



Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

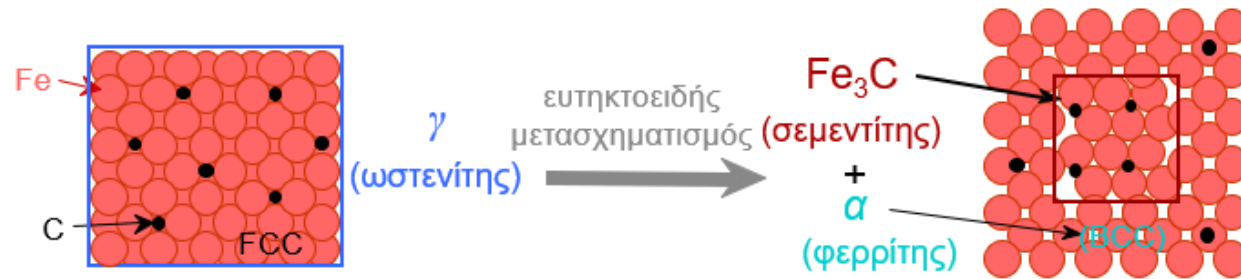
Τεχνολογία Υλικών Ι

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Δρ. Σκλήρη Ευαγγελία

Μετασχηματισμοί Φάσεων

- Ο μετασχηματισμός από μία φάση σε μία άλλη απαιτεί χρόνο.
- Χρειάζεται χρόνος ώστε τα άτομα να μετακινηθούν και να σχηματίσουν νέα δομή.



Στο παράδειγμα του χάλυβα:

Αρχικά έχουμε γ-ωστενίτη (FCC δομή), όπου ο άνθρακας διαλύεται μέσα στο Fe.

Κατά την ψύξη, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται ευτηκτοειδώς σε:

- α-φερρίτη
- Fe₃C (σεμεντίτη)

Αυτό απαιτεί:

1. διάχυση ατόμων C
2. αναδιοργάνωση της κρυσταλλικής δομής,
3. χρόνο

Μετασχηματισμοί Φάσεων

1. Ο ρυθμός μετασχηματισμού εξαρτάται από θερμοκρασία και χρόνο

Σε υψηλές θερμοκρασίες τα άτομα κινούνται πιο εύκολα → γρήγορη διάχυση.

Σε χαμηλές θερμοκρασίες η κίνηση δυσκολεύει → αργός μετασχηματισμός.

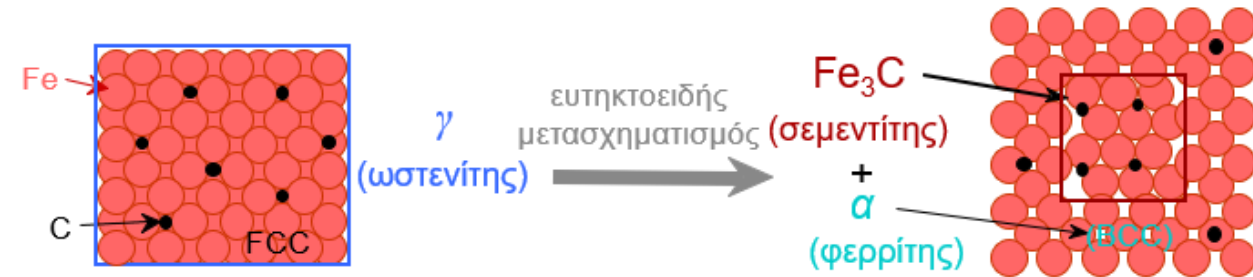
Άρα:

- αργή ψύξη → προλαβαίνει να σχηματιστεί δομή ισορροπίας,
- γρήγορη ψύξη → δεν προλαβαίνει να σχηματιστεί ο μετασχηματισμός

➤ Αν ψύξουμε πολύ γρήγορα, τα άτομα δεν προλαβαίνουν να διαχυθούν.

Τότε δημιουργούνται **δομές μη-ισορροπίας**, όπως: **μαρτενσίτης**

Δηλαδή δομές που δεν θα υπήρχαν αν το υλικό έμενε αρκετό χρόνο σε ισορροπία.



Πολλές φορές οι δομές μη-ισορροπίας έχουν καλύτερες ιδιότητες.

Παράδειγμα:

Ο μαρτενσίτης είναι πολύ πιο σκληρός και ανθεκτικός από τη δομή ισορροπίας.

Άρα:

- δεν θέλουμε πάντα ισορροπία
- ελέγχουμε την ψύξη για να πάρουμε τις ιδιότητες που θέλουμε.

Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Πυρήνωση

- οι πυρήνες λειτουργούν ως “πρότυπα” βάσει των οποίων αναπτύσσονται οι κρύσταλλοι
 - για να σχηματιστούν πυρήνες, ο ρυθμός προσθήκης ατόμων στον πυρήνα πρέπει να είναι ταχύτερος από τον ρυθμό απώλειας ατόμων
 - αφού σχηματιστούν πυρήνες, η διαδικασία κρυσταλ. ανάπτυξης εξελίσσεται μέχρι να επιτευχθεί κατάσταση ισορροπίας
-
- Η ΔT είναι πόσο απέχει η θερμοκρασία από τη θερμοκρασία ισορροπίας μετασχηματισμού.
 - Στην ψύξη \rightarrow λέγεται **υπερψύξη**
 - Στη θέρμανση \rightarrow λέγεται **υπερθέρμανση**
 - Όσο μεγαλύτερη η $\Delta T \rightarrow$ τόσο μεγαλύτερη η “**κινητήριος δύναμη**” άρα τόσο ευκολότερα δημιουργούνται πυρήνες.
-
- **μικρή $\Delta T \rightarrow$ αργός ρυθμός πυρήνωσης – λίγοι πυρήνες – μεγάλοι κρύσταλλοι**
 - **μεγάλη $\Delta T \rightarrow$ ταχύς ρυθμός πυρήνωσης – πολλοί πυρήνες – μικροί κρύσταλλοι**

☐ Στερεοποίηση: Τύποι πυρήνωσης

Ομοιογενής πυρήνωση

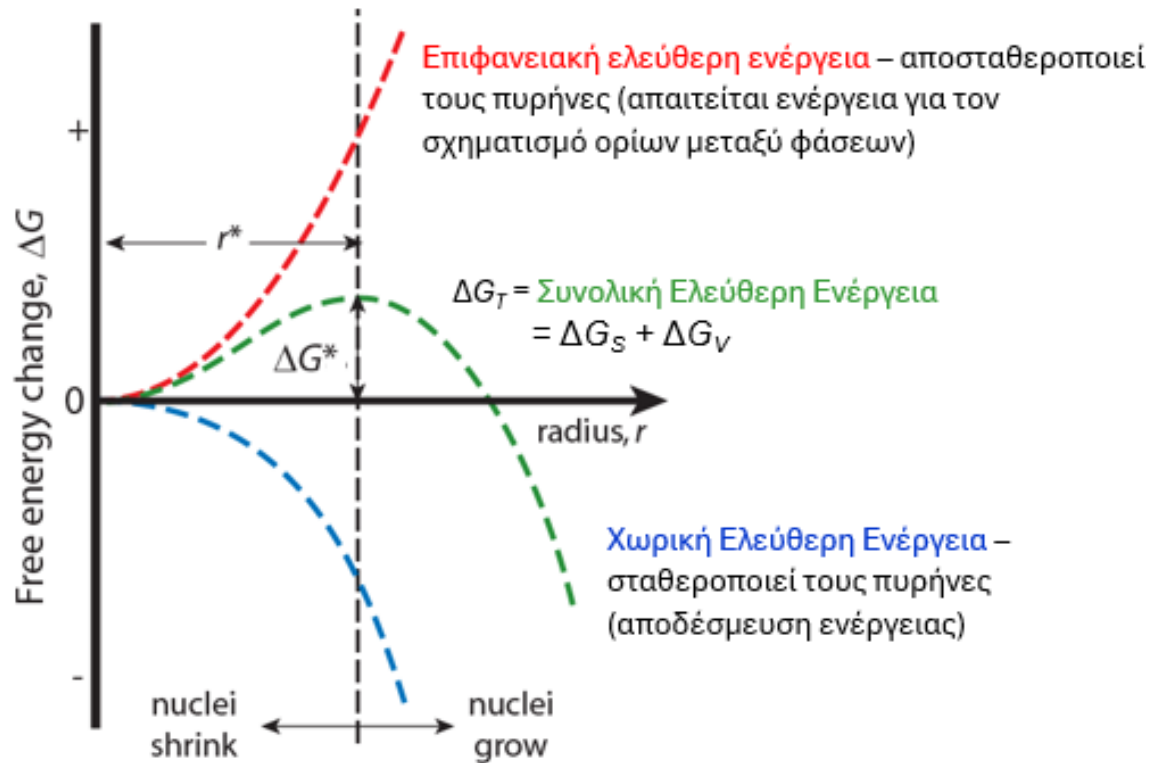
- σχηματισμός πυρήνων στον κύριο όγκο του υγρού μετάλλου
- απαιτεί σημαντικό βαθμό υπερψύξης (τυπικά, 80-300°C)

Ετερογενής πυρήνωση

- συμβαίνει πολύ ευκολότερα, επειδή είναι ήδη παρούσα κάποια ευσταθής “επιφάνεια πυρήνωσης” — π.χ., τοίχωμα καλουπιού, προσμείξεις σε υγρή φάση
- απαιτείται πολύ μικρός βαθμός υπερψύξης (0.1-10°C)

Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Ομοιογενής πυρήνωση και ενέργεια



• Για να σχηματιστεί νέος πυρήνας δρουν δύο ανταγωνιστικές ενέργειες.

• **Επιφανειακή ελεύθερη ενέργεια (κόκκινη καμπύλη):**

- αυξάνει την ενέργεια του συστήματος
- δυσκολεύει την πυρήνωση
- σχετίζεται με τη δημιουργία νέων ορίων φάσεων

• **Χωρική ελεύθερη ενέργεια (μπλε καμπύλη):**

- μειώνει την ενέργεια του συστήματος
- ευνοεί τον σχηματισμό της νέας φάσης

• **Συνολική ελεύθερη ενέργεια (πράσινη καμπύλη):**

- είναι το άθροισμα των δύο όρων

• Υπάρχει μια **κρίσιμη ακτίνα r^*** :

- αν $r < r^* \rightarrow$ ο πυρήνας διαλύεται
- αν $r > r^* \rightarrow$ ο πυρήνας αναπτύσσεται αυθόρμητα
- οι πολύ μικροί πυρήνες είναι ασταθείς
- ο μετασχηματισμός ξεκινά μόνο όταν ξεπεραστεί η κρίσιμη ακτίνα.

□ Ρυθμός μετασχηματισμού φάσεων

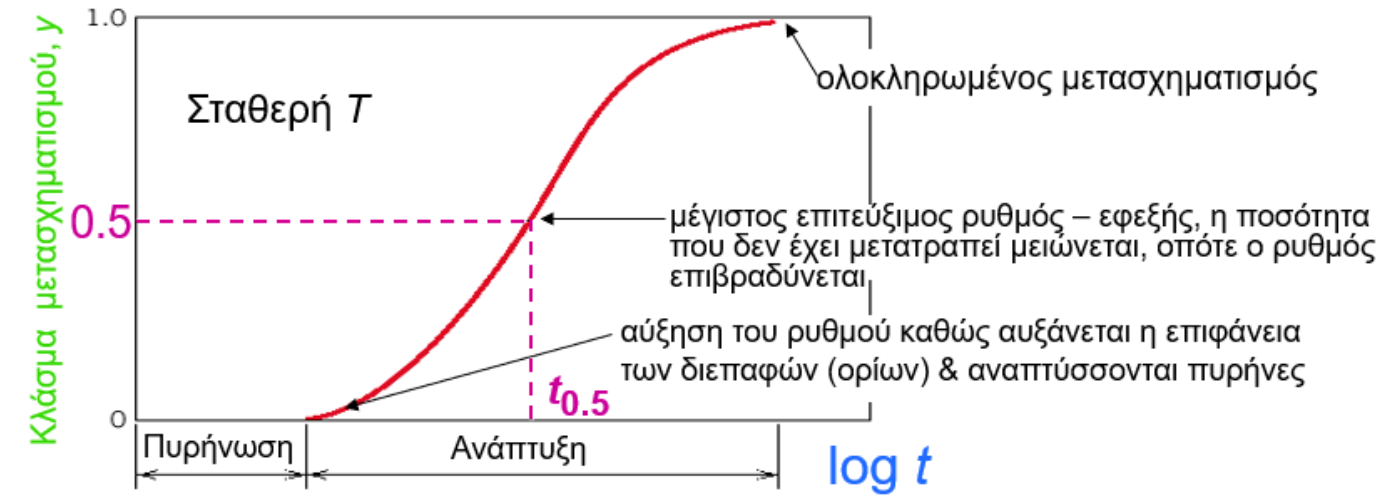
Κινητική - μελέτη του ρυθμού των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τους μετασχηματισμούς φάσεων

- Προσδιορισμός ρυθμού αντίδρασης – μέτρηση του βαθμού ολοκλήρωσης του μετασχηματισμού ως συνάρτηση του χρόνου (κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία)

— Πώς μετριέται ο βαθμός ολοκλήρωσης ενός μετασχηματισμού;

- περίθλαση ακτινών X – απαιτεί πολλά δοκίμια
- μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας – σε μεμονωμένο δοκίμιο
- μέτρηση διάδοσης ηχητικών κυμάτων – σε μεμονωμένο δοκίμιο

Μετασχηματισμοί Φάσεων



$$\rho\upsilon\theta\mu\acute{o}\varsigma = \frac{1}{t_{0.5}}$$

- μικρό $t_{0.5}$ \rightarrow γρήγορος μετασχηματισμός,
- μεγάλο $t_{0.5}$ \rightarrow αργός μετασχηματισμός.

Εξίσωση Avrami

$$y = 1 - e^{-kt^n}$$

▪ Αρχικά: αργός ρυθμός

Στην αρχή γίνεται κυρίως:

πυρήνωση

Υπάρχουν λίγοι πυρήνες,

οπότε ο μετασχηματισμός προχωρά αργά.

▪ Μεσαία περιοχή: γρήγορος ρυθμός

Καθώς δημιουργούνται περισσότεροι πυρήνες:

αυξάνονται οι διεπιφάνειες,

μεγαλώνουν οι κρύσταλλοι,

ο μετασχηματισμός επιταχύνεται.

