



Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τεχνολογία Υλικών Ι

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Δρ. Σκλήρη Ευαγγελία

Μηχανισμοί Ισχυροποίησης στα Μέταλλα

☐ Ισχυροποίηση

- Τα μέταλλα παραμορφώνονται πλαστικά μέσω κίνησης διαταραχών
- Η αντοχή σχετίζεται με το πόσο εύκολα κινούνται οι διαταραχές
- Στόχος ισχυροποίησης να εμποδίσουμε την κίνηση των διαταραχών

➤ Όσο πιο δύσκολη η κίνηση → απαιτούνται μεγαλύτερες μηχανικές δυνάμεις για πλαστική παραμόρφωση → τόσο μεγαλύτερη αντοχή

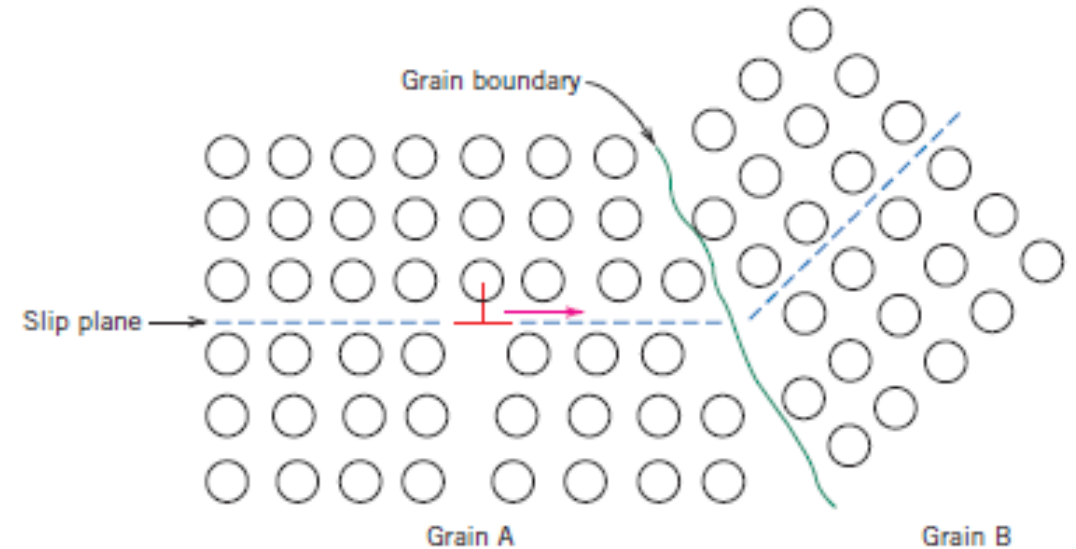
☐ Βασικοί μηχανισμοί σκλήρυνσης

- Μείωση μεγέθους κόκκων
- Σκλήρυνση στερεού διαλύματος
- Σκλήρυνση με παραμόρφωση (cold work)

Στόχος → παρεμπόδιση της κίνησης των διαταραχών

Ισχυροποίηση με Μείωση του Μεγέθους Κόκκων

- Τα όρια κόκκων λειτουργούν ως εμπόδια στην κίνηση των διαταραχών
 - Όσο μικρότεροι οι κόκκοι → περισσότερα όρια
 - Διαφορετικός προσανατολισμός κόκκων → δυσκολεύει την κίνηση των διαταραχών
 - Ατομική αταξία στα όρια των κόκκων → ασυνέχεια στα επίπεδα ολίσθησης
 - Άρα τα όρια κόκκων εμποδίζουν την κίνηση των διαταραχών
- Άρα αυξάνεται η αντοχή και η σκληρότητα



□ Εξίσωση Hall–Petch:

$$\sigma_y = \sigma_o + k_y d^{-1/2}$$

Όπου:

d είναι η μέση διάμετρος κόκκου

σ_o είναι σταθερά του υλικού

k_y είναι σταθερά του υλικού

- μικρό d → μεγάλη αντοχή

Ισχυροποίηση μέσω Στερεού Διαλύματος

□ **Στερεό Διάλυμα** → Κράματα στα οποία άτομα προσμίξεων διαλύονται στο πλέγμα του βασικού μετάλλου (είτε υποκαθιστώντας άτομα είτε σε ενδιάμεσες θέσεις).

- Προσθήκη ξένων ατόμων στο πλέγμα
- Τα άτομα αυτά προκαλούν παραμορφώσεις πλέγματος
- Αποτέλεσμα → δυσκολεύεται η κίνηση διαταραχών → **αυξάνεται η αντοχή**
- Όσο αυξάνει η συγκέντρωση → αυξάνει η αντοχή
- Δυσκολία στην κίνηση των διαταραχών → δεν μπορεί να **παραμορφωθεί το υλικό εύκολα** → **μειώνεται η ολκιμότητα** (ικανότητα για πλαστική παραμόρφωση)

Ισχυροποίηση μέσω Στερεού Διαλύματος

Κράμα Cu-Ni

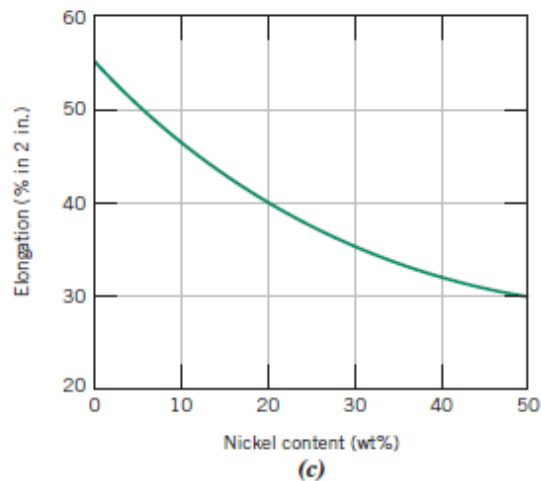
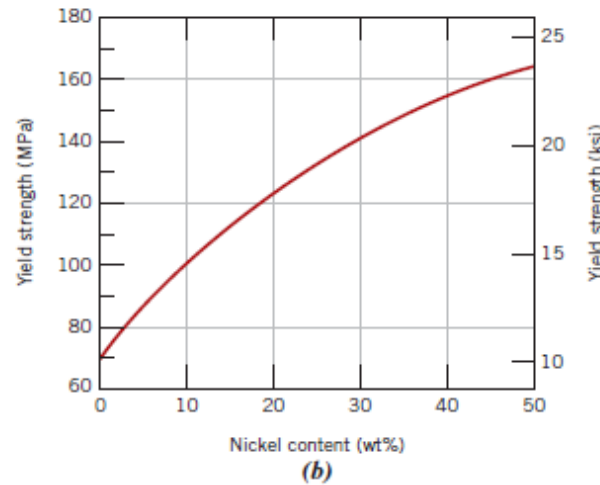
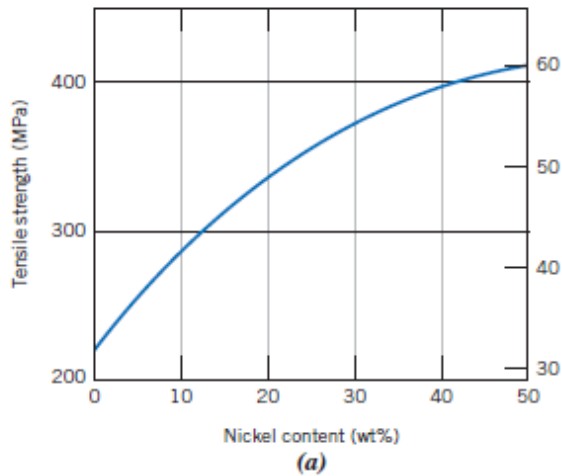


Figure 7.16 Variation with nickel content of (a) tensile strength, (b) yield strength, and (c) ductility (%EL) for copper-nickel alloys, showing strengthening.

