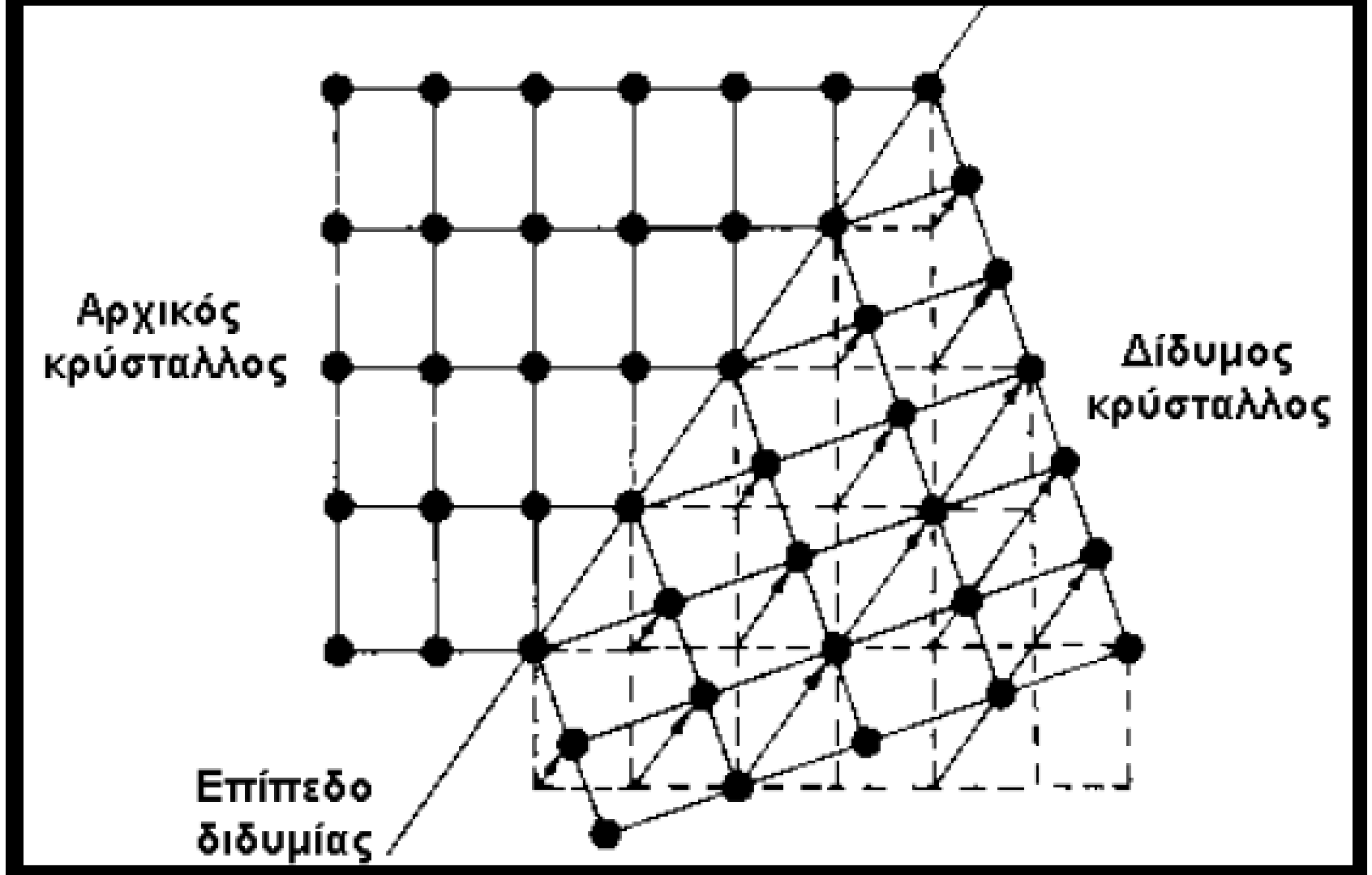
Συνεκτικά (>85% κοινά άτομα)

Ημι-συνεκτικά (40-60%)

Μη συνεκτικά (<15%)

Τα όρια κόκκων μικρής γωνίας
 θ έχουν πιο κανονική διάταξη
ατόμων, μεγαλύτερο βαθμό
συνάφειας και χαμηλότερο
ενεργειακό επίπεδο

ΓΩΝΙΑ θ , ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΟΚΚΩΝ,
ΣΗΜΑΣΙΑ ΟΡΙΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΓΩΝΙΑΣ θ

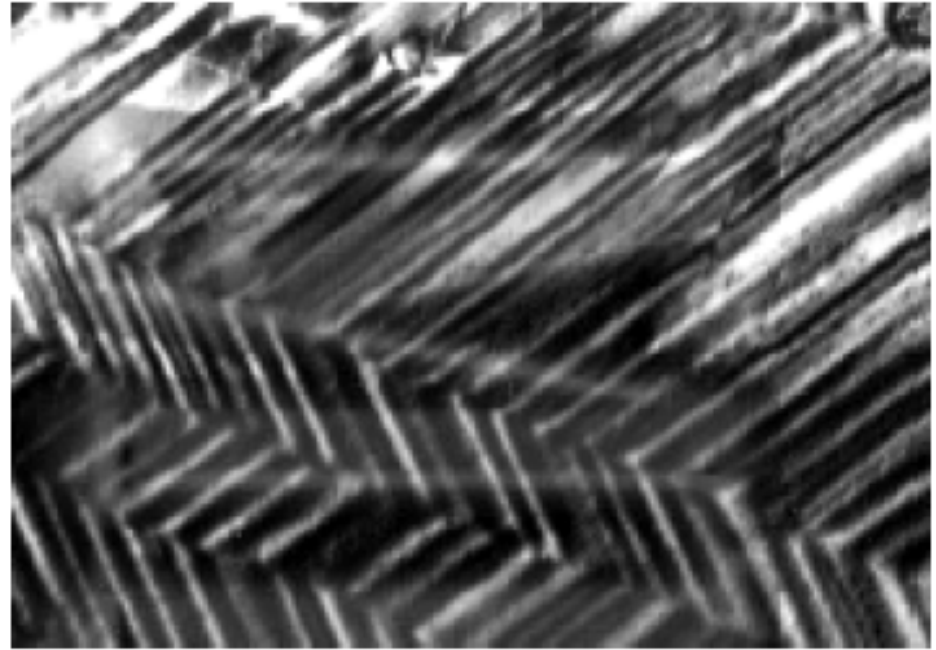


Διδυμία υφίσταται σε έναν κρύσταλλο όταν ένα τμήμα του βρίσκεται μετατοπισμένο ως προς το υπόλοιπο τμήμα του, έτσι ώστε το ένα να αποτελεί είδωλο του άλλου ως προς ένα κρυσταλλικό επίπεδο (ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΔΥΜΙΑΣ)

ΔΙΔΥΜΙΕΣ



Κράματος Cu-Zn



Κράματος Cu-Zn-Al

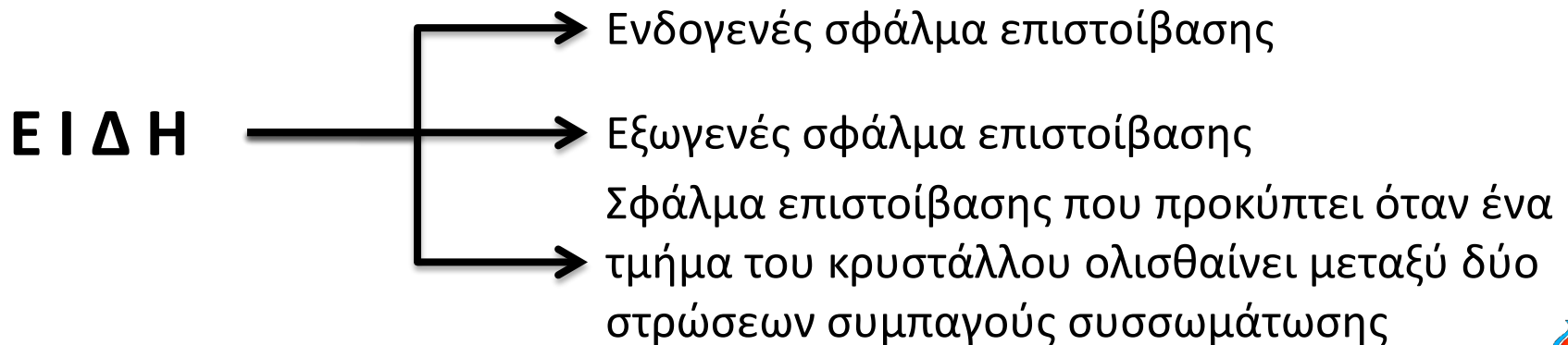
Στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο οι ζώνες διδυμίας εμφανίζονται ως παράλληλες ταινίες διαφορετικής τονικότητας στο εσωτερικό των κόκκων. Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι η ανάκλαση του φωτός είναι διαφορετική στα δίδυμα τμήματα του κρυστάλλου (έχουν διαφορετικό προσανατολισμό).

ΜΙΚΡΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΙΔΥΜΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ



Ανάπτυξη σφαλμάτων
επιστοίβασης σε μονο-
κρύσταλλο κράμα Co-Ni.

Πρόκειται για ατέλειες που παρεμβαίνουν στην προβλεπόμενη από την κρυσταλλική δομή διαδοχή των επιπέδων κατά μήκος μιας κρυσταλλογραφικής διεύθυνσης.



ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΕΠΙΣΤΟΙΒΑΣΗΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2. ΕΙΔΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

3. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

4. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΜΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ή ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ή
ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ

5. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ή ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

6. ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

ΟΡΙΣΜΟΣ

Πρόκειται για ατέλειες όπου μέρος του όγκου του μητρικού κρυστάλλου αντικαθίσταται από όγκο διαφορετικής ένωσης.

ΕΙΔΗ (ανάλογα με τη χημική σύνθεση της “ξένης ουσίας”)

➤ Κατακρημνίσματα (*percipitates*)

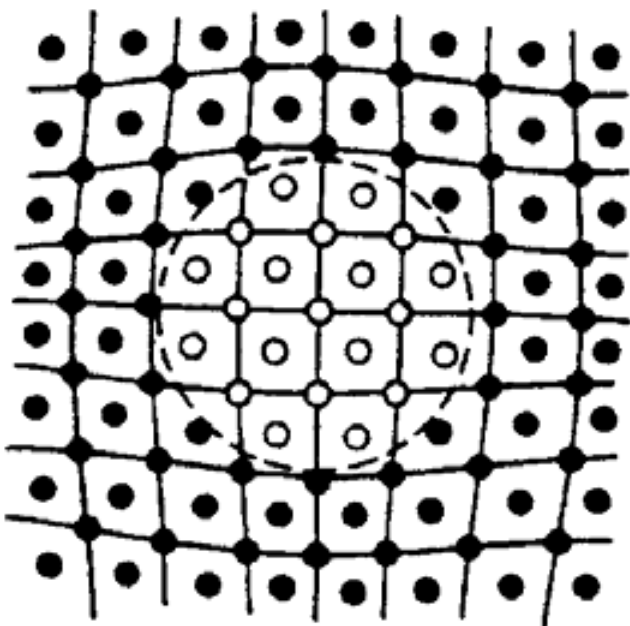
Είναι μικρού μεγέθους ενώσεις που σχηματίζονται από το μητρικό μέταλλο και ένα στοιχείο κραμάτωσης.

➤ Εγκλείσματα (*inclusions*)

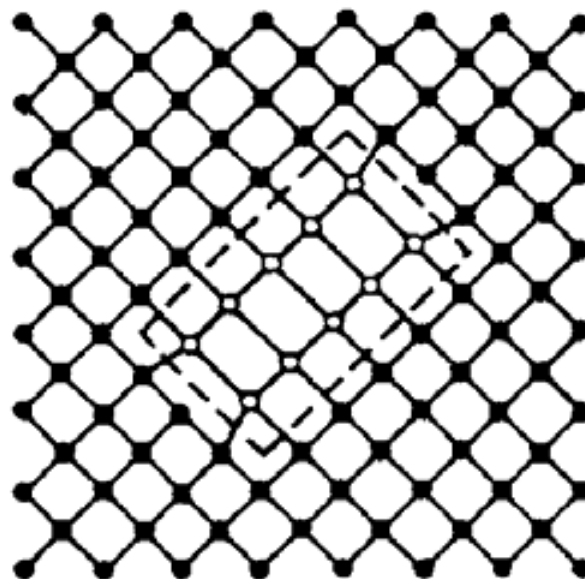
Είναι ακαθαρσίες (οξειδία, θειούχες ή πυριτικές ενώσεις) που δημιουργούνται κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου από την υγρή φάση.

➤ Στις ατέλειες τριών διαστάσεων υπάγονται ακόμη οι **πόροι** (που δημιουργούνται π.χ. από τυρβώδη ροή κατά την χύτευση) και **οι ρωγμές** (λύση της συνέχειας του κρυστάλλου)

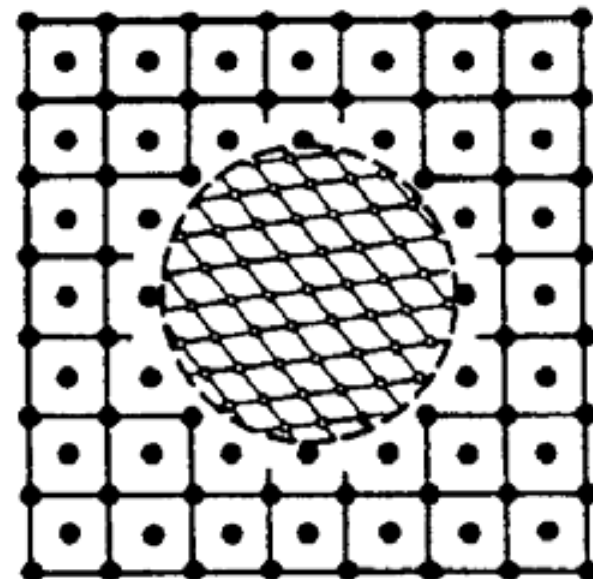
ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ



Με πλεγματική
συνέχεια με το
μητρικό πλέγμα



Με
ημιπλεγματική
συνέχεια

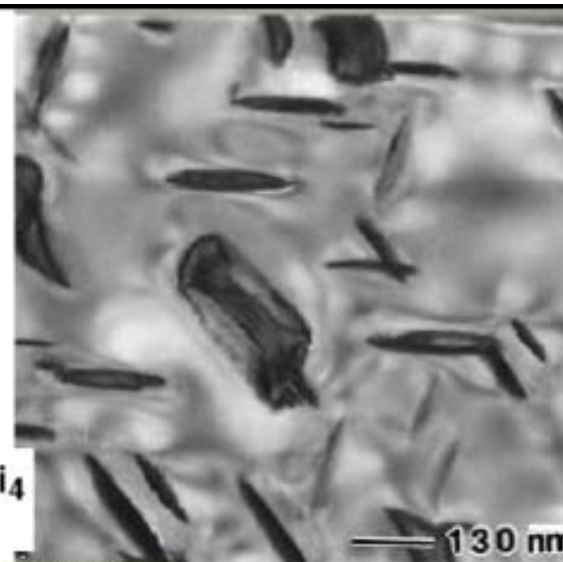


Χωρίς καμιά
πλεγματική
συνέχεια

ΤΥΠΟΙ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΩΝ



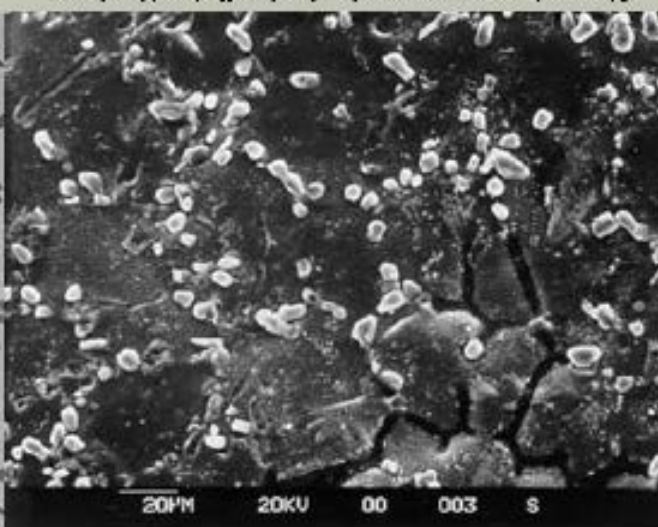
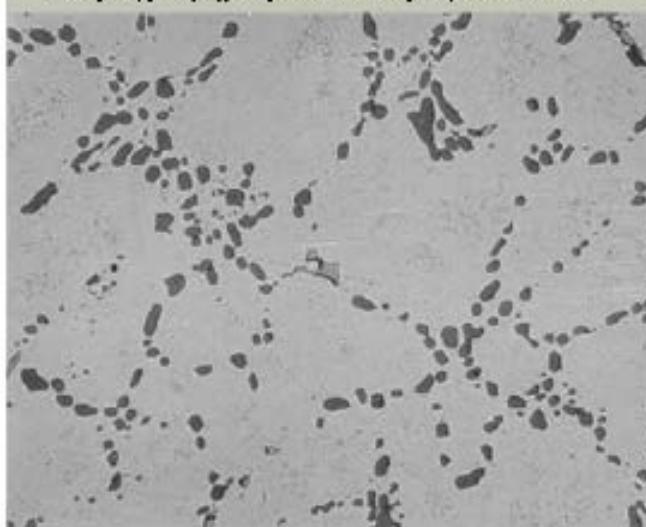
Φολίδες γραφίτη στον
φαιό χυτοσίδηρο κατά
τη στερεοποίησή του



Κατακρημνίσματα Ti_3Ni_4
σε κράμα Ni-Ti

Μικρογράφημα με οπτικό μικροσκόπιο

Μικρογράφημα με μικροσκόπιο σάρωσης



Ενδοκρυσταλλικά κατάκρη-
μνίσματα Si και ρωγμές σε
κράμα Al-Si (αεροναυπηγι-
κής χρήσης)

➤ Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών**, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

➤ Δ. Τσιπάς, **Σημειώσεις/Διαλέξεις Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών II**. Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010

➤ W.D. Callister JR, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών** (5^η έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2008.

➤ Τίτλος πρωτότυπου: William D. Callister, JR. **Materials Science and Engineering, an introduction**.

➤ H.G. Van Bueren, **Imperfections in Crystals**, North Holland Publishing Co., Amsterdam (Wiley – Interscience, New York), 1960

➤ W.G. Moffatt, G.W. Pearsall, and J. Wulff, **The Structure and Properties of Materials, Vol. 1, Structure**, John Wiley & Sons, New York, 1964

➤ ASM Handbook, **Vol. 9, Metallography and Microstructures**, ASM International, Materials Park, OH, 1985

➤ G.F. Van der Voort, **Metallography, Principles and Practice**, McGraw – Hill Co., New York, 1984

➤ J.P. Hirth & J. Lothe, **Theory of dislocations** (2nd edition), Wiley, 1982

➤ D. Hull & D.J. Bacon, **Introduction to dislocations** (3rd edition), Pergamon Press, 1984

Τεχνολογία Υλικών

Μηχανισμοί Ισχυροποίησης

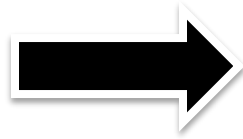
Επικ. Καθ. Α. Τσουκνίδας (tsouknidas@teiwm.gr)



web. <https://biomed.teiwm.gr>

e-class. www.teiwm.gr

ΟΡΙΣΜΟΣ



Σκλήρυνση μεταλλικού υλικού είναι η ισχυροποίησή του έναντι πλαστικής παραμόρφωσης και χαρακτηρίζεται από αύξηση της σκληρότητας, του ορίου διαρροής (σ_y) και της αντοχής του.

ΠΟΥ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ Η ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ;



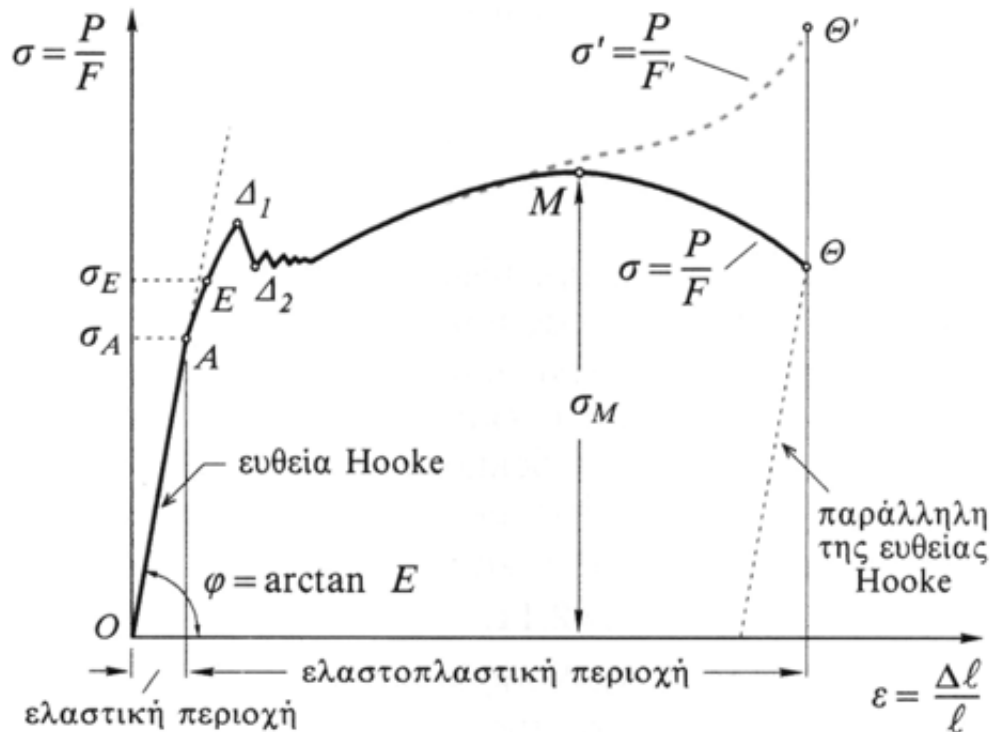
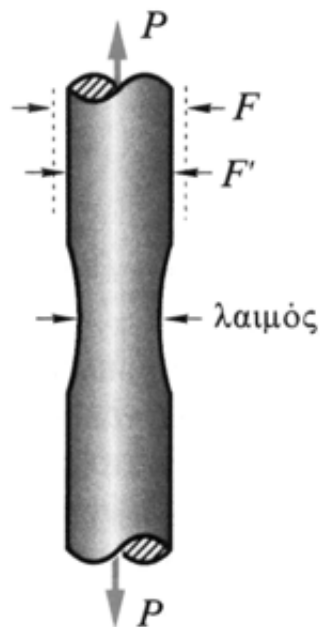
Προέρχεται από την ολίσθηση των αταξιών πάνω σε συγκεκριμένα κρυσταλλογραφικά επίπεδα (επίπεδα ολίσθησης), όταν εφαρμόζεται εξωτερική διατμητική τάση (τ_c).

Η κρίσιμη διατμητική τάση (τ_c) σχετίζεται άμεσα με το όριο διαρροής (σ_y).

Σχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας?

ΜΕΘΟΔΟΣ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΑΤΑΙ
Ισχυροποίηση από τα σύνορα των κόκκων (πως?).	Οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλουν τα σύνορα των κόκκων στην ολίσθηση των αταξιών.	Εξάρτηση της τάσης διαρροής από το μέγεθος των κόκκων.
Ισχυροποίηση με ενδοτράχυνση.	Οφείλεται στην ραγδαία αύξηση (γιατί) της πυκνότητας των αταξιών και στην αλληλεπίδραση μεταξύ τους.	Εξάρτηση της τάσης διαρροής από την πλαστική παραμόρφωση.
Ισχυροποίηση με δημιουργία στερεού διαλύματος.	Οφείλεται στην αλληλεπίδραση των αταξιών με άτομα παρεμβολής ή αντικατάστασης.	Εξάρτηση της τάσης διαρροής από τη συγκέντρωση των συστατικών του κράματος.
Ισχυροποίηση με καθίζηση και διασπορά φάσεων. (κατακρήμνιση λόγω γήρανσης)	Οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλουν σωματίδια άλλων φάσεων, τα οποία σχηματίζονται από καθίζηση ή από διασπορά.	Εξάρτηση της τάσης διαρροής από το κλάσμα όγκου και το μέσο μέγεθος των σωματιδίων.
Ισχυροποίηση με μαρτενσιτικό μετασχηματισμό.	Οφείλεται στην αντίσταση που δημιουργείται από τη μεταβολή του κρυσταλλικού πλέγματος.	Εξάρτηση του ορίου διαρροής από τα χαρακτηριστικά του κρυσταλλικού πλέγματος.

Για τη σκλήρυνση ενός κραματικού συστήματος μπορεί να επιβάλλονται **συγχρόνως** ένας ή περισσότεροι από τους παραπάνω μηχανισμούς ισχυροποίησης.



Χαρακτηριστικά σημεία:

σ_A : όριο αναλογίας

σ_E : όριο ελαστικότητας

$\sigma_{\Delta 1}, \sigma_{\Delta 2}$: άνω και κάτω όριο διαρροής ($\sigma_{\Delta 1} = R_e$)

σ_M : όριο αντοχής ή όριο θραύσης ($\sigma_M = R_m$)

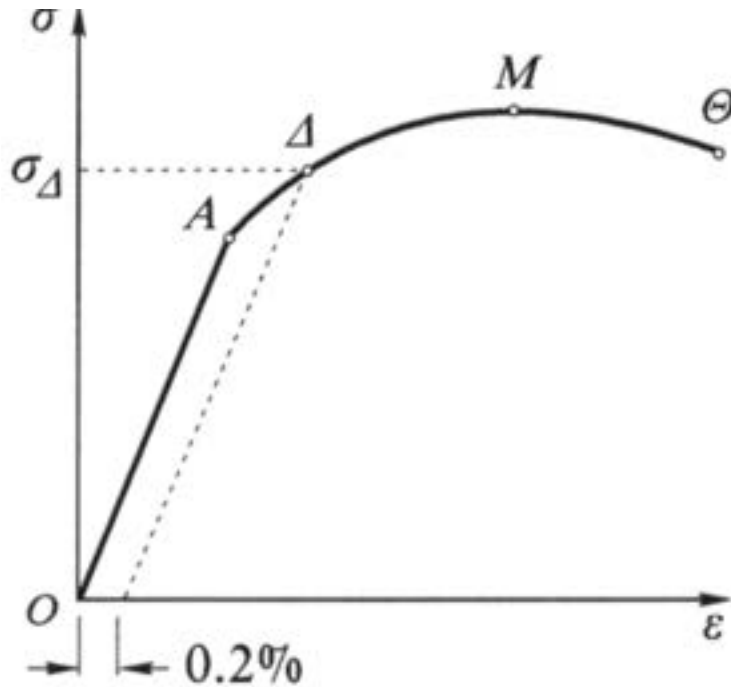
σ_Θ : τάση θραύσης

Στην ελαστική περιοχή παραμόρφωσης ισχύει ο νόμος του **Hooke**:

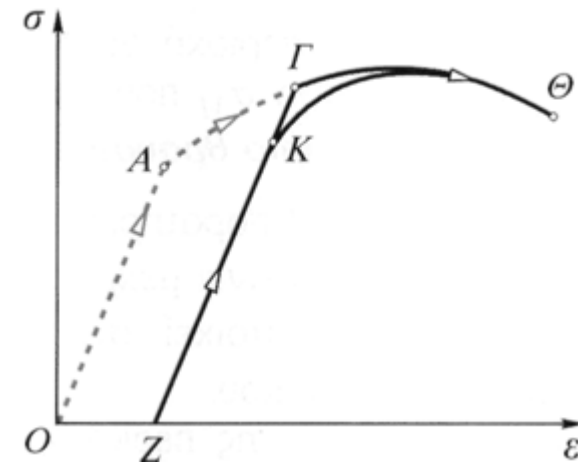
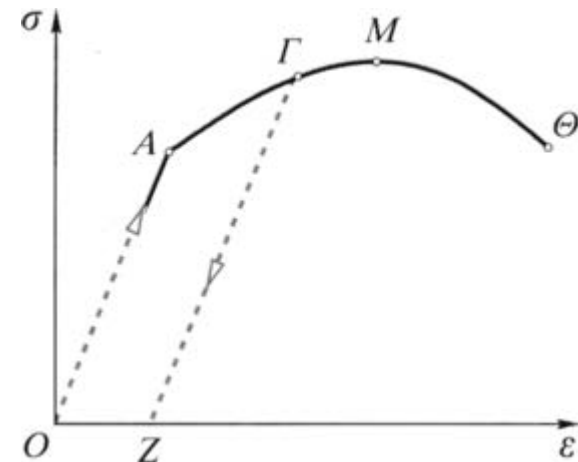
$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

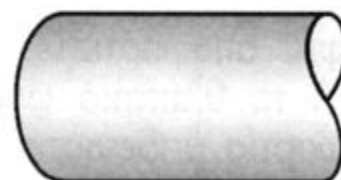
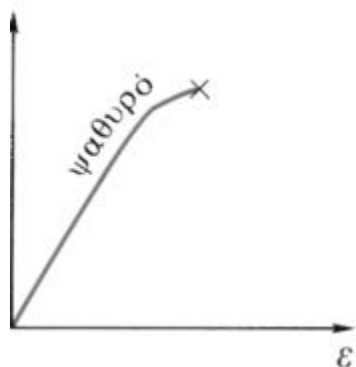
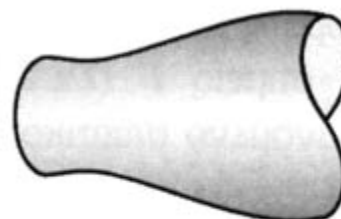
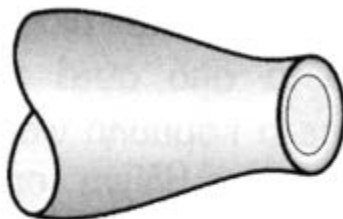
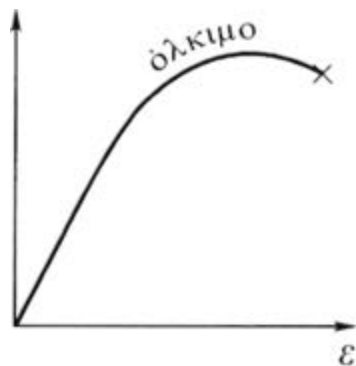
$$\sigma = \varepsilon \cdot E \Rightarrow \Delta \ell = \frac{P \ell}{EF}$$

είναι το φαινόμενο, κατά το οποίο ένα όλκιμο μέταλλο γίνεται σκληρότερο και ισχυρότερο όταν παραμορφώνεται πλαστικά.

