



Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών

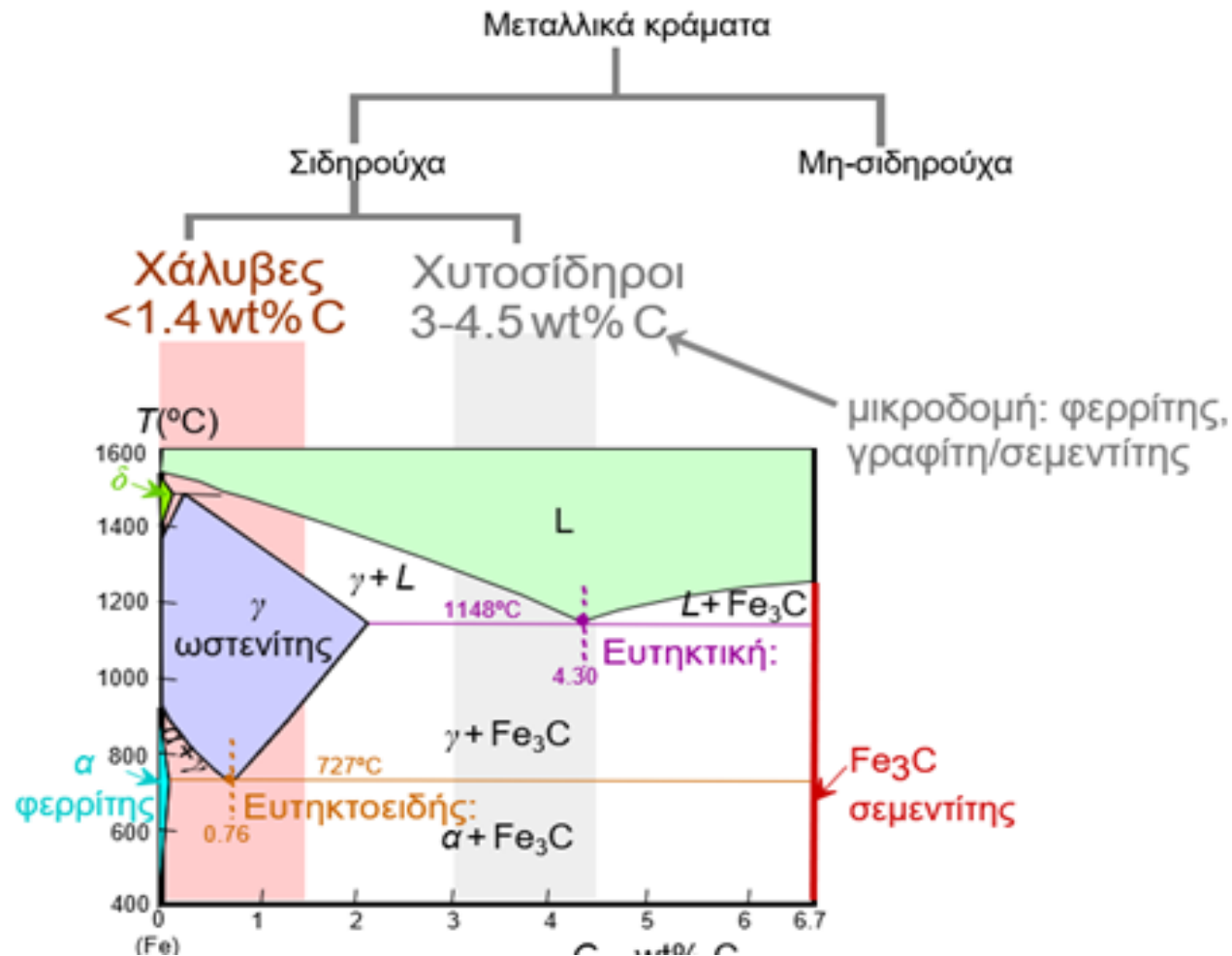
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τεχνολογία Υλικών Ι

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Δρ. Σκλήρη Ευαγγελία

Κατηγοριοποίηση Μεταλλικών Κραμάτων



❑ Μεταλλικά κράματα

Χωρίζονται σε:

- Σιδηρούχα → έχουν ως βασικό στοιχείο τον Fe
- Μη-σιδηρούχα → Al, Cu, Ti

❑ Σιδηρούχα κράματα

Χάλυβες

Περίπου:

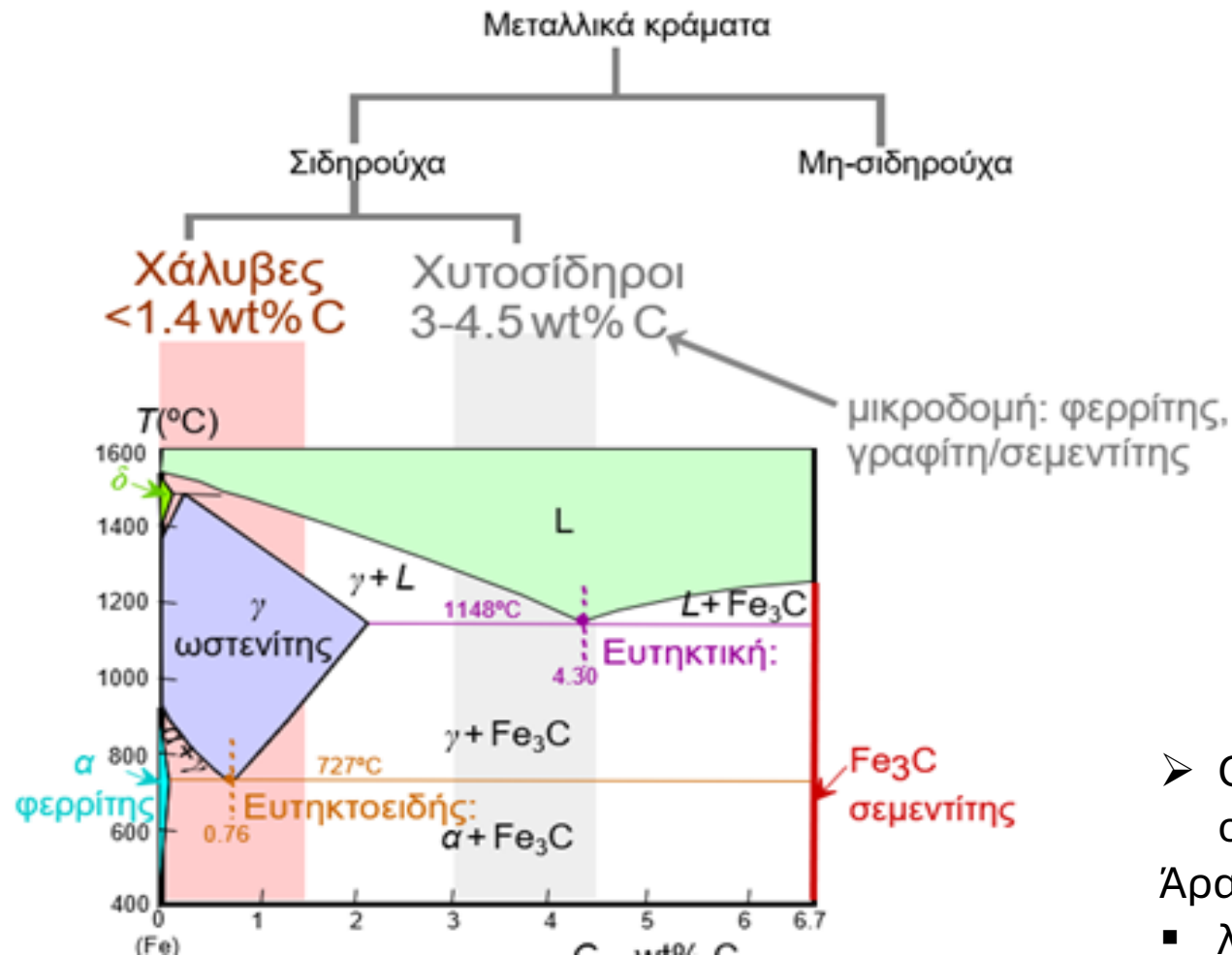
<math>< 1.4 \text{ wt\% C}</math>

- μικρότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα
- μεγαλύτερη ολκιμότητα
- καλύτερη κατεργασιμότητα

Η μικροδομή τους συνήθως περιέχει:

- φερρίτη
- περλίτη
- μπαινίτη
- μαρτενσίτη

Κατηγοριοποίηση Μεταλλικών Κραμάτων



□ Χυτοσίδηροι

Περίπου:

3 – 4.5 wt% C

- χυτεύονται εύκολα
- πιο ψαθυροί
- υψηλή αντοχή σε θλίψη

Η μικροδομή τους περιέχει:

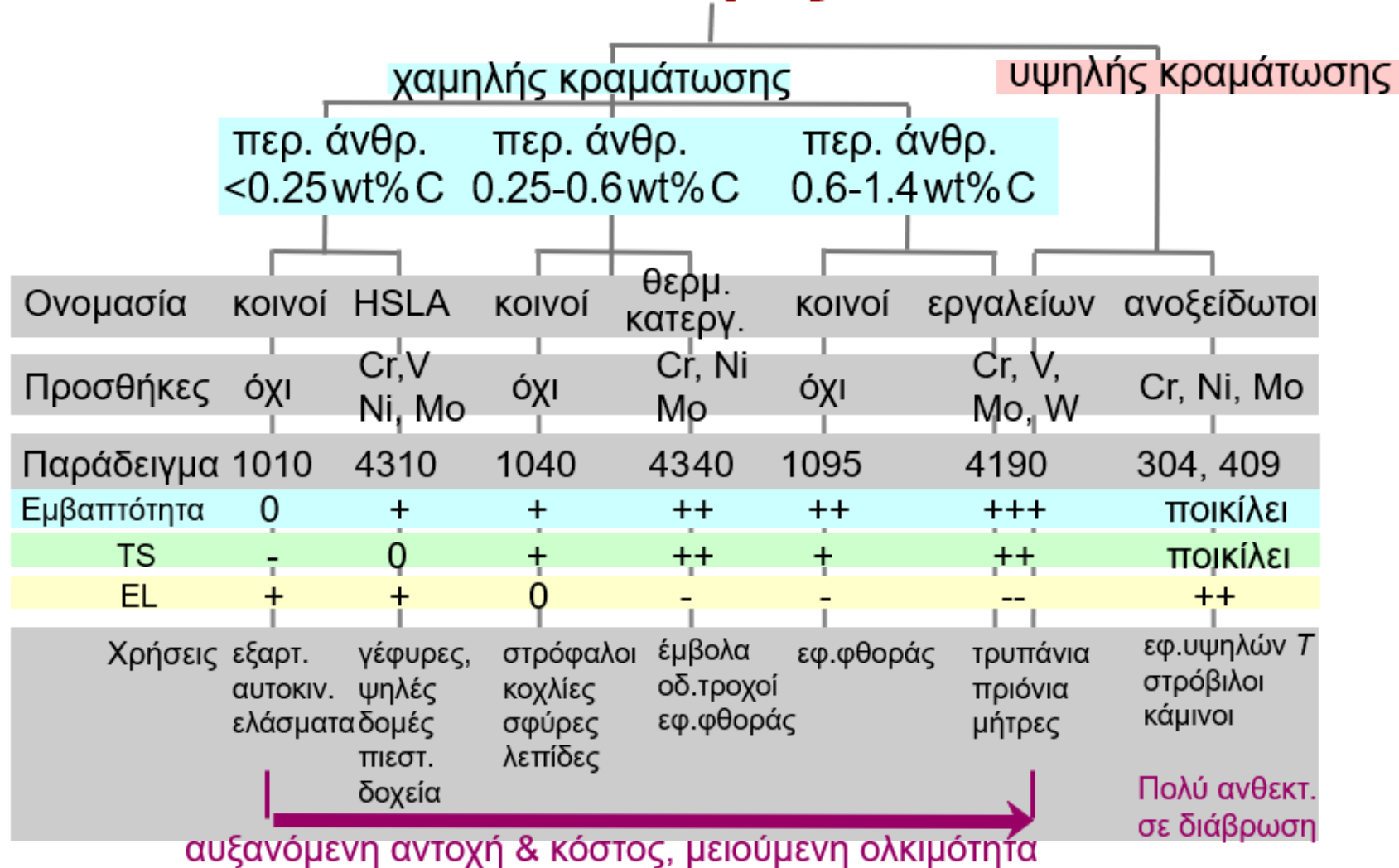
- φερρίτη
- γραφίτη ή/και σεμεντίτη

➤ Ο άνθρακας αυξάνει σκληρότητα και αντοχή, αλλά μειώνει ολκιμότητα

Άρα:

- λίγος C → χάλυβας → πιο ολκιμος
- πολύς C → χυτοσίδηρος → πιο σκληρός αλλά πιο ψαθυρός

Χάλυβες



Σιδηρούχα κράματα

Κράματα με βάση τον σίδηρο

Τυποποίηση χαλύβων American Iron and Steel Institute/Society of Automotive Engineers (AISI/SAE)

- Τα πρώτα δύο ψηφία δείχνουν ποια κραματικά στοιχεία υπάρχουν
- Τα τελευταία δύο ψηφία δείχνουν την περιεκτικότητα σε άνθρακα

Παράδειγμα: χάλυβας 1060 – κοινός ανθρακοχάλυβας με 0.60 wt% C

10xx Κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες

11xx Κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες (με προσθήκη θείου για βελτίωση κατεργασιμότητας)

15xx Mn (1.00 - 1.65%)

40xx Mo (0.20 ~ 0.30%)

43xx Ni (1.65 - 2.00%), Cr (0.40 - 0.90%), Mo (0.20 - 0.30%)

44xx Mo (0.5%)

όπου το xx υποδεικνύει wt% C x 100

Ανοξείδωτος χάλυβας >11% Cr

Χυτοσίδηροι

- Σιδηρούχα κράματα με περιεκτικότητα σε **C > 2.1 wt% C**
 - συνηθέστερα 3 - 4.5 wt% CΆρα έχουν πολύ περισσότερο άνθρακα από τους χάλυβες

➤ Λέγονται χυτοσίδηροι γιατί χύνονται πολύ εύκολα σε καλούπια (casting).

Έχουν:

- χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης
- μεγαλύτερη ρευστότητα όταν λιώνουν

Χρησιμοποιούνται για πολύπλοκα σχήματα, μεγάλα εξαρτήματα, εύκολη χύτευση.

Παραδείγματα:

- μπλοκ κινητήρων,
- σωλήνες
- βάσεις μηχανών

➤ Χαμηλή θερμοκρασία τήξης – εύκολα στη χύτευση

Ο υψηλός άνθρακας μειώνει τη θερμοκρασία τήξης του κράματος.

Άρα:

- λιώνει πιο εύκολα,
- ρέει καλύτερα μέσα στο καλούπι

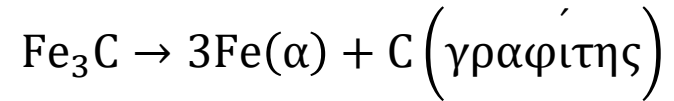
➤ Γενικά ψαθυρά

Οι χυτοσίδηροι συνήθως έχουν:

- μικρή ολκιμότητα
- μικρή αντοχή σε κρούση
- πιο εύκολη θραύση

➤ Επειδή έχουν πολύ άνθρακα, σχηματίζονται φάσεις όπως **γραφίτης** ή **σεμεντίτης**, που εμποδίζουν την πλαστική παραμόρφωση.

☐ Μετασχηματισμός σεμεντίτη



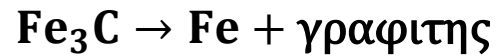
Ο σεμεντίτης (Fe_3C):

- δεν είναι πάντα **σταθερός θερμοδυναμικά**
- μπορεί να διασπαστεί σε:
 - φερρίτη ($\alpha\text{-Fe}$)
 - και γραφίτη

Γενικά αργή διαδικασία, απαιτεί χρόνο, αργή ψύξη, διάχυση

- Ο άνθρακας μπορεί να εμφανιστεί είτε ως σκληρός σεμεντίτης είτε ως γραφίτης, ανάλογα με την ψύξη.

Χυτοσίδηροι



Ο σχηματισμός γραφίτη προάγεται από

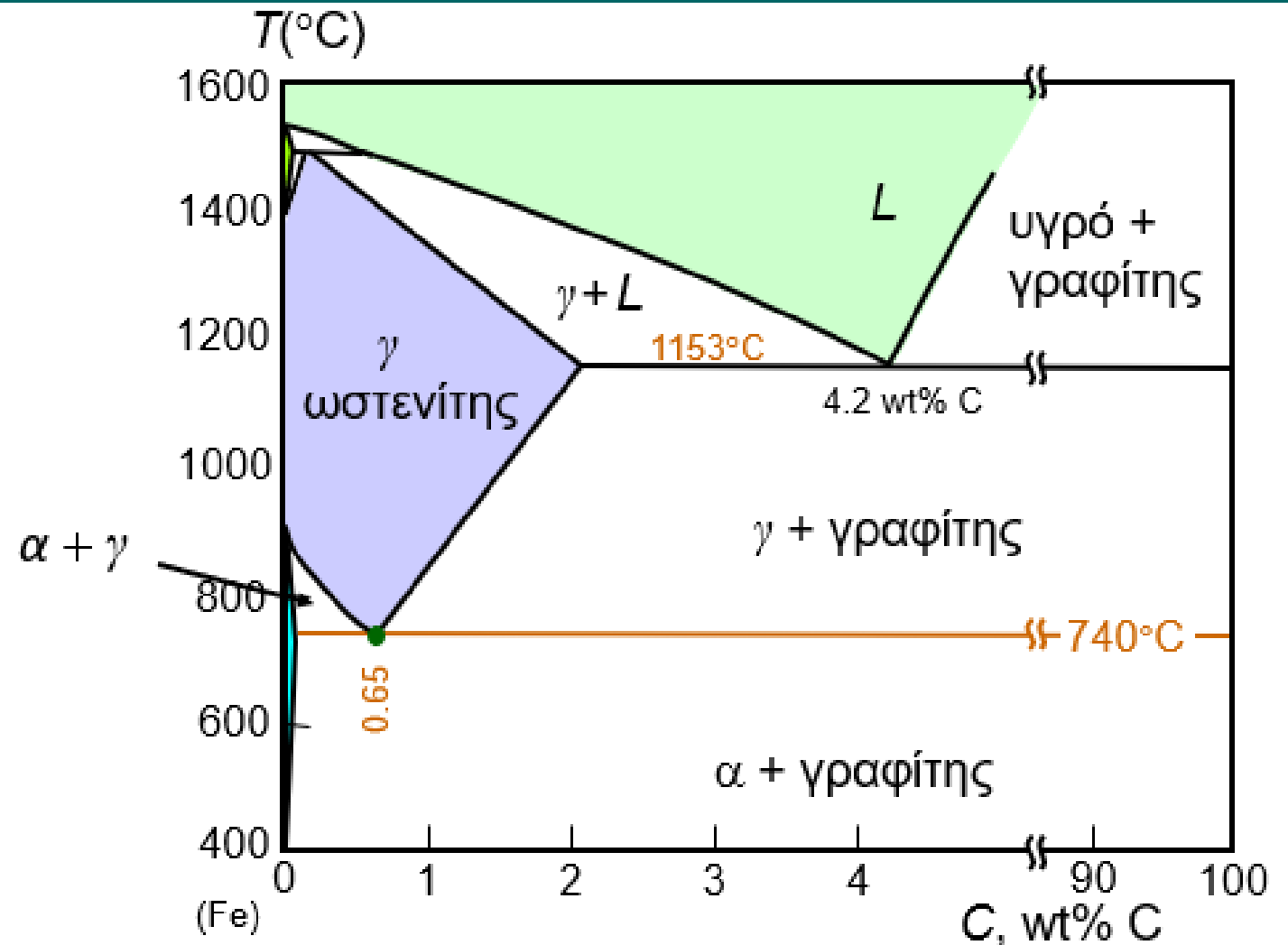
- την ύπαρξη Si > 1 wt%
- την αργή ψύξη

Αργή ψύξη

Για να σχηματιστεί γραφίτης χρειάζεται διάχυση άνθρακα και χρόνος.

