



Μεταλλουργικά φαινόμενα συγκολλήσεων II

ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑ 9

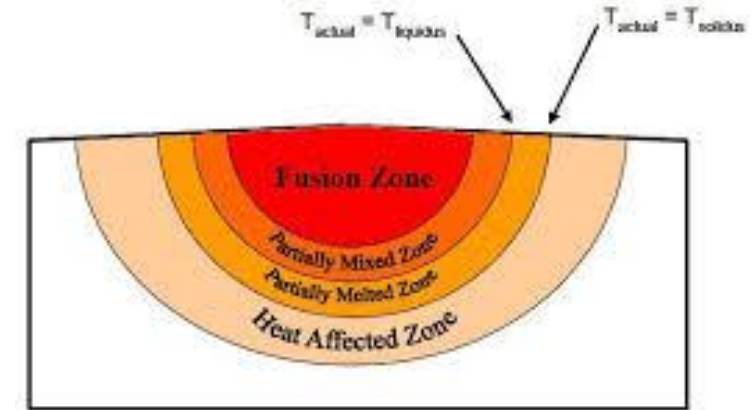
ΜΕΡΟΣ Α

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μακρογραφική παρατήρηση ραφής συγκόλλησης τήξης

Σε συγκολλήσεις τήξης παρατηρούνται 4 Ζώνες:

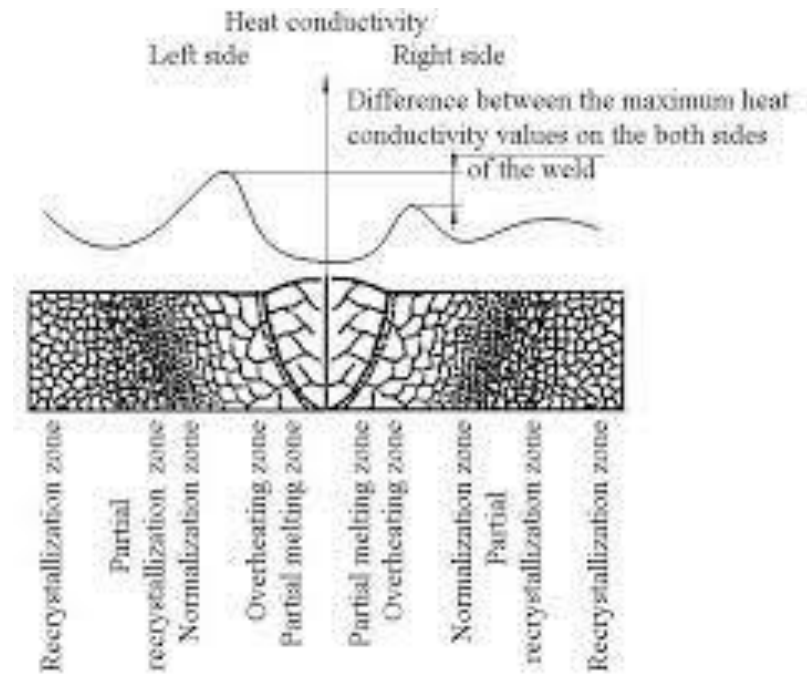
- ❑ Μέταλλο συγκόλλησης (ΜΣ)
- ❑ Ζώνη μερικής τήξης (ZMT)
- ❑ Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ)
- ❑ Βασικό μέταλλο (ΒΣ)



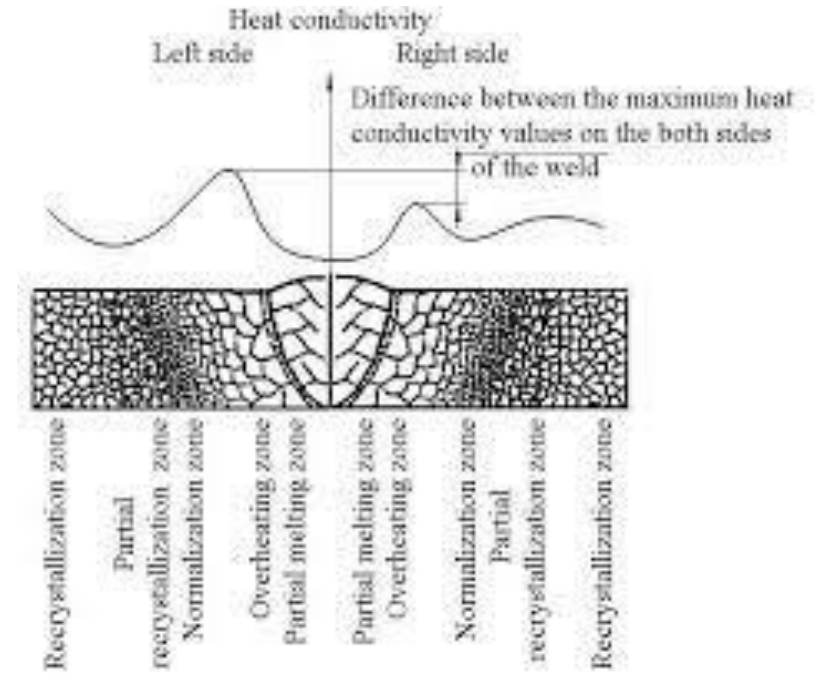
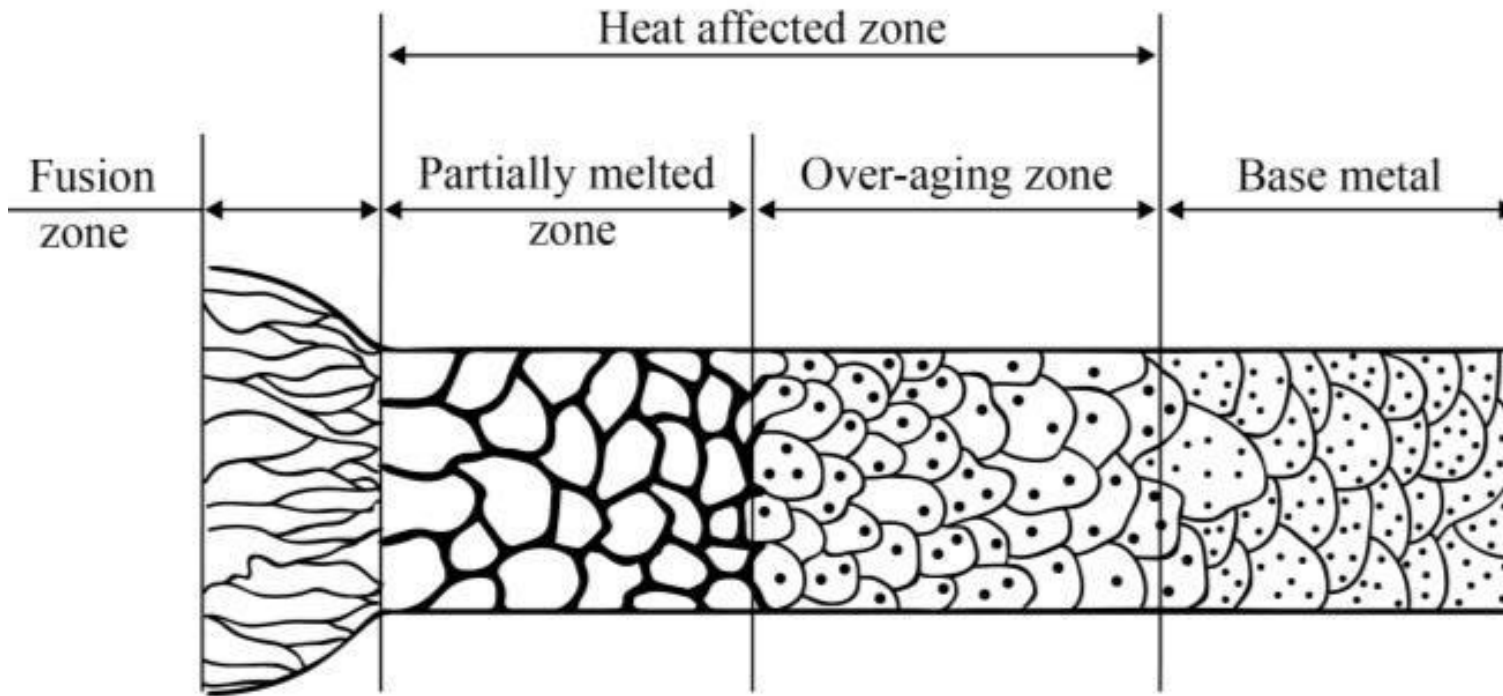
Διαφορισμός

- Η ανομοιογένεια στη δομή των συγκολλήσεων οφείλεται στο φαινόμενο του διαφορισμού, ο οποίος διακρίνεται σε

- a) Μακροδιαφορισμό
- b) Μικροδιαφορισμό



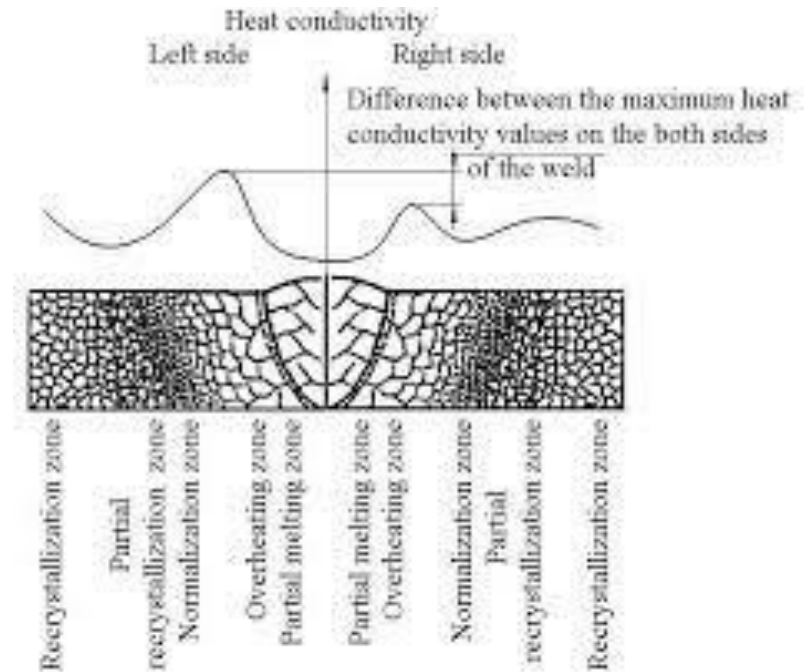
Μακρογραφική παρατήρηση ραφής συγκόλλησης τήξης



Μέταλλο συγκόλλησης (ΜΣ)

Σε συγκολλήσεις τήξης στο μέταλλο συγκόλλησης

- ❑ Σχηματίζονται δενδρίτες έντονα προσανατολισμένοι λόγω ταχεία στερεοποίησης
- ❑ Ο προσανατολισμός τους ακολουθεί τη διεύθυνση της των ισόθερμων καμπυλών
- ❑ Η ταχύτητα στερεοποίησης είναι ίδιας τάξης μεγέθους με την ταχύτητα συγκόλλησης δλδ mm/s



Ζώνη μερικής τήξης (ZMT)

Σε συγκολλήσεις τήξης η ζώνη μερικής τήξης

- ❑ Βρίσκεται μεταξύ ΘΕΖ και ΜΣ
- ❑ Δεν είναι ευδιάκριτη σε καθαρά μέταλλα, ενώ είναι περισσότερο διακριτή σε κράματα
- ❑ Παρατηρούνται μεταλλουργικοί δεσμοί με το τηγμένο μέταλλο
- ❑ Η υγροποίηση των ορίων των κόκκων μπορεί να προκαλέσει ρωγματώσεις
- ❑ Καθώς σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα υγρού μετάλλου, χωρίς μηχανική αντοχή
- ❑ Έτσι οι ρωγματώσεις οφείλονται στα φορτία της συγκόλλησης (μηχανικά, θερμικά)

Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΕΖ)

Σε συγκολλήσεις τήξης η ΘΕΖ

- ❑ Αποτελεί συνέπεια του θερμικού κύκλου
- ❑ Κάθε σημείο της μικροδομής «βιώνει» διαφορετικά τον θερμικό κύκλο επομένως δεν παρατηρείται ομοιογένεια στις μηχανικές ιδιότητες της
- ❑ Παράγονται αρκετά υψηλές θερμοκρασίες για να προκαλέσουν μεταβολές στη μικροδομή σε στερεά κατάσταση
- ❑ Ταυτόχρονα και αρκετά χαμηλές για να προκαλέσουν τήξη
- ❑ Σε ΘΕΖ χωρίς αλλαγή φάσης παρατηρείται μεγέθυνση των κόκκων και άρα υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων

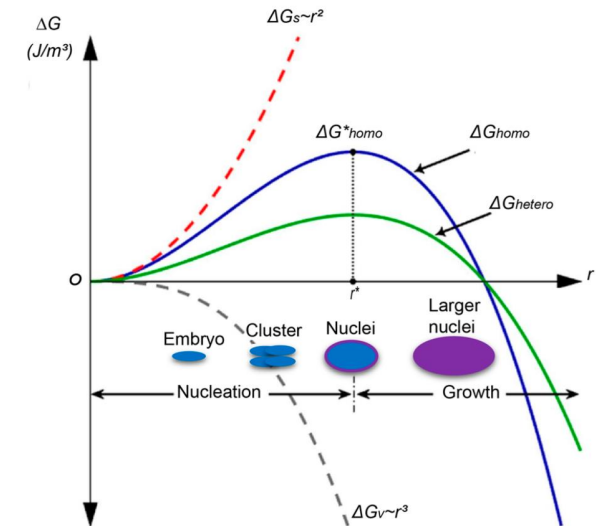
Βασικό Μέταλλο (BM)

