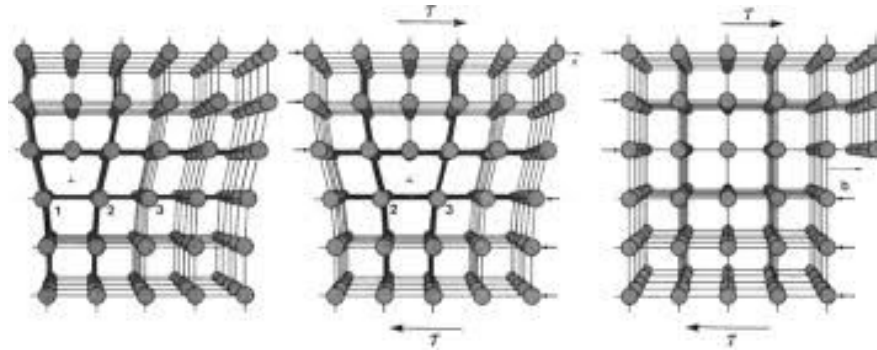


Διαταραχές και Μηχανισμοί Ισχυροποίησης

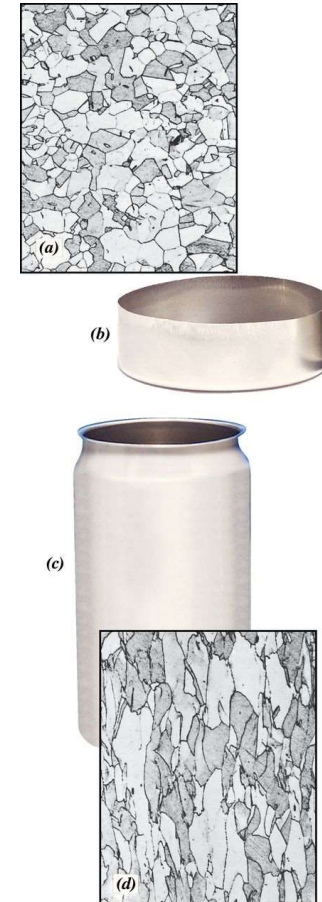


Περιέχει περιεχόμενο και υλικό από τα συγγράμματα:

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

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

- Γιατί το πλήθος των διαταραχών είναι μεγαλύτερο στα μέταλλα;
- Πώς σχετίζεται η αντοχή των υλικών με την κίνηση των διαταραχών;
- Γιατί η θερμότητα μεταβάλλει την αντοχή και άλλες ιδιότητες των υλικών;



The photomicrographs in figures (a) and (d) are taken from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. 1, Structure, John Wiley & Sons, 1964. Reproduced with permission of Janet M. Moffatt. Figures (b) and (c) © William D. Callister, Jr.

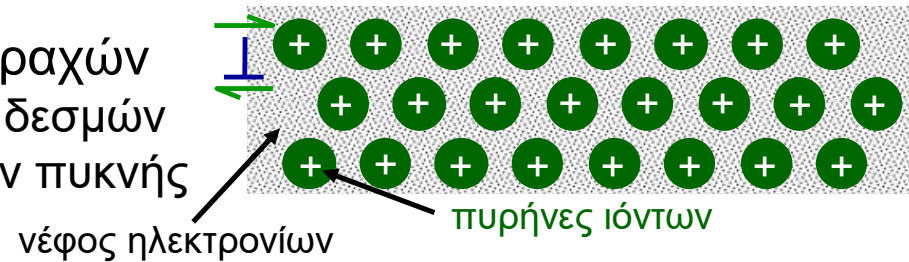
ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ

Διαταραχές & κατηγορίες υλικών

- Μέταλλα (Cu, Al):

Ευκολότερη κίνηση διαταραχών

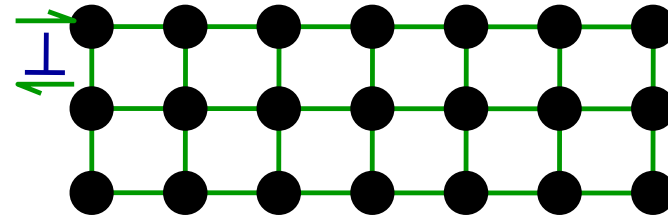
- ύπαρξη μη-κατευθυντικών δεσμών
- διαθεσιμότητα διευθύνσεων πυκνής διάταξης για ολίσθηση



- Κεραμικά (ομοιοπολ. δεσμοί)

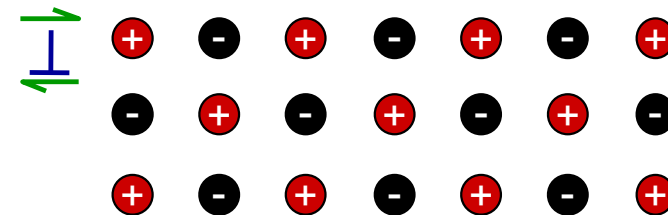
(Si, διαμάντι):

- δύσκολη κίνηση
- κατευθυντικοί δεσμοί



- Κεραμικά (ιοντικοί δεσμοί NaCl):

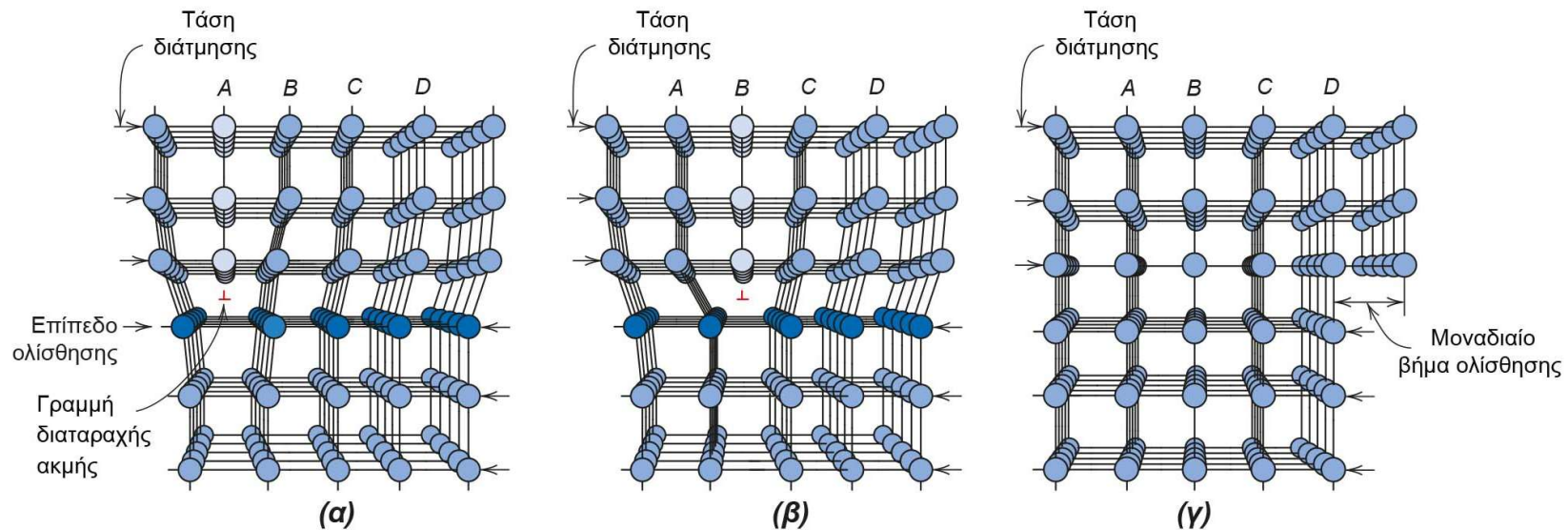
- δύσκολη κίνηση
- απαιτείται αποφυγή πλησιέστερων γειτόνων ίδιου φορτίου (-, +)



Κίνηση διαταραχών

Πλαστική παραμόρφωση: Κίνηση μεγάλου αριθμού διαταραχών

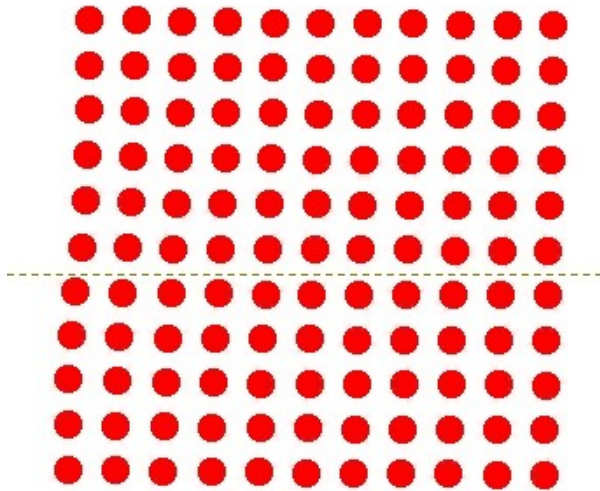
- Μέταλλα – πλαστική παραμόρφωση συμβαίνει λόγω **ολίσθησης** – μία διαταραχή ακμής (πρόσθετο ημιεπίπεδο ατόμων) μετακινείται, ολισθαίνοντας, σε παρακείμενα ημιεπίπεδα ατόμων.



- Εάν δεν υπάρχει δυνατότητα μετακίνησης των διαταραχών, δεν συμβαίνει πλαστική παραμόρφωση!

Κίνηση διαταραχών ακμής

- Η μετακίνηση διαταραχών συνίσταται στη διαδοχική “ώθηση” ενός ημιεπιπέδου ατόμων (από αριστερά προς τα δεξιά στο σχήμα).
- Στα διαδοχικά ολισθαίνοντα επίπεδα, οι δεσμοί “σπάνε” και αναδημιουργούνται.

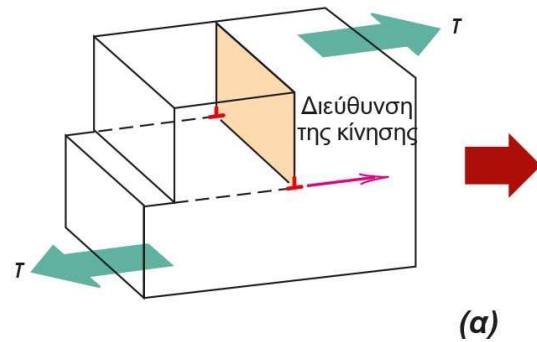


Σχηματική αναπαράσταση, σε επίπεδο ατόμων, της μετακίνησης μιας διαταραχής ακμής από αριστερά προς τα δεξιά υπό την επίδραση διάτμησης.