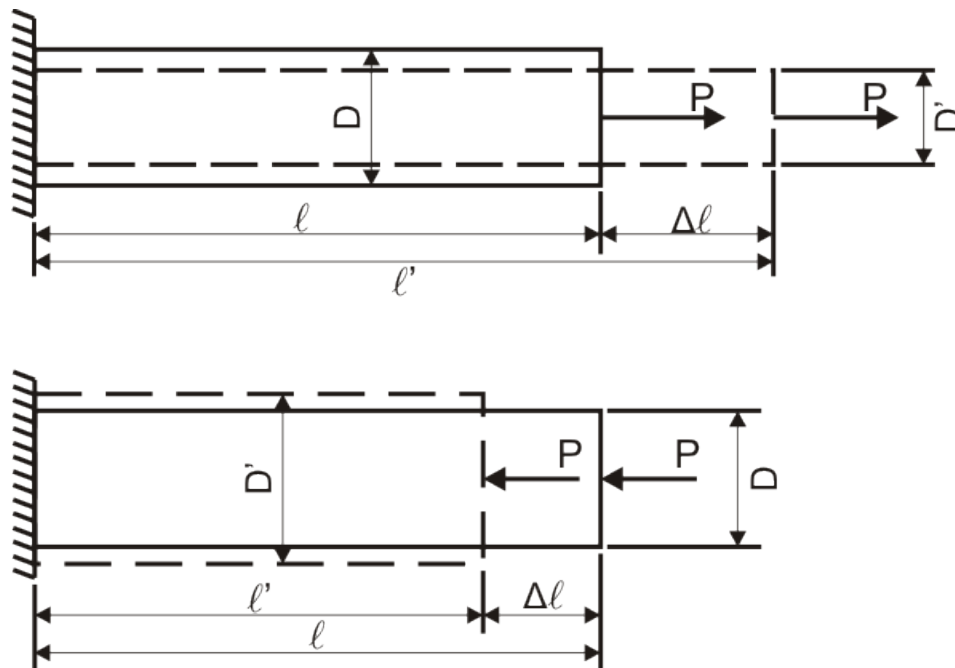


Το αλουμίνιο δεν παρουσιάζει ορατό σημείο διαρροής και γι' αυτόν τον λόγο ορίζεται ένα συμβατικό όριο διαρροής που αντιστοιχεί σε γραμμική παραμόρφωση ίση με 0.2% .





Τα ψαθυρά υλικά (χυτοσίδηρος) δεν παρουσιάζουν διαρροή και η θραύση πραγματοποιείται κάθετα στην διεύθυνση φόρτισης
απουσία σημαντικών πλαστικών παραμορφώσεων



Κατά τον εφελκυσμό ή την θλίψη ενός φορέα παρατηρείται η επιμήκυνση ή η επιβράχυνση του φορέα. Προκειμένου όμως ο όγκος να παραμένει σταθερός θα πρέπει να συμβαίνει μια μεταβολή και στην εγκάρσια διάσταση του φορέα. Ορίζουμε ως εγκάρσια παραμόρφωση, σε αντιστοιχία με την γραμμική ή αξονική παραμόρφωση το μέγεθος:

$$\varepsilon_q = \frac{\Delta D}{D} = \frac{D' - D}{D}$$

$$\varepsilon > 0 \Rightarrow \varepsilon_q < 0$$

$$\varepsilon < 0 \Rightarrow \varepsilon_q > 0$$

Ο νόμος του Hooke συνδέει τις ορθές τάσεις με την γραμμική παραμόρφωση στην ελαστική περιοχή, με την γραμμική σχέση $\sigma = \epsilon E$.

Αντίστοιχα, ο νόμος του Hooke συνδέει επίσης τις διατμητικές τάσεις τα με τη γωνιακή παραμόρφωση γ , με την ανάλογη γραμμική σχέση:

$$\tau = G\gamma \quad \text{όπου το } \gamma \text{ εκφράζεται σε [rad]}$$

Όπου το G είναι σταθερή ποσότητα που έχει διαστάσεις τάσης, όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση και χαρακτηρίζει τις μηχανικές ιδιότητες των διαφόρων υλικών. Είναι δε κάτι ανάλογο του μέτρου ελαστικότητας E και ονομάζεται **δεύτερο μέτρο ελαστικότητας** ή **μέτρο διάτμησης** ή και **μέτρο ολίσθησης, σε αντιστοιχία με τις ονομασίες της γωνίας γ .**

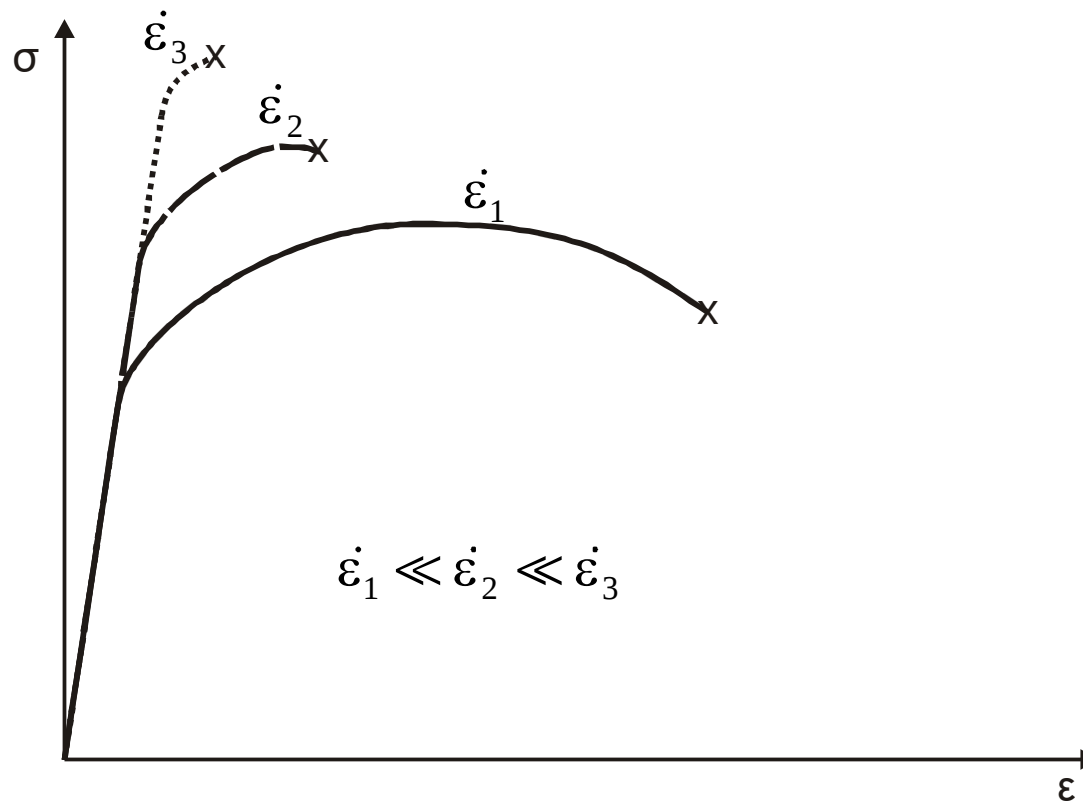
Αποδεικνύεται ότι τα δύο αυτά μέτρα ελαστικότητας E και G , συνδέονται μεταξύ τους.

Το μ ονομάζεται **λόγος του Poisson**, είναι καθαρός αριθμός και για τα μέταλλα παίρνει την τιμή περίπου $\mu \approx 0.3$.

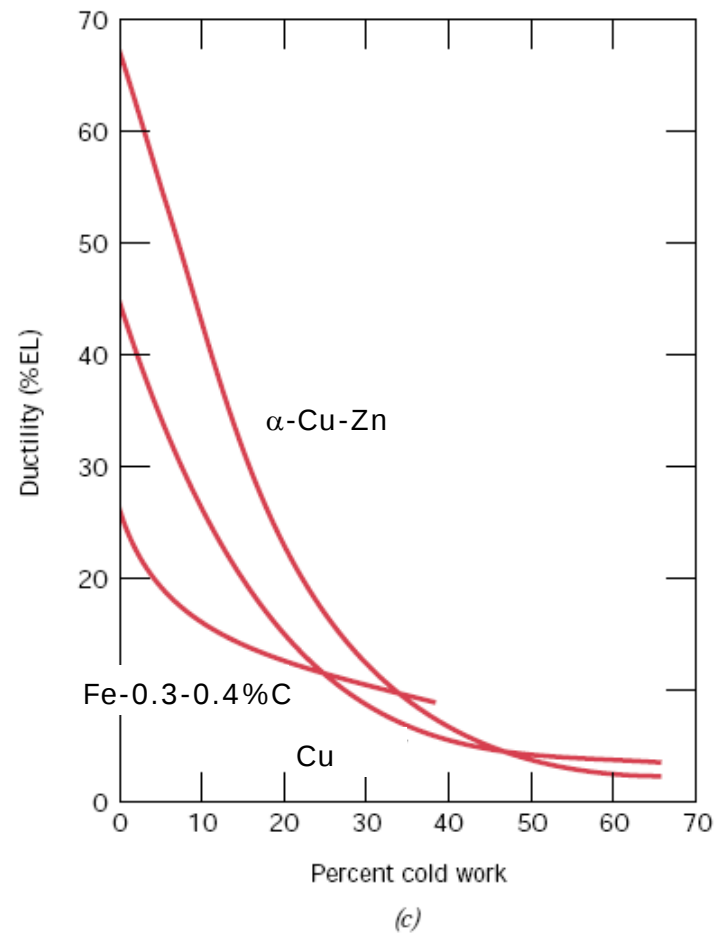
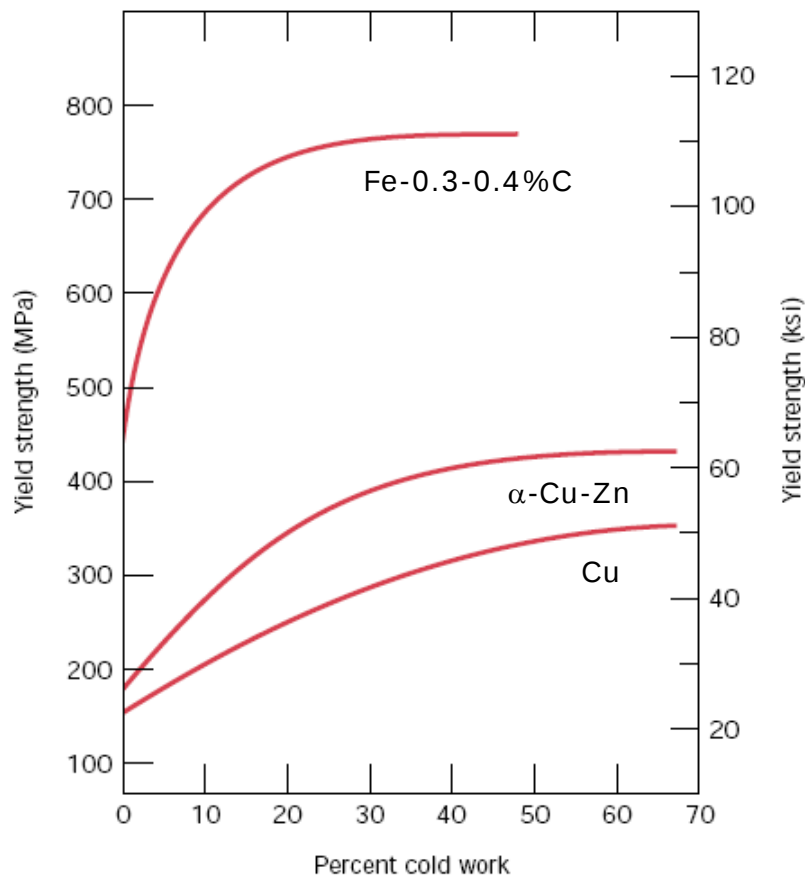
Παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μια αναλογία ανάμεσα στην γραμμική και εγκάρσια παραμόρφωση για κάθε υλικό. Ο λόγος μεταξύ της εγκάρσιας και της γραμμικής παραμόρφωσης ονομάζεται λόγος Poisson και αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος για κάθε υλικό:

$$\mu = -\frac{\epsilon_q}{\epsilon}$$

Τι είναι ένα ασυμπίεστο υλικό?
Τι λόγο Poisson έχει?



Ταχύτητα παραμόρφωσης (Ταχύτητα φόρτισης/Αρχική διάμετρο δοκιμίου).
 Η αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης αυξάνει την τάση ενός όλκιμου υλικού για ψαθυρή θραύση (γιατί). Την ίδια επίδραση έχει και η μείωση της θερμοκρασίας (γιατί).

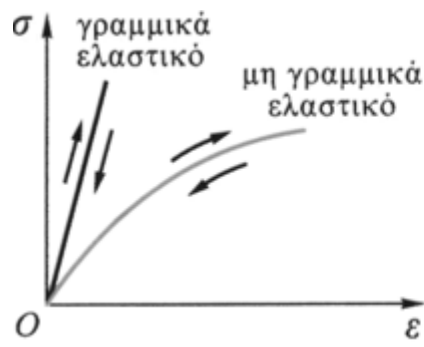


$$\%CW = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100$$

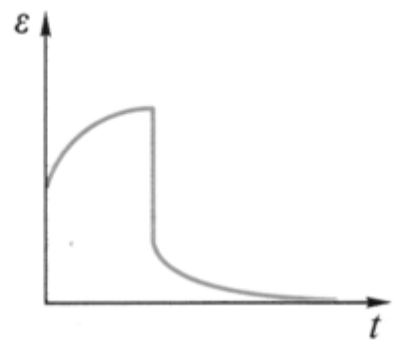
**Βαθμός ενδοτράχυνσης ή
ψυξηλασίας**
(στην Ευρώπη)

ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗ
(ΕΡΓΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ)

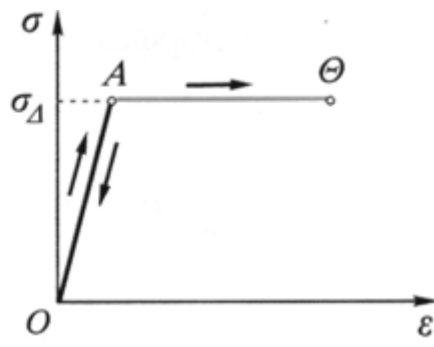
Προκειμένου να διευκολυνθούν οι υπολογισμοί, για την επίλυση κατασκευαστικών ή άλλων σύνθετων προβλημάτων της Αντοχής των Υλικών, υποθέτουμε ότι τα υλικά συμπεριφέρονται με εξιδανικευμένο τρόπο. Και τούτο διότι στην πράξη παρουσιάζεται μία μεγάλη ποικιλία τύπων συμπεριφοράς που δεν μπορούν να περιγραφούν με απλές καταστατικές εξισώσεις.



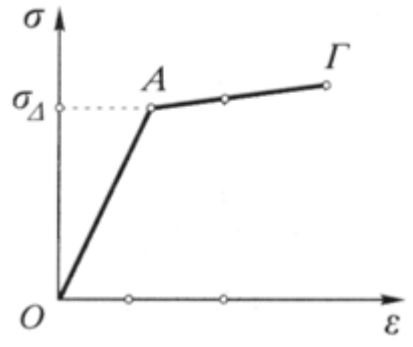
Απόλυτα
ελαστικό



Ανελαστικό



Ελαστικό
Απολύτως
πλαστικό



Ελαστικό
Γραμμικά
κρατυνόμενο



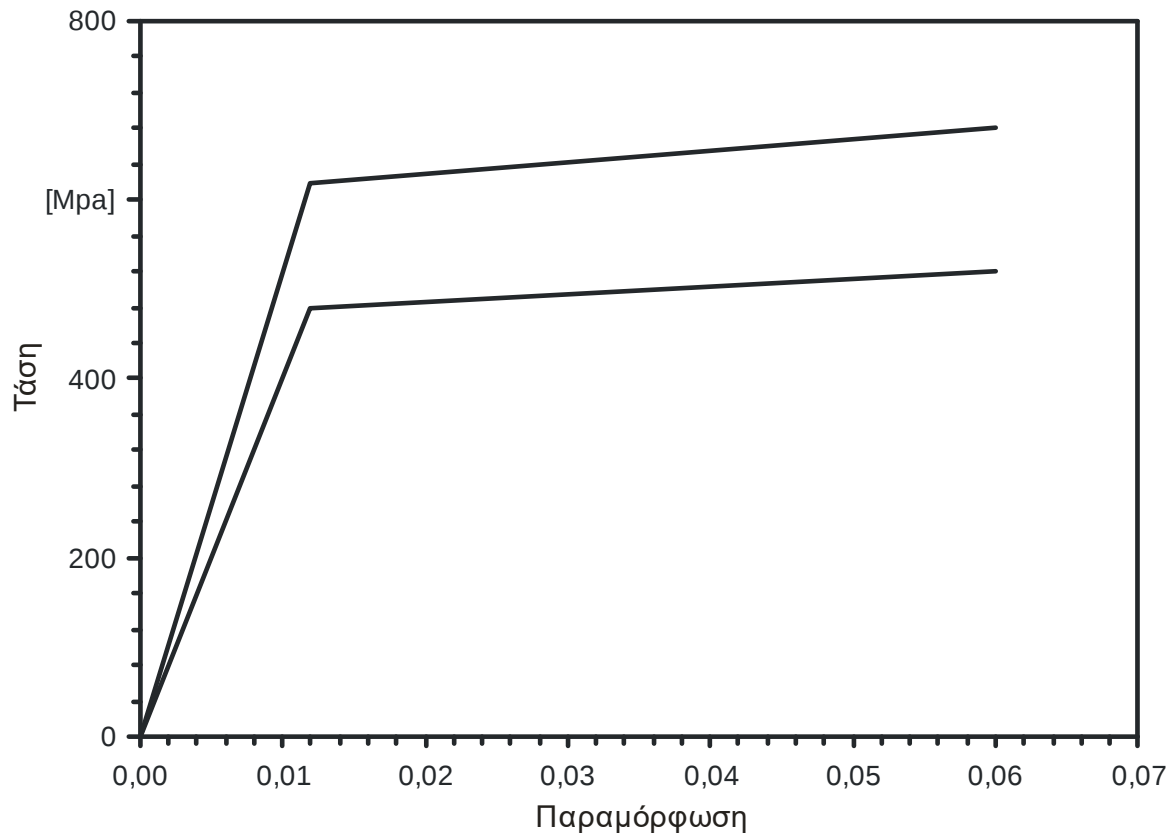
Τεχνηκή βαλβίδα καρδιάς
Υλικό: άνθρακας
Μηχανική συμπεριφορά: Απόλυτα
ελαστική

Στο σχήμα παρουσιάζονται 2 απλοποιημένες καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης, οι οποίες έχουν προκύψει από πειράματα εφελκυσμού σε δύο διαφορετικούς χάλυβες. Για δύο ράβδους από τα δύο συγκεκριμένα υλικά σας δίνονται τα παρακάτω στοιχεία:

Μήκος: 500 mm, Επιφάνεια διατομής: 100 mm².

Ζητούνται:

- Η παραμόρφωση που θα υποστούν οι δύο ράβδοι αν ασκηθεί αξονικό φορτίο ίσο με 30 kN.
- Η αναπτυσσόμενη τάση στις ράβδους αν η επιμήκυνση των ράβδων είναι ίση με $\Delta l = 3$ mm.

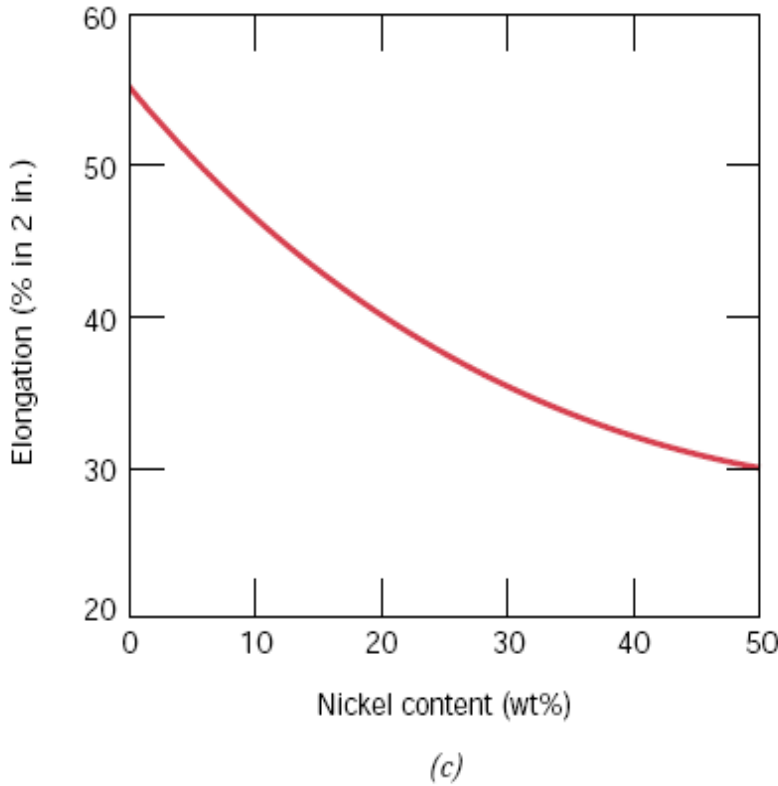
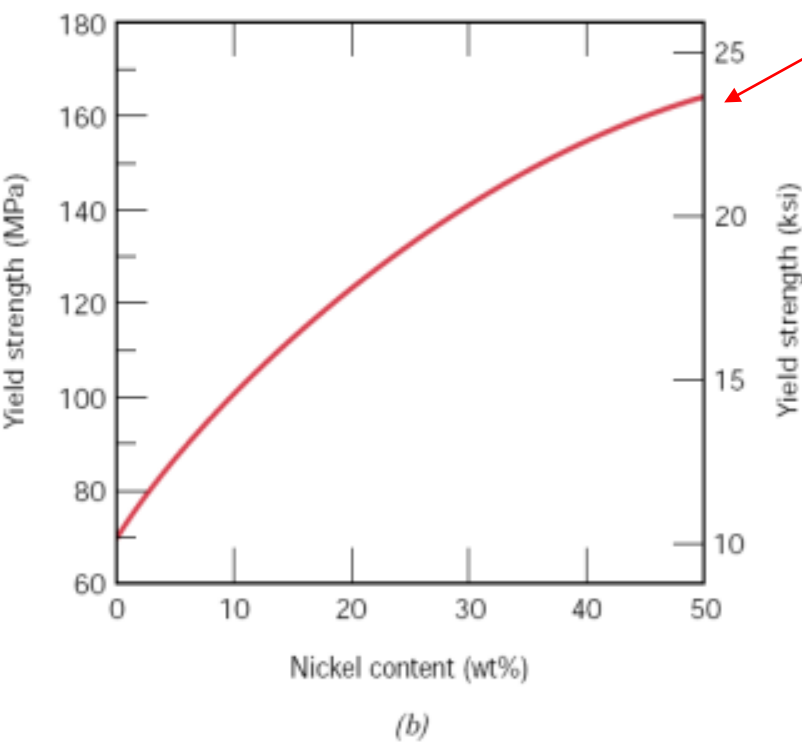


Κραματικά στοιχεία:

- Βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητες (όριο διαρροής, μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, σκληρότητα)
- Μειώνεται η ολκιμότητα, η αντι-διαβρωτική ικανότητα και η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Cu-Ni

Ποιο είναι το άνω όριο το όριο διαρροής του Ni?

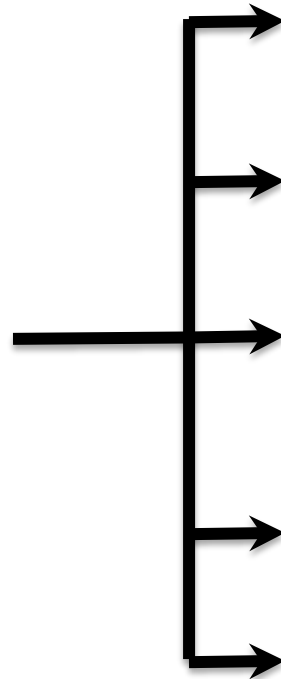


W. D. Callister, Jr. "Intr. A la C. De los materiales". Ed Reverté, 2000

Ορισμός

ισχυροποίηση κράματος με το σχηματισμό πολύ λεπτής διαμερισμένης φάσης μέσα στο αρχικό μητρικό πλέγμα.

Κράματα που
υφίστανται
σκλήρυνση με
γήρανση είναι



Κράματα Al: Al-Cu (ντουραλουμίνιο),
Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg.

Κράματα Cu: Cu-Be, Cu-Sn.

Κοινοί μαλακοί χάλυβες, ανοξείδωτοι
χάλυβες, ειδικοί χάλυβες

Υπερ-κράματα Ni.

Υπερ-κράματα Co.