(a) Αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength)

Όσο αυξάνει το Ni → αυξάνεται αντοχή
Το υλικό γίνεται πιο ισχυρό

(b) Τάση διαρροής (yield strength)

Όσο αυξάνει το Ni → αυξάνεται η τάση διαρροής
Θέλει μεγαλύτερη τάση για να αρχίσει να παραμορφώνεται

(c) Ολκιμότητα (% επιμήκυνση)

Όσο αυξάνει το Ni → μειώνεται η ολκιμότητα
Το υλικό παραμορφώνεται λιγότερο πριν σπάσει

Ισχυροποίηση μέσω Στερεού Διαλύματος

- **Μικρότερο άτομο προσμίξεως**

Μπαίνει στη θέση κανονικού ατόμου
(substitutional)

Είναι πιο μικρό → τραβάει τα γύρω άτομα

Δημιουργεί **εφελκυστικές παραμορφώσεις**
(**tensile strains**)

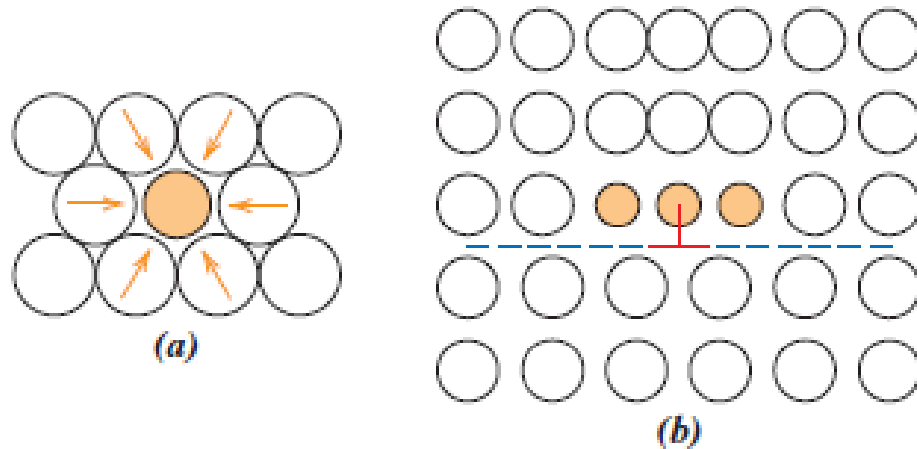


Figure 7.17 (a) Representation of tensile lattice strains imposed on host atoms by a smaller substitutional impurity atom. (b) Possible locations of smaller impurity atoms relative to an edge dislocation such that there is partial cancellation of impurity-dislocation lattice strains.

- **Μεγαλύτερο άτομο προσμίξεως**

Είναι πιο μεγάλο → σπρώχνει τα γύρω άτομα
Δημιουργεί **θλιπτικές παραμορφώσεις**
(**compressive strains**)

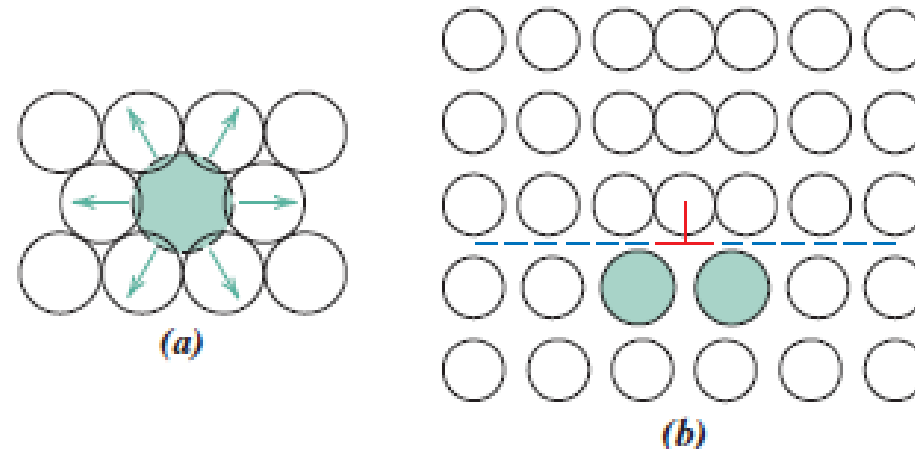


Figure 7.18 (a) Representation of compressive strains imposed on host atoms by a larger substitutional impurity atom. (b) Possible locations of larger impurity atoms relative to an edge dislocation such that there is partial cancellation of impurity-dislocation lattice strains.

Ισχυροποίηση μέσω Στερεού Διαλύματος

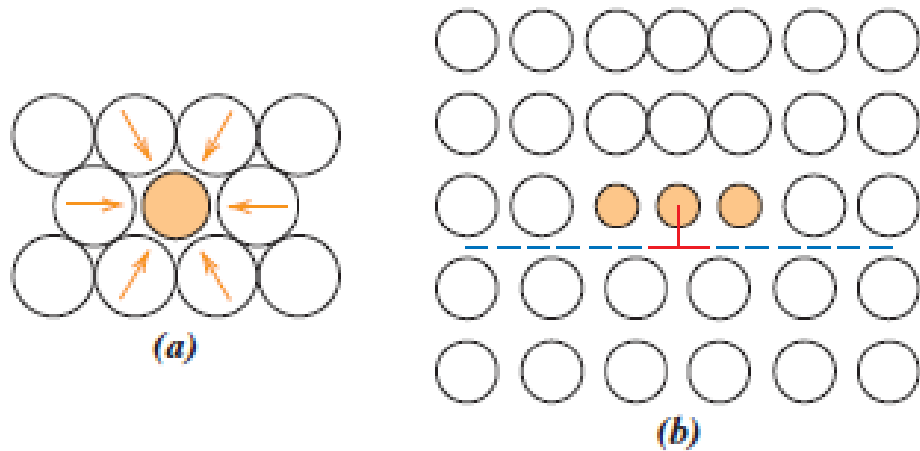


Figure 7.17 (a) Representation of tensile lattice strains imposed on host atoms by a smaller substitutional impurity atom. (b) Possible locations of smaller impurity atoms relative to an edge dislocation such that there is partial cancellation of impurity–dislocation lattice strains.

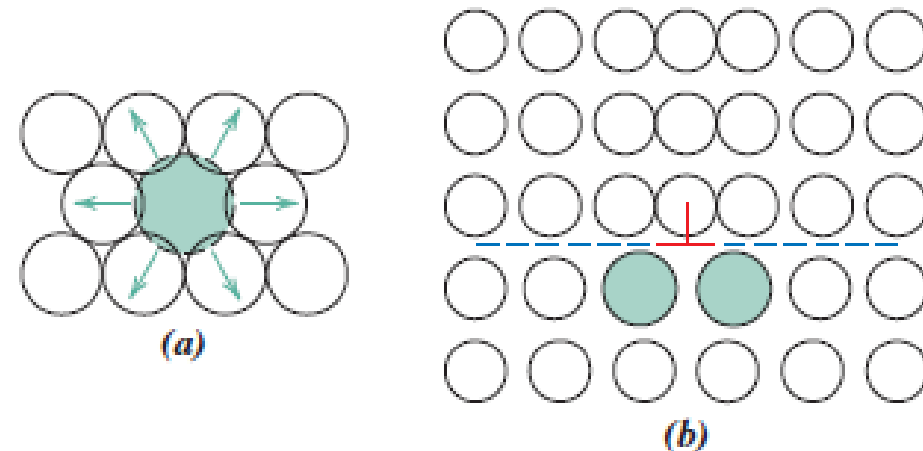


Figure 7.18 (a) Representation of compressive strains imposed on host atoms by a larger substitutional impurity atom. (b) Possible locations of larger impurity atoms relative to an edge dislocation such that there is partial cancellation of impurity–dislocation lattice strains.