Σε συγκολλήσεις τήξης στο BM

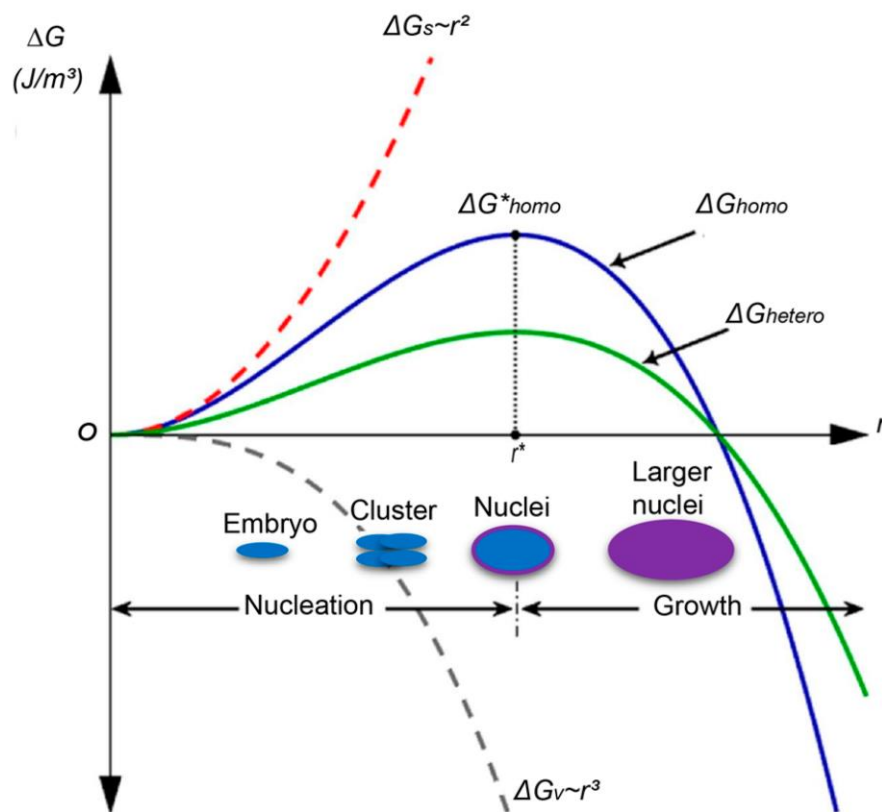
- ❑ Δεν παρατηρείται καμία μεταβολή φάσης ή μεταλλουργικός μετασχηματισμός
- ❑ Είναι φορέας παραμορφώσεων (διαμήκεις συστολές) και
- ❑ Παραμένουσων τάσεων (συγκράτηση τεμαχίων)

Πυρηνοποίηση σε υγρές φάσεις

- ❑ Τα άτομα του υγρού εξαναγκάζονται σε διαρκή κίνηση λόγω θερμικής ανάδευσης του τήγματος
- ❑ Κάποιες φορές σχηματίζονται εμβριακοί κρύσταλλοι μετά από συνένωση μικρών ομάδων ατόμων
- ❑ Οι εμβριακοί κρύσταλλοι είτε θα διαλυθούν μετά από μικρό διάστημα στη μάζα του υγρού ή
- ❑ Θα σχηματίσουν κρυσταλλικούς πυρήνες



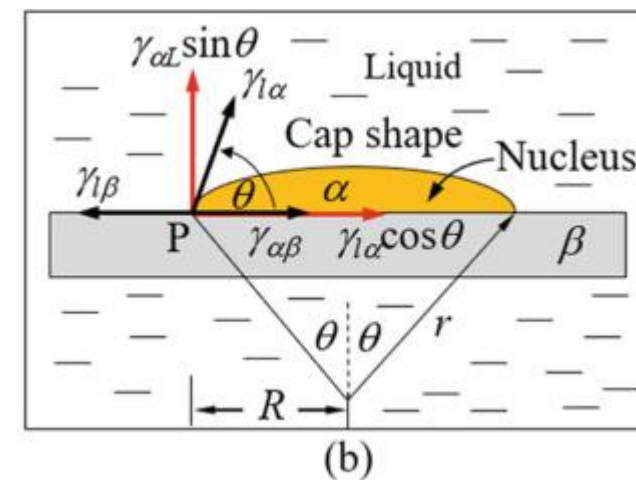
Μαθηματική διατύπωση πυρηνοποίησης σε υγρή φάση



- Η $\Delta G(r)$ παρουσιάζει μέγιστο ΔG^* και r^*
- Τα οποία ονομάζονται ενέργεια ενεργοποίησης και κρίσιμη ακτίνα πυρηνοποίησης, αντίστοιχα

Ετερογενής πυρηνοποίηση

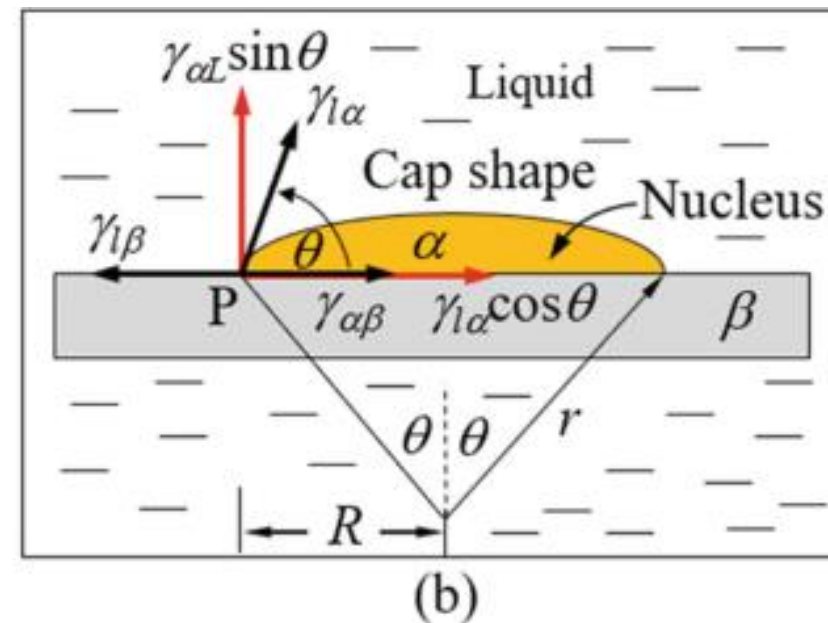
- Η ετερογενής πυρηνοποίηση πραγματοποιείται σε ατέλειες της δομής της επιφάνειας καταλύτη (οπές, αταξίες, σύνορα κόκκων κ.α.)
- Καθώς ένα μέρος της ελεύθερης ενέργειας των ατελειών οδηγεί στην υπέρβαση του ενεργειακού φραγμού, για την πραγματοποίηση της πυρηνοποίησης



Ετερογενής πυρηνοποίηση

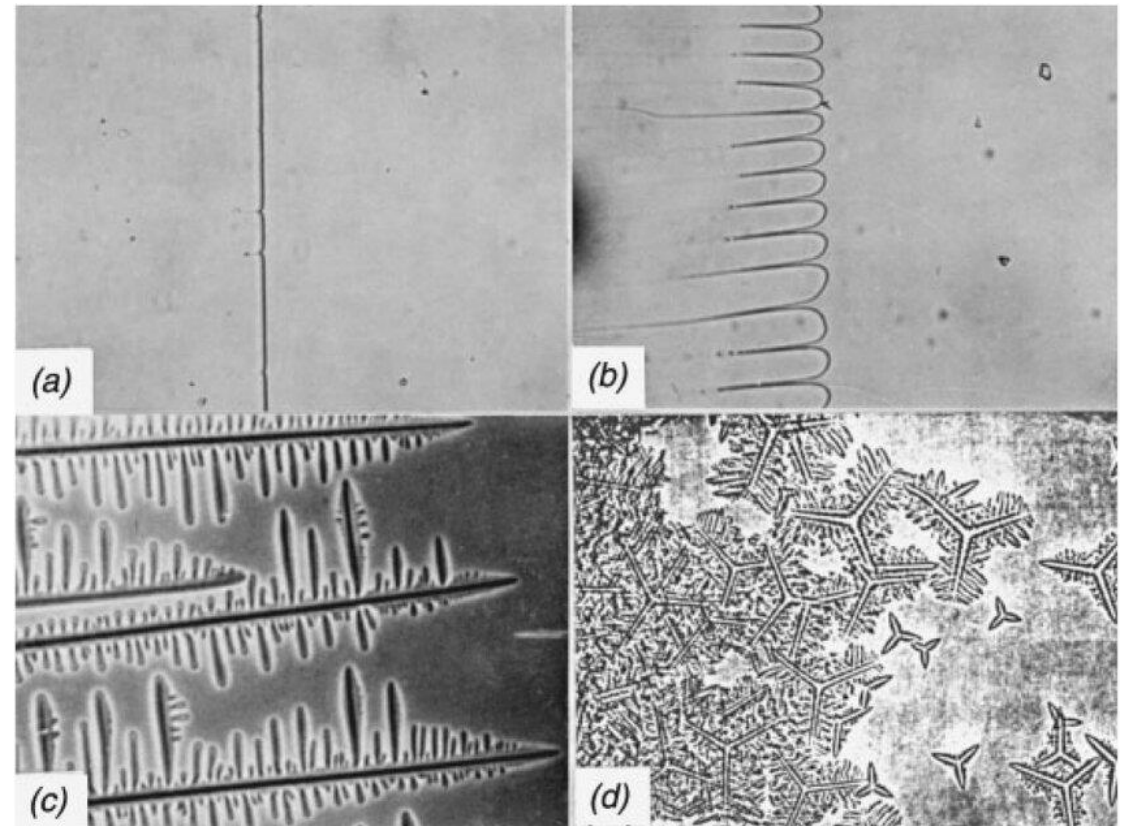
$$\Delta G_{het} = f(\theta) \Delta G_{hom}$$

$$f(\theta) = \frac{1}{2}(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2$$



Μορφολογία ανάπτυξης πυρήνων

- Επίπεδη ανάπτυξη
- Δενδριτική ανάπτυξη
- Κυψελοειδής ανάπτυξη



Μαθηματική διατύπωση κριτηρίου σχηματιζόμενης μορφολογίας

$$\frac{G}{R} > \left(\frac{G}{R} \right)_{crit}, \text{ επίπεδη ανάπτυξη}$$

$$\frac{G}{R} \approx \left(\frac{G}{R} \right)_{crit}, \text{ κυψελοειδής ανάπτυξη}$$

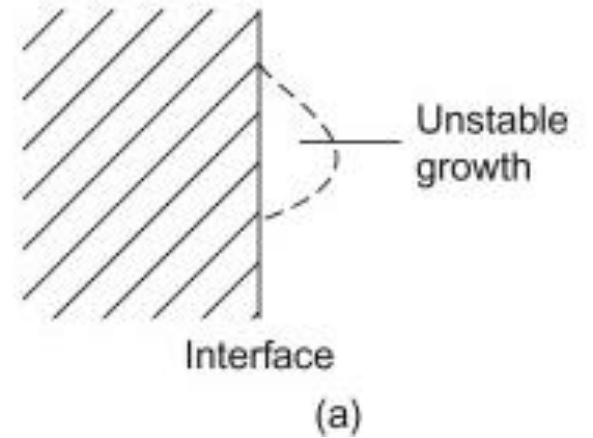
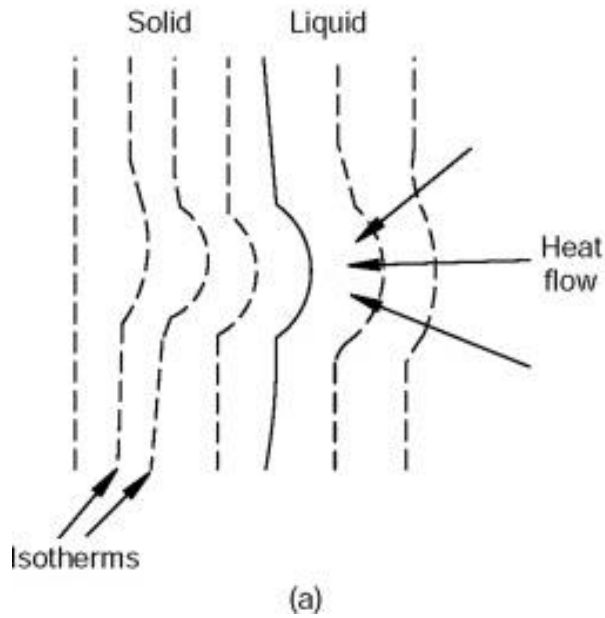
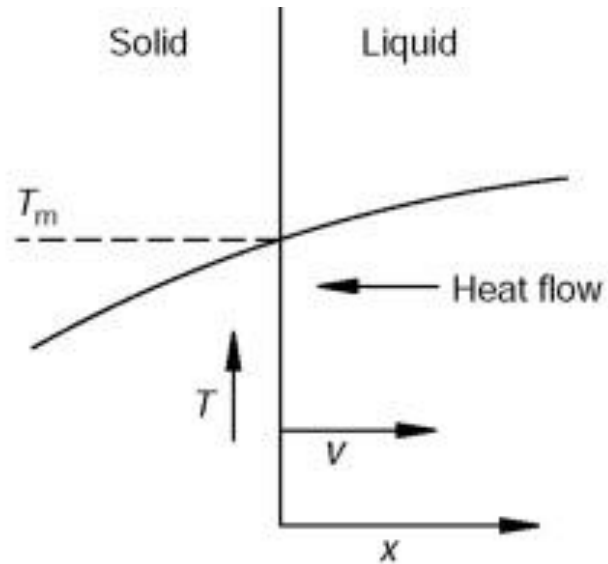
$$\frac{G}{R} < \left(\frac{G}{R} \right)_{crit}, \text{ δενδριτική ανάπτυξη}$$