- Δ. Τσιπάς, **Σημειώσεις/Διαλέξεις Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών II**. Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010
- Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών** (1^η έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, **Φυσική Μεταλλουργία** (1^η έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2007.
- W.D. Callister JR, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών** (5^η έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2008.
- Τίτλος πρωτότυπου: William D. Callister, JR. **Materials Science and Engineering, an introduction**.
- M.A. Meyers, K. K. Chawla, **Mechanical Metallurgy. Principles and Applications**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984
- H.W. Hayden, W.G. Moffatt, J. Wulff, **The Structure and Properties of Materials, Vol.3: Mechanical Behavior**, John Wiley and sons, USA, 1965. (Σε μετάφραση στα Ελληνικά από τον Α.Α. Τζαβάρα)
- A. Kelly, R.B. Nicholson, **Strengthening Methods in Crystals**, Halsted Press Division, John Wiley and sons, USA, 1971

Τεχνολογία Υλικών

Διάχυση

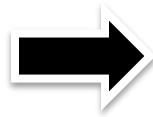
Επικ. Καθ. Α. Τσουκνίδας (tsouknidas@teiwm.gr)



web. <https://biomed.teiwm.gr>

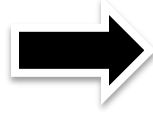
e-class. www.??gr

Διάχυση (diffusion)



ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
μάζας διαμέσου μάζας

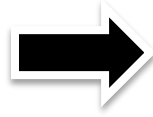
Άτομα
αερίων, υγρών και στερεών



Βρίσκονται σε συνεχή κίνηση

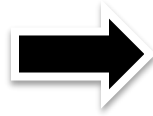
Αέρια	Υγρά	Στερεά
ταχεία κίνηση	βραδύτερη από αυτήν των αερίων	περιορίζονται λόγω των αναπτυσσόμενων δεσμών γύρω από τις θέσεις ισορροπίας

Διάχυση στα στερεά



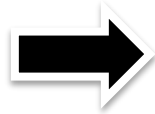
Μηχανισμός μεταφοράς ατόμων
(όμοιων ή διαφορετικών μεταξύ τους)
μέσα στη μάζα ενός υλικού,
λόγω **θερμικής διέγερσής** τους.

Αποτέλεσμα διάχυσης



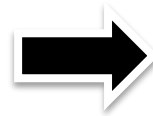
Η ανάμιξη ατόμων της ίδιας ή
διαφορετικών ουσιών μέσω τυχαίας
θερμικής κίνησής τους.

Μέταλλα και
κράματα



Οι περισσότερες αντιδράσεις
σε **ΣΤΕΡΕΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ**
περιλαμβάνουν μετακινήσεις ατόμων

Που χρησιμοποιείται η διάχυση?



για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των
υλικών.

Παραδείγματα:

Η ενίσχυση του επιφανειακού στρώματος Ti έναντι φθοράς, με εμποτισμό ξένων ατόμων στο αντίστοιχο κρυσταλλικό πλέγμα (**επιτυγχάνεται με διάχυση οξυγόνου προς δημιουργία TiO_2**)

ΕΙΝΑΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ Η ΔΙΑΧΥΣΗ;



**Αυτοδιάχυση
(self-diffusion)**

**Διάχυση αντικατάστασης
ή διάχυση κενών
(substitutional diffusion)**

**Σε τι διαφέρει αυτό από
την «ολίσθηση» αταξιών?**

**Διάχυση
υποκατάστασης
(interstitial diffusion)**

Η μεταφορά ατόμων καθαρού μετάλλου μέσα στο κρυσταλλικό του πλέγμα.

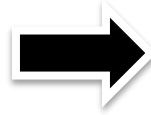
Η μεταφορά ξένων ατόμων ή κενών (οπών) σε πλεγματικές θέσεις του μητρικού κρυσταλλικού πλέγματος.

(Στην περίπτωση αυτή, το μέγεθος ξένων και μητρικών ατόμων είναι περίπου ίδιο και ο μηχανισμός διευκολύνεται πολύ από την ύπαρξη κενών στο αρχικό πλέγμα. Γενικά, κατά την εξέλιξη της διάχυσης παρατηρείται ροή ατόμων και κενών.)

Η μεταφορά ξένων ατόμων σε παραπλεγματικές θέσεις του μητρικού κρυσταλλικού πλέγματος.

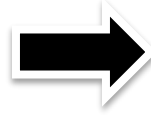
ΕΙΔΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

**Χωρική διάχυση
(volume diffusion)**



περιγράφει την μεταφορά ατόμων
στο εσωτερικό των κόκκων
πολυκρυσταλλικού υλικού

**Διάχυση στα όρια κόκκων
(grain-boundary diffusion)**

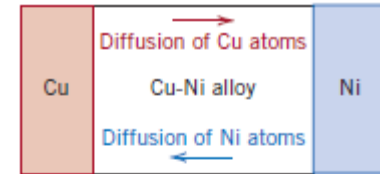


περιγράφει την μεταφορά ατόμων
μέσω των ορίων των κόκκων
πολυκρυσταλλικού υλικού.

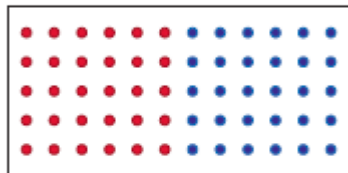


(a)

Ζεύγος Διάχυσης Cu-Ni

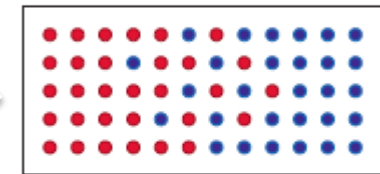


(a)

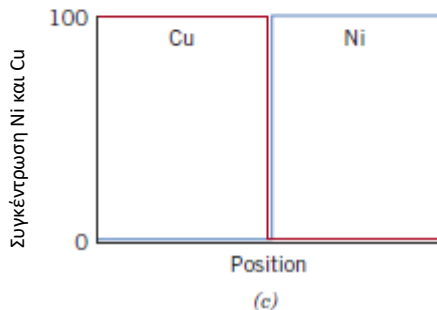


(b)

πριν και μετά

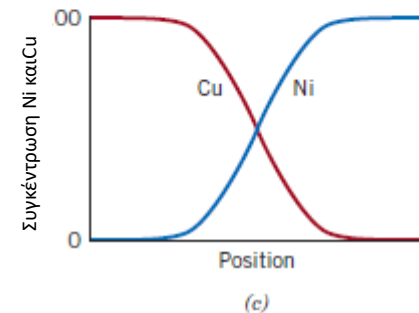


(b)



(c)

τη θερμική επεξεργασία
σε υψηλή θερμοκρασία



(c)

ΕΙΔΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Διάχυση
(ΑΤΟΜΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ)

η βήμα προς βήμα μετακίνηση ατόμων
από μια πλεγματική θέση σε μια άλλη

τα άτομα στα στερεά σε διαρκή κίνηση
αλλάζοντας ταχύτητα θέσεις με απόλυτη
τυχειότητα

Διάχυση
(ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ)

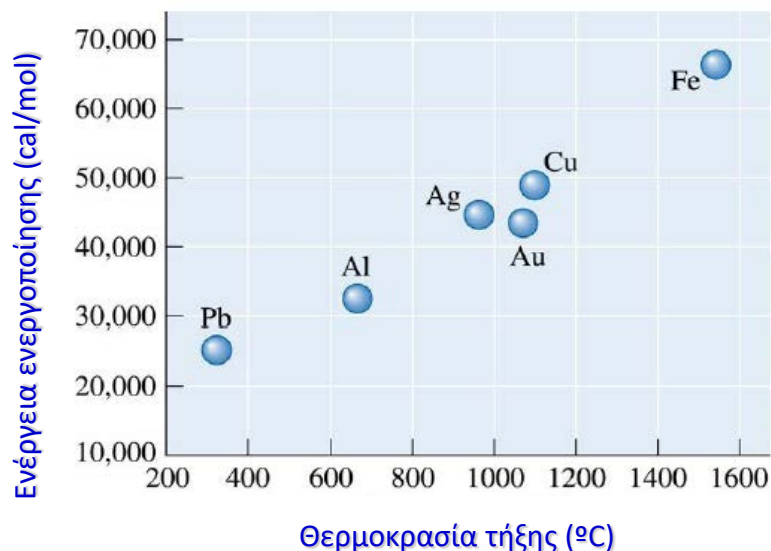
ταυτόχρονες
προϋποθέσεις

γειτονικό πλεγματικό σημείο να είναι κενό

το άτομο θα πρέπει να έχει την **Από πού?**

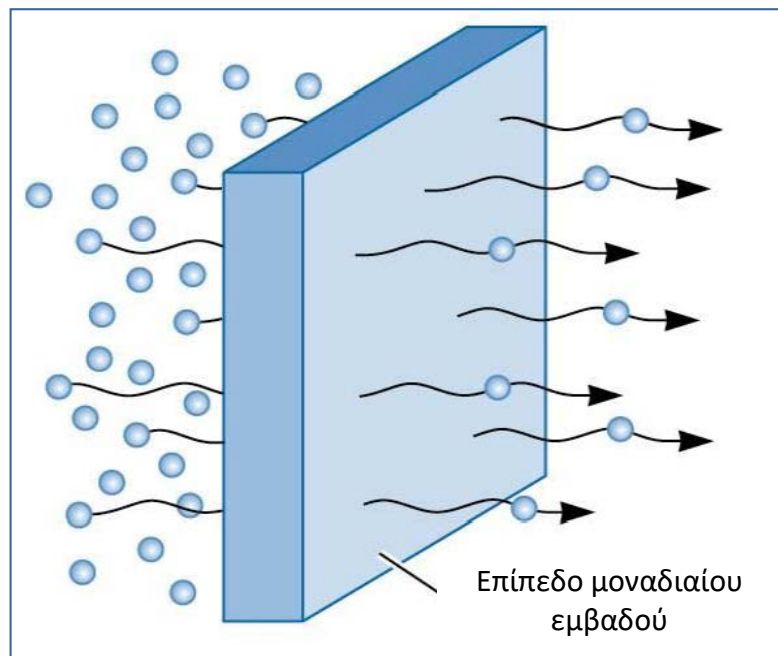
ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (δονητικής φύσης)

για να σπάσει τους δεσμούς του με τα γειτονικά άτομα και
να προκαλέσει μια κρυσταλλική παραμόρφωση κατά τη
διάρκεια της μετατόπισης



Η ενέργεια ενεργοποίησης της αυτοδιάχυσης
αυξάνει με την θερμοκρασία τήξης του
μετάλλου.

Η ταχύτητα με την οποία άτομα του στοιχείου διαχέονται σε ένα υλικό εκφράζεται από το μέγεθος της ροής, J , η οποία ορίζεται ως ο αριθμός των ατόμων που διέρχονται από ένα επίπεδο μοναδιαίου εμβαδού στη μονάδα του χρόνου



Πυκνότητα ροής $\Rightarrow$ 1^{ος} νόμος του Fick

$$J = -D \frac{\delta C}{\delta x}$$

J = η ροή ατόμων ($\text{at}/\text{m}^2\text{s}$)

$\delta C/\delta x$ = η βαθμωση της συγκέντρωσης ($[\text{at}/\text{m}^3]/\text{m}$)

D = η διαχυτότητα ή συντελεστής διάχυσης (m^2/s)

Τι συμβολίζει το $-$

Αν είναι συντελεστής, ποιος ο λόγος να περιγράφεται από τύπο?

$$D = D_0 e^{-\frac{Q_D}{RT}}$$

Συχνότητα αλμάτων

ΚΙΝΟΥΣΑ ΔΥΝΑΜΗ = η ύπαρξη βαθμωσης της συγκέντρωσης του διαχεόμενου στοιχείου

ΠΡΩΤΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ FICK

Παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή διάχυσης

α) Μηχανισμός διάχυσης (σε ατομικό επίπεδο) π.χ.

C με το μηχανισμό μετακίνησης ατόμων προσθήκης διαχέεται στον Fe-γ

Fe με το μηχανισμό υποκατάστασης ατόμων και συμπλήρωσης κενών διαχέεται στον Fe-γ

β) Τύπος κρυσταλλικής δομής του υλικού αποδέκτη

$$D_{(C \text{ σε Fe-}\gamma, \text{ FCC})} = 5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s} < D_{(C \text{ σε Fe-}\alpha, \text{ BCC})} = 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

γ) Τύπος ατελειών κρυσταλλικής δομής

Ανοικτές δομές (+ οπές) $\Rightarrow \uparrow D$

$D_{\text{επιφάνεια}} > D_{\text{όρια κόκκων}} > D_{\text{ογκική}}$

δ) Συγκέντρωση των σωματιδίων που διαχέονται

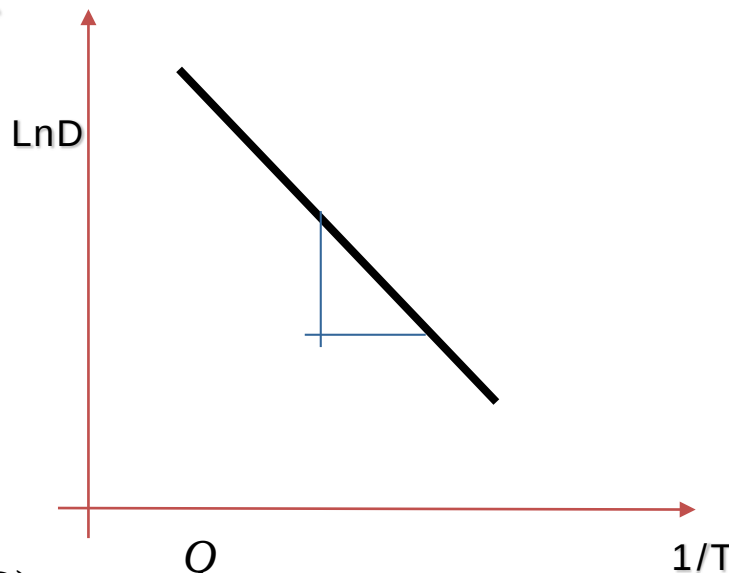
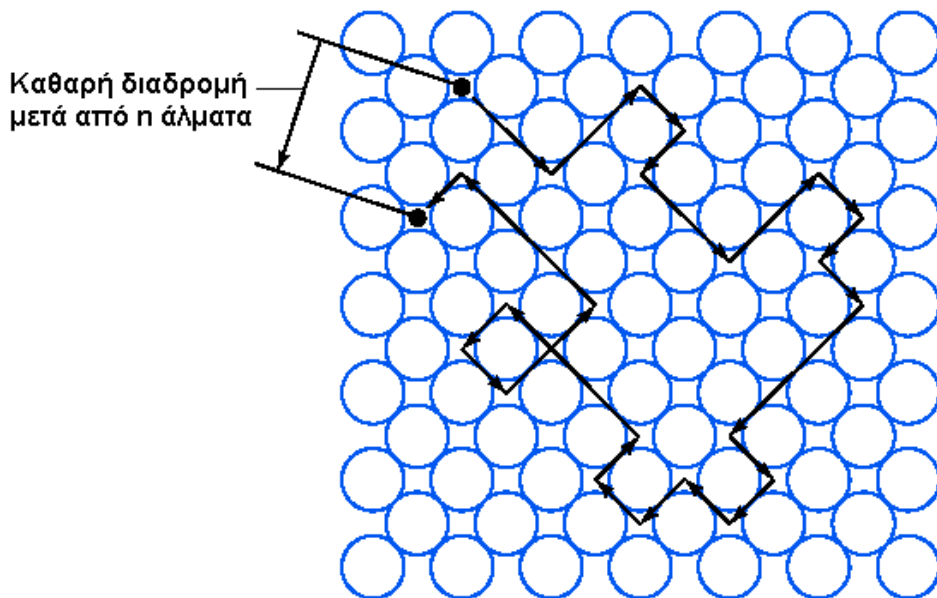
Όταν $\uparrow$ η συγκέντρωση των solute atoms μεταβάλλεται ο συντελεστής διάχυσης (πως?)

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

ε) Θερμοκρασία

$$\uparrow T \Rightarrow \uparrow D$$

$\uparrow T \Rightarrow \uparrow$ το πλήθος των δονήσεων των ατόμων $\Rightarrow$ μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης άλματος $\Rightarrow D \uparrow$



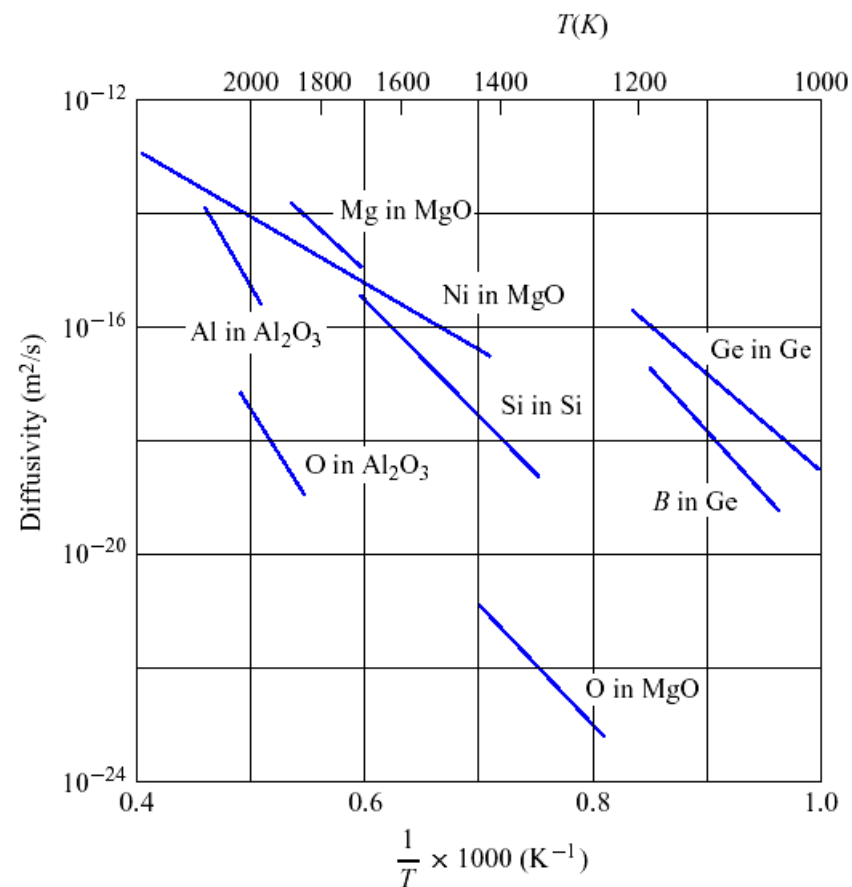
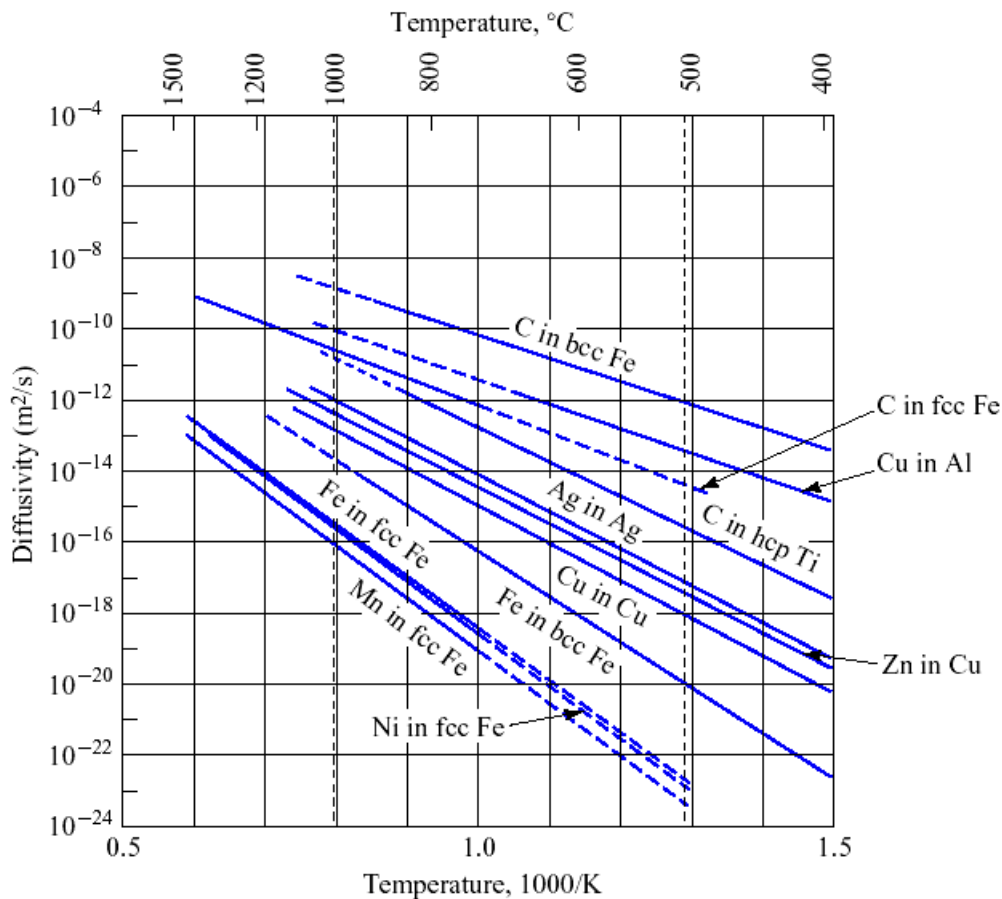
$$\text{Ln}(D) = y_0 - \frac{Q}{R \cdot T}$$

$$\text{Ln}(D) = \text{Ln}(D_0) - \frac{Q_D}{R \cdot T}$$

$$D = D_0 e^{-\frac{Q_D}{RT}}$$

Εκφράζει την συχνότητα αλμάτων που εξαρτάτε από τον χρόνο που διαθέτει το άτομο την ενέργεια Q)

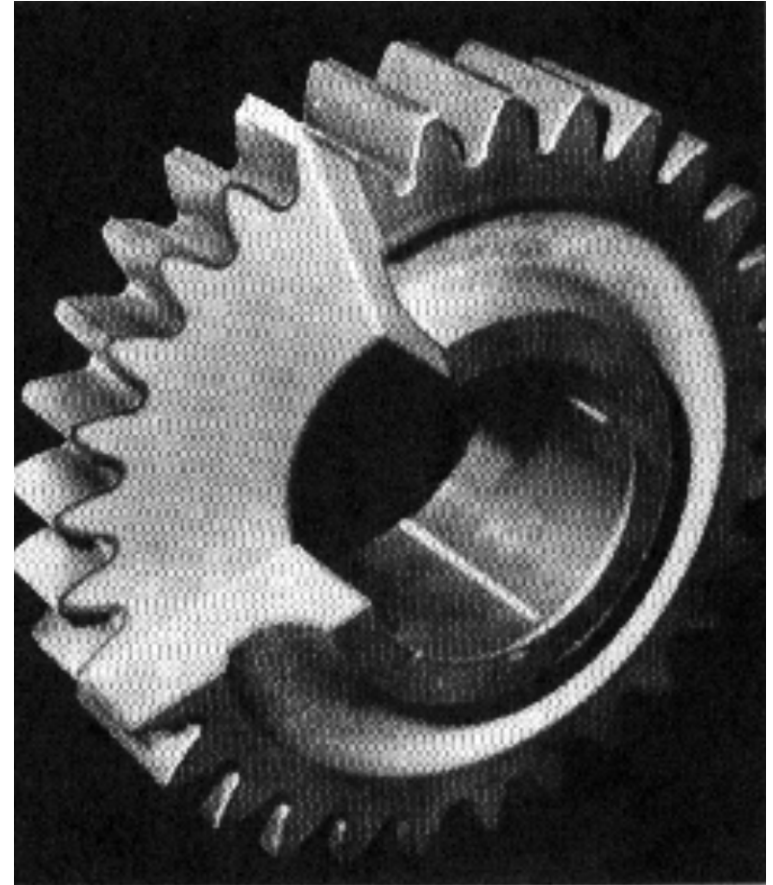
ε) Θερμοκρασία



Φωτογραφία ενός γραναζιού χάλυβα το οποίο έχει σκληρυνθεί με εμποτισμό.

Το εξωτερικό τμήμα έχει σκληρυνθεί με διεργασία υψηλής θερμοκρασίας κατά την οποία άνθρακας (C) από το περιβάλλον **διαχύθηκε στην επιφάνεια** του γραναζιού.

Το σκοτεινό περίγραμμα που διακρίνεται στην τομή της διπλανής φωτογραφίας αντιστοιχεί στην περιοχή του γραναζιού που έχει «επιλεκτικά» σκληρυνθεί με εμποτισμό.



Αντίστοιχο της αδαμαντίνης στα δόντια μας!

➤ Δ. Τσιπάς, **Σημειώσεις/Διαλέξεις Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών II**. Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010

➤ Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών** (1^η έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

➤ Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, **Φυσική Μεταλλουργία** (1^η έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2007.

➤ W.D. Callister JR, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών** (5^η έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2008.

➤ Τίτλος πρωτότυπου: William D. Callister, JR. **Materials Science and Engineering, an introduction**.

➤ P.G. Shewmon, **Diffusion in Solids**, McGraw – Hill Co., New York, 1963

➤ J. Crank, **The Mathematics of Diffusion**, Oxford University Press, New York, 1975

➤ J.L. Bocquet, G. Brebec, V. Limoge, **Diffusion in Metals and Alloys**, in Physical Metallurgy, R.W. Cahn, P. Haasen (eds), Elsevier Science Publishers, 1983

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Τεχνολογία Υλικών

Θραυστομηχανική

Επικ. Καθ. Α. Τσουκνίδας (tsouknidas@teiwm.gr)



web. <https://biomed.teiwm.gr>

e-class. www.??gr

Ο διαχωρισμός ενός σώματος σε δύο ή περισσότερα τμήματα, ως αποτέλεσμα μιας επιβαλλόμενης στατικής τάσης (δηλαδή, σταθερής ή πολύ αργά μεταβαλλόμενης με το χρόνο), σε θερμοκρασίες χαμηλές σε σχέση με τη θερμοκρασία τήξης του υλικού.

Βασικές κατηγορίες θραύσης

Κατηγορία θραύσης

Χαρακτηριστικά

Εφελκυστική θραύση χαμηλών θερμοκρασιών

Πρωταρχική ρήξη ατομικών δεσμών και επιπέδων, κάτω από στατική φόρτιση

Εφελκυστική θραύση υψηλών θερμοκρασιών (θραύση από ερπυσμό)

Πρωταρχική ρήξη ατομικών δεσμών και επιπέδων, κάτω από στατική φόρτιση.
Συμβολή του φαινομένου διάχυσης.

Πως εξηγείται αυτό?

Θραύση από κόπωση

Θραύση κάτω από το καθεστώς κυκλικά μεταβαλλόμενης τάσης

Περιβαλλοντική θραύση

Συνέργεια του διαβρωτικού περιβάλλοντος στη θραύση (ψαθυροποίηση)

Ποια η συνηθέστερη κατηγορία θραύσης, ποια η πιο επικίνδυνη και γιατί?

ΘΡΑΥΣΗ

- **Ανάλογα την πλαστικότητα του υλικού**
 - Όλκιμη θραύση
 - Ψαθυρή θραύση
- **Ανάλογα με τον τρόπο που διαδίδονται οι ρωγμές**
 - Ενδοκρυσταλλική θραύση
 - Περικρυσταλλική θραύση
- **Ανάλογα με τη μορφολογία των επιφανειών θραύσης**
 - Τοπογραφία «κοίτης ποταμού»
 - Χαρακτηριστική κοκκώδη μορφολογία
 - Χαρακτηριστική κυψελωτή μορφολογία

Συνοδεύεται από σημαντική πλαστική παραμόρφωση με μεγάλη απορρόφηση ενέργειας πριν από τη θραύση.