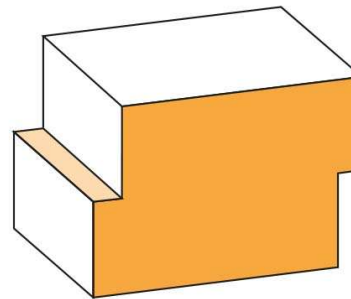
(Πηγή: P.M. Anderson)

Κίνηση διαταραχών

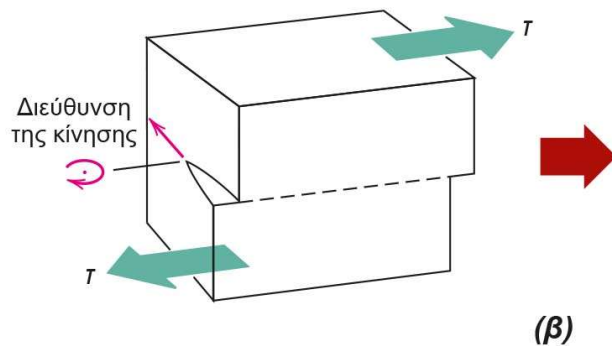
- Μία διαταραχή μετακινείται κατά μήκος ενός **επιπέδου ολίσθησης**, σε **διεύθυνση ολίσθησης** κάθετη προς τη γραμμή της διαταραχής
- Η διεύθυνση ολίσθησης είναι ίδια με τη διεύθυνση του **διανύσματος Burgers**



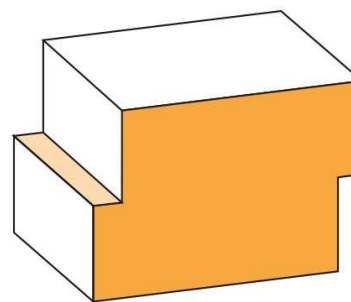
(α)



Διαταραχή ακμής



(β)

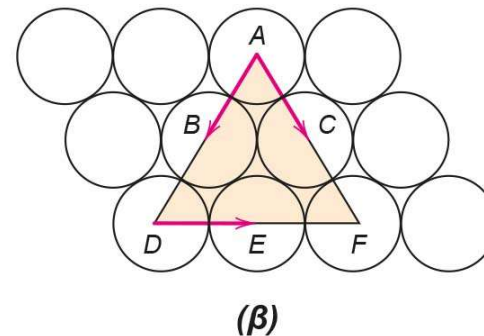
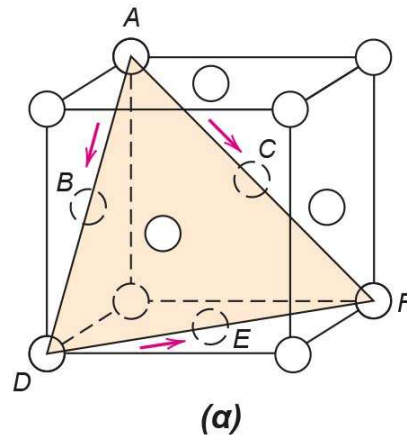


Ελικοειδής διαταραχή

Μηχανισμοί παραμόρφωσης

Σύστημα ολίσθησης

- **Επίπεδο ολίσθησης** - επίπεδο στο οποίο συμβαίνει ευκολότερα ολίσθηση
 - Μέγιστες επίπεδες πυκνότητες (και μεγάλες αποστάσεις μεταξύ επιπέδων)
- **Διευθύνσεις ολίσθησης** - διευθύνσεις κίνησης
 - Μέγιστες γραμμικές πυκνότητες

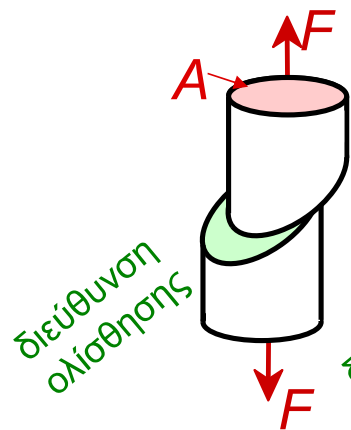


- Δομή FCC: Ολίσθηση συμβαίνει σε κρυσταλλογραφικά επίπεδα $\{111\}$, στις διευθύνσεις $\langle 110 \rangle$ (αμφότερα πυκνής διάταξης)
 - => συνολικά 12 συστήματα ολίσθησης σε κρυστάλλους FCC
- Δομές BCC & HCP: υπάρχουν άλλα συστήματα ολίσθησης

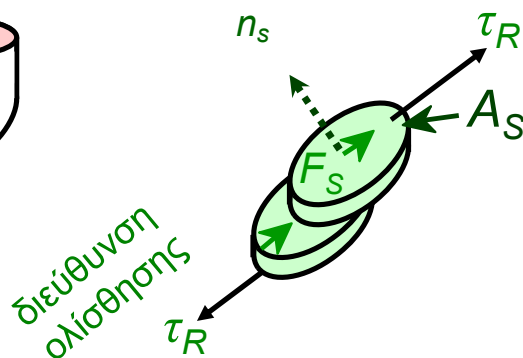
Τάση και κίνηση διαταραχών

- Ανηγμένη διατμητική τάση, τ_R
 - προκύπτει από εφαρμοζόμενες εφελκυστικές τάσεις

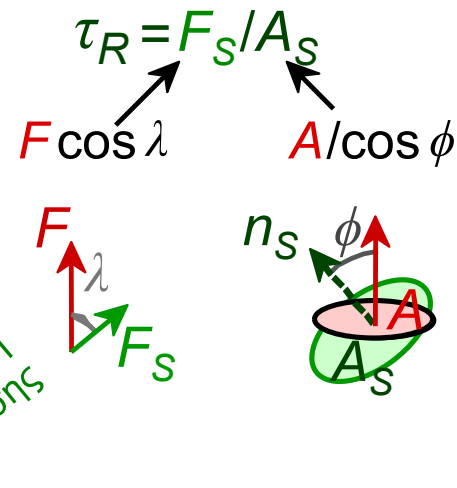
Εφαρμοζόμενη
εφελκυστική
τάση: $\sigma = F/A$



Ανηγμένη διατμ.
τάση: $\tau_R = F_S/A_S$



Σχέση μεταξύ
 σ και τ_R



$$\tau_R = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$

Κρίσιμη ανηγμένη διατμητική τάση

- Συνθήκη για κίνηση διαταραχών:
- Η ευκολία κίνησης διαταραχών εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό

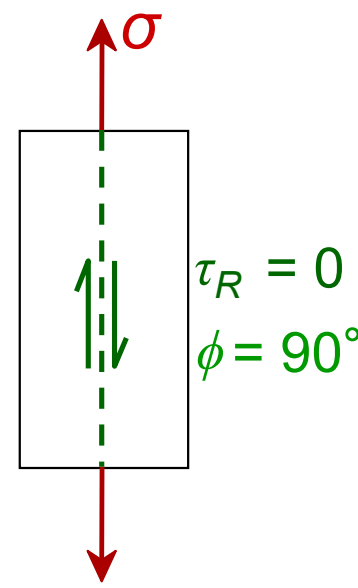
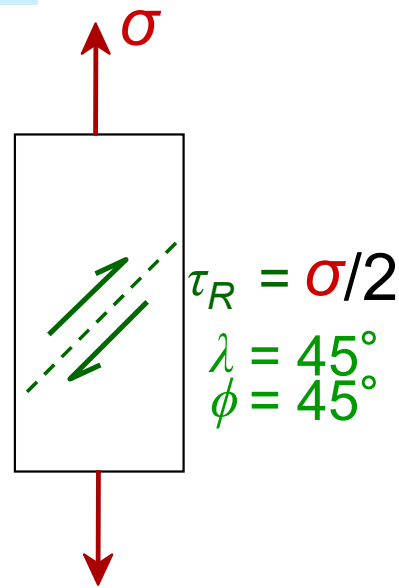
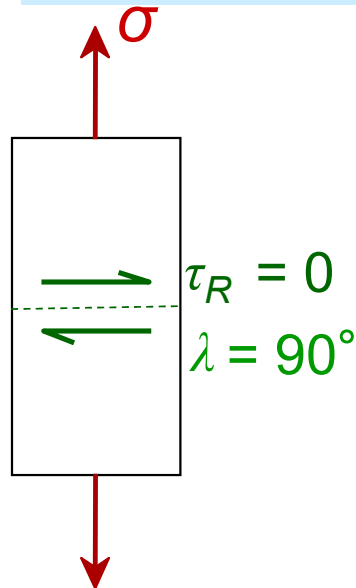
κρίσιμη αναλυμένη
διατμητική τάση
(critical resolved
shear stress)

$$\tau_R > \tau_{CRSS}$$

↑
ΤΥΠΙΚΑ

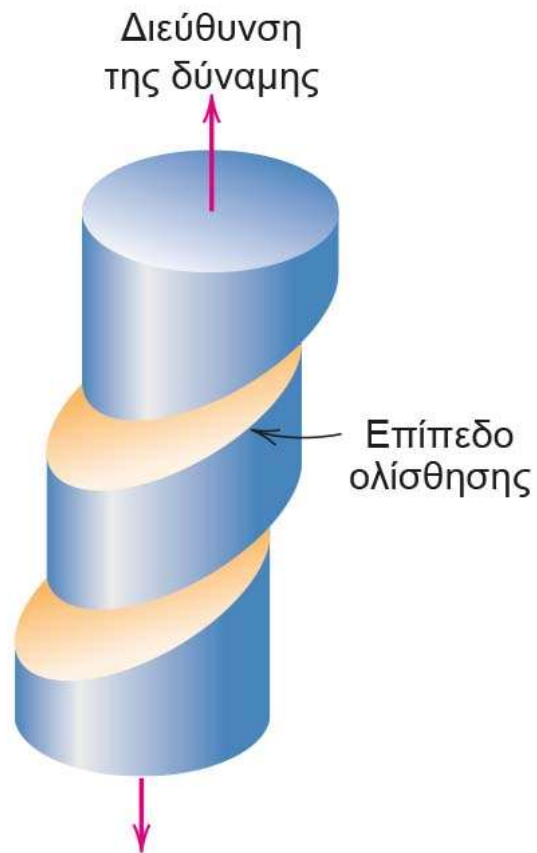
10^{-4} GPa έως 10^{-2} GPa

$$\tau_R = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$

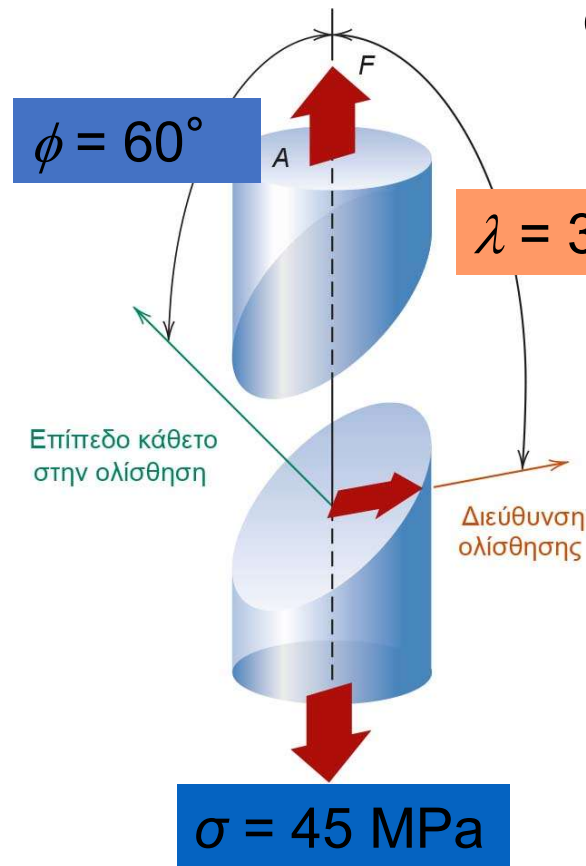


τ μέγιστη σε $\lambda = \phi = 45^\circ$

Ολίσθηση σε μονοκρυστάλλους



Παράδειγμα: Παραμόρφωση μονοκρυστάλλου



- α) Θα υποστεί διαρροή ο μονοκρύσταλλος;
β) Εάν όχι, πόση τάση απαιτείται;

$$\tau_{\text{crss}} = 20.7 \text{ MPa}$$

$$\tau = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$

$$\sigma = 45 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \tau &= (45 \text{ MPa}) (\cos 35^\circ) (\cos 60^\circ) \\ &= (45 \text{ MPa}) (0.41) \end{aligned}$$

$$\tau = 18.4 \text{ MPa} < \tau_{\text{crss}} = 20.7 \text{ MPa}$$

Επομένως, εφαρμοζόμενη τάση 45 MPa δεν προκαλεί διαρροή στον κρύσταλλο.