Αστάθεια διεπιφάνειας

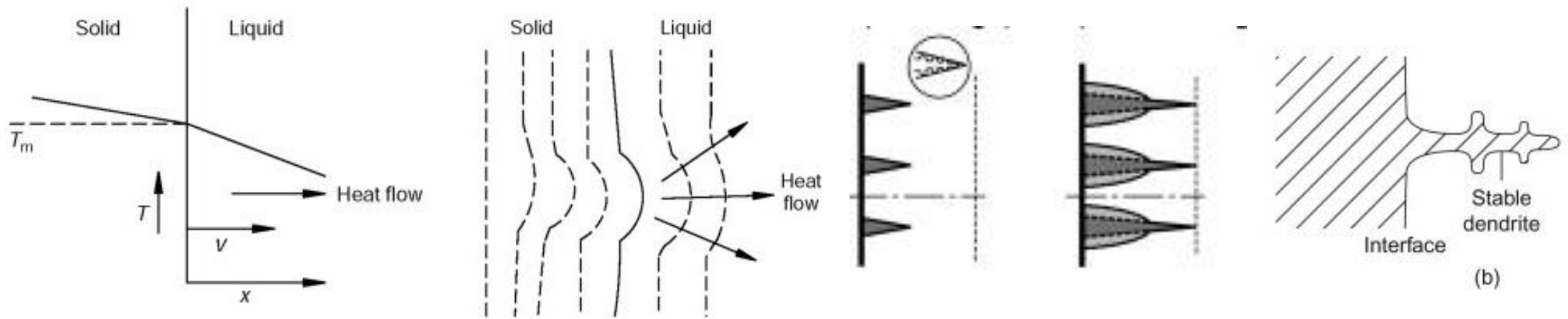
- Στην πραγματικότητα το κριτήριο αστάθειας στις συγκολλήσεις είναι

$$G = |\nabla T| < |\nabla T_L|$$

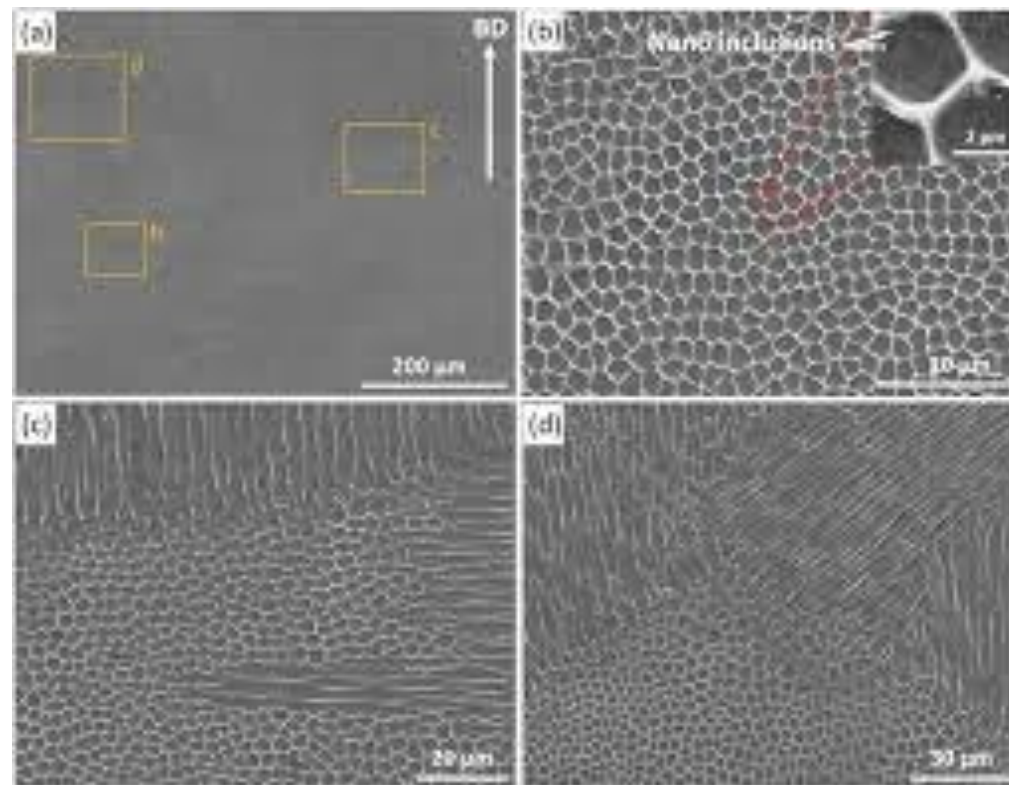
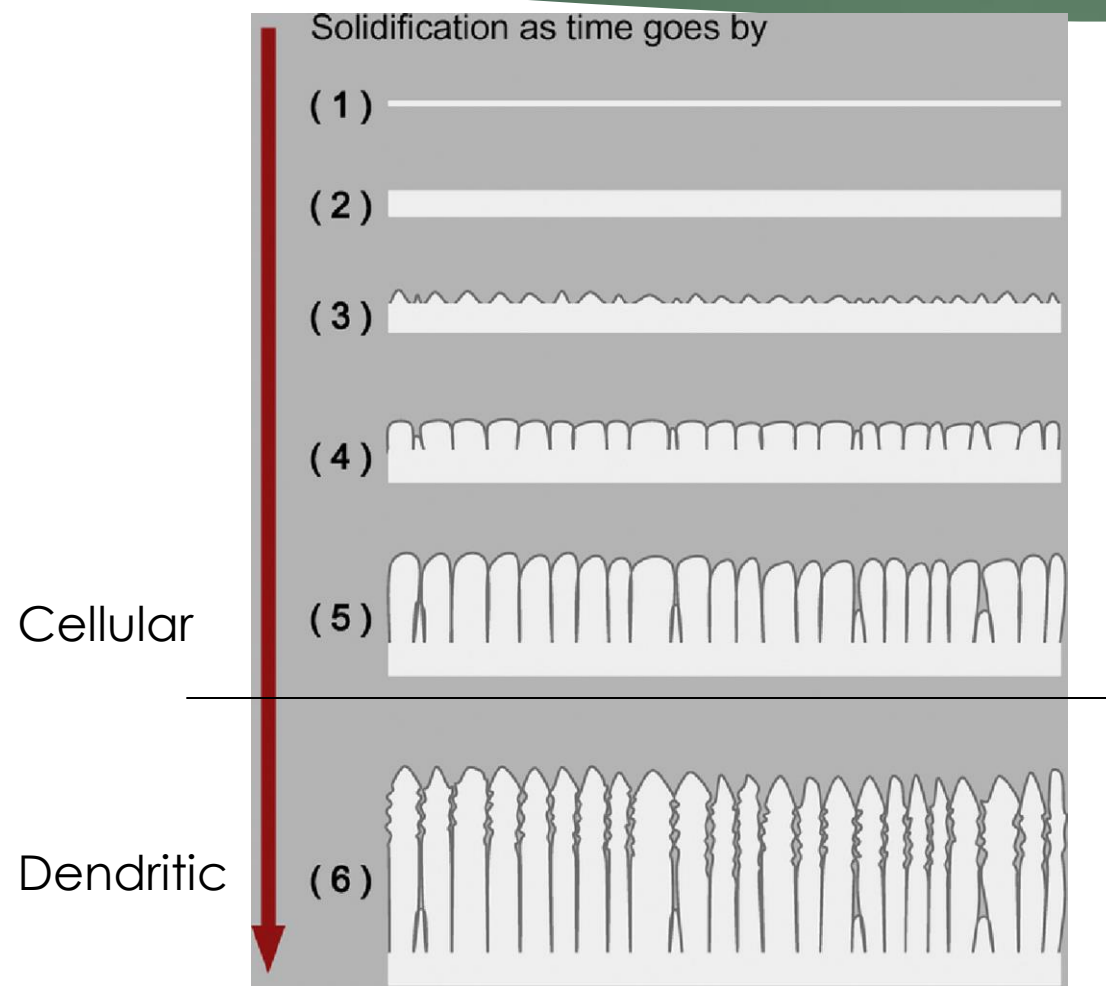
Επίπεδη ανάπτυξη



Δενδριτική ανάπτυξη

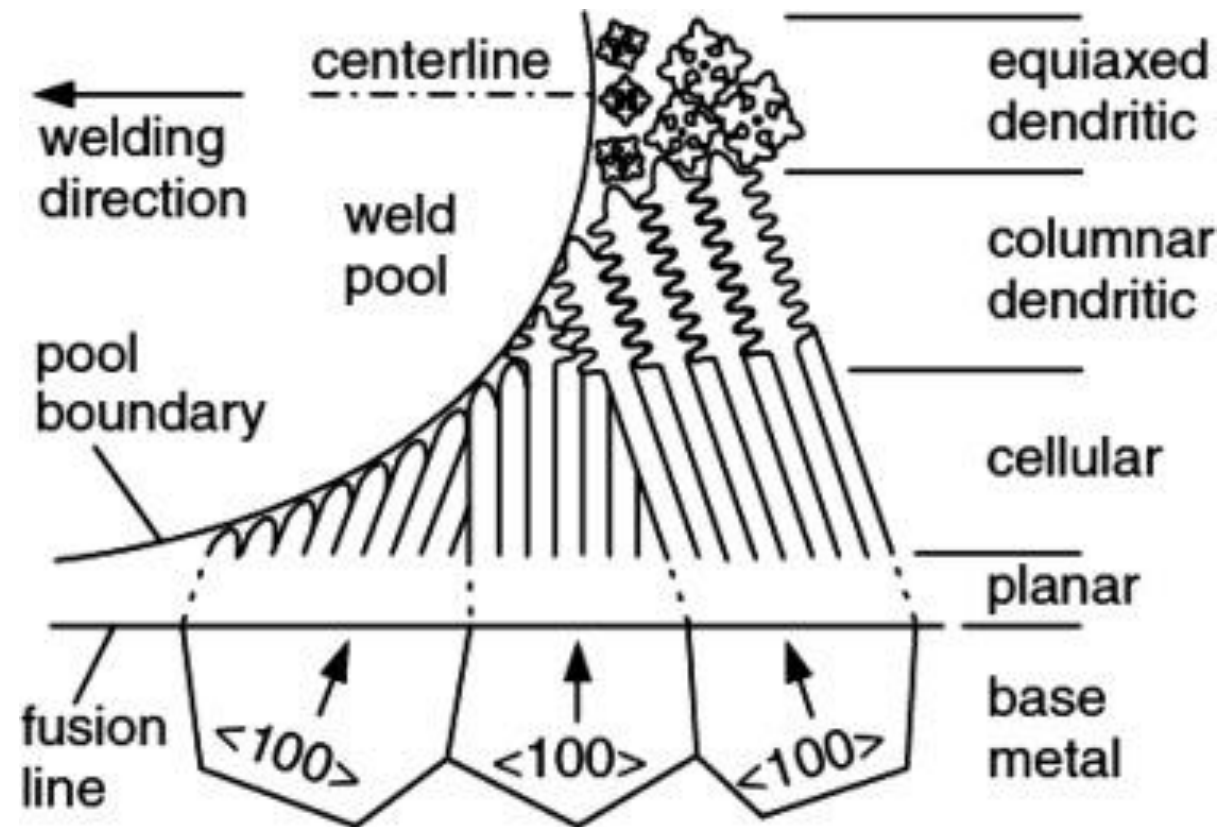


Κυψελοειδής ανάπτυξη



Πυρηνοποίηση σε συγκολλήσεις χάλυβα

20



ΜΕΡΟΣ Β

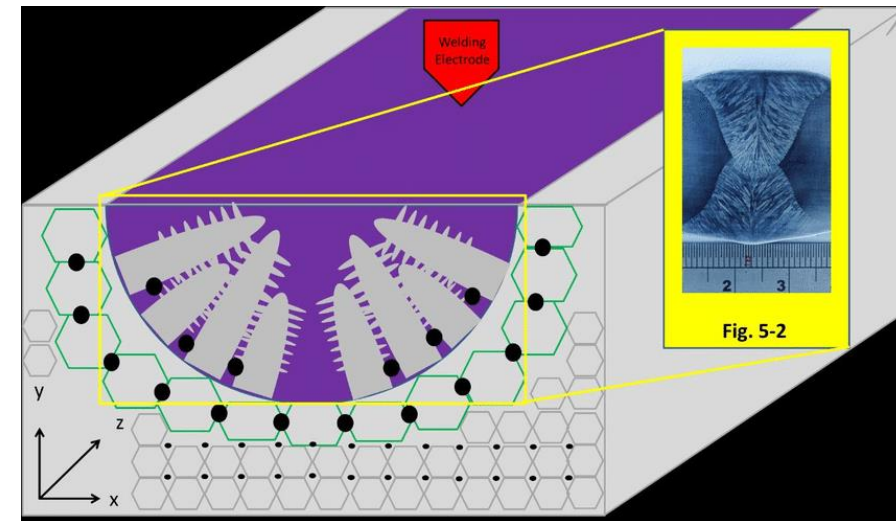
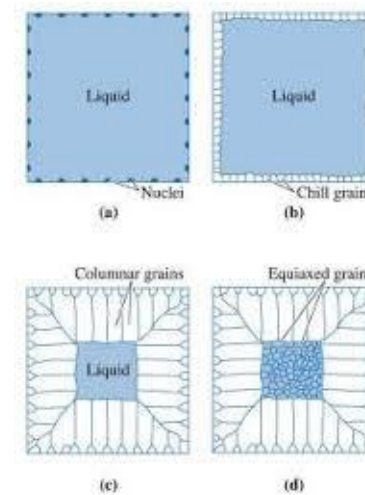
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΑ
ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ
ΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Μεταλλουργικά Φαινόμενα

- Διακρυστάλλωση
- Επιταξία
- Φαινόμενο Συναγωνισμού ή Ανταγωνισμού

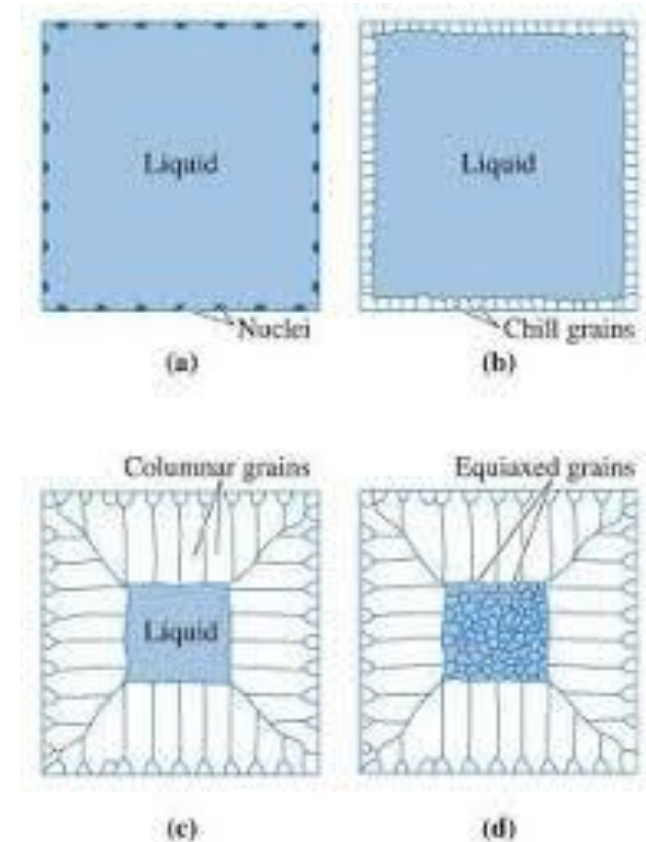
Διακρυστάλλωση

- Η ανομοιομόρφη ανάπτυξη κόκκων σε προνομιακές διευθύνσεις



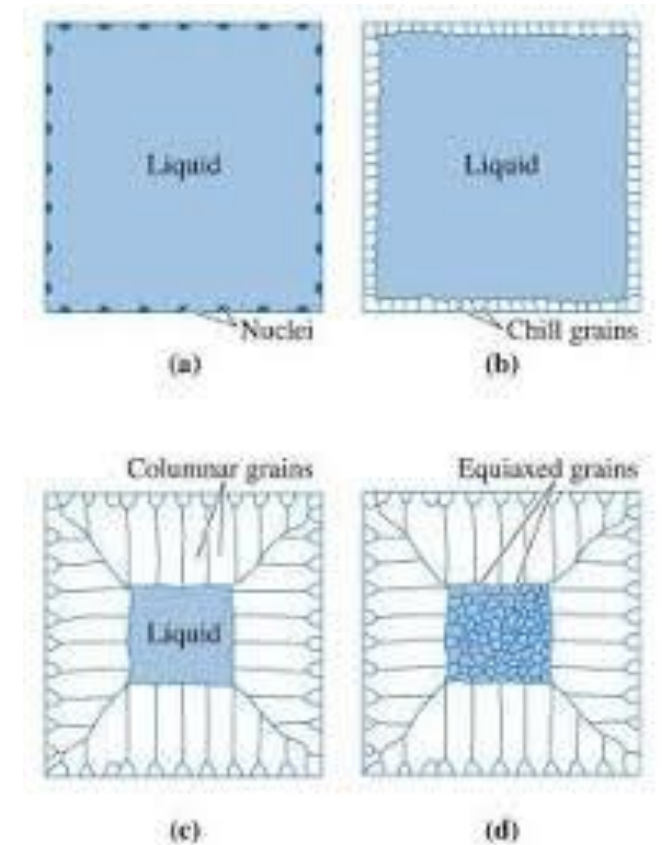
Διακρυστάλλωση

- Οφείλεται στην ανισόθερμια του τήγματος καθώς και
- Στη ροή θερμότητας κατά τη στερεοποίηση
- Η στερεοποίηση ξεκινά από τις ψυχρές προς το εσωτερικό (κέντρο) της συγκόλλησης
- Δηλαδή αντίθετα από τη ροή θερμότητας