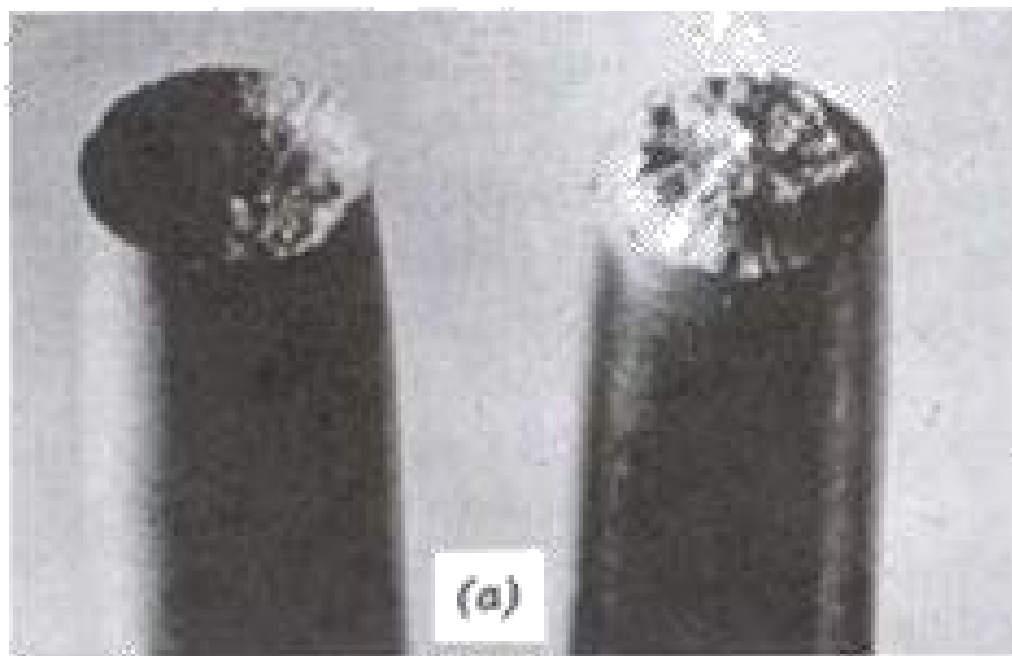


Όλκιμη θραύση

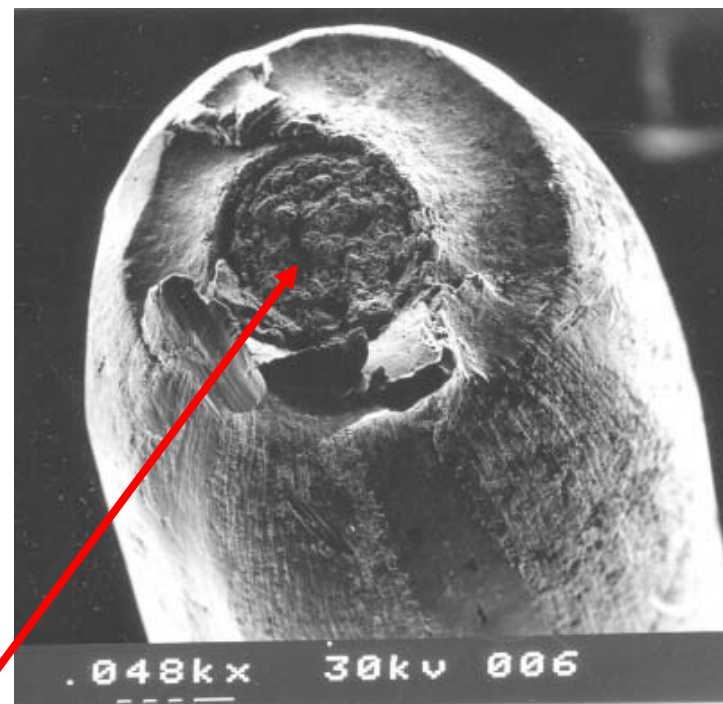


Ισχυρά όλκιμη θραύση κατά την οποία το δοκίμιο παρουσιάζει **στένωση** («**λαιμό**») που φθάνει ως τη δημιουργία σημείου θραύσης.

Ο Λ Κ Ι Μ Η Θ Ρ Α Υ Σ Η



Θραύση «Cup and cone» σε Ti



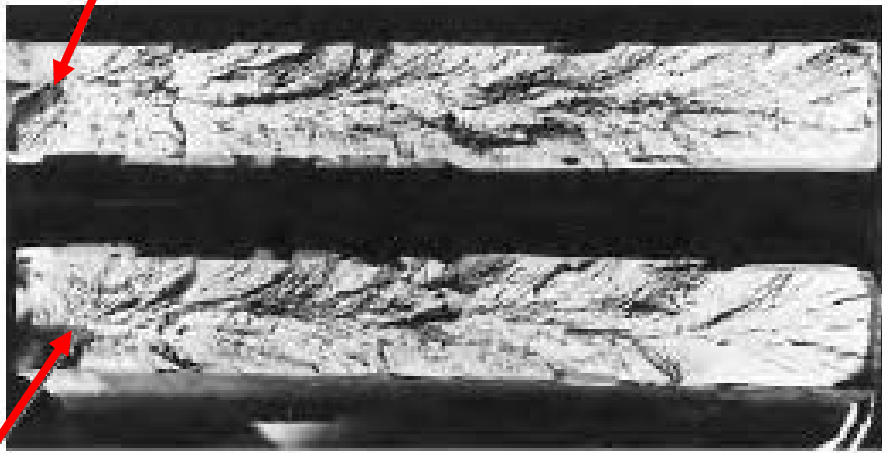
Θραυστογραφία (SEM)
ηλεκτρονικής μικροσκοπίας

Μικρο-κοιλότητες (σφαιρικές ή παραβολικού σχήματος)
- χαρακτηριστικές όλκιμης θραύσης

ΟΛΚΙΜΗ ΘΡΑΥΣΗ

Συνοδεύεται από ελάχιστη ή μηδενική πλαστική παραμόρφωση με μικρή απορρόφηση ενέργειας πριν από τη θραύση.

Λαμβάνει χώρα χωρίς καμία αισθητή παραμόρφωση με γρήγορη διάδοση της ρωγμής. Η διάδοση των ρωγμών αντιστοιχεί στο διαδοχικό και επαναλαμβανόμενο σπάσιμο ατομικών δεσμών κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων. **Μετά την δημιουργία της ρωγμής αυξάνει η τάση...**

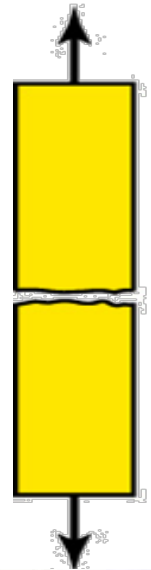


Η τάση για ψαθυρή θραύση αυξάνει με:

Μείωση (↓) θερμοκρασίας και

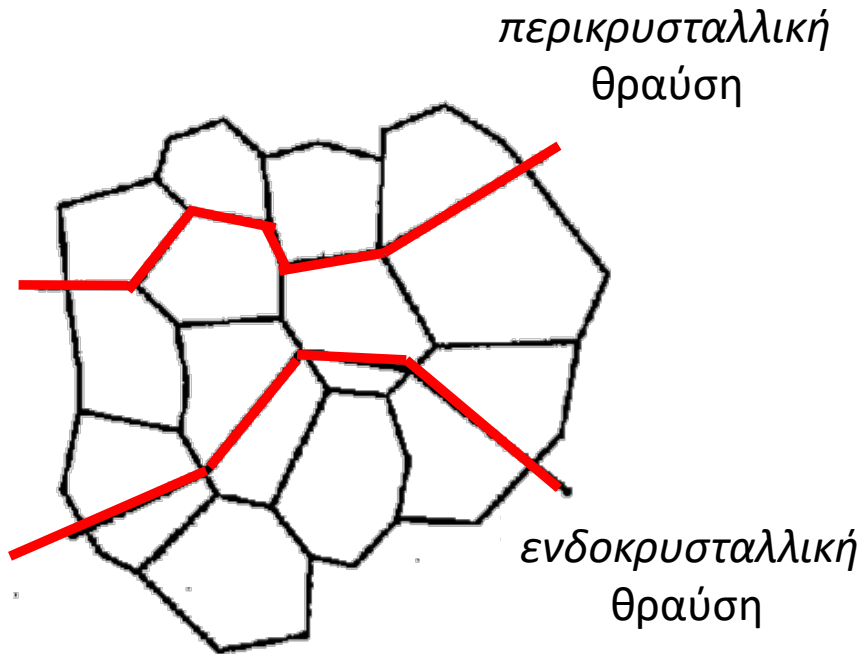
Αύξηση (↑) ρυθμού παραμόρφωσης

Τα τόξα υποδεικνύουν το σημείο σχηματισμού της ρωγμής



ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ

Αναλόγως του τρόπου διάδοσης των ρωγμών, η θραύση, κατά τη δοκιμή εφελκυσμού διακρίνεται σε περικρυσταλλική ή ενδοκρυσταλλική.



Περικρυσταλλική ρωγμάτωση:

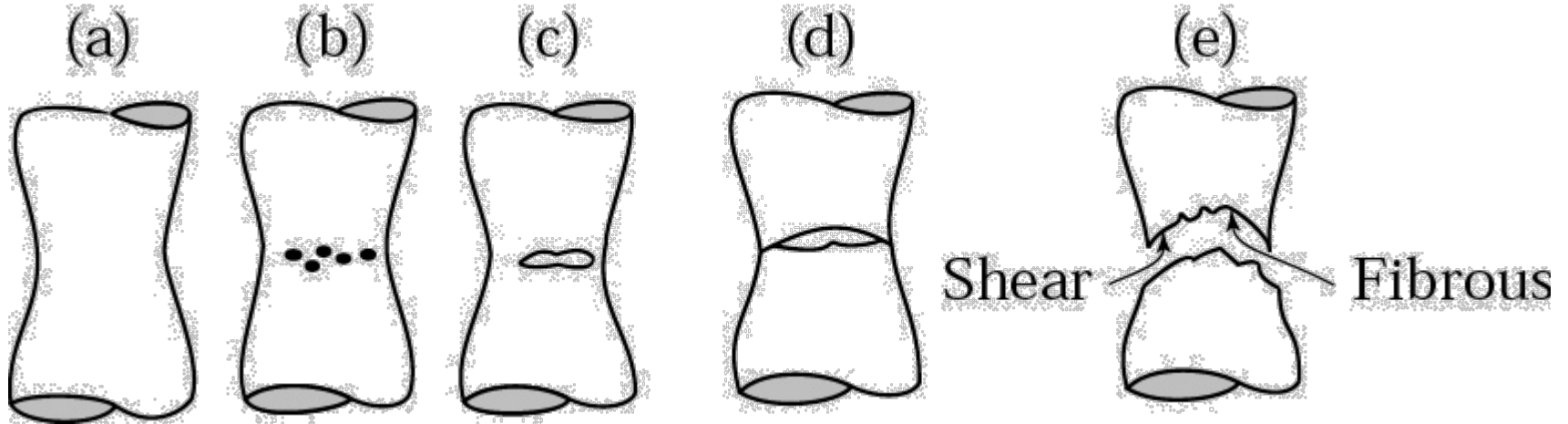
- ο μηχανισμός θραύσης, κατά τον οποίον η ρωγή μεταδίδεται ακολουθώντας τα όρια των κόκκων.
- μέταλλα του fcc συστήματος σε συνδυασμό με την παρουσία ακαθαρσιών ή δευτερογενών φάσεων στα όρια των κόκκων τους

Ενδοκρυσταλλική ρωγμάτωση:

- η διάδοση της ρωγμής γίνεται μέσω των κόκκων του υλικού περνώντας από συγκεκριμένα κρυσταλλογραφικά επίπεδα ελάχιστης ενέργειας συνάφειας σχισμογενή)
- συναντάται κυρίως σε μέταλλα των hcp και bcc συστημάτων

ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΡΩΓΜΩΝ

Ο πιο συχνά συναντώμενος μηχανισμός θραύσης σε όλκιμα μεταλλικά υλικά



Διαδοχικά στάδια:

(a) Αρχική στένωση

(b) δημιουργία μικροκενών

(c) συνένωση μικροκενών

(d) θραύση με διάτμηση άκρων ή

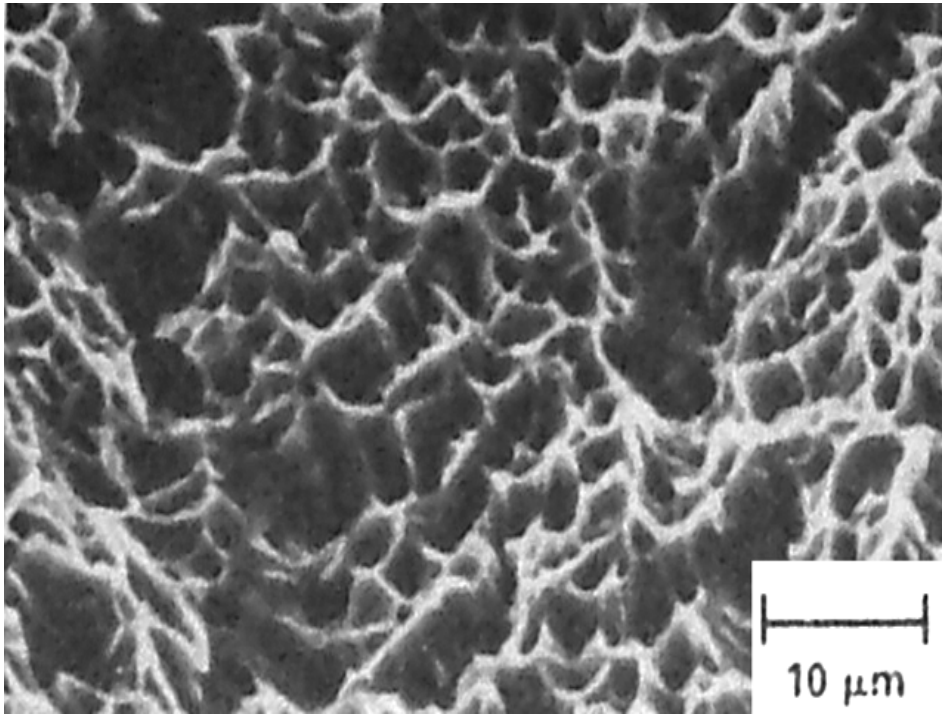
(e) θραύση με διάρρηξη άκρων

Θραύση

cup- (άνω επιφάνεια θραύσης)

and cone (κάτω επιφάνεια)

ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΜΙΚΡΟΚΕΝΩΝ



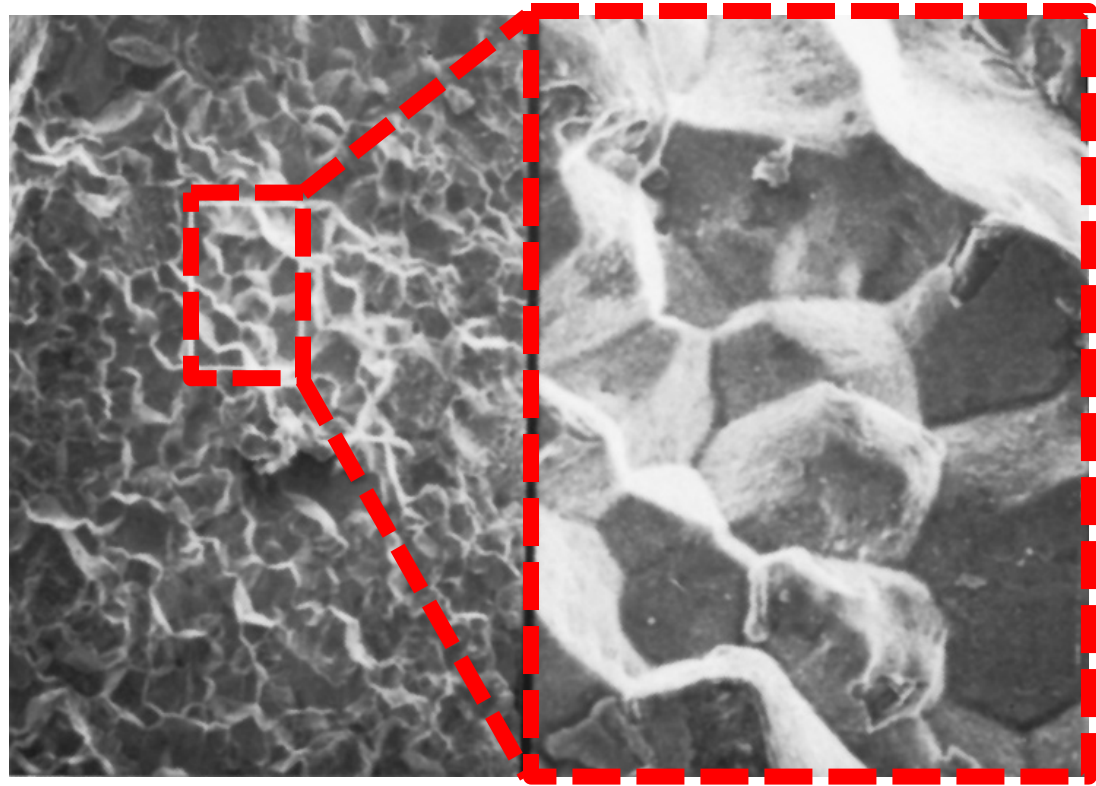
Επιφάνεια όλκιμης θραύσης σε κοινό χάλυβα με χαρακτηριστική κυψελωτή μορφολογία.

Επιφάνεια θραύσης χάλυβα σε δοκιμή εφελκυσμού. (συνένωση μικροκενών στην πάνω δεξιά γωνία)

ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΜΙΚΡΟΚΕΝΩΝ

Είναι ο μηχανισμός θραύσης, κατά τον οποίον η ρωγή μεταδίδεται ακολουθώντας τα όρια των κόκκων.

Παρατηρείται κυρίως σε μέταλλα του fcc συστήματος σε συνδυασμό με την παρουσία ακαθαρσιών ή δευτερογενών φάσεων στα όρια των κόκκων τους.



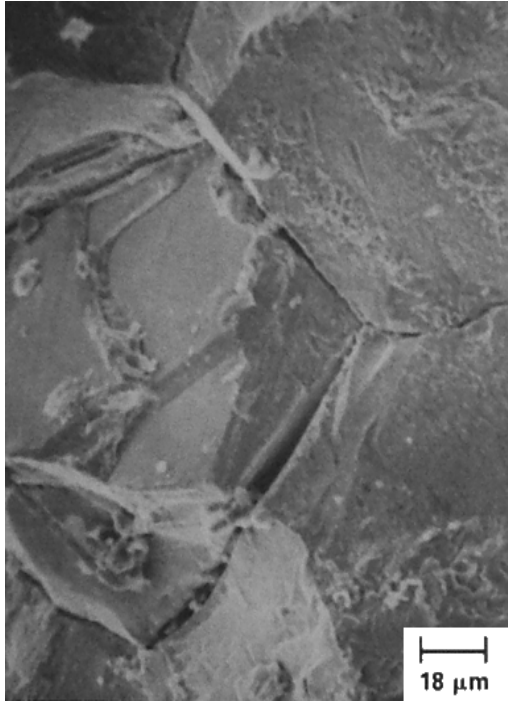
Η επιφάνεια θραύσης παρουσιάζει χαρακτηριστική κοκκώδη μορφολογία

Διαλυτοποίηση αερίων (οξυγόνου, υδρογόνου) του περιβάλλοντος αλλά και διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση ευνοούν τον εν λόγω μηχανισμό (γιατί?)

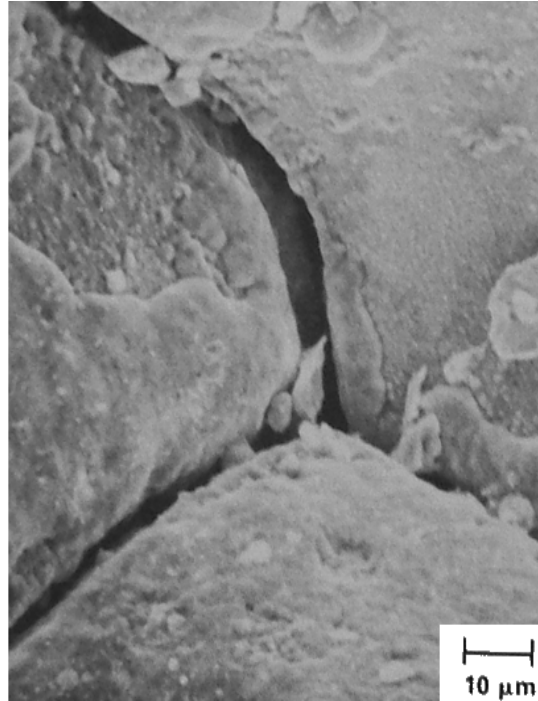
Σε τι είδους κατασκευές αναμένονται τέτοιου είδους αστοχίες?

ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗ

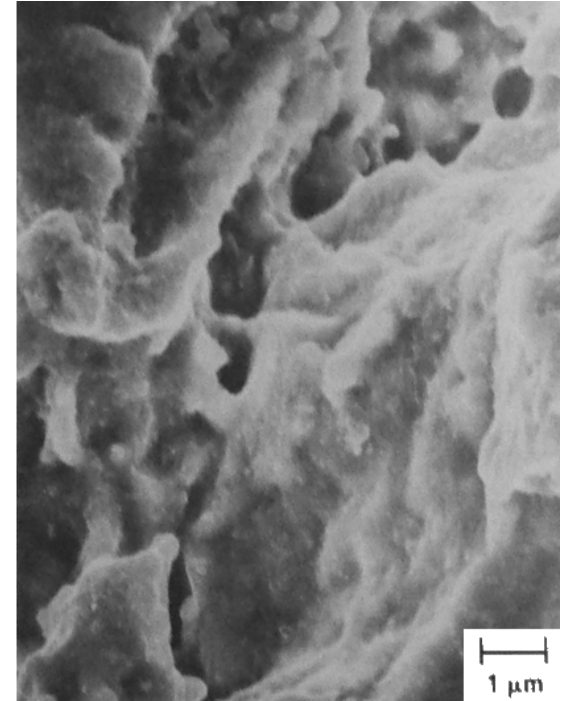
Παραδείγματα περικρυσταλλικής θραύσης μετά από δοκιμή ερπυσμού.



Inconel 625



Incoloy 800



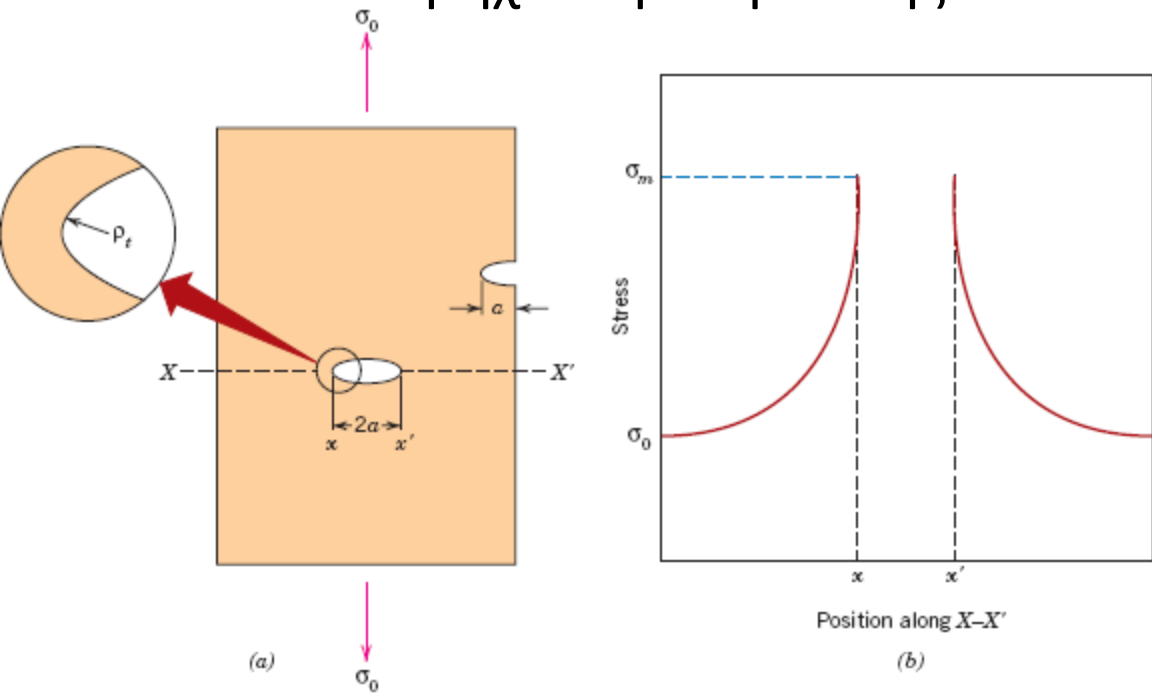
PE-16

ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗ

Μηχανικές ιδιότητες διάφορων υλικών σε θερμοκρασία δωματίου.

METALS (WROUGHT)	E (GPa)	Y (MPa)	UTS (MPa)	ELONGATION (%) in 50 mm	POISSON'S RATIO
Aluminum and its alloys	69-79	35-550	90-600	45-5	0.31-0.34
Copper and its alloys	105-150	76-1100	140-1310	65-3	0.33-0.35
Lead and its alloys	14	14	20-55	50-9	0.43
Magnesium and its alloys	41-45	130-305	240-380	21-5	0.29-0.35
Molybdenum and its alloys	330-360	80-2070	90-2340	40-30	0.32
Nickel and its alloys	180-214	105-1200	345-1450	60-5	0.31
Steels	190-200	205-1725	415-1750	65-2	0.28-0.33
Stainless steels	190-200	240-480	480-760	60-20	0.28-0.30
Titanium and its alloys	80-130	344-1380	415-1450	25-7	0.31-0.34
Tungsten and its alloys	350-400	550-690	620-760	0	0.27
NONMETALLIC MATERIALS					
Ceramics	70-1000	-	140-2600	0	0.2
Diamond	820-1050	-	-	-	-
Glass and porcelain	70-80	-	140	0	0.24
Rubbers	0.01-0.1	-	-	-	0.5
Thermoplastics	1.4-3.4	-	7-80	1000-5	0.32-0.40
Thermoplastics, reinforced	2-50	-	20-120	10-1	-

Griffith theory Θεωρία που προσφέρει θερμοδυναμικά ή ενεργειακά κριτήρια για την αστοχία των υλικών. ΔΕΝ αποτελεί μηχανισμό θραύσης



(α) Γεωμετρία επιφανειακών & εσωτερικών ρωγμών

(β) Κατανομή της τάσης κατά μήκος της ευθείας $X - X'$ που υποδεικνύει την ενίσχυση της τάσης στα σημεία αιχμής της ρωγμής

Κατά τη διάδοση της ρωγμής

Ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης U_E
 (αποθηκεύτηκε κατά την ελαστική παραμόρφωση)

Επιφανειακή Ενέργεια συστήματος U_s
 (δημιουργία νέων ελεύθερων επιφανειών)

ΣΥΝΘΗΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

$$\frac{dU}{da} = \frac{dU_E}{da} + \frac{dU_s}{da} = 0$$

- Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών** (1^η έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Δ. Τσιπάς, **Σημειώσεις/Διαλέξεις Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών II**. Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010
- Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, **Φυσική Μεταλλουργία** (1^η έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2007.
- W.D. Callister JR, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών** (5^η έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2008.
- Τίτλος πρωτότυπου: William D. Callister, JR. **Materials Science and Engineering, an introduction**.
- M.A. Meyers, K. K. Chawla, **Mechanical Metallurgy. Principles and Applications**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984
- ASM Handbook, **Vol. 11, Failure Analysis and Prevention**, ASM International, Materials Park, OH, 1986
- ASM Handbook, **Vol. 12, Fractography**, ASM International, Materials Park, OH, 1986

Τεχνολογία Υλικών

Κόπωση

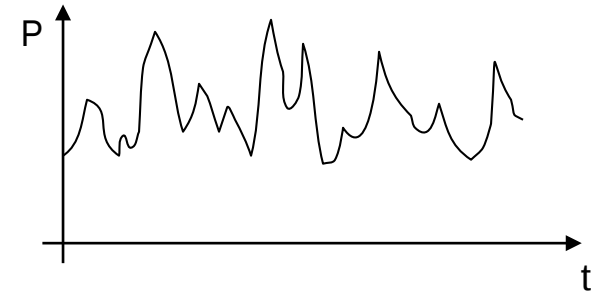
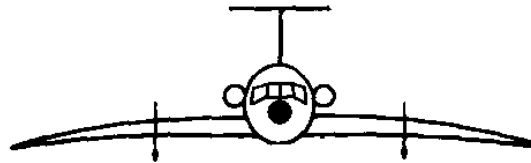
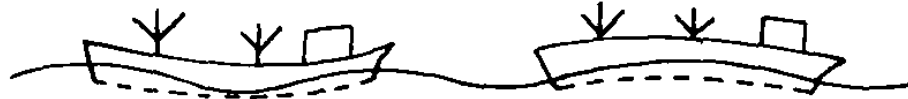
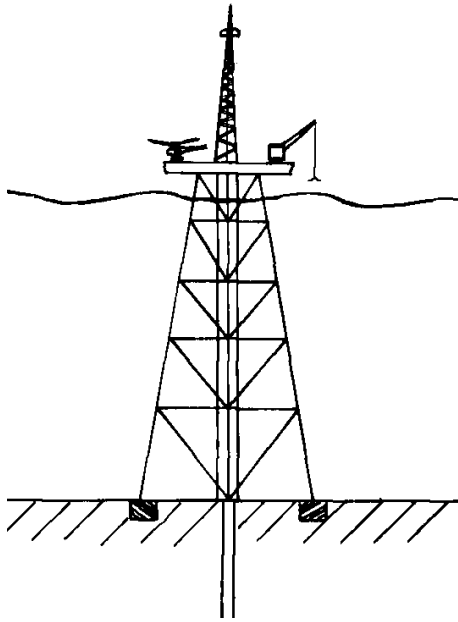
Επικ. Καθ. Α. Τσουκνίδας (tsouknidas@teiwm.gr)



web. <https://biomed.teiwm.gr>

e-class. www.teiwm.gr

Αν ένα μεταλλικό εξάρτημα υποβληθεί σε εναλλασσόμενες περιοδικές και συνεχείς καταπονήσεις, είναι δυνατόν να οδηγηθεί σε θραύση για τιμές τάσεων κατά πολύ μικρότερες της αντοχής του σε εφελκυσμό (σ_{TS}) ή ακόμη και του ορίου διαρροής του (σ_Y).