Παράδειγμα: Παραμόρφωση μονοκρυστάλλου

Πόση τάση απαιτείται (δηλ., πόση είναι η τάση διαρροής, σ_y);

$$\tau_{\text{crss}} = 20.7 \text{ MPa} = \sigma_y \cos \lambda \cos \phi = \sigma_y (0.41)$$

$$\therefore \sigma_y = \frac{\tau_{\text{crss}}}{\cos \lambda \cos \phi} = \frac{20.7 \text{ MPa}}{0.41} = \underline{\underline{50.5 \text{ MPa}}}$$

Επομένως, για να συμβεί παραμόρφωση, η εφαρμοζόμενη τάση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από, ή ίση με την τάση διαρροής

$$\sigma \geq \sigma_y = 50.5 \text{ MPa}$$

Ολίσθηση σε πολυκρυσταλλικά υλικά

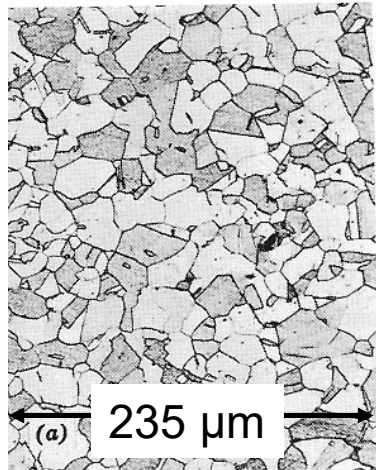
- Τα πολυκρυσταλλικά υλικά είναι ανθεκτικότερα από τα μονοκρυσταλλικά – τα όρια κόκκων παρεμποδίζουν την κίνηση των διαταραχών.
- Διαφοροποίηση επιπέδων & διευθύνσεων ολίσθησης (λ , ϕ) μεταξύ των κόκκων.
- Μεταβολή της τ_R μεταξύ των κόκκων.
- Διαρροή υφίστανται πρώτα οι κόκκοι με τη μεγαλύτερη τ_R .
- Διαρροή επέρχεται αργότερα για κόκκους με λιγότερο ευνοϊκό προσανατολισμό.



Ανισοτροπία χαρακτηριστικών: σ_y

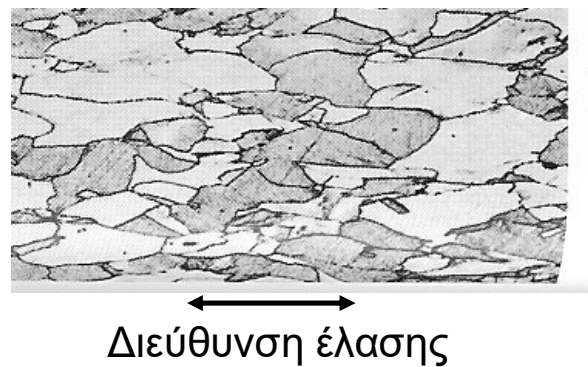
- Μπορεί να προκληθεί από έλαση πολυκρυσταλλικού μετάλλου

- προ έλασης



- ισότροπη
επειδή οι κόκκοι
είναι ισοαξονικοί
& τυχαίου
προσανατολισμού

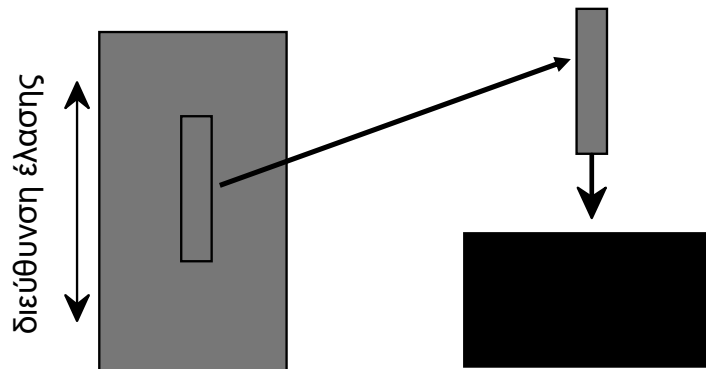
- μετά από έλαση



- ανισότροπη
επειδή η έλαση επηρεάζει
προσανατολισμό & σχήμα
κόκκων.

Ανισοτροπία χαρακτηριστικών: Παραμόρφωση

1. Κυλινδρικό
βλήμα, κοπή
από έλασμα
τανταλίου:

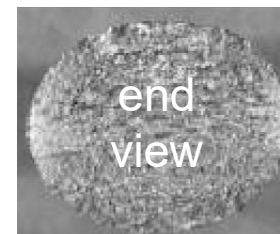


2. Εκτόξευση
βλήματος
σε στόχο.

3. Παραμόρφωση
κυλινδρικού σχήματος



ΦΩΤΟ: Πηγή:
G.T. Gray III, Los
Alamos National Labs.
Χρησιμοποιείται με
άδεια.



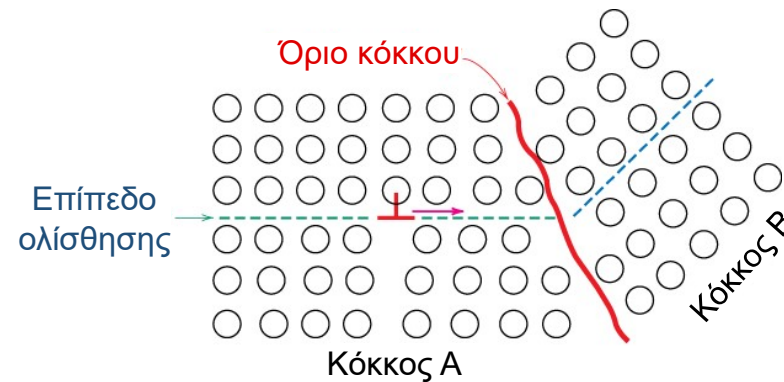
διεύθυνση
πάχους
ελάσματος

- Το μη-κυκλικό σχήμα του άκρου πρόσκρουσης υποδεικνύει ανισότροπη παραμόρφωση του υλικού.

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στρατηγικές ισχυροποίησης, 1: Μείωση μεγέθους κόκκων

- Τα όρια κόκκων λειτουργούν ως εμπόδια για την ολίσθηση.
- Η "ισχύς" των εμποδίων αυξάνεται αυξανόμενης της διαφοράς προσανατολισμού.
- Μικρότερο μέγεθος κόκκων: περισσότερα εμπόδια για την ολίσθηση.

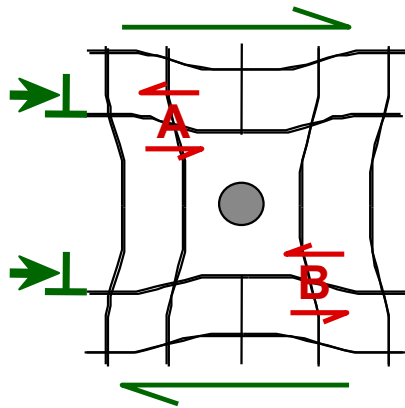


- Εξίσωση Hall-Petch:

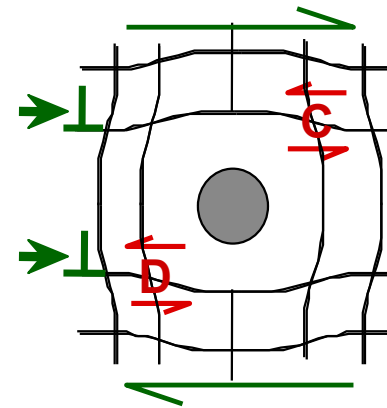
$$\sigma_{yield} = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

Στρατηγικές ισχυροποίησης, 2: Δημιουργία στερεών διαλυμάτων

- Τα άτομα πρόσμειξης ασκούν εφελκυστικές ή θλιπτικές τάσεις στα γειτονικά τους & εισάγουν παραμορφώσεις στο πλέγμα.
- Αυτές οι παραμορφώσεις λειτουργούν ως εμπόδια στην κίνηση των διαταραχών.
- Μικρότερο άτομο πρόσμειξης (αντικατάστασης)
- Μεγαλύτερο άτομο πρόσμειξης (αντικατάστασης)

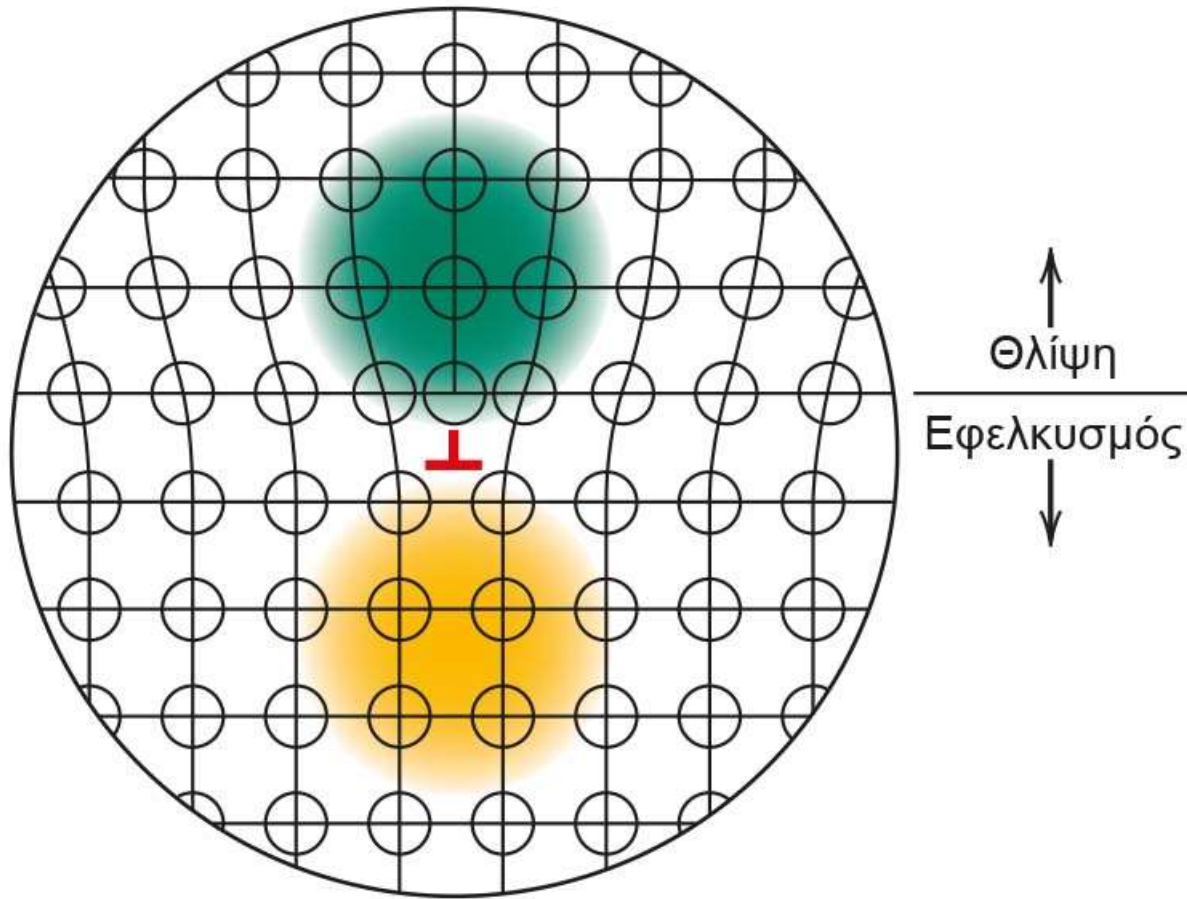


Το άτομο πρόσμειξης προκαλεί τοπική τάση στα **A** και **B** η οποία αντενεργεί στην κίνηση των διαταραχών προς τα δεξιά.