Τα άτομα προσμίξεων

- δημιουργούν πεδία τάσεων στο πλέγμα
- αλληλεπιδρούν με τις διαταραχές
- δυσκολεύεται η κίνηση διαταραχών → απαιτείται εφαρμογή μεγαλύτερης τάσης → αυξάνεται η αντοχή

➤ Τα κράματα είναι ισχυρότερα από τα καθαρά μέταλλα

Σκλήρυνση μέσω Ενδοτράχυνσης

❑ Σκλήρυνση με παραμόρφωση (strain hardening)

- Πλαστική παραμόρφωση → αύξηση διαταραχών
- Οι διαταραχές αλληλεπιδρούν και μπλοκάρουν η μία την άλλη άρα απαιτείται μεγαλύτερη τάση

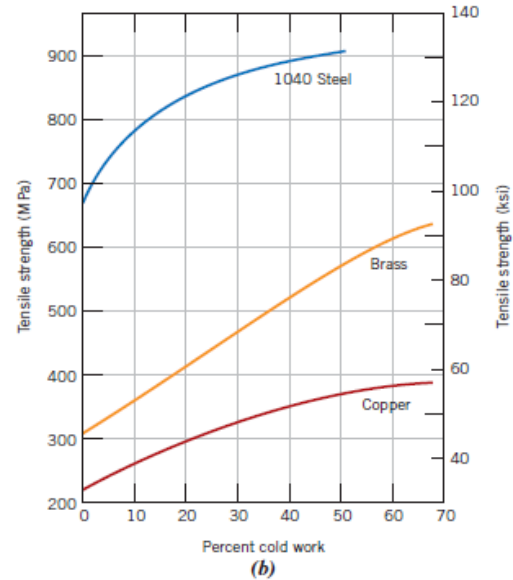
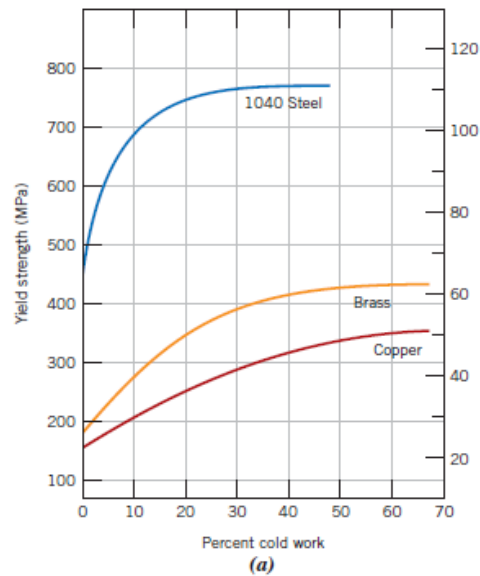
Αποτέλεσμα:

- αυξάνεται όριο διαρροής
- αυξάνεται η αντοχή
- μειώνεται η ολκιμότητα

❑ Ποσοστό Ψυξηλασίας (%CW) εκφράζει τον βαθμό παραμόρφωσης

$$\%CW = \left(\frac{A_o - A_d}{A_o} \right) \cdot 100$$

Σκλήρυνση μέσω Ενδοτράχυνσης



(a) Τάση διαρροής (yield strength)

Όσο αυξάνει το % ποσοστό ψυχρηλασίας → αυξάνει η τάση διαρροής

Θέλει μεγαλύτερη τάση για να ξεκινήσει η πλαστική παραμόρφωση

(b) Αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength)

Όσο αυξάνει το % ποσοστό ψυχρηλασίας → αυξάνεται η αντοχή

Το υλικό γίνεται πιο ισχυρό

(c) Ολκιμότητα (%EL)

Όσο αυξάνει το % ποσοστό ψυχρηλασίας → μειώνεται η ολκιμότητα

Το υλικό γίνεται πιο εύθραυστο (παραμορφώνεται λιγότερο)

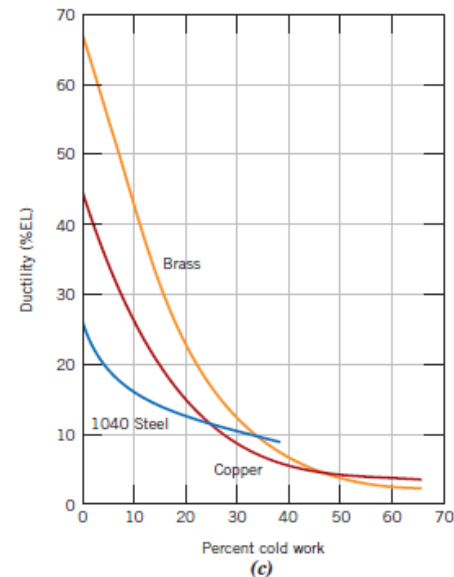
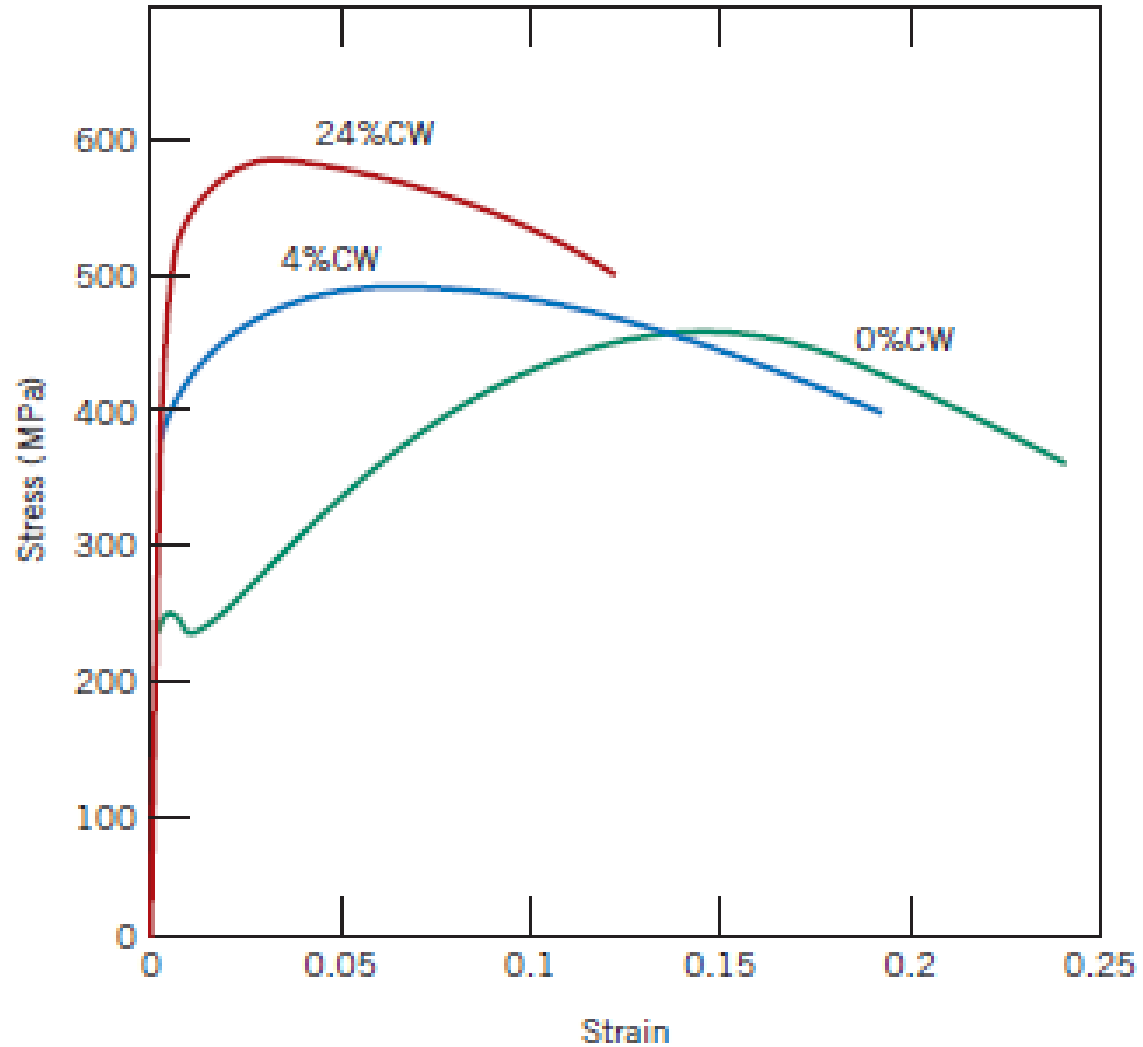