Άρα η αργή ψύξη επιτρέπει στον άνθρακα να μετακινηθεί, και να σχηματίσει γραφίτη.

Η γρήγορη ψύξη αντίθετα παγιδεύει τον άνθρακα ως Fe_3C , άρα οδηγεί πιο εύκολα σε λευκό χυτοσίδηρο.

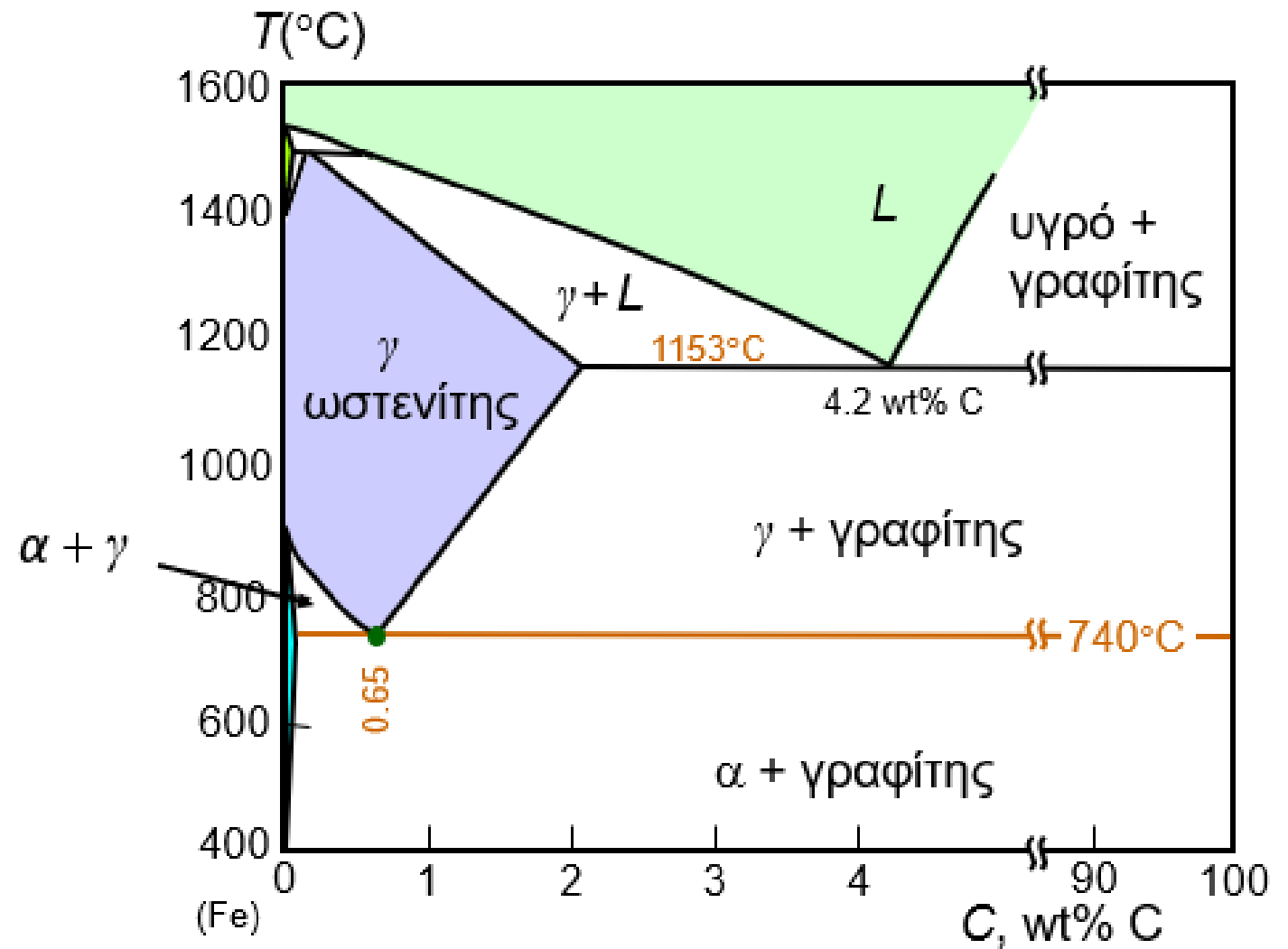
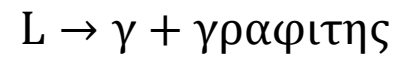


Χυτοσίδηροι

□ Ευτηκτική αντίδραση

- 4.2 wt% C
- 1153°C

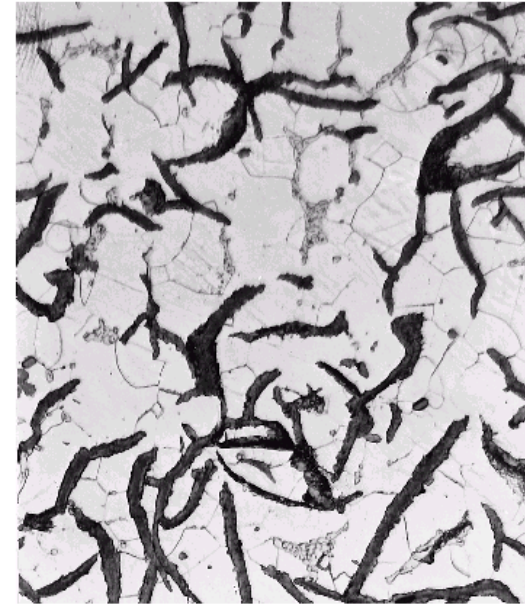
Εκεί γίνεται ευτηκτικός μετασχηματισμός:



Τύποι Χυτοσίδηρων

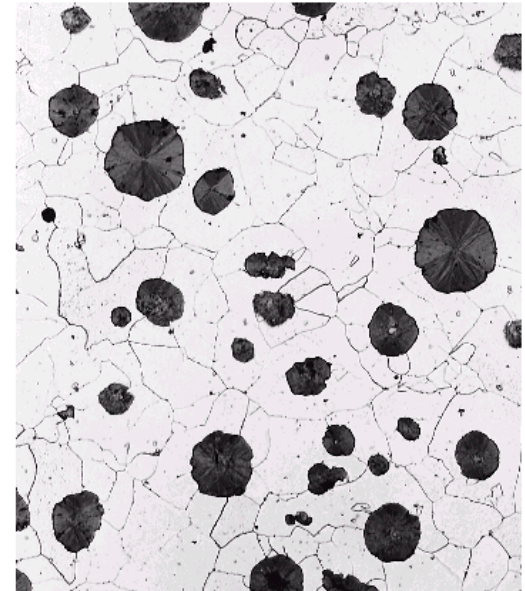
Φαιός χυτοσίδηρος

- περιέχει νιφάδες γραφίτη
- χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό και αυξημένη ψαθυρότητα, επειδή οι νιφάδες γραφίτη λειτουργούν ως συγκεντρωτές τάσεων
- υψηλή αντοχή σε θλίψη
- πολύ καλή απόσβεση κραδασμών και δονήσεων
- καλή αντοχή στη φθορά, καθώς ο γραφίτης δρα ως στερεό λιπαντικό και μειώνει την τριβή



Όλκιμος σίδηρος

- παράγεται με προσθήκη Mg και/ή Ce
- ο γραφίτης εμφανίζεται ως σφαιρίδια και όχι ως νιφάδες
- οι σφαιρικοί κόκκοι γραφίτη μειώνουν τη συγκέντρωση τάσεων
- συχνά, το υλικό μήτρας είναι περλίτης – μεγαλύτερη αντοχή και σκληρότητα αλλά μικρότερη ολκιμότητα



Τύποι Χυτοσίδηρων

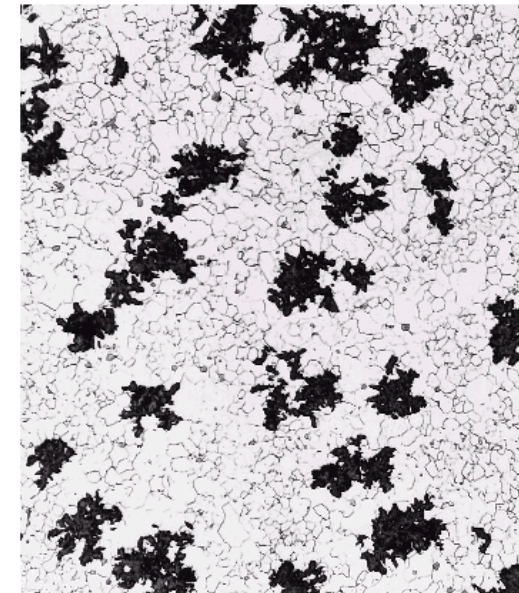
Λευκοσίδηρος

- χαμηλή περιεκτικότητα σε Si (< 1 wt%) και/ή γρήγορη ψύξη
- ο άνθρακας παραμένει κυρίως ως σεμεντίτης (Fe_3C) και δεν σχηματίζεται γραφίτης
- μικροδομή με περλίτη και σεμεντίτη
- πολύ υψηλή σκληρότητα και αντοχή στη φθορά
- πολύ ψαθυρό υλικό με μικρή ολκιμότητα