Η θραύση τότε επέρχεται χωρίς προηγούμενη παραμόρφωση, παρουσιάζοντας χαρακτηριστική όψη σε δύο ζώνες και οφείλεται στο φαινόμενο της ΚΟΠΩΣΗΣ του μετάλλου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

➤ Αποτελεί το συχνότερο λόγο αστοχίας στα μέταλλα. Συμμετέχει στο 90% των αστοχιών.

➤ Εμφανίζεται μετά από μακρά περίοδο επαναλαμβανόμενων κυκλικών τάσεων ή παραμορφώσεων.

Πως γίνεται αυτό? Αφού η θραύση επέρχεται χωρίς προηγούμενη παραμόρφωση

➤ Είναι καταστρεπτική και εμφανίζεται ξαφνικά χωρίς προειδοποίηση.



στροφαλοφόρος

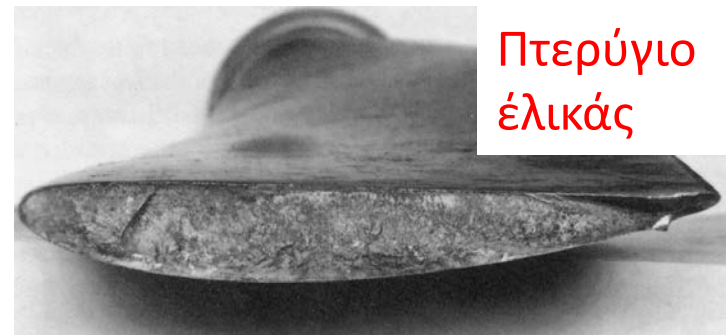


άξονας διεύθυνσης



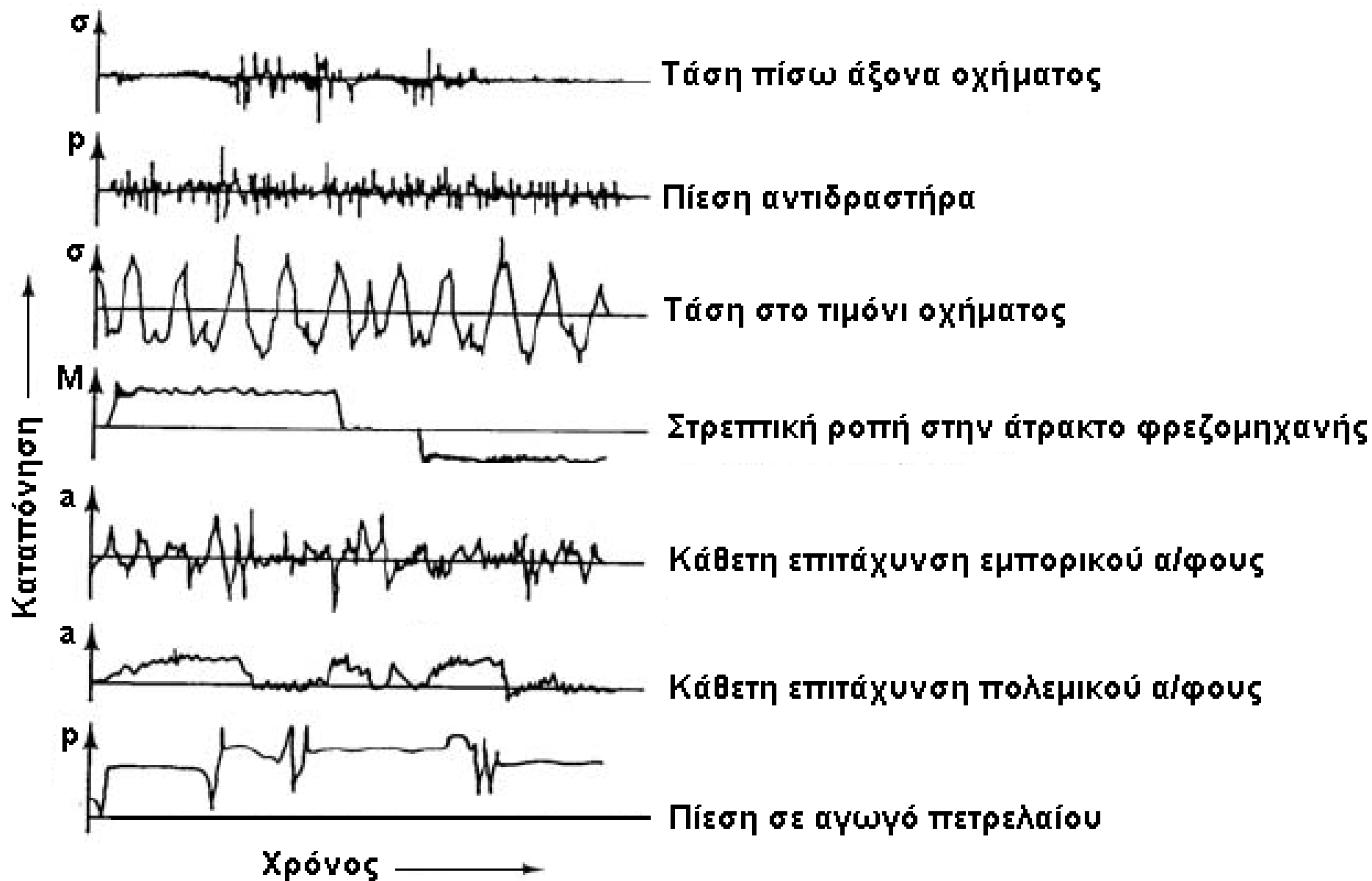
άτρακτος αεροσκάφους

Γιατί αστόχησε?



Πτερύγιο
έλικας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ



ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΕ ΟΡΙΣΜΕΝΕΣ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΠΡΑΞΗΣ

ΚΟΠΩΣΗ

Μη ρωγματωμένων δοκιμίων

Παραδείγματα: όλα τα (μεταλλικά) τεμάχια μικρού μεγέθους όπως βίδες

Προ-ρωγματωμένων δοκιμίων

Παραδείγματα: σχεδόν όλα τα κεραμικά

Πολυκυκλική κόπωση

- Κόπωση σε τάσεις χαμηλότερες της τάσης διαρροής ($\sigma_{\max} < \sigma_y$)
- Κύκλοι έως θραύση $N_f \geq 10^4$
- Ελαστική παραμόρφωση

Ολιγοκυκλική κόπωση

- Κόπωση σε τάσεις μεγαλύτερες της τάσης διαρροής ($\sigma_{\max} > \sigma_y$)
- Κύκλοι έως θραύση $N_f \leq 10^4$
- Μικρή πλαστική παραμόρφωση

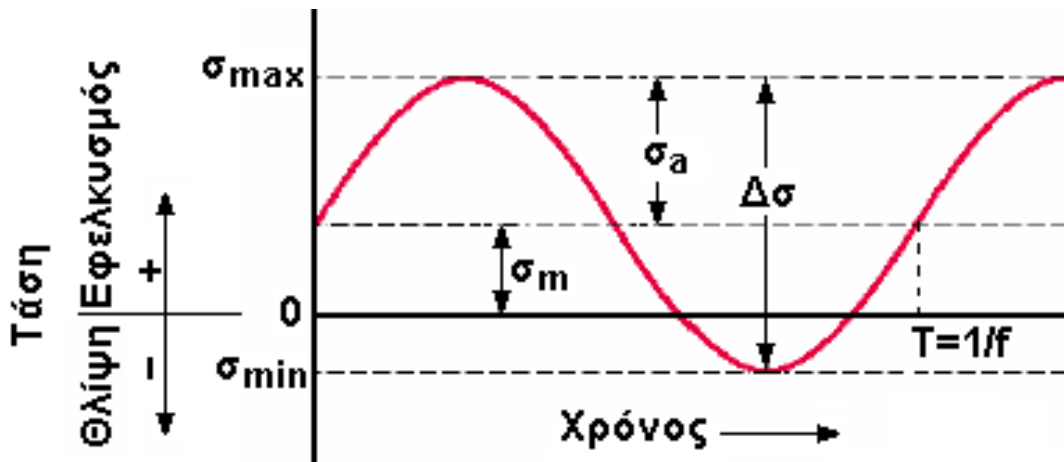
Ανάπτυξη ρωγμής

Δημιουργία νέων ρωγμών κατά την κόπωση

Η θραύση επέρχεται πάντα στο σημείο της ρωγμής?

Κόπωση χωρίς προϋπάρχουσες ρωγμές

ΕΙΣΑΓΩΓΗ



$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

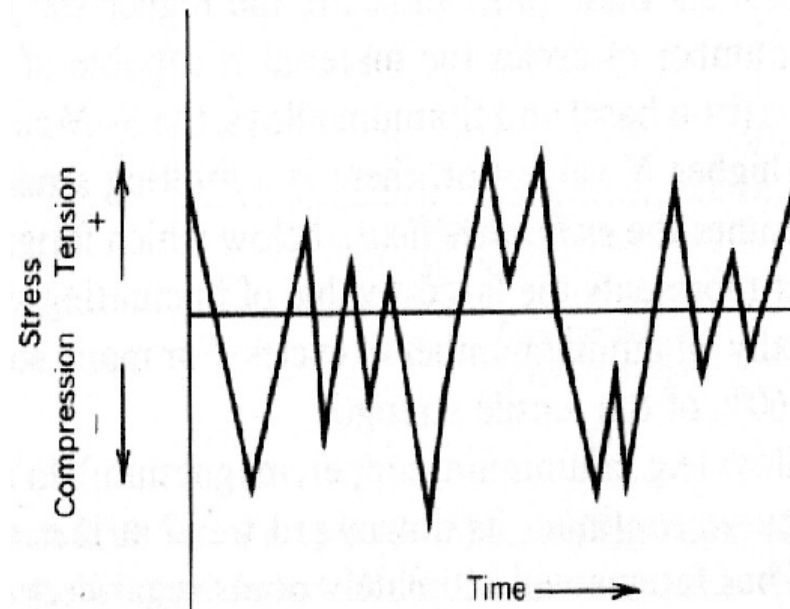
Ισχύει πάντα
 $\sigma_m < \sigma_a$?

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2}$$

N = number of fatigue cycles

N_f = number of cycles to failure

$$\text{Λόγος καταπονήσεων, } R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

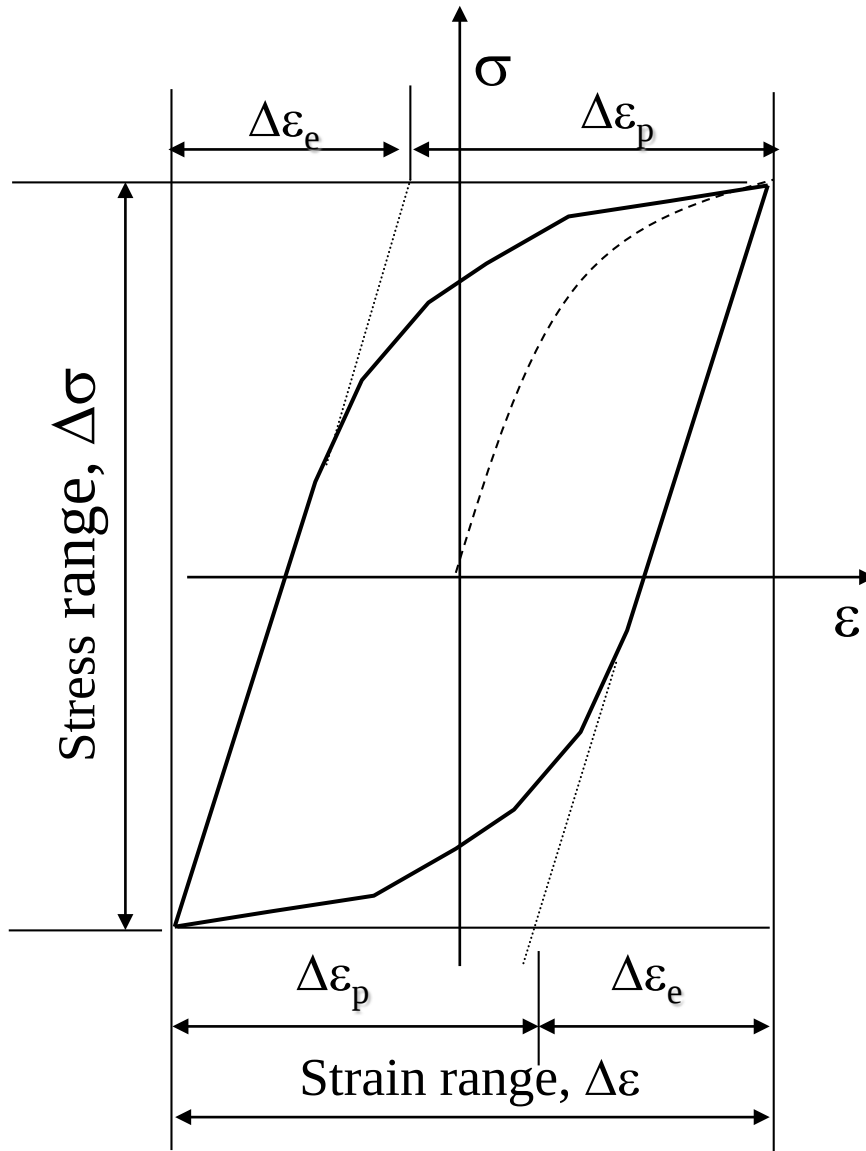


Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της δοκιμής διακρίνουμε τα εξής είδη συνθηκών κόπωσης :

- Εναλλασσόμενη συμμετρική κόπωση $\sigma_m < 0 \text{ ή } = 0 \text{ ή } > 0$
- Ασύμμετρη επαναλα/μενη κόπωση $\sigma_m < 0 \text{ ή } = 0 \text{ ή } > 0$
- Κυματοειδής κόπωση $\sigma_m < 0 \text{ ή } = 0 \text{ ή } > 0$

Τι τιμή παίρνει το R για εναλλασσόμενη συμμετρική κόπωση?

Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης. Συμπεριφορά υστέρησης.



Φάσμα

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{elastic} + \Delta \varepsilon_{plastic}$$

$$\Delta \varepsilon_e = \Delta \sigma / E$$

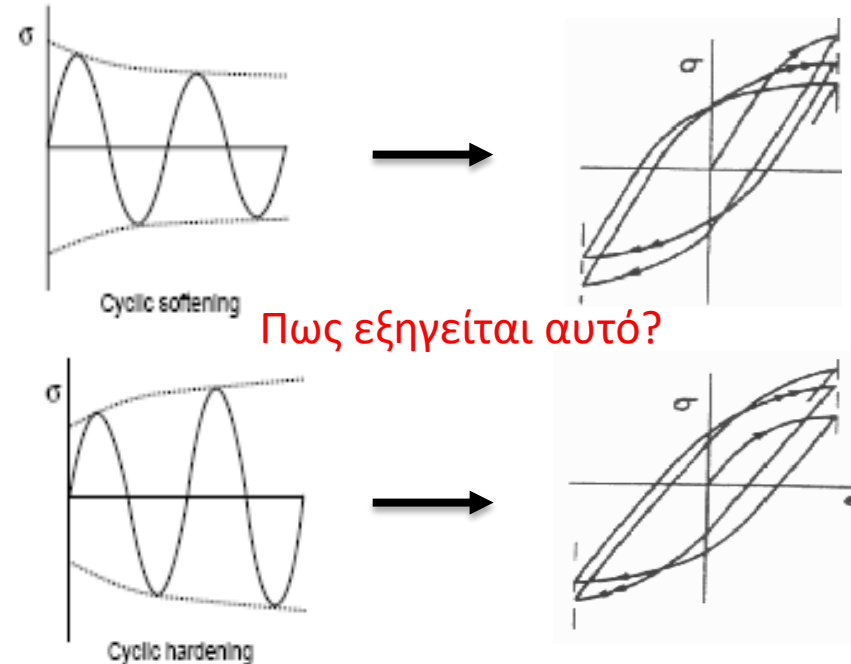
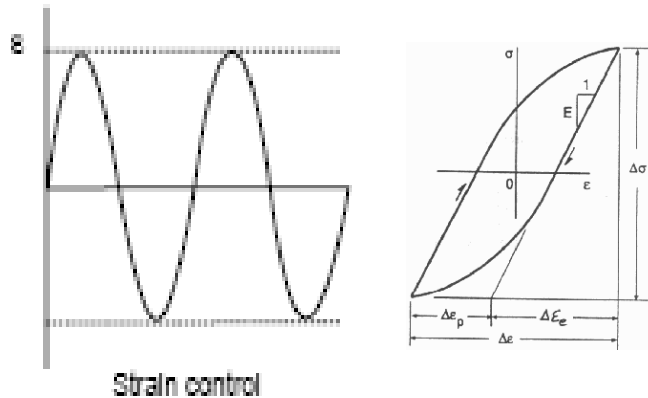
Ένταση

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E}$$

Κόπωση ελεγχόμενη από την τάση (αναφέρεται σε ολιγοκυκλική).
Όταν η τάση διατηρείται σταθερή η παραμόρφωση μπορεί είτε να αυξάνει (cyclic hardening), είτε να μειώνεται (cyclic softening) ή να παραμένει σταθερή.

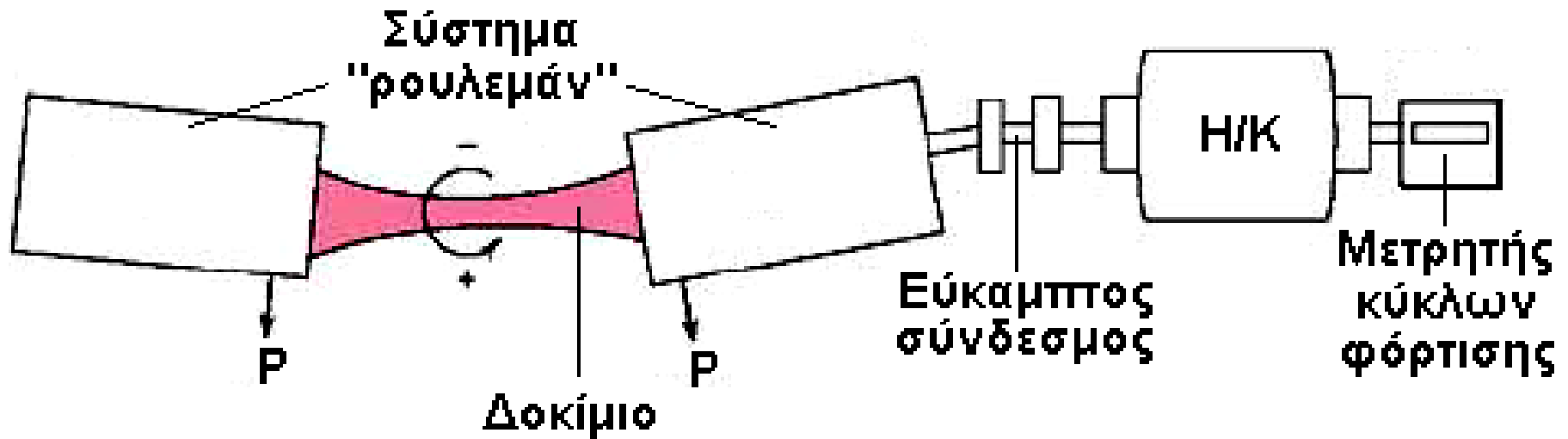
Πως μεταβάλλονται τα αντίστοιχα διαγράμματα στις περιπτώσεις αυτές?



Cyclic hardening: η αρχική πυκνότητα διαταραχών είναι χαμηλή, η κυκλική τάση αυξάνει τη πυκνότητα διαταραχών $\Rightarrow$ αυξάνει η παραμόρφωση στο δοκίμιο και «σκληραίνει».

Cyclic softening: αρχική πυκνότητα διαταραχών υψηλή, η κυκλική τάση επιτρέπει την αναδιάταξη των διαταραχών σε σταθερά δίκτυα, ελαττώνοντας την παραμόρφωση στο δοκίμιο που εν συνεχεία «μαλακώνει».

Δοκιμή κόπωσης σε συνθήκες καθαρής κάμψης



ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ: DIN 50100, DIN 50113, ASTM E-206, ASTM E-466.

Το δοκίμιο στηρίζεται σε δύο αρθρώσεις (ρουλεμάν) και δέχεται στα άκρα του δύο ίσες τέμνουσες δυνάμεις P (συνθήκες καθαρής κάμψης).

Μέσω Η/Κ, το δοκίμιο στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα.

Ποιο το πλεονέκτημα αυτής της μορφής της δοκιμής έναντι εναλλασσόμενου εφελκυσμού – θλίψης?

Σε μια περιστροφή όλα τα σημεία του δοκιμίου περνούν από κατάσταση εφελκυσμού σε κατάσταση θλίψης και αντίστροφα (έχουμε 2-πλάσια συχνότητα).

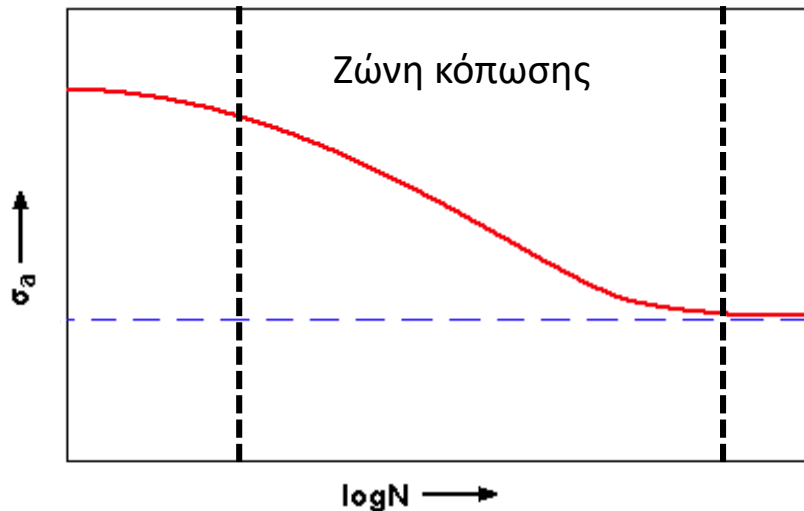
Τι σημαίνει $\sigma_m=0$?

Για πολυκυκλική κόπωση (και $\sigma_m=0$) έχει βρεθεί πειραματικά ότι τα δεδομένα μπορούν να προβλεφθούν από μια εξίσωση της μορφής:

$$\Delta\sigma N_f^a = C_1 \quad \textbf{Νόμος Basquin}$$

$$\Rightarrow a = \frac{\partial \log(\Delta\sigma)}{\partial \log(N_f)} \quad \text{Όπου } a \text{ είναι μια σταθερά } (\approx 0.07-0.15) \text{ και } C_1 \text{ επίσης μια σταθερά.}$$

Πως «βγαίνουν» αυτές οι καμπύλες Wöhler?

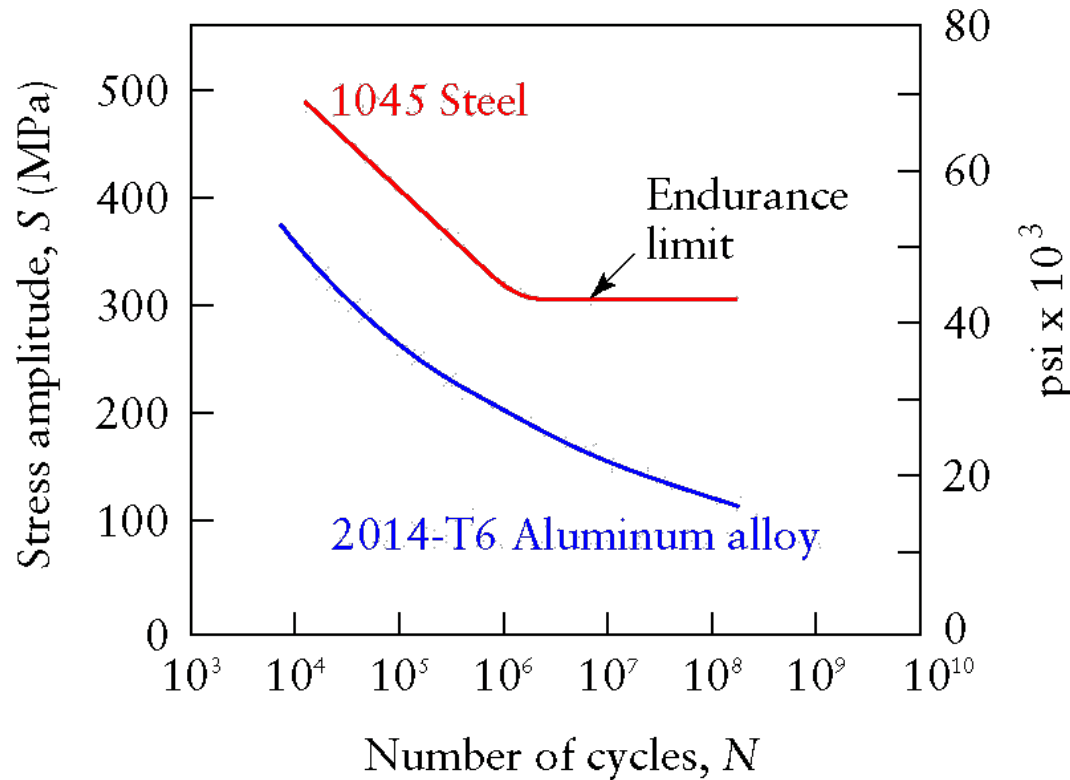


Χαρακτηριστικά των καμπυλών Wöhler:

- Ζώνη ολιγοκυκλικής κόπωσης: $N < 10^2$
- Ζώνη κόπωσης: $10^4 < N < 10^6$
- Ζώνη απεριόριστης αντοχής: $N > 10^6$.