Figure 7.19 For 1040 steel, brass, and copper, (a) the increase in yield strength, (b) the increase in tensile strength, and (c) the decrease in ductility (%EL) with percent cold work.

[Adapted from *Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels*, Vol. 1, 9th edition, B. Bardes (Editor), 1978; and *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, 9th edition, H. Baker (Managing Editor), 1979. Reproduced by permission of ASM International, Materials Park, OH.]

Σκλήρυνση μέσω Ενδοτράχυνσης

➤ Ίδιο υλικό με διαφορετικά ποσοστά ψυξηλασίας



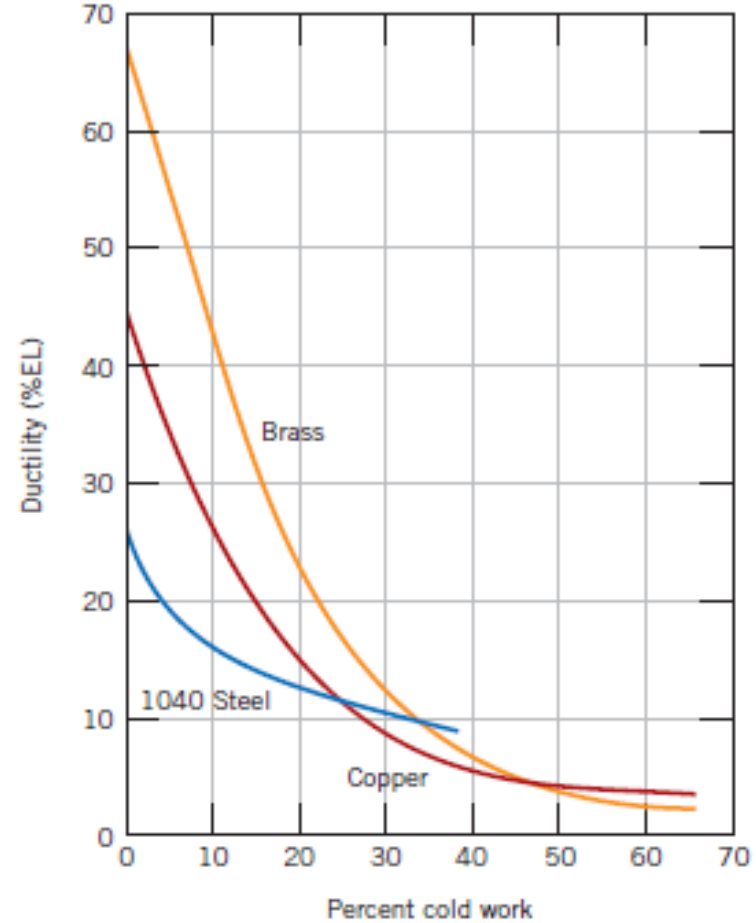
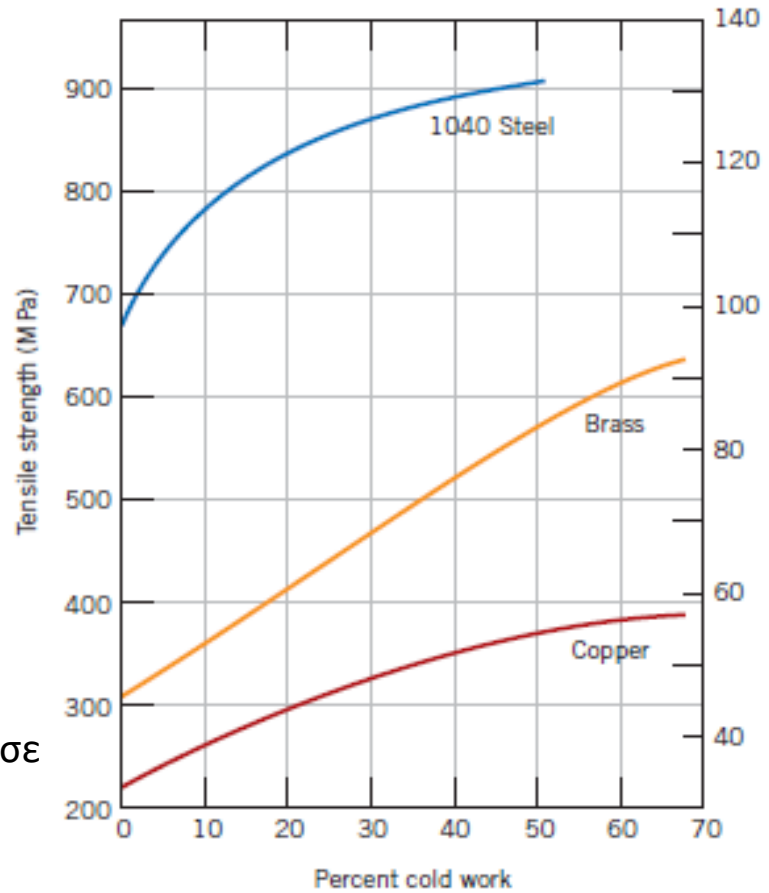
- Όριο διαρροής αυξάνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό % CW
- Μέγιστη τάση αυξάνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό % CW
- Παραμόρφωση μέχρι τη θραύση μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό % CW

Σκλήρυνση μέσω Ενδοτράχυνσης

Άσκηση:

Υπολογίστε την αντοχή σε εφελκυσμό και την ολκιμότητα (% επιμήκυνση, %EL) για μια κυλινδρική ράβδο από χαλκό η οποία υφίσταται ψυχρηλασία σε βαθμό που επιφέρει μείωση της διαμέτρου της από 15.2 mm σε 12.2 mm.

Χρησιμοποιείτε και τα ακόλουθα διαγράμματα.