Μαλακτός σίδηρος

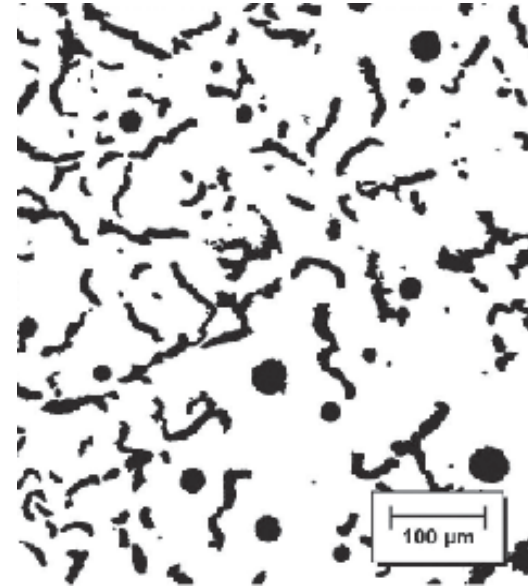
- παράγεται με θερμική κατεργασία λευκού χυτοσιδήρου στους $800\text{--}900^\circ\text{C}$
- κατά τη θερμική κατεργασία μέρος του σεμεντίτη διασπάται και σχηματίζεται γραφίτης
- ο γραφίτης εμφανίζεται ως συσσωματώματα (temper carbon)
- παρουσιάζει καλύτερη ολκιμότητα και δυσθραυστότητα από τον λευκό χυτοσίδηρο
- συνδυάζει ικανοποιητική αντοχή και κατεργασιμότητα



Τύποι Χυτοσίδηρων

Συμπαγής γραφιτικός χυτοσίδηρος

- σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα - Ο γραφίτης μεταφέρει σχετικά καλά τη θερμότητα.
- καλή αντίσταση σε θερμικό αιφνιδιασμό - απότομη αλλαγή θερμοκρασίας. Ο γραφίτης βοηθά να μειώνονται οι θερμικές τάσεις, άρα το υλικό δεν ραγίζει εύκολα.
- μειωμένη οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες



- Ο συμπαγής γραφιτικός χυτοσίδηρος συνδυάζει τη θερμική αγωγιμότητα του φαιού χυτοσιδήρου με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες

Τύποι Χυτοσίδηρων

- **Φαιός χυτοσίδηρος**

- καλύτερος σε απορρόφηση κραδασμών και θερμική αγωγιμότητα
- αλλά πιο εύθραυστος λόγω νιφάδων γραφίτη

- **Λευκοσίδηρος** ο πιο σκληρός και ανθεκτικός στη φθορά

αλλά πολύ ψαθυρός → σπάει εύκολα

- **Μαλακτός χυτοσίδηρος**

- βελτιωμένος λευκοσίδηρος
- καλύτερη ολκιμότητα και κατεργασιμότητα

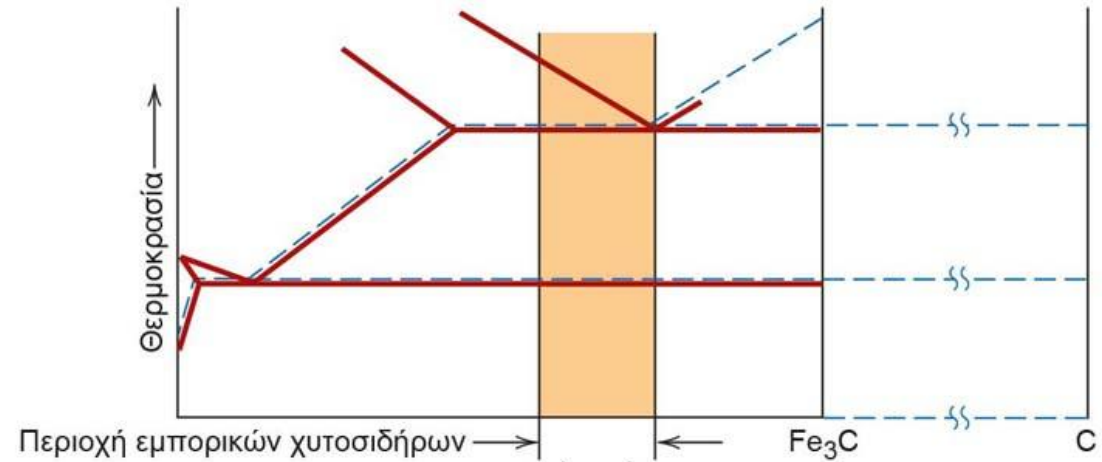
- **Σφαιροειδής (όλκιμος) χυτοσίδηρος**

- συνήθως οι καλύτερες συνολικά μηχανικές ιδιότητες
- υψηλή αντοχή + καλή ολκιμότητα επειδή ο γραφίτης είναι σφαιρικός και δεν συγκεντρώνει τάσεις

- **Συμπαγής γραφιτικός (CGI)**

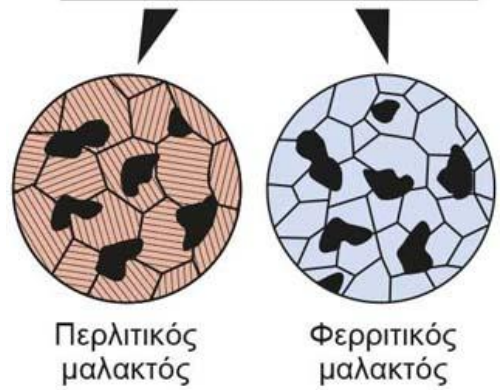
- ενδιάμεσος μεταξύ φαιού και σφαιροειδούς
- κρατά καλή θερμική αγωγιμότητα αλλά έχει πολύ καλύτερη αντοχή από τον φαιό

Παραγωγή Χυτοσίδηρων

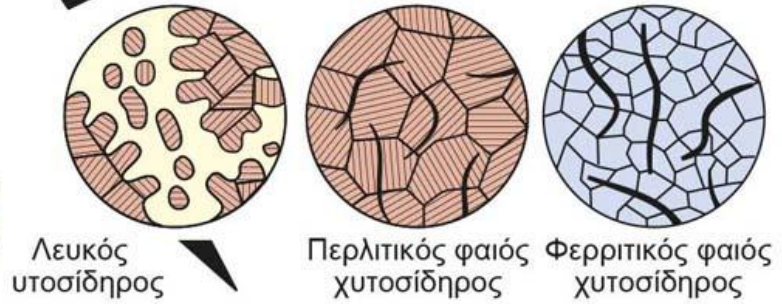


Αναθέρμανση: διάρκεια ~700°C για 30 + h

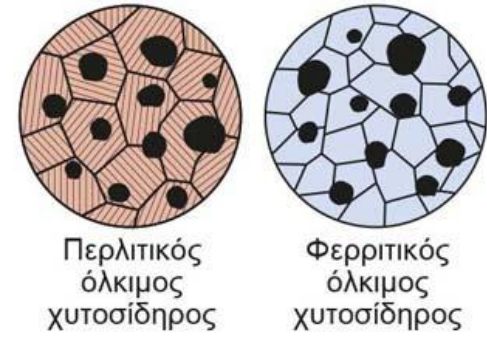
Ταχεία ψύξη	Αργή ψύξη
$P + G_r$	$\alpha + G_r$



Ταχεία ψύξη	Ενδιάμεση	Αργή ψύξη
$P + Fe_3C$	$P + G_f$	$\alpha + G_f$



Ενδιάμεση	Αργή ψύξη
$P + G_n$	$\alpha + G_n$



Γρήγορη ψύξη
 → περισσότερο Fe_3C
 → λευκοσίδηρος

Αργή ψύξη
 → περισσότερο γραφίτης
 → φαιός/όλκιμος

Mg/Ce
 → σφαιρικός γραφίτης
 → όλκιμος χυτοσίδηρος

❑ Περιορισμοί των σιδηρούχων κραμάτων

➤ Σχετικά υψηλές πυκνότητες

Τα σιδηρούχα κράματα έχουν μεγάλη πυκνότητα, δηλαδή είναι βαριά υλικά.

Ο σίδηρος έχει πυκνότητα περίπου 7.8 g/cm^3

Αυτό είναι πρόβλημα όταν θέλουμε ελαφριές κατασκευές,

Γι' αυτό συχνά χρησιμοποιούνται κράματα Al, Ti, σύνθετα υλικά.

➤ Σχετικά χαμηλές ηλεκτρικές αγωγιμότητες

Οι χάλυβες άγουν το ρεύμα αλλά όχι τόσο καλά όσο Cu , Al , Ag

Τα κραματικά στοιχεία, ο άνθρακας και οι ατέλειες σκεδάζουν τα ηλεκτρόνια και δυσκολεύουν τη ροή τους.

➤ Μη ικανοποιητική αντίσταση σε διάβρωση

Ο σίδηρος οξειδώνεται εύκολα και σχηματίζει σκουριά σε παρουσία οξυγόνου και υγρασίας

Μη-σιδηρούχα Κράματα

• Κράματα Cu

Ορείχαλκος: πρόσμειξη Zn
(κοσμήματα, νομίσματα,
αντοχή σε διάβρωση)

Μπρούντζος: προσμείξεις
Sn, Al, Si, Ni (τριβείς,
τροχοί προσγείωσης)

Cu-Be: ισχυροποίηση
με κατακρήμνιση
για αντοχή

• Κράματα Ti

-σχετικά χαμηλή ρ : 4.5 g/cm^3
έναντι 7.9 του χάλυβα
-δραστικά σε υψηλές T
-διαστημ. εφαρμ.

Μη-σιδηρούχα κράματα

• Κράματα Al

-Χαμηλή ρ : 2.7 g/cm^3
-προσθήκη Cu, Mg, Si, Mn, Zn
-στερεό διάλυμα ή ισχυροποίηση
με κατακρήμνιση
(εξαρτ. αεροσκαφών
& συσκευασία)

• Κράματα Mg

-πολύ χαμηλή ρ : 1.7 g/cm^3
-αναφλέγονται εύκολα
αεροσκάφη, πύραυλοι

• Πυρίμαχα μέταλλα

-υψηλές T τήξης
-Nb, Mo, W, Ta

• Ευγενή μέταλλα

-Ag, Au, Pt
-ανθεκτικά σε οξειδ./διάβρ.

☐ Θερμική κατεργασία (Heat Treatment)

Οι θερμικές κατεργασίες εφαρμόζονται στους χάλυβες με σκοπό την τροποποίηση της μικροδομής τους και συνεπώς βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους.