μέγιστος ρυθμός μετασχηματισμού

▪ Τελικό στάδιο: επιβράδυνση

Προς το τέλος:

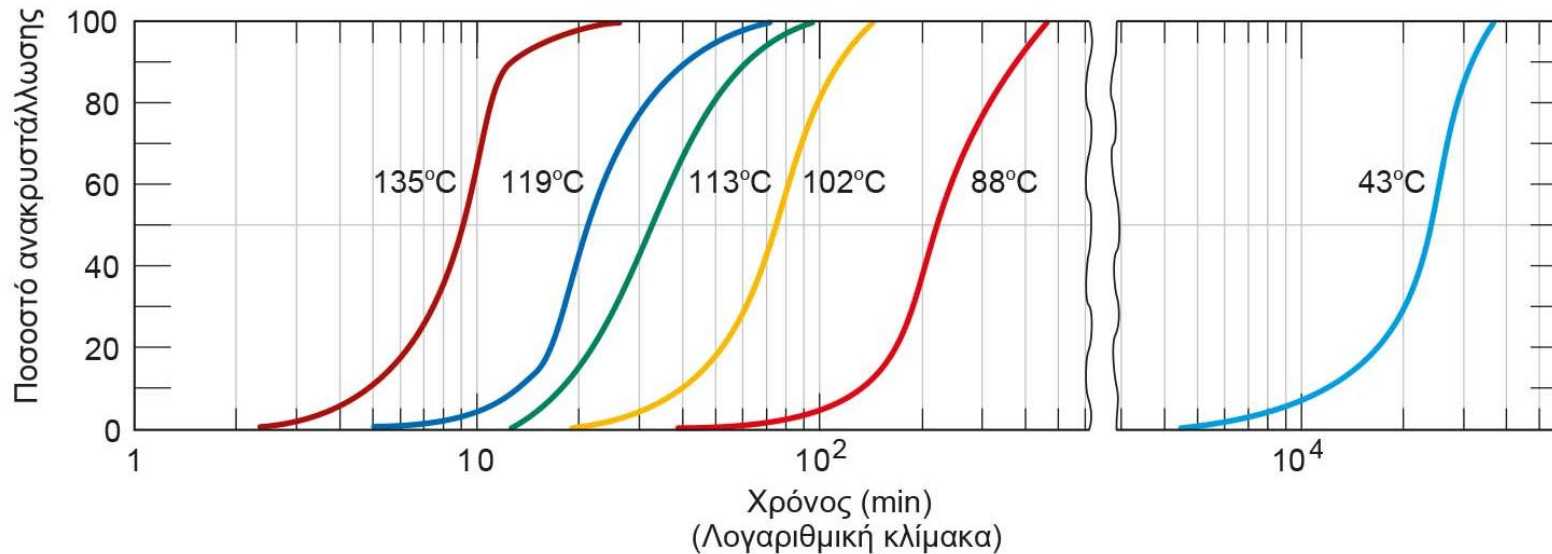
έχει απομείνει μικρή ποσότητα αμετάτρεπτης φάσης,

άρα ο ρυθμός μειώνεται.

ολοκληρώνεται ο μετασχηματισμός.

Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Εξάρτηση του ρυθμού μετασχηματισμού από τη θερμοκρασία



$$\rho\upsilon\theta\mu\acute{o}\varsigma = \frac{1}{t_{0.5}}$$

Άρα:

μικρότερος χρόνος $t_{0.5}$ → μεγαλύτερος ρυθμός.

Στις υψηλές θερμοκρασίες:
το $t_{0.5}$ μειώνεται πολύ άρα ο ρυθμός αυξάνεται.

Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία:

- οι καμπύλες μετακινούνται προς τα αριστερά
- δηλαδή ο μετασχηματισμός ολοκληρώνεται σε μικρότερο χρόνο.

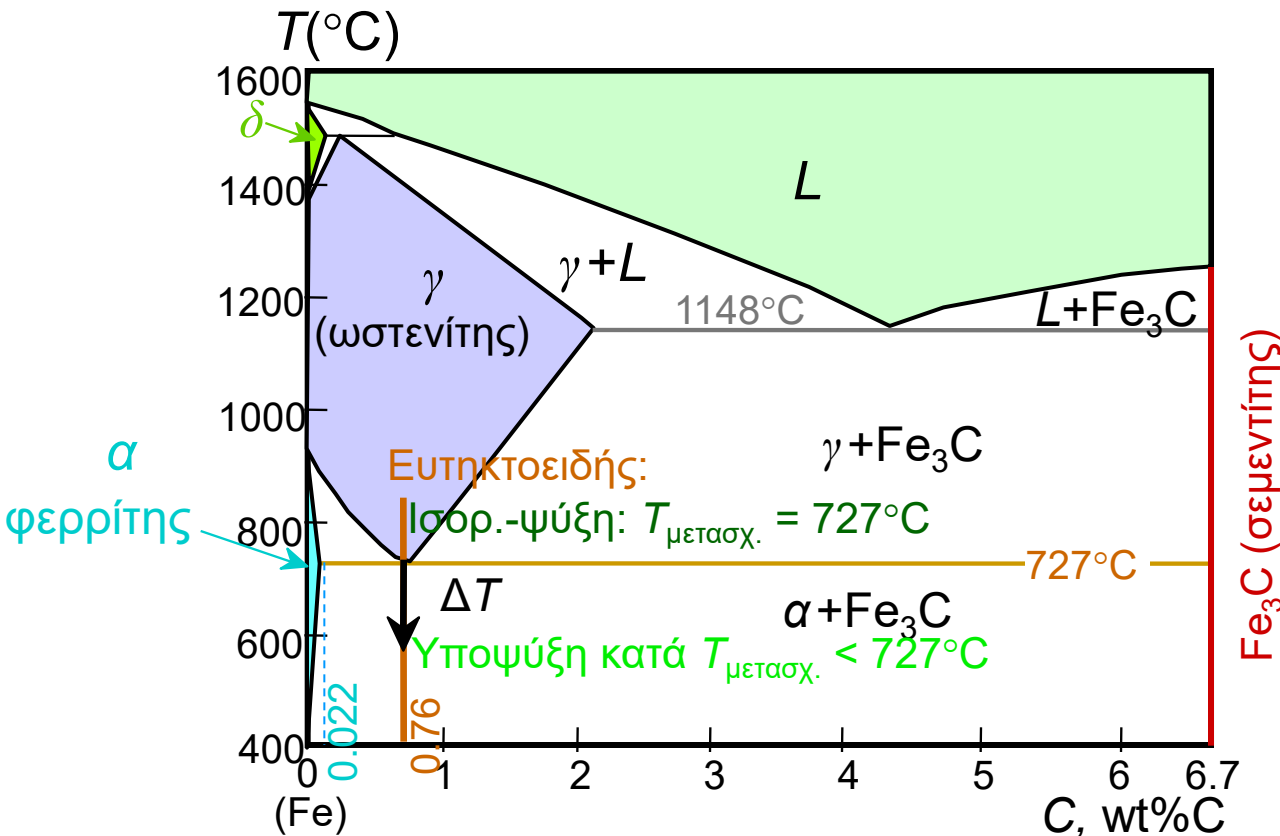
Άρα **μεγαλύτερη θερμοκρασία → γρηγορότερος μετασχηματισμός**

Σε υψηλότερη θερμοκρασία:

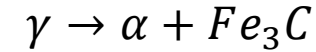
- τα άτομα κινούνται πιο εύκολα,
- η διάχυση γίνεται γρηγορότερα
- οι πυρήνες αναπτύσσονται πιο γρήγορα

Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Μετασχηματισμοί και υποψύξη



➤ Ο ευτηκτοειδής μετασχηματισμός στο Fe-Fe₃C
Στον ευτηκτοειδή χάλυβα:



ο ωστενίτης (γ) μετατρέπεται σε: φερρίτη (α) και σεμεντίτη (Fe_3C)

➤ 727°C : θερμοκρασία ευτηκτοειδούς μετασχηματισμού

Όμως πρακτικά στους ακριβώς 727°C ο μετασχηματισμός είναι εξαιρετικά αργός.

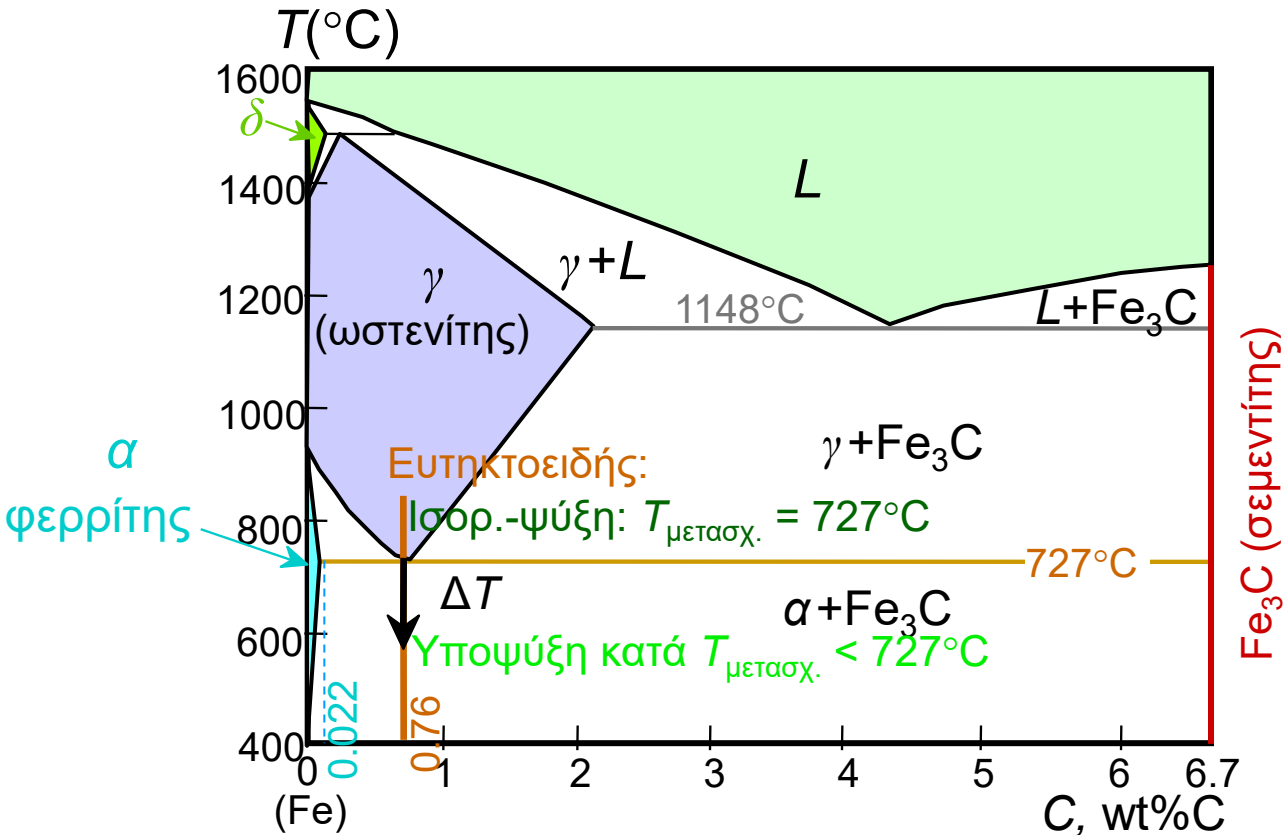
Άρα χρειάζεται:

μικρή υποψύξη δηλαδή:

$$T < 727^\circ C$$

Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Μετασχηματισμοί και υποψύξη



Είναι η διαφορά:

$$\Delta T = T_{\text{μετασχ.}} - T$$

Δηλαδή πόσο κάτω από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού ψύχθηκε το υλικό.

Η υποψύξη:

- αυξάνει την κινητήρια δύναμη,
- διευκολύνει την πυρήνωση
- επιτρέπει να ξεκινήσει ο μετασχηματισμός.

Χωρίς υποψύξη:

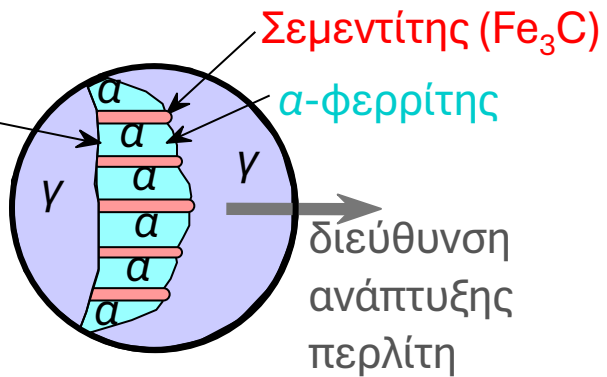
- οι πυρήνες δύσκολα σταθεροποιούνται
- άρα ο μετασχηματισμός δεν προχωρά πρακτικά.

Μετασχηματισμοί Φάσεων

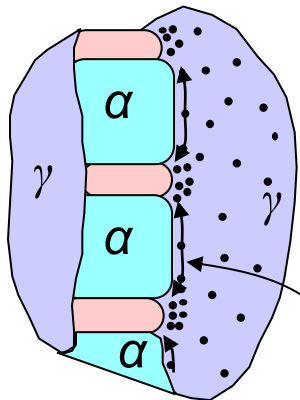
□ Ο ευτηκτοειδής μετασχηματισμός Fe-Fe₃C

- Μετασχηματισμός ωστενίτη σε περλίτη:

Όρια κόκκων
γ-ωστενίτη



Διάχυση C κατά τον
μετασχηματισμό



Ο C μετακινείται από τις περιοχές όπου σχηματίζεται φερρίτης προς τις περιοχές σεμεντίτη.

Ο περλίτης είναι **εναλασσόμενες στρώσεις**

- α-φερρίτη (α)
- και σεμεντίτη (Fe_3C)

Ο φερρίτης διαλύει πολύ λίγο άνθρακα.

Άρα όταν σχηματίζεται φερρίτης →
αποβάλλεται άνθρακας.