Tensile strength: αντοχή σε εφελκυσμό
Ductility: ολκιμότητα

Σκλήρυνση μέσω Ενδοτράχυνσης

Απάντηση:

Ισχύει:

$$\%CW = \left(\frac{A_o - A_d}{A_o} \right) \cdot 100$$

Για κυλινδρική διατομή:

$$A = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2$$

Οπότε:

$$\%CW = \frac{\pi \left(\frac{15.2}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{12.2}{2} \right)^2}{\pi \left(\frac{15.2}{2} \right)^2} \times 100$$

$$\%CW = 35.6\%$$

- Η αντοχή σε εφελκυσμό για 35.6% CW βρίσκεται από την καμπύλη για το χαλκό και η τιμή της είναι 340 MPa. Η ολκιμότητα για 35.6% CW είναι περίπου 7% EL.

Σκλήρυνση μέσω Ενδοτράχυνσης

Άσκηση:

Δύο δοκίμια του ίδιου μετάλλου, δεν έχουν υποστεί προηγούμενη παραμόρφωση, πρόκειται να παραμορφωθούν πλαστικά με μείωση της επιφάνειας των διατομών τους.

Το ένα έχει κυκλική διατομή και το άλλο ορθογωνική.

Κατά την παραμόρφωση η κυκλική διατομή παραμένει κυκλική και η ορθογωνική παραμένει ορθογωνική.

Οι διαστάσεις, αρχικές και μετά την παραμόρφωση, είναι οι εξής:

	<i>Circular (diameter, mm)</i>	<i>Rectangular (mm)</i>
<i>Original dimensions</i>	15.2	125 × 175
<i>Deformed dimensions</i>	11.4	75 × 200

Ποιο δοκίμιο θα είναι πιο σκληρό μετά την παραμόρφωση και γιατί;

Σκλήρυνση μέσω Ενδοτράχυνσης

Απάντηση:

Η σκληρότητα εξαρτάται από το ποσοστό ψυξηλασίας (%CW)

Για το κυλινδρικό δοκίμιο:

$$\%CW = \left[\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right] \times 100$$

$$= \left[\frac{\pi r_0^2 - \pi r_d^2}{\pi r_0^2} \right] \times 100$$

$$= \left[\frac{\pi \left(\frac{15.2 \text{ mm}}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{11.4 \text{ mm}}{2} \right)^2}{\pi \left(\frac{15.2 \text{ mm}}{2} \right)^2} \right] \times 100 = 43.8\%CW$$

Σκλήρυνση μέσω Ενδοτράχυνσης

Απάντηση:

Η σκληρότητα εξαρτάται από το **ποσοστό ψυξηλασίας (%CW)**

Για το ορθογωνικό δοκίμιο:

$$\%CW = \left[\frac{(125 \text{ mm})(175 \text{ mm}) - (75 \text{ mm})(200 \text{ mm})}{(125 \text{ mm})(175 \text{ mm})} \right] \times 100 = 31.4\%CW$$

- Η σκληρότητα αυξάνεται με το ποσοστό ψυξηλασίας, επομένως το δοκίμιο με τη μεγαλύτερη μείωση διατομής είναι και το σκληρότερο άρα το κυκλικό δοκίμιο.

Ανόπτηση, Ανακρυστάλλωση και Ανάπτυξη Κόκκων

□ Ανόπτηση (Annealing)

Με κατάλληλη θερμική επεξεργασία μπορεί να επιτευχθεί επαναφορά των ιδιοτήτων και της δομής στην προ-ψυχρηλασία κατάστασή τους.

Σκοπός είναι η επαναφορά ιδιοτήτων

Περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Ανάκτηση (recovery)
- Ανακρυστάλλωση (Recrystallization)
- Ανάπτυξη κόκκων (Grain growth)

□ Ανάκτηση (Recovery)

Σε υψηλές θερμοκρασίες, η αυξημένη διάχυση επιτρέπει την αναδιάταξη των διαταραχών, οδηγώντας σε μείωση της αποθηκευμένης ενέργειας παραμόρφωσης.

- μερική αναδιάταξη διαταραχών
- μικρή μείωση αντοχής
- βελτίωση φυσικών ιδιοτήτων (ηλεκτρική, θερμική αγωγιμότητα)

Ανόπτηση, Ανακρυστάλλωση και Ανάπτυξη Κόκκων

□ Ανακρυστάλλωση (Recrystallization)

- Δημιουργία νέων κόκκων χωρίς παραμορφώσεις
- Οι νέοι κόκκοι έχουν χαμηλή πυκνότητα διαταραχών
- Προκύπτει μετά από ψυξηλασία και θέρμανση

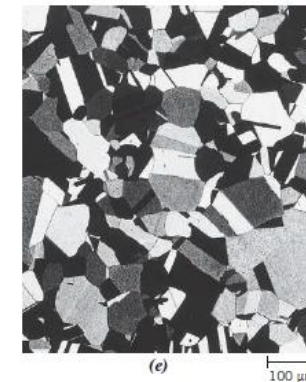
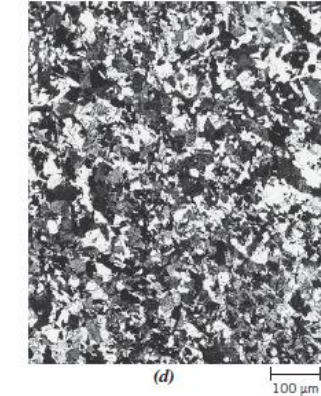
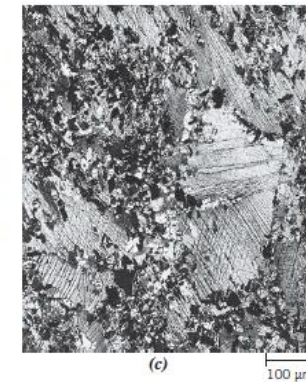
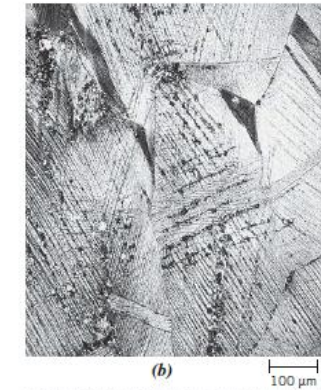
- Μετά την πλαστική παραμόρφωση → υψηλή εσωτερική ενέργεια
- Δημιουργούνται μικροί πυρήνες νέων κόκκων
- Οι κόκκοι αυτοί μεγαλώνουν και αντικαθιστούν τους παλιούς
- Διαδικασία μέσω διάχυσης

Τι συμβαίνει στη μικροδομή

- Από επιμηκυμένους κόκκους (cold worked) → σε μικρούς ισοαξονικούς κόκκους → πλήρης αντικατάσταση παλιάς δομής, Σχήμα (a → d)

Figure 7.21

Photomicrographs showing several stages of the recrystallization and grain growth of brass. (a) Cold-worked (33% CW) grain structure. (b) Initial stage of recrystallization after heating for 3 s at 580°C (1075°F); the very small grains are those that have recrystallized. (c) Partial replacement of cold-worked grains by recrystallized ones (4 s at 580°C). (d) Complete recrystallization (8 s at 580°C). (e) Grain growth after 15 min at 580°C. (f) Grain growth after 10 min at 700°C (1290°F). All photomicrographs 70×. (All photomicrographs from J. E. Burke, *Grain Control in Industrial Metallurgy*, in "The Fundamentals of Recrystallization and Grain Growth," Thirtieth National Metal Congress and Exposition, American Society for Metals, 1948. By permission of ASM International, Materials Park, OH. www.asminternational.org.)