Με κατάλληλη θέρμανση και ελεγχόμενη ψύξη μπορούμε να μεταβάλουμε:

- τη σκληρότητα,
- την αντοχή
- την ολκιμότητα
- τη δυσθραυστότητα

Μία θερμική κατεργασία περιλαμβάνει συνήθως:

- Θέρμανση του υλικού
- Παραμονή σε συγκεκριμένη θερμοκρασία
- Ψύξη με ελεγχόμενο ρυθμό

☐ Θερμική Κατεργασία Χαλύβων (Heat Treatment of Steels)

- Για χάλυβες υψηλής αντοχής, ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικών ιδιοτήτων επιτυγχάνεται όταν σχηματίζεται κυρίως μικροδομή μαρτενσίτη σε όλη τη διατομή του υλικού.
- Μετά τη βαφή, ακολουθεί κατεργασία επαναφοράς (tempering), κατά την οποία ο μαρτενσίτης μετατρέπεται σε μαρτενσίτη επαναφοράς, βελτιώνοντας τη δυσθραυστότητα και την ολκιμότητα.

❑ Εμβαιπτότητα (Hardenability)

➤ Η εμβαιπτότητα εκφράζει την ικανότητα ενός χάλυβα να σχηματίζει μαρτενσίτη σε μεγάλο βάθος κατά τη βαφή.

Επηρεάζεται κυρίως από:

- τη χημική σύσταση
 - το μέσο βαφής
 - ρυθμό ψύξης.
- Ο προσδιορισμός της πραγματοποιείται με τη δοκιμή Jominy end-quench, από την οποία προκύπτουν οι καμπύλες εμβαιπτότητας.

❑ Δοκιμή Jominy (Jominy End-Quench Test)

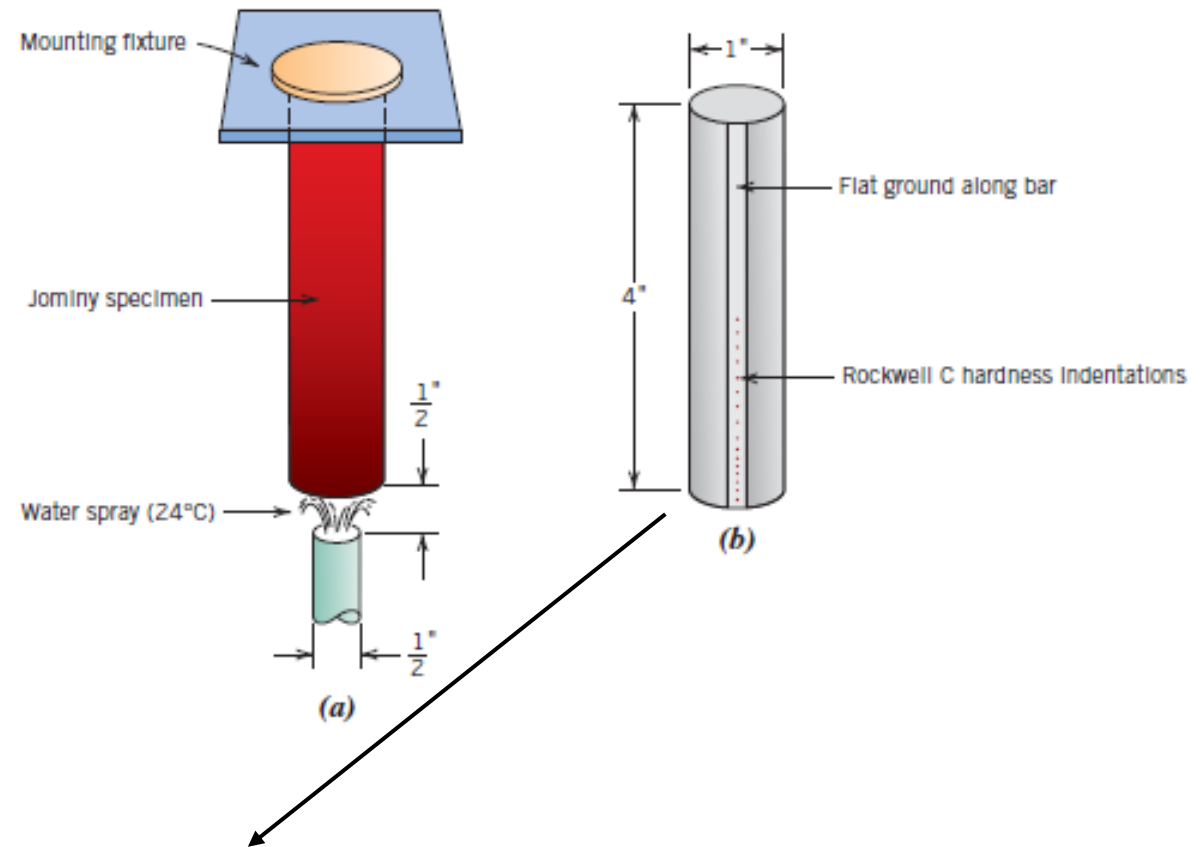
Σκοπός: Προσδιορισμός της εμβαπτότητας ενός χάλυβα.

Ένα κυλινδρικό δοκίμιο χάλυβα:

- αρχικά θερμαίνεται ώστε να σχηματιστεί ωστενίτης
- μετά ψύχεται μόνο από το ένα άκρο με πίδακα νερού.

Άρα:

- το κάτω άκρο ψύχεται πολύ γρήγορα
- όσο απομακρυνόμαστε από αυτό, η ψύξη γίνεται πιο αργή.



Μετά τη βαφή:

λειαίνεται επίπεδη επιφάνεια κατά μήκος του δοκιμίου, και πραγματοποιούνται μετρήσεις σκληρότητας Rockwell C. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η μεταβολή της σκληρότητας με την απόσταση από το βαμμένο άκρο.

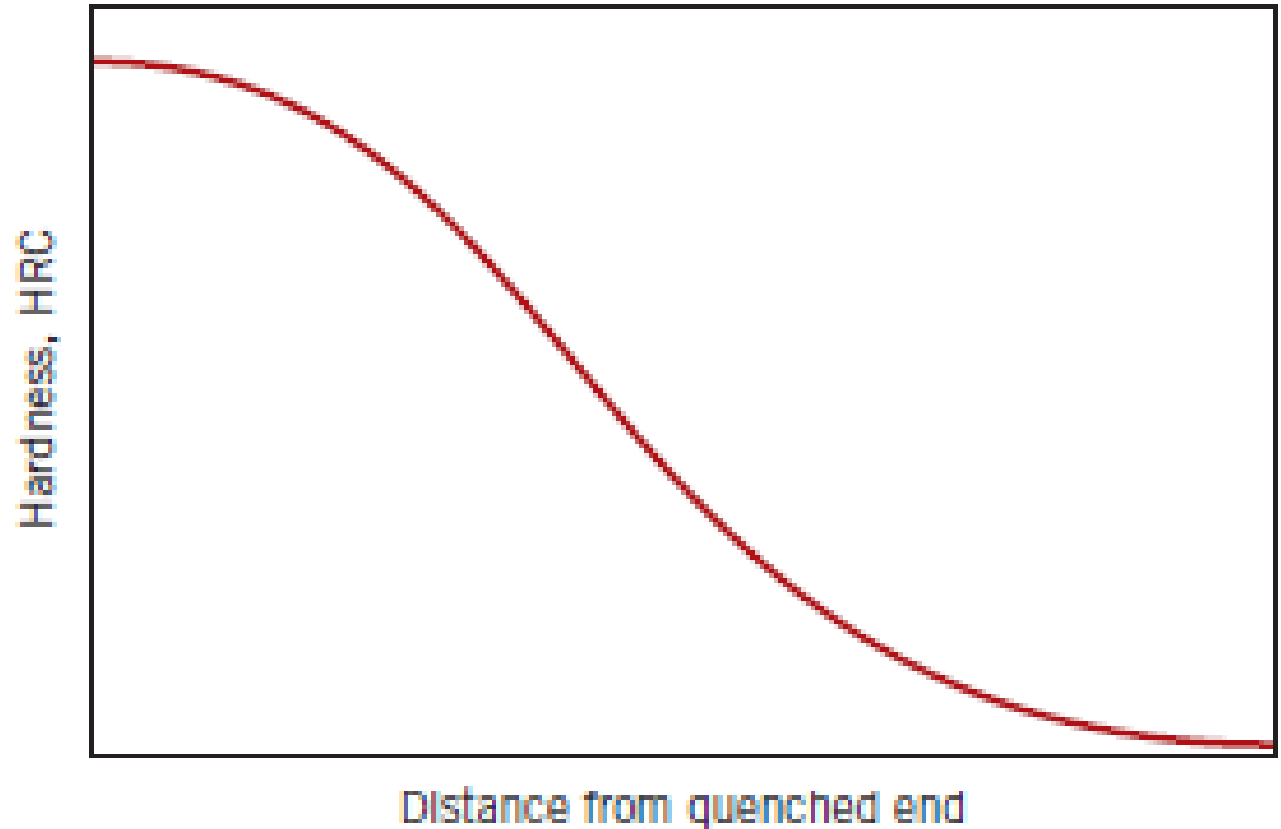
Θερμικές Κατεργασίες

- Η καμπύλη εμβαπτότητας απεικονίζει τη μεταβολή της σκληρότητας σε συνάρτηση με την απόσταση από το βαμμένο άκρο ενός δοκιμίου Jominy.
- Η σκληρότητα μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το βαμμένο άκρο, επειδή μειώνεται ο ρυθμός ψύξης, και σχηματίζεται μικρότερη ποσότητα μαρτενσίτη.
- Κάθε χάλυβας παρουσιάζει διαφορετική καμπύλη εμβαπτότητας, ανάλογα με τη χημική σύσταση και τα κραματικά στοιχεία.