Ο άνθρακας διαχέεται στις διπλανές περιοχές,
και εκεί σχηματίζεται σεμεντίτης (Fe_3C)

Έτσι δημιουργούνται εναλλάξ:

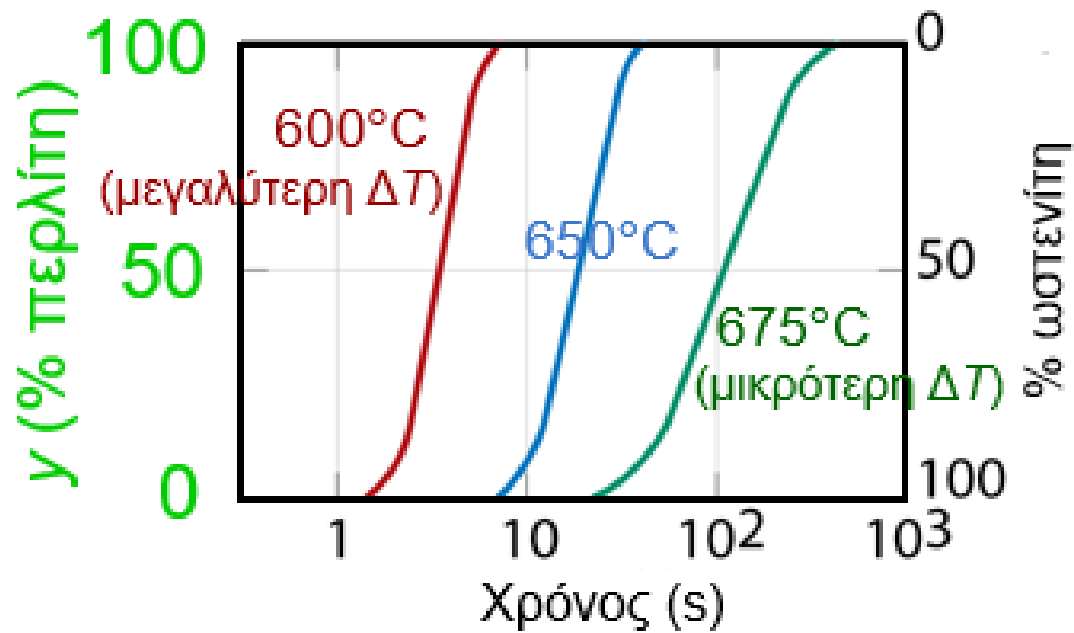
στρώσεις φερρίτη,

στρώσεις σεμεντίτη.

Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Ο ευτηκτοειδής μετασχηματισμός Fe-Fe₃C

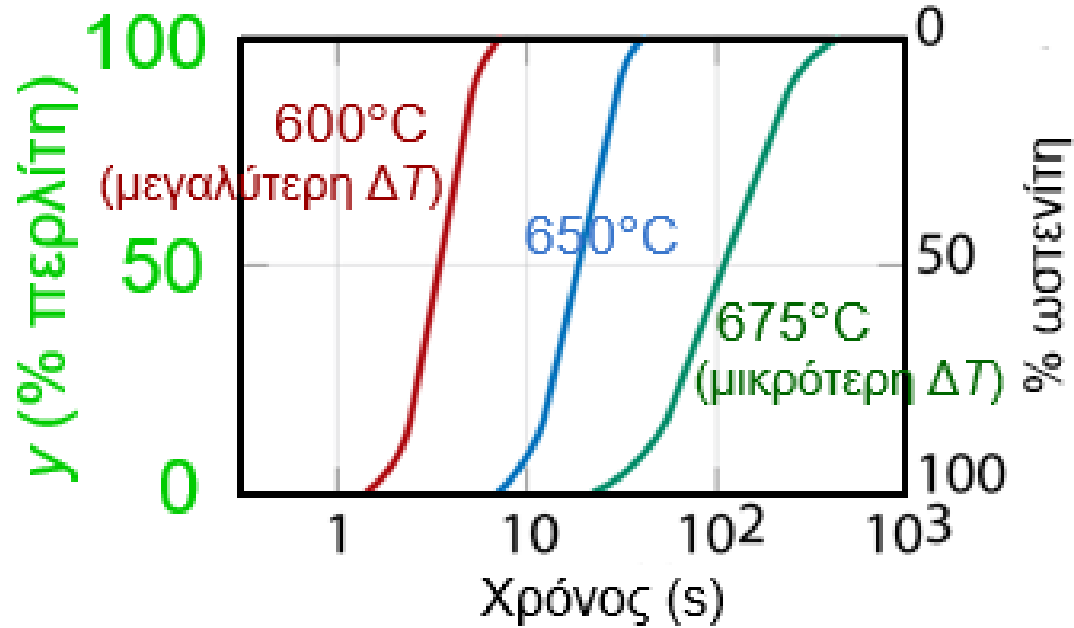
- Οι καμπύλες δείχνουν τον ρυθμό σχηματισμού περλίτη σε διαφορετικές θερμοκρασίες.



- **Στους 675°C**
μικρή υποψύξη (ΔT)
αργός μετασχηματισμός
- **Στους 600°C**
μεγαλύτερη υποψύξη
πολύ γρηγορότερος μετασχηματισμός
Άρα μεγαλύτερη υποψύξη → μεγαλύτερος ρυθμός μετασχηματισμού

Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Ο ευτηκτοειδής μετασχηματισμός Fe-Fe₃C



➤ Χονδρόκοκκος και λεπτόκοκκος περλίτης

Υψηλότερες θερμοκρασίες

μικρή υποψύξη (ΔT)

λίγοι πυρήνες σχηματίζονται

η διάχυση είναι εύκολη

οι εναλλασσόμενες στρώσεις αναπτύσσονται περισσότερο →

χονδρόκοκκος περλίτης

Ιδιότητες:

πιο μαλακός

πιο όλκιμος

Χαμηλότερες θερμοκρασίες

μεγάλη υποψύξη (ΔT)

μικρή απόσταση μεταξύ εναλλασσόμενων στρώσεων

→ λεπτόκοκκος περλίτης

Ιδιότητες:

πιο σκληρός

μεγαλύτερη αντοχή

Η θερμοκρασία μετασχηματισμού επηρεάζει τον ρυθμό σχηματισμού του περλίτη και τη μικροδομή του.

Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Παραγωγή διαγραμμάτων για ισόθερμους μετασχηματισμούς

Ισόθερμος μετασχηματισμός

ψύχουμε γρήγορα το υλικό σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία και το κρατάμε εκεί σταθερό.

Εδώ $T = 675^{\circ}\text{C}$

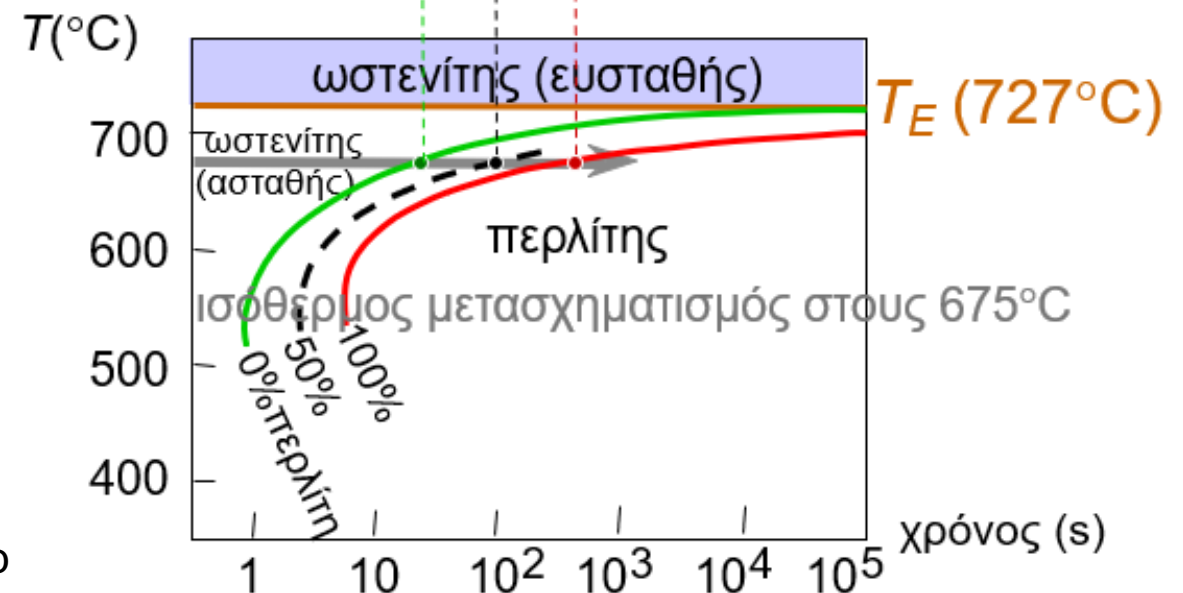
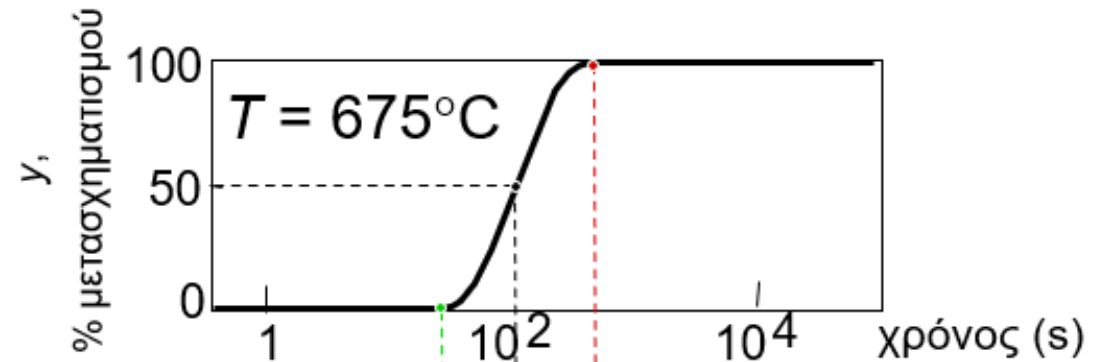
y = ποσοστό μετασχηματισμού

δηλαδή πόσος ωστενίτης έχει μετατραπεί σε περλίτη

Στην αρχή παρατηρείται μια καθυστέρηση, γιατί πρέπει πρώτα να σχηματιστούν πυρήνες περλίτη. Άρα ο ρυθμός μετασχηματισμού είναι μικρός.

Στη συνέχεια ο μετασχηματισμός επιταχύνεται, επειδή οι πυρήνες αναπτύσσονται και σχηματίζεται όλο και περισσότερος περλίτης. Για αυτό η καμπύλη γίνεται πιο απότομη.

Προς το τέλος ο ρυθμός μειώνεται ξανά, επειδή απομένει όλο και λιγότερος ωστενίτης για να μετασχηματιστεί.



Μετασχηματισμοί Φάσεων

Διάγραμμα TTT (Time–Temperature–Transformation)

Δείχνει σε ποιους χρόνους και θερμοκρασίες ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε περλίτη.

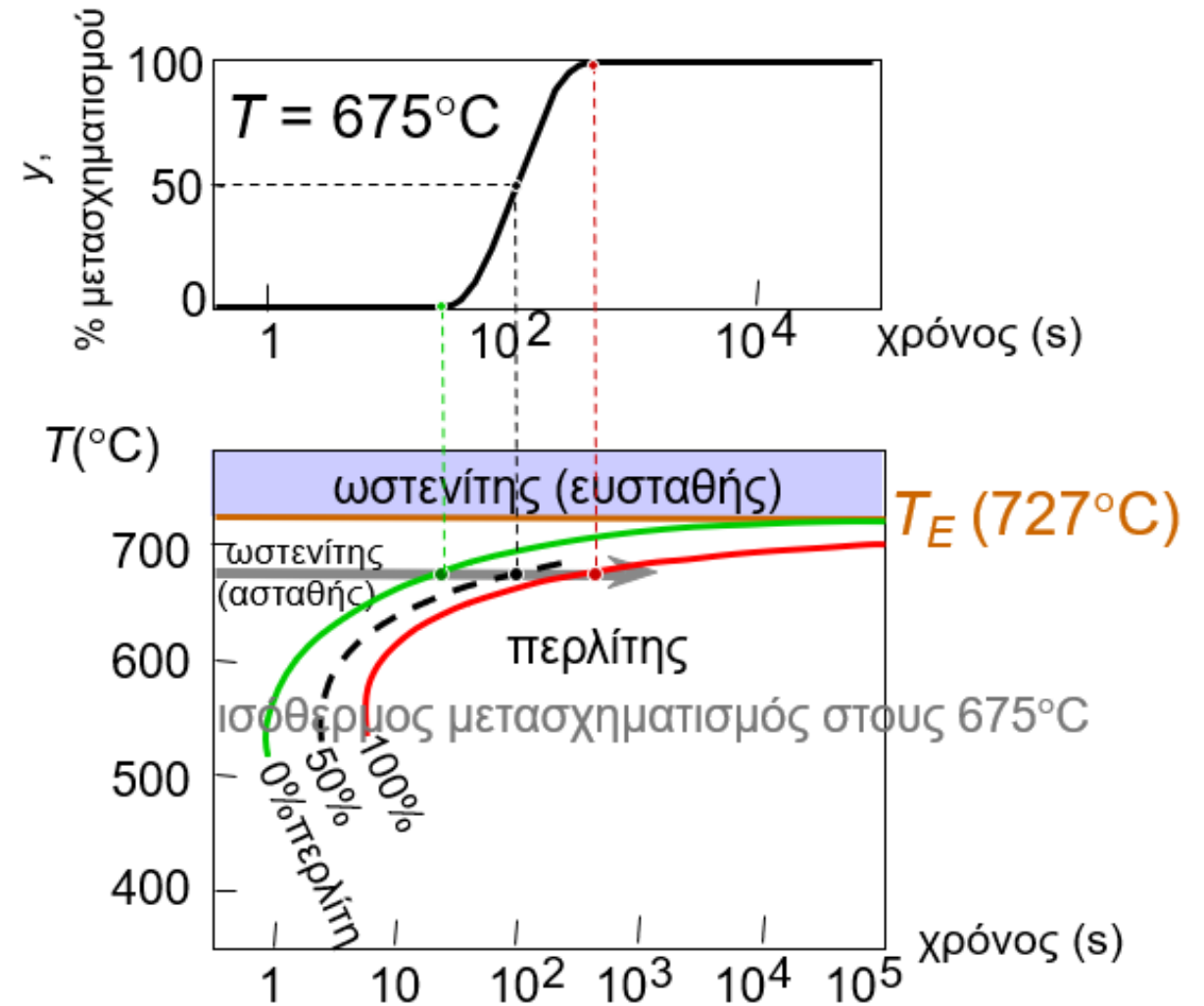
- Πράσινη καμπύλη
αρχή μετασχηματισμού

δηλαδή πότε αρχίζει να σχηματίζεται περλίτης.