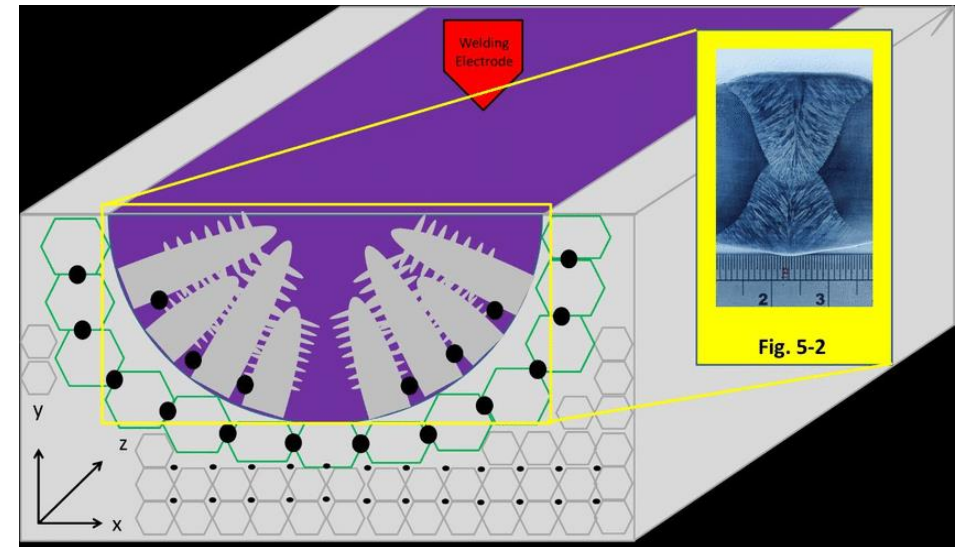
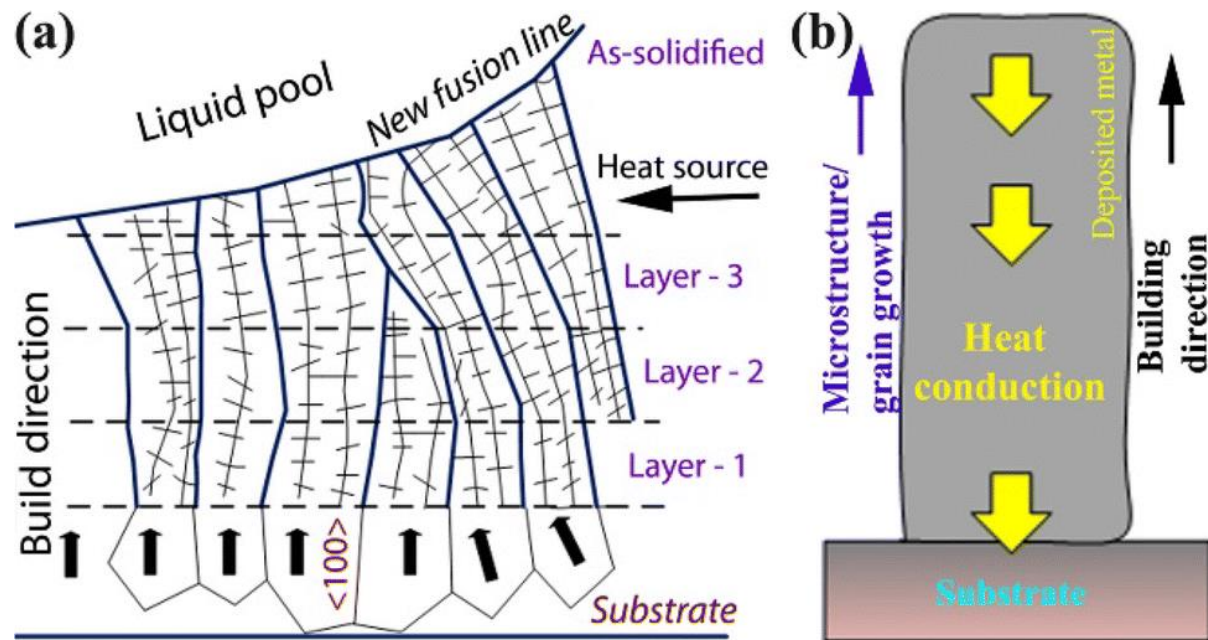
Διακρυστάλλωση

- Σχηματισμός δενδρίτων από τις ψυχρές προς τις θερμές περιοχές
- Το μέγεθος τους είναι ανάλογο της διάρκειας στερεοποίησης
- Μεγάλη διάρκεια → χονδροί και μεγάλοι δενδρίτες
- Μικρή διάρκεια → μικροί και λεπτοί δενδρίτες



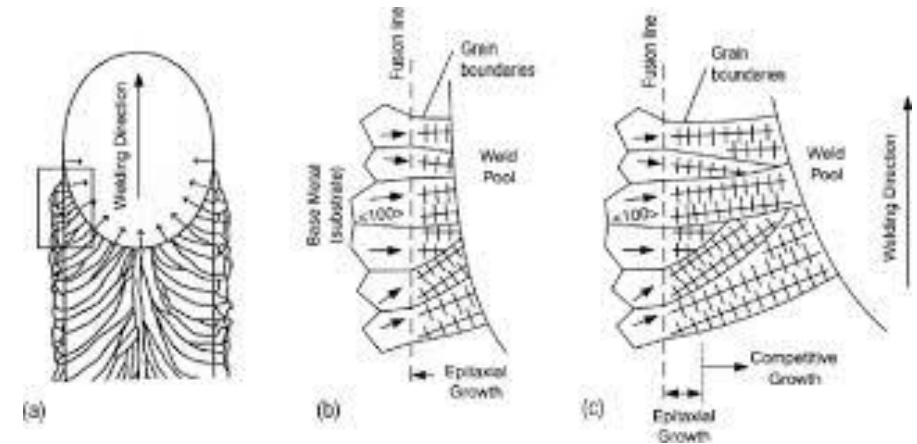
Επιταξία

- Τα άτομα στο υγρό στην διεπιφάνεια S/L τοποθετούνται στις προεκτάσεις των διευθύνσεων των ατόμων της προσκείμενης στερεάς φάσης



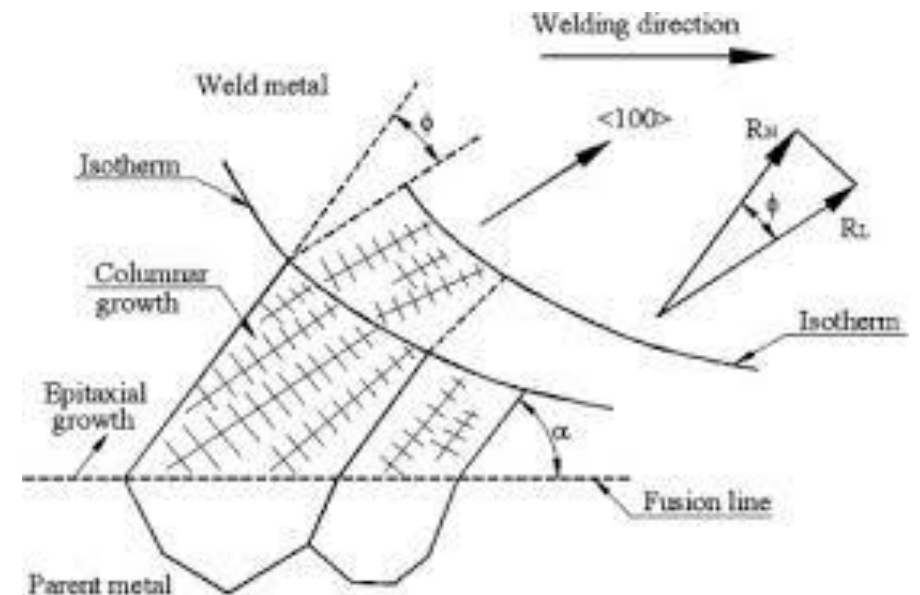
Επιταξία

- Επιταξία παρατηρείται μόνο όταν το προς συγκόλληση υλικό έχει 2 φάσεις π.χ. χάλυβας
- Σε ετερογενείς συγκολλήσεις δεν παρατηρείται επιταξία λόγω διαφορετικής σύστασης WM με BM
- Τότε νέοι κόκκοι σχηματίζονται στα όρια του βασικού μετάλλου



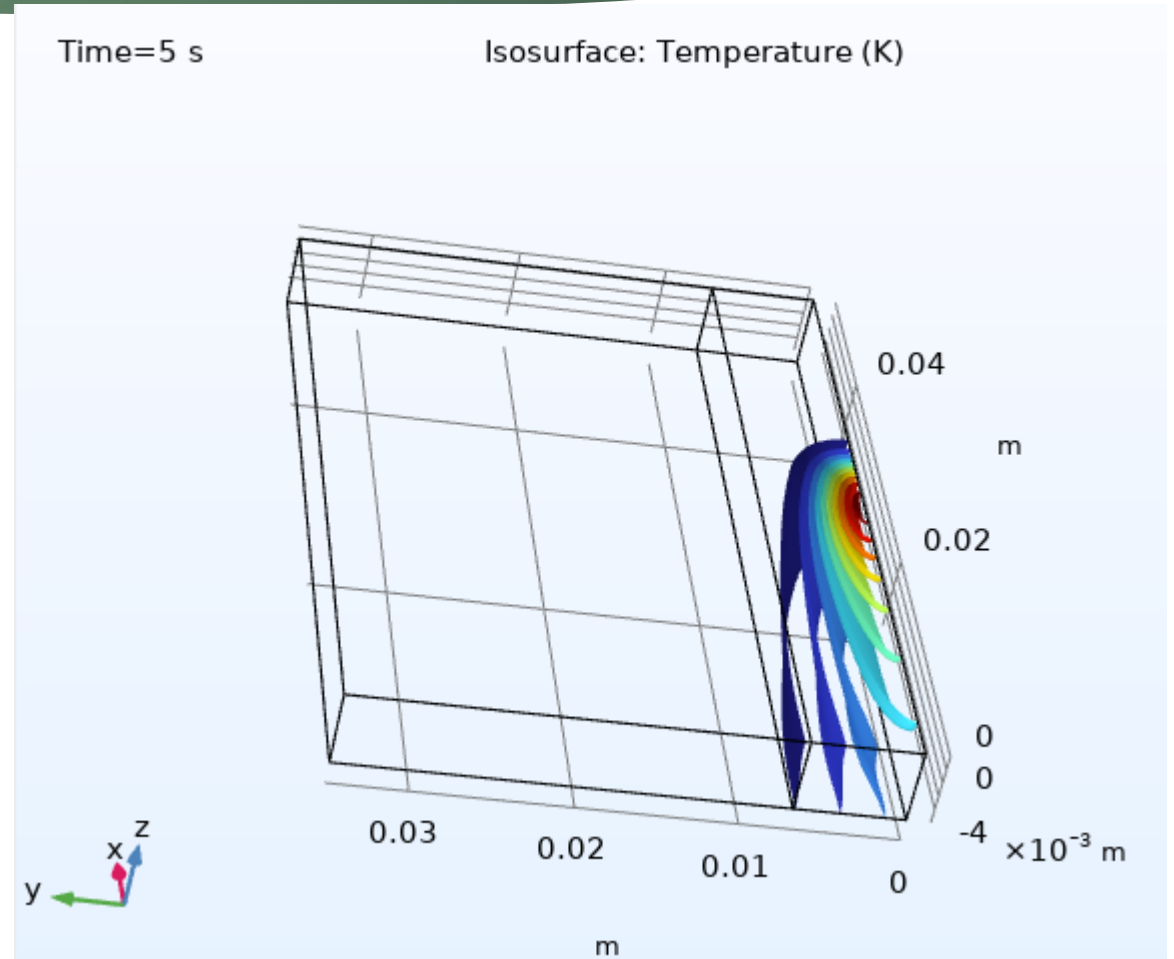
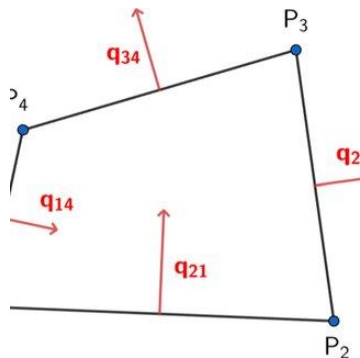
Φαινόμενο Συναγωνισμού ή Ανταγωνισμού

- Οι κρύσταλλοι με το «σωστό» προσανατολισμό θα αναπτυχθούν
- Αυτοί που είναι προσανατολισμένοι σε διαφορετικές διευθύνσεις θα σταματήσουν να αναπτύσσονται και θα εξαφανιστούν
- Ο «ευνοϊκός» προσανατολισμός είναι η διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια της ισόθερμης

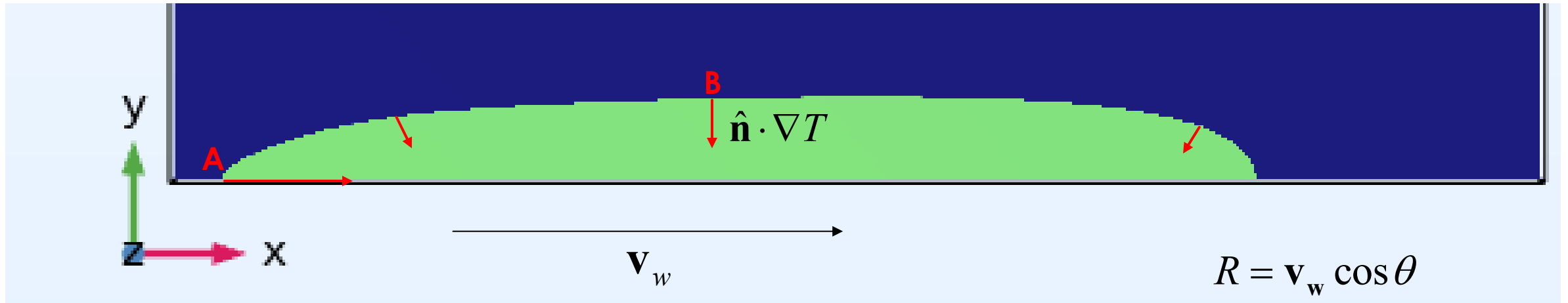


Διεύθυνση μέγιστης χωρικής παραγώγου

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot \nabla T = \hat{n}_x \frac{\partial T}{\partial x} + \hat{n}_y \frac{\partial T}{\partial y} + \hat{n}_z \frac{\partial T}{\partial z}$$