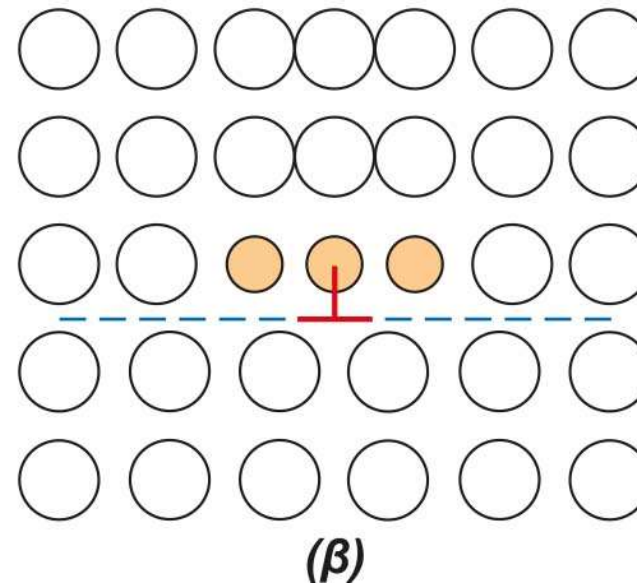
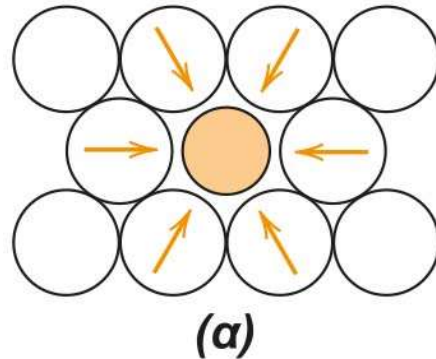
Το άτομο πρόσμειξης προκαλεί τοπική τάση στα **C** και **D** η οποία αντενεργεί στην κίνηση των διαταραχών προς τα δεξιά.

Παραμόρφωση του πλέγματος γύρω από τις διαταραχές



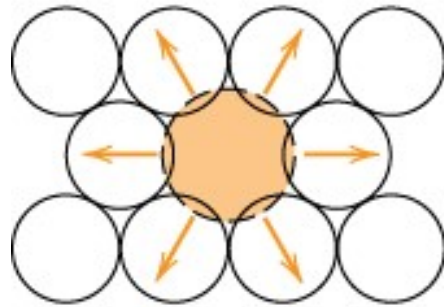
Ισχυροποίηση μέσω κραμάτωσης (στερεά διαλύματα)

- Μικρά άτομα πρόσμειξης τείνουν να συγκεντρώνονται στις διαταραχές (περιοχές θλιπτικής παραμόρφωσης)
 - μερική ακύρωση των θλιπτικών παραμορφώσεων από τις διαταραχές και των εφελκυστικών παραμορφώσεων από τα άτομα πρόσμειξης
- Μείωση της ευκινησίας των διαταραχών και αύξηση αντοχής

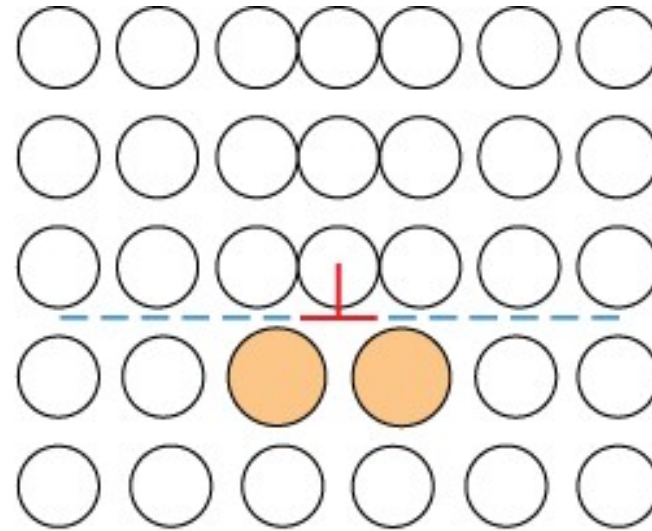


Ισχυροποίηση μέσω κραμάτωσης (στερεά διαλύματα)

- Μεγάλα άτομα πρόσμειξης τείνουν να συγκεντρώνονται στις διαταραχές (περιοχές εφελκυστικής παραμόρφωσης)



(α)



(β)

Ισχυροποίηση στερεού διαλύματος (προσομοίωση στο VMSE)

[Main Menu](#)

Solid-Solution Strengthening

[Help](#)

This module allows you to observe the mechanism of solid solution strengthening by viewing animations, which are accompanied with voice-overs.

Pure

Larger

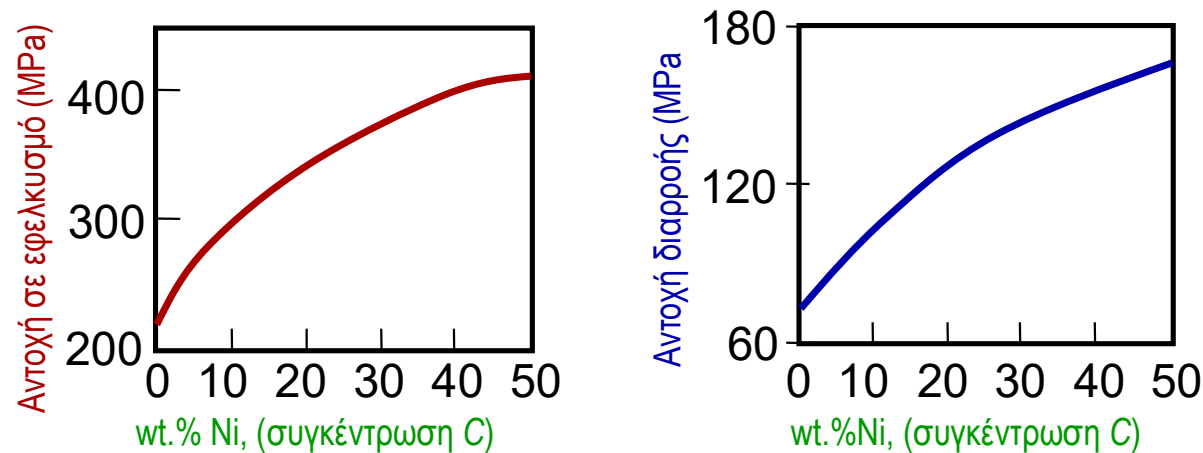
Smaller

Interstitial

Please be patient. This may take a few minutes to load depending on your connection speed.

Παράδειγμα: Ισχυροποίηση χαλκού με κραμάτωση

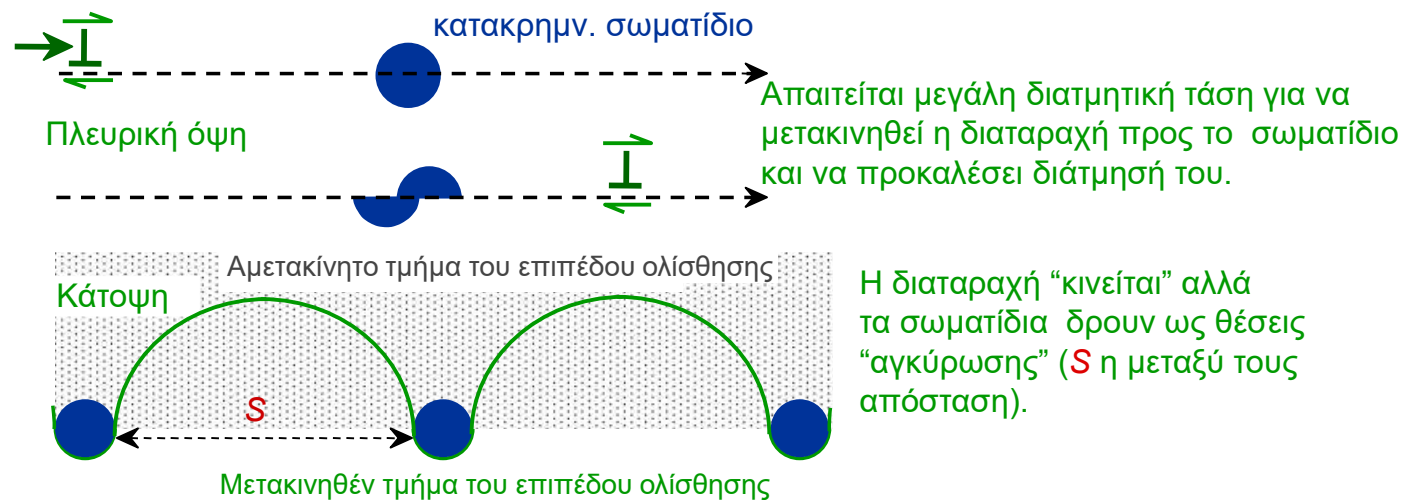
- Η αντοχή σε εφελκυσμό και η αντοχή διαρροής αυξάνονται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε Ni.



- Εμπειρική σχέση: $\sigma_y \sim C^{1/2}$
- Η κραμάτωση αυξάνει τα σ_y και TS .

Στρατηγικές ισχυροποίησης, 3: Σκλήρυνση με κατακρήμνιση

- Ανάπτυξη κατακρημνισμένων σωματιδίων από υλικό μεγάλης σκληρότητας (π.χ. κεραμικό) καθιστά δύσκολη τη διάτμηση. Π.χ.: Καρβίδιο πυριτίου (SiC) σε σίδηρο ή αλουμίνιο.