- Μαύρη διακεκομμένη
50% μετασχηματισμό

- Κόκκινη καμπύλη
τέλος μετασχηματισμού

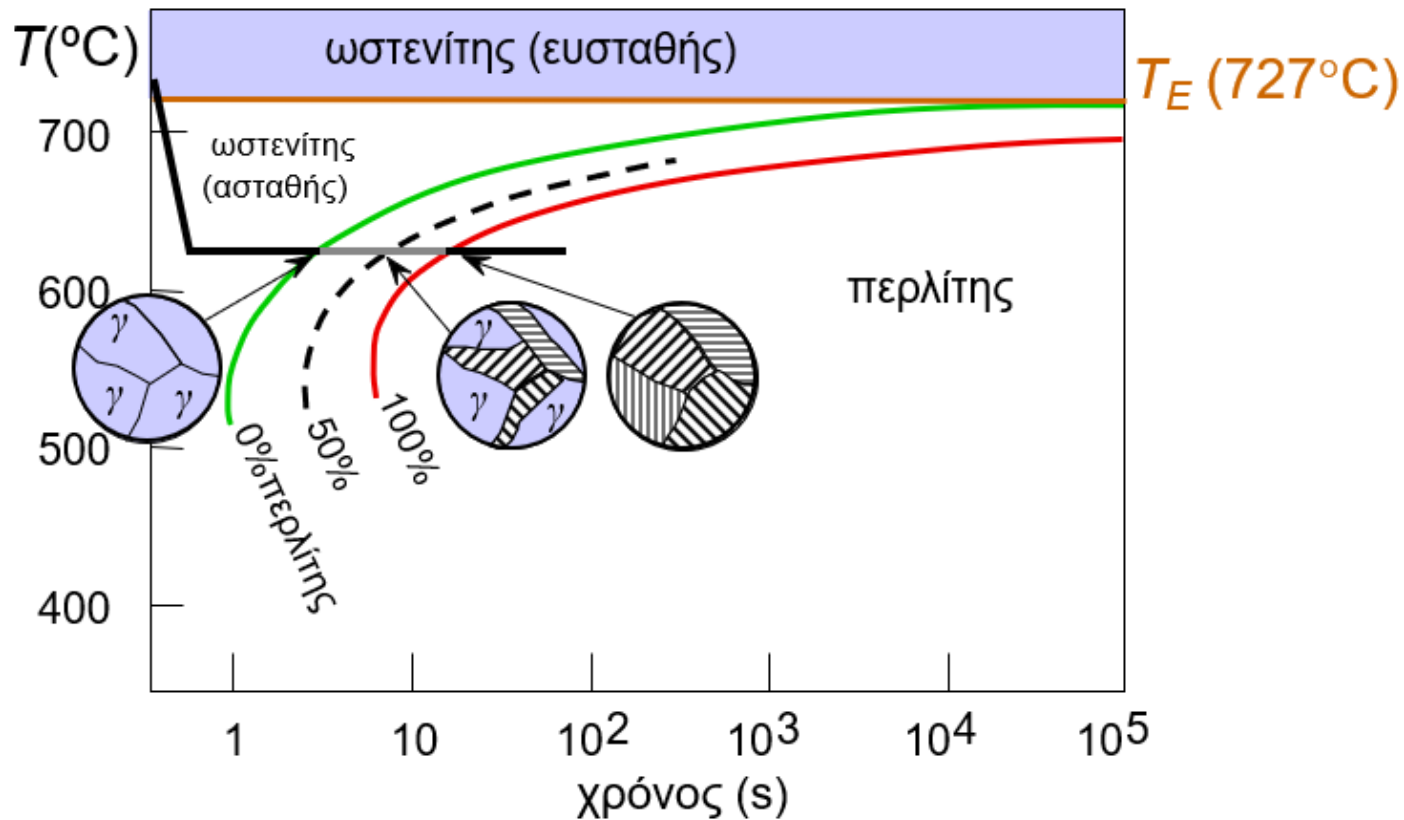
δηλαδή πότε ολοκληρώνεται.



Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Ισόθερμος μετασχηματισμός ωστενίτη σε περλίτη

- Ευτηκτοειδής σύσταση, $C_0 = 0.76 \text{ wt\% C}$
- Έναρξη σε $T > 727^\circ\text{C}$
- Ταχεία ψύξη σε 625°C
- Διατήρηση σταθερής T (625°C) (ισόθερμη κατεργασία)



Μετασχηματισμοί Φάσεων

Να χαρακτηρίσετε τις παρακάτω προτάσεις ως σωστές ή λανθασμένες, με βάση τη θεωρία των μετασχηματισμών φάσεων και του ευτηκτοειδούς μετασχηματισμού στο σύστημα Fe-Fe₃C.

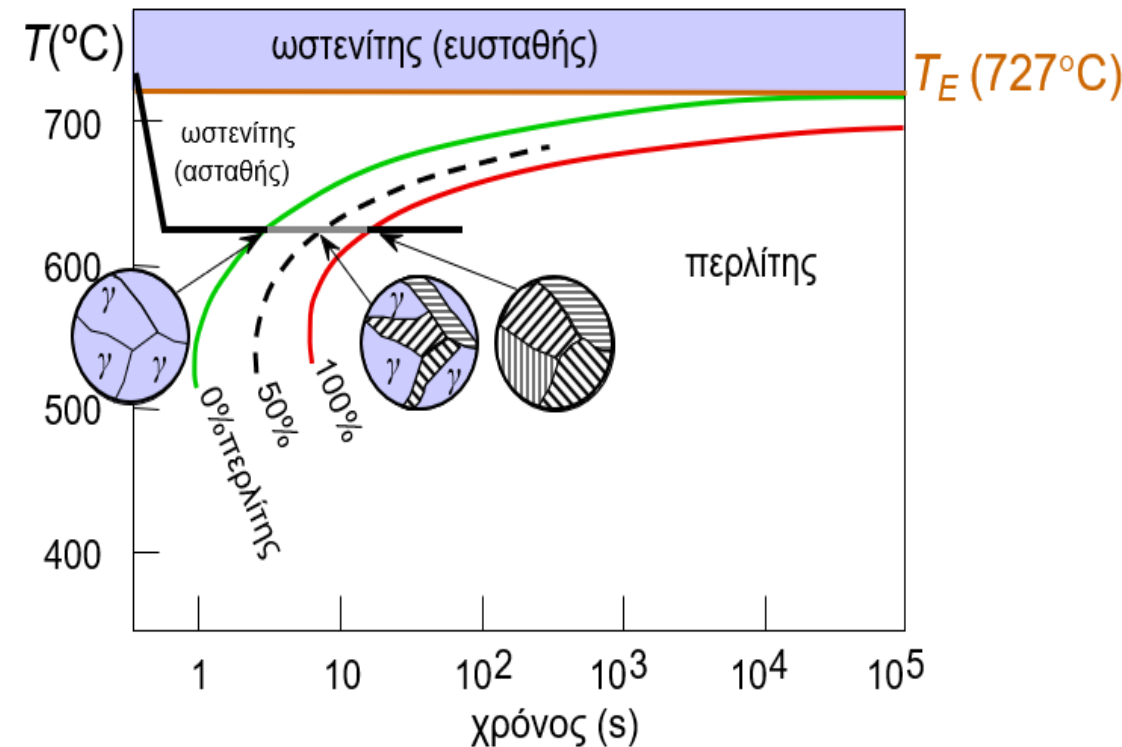
1. Η δημιουργία νέας επιφάνειας διευκολύνει την πυρήνωση.
2. Μεγάλη υποψύξη οδηγεί συνήθως σε περισσότερους πυρήνες.
3. Ο μαρτενσίτης είναι δομή ισορροπίας.
4. Ο φερρίτης διαλύει μεγάλη ποσότητα άνθρακα.
5. Στην αρχή του μετασχηματισμού ο ρυθμός είναι συνήθως αργός.
6. Σε υψηλότερη θερμοκρασία η διάχυση των ατόμων γίνεται ευκολότερα.
7. Ο λεπτόκοκκος περλίτης είναι πιο σκληρός από τον χονδρόκοκκο.
8. Στο διάγραμμα TTT η πράσινη καμπύλη δείχνει το τέλος του μετασχηματισμού.

Μετασχηματισμοί Φάσεων

Άσκηση:

Ένας ευτηκτοειδής χάλυβας (0.76% C) θερμαίνεται πάνω από τους 727°C ώστε να γίνει πλήρως ωστενιτικός και στη συνέχεια ψύχεται γρήγορα στους 625°C , όπου διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία. Με βάση το διάγραμμα TTT:

1. Ποια φάση υπάρχει αμέσως μετά την ταχεία ψύξη στους 625°C ;
2. Τι δείχνει η πράσινη καμπύλη;
3. Τι μικροδομή υπάρχει μεταξύ της πράσινης και της κόκκινης καμπύλης;
4. Τι σημαίνει το σημείο όπου η οριζόντια γραμμή τέμνει τη μαύρη διακεκομμένη καμπύλη;
5. Ποια είναι η τελική μικροδομή μετά την πλήρη ολοκλήρωση του μετασχηματισμού;
6. Γιατί ο μετασχηματισμός δεν γίνεται ακαριαία μόλις το υλικό φτάσει στους 625°C ;



Μετασχηματισμοί Φάσεων

Σύντομη ανάπτυξη

1. Γιατί η μεγάλη υποψύξη αυξάνει τον ρυθμό πυρήνωσης;
2. Γιατί στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ο μετασχηματισμός μπορεί να ξαναγίνει αργός;
3. Εξήγησε γιατί ο λεπτόκοκκος περλίτης είναι πιο σκληρός από τον χονδρόκοκκο.
4. Γιατί στους ακριβώς 727°C ο ευτηκτοειδής μετασχηματισμός είναι πολύ αργός;
5. Τι σημαίνει ότι ένας πυρήνας έχει ακτίνα μικρότερη από την κρίσιμη ακτίνα r^* ;

Μετασχηματισμοί Φάσεων

Άσκηση:

Δύο ευτηκτοειδείς χάλυβες ψύχονται ισόθερμα:

ο πρώτος στους $675^{\circ}C$,

ο δεύτερος στους $600^{\circ}C$.

Να απαντήσετε:

1. Ποιος χάλυβας έχει μεγαλύτερη υποψύξη;
2. Σε ποιον ο μετασχηματισμός θα γίνει γρηγορότερα;
3. Σε ποιον θα σχηματιστεί λεπτόκοκκος περλίτης;
4. Ποιος θα είναι πιο σκληρός;

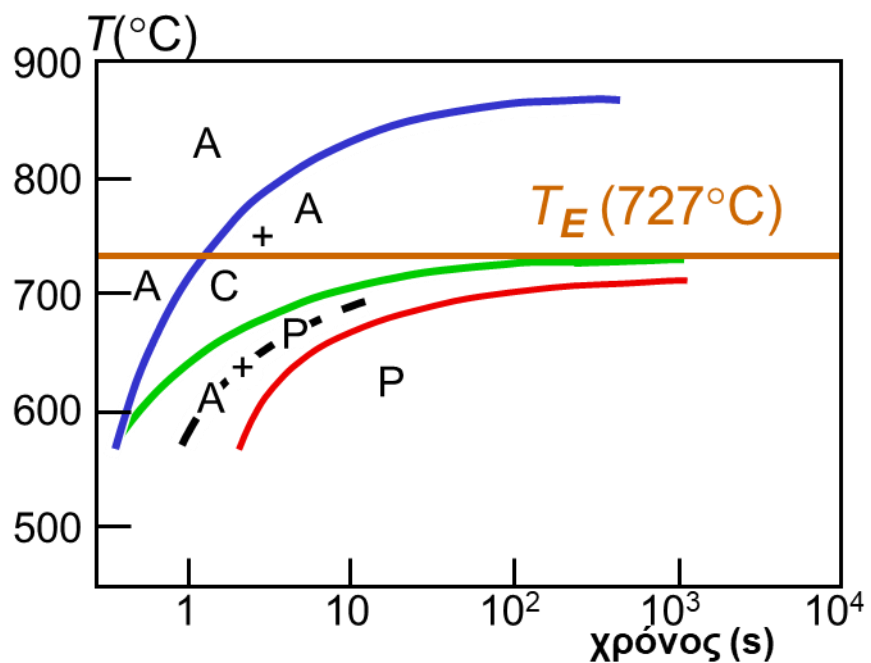
Άσκηση:

Να εξηγήσετε γιατί στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και στις πολύ χαμηλές, ο μετασχηματισμός μπορεί να είναι αργός;

Μετασχηματισμοί Φάσεων

Μετασχηματισμοί εν τη παρουσία μη-ευτηκτοιδών συστάσεων

Δίνεται $C_0 = 1.13 \text{ wt\% C}$



A → ωστενίτης (Austenite)

C → σεμεντίτης (Cementite)

P → περλίτης (Pearlite) (φερρίτης + σεμενίτης)

- Για $C_0 = 1.13\% \text{ C}$ έχουμε:

$$C_0 > 0.76\%$$

άρα ο χάλυβας είναι **υπερευτηκτοιδής**.

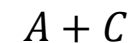
Αυτό σημαίνει ότι κατά την ψύξη δεν σχηματίζεται κατευθείαν μόνο περλίτης.