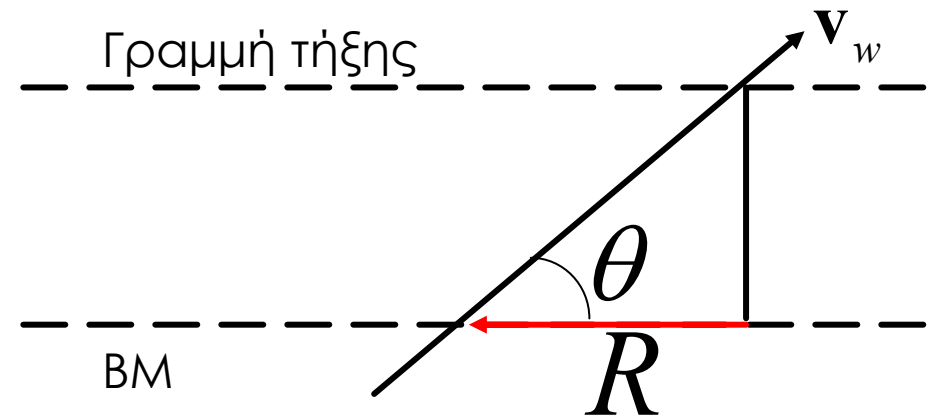


Ταχύτητα ψύξης R



Σημείο A: $\theta = 0$, και $R = \mathbf{v}_w$
 Σημείο B: $\theta = 90^\circ$, και $R = 0$

$G_A > G_B$



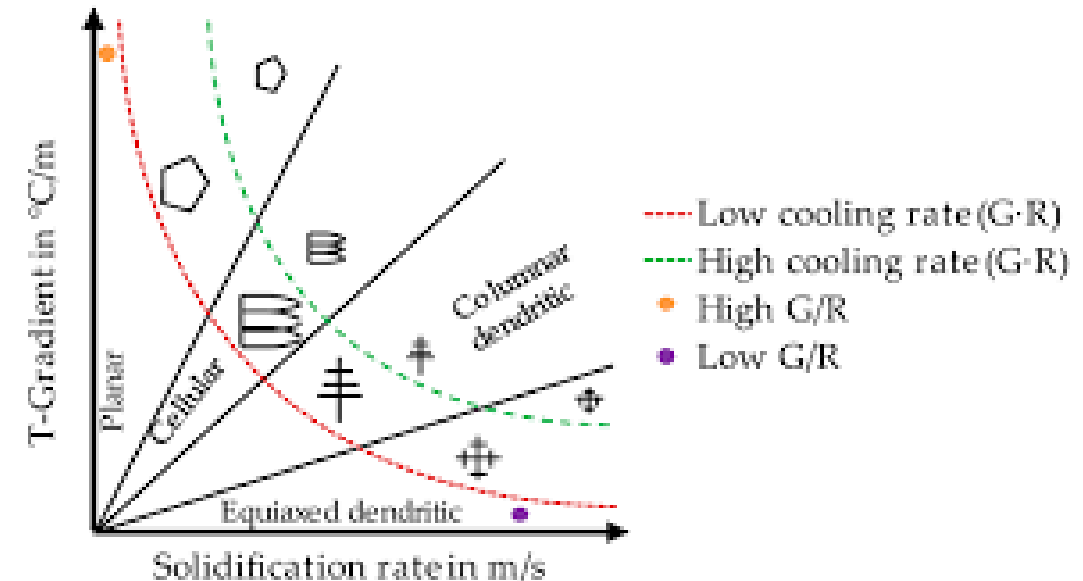
Ταχύτητα ψύξης R

- Λόγω της ροής θερμότητας (T ουρά κομήτη) καθώς η πηγή θερμότητας κινείται προς τα εμπρός
- Το υλικό στην ουρά ψύχεται πιο γρήγορα λόγω αγωγής και ακτινοβολίας

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\frac{u}{2a}w} \frac{e^{-\frac{u}{2a}R}}{R}$$

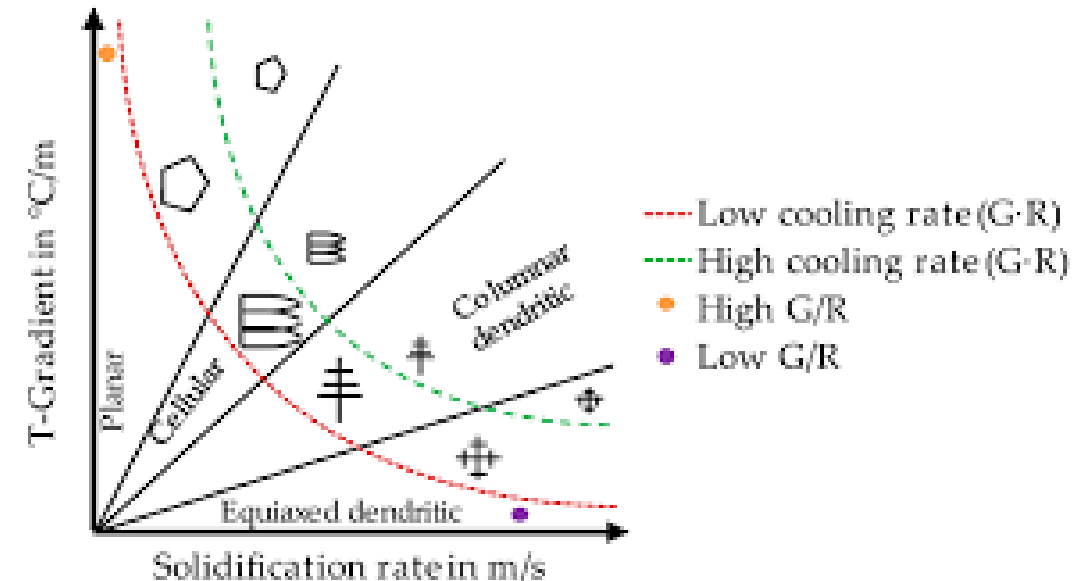
Επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας και του ρυθμού ψύξης στην Μορφολογία πυρηνοποίησης

- ▶ Χαμηλό G , και μεγάλο $R \rightarrow$ μικρός $G/R \rightarrow$ δενδρίτης
- ▶ Η ανάπτυξη δενδρίτη συνεπικουρείται από μεγάλη συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας
- ▶ Μεγάλες τιμές του $G/R \rightarrow$ επίπεδη ανάπτυξη

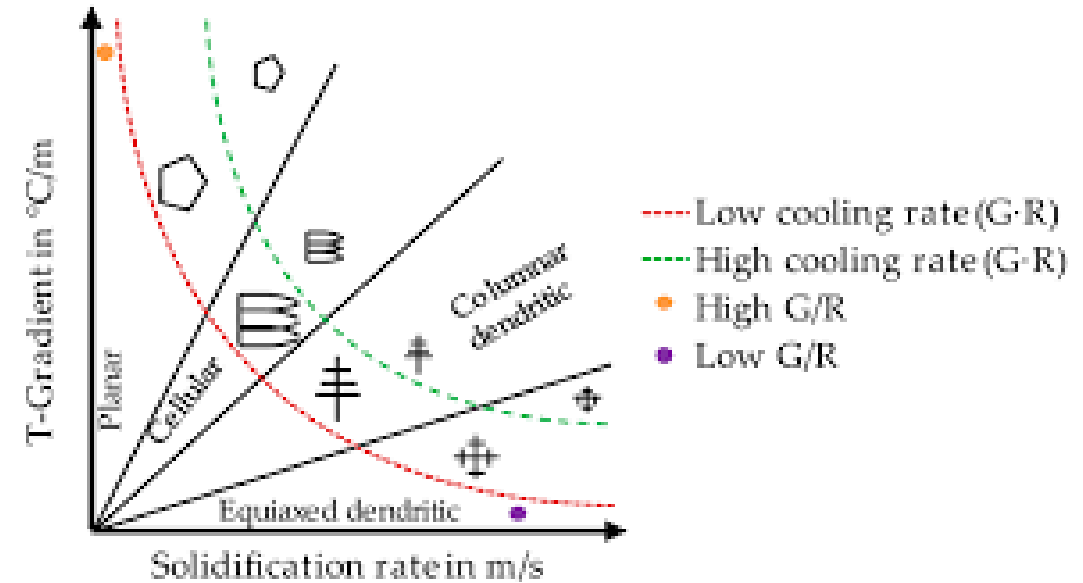
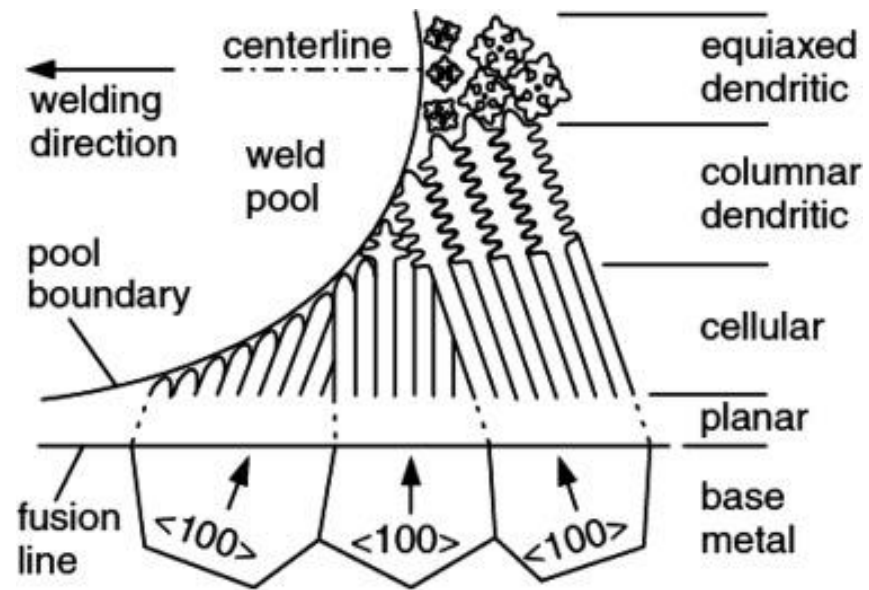


Επίδραση της ταχύτητας στερεοποίησης στην Μορφολογία πυρηνοποίησης

- ▶ Πολύ μικρή $\rightarrow$ επίπεδη ανάπτυξη
- ▶ Μικρή $\rightarrow$ κόκκοι με μικρές παραμορφώσεις
- ▶ Μεγάλη $\rightarrow$ δενδριτική κιονοειδής ανάπτυξη
- ▶ Πολύ μεγάλη $\rightarrow$ δενδριτική ισοαξονική ανάπτυξη



Πυρηνοποίηση σε συγκολλήσεις χάλυβα

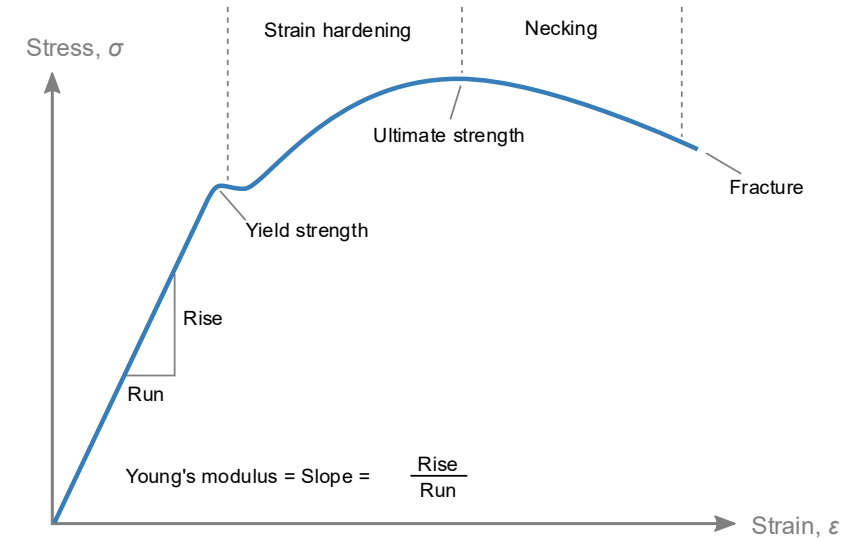


Θερμικές τάσεις

- Κατά τη συγκόλληση του ΒΜ η περιοχή υπόκειται σε θερμικές τάσεις ανάλογες της μεταβολής της θερμοκρασίας ∇T
- Λόγω της διάδοσης θερμότητας το ΒΜ και ΜΣ υπόκεινται σε συστολή κατά την ψύξη
- Οι παραμορφώσεις στο ΜΣ είναι μεγαλύτερες και το υλικό διαρρέει πλαστικά
- Έτσι κατά την απόψυξη το ΜΣ δεν επανέρχεται σε μηδενική εντατική κατάσταση → παραμένουσες τάσεις

Πλαστική διαρροή

- ▶ Στην καμπύλη τάσης παραμόρφωσης, σημείο εκτός της ελαστικής περιοχής
- ▶ Οι διαταραχές αρχίζουν να κινούνται στο υλικό μη αναστρέψιμα
- ▶ Στην ελαστική περιοχή τα άτομα «κρατούνται» στις θέσεις τους
- ▶ Με λίγα λόγια η δομή του υλικού δεν μπορεί να αντισταθεί στην αλλαγή του σχήματος λόγω της παραμόρφωσης
- ▶ Αποτελεί το πρώτο στάδιο μόνιμης παραμόρφωσης



Θερμή ρωγμάτωση

- Πραγματοποιείται κατά τη στερεοποίηση και προς το τέλος αυτής
- Λόγω της δημιουργίας λεπτού υμένα γύρω από τους δενδρίτες
- Το οποίο επιδρά αρνητικά στη συνοχή του κρυσταλλικού πλέγματος
- Λόγω των υψηλών θερμικών τάσεων, τα υμένα παρουσιάζουν ρωγμές
- Οι ρωγμές είναι περικρυσταλλικές

Παράμετροι που επηρεάζουν τη θερμή ρωγμάτωση

- Το εύρος της θερμοκρασίας στερεοποίησης
- Η ποσότητα και η σύσταση των υμενίων στην τελική φάση στερεοποίησης
- Η επιφανειακή τάση του υγρού στα όρια των κόκκων
- Η ίδια η δομή των κόκκων