ΠΟΛΥΚΥΚΛΙΚΗ ΚΟΠΩΣΗ

Η καμπύλη S-N ή καμπύλη του Wöhler



Από τι παράγοντες μπορεί να επηρεαστεί η κλίση ή η θέση μιας καμπύλης Wöhler?

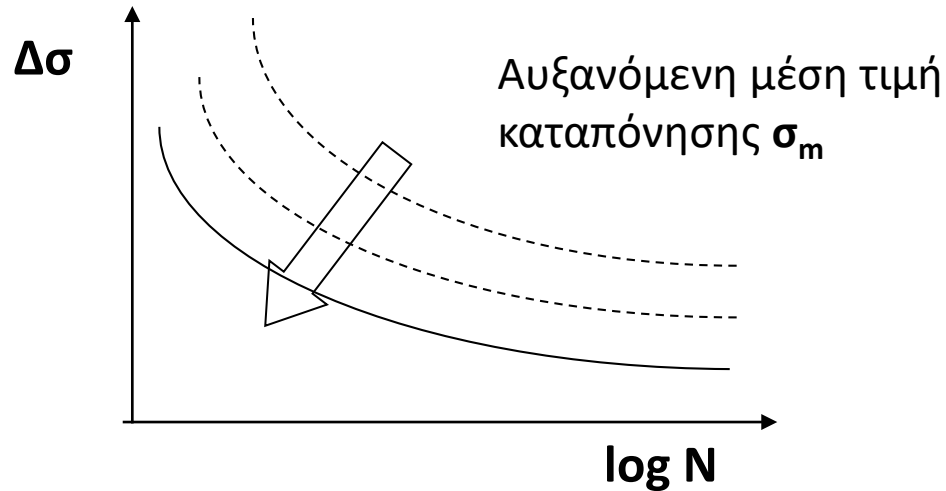
Τυπικές καμπύλες $S - N$ για δύο μέταλλα.

Σε αντίθεση με το χάλυβα 1045 το αλουμίνιο 2014-T6 δεν εμφανίζει όριο κόπωσης. **Γιατί και σε τι χρησιμεύει?**

ΠΟΛΥΚΥΚΛΙΚΗ ΚΟΠΩΣΗ

Για στατική καταπόνηση $\sigma_m > 0$, η διάρκεια ζωής σε κόπωση ελαττώνεται με αυξανόμενη στατική καταπόνηση. !!!

Όσο μεγαλύτερο το σ_m τόσο πιο κοντά στο $\sigma_{0.2}$ βρισκόμαστε!



Προσοχή, δεν συγκρίνουμε καταπονήσεις ιδίου εύρους με μεταβαλλόμενο σ_m ! Εκεί θα είχαμε άλλο διάγραμμα...

Υπάρχουν διάφορες εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν το εύρος της καταπόνησης και τη στατική καταπόνηση με τη διάρκεια ζωής σε κόπωση.

Για να διατηρηθεί η διάρκεια ζωής σε κόπωση N_f σταθερή, όταν να υλικό υπόκειται σε στατική καταπόνηση $\sigma_m > 0$, το εύρος της καταπόνησης θα πρέπει να μειώνεται.

ΚΟΠΩΣΗ

Μη ρωγματωμένων δοκιμίων

Παραδείγματα: όλα τα (μεταλλικά) τεμάχια μικρού μεγέθους όπως βίδες

Προ-ρωγματωμένων δοκιμίων

Παραδείγματα: σχεδόν όλα τα κεραμικά

Πολυκυκλική κόπωση

- Κόπωση σε τάσεις χαμηλότερες της τάσης διαρροής ($\sigma_{\max} < \sigma_y$)
- Κύκλοι έως θραύση $N_f \geq 10^4$
- Ελαστική παραμόρφωση

Ολιγοκυκλική κόπωση

- Κόπωση σε τάσεις μεγαλύτερες της τάσης διαρροής ($\sigma_{\max} > \sigma_y$)
- Κύκλοι έως θραύση $N_f \leq 10^4$
- Μικρή πλαστική παραμόρφωση

Ανάπτυξη ρωγμής

Δημιουργία νέων ρωγμών κατά την κόπωση



Σχηματισμός νέων ρωγμών και εξέλιξη υφιστάμενων

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΠΩΣΗ

(1) Έναρξη ρωγμής.

Είναι το στάδιο εκείνο κατά το οποίο αναπτύσσεται λόγω κόπωσης κάποιο ελάττωμα, που θα μπορούσε ενδεχομένως να εξαλειφθεί με κατάλληλη κατεργασία (όπως πχ με ανόπτηση, επιφανειακές κατεργασίες, κλπ.).

(2) Ανάπτυξη ρωγμής μέσω των επιπέδων ολίσθησης.

Περιλαμβάνει την επέκταση της αρχικής ρωγμής μέσω των κρυσταλλογραφικών επιπέδων μέγιστης διατμητικής τάσης. Το στάδιο αυτό καλείται και **στάδιο I** ανάπτυξης της ρωγμής.

(3) Ανάπτυξη ρωγμής μέσω των επιπέδων της μέγιστης εφελκυστικής τάσης

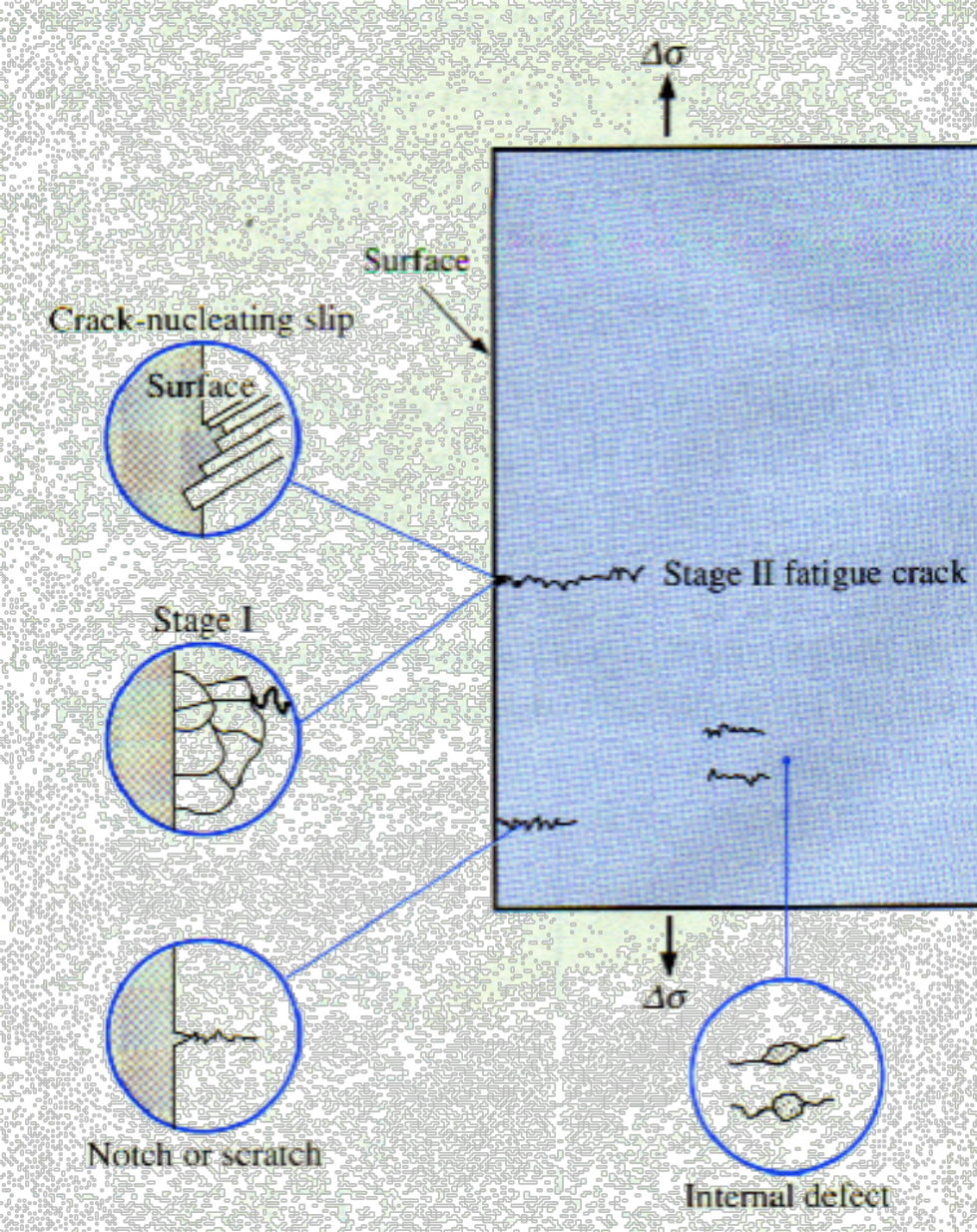
Περιλαμβάνει την επέκταση της ρωγμής του προηγούμενου σταδίου, κάθετα στον άξονα εφαρμογής της μέγιστης εφελκυστικής τάσης. Καλείται πολύ συχνά **στάδιο II** ανάπτυξης της ρωγμής. **Ποια η διαφορά του στάδιο II από το στάδιο I ?**

(4) Τελικό στάδιο αστοχίας

Συμβαίνει όταν η ρωγμή αποκτήσει επαρκές μήκος, με αποτέλεσμα η διατομή του υλικού να είναι αδύνατο να αντέξει την εφαρμογή του φορτίου. Όταν συμβεί αυτό, η ρωγμή διαδίδεται ακαριαία και το υλικό οδηγείται στην τελική θραύση, που εμφανίζεται στην περιοχή αυτή, σαν όλκιμη. **Τι συνάίνει αυτό? Όλκιμη θραύση: Η επιφάνεια θραύσης παρουσιάζει σημαντική πλαστική παραμόρφωση**

ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΠΟ

ΚΟΠΩΣΗ

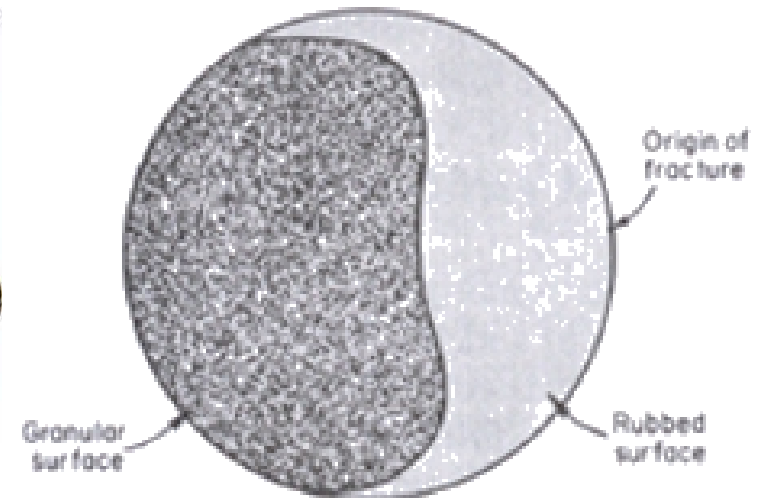


Η ανάπτυξη της ρωγμής κατά το στάδιο I, είναι ίση με μερικές διαμέτρους κόκκων προτού μεταβεί στο στάδιο II.

Η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής στο στάδιο I είναι πολύ χαμηλή (μερικά nm/κύκλο) σε σχέση με αυτή που επικρατεί στο στάδιο II (μερικά μm/κύκλο).

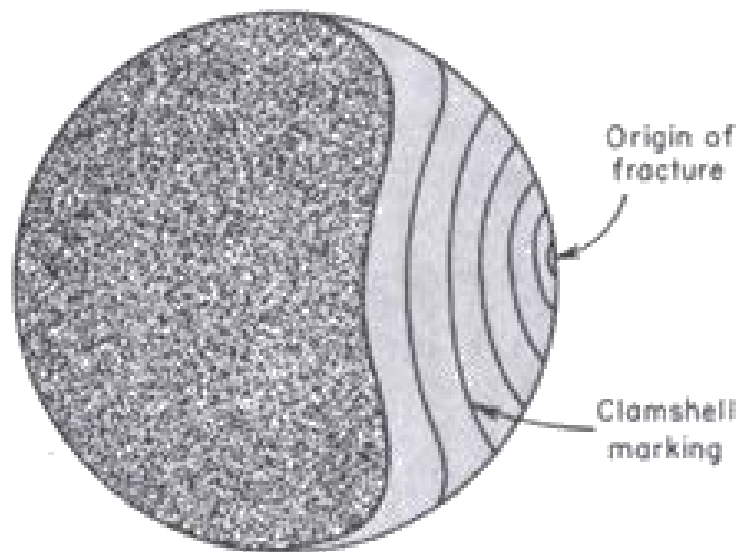
Η επιφάνεια θραύσης του σταδίου I έχει χαρακτηριστικό γνώρισμα, το ότι είναι λεία χωρίς ίχνη πλαστικής παραμόρφωσης.

- Πως είναι δυνατό να έχουμε επιφάνεια θραύσης σε στάδιο I?
- Σε ποια υλικά παρατηρείται?



Η λεία επιφάνεια αντιστοιχεί στην επιφάνεια στην οποία η ρωγμή διαδίδεται αργά (**στάδιο I**). Η γρήγορη αστοχία εμφανίζεται στην περιοχή με θολή και ινώδη υφή (το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας – **στάδιο II**).

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΠΟ ΚΟΠΩΣΗ



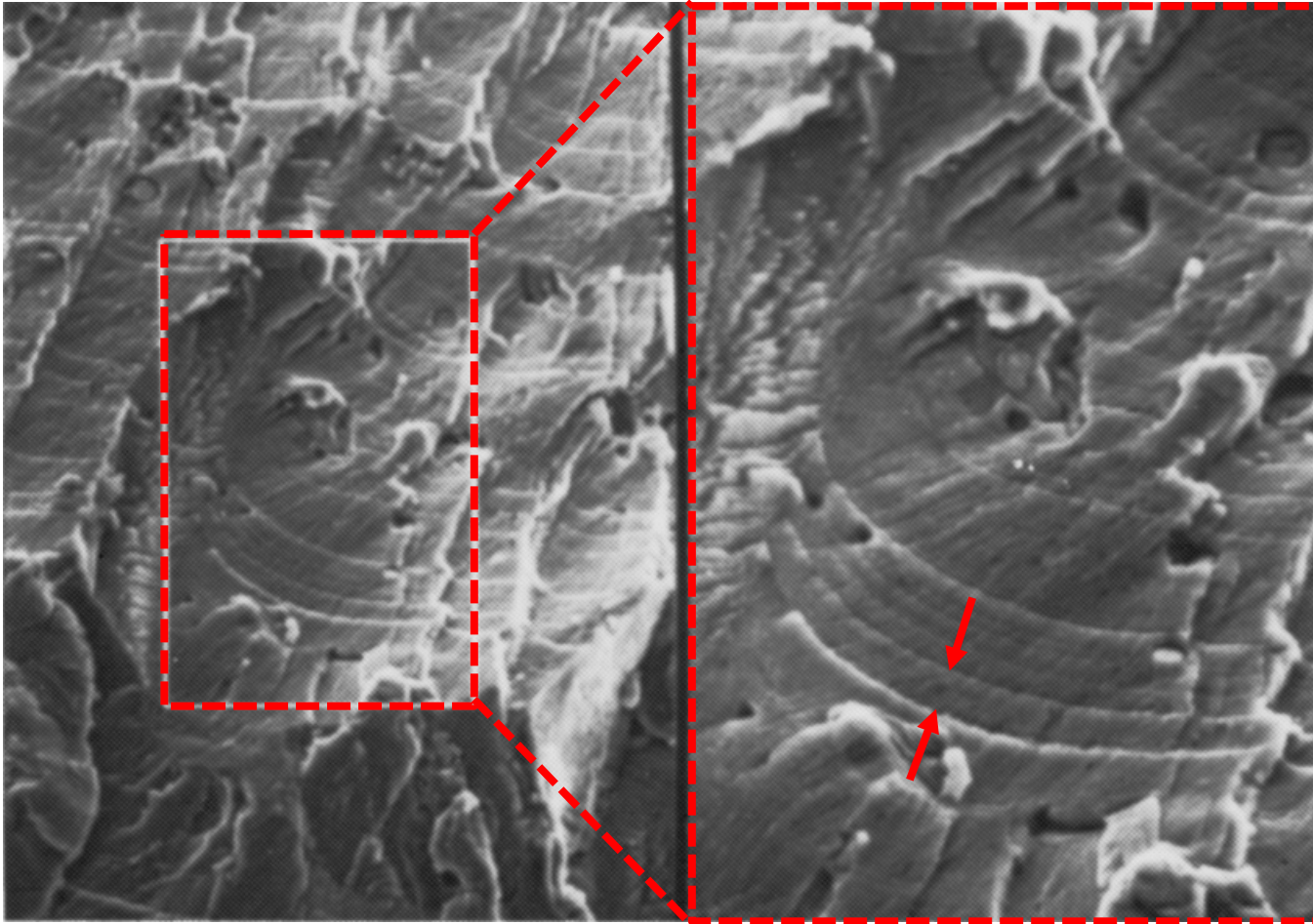
Επιφάνεια θραύσης από κόπωση, στην οποία φαίνονται οι ραβδώσεις κόπωσης.



Κάθε μικρο-ράβδωση θεωρείται ότι αναπαριστά την απόσταση κατά την οποία αναπτύχθηκε το μέτωπο της ρωγμής κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης.

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΠΟ ΚΟΠΩΣΗ

Επιφάνεια θραύσης από κόπωση, στην οποία φαίνονται οι ραβδώσεις κόπωσης



Γιατί μεταβάλλεται
το πλάτος/εύρος
των ραβδώσεων?

Μεγέθυνση: αριστερά, 500x; δεξιά, 1000x

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΠΟ ΚΟΠΩΣΗ

- Ο τρόπος φόρτισης και το εύρος της παραμόρφωσης
- Η συγκέντρωση της επιβαλλόμενης τάσης η οποία τείνει να ελαττώσει την αντοχή στην κόπωση (η τάση μεταβάλλεται σε οπές, απότομες μεταβολές της διατομής κτλ.)
- Το είδος της κρυσταλλικής δομής
 - ο προσανατολισμός του μονοκρυσταλλικού υλικού
 - Δώστε σχετικά παραδείγματα
 - το μέγεθος των κόκκων του πολυκρυσταλλικού υλικού
- Η συχνότητα των κυκλικών μεταβολών
- Οι επιφανειακές ανωμαλίες. → δημιουργούν τοπικές συγκεντρώσεις τάσης και κατ' επέκταση ρωγμές
- Η κατάσταση της επιφάνειας → Κατεργασίες επιφανειακής σκλήρυνσης προκαλούν αύξηση της αντοχής του μετάλλου δεδομένου ότι οι ρωγμές δημιουργούνται, συνήθως, στην επιφάνεια.
- Η προηγούμενη κατεργασία
- Η θερμοκρασία
- Η παρουσία και δεύτερης φάσης στο υλικό

• Το περιβάλλον → Το διαβρωτικό περιβάλλον ευνοεί την ανάπτυξη και τη διάδοση των ρωγμών → ΚΟΠΩΣΗ
ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΟΠΩΣΗ

➤ Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών** (1^η έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

➤ Δ. Τσιπάς, **Σημειώσεις/Διαλέξεις Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών II**. Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010

➤ Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, **Φυσική Μεταλλουργία** (1^η έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2007.

➤ W.D. Callister JR, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών** (5^η έκδοση), Εκδόσεις John Wiley & Sons, Inc..

➤ Boyer, H.E. (Editor), **Atlas of Fatigue Curves**. ASM International, Materials Park, OH, 1986

➤ ASM Handbook, **Vol. 11, Failure Analysis and Prevention**, ASM International, Materials Park, OH, 1986

➤ ASM Handbook, **Vol. 12, Fractography**, ASM International, Materials Park, OH, 1986

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Τεχνολογία Υλικών

Φθορά-Τριβή

Επικ. Καθ. Α. Τσουκνίδας (tsouknidas@teiwm.gr)



web. <https://biomed.teiwm.gr>

e-class. www.??gr

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

η επιστήμη και τεχνολογία των *επιφανειών* που βρίσκονται σε σχετική κίνηση και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Περιλαμβάνει:

Τριβή: προκαλεί απώλεια ενέργειας **Υφίσταται τριβή χωρίς φθορά?**

Φθορά: καταστροφή και απώλεια υλικού **Υφίσταται φθορά χωρίς τριβή?**

Λίπανση: μέθοδοι με τους οποίους ελαχιστοποιείται η τριβή

- Στερεά λιπαντικά: Ζη, γραφίτης, κ.α.
- Υγρά λιπαντικά: φυσικά ή τεχνικά έλαια...

Στη μεγάλη τους πλειοψηφία, οι βιομηχανικές κατασκευές περιλαμβάνουν κινούμενα τμήματα που βρίσκονται σε σημειακή ή σε επιφανειακή επαφή. Η σχετική κίνηση των εφαιπόμενων επιφανειών οδηγεί στη φθορά τους, μέσω *τριβολογικών μηχανισμών* που μπορεί να είναι χημικής ή μηχανικής φύσεως, ή συνδυασμός τους.

Πως μπορεί λόγω τριβής να προκληθεί φθορά χημικής φύσεως?

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ανάλογα με τη φυσική κατάσταση στην οποία βρίσκονται τα εν επαφή σώματα και το είδος της σχετικής κίνησης μπορούμε να διακρίνουμε πολλούς τύπους τριβοσυστημάτων.

Συστατικά μέρη ενός ΤΡΙΒΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Επιφάνειες έδρασης:

η εμφάνιση δυνάμεων τριβής είναι ανεπιθύμητη επειδή οδηγεί σε ενεργειακές απώλειες, ενώ η ταυτόχρονη φθορά οδηγεί σε χαμηλές ανοχές λειτουργίας.

**Οι ανοχές μεταβάλλονται από
συναρμογής σε συσφίξεως
ή ανάποδα?**

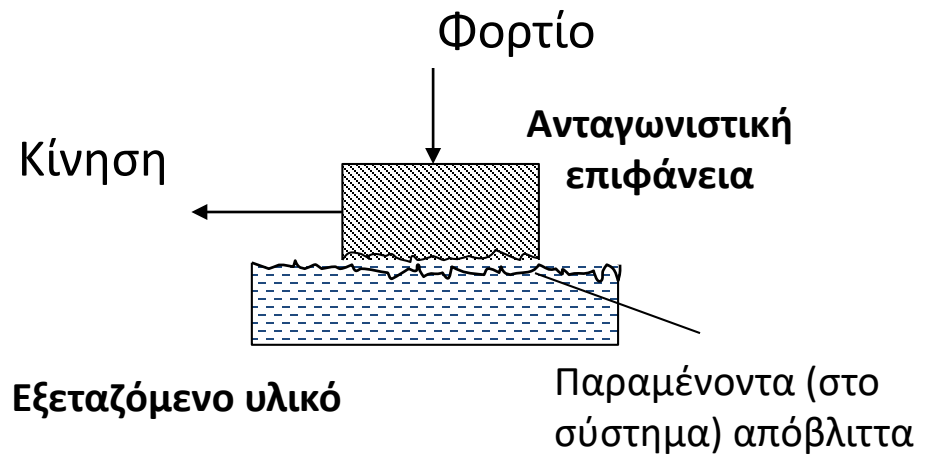
Μηχανουργικές κατεργασίες μετάλλων: (τόρνευση και λείανση)

επιδιώκουμε να πετύχουμε τη μέγιστη αποβολή υλικού, -φθορά,- δαπανώντας ελάχιστη ενέργεια.

Πως, θέλουμε ή όχι τριβή?

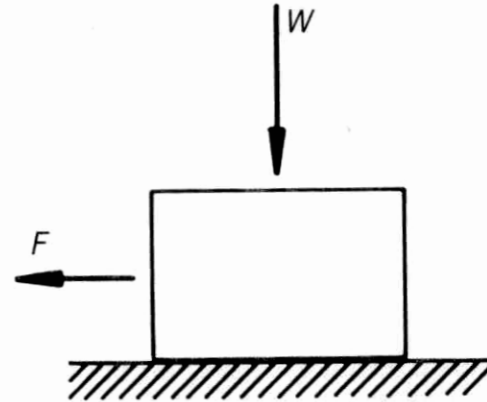
**Υπάρχουν συστήματα/εφαρμογές στις οποίες τα
απόβλητα αυτά να έχουν καταστροφικές επιπτώσεις**

Περιβάλλον (Τ, υγρασία....)



Τριβή αναφέρεται στην αντίσταση που προβάλλεται κατά τη σχετική κίνηση σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή.

Πως μπορεί να μειωθεί
η τριβή της κινούμενης
αυτής μάζας?



Μειώνεται έτσι ο συντελεστής τριβής?

Επιτεύγματα που σχετίζονται με την τριβή: φωτιά, τροχός, κ.α.

Είναι η τριβή επιθυμητή;

ΝΑΙ: φρένα, κοχλιοσυνδέσεις, ...

ΟΧΙ: επιφάνειες έδρασης, στρόφιγγες,....

Τ Ρ Ι Β Η

ΝΟΜΟΙ ΤΡΙΒΗΣ

Leonardo da Vinci (≈ 1500)

Amontons (≈ 1700)

Coulomb (≈ 1785)

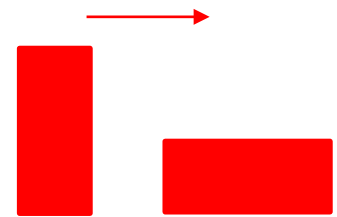


ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΙ
ΝΟΜΟΙ

1^{ος} νόμος (δεν ισχύει για τα πολυμερή)

Η εφαπτομενική δύναμη που προκαλεί την έναρξη της κίνησης (F_T), είναι ανάλογη της κάθετης δύναμης στην επιφάνεια επαφής (F_N):

$$F_T = \mu F_N \longrightarrow \mu \quad \text{Συντελεστής τριβής}$$



2^{ος} νόμος (δεν ισχύει υπό συνθήκες λίπανσης)

Ο συντελεστής τριβής (μ), είναι ανεξάρτητος της επιφάνειας επαφής

Πως εξηγείται το φαινόμενο της ευκολότερης κίνησης μιας ρόδας?

Ποιο από τα 2 κινείται ποιο εύκολα?

3^{ος} νόμος (δεν ισχύει για υψηλές ταχύτητες ολίσθησης)

Η τριβή είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα ολίσθησης.

Αυτό σημαίνει ότι η δύναμη που απαιτείται για την έναρξη της ολίσθησης ισούται με τη δύναμη που απαιτείται για τη συντήρηση της κίνησης σε οποιαδήποτε ταχύτητα.

Τι αλλάζει σε υψηλές ταχύτητες? Γιατί αυξάνει ο συντελεστής τριβής?

Η εφαπτομενική δύναμη που προκαλεί την έναρξη της κίνησης (F_T), είναι ανάλογη της κάθετης δύναμης στην επιφάνεια επαφής (F_N):

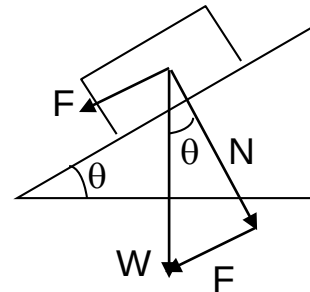
Τυπικές τιμές του μ	0,03	έδρανο με λίπανση
	0,5 – 0,7	ολίσθηση χωρίς λίπανση

Είναι λογικό ή θα έπρεπε να μειώνεται ο μ ?

Πειραματικός υπολογισμός του μ :

Πως υπολογίζεται το μ από τον λόγο F και N ?