- Σε υψηλή θερμοκρασία υπάρχει μόνο:
A (ωστενίτης)

- Η μπλε καμπύλη δείχνει την έναρξη σχηματισμού προευτηκτοιδούς σεμεντίτη (Fe_3C)

Επειδή ο ωστενίτης περιέχει περισσότερο άνθρακα κοντά στους 727°C , αρχίζει να αποβάλλεται Fe_3C

Άρα μετά τη μπλε καμπύλη έχουμε:

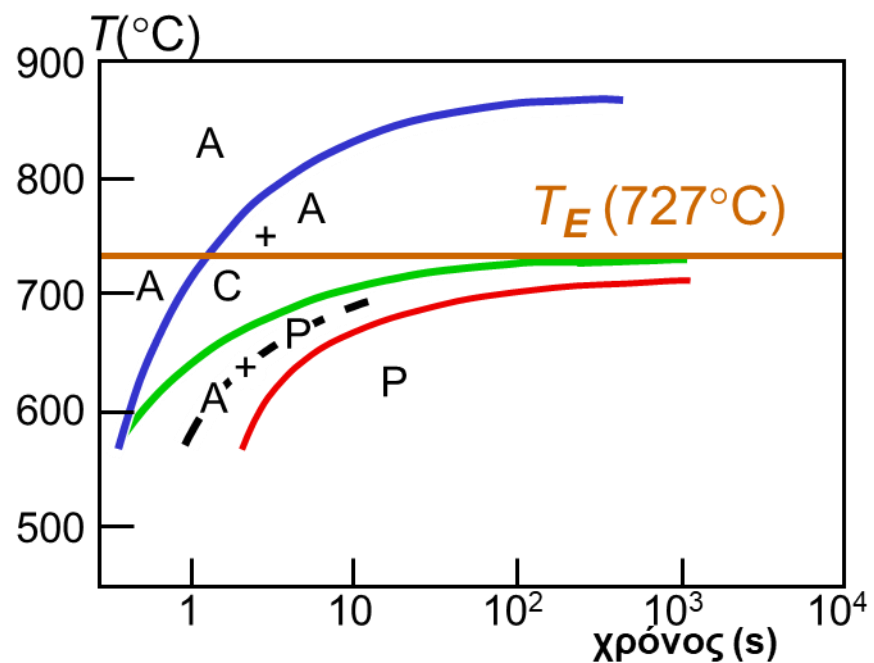


Δηλαδή ωστενίτης και προευτηκτοιδής σεμεντίτης.

Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Μετασχηματισμοί εν τη παρουσία μη-ευτηκτοιδών συστάσεων

Δίνεται $C_0 = 1.13 \text{ wt\% C}$

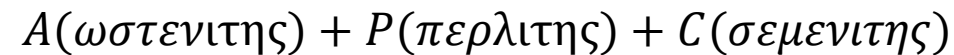


A → ωστενίτης (Austenite)
C → σεμεντίτης (Cementite)
P → περλίτης (Pearlite)

➤ Πράσινη καμπύλη

Δείχνει την έναρξη σχηματισμού περλίτη από τον εναπομείναντα ωστενίτη.

Στην περιοχή αυτή συνυπάρχουν:



➤ Μαύρη διακεκομμένη

Δείχνει περίπου 50% μετασχηματισμό του ωστενίτη σε περλίτη.

➤ Κόκκινη καμπύλη

Δείχνει το τέλος μετασχηματισμού του ωστενίτη σε περλίτη. Μετά από αυτή δεν έχει απομείνει ωστενίτης.

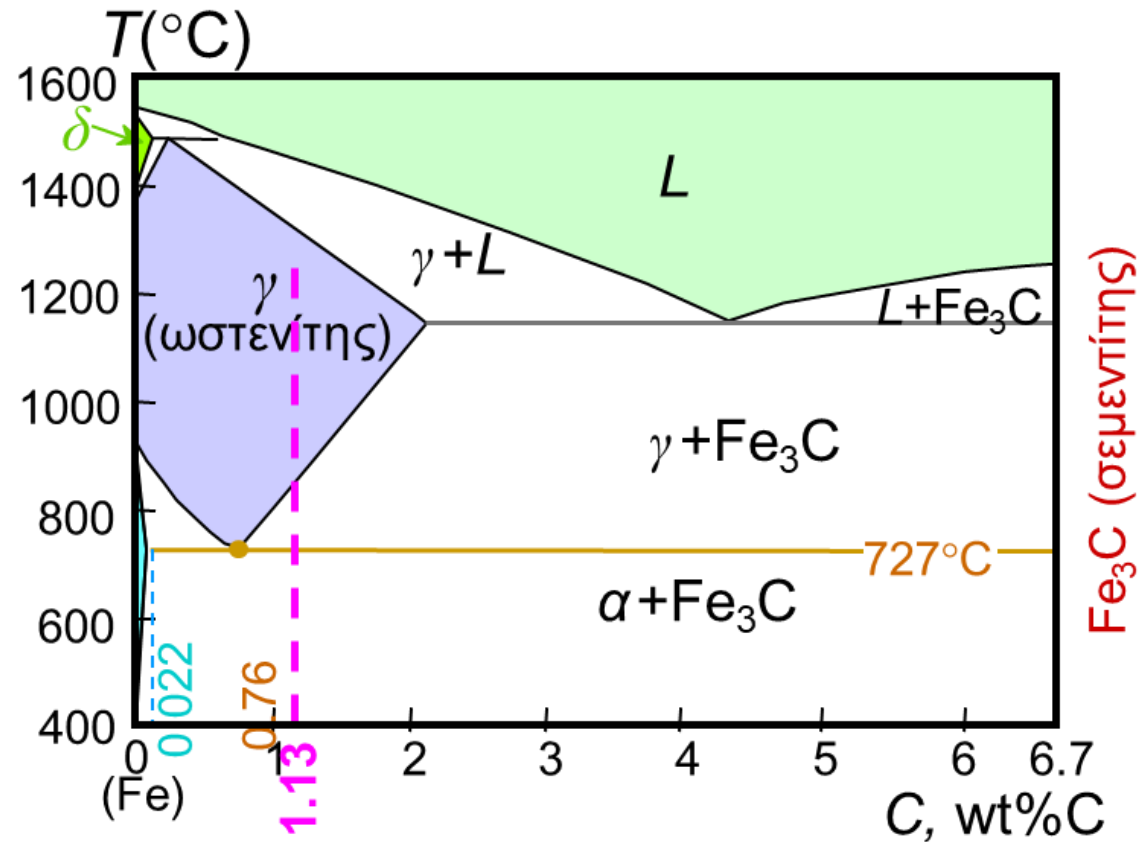
Η τελική μικροδομή είναι:



Δηλαδή περλίτης και προευτηκτοιδής σεμεντίτης.

Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Δίνεται $C_0 = 1.13 \text{ wt\% C}$



Υπερευτηκτοειδής σύσταση – προευτηκτοειδής σεμεντίτης

- Το διάγραμμα δείχνει ότι για σύσταση $1.13\% \text{ C}$ ο χάλυβας είναι **υπερευτηκτοειδής**, οπότε πριν από τους 727°C σχηματίζεται πρώτα **προευτηκτοειδής σεμεντίτης** και μετά περλίτης.

Μετασχηματισμοί Φάσεων

Ο σφαιροειδίτης αποτελείται από:

- μικρά σφαιρικά σωματίδια σεμεντίτη (Fe_3C)
- μέσα σε μήτρα φερρίτη (α).

➤ Ο σφαιροειδίτης σχηματίζεται όταν:

- περλίτης ή μπαινίτης
- θερμαίνονται για μεγάλο χρονικό διάστημα
- σε θερμοκρασία λίγο κάτω από τους:

$727^\circ C$

Άρα απαιτούνται:

- ✓ διάχυση άνθρακα
- ✓ αρκετός χρόνος.

Γιατί σχηματίζονται σφαιρικά σωματίδια

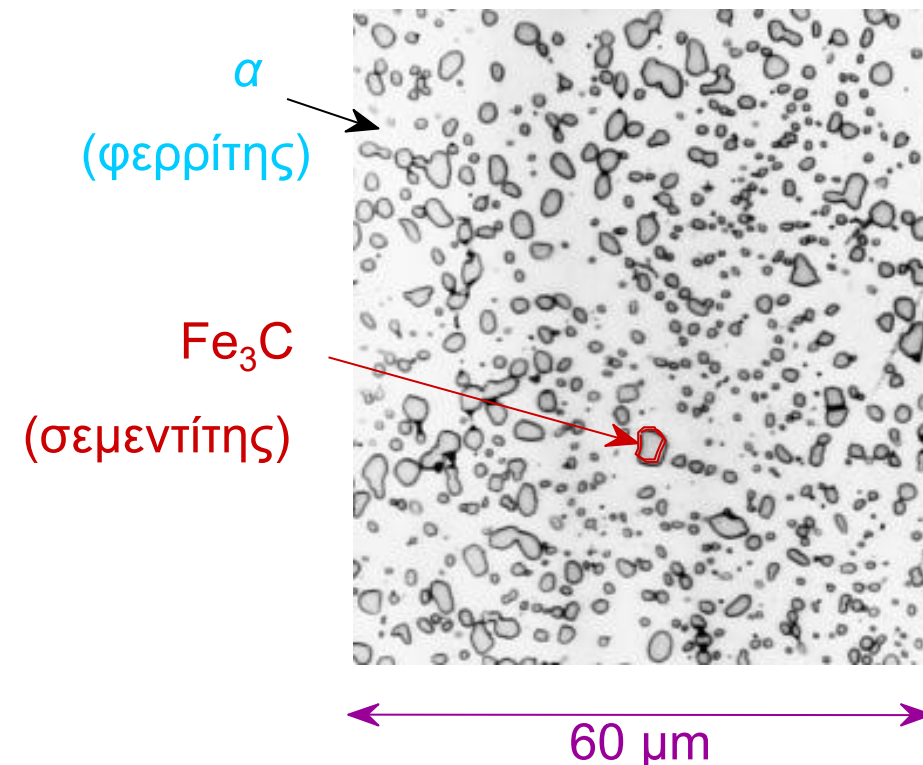
Το σύστημα προσπαθεί να μειώσει τη συνολική επιφάνεια διεπιφάνειας μεταξύ:



Οι σφαιρικές μορφές έχουν:

μικρότερη επιφάνεια ανά όγκο

άρα μικρότερη επιφανειακή ενέργεια και είναι ενεργειακά πιο σταθερές.



Μηχανικές ιδιότητες

Ο σφαιροειδίτης είναι:

- πιο μαλακός
- πιο όλκιμος

και κατεργάζεται ευκολότερα

σε σύγκριση με τον περλίτη και τον μπαινίτη.

Μετασχηματισμοί Φάσεων

❑ **Μαρτενσίτης** - μια μικροδομή που σχηματίζεται με πολύ γρήγορη ψύξη του ωστενίτη

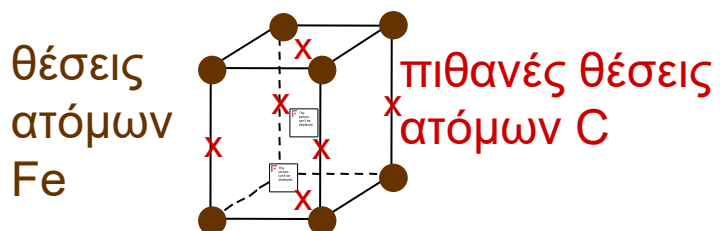
Ο μαρτενσίτης είναι:

- προϊόν μετασχηματισμού εκτός ισορροπίας
- πολύ σκληρή μικροδομή,
- που σχηματίζεται χωρίς διάχυση άνθρακα.

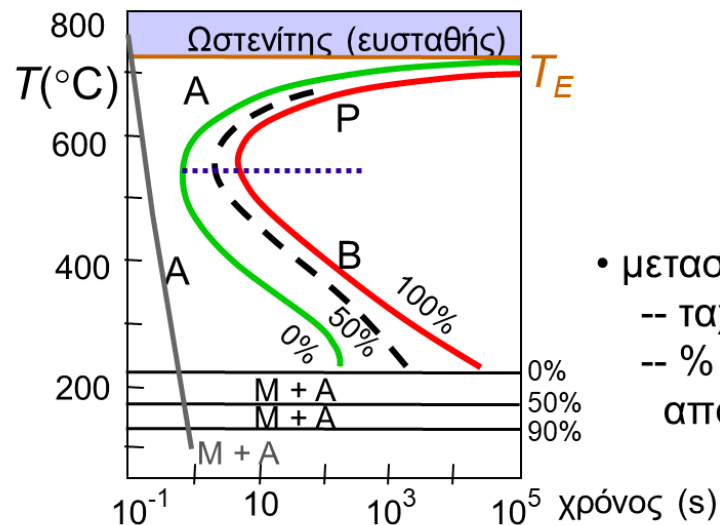
- Αρχικά έχουμε γ (ωστενίτη) με FCC δομή.
- Με απότομη ψύξη τα άτομα C δεν προλαβαίνουν να διαχυθούν, παγιδεύονται μέσα στο πλέγμα, και η δομή παραμορφώνεται.
- Έτσι προκύπτει:

BCT

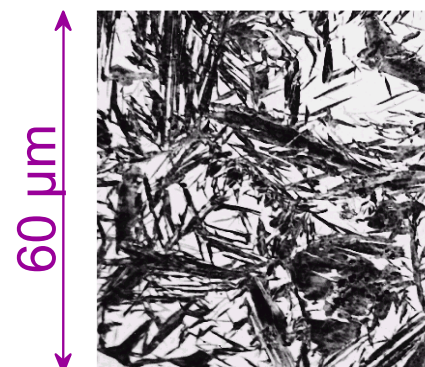
δηλαδή **τετραγωνική χωροκεντρωμένη δομή**.



• Διάγραμμα ισόθερμου μετασχ.



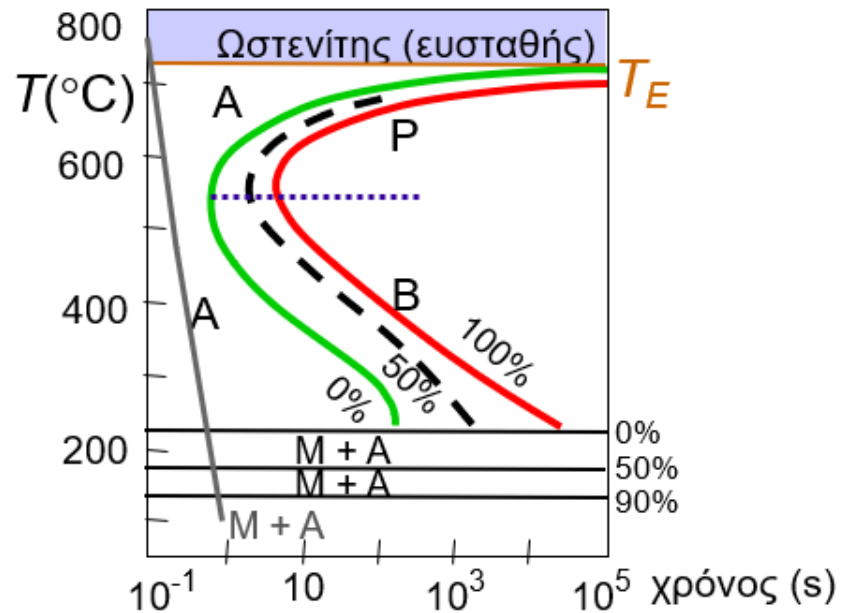
- μετασχηματισμός γ σε μαρτενσίτη (M).
- ταχεία διαδικασία (χωρίς διάχυση)
- % μετασχηματισμού εξαρτάται μόνο από την T στην οποία ψύχεται ταχέως



— Βελονοειδής μαρτενσίτης
— Ωστενίτης

Μετασχηματισμοί Φάσεων

- Διάγραμμα ισόθερμου μετασχ.