Ανόπτηση, Ανακρυστάλλωση και Ανάπτυξη Κόκκων

❑ Ανακρυστάλλωση (Recrystallization)

- Μειώνεται η αντοχή
- Μειώνεται η σκληρότητα
- Μεγαλώνει η ολκιμότητα
- Επαναφορά ιδιοτήτων πριν την ψυξηλασία

Παράγοντες που επηρεάζουν

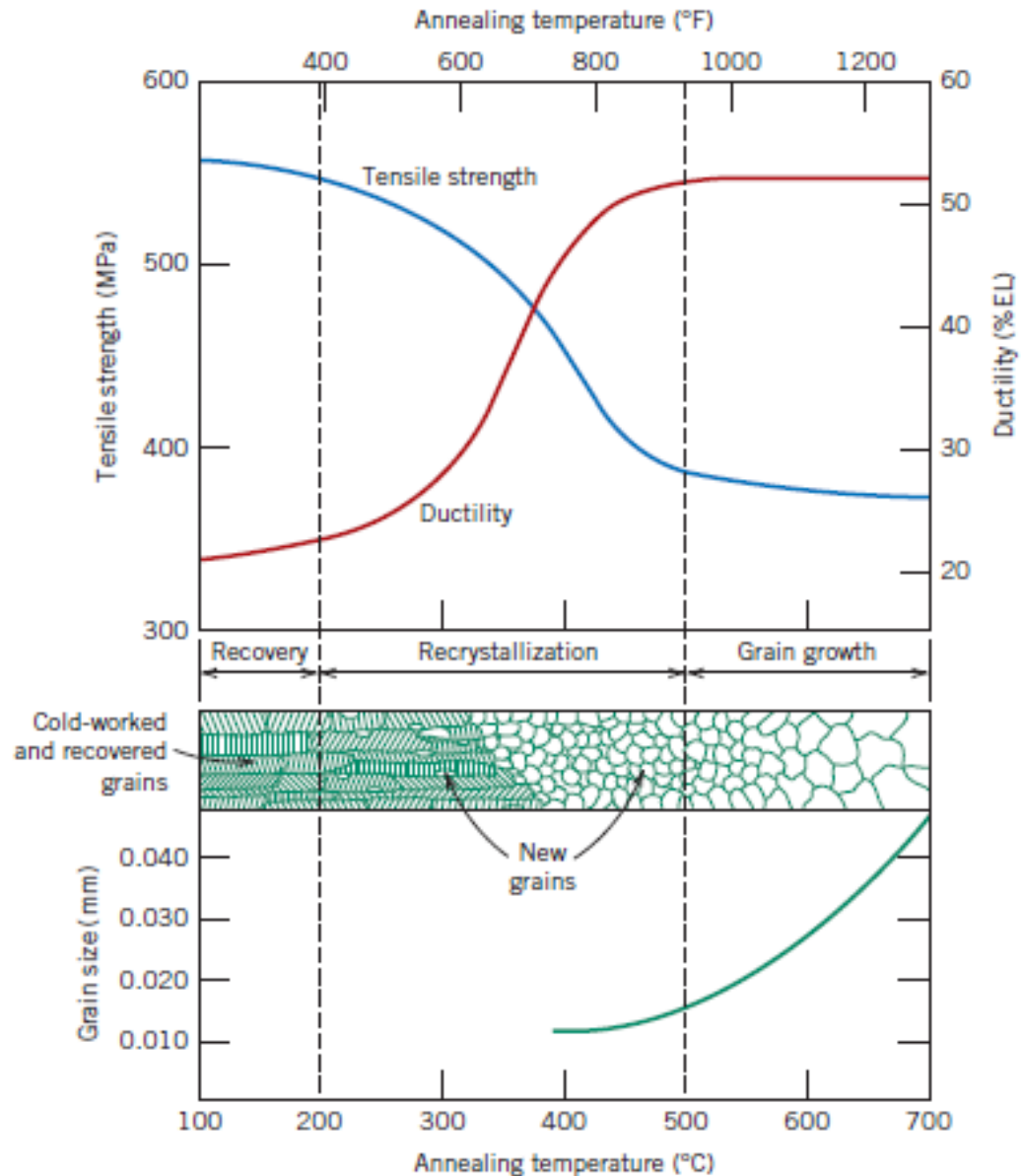
- Θερμοκρασία
- Χρόνος
- Ποσοστό ψυξηλασίας
- Μεγαλύτερο ποσοστό ψυξηλασίας → πιο εύκολη ανακρυστάλλωση

Θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης

- Θερμοκρασία όπου ολοκληρώνεται η ανακρυστάλλωση

Συνήθως $0.4T_m - 0.7T_m$

Ανόπτηση, Ανακρυστάλλωση και Ανάπτυξη Κόκκων



Πώς επηρεάζει η θερμοκρασία ανόπτησης:

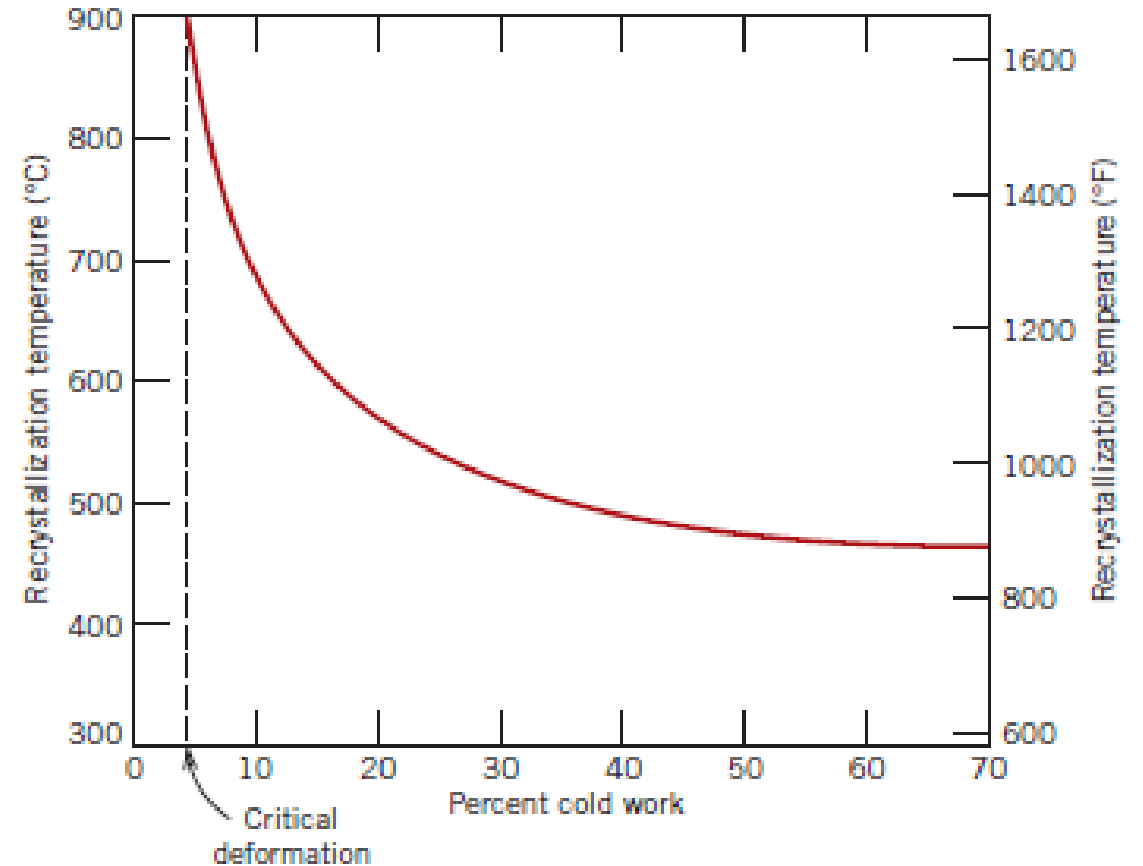
- την αντοχή
- την ολκιμότητα
- τη μικροδομή (κόκκοι)