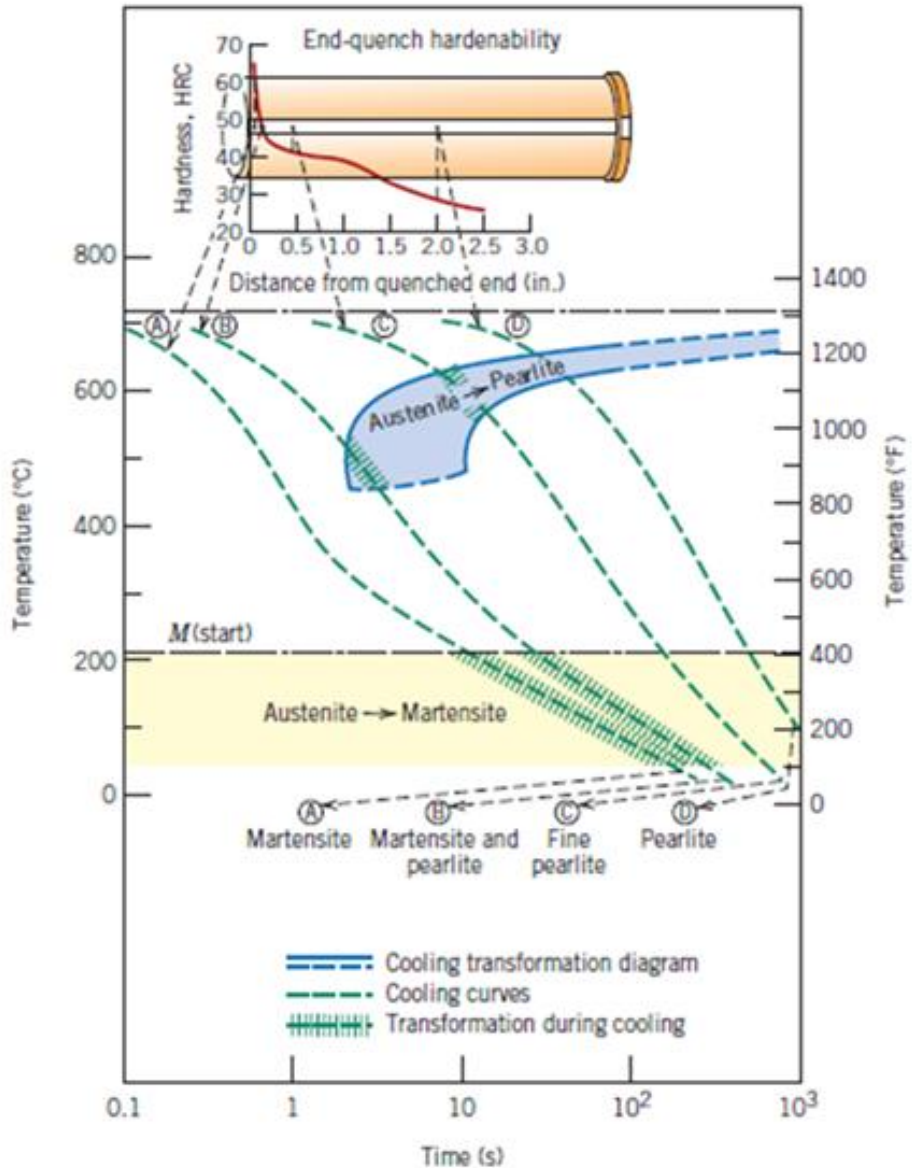
Μέσα βαφής

- Το μέσο βαφής επηρεάζει τον βαθμό σχηματισμού μαρτενσίτη.

- Συνήθη μέσα βαφής:
 1. νερό → πιο έντονη βαφή
 2. υδατικά πολυμερή
 3. λάδι
 4. αέρας → ηπιότερη βαφή



Θερμικές Κατεργασίες



Το κυλινδρικό δοκίμιο ψύχεται μόνο από τη μία άκρη

- κοντά στο άκρο → πολύ γρήγορη ψύξη
- μακριά από το άκρο → πιο αργή ψύξη
- Η κόκκινη καμπύλη δείχνει πώς αλλάζει η σκληρότητα κατά μήκος του δοκιμίου.
- κοντά στο άκρο → μεγάλη σκληρότητα (κοντά στο άκρο σχηματίζεται περισσότερο μαρτενσίτης)
- πιο μακριά → μικρότερη σκληρότητα

Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε διαφορετικό σημείο του δοκιμίου:

- A → πολύ κοντά στο ψυχόμενο άκρο → πολύ γρήγορη ψύξη
- D → πιο μακριά → αργή ψύξη

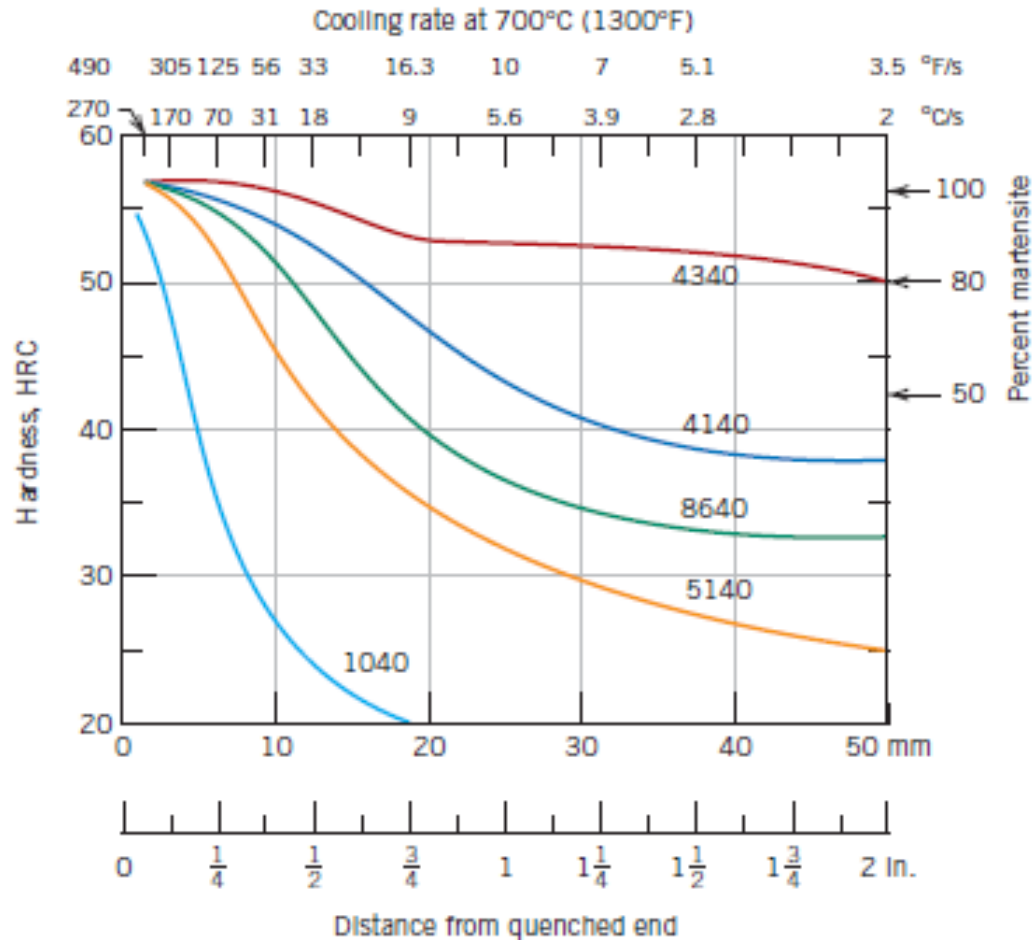
Οι πράσινες καμπύλες είναι διαφορετικοί ρυθμοί ψύξης.

Μπλε καμπύλες - διάγραμμα μετασχηματισμού

Είναι CCT διάγραμμα

Η περιοχή ανάμεσα στις μπλε γραμμές είναι περιοχή σχηματισμού περλίτη

Θερμικές Κατεργασίες



- Η σκληρότητα μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το ψυχόμενο άκρο.
- Ο χάλυβας 4340 διατηρεί υψηλή σκληρότητα σε μεγάλο βάθος.
- Ο χάλυβας 1040 χάνει γρήγορα τη σκληρότητά του.
- Η διαφορά οφείλεται στα κραμικά στοιχεία που αυξάνουν την εμβαπτότητα.

- Τα κραμικά στοιχεία αυξάνουν την εμβαπτότητα επειδή **καθυστερούν τους διαχυτικούς μετασχηματισμούς**
 - δυσκολεύουν τη διάχυση του άνθρακα άρα τον σχηματισμό περλίτη και μπαινίτη.
 - σχηματισμός περισσότερο μαρτενσίτη με αποτέλεσμα μεγαλύτερη σκληρότητα

Austenite → Martensite

περισσότερος μαρτενσίτης → μεγαλύτερη σκληρότητα → μεγαλύτερη εμβαπτότητα

Θερμικές Κατεργασίες

□ Ρυθμός ψύξης στο εσωτερικό του δοκιμίου

Η ψύξη δεν είναι ίδια σε όλη τη διατομή του χάλυβα.
Η επιφάνεια ψύχεται ταχύτερα από τον πυρήνα.