Από τη γωνία τριβής θ



$$\tan\theta = \frac{F}{N} = \mu_s$$

(συντελεστής στατικής τριβής)

$$\mu_s > \mu_d \text{ (δυναμικής)}$$

Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από πλήθος παραγόντων όπως η φύση της επιφανείας, τα υλικά, το περιβάλλον, τις συνθήκες και τη διάταξη του πειράματος,...

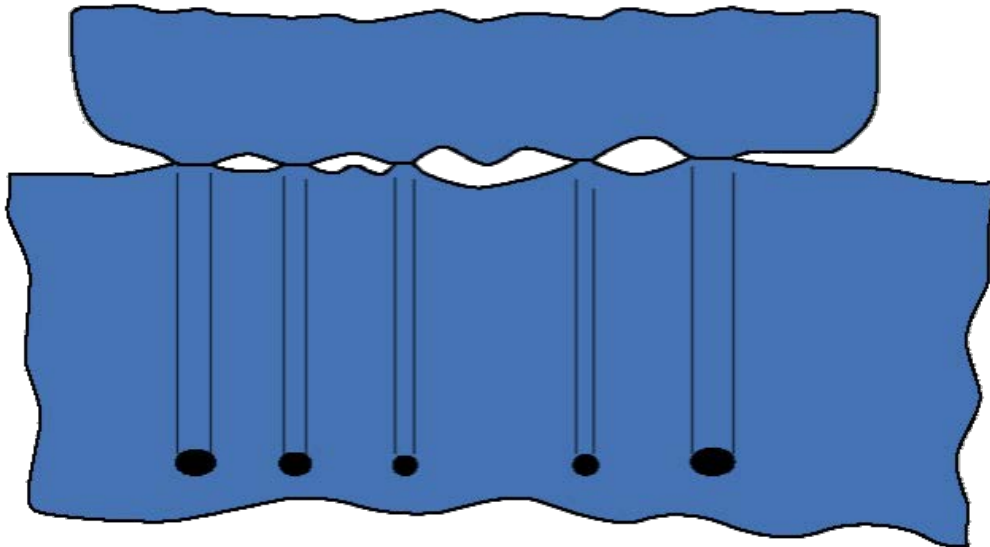
1^{ος} ΝΟΜΟΣ ΤΡΙΒΗΣ

Υλικά Ισχύει?		Στατικής τριβής,		Δυναμικής τριβής,	
		Dry & clean	Lubricated	Dry & clean	Lubricated
Aluminum	Steel	0.61		0.47	
Copper	Steel	0.53	0.18	0.36	
Brass	Steel	0.51	0.19	0.44	
Cast iron	Copper	1.05		0.29	
Cast iron	Zinc	0.85		0.21	
Concrete (wet)	Rubber	0.30			
Concrete (dry)	Rubber	1.0		0,6-0,85	
Copper	Glass	0.68		0.2-0.3	
Glass	Glass	0.94	0.1-0.6	0.4	0.09-0.1
Polythene	Steel	0.2	0.2		
Steel	Steel	0.80	0.16	0.05-0.11	
Steel	Teflon	0.04	0.04		0.04
Teflon	Teflon	0.04	0.04		0.04

Ο συντελεστής τριβής (μ), είναι ανεξάρτητος του μεγέθους της επιφάνειας επαφής.

Αλλάζει η δύναμη τριβής ανάλογα με την ποιότητα της επιφάνειας?

Επαφή μεταξύ δύο σωμάτων: *Πραγματική επιφάνεια επαφής*

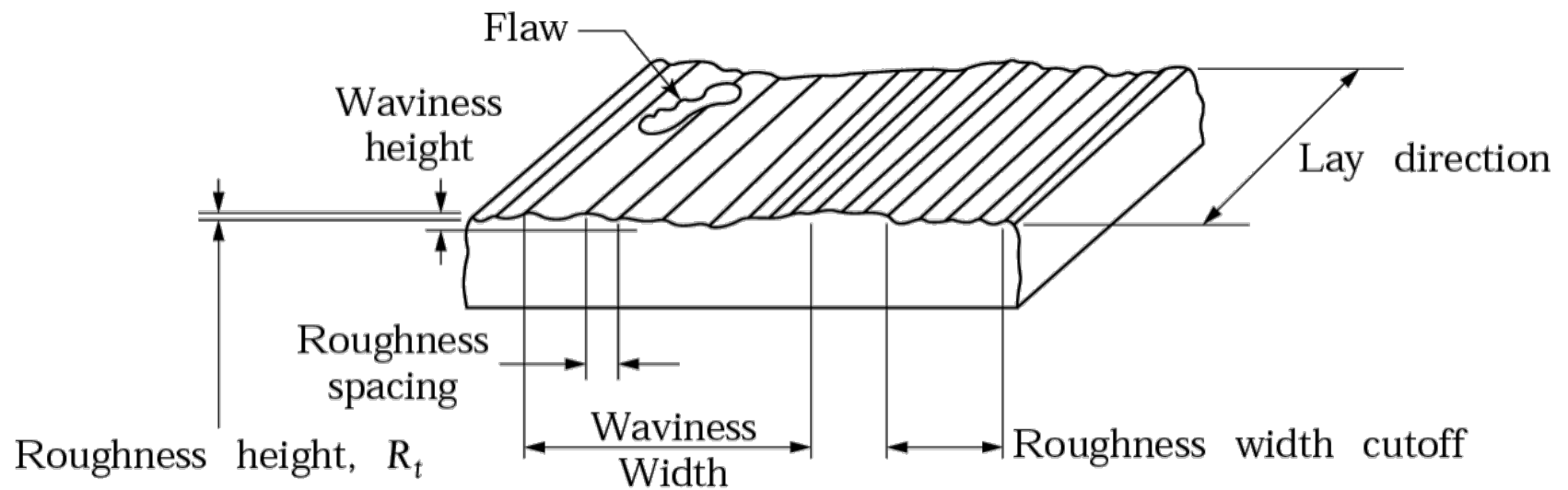


Σε βιομηχανικές κατασκευές, η πραγματική επιφάνεια είναι 4-5 φορές μικρότερη από τη φαινόμενη επιφάνεια.

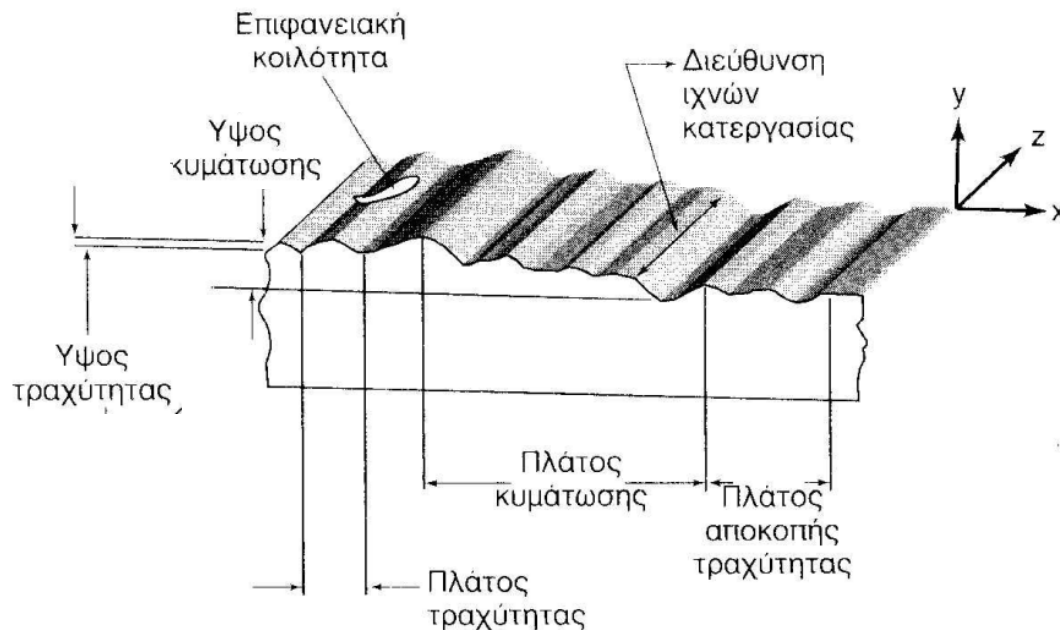
Πως γίνεται αυτό, αφού η τραχύτητα αυξάνει την επιφάνεια?

Συσχετίστε σχεδιασμένη, φαινόμενη και επιφάνια επαφής.

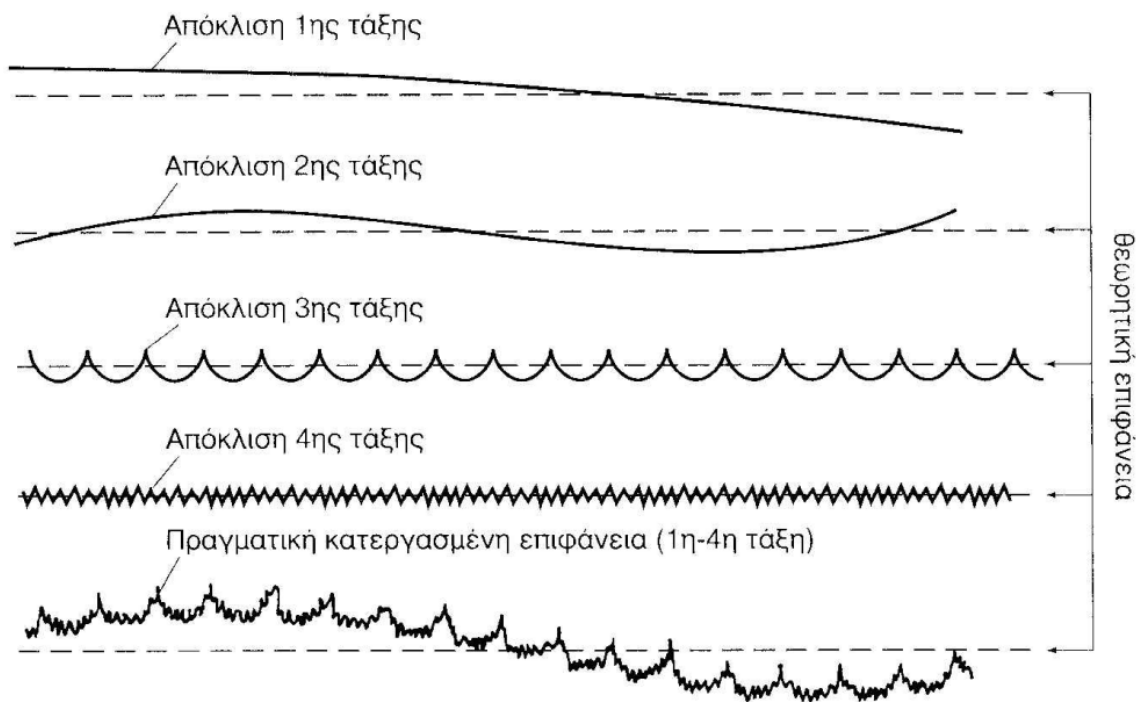
2^{ος} ΝΟΜΟΣ ΤΡΙΒΗΣ



Χαρακτηριστικά μεγέθη της τοπογραφίας μιας κατεργασμένης επιφάνειας.



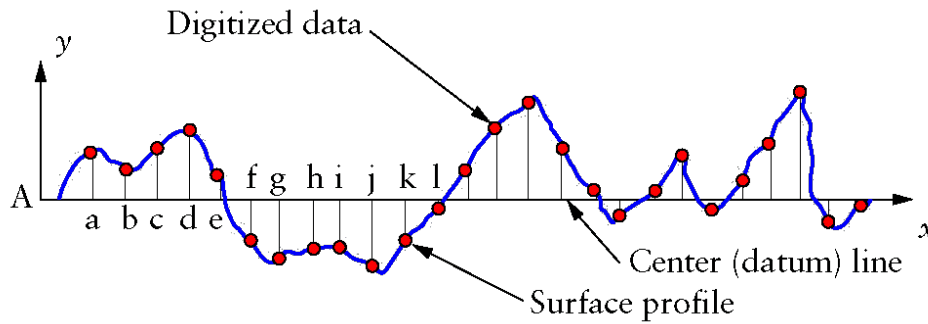
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ



Σύνθεση της πραγματικής
επιφάνειας
από αποκλίσεις 1ης έως 4ης
τάξης

ΤΑΞΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ
1 ^η τάξη (μακροτοπογραφική)	Σφάλμα μορφής	Σφάλμα ρύθμισης εργαλειομηχανής, αστοχία εργαλείου (κάμψη, φθορά κλπ)
2 ^η τάξη	Κυμάτωση	Κάμψη εργαλείου ή μέρους της εργαλειομηχανής, εκκεντρότητα, ταλαντώσεις
3 ^η τάξη	Τραχύτητα	Ανωμαλίες του χείλους του κοπτικού εργαλείου, πρόωρη φθορά
4 ^η τάξη (ανώτερη)	Μικροτραχύτητα	

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ



Μέτρηση της τραχύτητας επιφάνειας.
 (α) Ορισμός της κεντρικής γραμμής ή γραμμής αναφοράς.
 (β) Προσδιορισμός των παραμέτρων ύψους.

Μέση τραχύτητα

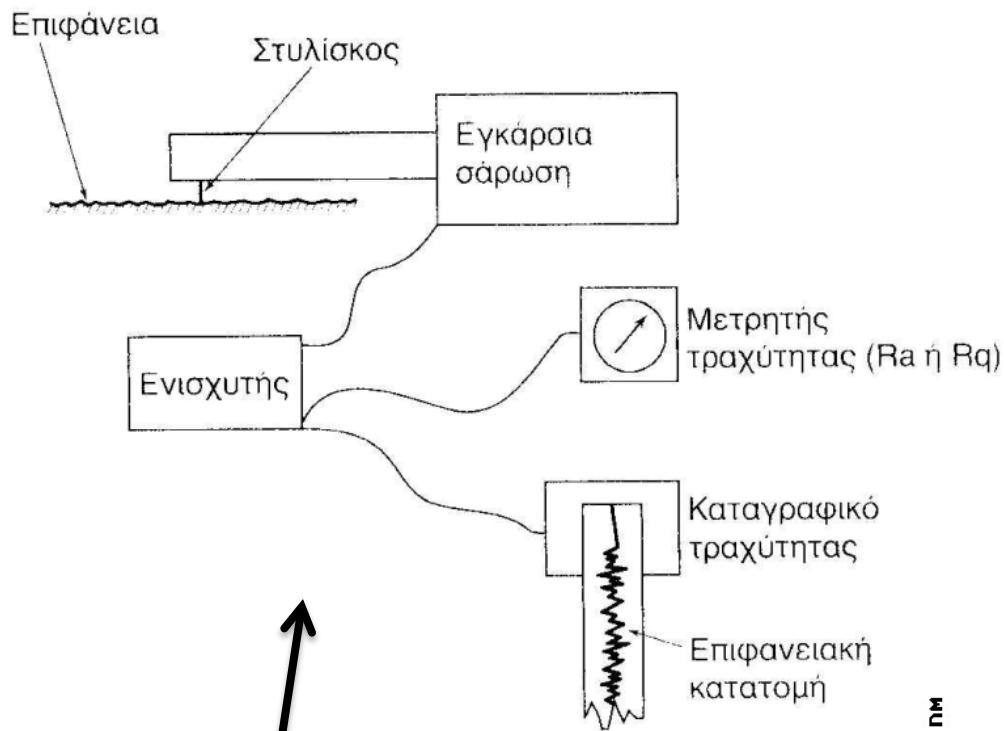
$$R_a = \frac{a + b + c + d + \dots}{n}$$

Ενδεικνυόμενη τραχύτητα

$$R_q = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}{n}}$$

Μέγιστη τραχύτητα R_t : η κάθετη απόσταση μεταξύ μέγιστης κορυφής και μέγιστης κοιλιάδας

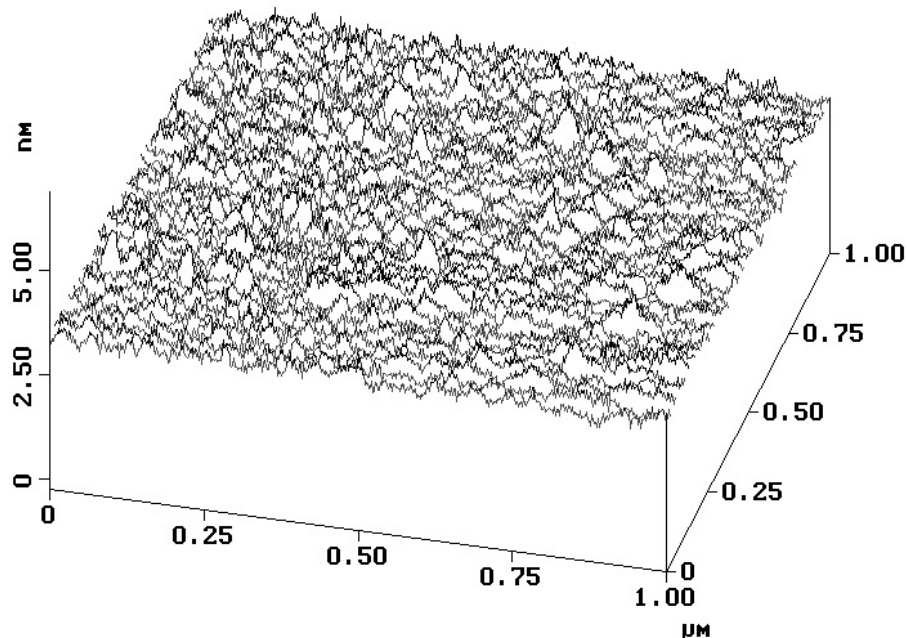
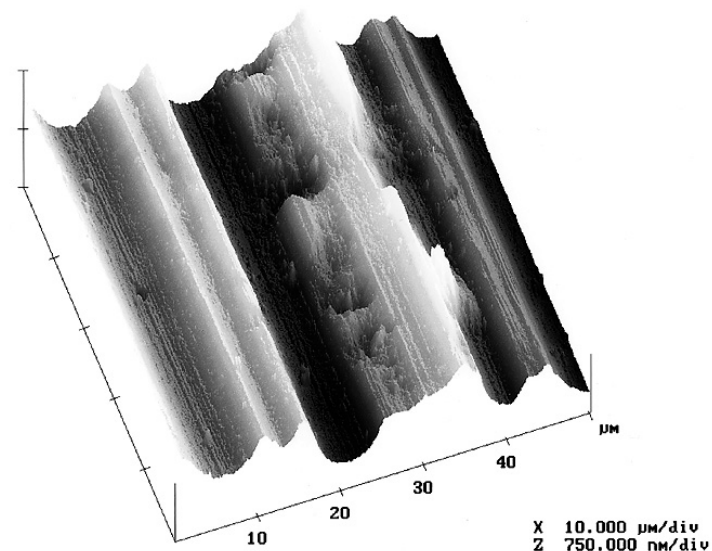
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ



Αρχή λειτουργίας τραχύμετρου
και προφιλόμετρου

Γιατί δίνουν ελλιπή πληροφορία αυτού
του τύπου μετρήσεις?

Atomic Force Microscope (AFM)



ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η επίδραση μηχανικών, ή και θερμικών φορτίων κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας, επιφέρει αλλαγές στα στρώματα του υλικού κοντά στην επιφάνεια, από τις σπουδαιότερες των οποίων είναι η **αλλαγή της σκληρότητας**.

ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ

σκληρότητα κρυσταλλικού ορυκτού είναι η αντίσταση του υλικού αυτού στη χάραξή του από άλλο σκληρότερο.

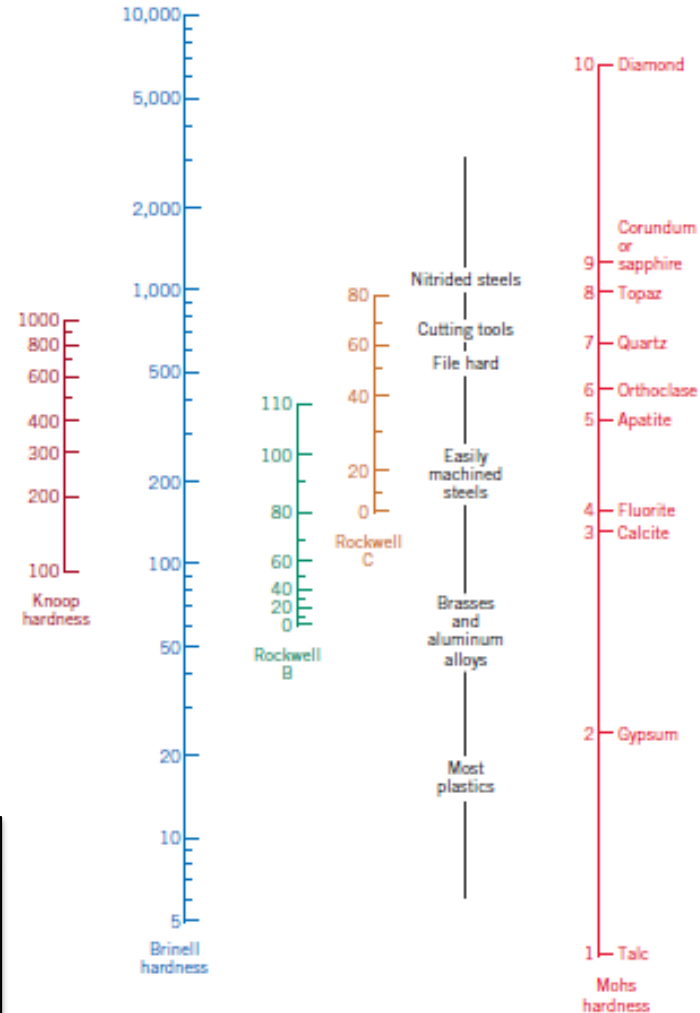


Κλίμακα Mohs

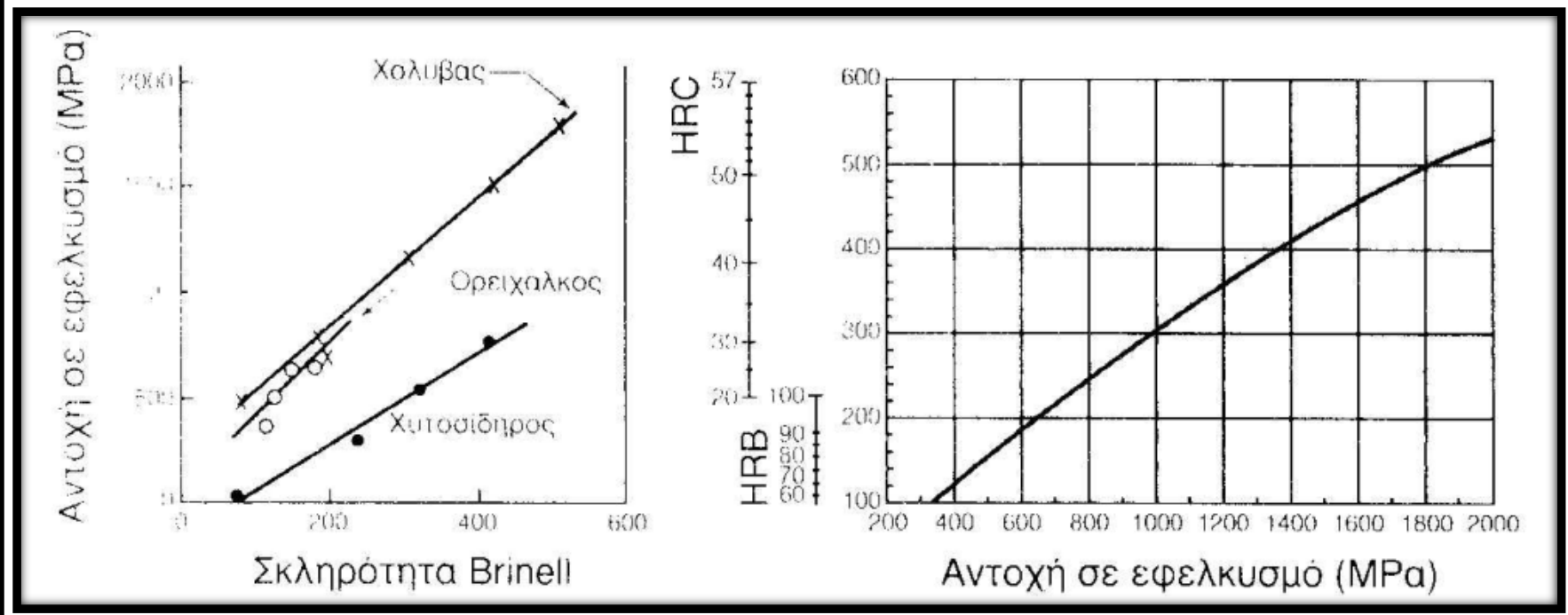
ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ

Ως **σκληρότητα ενός υλικού** ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει το υλικό αυτό, στην κάθετη διείδυση ενός άλλου σώματος μεγαλύτερης σκληρότητας από αυτήν του εξεταζόμενου υλικού. **Γιατί χρησιμοποιούμε άλλη κλίμακα?**

Η σκληρότητα είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η διείδυση του σκληρού υλικού αναφοράς.



ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ



Η σκληρότητα δε συνδέεται (πάντα) άμεσα με τις λοιπές μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού

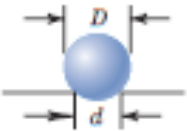
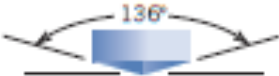
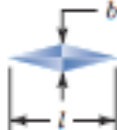
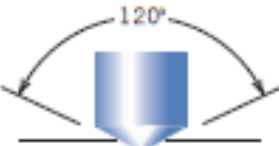
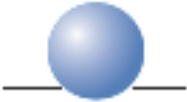
Ωστόσο:

❖ Το όριο διαρροής (σ_y) χαλύβων με μικρή περιεκτικότητα σε (C), συνδέεται με την σκληρότητα με την σχέση: $H = 3\sigma_y$.

Μια απλή μέτρηση της σκληρότητας μας επιτρέπει, λοιπόν, να εκτιμήσουμε το όριο διαρροής ενός τέτοιου χάλυβα, με εύκολο και άμεσο τρόπο.

❖ Για ορισμένα κράματα έχει βρεθεί μια σχέση, η οποία επιτρέπει την εκτίμηση της μέγιστης αντοχής τους σε εφελκυσμό (σ_{TS}), γνωρίζοντας την τιμή της σκληρότητας με ακρίβεια 5-10%.

ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	{ Diamond cone; $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter steel spheres	 	 	60 kg 100 kg 150 kg } Rockwell 15 kg 30 kg 45 kg } Superficial Rockwell	

Τα χαρακτηριστικά των κυριότερων μεθόδων μέτρησης της μακρο- και μικρο- σκληρότητας:

Brinell, Vickers, Knoop και Rockwell.

ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ



ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Με τον όρο ΦΘΟΡΑ περιγράφεται η διαδικασία απομάκρυνσης υλικού, από το ένα ή και από τα δύο σώματα, τα οποία βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση

ΔΕΝ αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό ενός υλικού

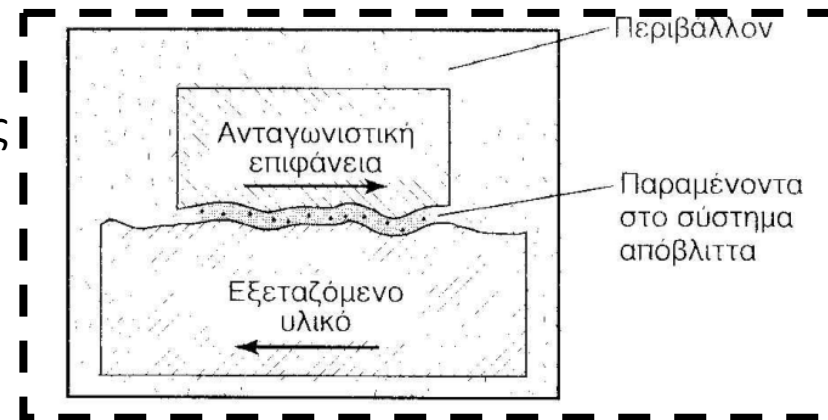
εξαρτάται απ' όλα τα στοιχεία του τριβοσυστήματος,

(α) το εξεταζόμενο υλικό,

(β) το υλικό αναφοράς (ανταγωνιστικό υλικό) ως προς το οποίο μελετάται η φθορά του εξεταζόμενου,

(γ) τα παραμένοντα στο σύστημα προϊόντα της φθοράς και

(δ) το περιβάλλον, -υγρασία, θερμοκρασία, λίπανση κλπ



Φ Θ Ο Ρ Α (λόγο τριβής!)