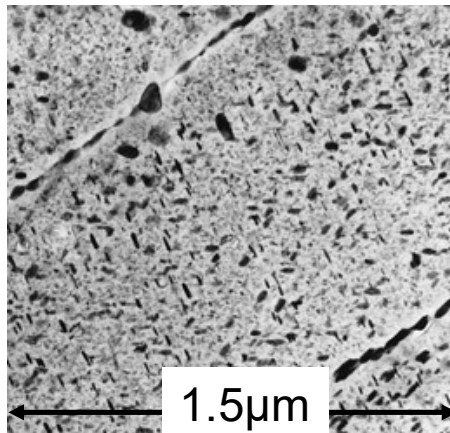
- Αποτέλεσμα: $\sigma_y \sim \frac{1}{S}$

Εφαρμογή: Σκλήρυνση με κατακρήμνιση

- Κύρια πτέρυγα αεροσκαφών Boeing 767



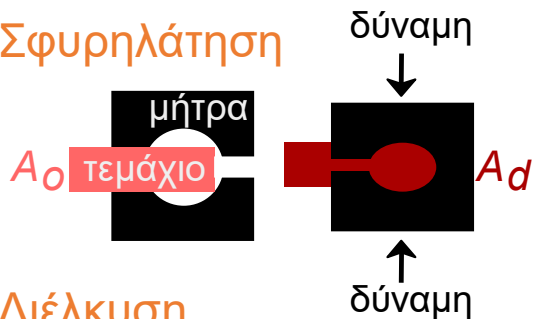
- Η εσωτερική δομή του αλουμινίου ισχυροποιείται με σωματίδια (κατακρημνίσματα), τα οποία σχηματίζονται με κραμάτωση.



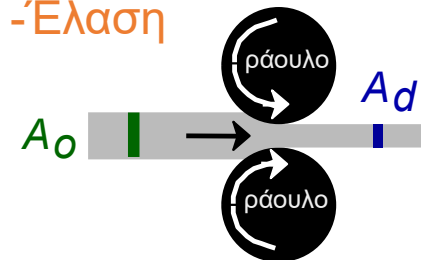
Στρατηγικές ισχυροποίησης, 4: Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση (ψυχρηλασία)

- Πλαστική παραμόρφωση σε θερμοκρασία δωματίου (για τα περισσότερα μέταλλα).
- Τυπικές κατεργασίες μορφοποίησης μειώνουν την επιφάνεια διατομής του κατεργαζόμενου τεμαχίου:

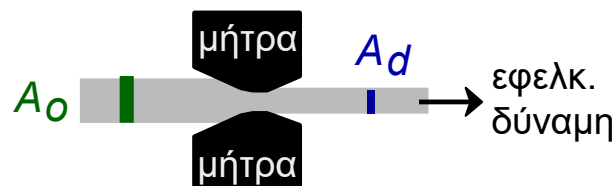
-Σφυρηλάτηση



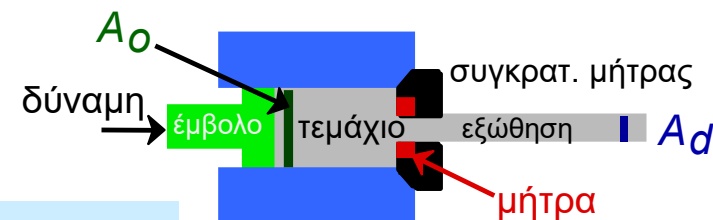
-Έλαση



-Διέλκυση



-Εξώθηση

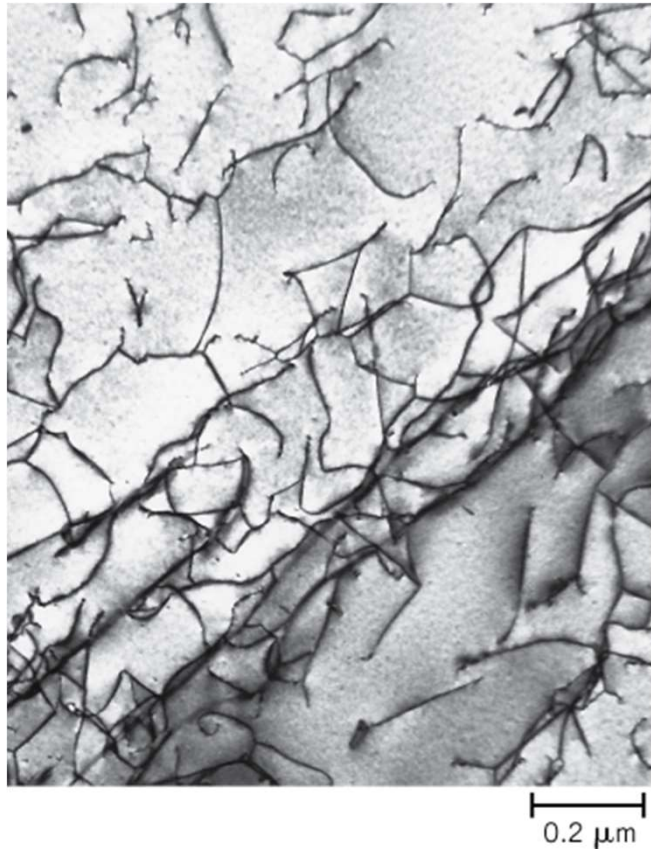


- Βαθμός ψυχρηλασίας:

$$\%CW = \frac{A_o - A_d}{A_o} \times 100$$

Ψυξηλασία και μεταβολή της δομής των διαταραχών

- Δομή διαταραχών σε εν ψυχρώ κατεργασμένο τεμάχιο Ti.



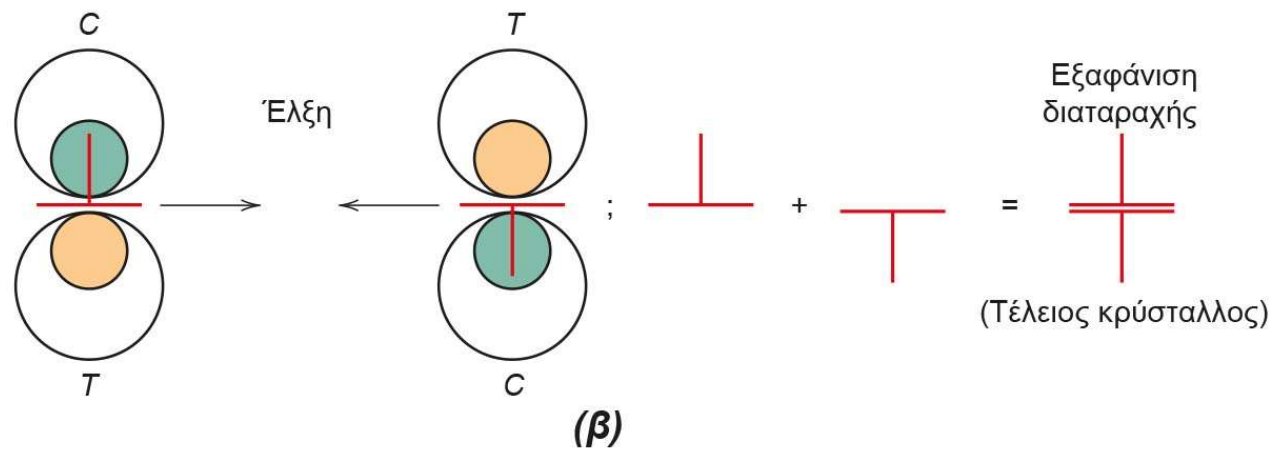
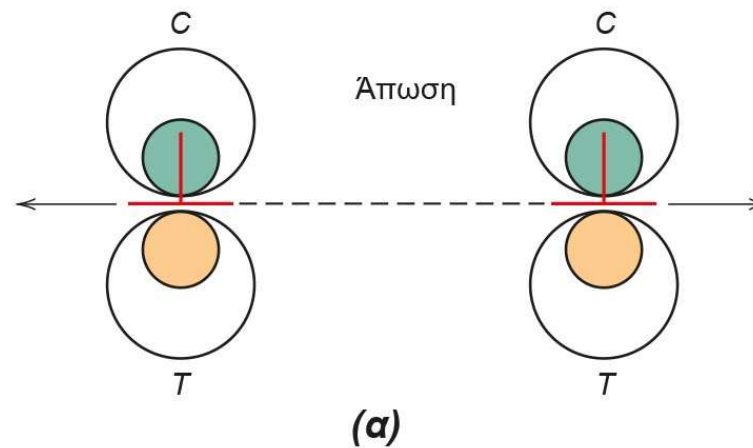
- Η ψυξηλασία οδηγεί σε “διεμπλοκή” των διαταραχών.
- Η κίνηση των διαταραχών καθίσταται πιο δύσκολη.

Ψυχρηλασία και πυκνότητα διαταραχών

$$\text{Πυκνότητα διαταραχών} = \frac{\text{ολικό μήκος διαταραχής}}{\text{μοναδιαίος όγκος}}$$

- Μονοκρύσταλλοι από ελεγχόμενη ανάπτυξη
→ περίπου 10^3 mm^{-2}
 - Εφαρμογή παραμόρφωσης => αύξηση πυκνότητας διαταραχών
→ $10^9\text{-}10^{10} \text{ mm}^{-2}$
 - Θερμική κατεργασία => μείωση πυκνότητας διαταραχών
→ $10^5\text{-}10^6 \text{ mm}^{-2}$
- Η τάση διαρροής αυξάνεται αυξανόμενης της ρ_d :

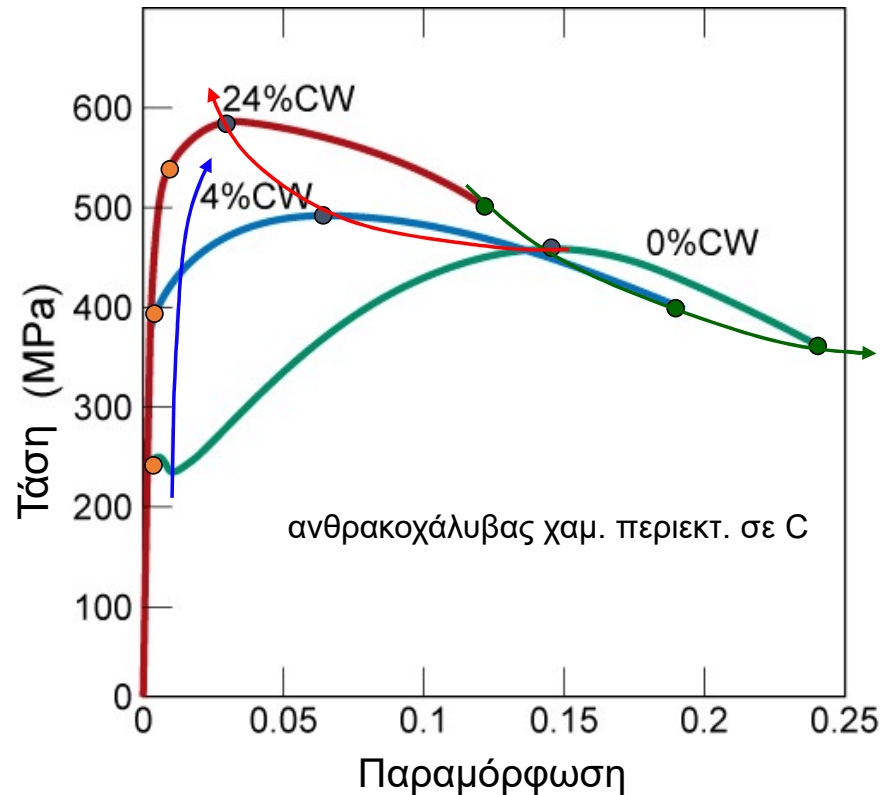
Αλληλεπιδράσεις μεταξύ πλεγματικών διαταραχών



Επιδράσεις της ψυξηλασίας

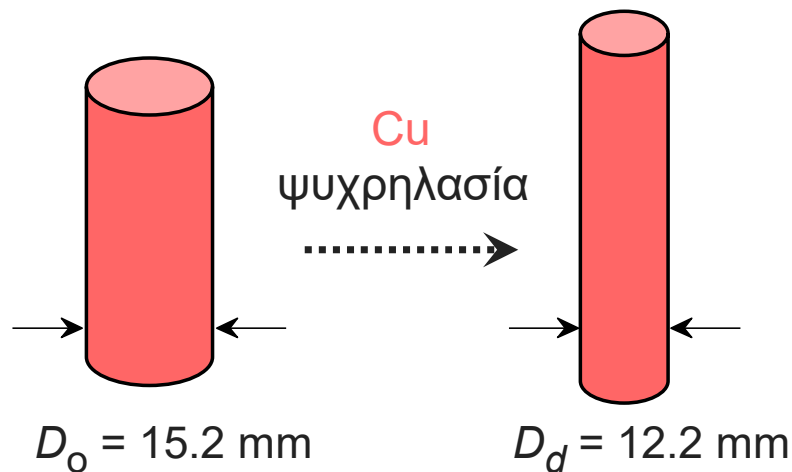
Αυξανόμενου του βαθμού ψυξηλασίας...