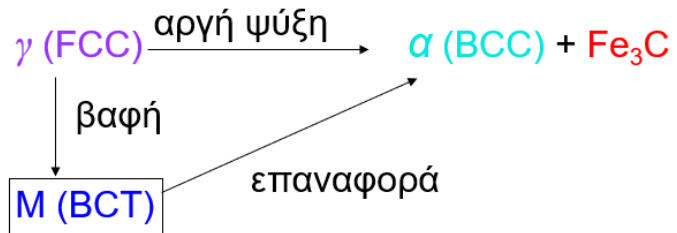


- A = Ωστενίτης (Austenite)
- P = Περλίτης (Pearlite)
Μικροδομή από εναλλασσόμενες στρώσεις: φερρίτη (α) και σεμεντίτη (Fe_3C)
- B = Μπαινίτης (Bainite)
Μικροδομή φερρίτη + σεμενίτη που σχηματίζεται σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες.
- M = Μαρτενσίτης (Martensite)
Πολύ σκληρή φάση που σχηματίζεται με πολύ γρήγορη ψύξη (βαφή). Έχει δομή BCT και σχηματίζεται χωρίς διάχυση.

- μετασχηματισμός γ σε μαρτενσίτη (M).
 - ταχεία διαδικασία (χωρίς διάχυση)
 - % μετασχηματισμού εξαρτάται μόνο από την T στην οποία ψύχεται ταχέως

Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Σχηματισμός μαρτενσίτη



Μαρτενσίτης (M) – μόνο μία φάση
– κρυσταλλική δομή BCT
(χωροκεντρωμένη τετραγωνική)

Μετασχηματισμός χωρίς διάχυση BCT εάν $C_0 > 0.15 \text{ wt\% C}$
BCT → λίγα επίπεδα ολίσθησης → σκληρό, ψαθυρό υλικό

- Κάνουμε επαναφορά γιατί ο μαρτενσίτης μετά τη βαφή είναι υπερβολικά σκληρός αλλά και πολύ ψαθυρός.

Δηλαδή:

έχει πολύ μεγάλες εσωτερικές τάσεις
ο άνθρακας είναι παγιδευμένος
η δομή BCT είναι έντονα παραμορφωμένη

Άρα μπορεί:

να ραγίσει εύκολα
να σπάσει από κρούση
να αποτύχει απότομα

Άρα πρακτικά η επαναφορά:

- μειώνει την ψαθυρότητα
- αυξάνει τη δυσθραυστότητα
- μειώνει τον κίνδυνο ρωγμών
- κάνει το υλικό πιο ασφαλές στη χρήση

Μετασχηματισμοί Φάσεων

❑ Μετασχηματισμοί φάσεων σε κράματα

Επίδραση της προσθήκης άλλων στοιχείων: μεταβολή της θερμοκρασίας μετάβασης.

Cr, Ni, Mo, Si, Mn

επιβράδυνση $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

αντίδραση (και σχηματισμός περλίτη, μπαινίτη)

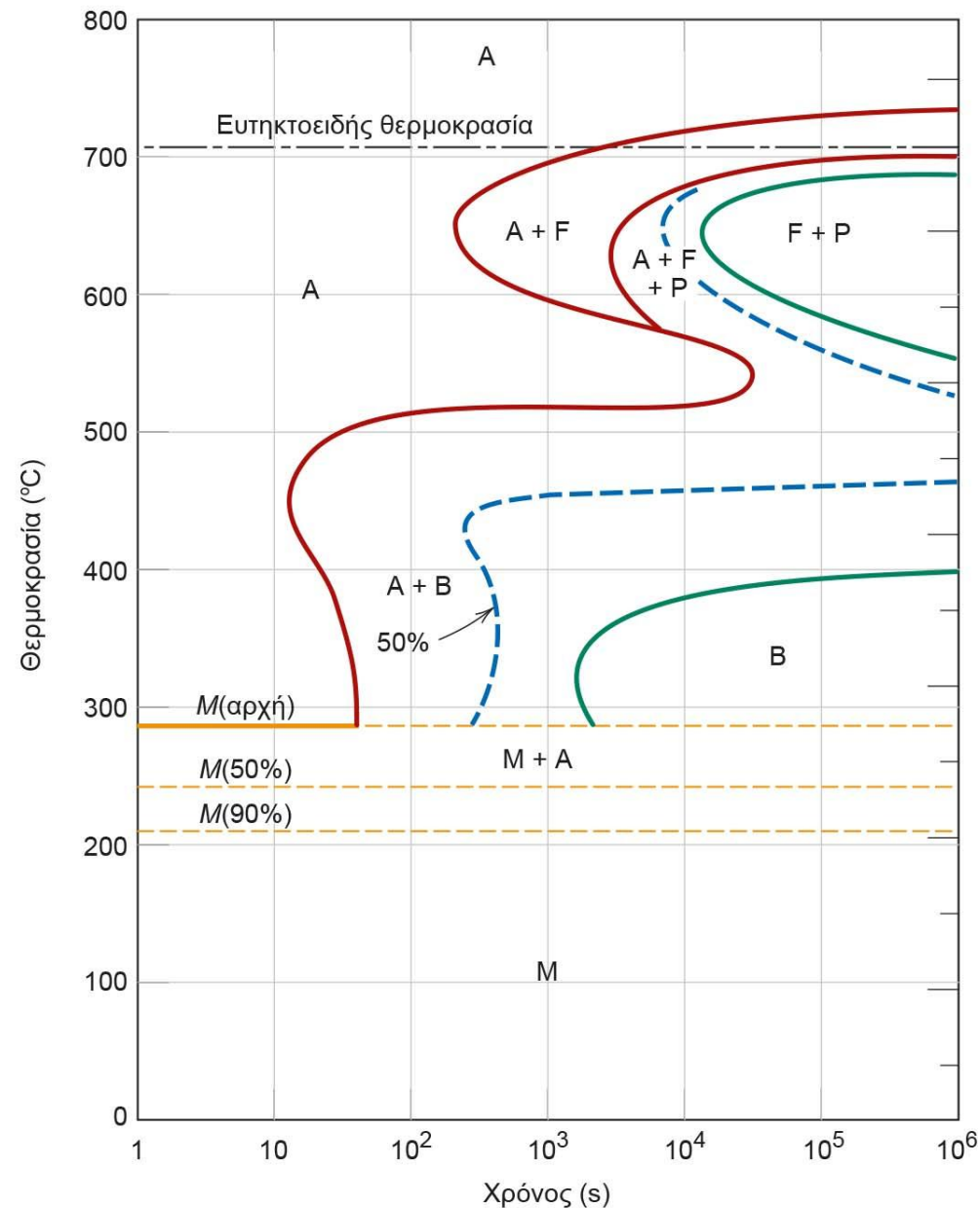
➤ Τα κραματικά στοιχεία καθυστερούν τον περλίτη/μπαινίτη γιατί δυσκολεύουν τη διάχυση του άνθρακα μέσα στο πλέγμα.

Άρα:

τα άτομα μετακινούνται πιο αργά

ο μετασχηματισμός αργεί (περλίτη/μπαινίτη)

οι καμπύλες TTT μετατοπίζονται προς τα δεξιά.



Μετασχηματισμοί Φάσεων

□ Διάγραμμα μετασχηματισμού συνεχούς ψύξης (CCT diagram)

- Δηλαδή αντί να κρατάμε σταθερή θερμοκρασία (TTT), το υλικό ψύχεται συνεχώς με τον χρόνο.

➤ Μπλε καμπύλη

- Είναι η καμπύλη ψύξης του υλικού
- Δείχνει πώς πέφτει η θερμοκρασία με τον χρόνο.

Καθώς το υλικό ψύχεται:

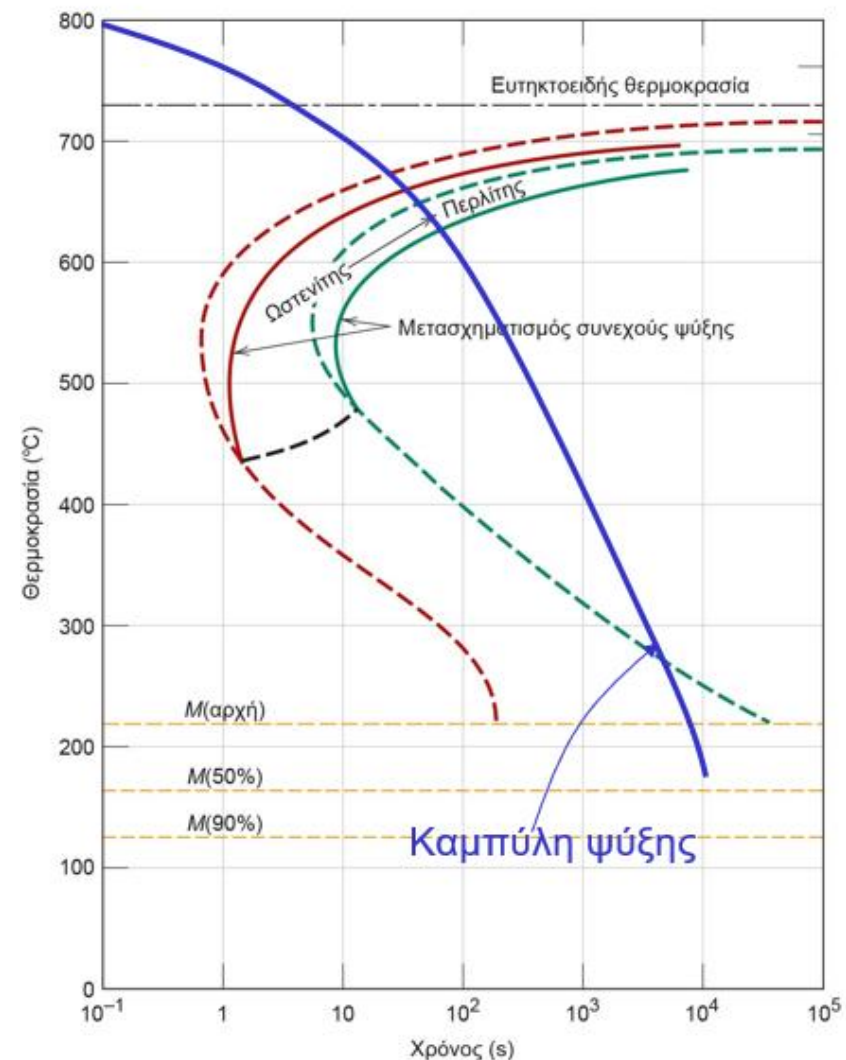
- αν η μπλε καμπύλη τέμνει την περιοχή περλίτη, σχηματίζεται περλίτης
- αν περάσει από περιοχή μπαινίτη, σχηματίζεται μπαινίτης
- αν αποφύγει όλες τις καμπύλες και φτάσει κάτω από το $M_{(αρχή)}$ σχηματίζεται μαρτενσίτης

➤ η μπλε καμπύλη περνά από την περιοχή μετασχηματισμού πριν φτάσει στο $M_{(αρχή)}$

Άρα:

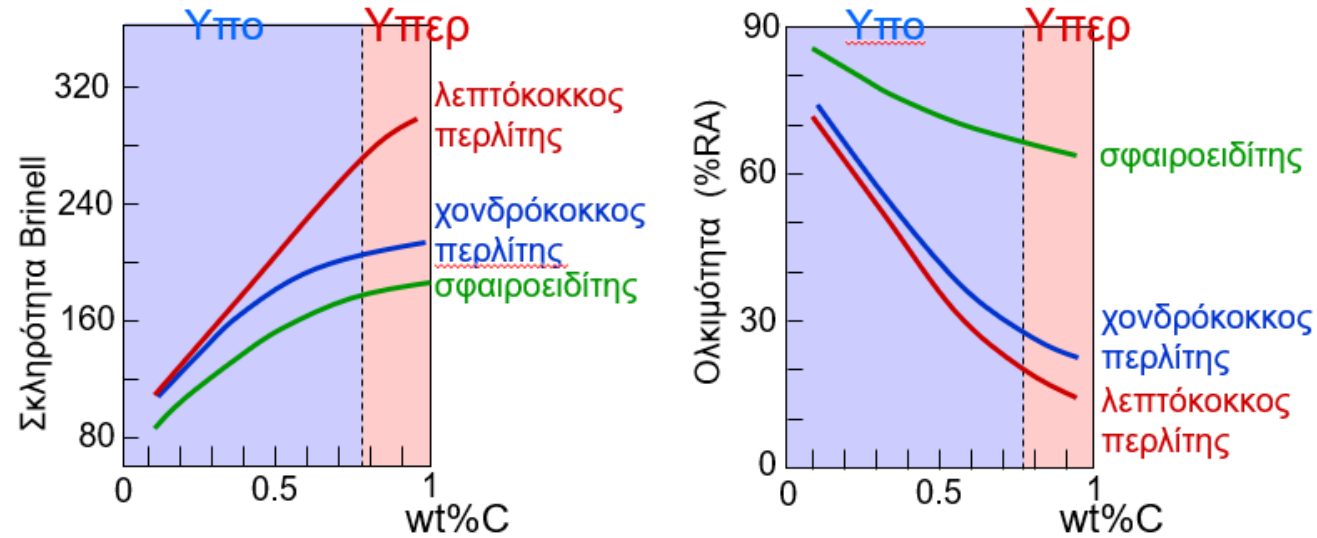
- μέρος του ωστενίτη μετασχηματίζεται πρώτα
- και μετά μπορεί να σχηματιστεί λίγος μαρτενσίτης.