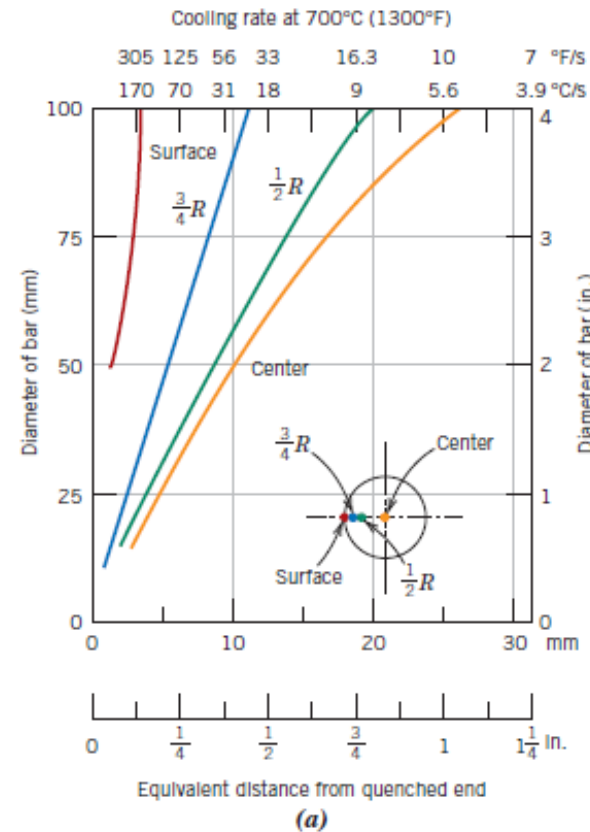
Άρα:

- στην επιφάνεια σχηματίζεται περισσότερο μαρτενσίτης
- ενώ στο κέντρο η ψύξη είναι πιο αργή

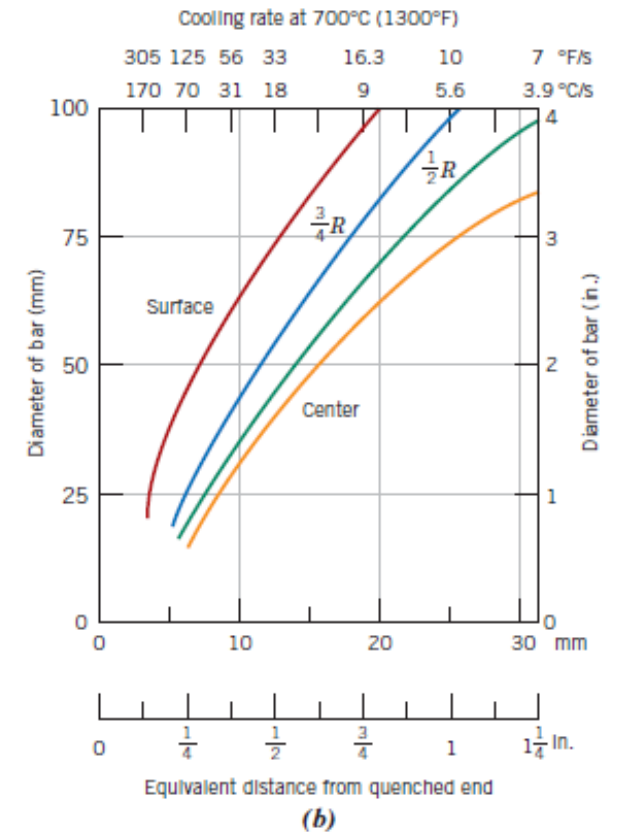
Στα διαγράμματα φαίνεται ο ρυθμός ψύξης:

- στην επιφάνεια,
- στο $\frac{3}{4}$ της ακτίνας,
- στο μισό της ακτίνας,
- και στο κέντρο

Το νερό προκαλεί μεγαλύτερους ρυθμούς ψύξης από το λάδι.



νερό



λάδι

Θερμικές Κατεργασίες

➤ πώς μεταβάλλεται η σκληρότητα από την επιφάνεια προς το κέντρο ενός κυλινδρικού δοκιμίου μετά τη βαφή

(a) Συγκρίνει διαφορετικούς χάλυβες ίδιας διαμέτρου

(50 mm) και βαφή σε νερό.

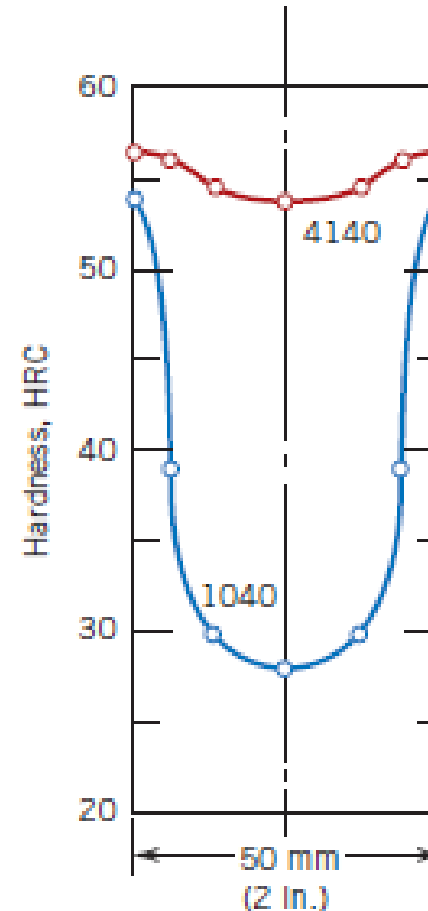
Ο χάλυβας 1040 (μπλε) χάνει πολύ τη σκληρότητά του στο κέντρο.

Ο χάλυβας 4140 (κόκκινο) διατηρεί υψηλή σκληρότητα σχεδόν παντού.

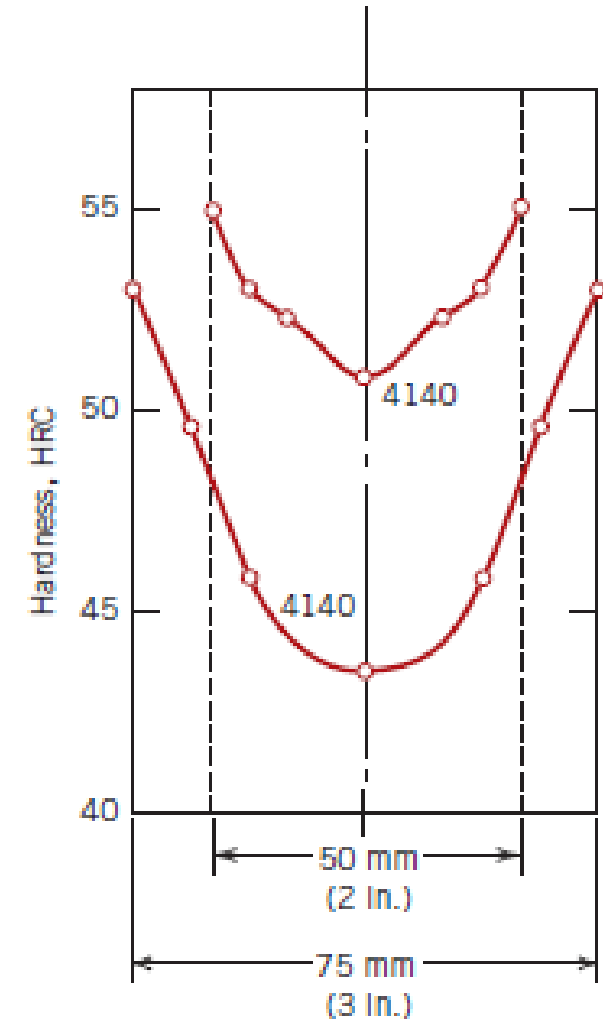
➤ **Ο χάλυβας 4140 έχει μεγαλύτερη εμβαπτότητα**

(b) Συγκρίνει τον ίδιο χάλυβα 4140 αλλά σε διαφορετικές διαμέτρους και βαφή σε λάδι.

▪ όσο μεγαλώνει η διάμετρος → τόσο πιο αργά ψύχεται το κέντρο → πέφτει περισσότερο η σκληρότητα στον πυρήνα



(a)



(b)

Θερμικές Κατεργασίες

☐ Μετά από επαναφορά

(a) Αντοχή σε εφελκυσμό (Tensile strength)

• Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία επαναφοράς → η αντοχή μειώνεται

• Όσο μικραίνει η διάμετρος → η αντοχή αυξάνεται

➤ Η επαναφορά μαλακώνει τον μαρτενσίτη.

➤ Τα μικρά δοκίμια ψύχθηκαν πιο γρήγορα → σχημάτισαν περισσότερο μαρτενσίτη

(b) Όριο διαρροής (Yield strength)

Δείχνει την τάση όπου αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση.

▪ ↑ θερμοκρασία επαναφοράς → ↓ όριο διαρροής

• μικρότερη διάμετρος → μεγαλύτερο όριο διαρροής

▪ η επαναφορά μειώνει τη σκληρότητα και την αντοχή.

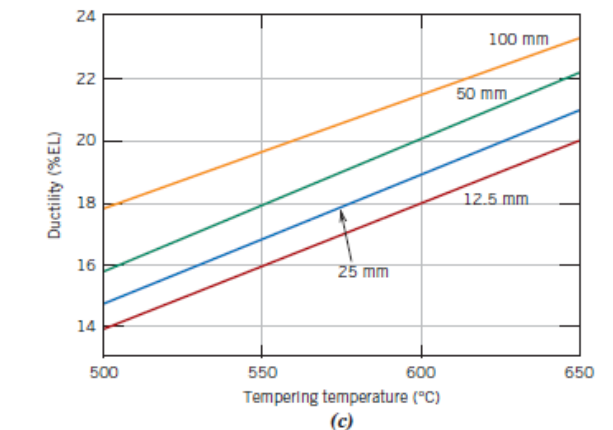
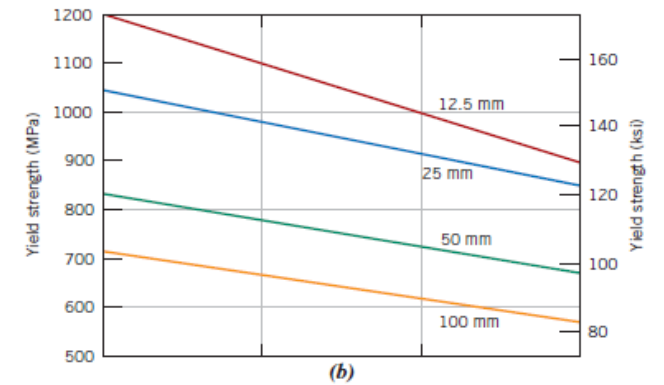
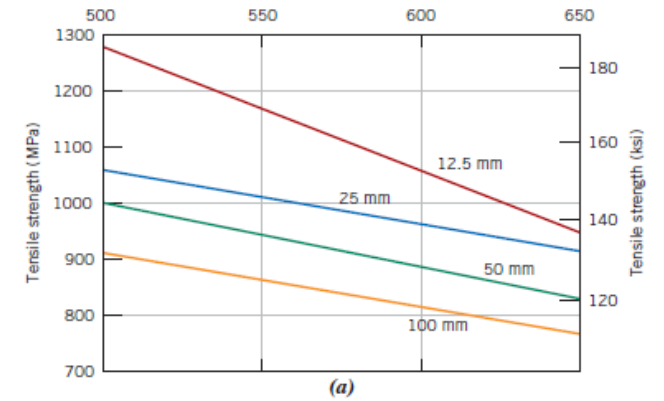
(c) Ductility (%EL) – Ολκιμότητα

όσο αυξάνεται η θερμοκρασία επαναφοράς → αυξάνεται η ολκιμότητα.