- αυξάνεται η αντοχή διαρροής (σ_y)
- αυξάνεται η αντοχή σε εφελκυσμό (TS)
- μειώνεται η ολκιμότητα ($\%EL$ ή $\%RA$)



Ψυξηλασία και μεταβολή μηχανικών ιδιοτήτων

- Πώς διαμορφώνονται, μετά από ψυξηλασία, οι τιμές αντοχής σε διαρροή και σε εφελκυσμό, καθώς και η ολκιμότητα, του καθαρού χαλκού;

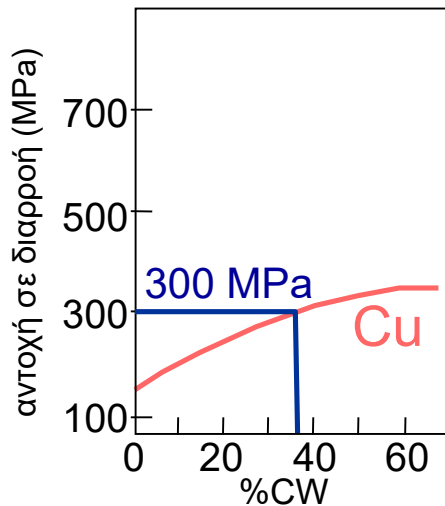


$$\begin{aligned}\%CW &= \frac{\frac{\pi D_o^2}{4} - \frac{\pi D_d^2}{4}}{\frac{\pi D_o^2}{4}} \times 100 \\ &= \frac{D_o^2 - D_d^2}{D_o^2} \times 100\end{aligned}$$

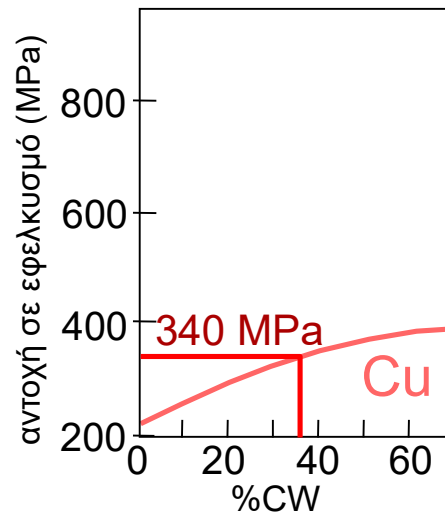
$$\%CW = \frac{(15.2 \text{ mm})^2 - (12.2 \text{ mm})^2}{(15.2 \text{ mm})^2} \times 100 = 35.6\%$$

Ψυξηλασία και μεταβολή μηχανικών ιδιοτήτων

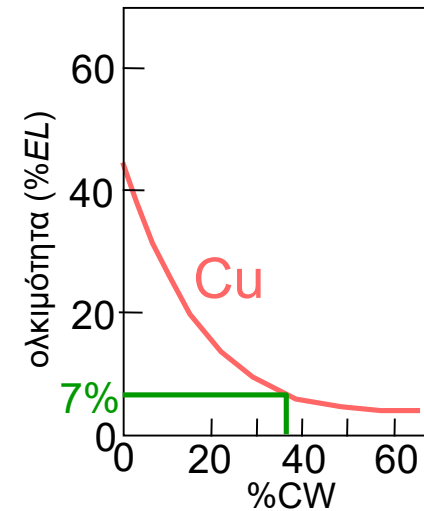
- Πώς διαμορφώνονται, μετά από ψυξηλασία, οι τιμές αντοχής σε διαρροή και σε εφελκυσμό, καθώς και η ολκιμότητα, του χαλκού με %CW = 35.6%;



$$\sigma_y = 300 \text{ MPa}$$



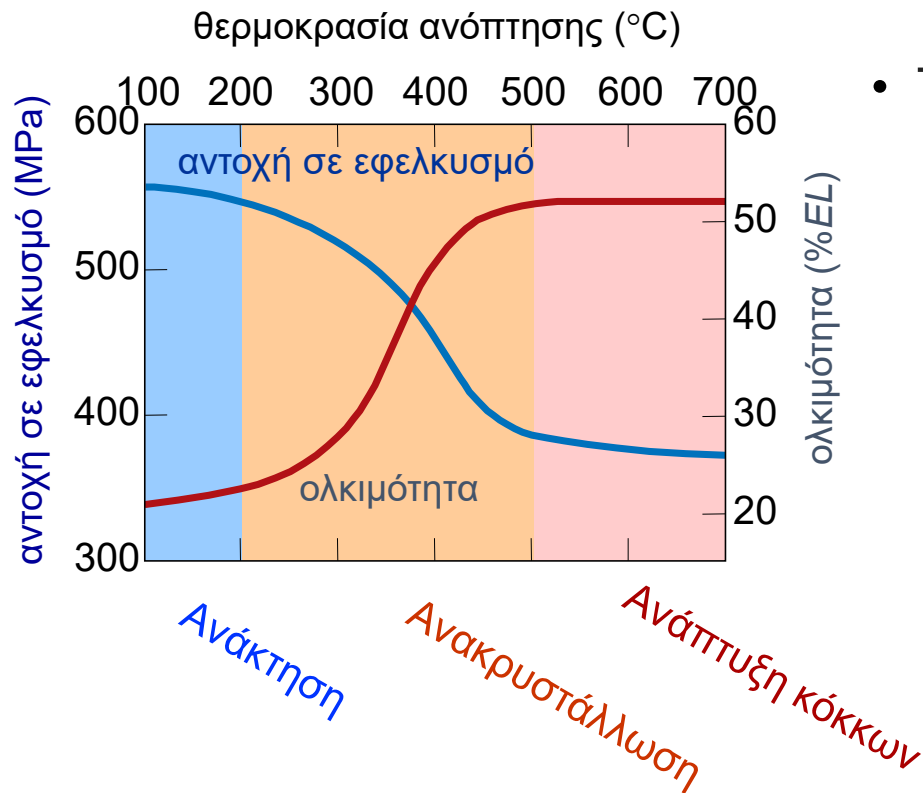
$$TS = 340 \text{ MPa}$$



$$\%EL = 7\%$$

Ανόπτηση και επιδράσεις της

- **Ανόπτηση**: Θερμική επεξεργασία μετά την ψυξηλασία ενός κράματος.
- 1 ώρα επεξεργασίας σε $T_{\text{ανόπτησης}}$...
μειώνει την TS και αυξάνει το % EL .
- Μείωση ή εξάλειψη των επιδράσεων της ψυξηλασίας!



- Τα 3 Στάδια της Ανόπτησης:

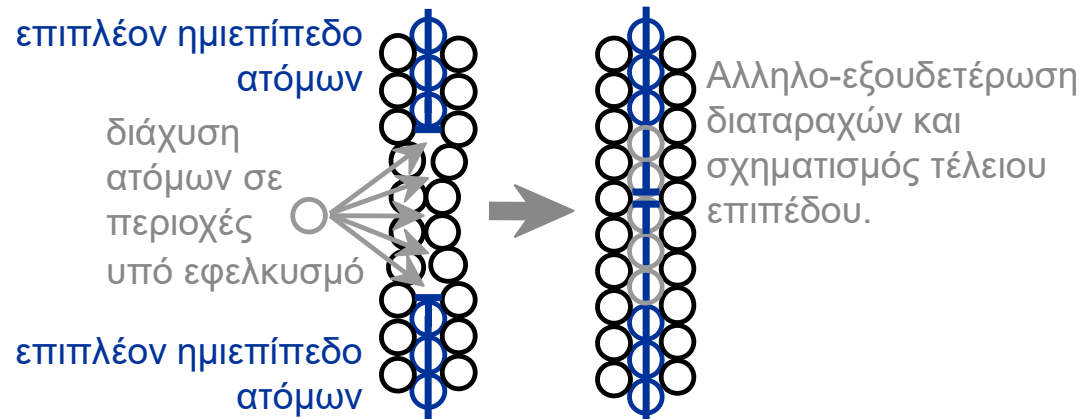
1. Ανάκτηση
2. Ανακρυστάλλωση
3. Ανάπτυξη κόκκων

Τα 3 Στάδια της Ανόπτησης:

1. Ανάκτηση

Μείωση της πυκνότητας διαταραχών μέσω εξουδετέρωσής τους.

- Σενάριο 1
Προκύπτει
από διάχυση



- Σενάριο 2

3. Οι “ανερχόμενες” διαταραχές μπορούν να μεταφερθούν σε νέο επίπεδο ολίσθησης.

2. Διάχυση πλεγματικών κενών => τα (γκρίζα) άτομα εκτοπίζονται, οι διαταραχές μπορούν να “ανέλθουν”.

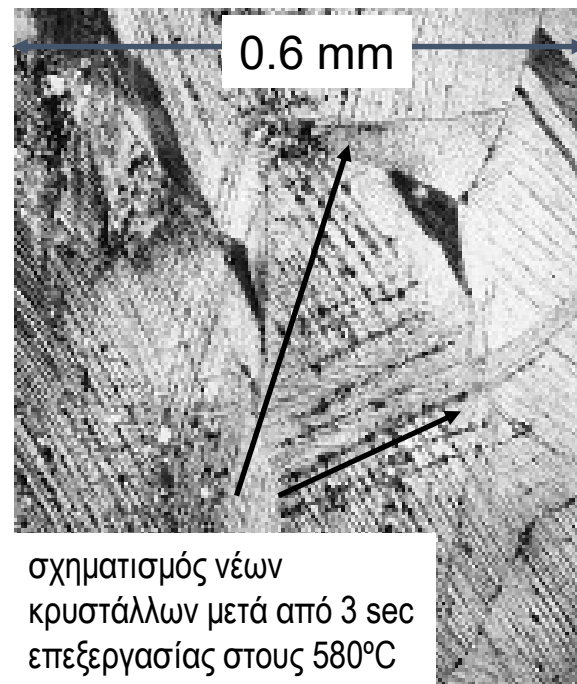
1. Μπλοκάρισμα διαταραχής – δεν μπορεί να μετακινηθεί προς τα δεξιά.