Μετατροπή διαγράμματος ισόθερμου μετασχηματισμού σε διάγραμμα μετασχηματισμού συνεχούς ψύξης



Μετασχηματισμοί Φάσεων

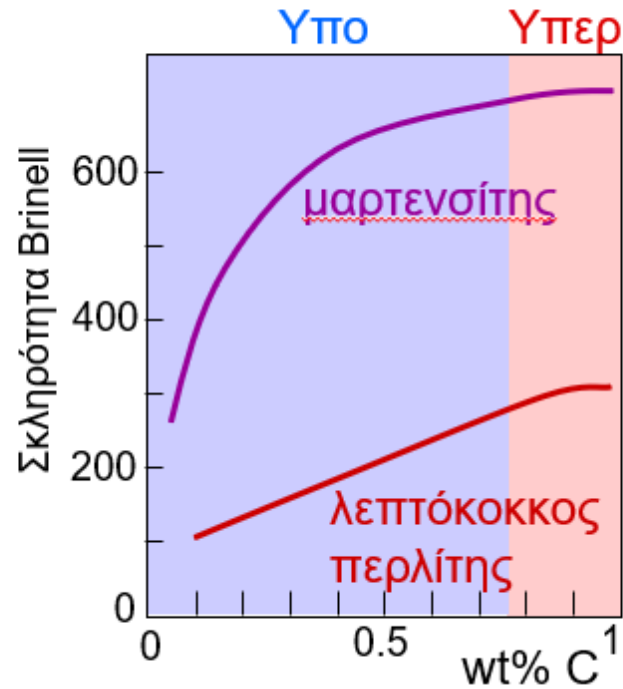
- Μηχ. Ιδιότητες: Λεπτόκοκκος περλίτης έναντι χονδρόκοκκου περλίτη, έναντι σφαιροειδίτη



- **Σκληρότητα:** λεπτόκοκκος > χονδρόκοκκος > σφαιροειδίτης
- **Ολκιμότητα (%RA):** λεπτόκοκκος < χονδρόκοκκος < σφαιροειδίτης

Μετασχηματισμοί Φάσεων

- Μηχ. Ιδιότητες: Λεπτόκοκκος περλίτης έναντι μαρτενσίτη



- λεπτόκοκκος περλίτης → καλή ισορροπία αντοχής/ολκιμότητας
- μαρτενσίτης → μέγιστη σκληρότητα αλλά μεγάλη ψαθυρότητα

- Σκληρότητα: λεπτόκοκκος περλίτης << μαρτενσίτη.

Μετασχηματισμοί Φάσεων

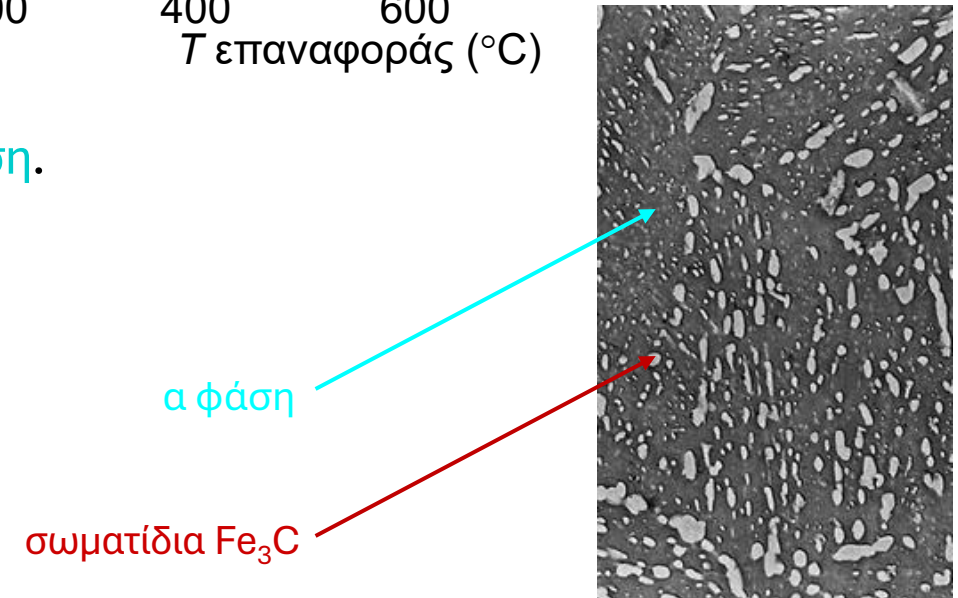
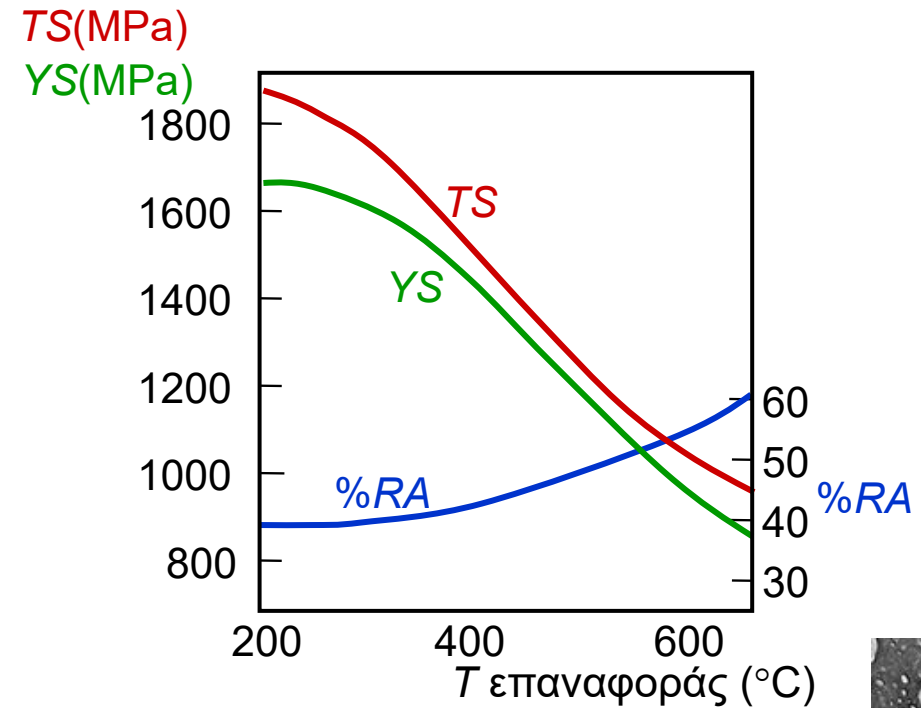
☐ Μαρτενσίτης από επαναφορά

Σχηματίζεται με θερμική κατεργασία μαρτενσίτη

- είναι λιγότερο ψαθυρός από τον μαρτενσίτη
- η κατεργασία επαναφοράς (επιβελτίωση) μειώνει τις εσωτερικές τάσεις που προκαλούνται από τη βαφή

- η επαναφορά παράγει εξαιρετικά μικρά σωματίδια Fe_3C που περιβάλλονται από α φάση.

η επαναφορά μειώνει τα TS , YS αλλά αυξάνει το $\%RA$



Μετασχηματισμοί Φάσεων

Άσκηση:

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα ισόθερμου μετασχηματισμού για κράμα σιδήρου-άνθρακα ευτηκτοειδούς σύστασης, να προσδιοριστεί η φύση της τελικής μικροδομής (και τα περίπου ποσοστά των μικροσυστατικών) για ένα μικρό δοκίμιο που υποβάλλεται στις παρακάτω θερμικές κατεργασίες.

Να θεωρήσετε ότι αρχικά το δοκίμιο βρίσκεται στους 760°C και έχει παραμείνει αρκετό χρόνο ώστε να αποκτήσει πλήρως και ομογενώς ωστενιτική δομή.

(α)

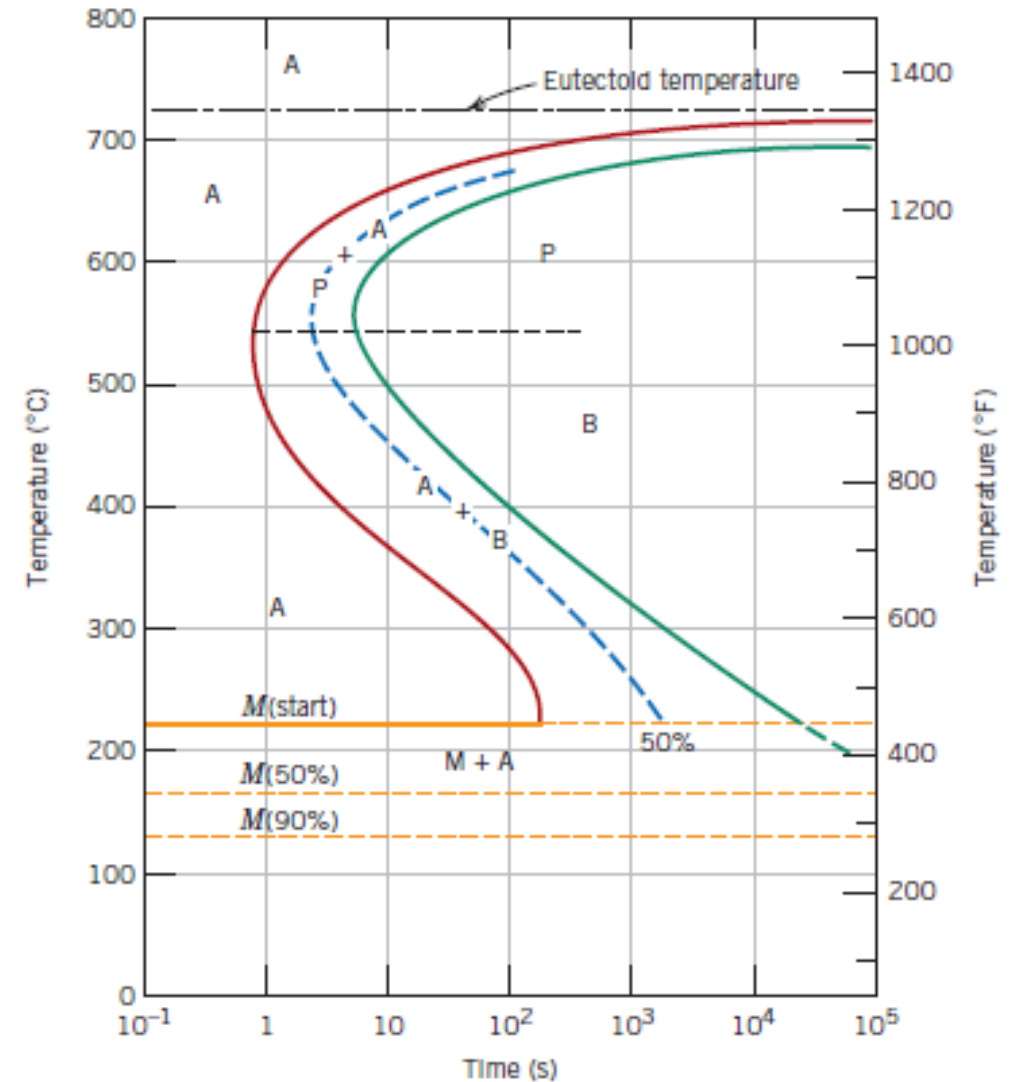
Ταχεία ψύξη στους 350°C , παραμονή για 10^4 s , και στη συνέχεια βαφή μέχρι θερμοκρασία περιβάλλοντος.

(β)

Ταχεία ψύξη στους 250°C , παραμονή για 100 s , και στη συνέχεια βαφή μέχρι θερμοκρασία περιβάλλοντος.

(γ)

Ταχεία ψύξη στους 650°C , παραμονή για 20 s , ταχεία ψύξη στους 400°C , παραμονή για 10^3 s , και στη συνέχεια βαφή μέχρι θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Μετασχηματισμοί Φάσεων

(α) Στους 350°C

ο ωστενίτης μετασχηματίζεται ισόθερμα σε μπαϊνίτη, ο μετασχηματισμός αρχίζει περίπου στα 10 s, και ολοκληρώνεται περίπου στα 500 s.

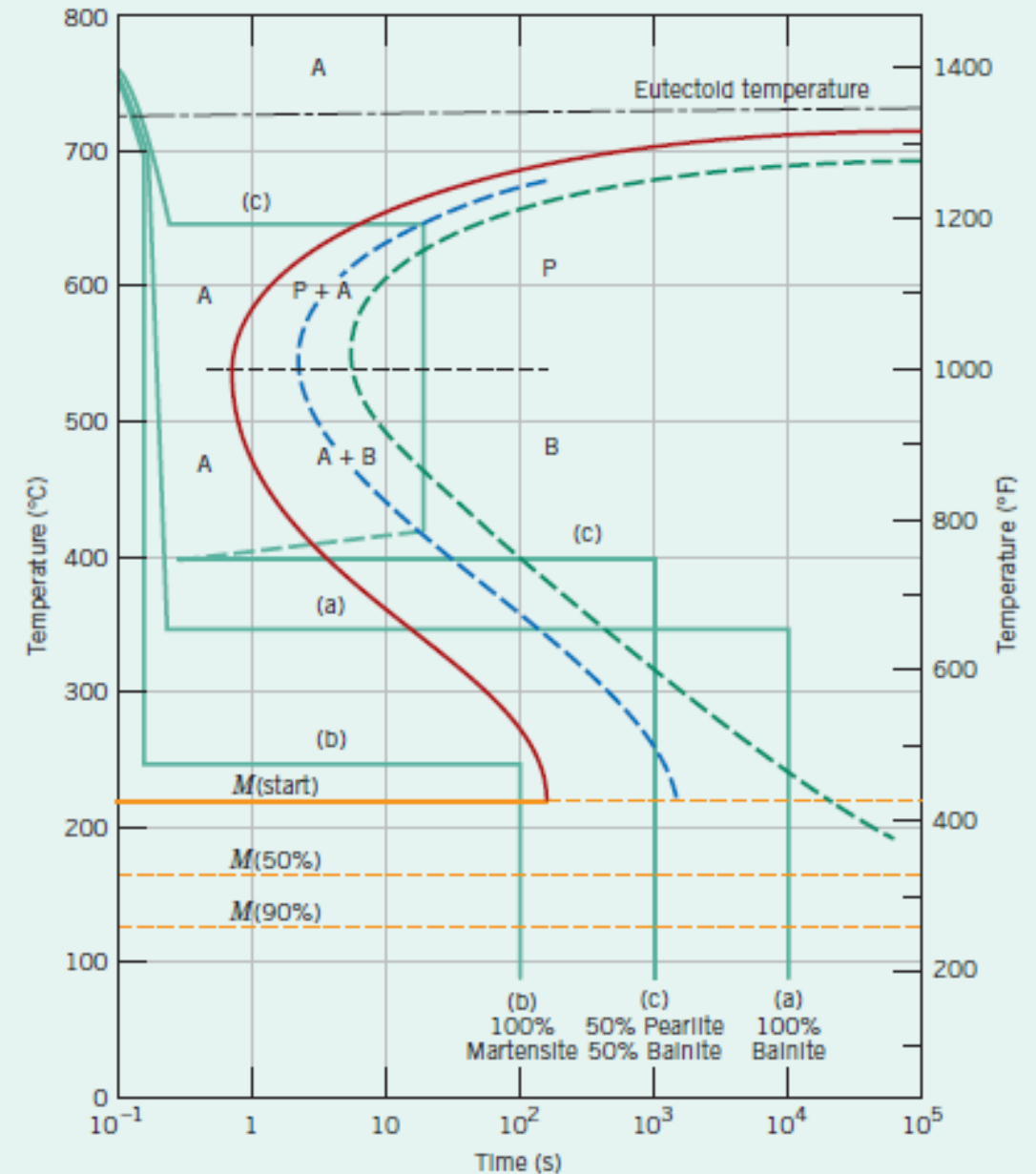
Εφόσον το δοκίμιο παραμένει για 10^4 s ο μετασχηματισμός ολοκληρώνεται πλήρως.