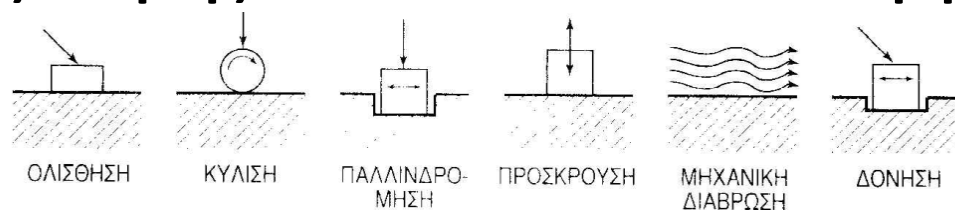
Κύριες ομάδες
τύπων φθοράς
των υλικών

Ανάλογα με
τον τρόπο σχετικής
κίνησης των δύο
υλικών σε επαφή

Ανάλογα με
το μηχανισμό που
υπεισέρχεται στο
φαινόμενο της
φθοράς (??)

ΦΘΟΡΑ (λόγο τριβής!)

Ανάλογα με τον τρόπο σχετικής κίνησης των δύο υλικών σε επαφή, διακρίνουμε:



Φθορά λόγω ολίσθησης

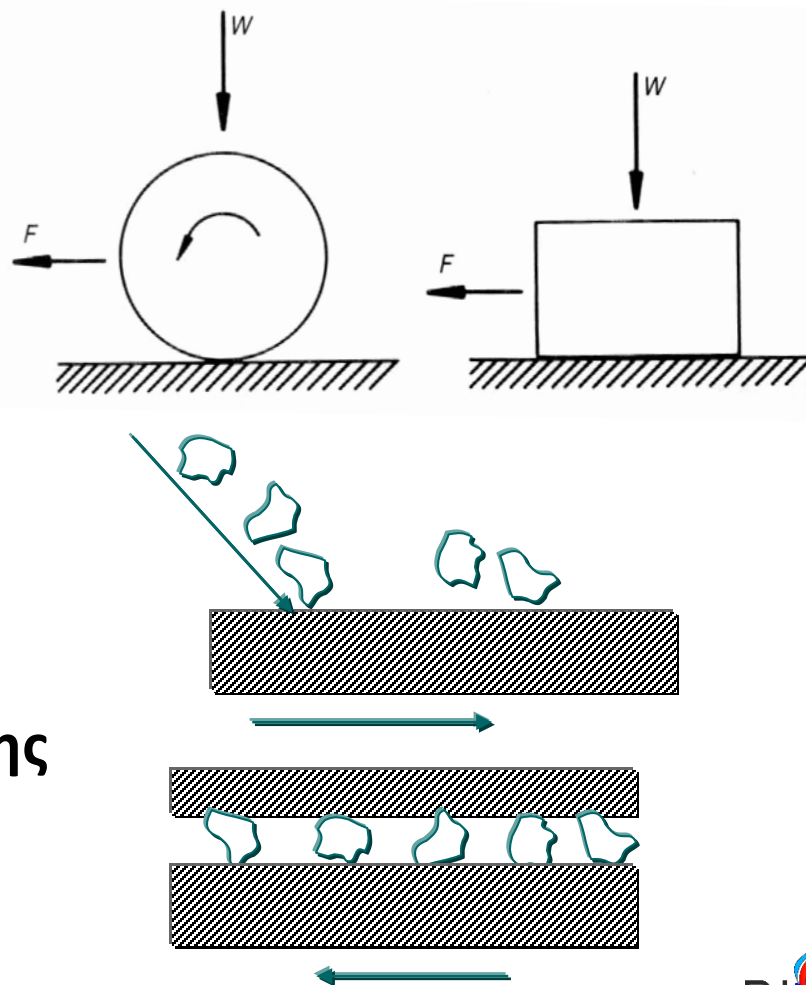
Φθορά λόγω κύλισης

Φθορά λόγω παλινδρόμησης

Φθορά λόγω πρόσκρουσης

Φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης

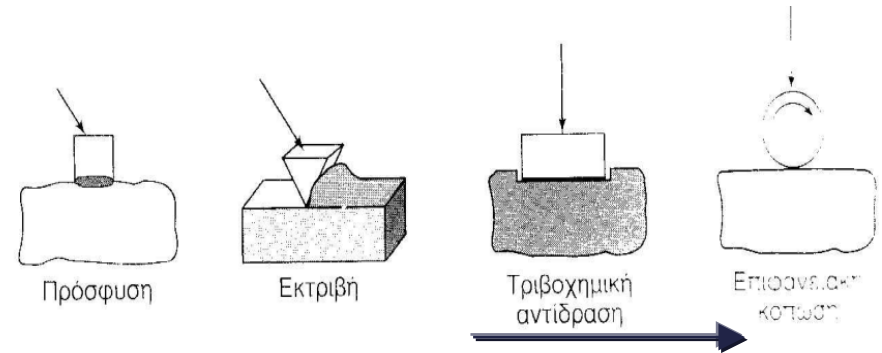
Φθορά λόγω δόνησης



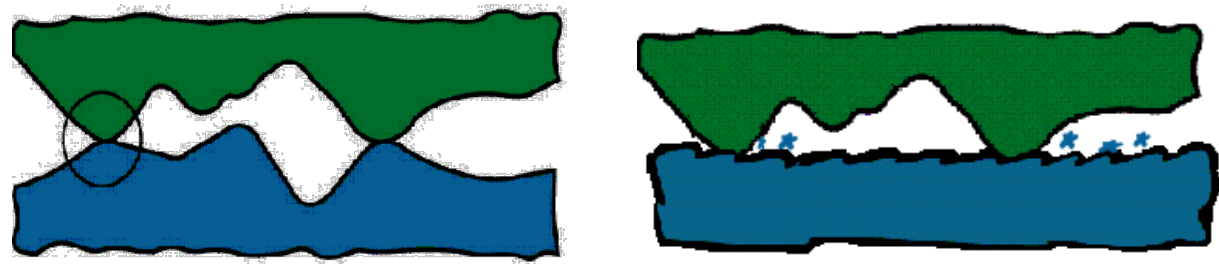
Φ Θ Ο Ρ Α (λόγο τριβής!)

Ανάλογα με το μηχανισμό που υπεισέρχεται στο φαινόμενο της φθοράς

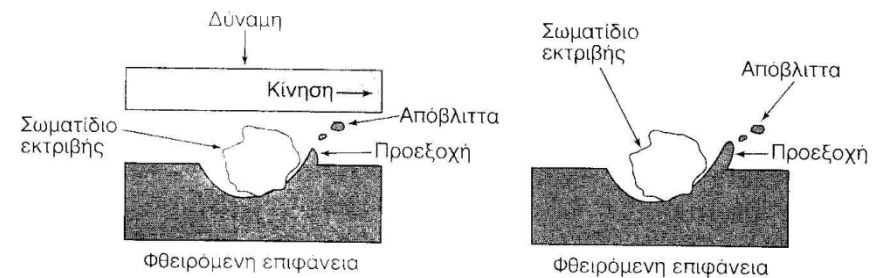
Φθορά λόγω πρόσφυσης



Φθορά λόγω εκτριβής



Λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων

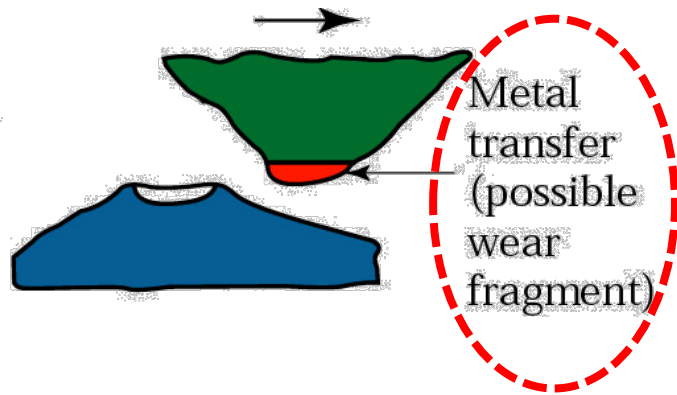


Μηχανισμός της επιφανειακής κόπωσης

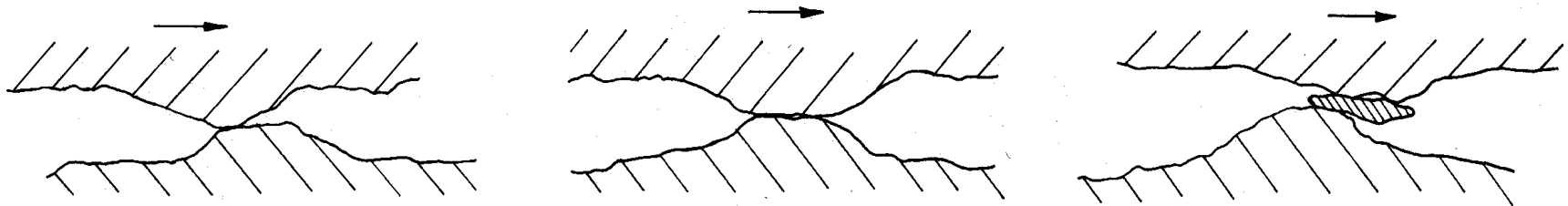
Φ Θ Ο Ρ Α (λόγο τριβής!)

παρατηρείται όταν δύο ομαλές επιφάνειες ολισθαίνουν η μια πάνω στην άλλη, ενώ τμήματα της μιας αποκόβονται και προσφύονται στην άλλη

Λόγο ποιου φαινομένου? Και βάση της αιτιολογίας του, πως μπορούμε να το αποφύγουμε?



μεταξύ των ατόμων στη διεπιφάνεια των δύο υλικών που βρίσκονται σε επαφή εμφανίζονται δυνάμεις πρόσφυσης και αναπτύσσονται χημικοί δεσμοί οι οποίοι καταστρέφονται και επαναδημιουργούνται



Με τον τρόπο αυτό, τμήματα του ενός υλικού μεταφέρονται στο άλλο, και, εν συνεχεία αποβάλλονται συχνά ως παραπροϊόντα της διεργασίας επαφής **(γιατί αποβάλλονται?)**.

ΦΘΟΡΑ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΦΥΣΗΣ

Συντελεστής φθοράς

$$k = \frac{3HV}{Fx}$$

Ν ο όγκος του υλικού που έχει φθαρεί με την εφαρμογή φορτίου **F** κατά την ολίσθηση σε απόσταση **x**

Η η σκληρότητα της φθειρόμενης επιφάνειας
Είναι λογικό να αυξάνει ο k ανάλογα με το Η?

UNLUBRICATED	k	LUBRICATED	k
Mild steel on mild steel	10 ⁻² to 10 ⁻³	52100 steel on 52100 steel	10 ⁻⁷ to 10 ⁻¹⁰
60-40 brass on hardened tool steel	10 ⁻³	Aluminum bronze on hardened steel	10 ⁻⁸
Hardened tool steel on hardened tool steel	10 ⁻⁴	Hardened steel on hardened steel	10 ⁻⁹
Polytetrafluoroethylene (PTFE) on tool steel	10 ⁻⁵		
Tungsten carbide on mild steel	10 ⁻⁶		

- Πρόληψη των φαινομένων πρόσφυσης ➤ μικρά φορτία
- λείες επιφάνειες
- συνεχής λίπανση

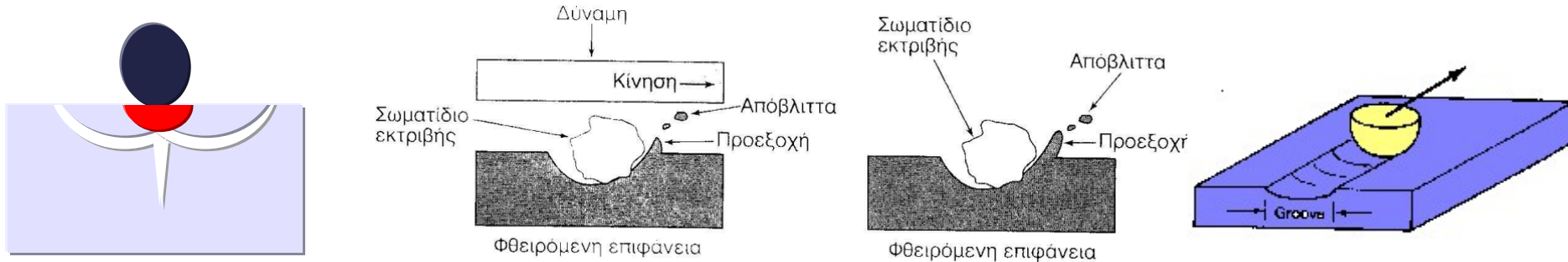
- μηχανικές ιδιότητες
- μικροδομή των υλικών

Αν και οι δύο επιφάνειες έχουν υψηλή σκληρότητα, ο ρυθμός φθοράς είναι χαμηλός

Φ Θ Ο Ρ Α Λ Ο Γ Ω Π Ρ Ο Σ Φ Υ Σ Η Σ

προκαλείται, όταν μια επιφάνεια βρίσκεται σε επαφή με σκληρά σωματίδια, τα οποία αποτελούν είτε το ανταγωνιστικό υλικό είτε τα προϊόντα φθοράς των δύο επιφανειών (π.χ. με χρήση γυαλόχαρτου).

Σε τι είδους παραμόρφωση βασίζεται το φαινόμενο αυτό?



Ο ρυθμός φθοράς λόγω εκτριβής ↓

με τη ↓ του επιβαλλόμενου φορτίου
την ↑ της σκληρότητας του φθειρόμενου υλικού

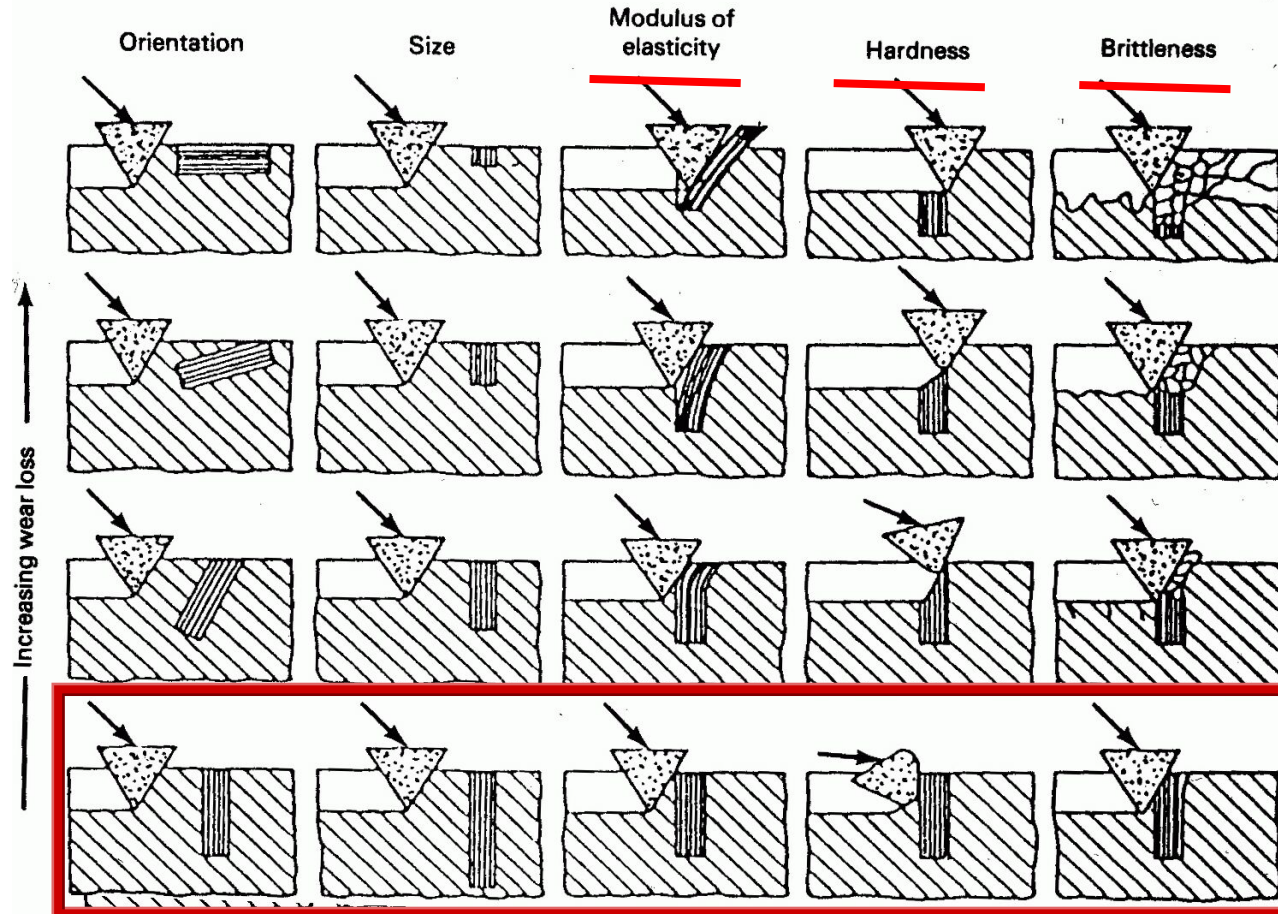
διότι μειώνεται το βάθος προσβολής του υλικού από τα σκληρά σωματίδια

Γενικά, υλικά με υψηλή σκληρότητα, καλή δυσθραυστότητα και υψηλή μηχανική αντοχή εν θερμώ, έχουν και καλή αντοχή σε φθορά λόγω εκτριβής.

- χάλυβες μετά από βαφή και επαναφορά
- οι επιφανειακά σκληρυμένοι χάλυβες
- τα κράματα κοβαλτίου
- cermets
- λευκοί χυτοσίδηροι
- οι σκληρές επιφάνειες από συγκόλληση

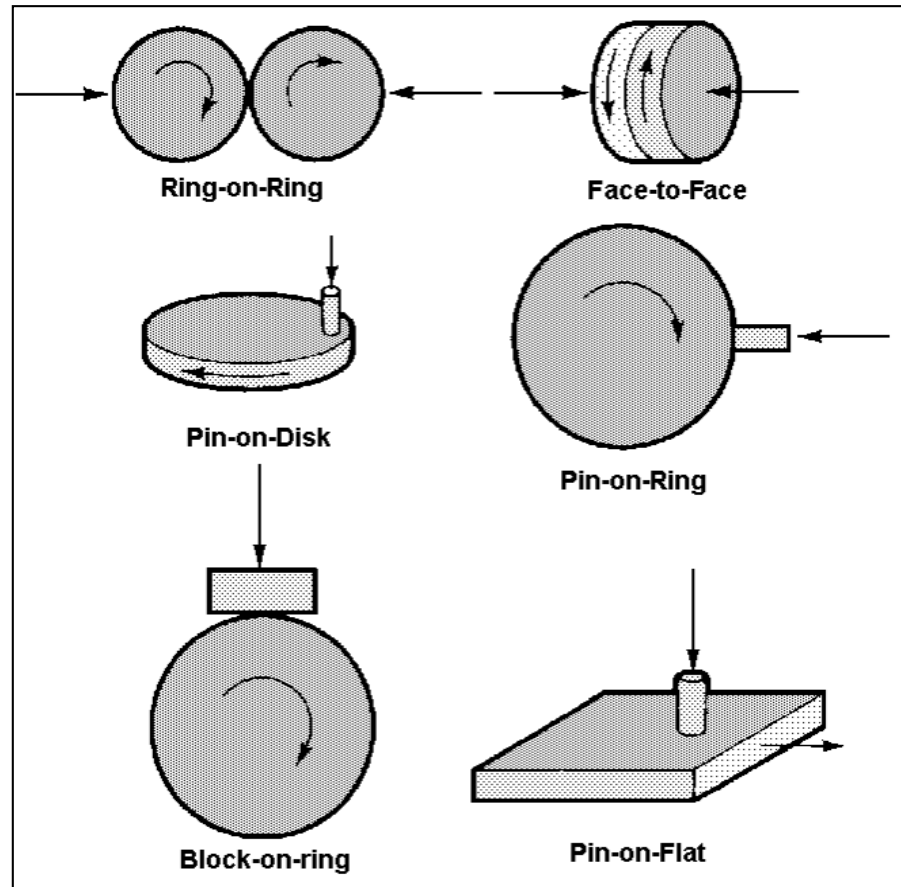
Φ Θ Ο Ρ Α Λ Ο Γ Ω Ε Κ Τ Ρ Ι Β Η Σ

Με τι κατεύθυνση αυξάνονται?



Επίδραση της διεύθυνσης, του μεγέθους, του μέτρου ελαστικότητας, της σκληρότητας και της ψαθυρότητας της δεύτερης φάσης ενός υλικού στο ρυθμό φθοράς.

Φ Θ Ο Ρ Α



Ο συντελεστής τριβής **ΔΕΝ** αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό ενός υλικού, αλλά εξαρτάται απ' όλα τα στοιχεία του τριβοσυστήματος,

Η εμφάνιση της τριβής προκαλεί ενεργειακές απώλειες, που κυρίως μετατρέπονται σε... **τι? Θερμότητα!**

Για να ελαχιστοποιηθούν οι δυνάμεις τριβής η *επιφάνεια του μετάλλου πρέπει να τροποποιηθεί* με τη προσθήκη ενός στρώματος το οποίο μπορεί να

- Προστατεύει ή να ελαττώνει τους επιφανειακούς χημικούς δεσμούς (και να αντέχει τα επιβαλλόμενα φορτία)
- Ολισθαίνει εύκολα και να επιτρέπει τη σχετική κίνηση των επιφανειών
- Μειώνει την θερμοκρασία στην επιφάνεια επαφής

⇒ **Χρήση Λιπαντικών:**

⇒ Περιλαμβάνουν στερεές κόνεις όπως γραφίτης και MoS_2 ή έλαια, συνθετικά υγρά, λίπη, θερμοπλαστικά πολυμερή

Τύποι λίπανσης:  **Υδρολίσθηση!**

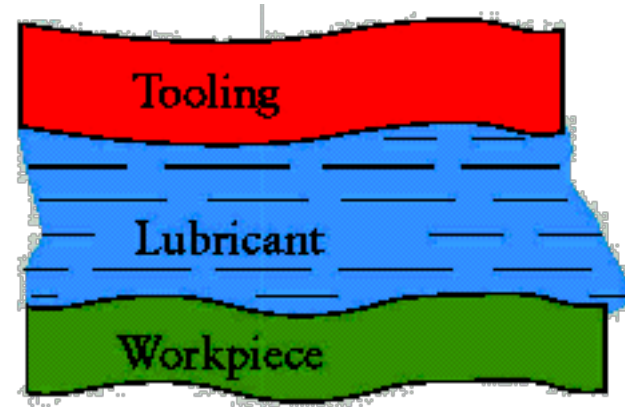
- ◆ Ρευστή Λίπανση: ένα στρώμα υγρού ή αερίου διαχωρίζει πλήρως τις δύο επιφάνειες
- ◆ Boundary Λίπανση: το λιπαντικό απορροφάται από την επιφάνεια και σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα που διαχωρίζει τις δύο επιφάνειες.
- ◆ Mixed mode Λίπανση: ταυτοχρόνως ένα λεπτό στρώμα και ένα στρώμα ρευστού διαχωρίζει τις δύο επιφάνειες.

ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

Τύποι λίπανσης:

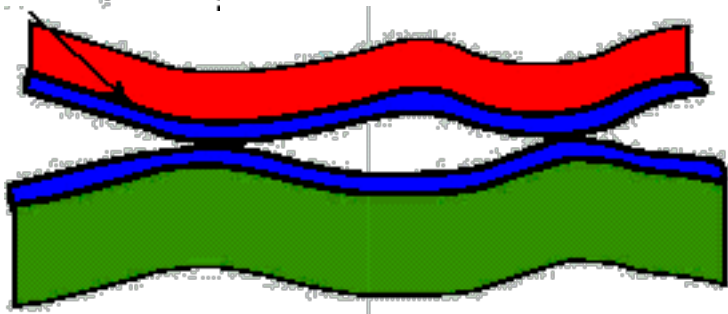
◆ Ρευστή λίπανση: Για να παραμένουν διαχωρισμένες οι δύο επιφάνειες θα πρέπει η πίεση μέσα στο στρώμα λίπανσης να εξισοροπεί το φορτίο που ασκείται στις δύο επιφάνειες.

- **Υδροστατική:** η πίεση του στρώματος λίπανσης παρέχεται από εξωτερική πηγή,
- **Υδροδυναμική:** η πίεση μεταξύ των επιφανειών δημιουργείται ως αποτέλεσμα του σχήματος και της κίνησης των επιφανειών. (εξαρτάται από το ιξώδες του λιπαντικού)



Fluid lubrication

Boundary film



Boundary lubrication

Boundary film



Mixed mode lubrication

Μηχανικές ιδιότητες

- Δυσθραυστότητα
- Σκληρότητα
- Όριο διαρροής και μέτρο ελαστικότητας

Ιδιότητες επιφανείας

- Τραχύτητα
- Διάβρωση - Οξείδωση

Χημική Σύσταση

Συνθήκες λειτουργίας

- | | | |
|---------------|--------------------|-----------------------|
| ■ Θερμοκρασία | ■ Λίπανση | ■ Ανταγωνιστικό υλικό |
| ■ Φορτίο | ■ Χρόνος | |
| ■ Περιβάλλον | ■ Επιφάνεια επαφής | |

ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ

Επιλογή υλικών τριβοσυστήματος για μείωση φθοράς λόγω ολίσθησης:

- Οι συντελεστές φθοράς και τριβής δεν συνδέονται μεταξύ τους, αλλά η χρήση λίπανσης μπορεί να ελαττώσει και τις δύο τιμές.
- Πρέπει να αποφεύγονται επιφάνειες με παρόμοια χημικά χαρακτηριστικά. Χαμηλή ενδο-διαλυτότητα (inter-solubility) βελτιώνει την ποιότητα του τριβολογικού συστήματος (παράδειγμα Al-Fe σε αντίθεση με το Fe-Fe).
- Υψηλή σκληρότητα, συνήθως, είναι ευεργετική.
- Η σκλήρυνση λόγω πλαστικής παραμόρφωσης αποτρέπει την έντονη φθορά. Μια δεδομένη επιφανειακή τραχύτητα είναι προτιμότερη από μια στιλβωμένη επιφάνεια. **Γιατί?**
- Σκληρές επιφάνειες (ενανθράκωση, εναζώτωση, βορίωση,...) βελτιώνουν τη συμπεριφορά έναντι φθοράς.

- Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών** (1^η έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Δ. Τσιπάς, **Σημειώσεις/Διαλέξεις Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών II**. Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010
- W.D. Callister JR, **Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών** (5^η έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2008.
- Τίτλος πρωτότυπου: William D. Callister, JR. **Materials Science and Engineering, an introduction**.
- M. J. Neale (Editor), **The Tribology Handbook**, Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford, Great Britain, 1973
- G. Stachowiak (Editor), **Wear – materials, mechanisms and practice**, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2006
- G.E. Totten, H. Liang (Editors), **Surface Modification and Mechanisms. Friction, Stress, and Reaction Engineering**, Taylor & Francis e-Library, New York, United States America, 2005
- ASM Handbook, **Vol. 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology**, ASM International, Materials Park, OH, 1986