Τα 3 Στάδια της Ανόπτησης:

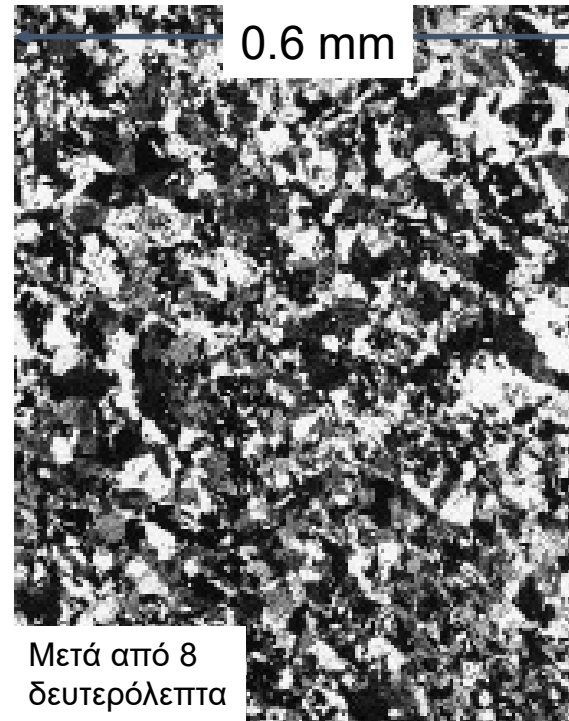
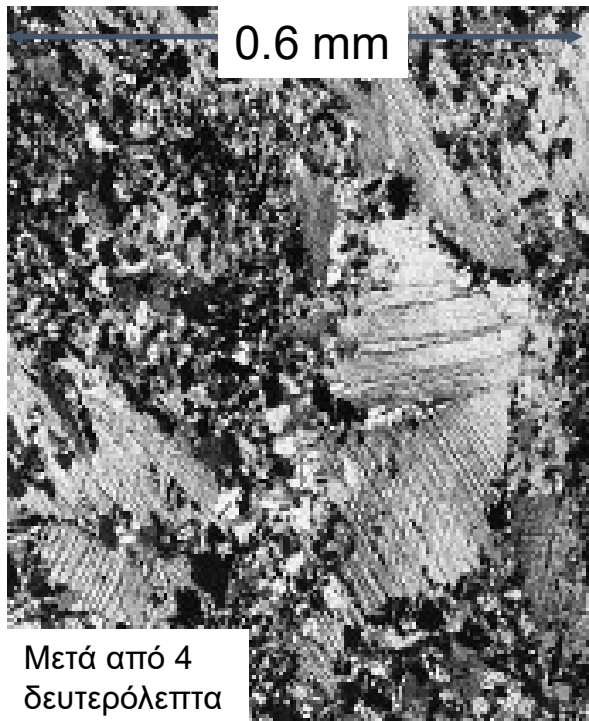
2. Ανακρυστάλλωση

- Σχηματίζονται νέοι κόκκοι οι οποίοι:
 - έχουν χαμηλές πυκνότητες διαταραχών
 - έχουν μικρό μέγεθος
 - καταναλώνουν & αντικαθιστούν γονικούς (ψυχρηλατημένους) κόκκους.



Καθώς συνεχίζεται η ανακρυστάλλωση...

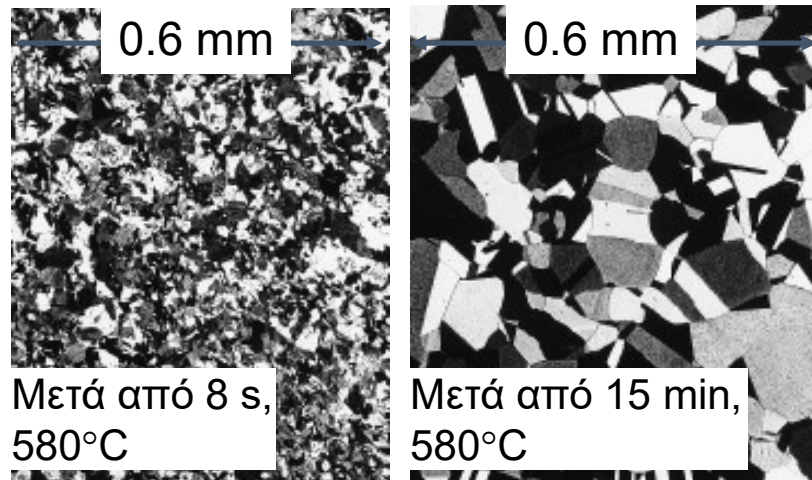
- Σταδιακά, όλοι οι “ψυχρηλατημένοι” κόκκοι καταναλώνονται ή αντικαθίστανται.



Τα 3 Στάδια της Ανόπτησης:

3. Ανάπτυξη κόκκων

- Σε μεγαλύτερους χρόνους επεξεργασίας, το μεσοσταθμικό μέγεθος κόκκων αυξάνεται.
 - μικροί κόκκοι: συρρικνώνονται (& τελικά εξαφανίζονται)
 - μεγάλοι κόκκοι: συνεχίζουν να αναπτύσσονται



- Εμπειρική σχέση:

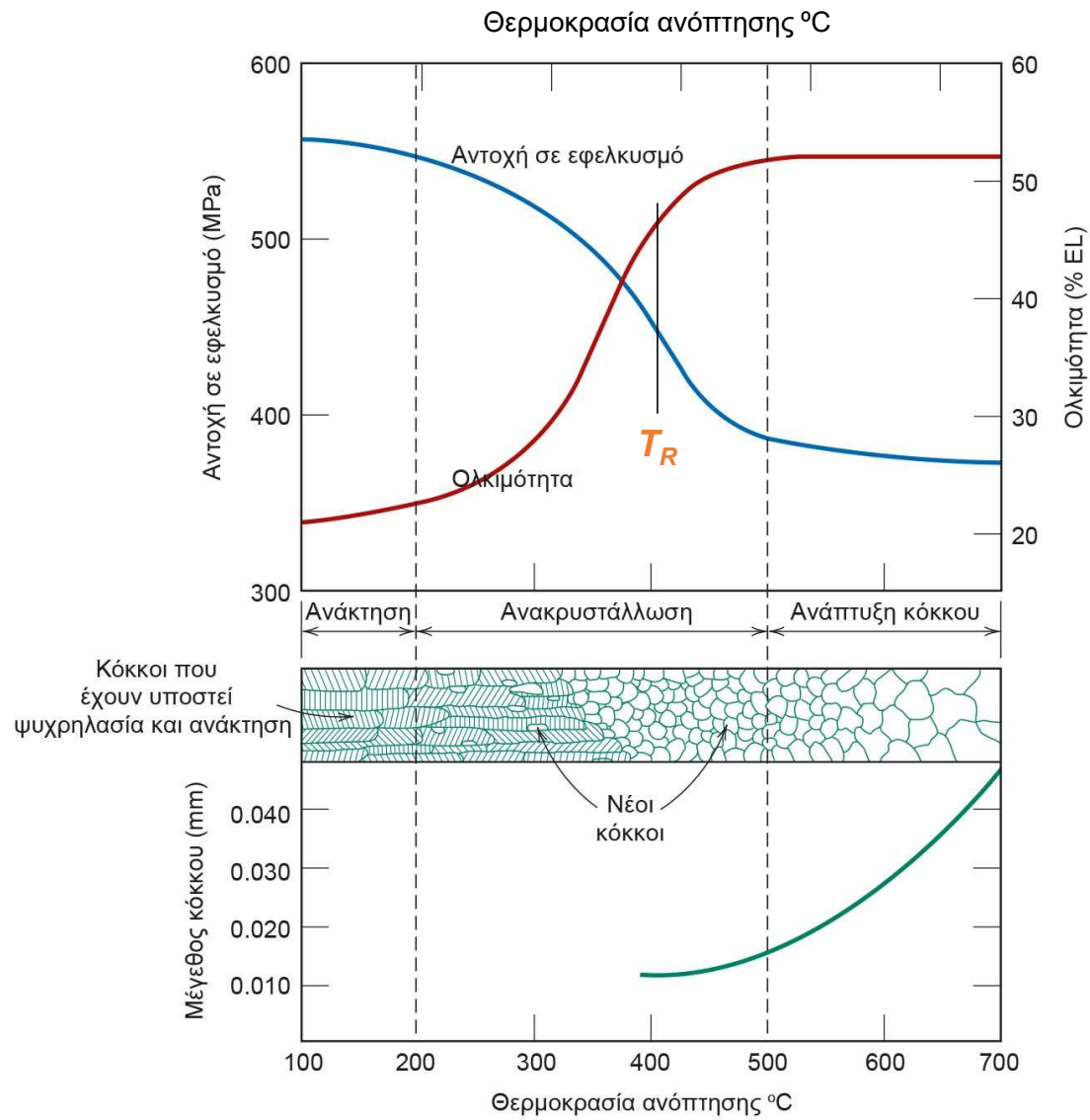
τυπ. τιμή εκθέτη ~ 2

διάμ. κόκκων
σε χρόνο t .

$$d^n - d_o^n = Kt$$

συντελεστής εξαρτ.
από υλικό και T .

χρόνος επεξεργασίας



T_R = θερμοκρασία
ανακρυστάλλωσης

Θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης

T_R = θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης =
θερμοκρασία στην οποία η ανακρυστάλλωση
ολοκληρώνεται σε χρόνο 1 ώρας.

$$0.3T_m < T_R < 0.6T_m$$

Για ένα συγκεκριμένο μέταλλο/κράμα, η T_R εξαρτάται
από:

- %CW -- μείωση της T_R με την αύξηση της %CW
- Καθαρότητα μετάλλου -- μείωση της T_R με την αύξηση του βαθμού καθαρότητας

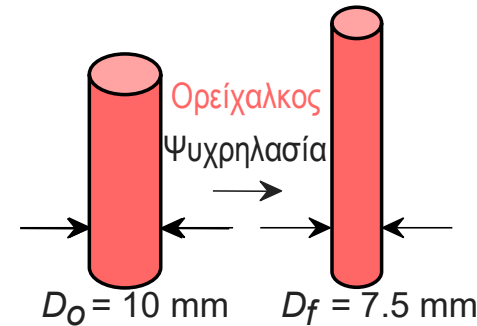
Μείωση διαμέτρου ράβδου: Πρόβλημα

Μία ράβδος από ορείχαλκο, κυκλικής διατομής με αρχική διάμετρο 10 mm, πρόκειται να διαμορφωθεί με διέλκυση. Η ψυξηλασία πρέπει να διατηρήσει το κυκλικό σχήμα της διατομής και να δώσει αντοχή σε εφελκυσμό μεγαλύτερη από 380 MPa και ολκιμότητα τουλάχιστον 15%*EL*. Επιπλέον, η τελική διάμετρος της ράβδου πρέπει να είναι 7.5 mm. Να διερευνηθεί πώς μπορεί να επιτευχθεί αυτό.