Μετά τη βαφή:

δεν απομένει ωστενίτης, άρα δεν σχηματίζεται μαρτενσίτης.

Τελική μικροδομή:

100% μπαϊνίτης



Μετασχηματισμοί Φάσεων

(β) Στους 250°C η έναρξη του μετασχηματισμού αρχίζει στα 150 s .

Όμως το δοκίμιο παραμένει μόνο:

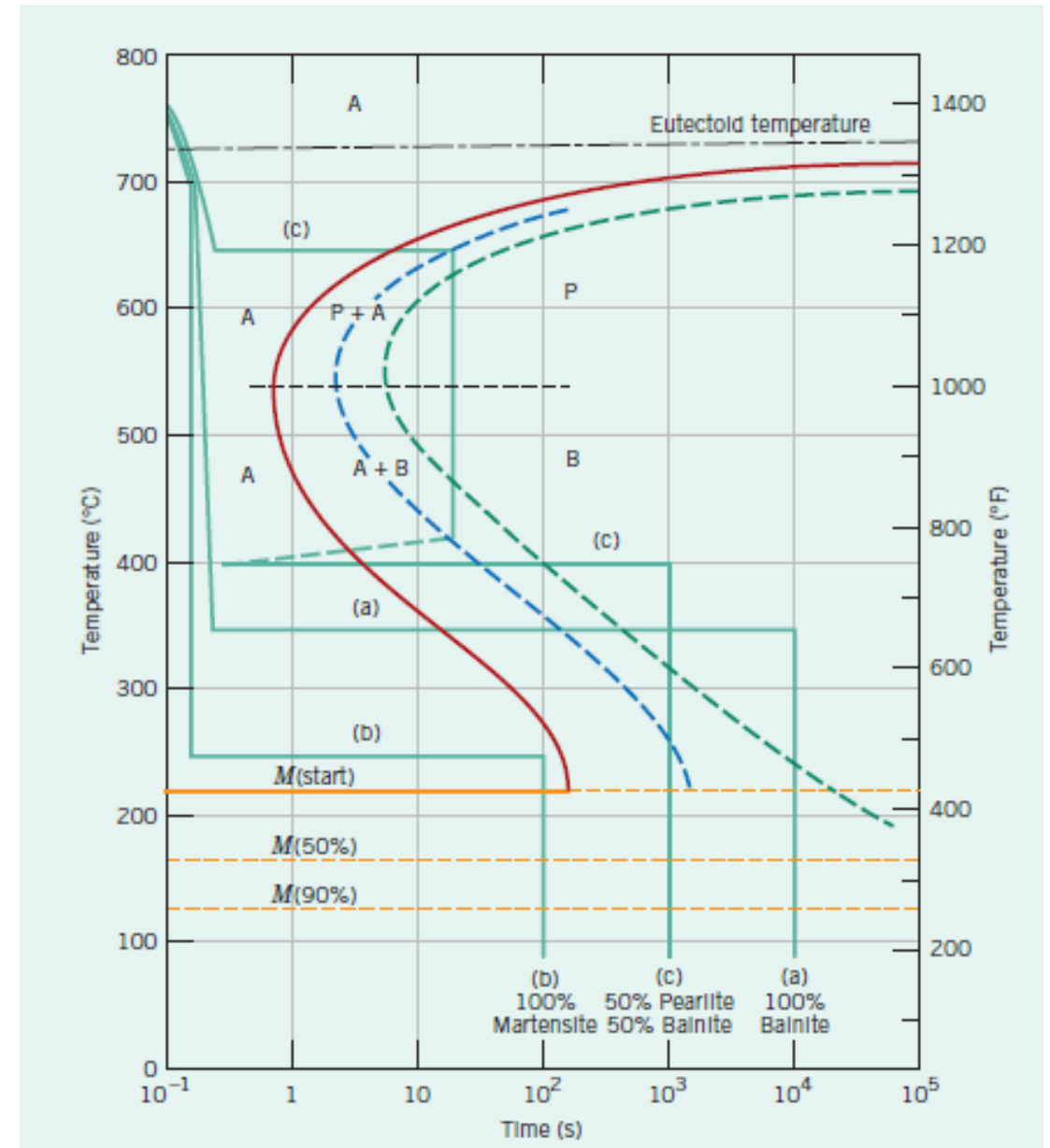
100 s

Άρα δεν έχει αρχίσει ακόμη ο σχηματισμός μπαϊνίτη, το δοκίμιο παραμένει 100% ωστενίτης.

Κατά τη βαφή το δοκίμιο περνά κάτω από τη θερμοκρασία M_s και ο ωστενίτης μετατρέπεται σε μαρτενσίτη.

Τελική μικροδομή:

100% μαρτενσίτης



Μετασχηματισμοί Φάσεων

(γ) Στους 650°C ο περλίτης αρχίζει να σχηματίζεται περίπου στα 7 s , και στα 20 σπερίπου το 50% του ωστενίτη έχει μετατραπεί σε περλίτη.

Άρα 50% περλίτης + 50% ωστενίτης

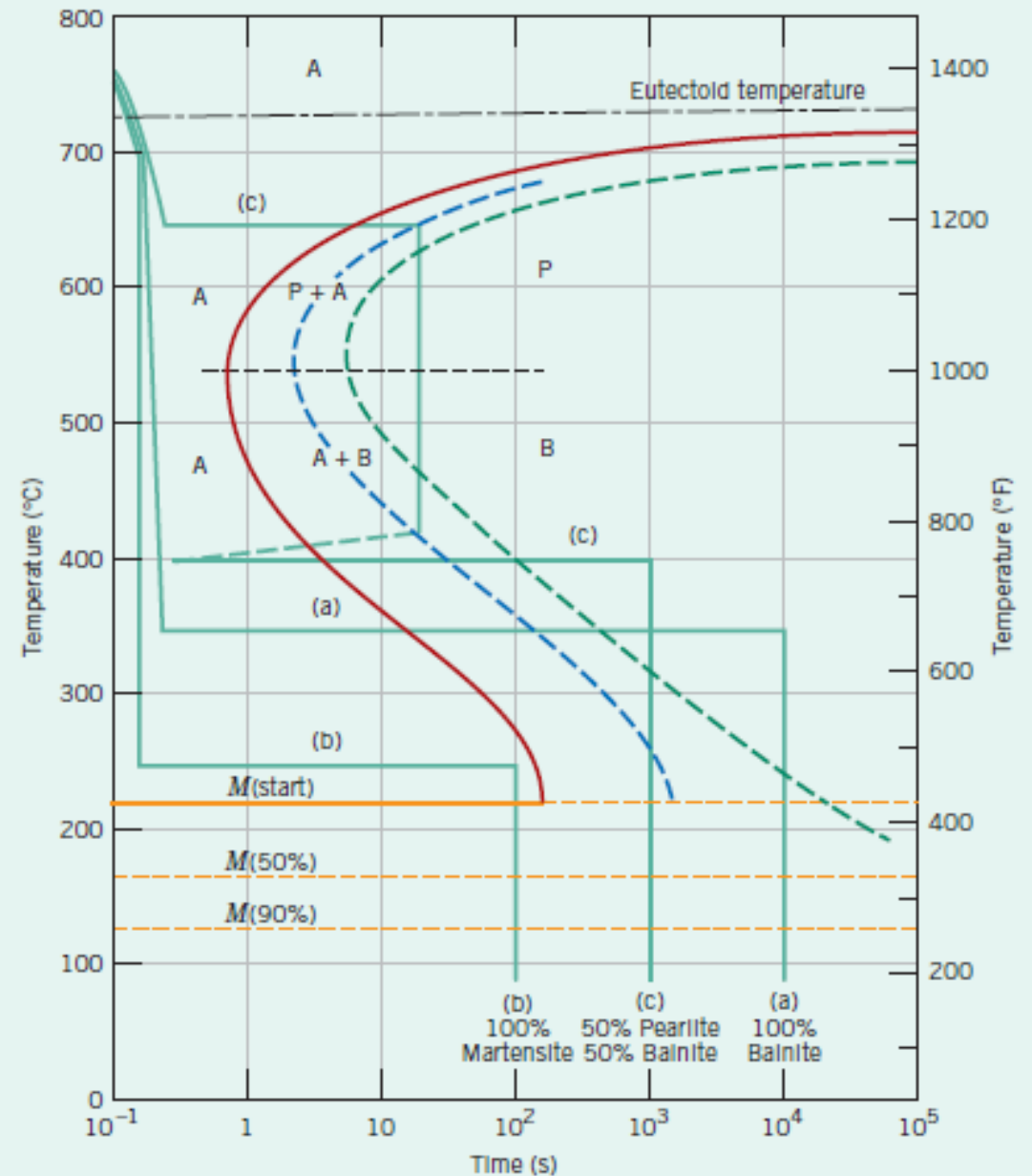
Ταχεία ψύξη στους 400°C

Η ψύξη είναι αρκετά γρήγορη ώστε να μην σχηματιστεί επιπλέον ποσότητα περλίτη ή μπαινίτη κατά τη διαδρομή. Στους 400°C μετά την πάροδο των 10^3 sec το υπόλοιπο 50% του ωστενίτη θα έχει μετατραπεί πλήρως σε μπαινίτη.

Μετά τη βαφή δεν έχει απομένει ωστενίτης, άρα δεν σχηματίζεται μαρτενσίτης.

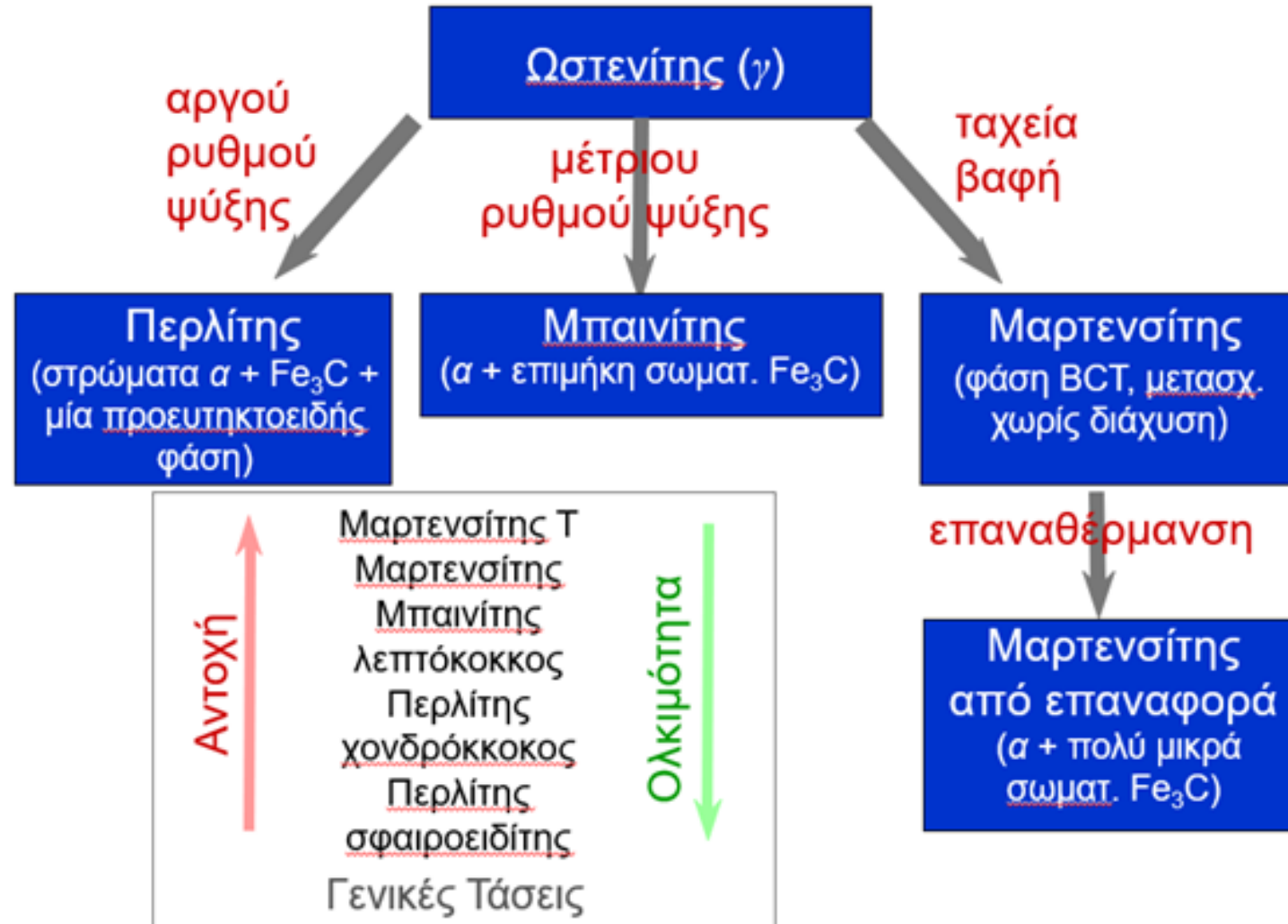
Τελική μικροδομή:

50% περλίτης + 50% μπαινίτης



Μετασχηματισμοί Φάσεων

☐ Σύνοψη εφικτών μετασχηματισμών



Figures adapted from:

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