όσο αυξάνεται η διάμετρος → αυξάνεται η ολκιμότητα.

Η επαναφορά κάνει τον μαρτενσίτη λιγότερο εύθραυστο

Τα μεγάλα δοκίμια έχουν λιγότερο μαρτενσίτη



❑ Κατακρήμνιση (Precipitation Hardening)

- Ορισμένα κράματα μπορούν να ενισχυθούν μέσω **σκλήρυνσης με κατακρήμνιση** (precipitation hardening).
- Η ενίσχυση οφείλεται στον σχηματισμό πολύ μικρών σωματιδίων δεύτερης φάσης (precipitates).

Βασικά στάδια

Ο έλεγχος του μεγέθους των σωματιδίων και της αντοχής επιτυγχάνεται μέσω δύο θερμικών κατεργασιών:

1. **Θερμική κατεργασία διαλύματος (Solution Heat Treatment)**
2. **Θερμική κατεργασία κατακρήμνισης (Precipitation Heat Treatment)**

☐ Κατεργασία Διάλυσης (Solution Heat Treatment)

Το κράμα θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία ώστε:

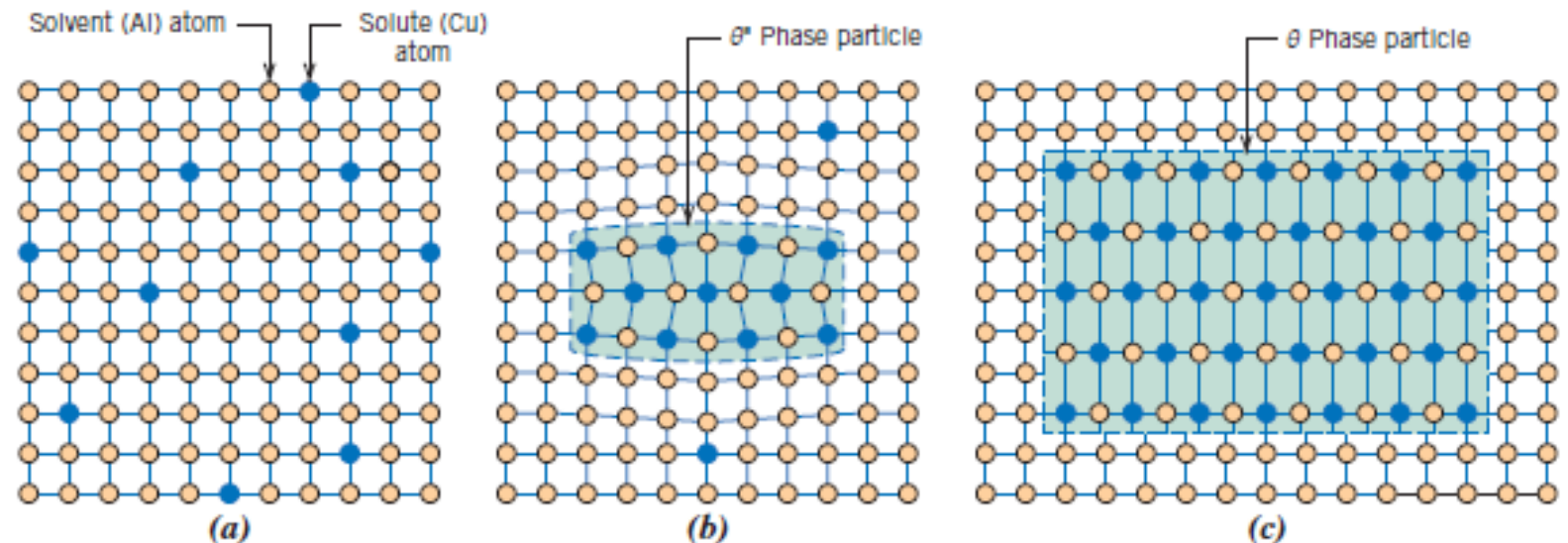
- όλα τα άτομα διαλυμένης ουσίας να διαλυθούν πλήρως
- σχηματισμός μία μόνο φάσης (μονοφασικό στερεό διάλυμα)
- Μετά γίνεται γρήγορη ψύξη (βαφή).

Η γρήγορη ψύξη (βαφή) διατηρεί την υπέρκορη στερεά διάλυση και αποτρέπει τον άμεσο σχηματισμό precipitates.

□ Κατεργασία Κατακρήμνισης - Precipitation Treatment (Aging)

Το υλικό θερμαίνεται ξανά αλλά σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

- η διάχυση πραγματοποιείται αργά,
- και σχηματίζονται μικροσκοπικά precipitates δεύτερης φάσης.
- Οι διαταραχές πρέπει να κινηθούν για να παραμορφωθεί το υλικό.
- Τα precipitates λειτουργούν ως εμπόδια στην κίνηση των διαταραχών.
- Επομένως απαιτείται μεγαλύτερη τάση για πλαστική παραμόρφωση.
- Άρα αυξάνεται η σκληρότητα και η αντοχή.



❑ Υπεργήρανση (Overaging)

Σε μεγάλους χρόνους θερμικής κατεργασίας:

- τα κατακρημνίσματα (precipitates) μεγαλώνουν
- γίνονται πιο αραιά και εμποδίζουν λιγότερο αποτελεσματικά τις διαταραχές

Αποτέλεσμα:

- μειώνεται η αντοχή
- μειώνεται η σκληρότητα.

Επίδραση χρόνου και θερμοκρασίας

Η αντοχή και η σκληρότητα:

- αρχικά αυξάνονται,
- φτάνουν σε μέγιστη τιμή
- μειώνονται λόγω υπεργήρανσης.

➤ Η υπεργήρανση επιταχύνεται με αύξηση της θερμοκρασίας.

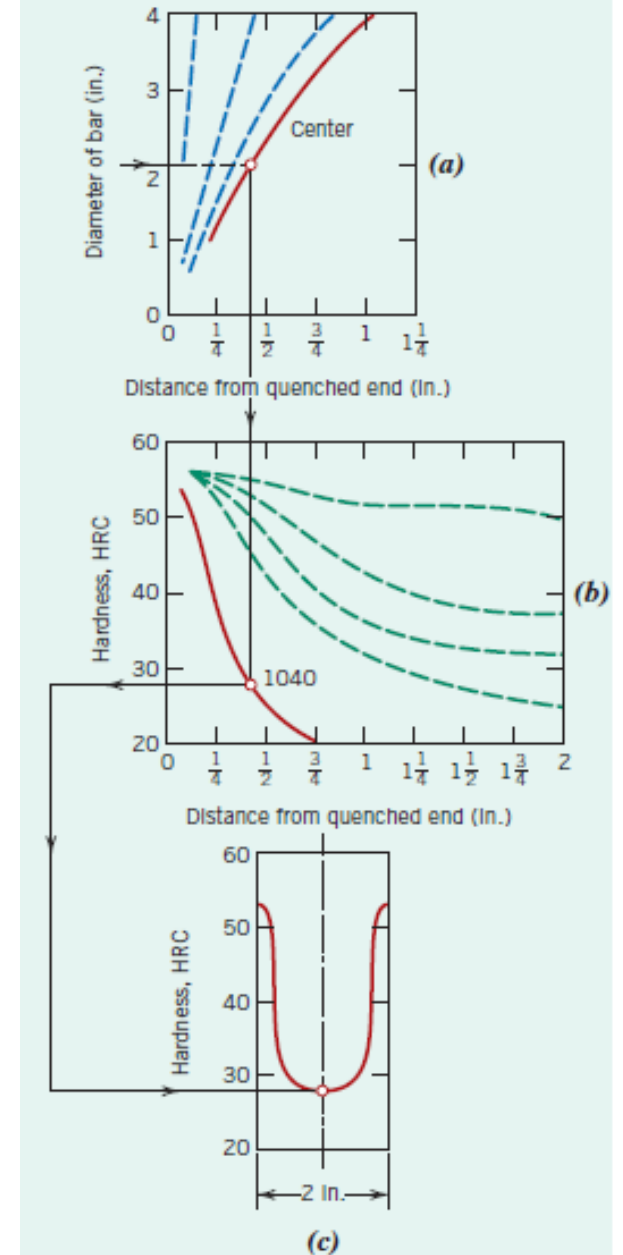
Θερμικές Κατεργασίες

Υπολογίστε την ακτινική κατανομή σκληρότητας ενός κυλινδρικού δοκιμίου χάλυβα 1040 διαμέτρου 50 mm, το οποίο έχει υποστεί βαφή σε μέτρια αναδύομενο νερό.

Απάντηση:

- Υπολογίζεται ο ρυθμός ψύξης (σε όρους ισοδύναμης απόστασης Jominy end-quench) στο κέντρο, στο μέσο της ακτίνας και στα τρία τέταρτα της ακτίνας του κυλινδρικού δοκιμίου.
- Στη συνέχεια, ο ρυθμός ψύξης σε καθεμία από αυτές τις ακτινικές θέσεις μετατρέπεται σε τιμή σκληρότητας χρησιμοποιώντας διάγραμμα εμβαπτότητας για το συγκεκριμένο κράμα.
- Τέλος, το προφίλ σκληρότητας προσδιορίζεται σχεδιάζοντας τη σκληρότητα ως συνάρτηση της ακτινικής θέσης.

Radial Position	Equivalent Distance from Quenched End [mm (in.)]	Hardness (HRC)
Center	9.5 ($\frac{3}{8}$)	28
Midradius	8 ($\frac{5}{16}$)	30
Three-quarters radius	4.8 ($\frac{3}{16}$)	39
Surface	1.6 ($\frac{1}{16}$)	54



Figures adapted from:

Materials Science and Engineering: An Introduction (W. D. Callister Jr. & D. Rethwisch),
10th ed., Chapter 11.