➤ Με την αύξηση της θερμοκρασίας ανόπτησης, το υλικό περνά από ανάκτηση σε ανακρυστάλλωση και στη συνέχεια σε ανάπτυξη κόκκων, με αντίστοιχη μείωση της αντοχής και αύξηση της ολκιμότητας

Ανόπτηση, Ανακρυστάλλωση και Ανάπτυξη Κόκκων

□ Ανακρυστάλλωση (Recrystallization)

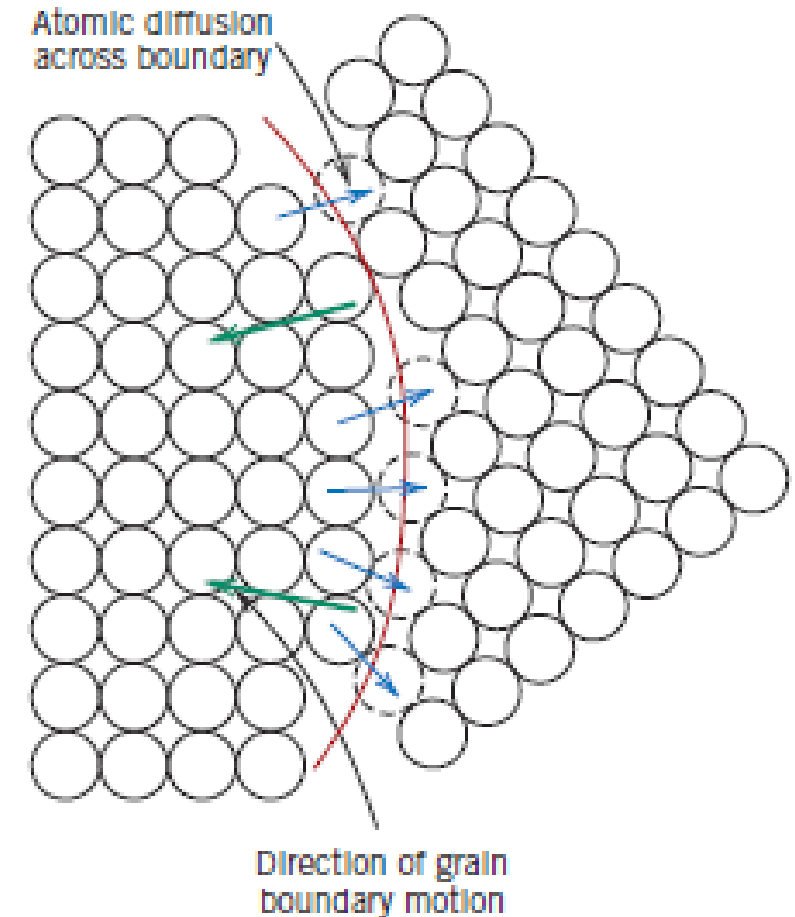
- **Επίδραση ποσοστού ψυχρηλασίας στη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης**
Όσο αυξάνεται % CW → μειώνεται θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης
Υπάρχει κρίσιμο ποσοστό (~2–20%)
Αν είναι μικρό → δεν γίνεται ανακρυστάλλωση



Ανόπτηση, Ανακρυστάλλωση και Ανάπτυξη Κόκκων

□ Αύξηση κόκκων (Grain Growth)

- Μετά την ανακρυστάλλωση, αν συνεχίσουμε να αυξάνουμε τη θερμοκρασία, οι κόκκοι δεν μένουν σταθεροί αλλά συνεχίζουν να μεγαλώνουν.
- Για να μειωθεί η ενέργεια, πρέπει να μειωθεί ο αριθμός των ορίων κόκκων. Λιγότερα όρια → μικρότερη συνολική ενέργεια
- Τα όρια κόκκων μετακινούνται μέσω διάχυσης
- Το σύστημα τείνει σε χαμηλότερη ενέργεια



Ανόπτηση, Ανακρυστάλλωση και Ανάπτυξη Κόκκων

□ Εξίσωση ανάπτυξης

$$d^n - d_0^n = Kt$$

d: μέγεθος κόκκου

d_0 : αρχικό μέγεθος

t: χρόνος

$n = 2$

K σταθερά

Το μέγεθος αυξάνει με τον χρόνο

□ Επίδραση θερμοκρασίας

Αυξάνεται η θερμοκρασία → αυξάνεται ο ρυθμός ανάπτυξης

Ταχύτητα διάχυσης αυξάνεται → Οι κόκκοι μεγαλώνουν πιο γρήγορα

- Η ανάπτυξη κόκκων δεν επιδιώκεται συνήθως, αλλά αποτελεί συνέπεια της θερμικής κατεργασίας που πρέπει να ελέγχεται, καθώς επηρεάζει αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες (αντοχή, σκληρότητα, ανθεκτικότητα).

Η μικροδομή καθορίζει τις μηχανικές ιδιότητες!

Ανόπτηση, Ανακρυστάλλωση και Ανάπτυξη Κόκκων

Άσκηση:

Όταν ένα υποθετικό μέταλλο με διάμετρο κόκκου 8.2×10^{-3} mm θερμαίνεται στους 500°C για 12.5 min, η διάμετρος αυξάνεται σε 2.7×10^{-2} mm. Υπολογίστε τη διάμετρο κόκκου όταν ένα δοκίμιο του αρχικού υλικού θερμανθεί στους 500°C για χρόνο 100 min. Υποθέστε ότι ο εκθέτης διαμέτρου κόκκου n έχει τιμή 2.

Ανόπτηση, Ανακρυστάλλωση και Ανάπτυξη Κόκκων

Απάντηση:

Εξίσωση ανάπτυξης κόκκων:

$$d^2 - d_0^2 = Kt$$

$$K = \frac{d^2 - d_0^2}{t}$$

$$K = \frac{(2.7 \cdot 10^{-2})^2 - (8.2 \cdot 10^{-3})^2}{12.5}$$

$$K = 5.29 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{min}$$

▪ Για $t = 100 \text{ min}$

$$d = \sqrt{d_0^2 + Kt}$$

$$d = \sqrt{(8.2 \cdot 10^{-3})^2 + (5.29 \cdot 10^{-5})(100)}$$

$$d = \sqrt{5.36 \cdot 10^{-3}}$$

$$d = 0.0732 \text{ mm}$$

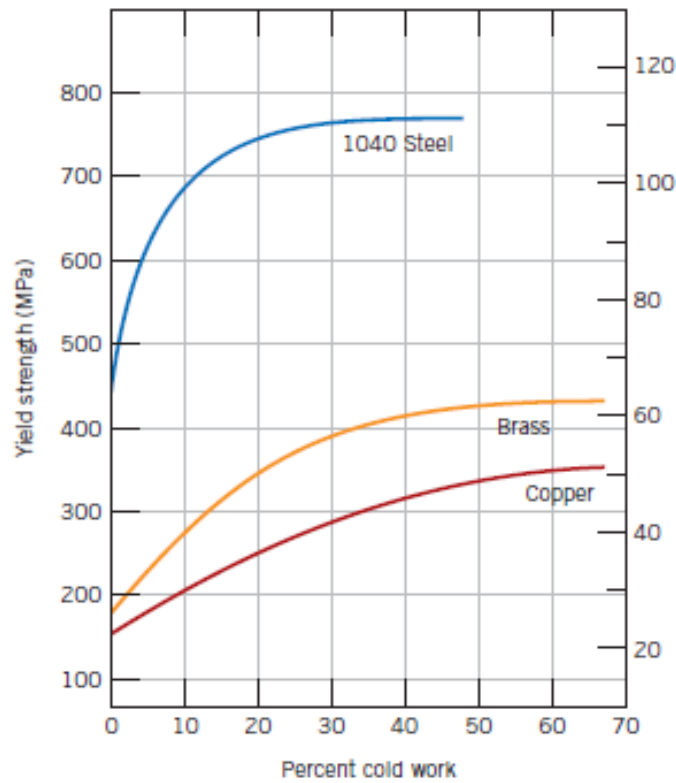
Σκλήρυνση μέσω Ενδοτράχυνσης

Άσκηση:

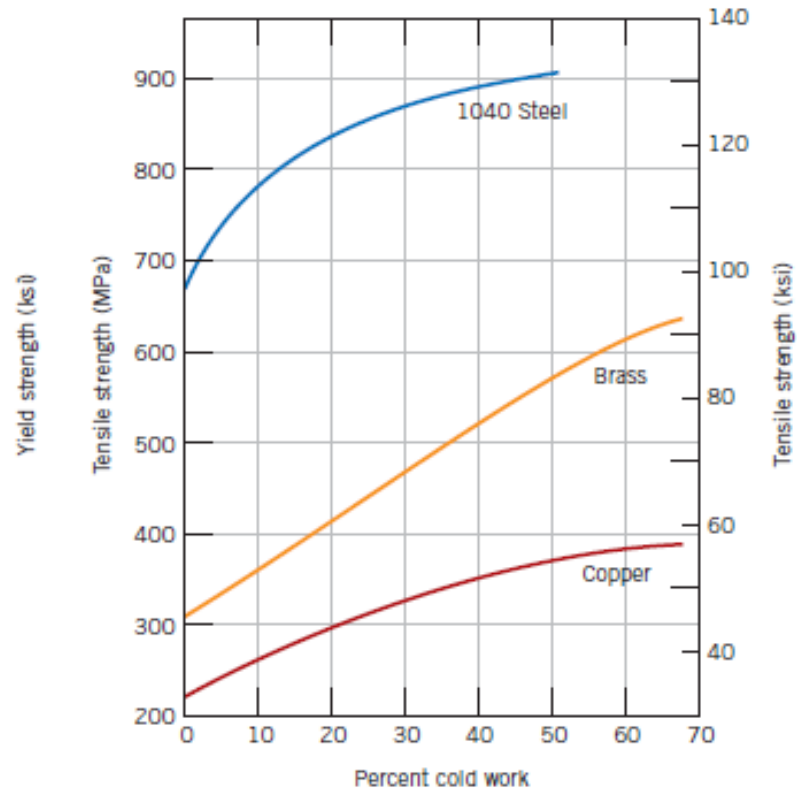
(α) Να υπολογιστεί προσεγγιστικά η ολκιμότητα (%EL) ενός ορείχαλκου που έχει όριο διαρροής 275 MPa.

(β) Να υπολογιστεί προσεγγιστικά η σκληρότητα Brinell ενός χάλυβα 1040 που έχει όριο διαρροής 690 MPa.

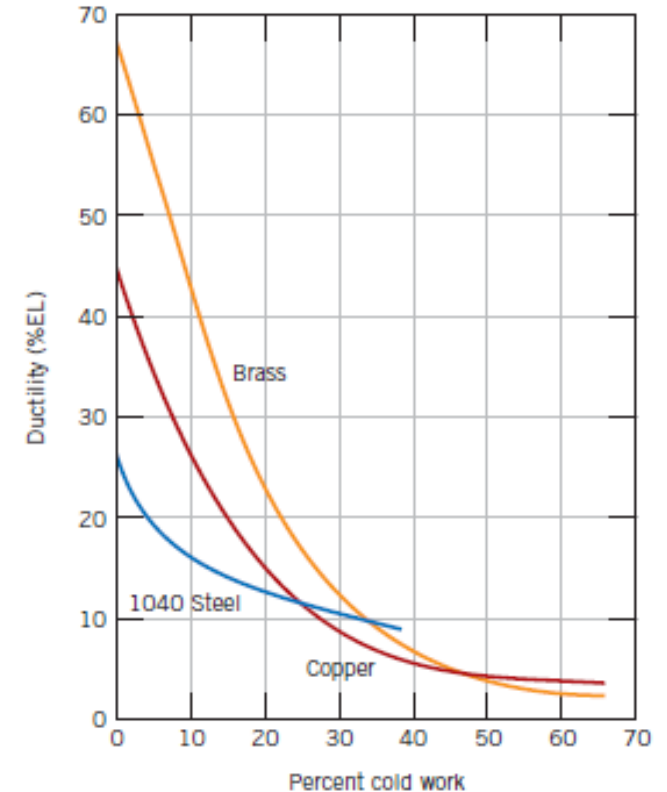
Χρησιμοποιείτε τα παρακάτω διαγράμματα.



(a)



(b)



(c)

Σκλήρυνση μέσω Ενδοτράχυνσης

Απάντηση:

(α) Όριο διαρροής 275 MPa αντιστοιχεί σε περίπου **10% ψυξηλασία (%CW)**

Για 10% CW → η ολκιμότητα είναι περίπου σε %EL = 43%

(β) Όριο διαρροής 690 MPa αντιστοιχεί σε περίπου **10% CW**

Για 10% CW αντοχή σε εφελκυσμό → $TS = 780 \text{ MPa}$

$$HB = \frac{TS(\text{MPa})}{3.45} = \frac{780 \text{ MPa}}{3.45} = 226$$

Άσκηση:

Ένα μη παραμορφωμένο δοκίμιο ενός κράματος έχει μέση διάμετρο κόκκων 0.040 mm. Σας ζητείται να μειώσετε τη μέση διάμετρο κόκκων σε 0.010 mm. Είναι αυτό δυνατό; Αν ναι, να εξηγήσετε τις διαδικασίες που θα χρησιμοποιούσατε και να ονομάσετε τις κατεργασίες που εμπλέκονται. Αν δεν είναι δυνατό, να εξηγήσετε γιατί.

Απάντηση:

Ναι, είναι δυνατό να μειωθεί η μέση διάμετρος κόκκων ενός μη παραμορφωμένου δοκιμίου κράματος από 0.040 mm σε 0.010 mm. Για να επιτευχθεί αυτό, το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά σε θερμοκρασία δωματίου δηλαδή υφίσταται ψυχρή κατεργασία και στη συνέχεια γίνεται ανόπτηση σε αυξημένη θερμοκρασία ώστε να πραγματοποιηθεί ανακρυστάλλωση και κάποια ανάπτυξη κόκκων, μέχρι η μέση διάμετρος κόκκων να φτάσει τα 0.010 mm.

Ψυχρή παραμόρφωση → Αυξάνονται πάρα πολύ οι διαταραχές → περισσότερη αποθηκευμένη ενέργεια

Ανακρυστάλλωση → Δημιουργούνται νέοι κόκκοι χωρίς διαταραχές → μείωση ενέργειας

Ανάπτυξη κόκκων → Πρέπει να ελεγχθεί θερμοκρασία & χρόνος, γιατί αλλιώς οι κόκκοι μεγαλώνουν