Μείωση διαμέτρου ράβδου: Διερεύνηση

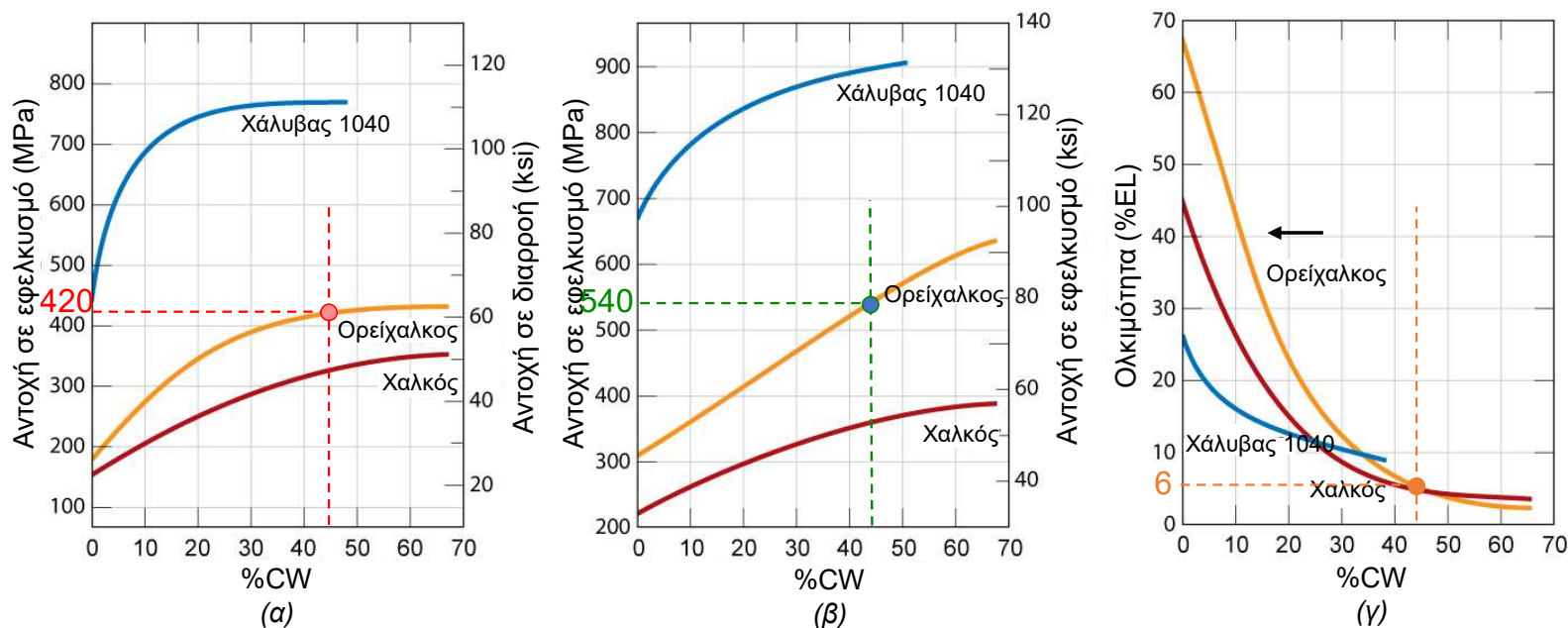
Ποιες συνέπειες θα έχει η διέλκυση της ράβδου απευθείας στην τελική διάμετρο;

Υπολογισμός βαθμού ψυξηλασίας:



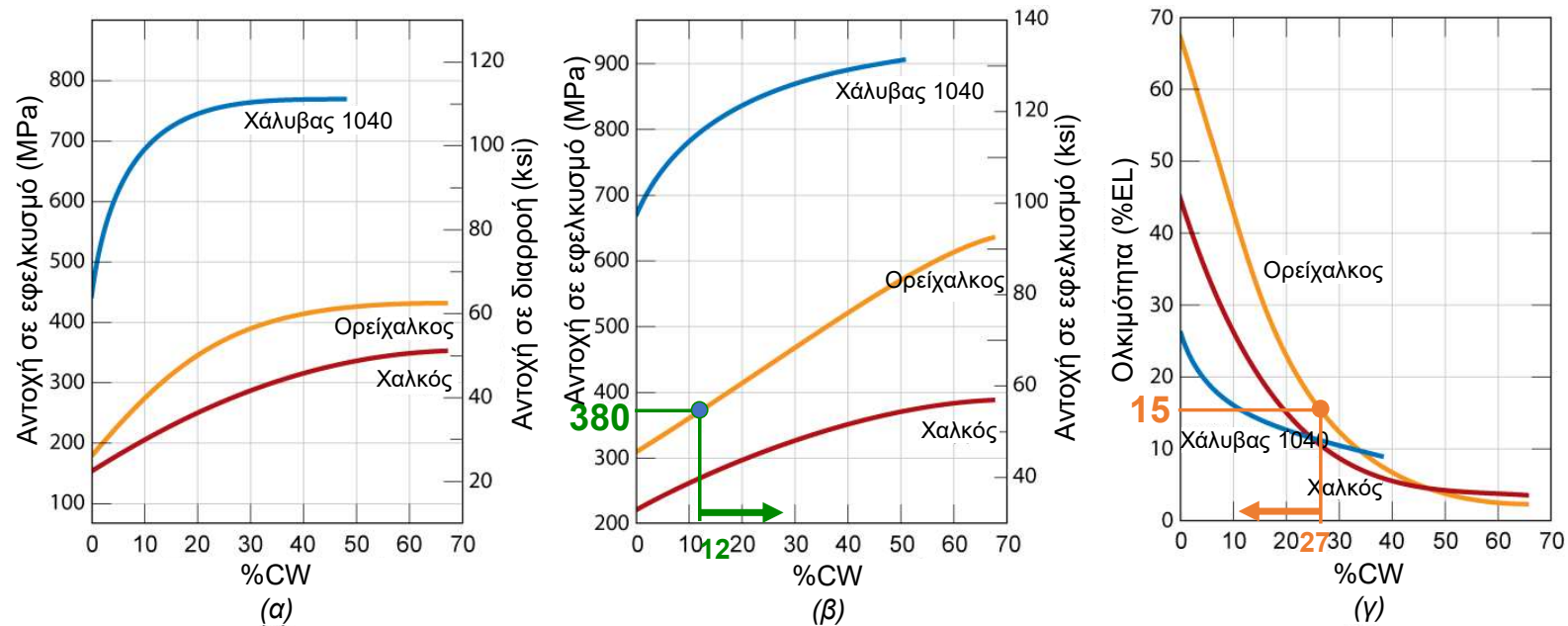
$$\begin{aligned}\%CW &= \left(\frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{A_f}{A_o} \right) \times 100 \\ &= \left(1 - \frac{\pi D_f^2 / 4}{\pi D_o^2 / 4} \right) \times 100 = \left(1 - \left(\frac{7.5}{10} \right)^2 \right) \times 100 = 43.8\%\end{aligned}$$

Μείωση διαμέτρου ράβδου: Λύση, 1



- Για %CW = 43.8%
 - $\sigma_y = 420 \text{ MPa}$
 - $TS = 540 \text{ MPa} > 380 \text{ MPa}$
 - $\%EL = 6 < 15$
- Τα αποτελέσματα δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις... υπάρχουν εναλλακτικές επιλογές;

Μείωση διαμέτρου ράβδου: Λύση, 2



Για $TS > 380 \text{ MPa}$ $\longrightarrow > 12 \%CW$

Για $\%EL > 15$ $\longrightarrow < 27 \%CW$

$\therefore$ Ο βαθμός ψυχρηλασίας γι' αυτή την εφαρμογή περιορίζεται σε $12 < \%CW < 27$

Μείωση διαμέτρου ράβδου: Λύση, 3

Διαδικασία: ψυξηλασία, ανόπτηση και κατόπιν ψυξηλασία ξανά

- Για επίτευξη του στόχου, απαιτείται $12 < \%CW < 27$
 - Θα χρησιμοποιήσουμε 20 %CW
- Η διάμετρος μετά από το πρώτο στάδιο ψυξηλασίας (αλλά πριν από το 2ο) υπολογίζεται ως εξής:

$$\%CW = \left(1 - \frac{D_{f2}^2}{D_{02}^2}\right) \times 100 \Rightarrow 1 - \frac{D_{f2}^2}{D_{02}^2} = \frac{\%CW}{100}$$

$$\frac{D_{f2}}{D_{02}} = \left(1 - \frac{\%CW}{100}\right)^{0.5} \Rightarrow D_{02} = \frac{D_{f2}}{\left(1 - \frac{\%CW}{100}\right)^{0.5}}$$

$$\text{Ενδιάμεση διάμετρος} = D_{f1} = D_{02} = 7.5 \text{ mm} / \left(1 - \frac{20}{100}\right)^{0.5} = 8.39 \text{ mm}$$

Μείωση διαμέτρου ράβδου: Σύνοψη

Στάδιο 1: Ψυξηλασία – μείωση διαμέτρου από 10 mm σε 8.39 mm

$$\%CW_1 = \left(1 - \left(\frac{8.39 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} \right)^2 \right) \times 100 = 29.6$$

Στάδιο 2: Ανόπτηση (θερμική κατεργασία με ανακρυστάλλωση)

Στάδιο 3: Ψυξηλασία – μείωση διαμέτρου από 8.39 mm σε 7.5 mm

$$\%CW_2 = \left(1 - \left(\frac{7.5}{8.49} \right)^2 \right) \times 100 = 20 \quad \text{Σχ. 7.19} \Rightarrow$$

$$\sigma_y = 340 \text{ MPa}$$

$$TS = 400 \text{ MPa}$$

$$\%EL = 24$$

Η διαδικασία ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις
και επιτυγχάνει το ζητούμενο.

Ψυξηλασία έναντι θερμηλασίας

- Θερμηλασία $\rightarrow$ παραμόρφωση πάνω από την T_R
- Ψυξηλασία $\rightarrow$ παραμόρφωση κάτω από την T_R

Το μέγεθος κόκκων επηρεάζει τις ιδιότητες

- Μέταλλα με δομή μικρών κόκκων – σχετικά μεγάλη αντοχή και δυσθραυστότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Μέταλλα με δομή μεγάλων κόκκων – καλή αντίσταση σε ερπυσμό σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες



ΣΥΝΟΨΗ



- Διαταραχές στο πλέγμα: παρατηρούνται κυρίως σε μέταλλα και κράματα.
- Η αντοχή αυξάνεται καθιστώντας δύσκολη την κίνηση των διαταραχών.
- Η αντοχή των μετάλλων μπορεί να αυξηθεί με:
 - μείωση μεγέθους κόκκων
 - ισχυροποίηση στερεού διαλύματος
 - σκλήρυνση με κατακρήμνιση
 - ψυξηλασία
- Εάν μετά την ψυξηλασία εφαρμοστεί θερμική κατεργασία (ανόπτηση) σε ένα μέταλλο, θα μεταβληθούν οι ιδιότητες και η μικροδομή του (λόγω ανάκτησης, ανακρυστάλλωσης και ανάπτυξης των κόκκων).