Επίδραση της θερμοκρασίας στερεοποίησης στη θερμή ρωγμάτωση

- Όσο μεγαλύτερη η T τόσο μεγαλύτερο το μέγεθος της ευπαθής σε ρωγμάτωση ζώνης (περιοχή σχηματιζόμενων υμενίων)
- Η θερμοκρασία στερεοποίησης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από ακαθαρσίες
- Σε χάλυβα π.χ. ακόμη και χαμηλές συγκεντρώσεις S και P , οδηγούν σε σοβαρή θερμή ρωγμάτωση καθώς
- Διαχωρίζονται στα όρια των κόκκων $\rightarrow$ μικρο και μακρο διαφορισμός
- Σχηματίζονται ευτηκτικές ενώσεις (π.χ. FeS), διευρύνοντας την ευπαθή σε θερμή ρωγμάτωση ζώνη

Αποφυγή θερμής ρωγμάτωσης

- ▶ Έλεγχος της σύστασης ομογενών συγκολλήσεων
- ▶ Επιλογή κατάλληλου πληρωτικού υλικού στις ετερογενείς
- ▶ Έλεγχος της δομής στερεοποίησης → ελαχιστοποίησης μεγέθους κόκκων
- ▶ Ευνοϊκές συνθήκες συγκόλλησης
 - a) HEDW (LBW,EBW,PAW)
 - b) Προθέρμανση (ελάττωση χωρικής και χρονικής μεταβολής θερμοκρασίας)
 - c) Ελαχιστοποίηση της δύναμης συγκράτησης των τεμαχίων

Ζώνη μερικής τήξης (ZMT)

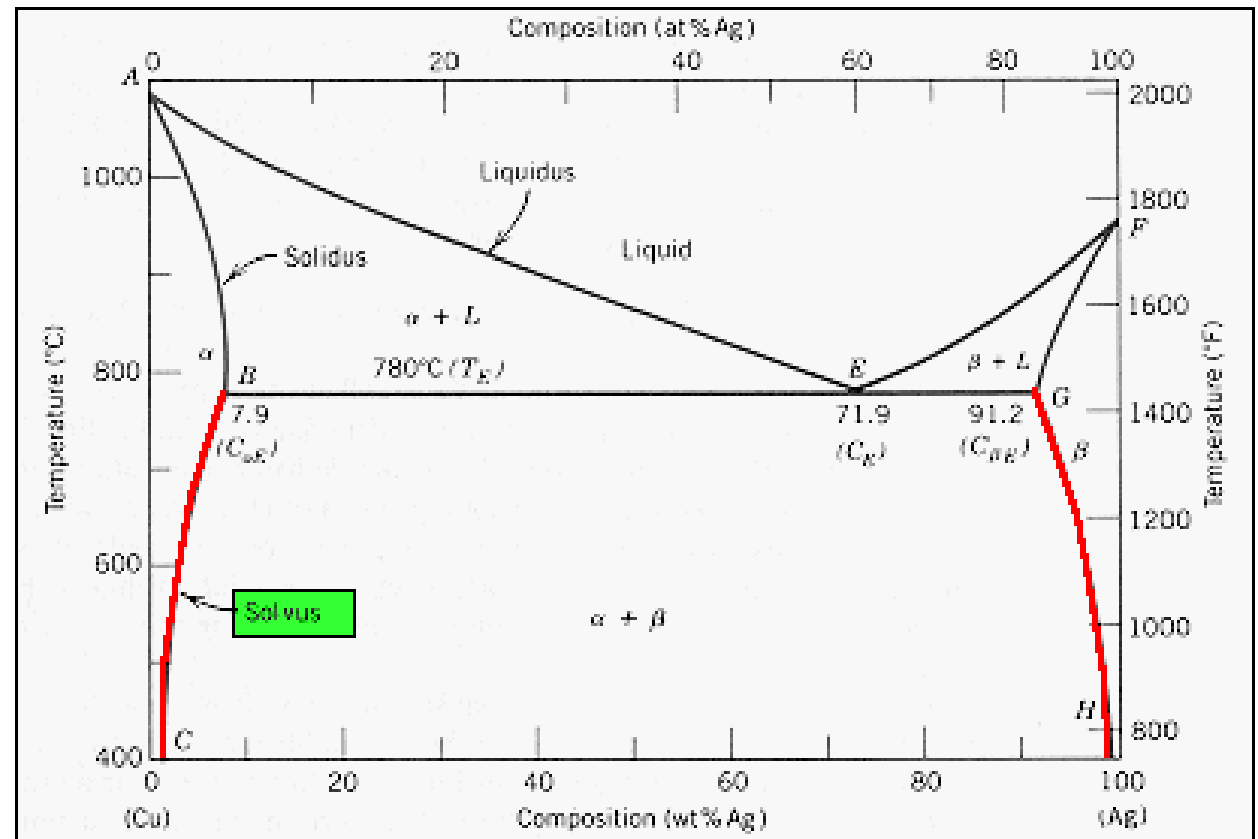
- ▶ Δεν έχει υποστεί πλήρη ανάμιξη
- ▶ Οι δυνάμεις συναγωγής του λουτρού συγκόλλησης είναι μικρότερες από τις δυνάμεις τριβής του ρευστού.
- ▶ Σε συγκολλήσεις με χρήση συνδετικού μέσου ή πληρωτικού μέσου με διαφορετική σύσταση από το μητρικό υλικό, η ZMT παρουσιάζει ετερογενή σύσταση και είναι επιρρεπής σε διάβρωση
- ▶ Σε καθαρά μέταλλα δεν παρατηρείται μερικώς τηγμένη περιοχή και η ZMT είναι δυσδιάκριτη

Ζώνη μερικής τήξης (ZMT)

- ▶ Σε κράματα στη ZMT έχουμε περιοχή μερικής τήξης
- ▶ Η οποία δημιουργείται λόγω της ανόδου της θερμοκρασίας, σε εύρος ανάμεσα στις καμπύλες Liquidus – Solidus
- ▶ Σε εκείνες τις περιοχές συναντάται μίγμα υγρού - στερεού
- ▶ Έτσι κατά την τήξη και στερεοποίηση παρατηρείται διαφορετική δομή από το BM
- ▶ Στη ZMT το φαινόμενο της αραίωσης είναι λιγότερο έντονο από το MΣ

Ζώνη μερικής τήξης ZMT

Καμπύλη Solvus: το όριο στερεής διαλυτότητας της φάσης β στην α



Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ)

- Σε καθαρά μέταλλα (π.χ. αλουμίνιο) δεν παρουσιάζεται αλλοτροπικός μεταχηματισμός
- Παρατηρείται μεγέθυνση των κόκκων λόγω διάχυσης
- Αύξηση της ευθραυστότητας
- Φαινόμενα ανακρυστάλλωσης
- Διάλυση και επαναδημιουργία κατακρηνισμάτων

Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ)

- ▶ Στους χάλυβες παρατηρείται περιοχή ωστενιτοποίησης λόγω θέρμανσης
- ▶ Κατά την ψύξη ο ωστενίτης μετασχηματίζεται είτε σε μαρτενσίτη, φερρίτη, μπαινίτη και φερρίτη, και μίγματα αυτών
- ▶ Ανάλογα με το ποσοστό του χάλυβα σε άνθρακα, αλλά και των υπόλοιπων στοιχείων κραμάτωσης η δομή της ΘΕΖ ποικίλει

Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ)

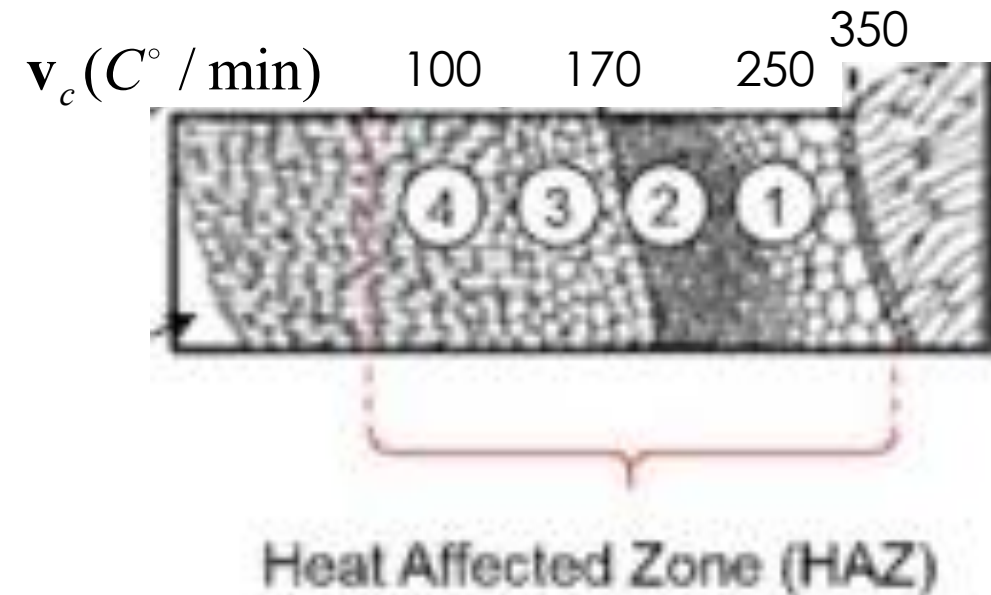
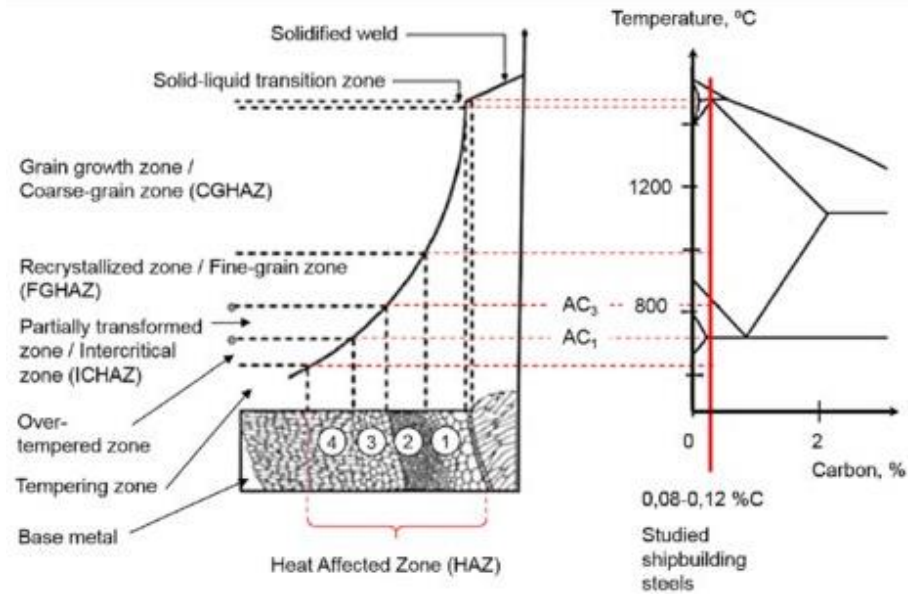
Οι χάλυβες ανάλογα το ποσοστό C κατηγοριοποιούνται ως εξής

1. Υποευτηκτόδεις, $C < 0.8\%$ κ.β.
2. Ευτηκτόδεις, $C 0.8\%$ κ.β.
3. Υπερευτηκτόδεις $C 0.8-2\%$ κ.β.

Με την αύξηση του περιεχομένου σε άνθρακα

- Αυξάνεται η μηχανική τους αντοχή
- Μειώνεται η ολκιμότητα τους
- Αυξάνεται η θερμοκρασία μεταβολής από την όλκιμη στην ψαθυρή περιοχή, δυσκολεύοντας τη συγκολλησιμότητα τους

Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ)

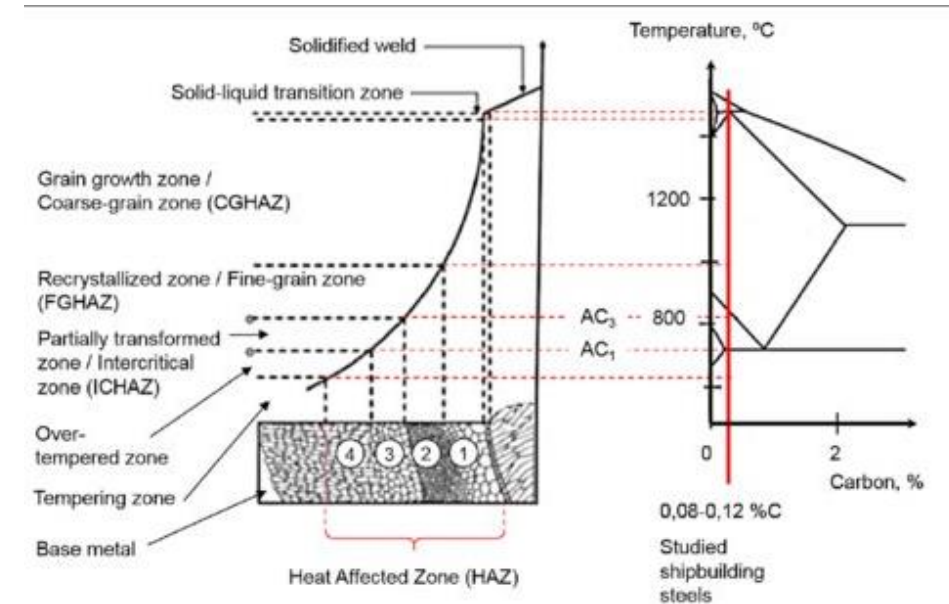


- 1: Ζώνη υπερθέρμανσης
- 2: Ζώνη ολικής ανόπτυσης
- 4: Ζώνη μερικής ανόπτυσης
- 4: Υποκρητική ΘΕΖ (tempering & recovery)

Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ)

- 1: Ζώνη υπερθέρμανσης $T \gg AC_3$
- 2: Ζώνη ολικής ανόπτησης $T > AC_3$
- 3: Ζώνη μερικής ανόπτησης $AC_1 < T < AC_3$
- 4: Υποκρητική ΘΕΖ $T < AC_1$

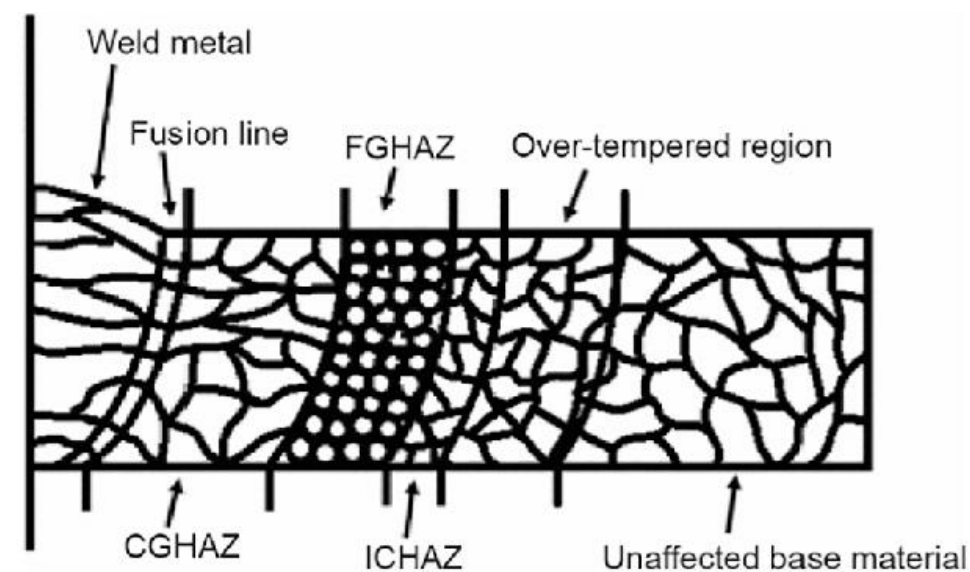
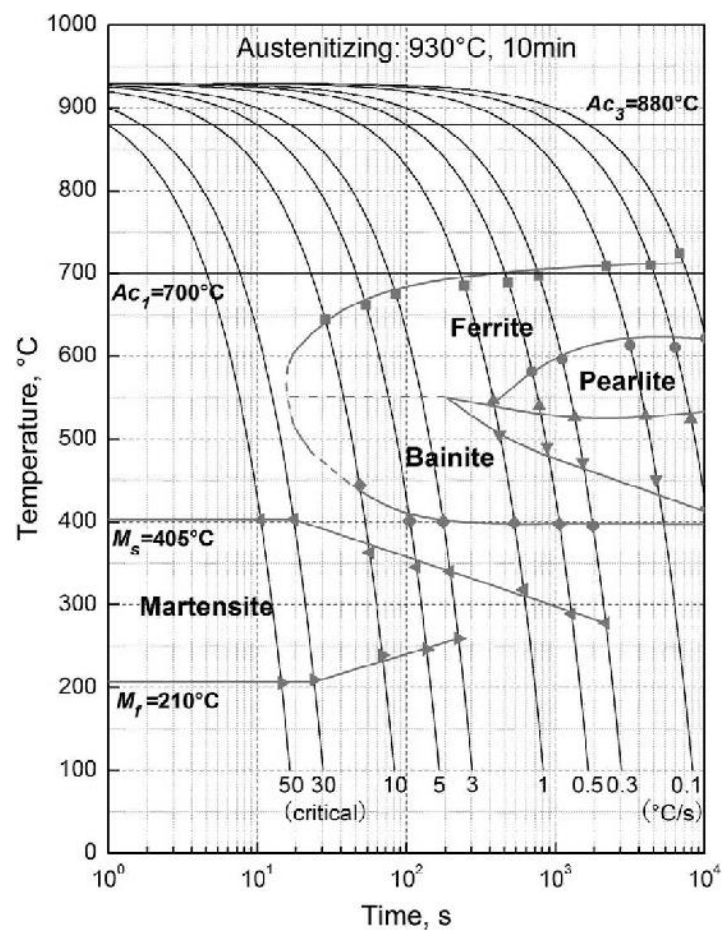
AC_3 η θερμοκρασία που σχηματίζεται 100% ωστενίτης
 AC_1 η θερμοκρασία που αρχίζει να σχηματίζεται ωστενίτης
 Ενδιάμεσα μίγμα ωστενίτη και φερρίτη



Ανόπτηση

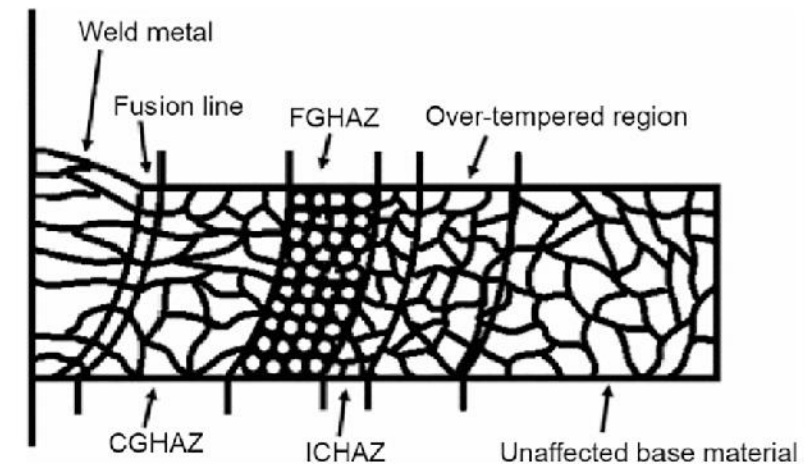
- Θέρμανση → Παραμονή σε αυτή τη θερμοκρασία → ψύξη
- Ανακρυστάλλωση παραμορφωμένων κόκκων
- Διάλυση κατακρινισμάτων
- Ελαχιστοποίηση ελεύθερης ενέργειας

Μετασχηματισμός φάσεων



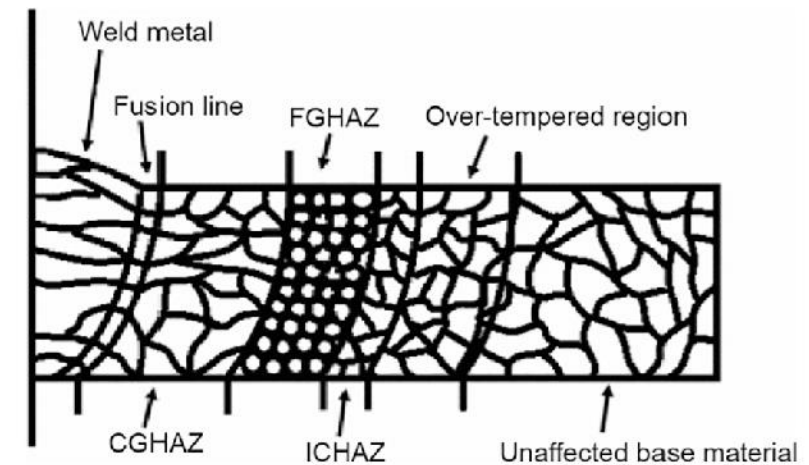
Ζώνη Υπερθέρμασης (CGHAZ)

- Φαινόμενα μεγέθυνσης κόκκων, $T \gg 1100\text{ C}^\circ$
- Τα οποία απαιτούν αρκετό χρόνο για να ολοκληρωθούν
- Ανάλογα με το ρυθμό ψύξης ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε
 - a) Περικρυσταλλικό φερρίτη
 - b) Πλακοειδή φερρίτη ή φερρίτης Widmanstätten
 - c) Βελονοειδή φερρίτη



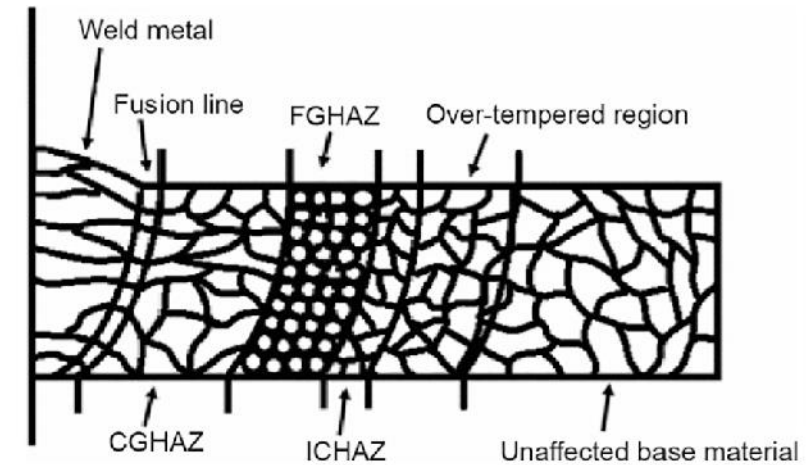
Ζώνη Υπερθέρμασης (CGHAZ)

- Συνήθως σχηματίζεται μίγμα των προηγούμενων φάσεων
- Με μεγαλύτερη αναλογία της φάσης που σχηματίζεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στο διάγραμμα CCT



Ζώνες πλήρους και μερικής ανόπτησης

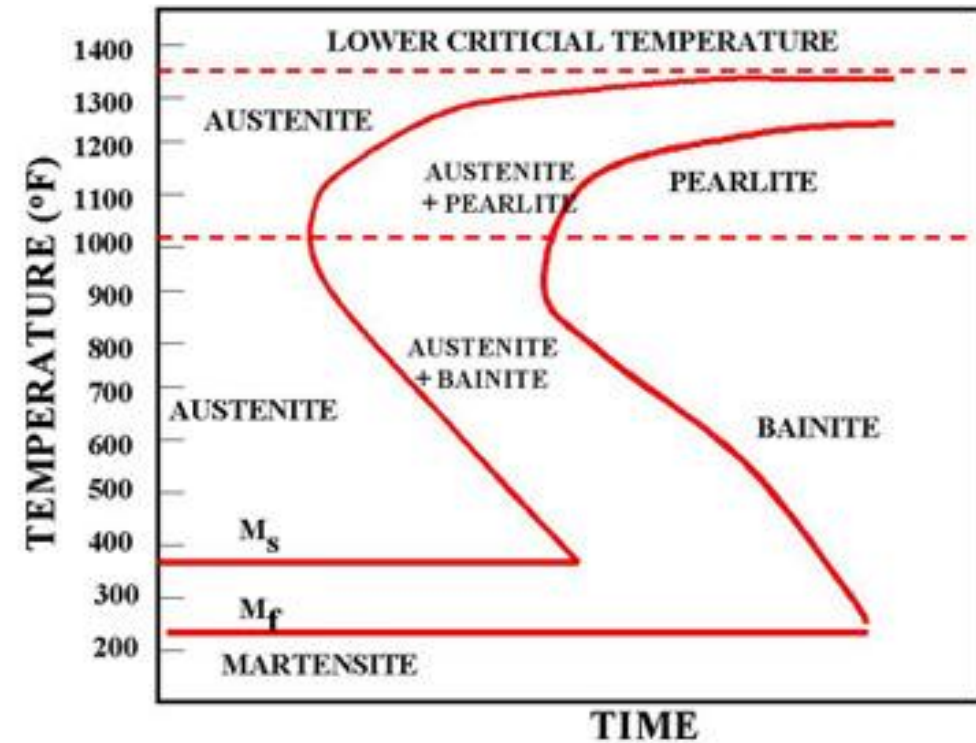
- Στη ζώνη πλήρους ανόπτησης (FGHAZ) αναπτύσσονται λεπτόκοκκες και ομοιόμορφες δομές με καλές μηχανικές ιδιότητες
- Στην ζώνη μερικής ανόπτησης (ICHAZ) αναπτύσσονται δομές που αποτελούνται από
 - a) Λεπτούς κόκκους ωστενίτη
 - b) Νησίδες με χονδρούς κόκκους άλλων φάσεων (κυρίως φερρίτη)

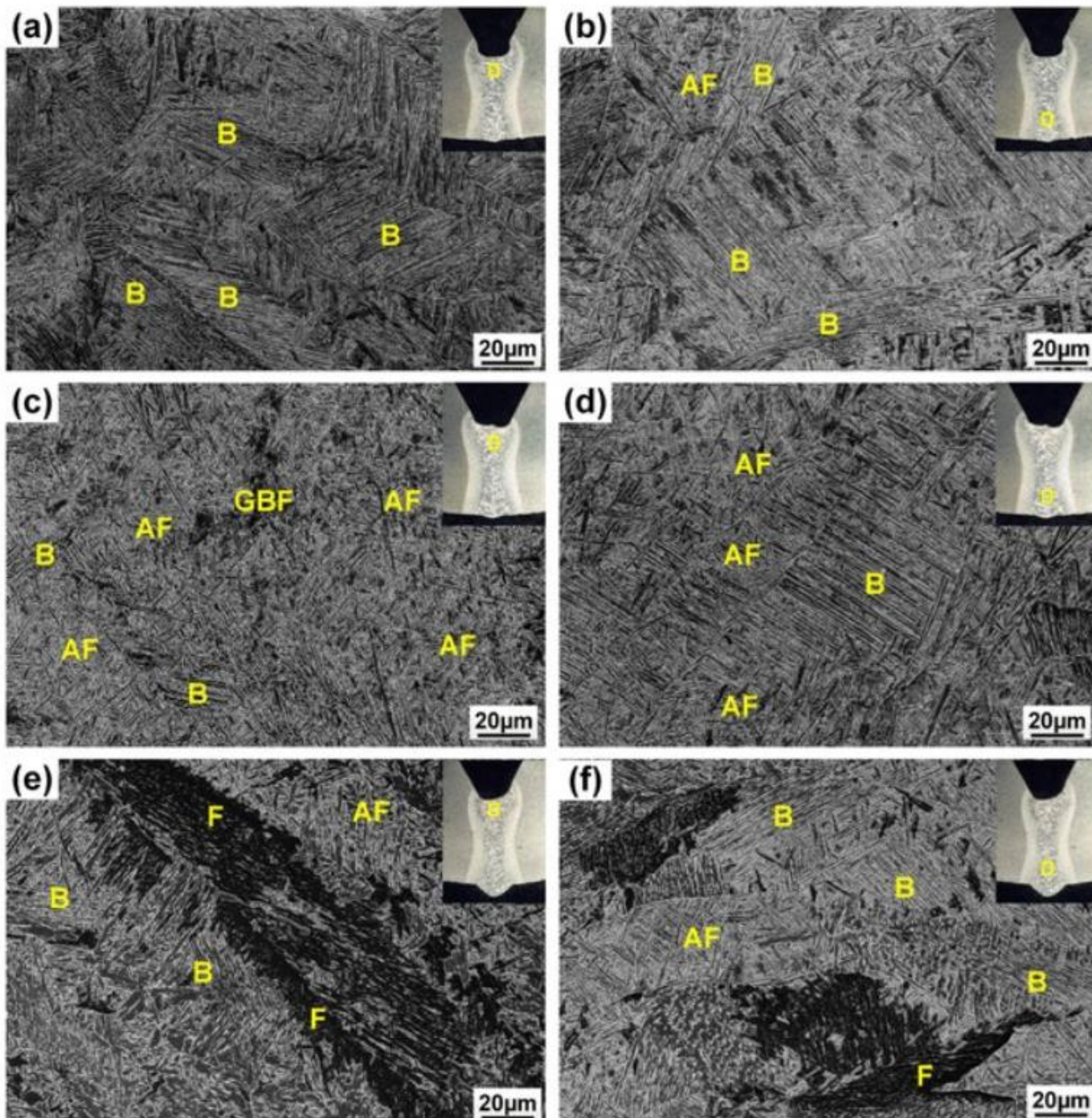


Διαγράμματα TTT

Time Temperature Transformation (TTT)

- Ισόθερμη αλλαγή φάσης
- Ιδανικά για θερμικές κατεργασίες





Figure

Caption

SEM images showing the presence of ferrite (F), acicular ferrite (AF), grain boundary ferrite (GBF), bainite (B) and martensite (M) in different regions of the weld metal: (a,b) autogenous laser weld; (c,d) the weld with ER70S wire; (e,f) the weld with pure iron wire; (g,h) the weld with pure nickel wire.

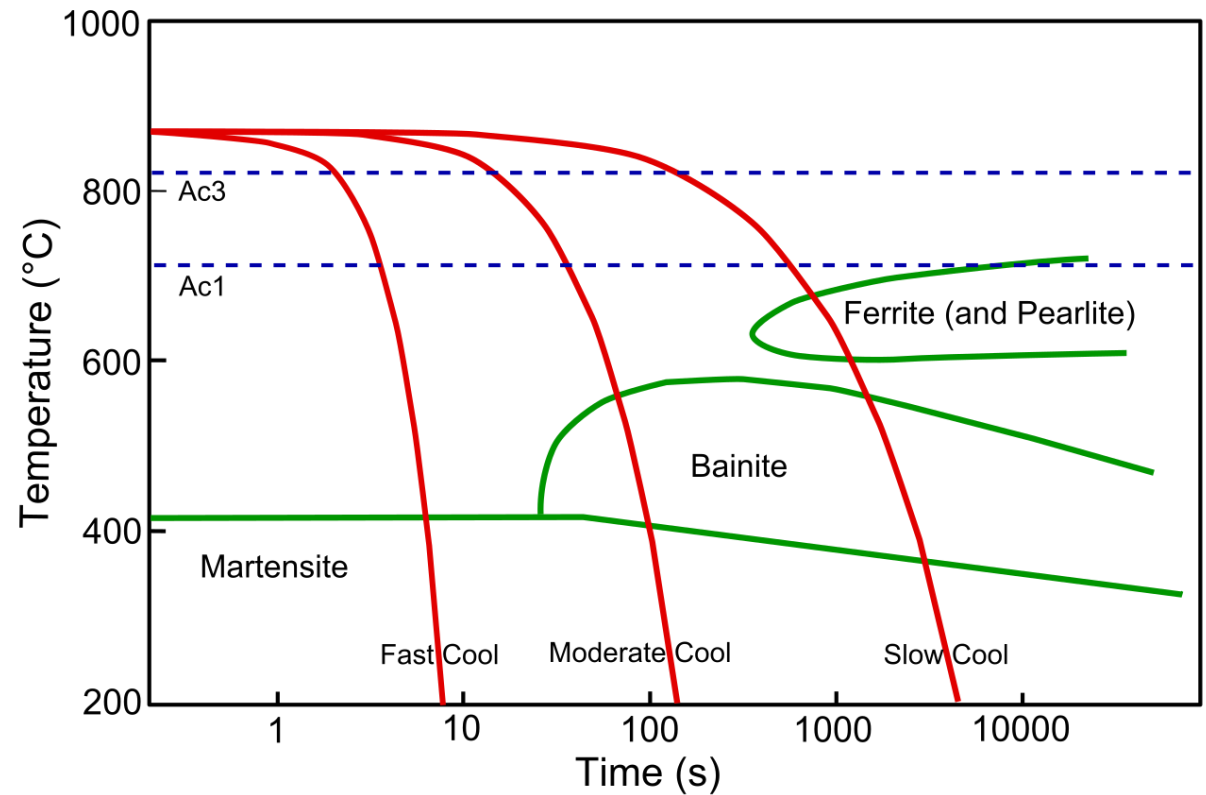
Content available from [Materials](#) ✓

This content is subject to copyright.

Διαγράμματα CCT

Continuous Cooling Transformation (CCT)

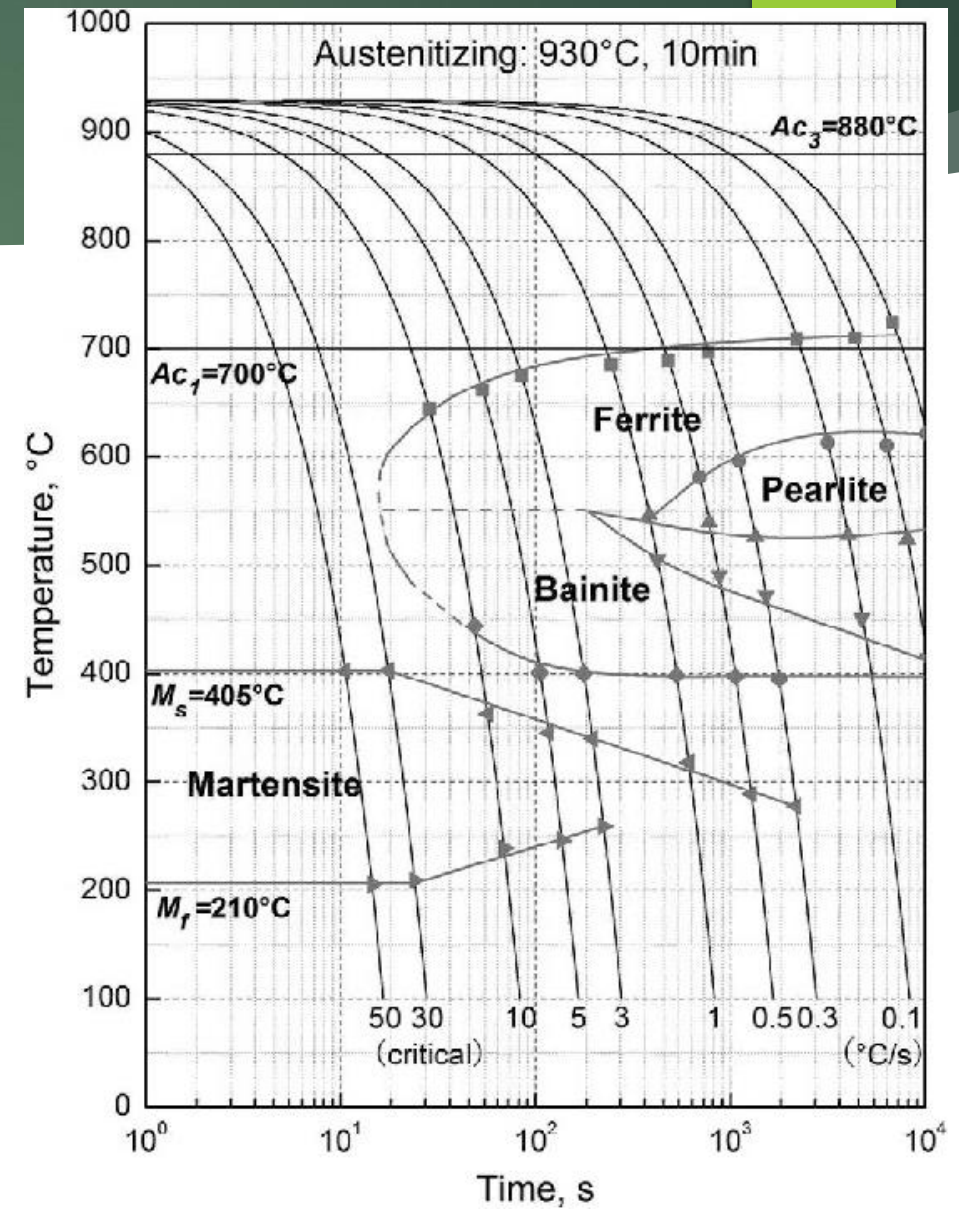
- Αλλαγή φάσης κατά την ψύξη (χρόνος, ταχύτητα)



Διαγράμματα CCT

Continuous Cooling Transformation (CCT)

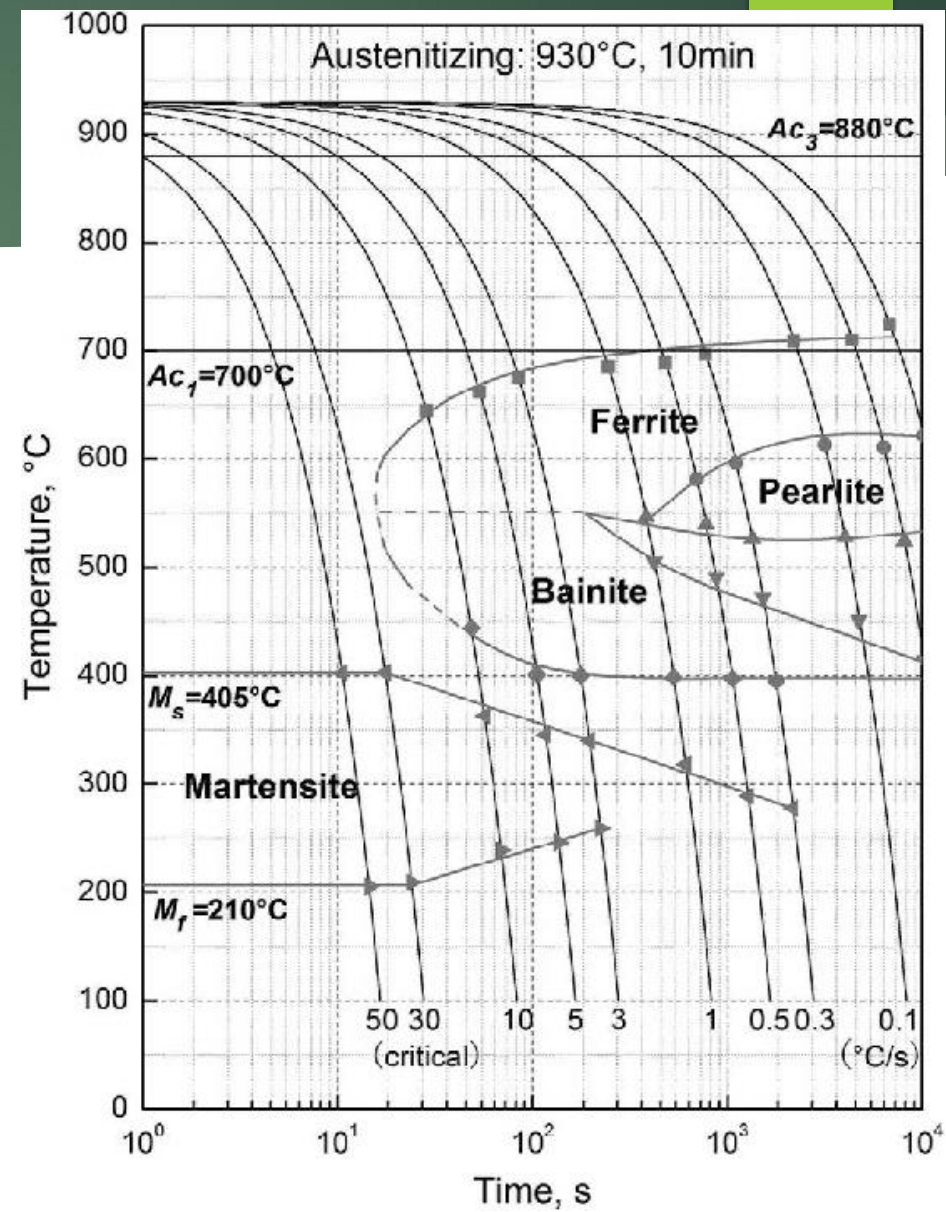
- Κρίσιμη ταχύτητα ψύξης, η μέγιστη ταχύτητα για σχηματισμό 100% μαρτενσίτη
- M_s και M_f αρχικές και τελικές θερμοκρασίες σχηματισμού μαρτενσίτη



Διαγράμματα CCT

Continuous Cooling Transformation (CCT)

- Γρήγορη ψύξη → μαρτενσίτης (σκληρός)
- Ψύξη με ταχύτητα μικρότερη της κρίσιμης ταχύτητας ψύξης → μίγματα φάσεων



Ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου (Hydrogen Embrittlement)

- Ψυχρή ρωγμάτωση κατά την ψύξη αρκετές ώρες, μέρες ή ακόμη και εβδομάδες
- Σε χάλυβες υψηλής αντοχής ακόμα και πολύ μικρή περιεκτικότητα H έως 1 ppm είναι ικανή να προκαλέσει ψαθυροποίηση
- Συναντάται
 - a) Στη βάση της συγκόλλησης (κατά πόδας)
 - b) Στη ρίζα της συγκόλλησης
 - c) Σε ακαθαρσίες

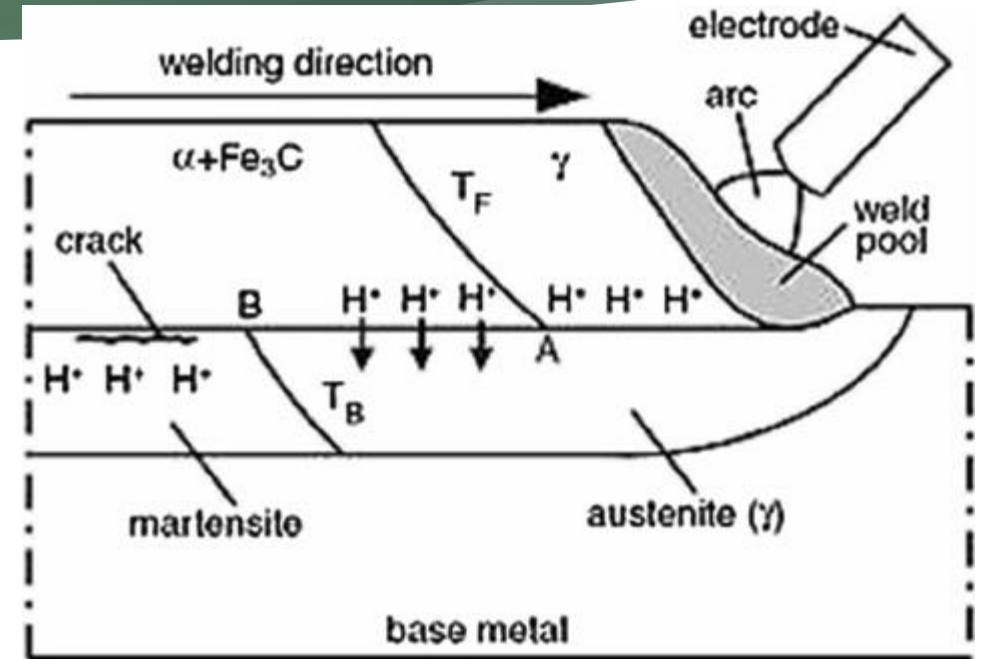
Ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου (Hydrogen Embrittlement)

Πηγές H αποτελούν

- Υγρασία
- Επένδυση των ηλεκτροδίων
- Προστατευτικό αέριο
- Ακαθαρσίες
- Προηγούμενες κατεργασίες

Ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου (Hydrogen Embrittlement)

- Διάσπαση της υγρασίας $H_2O \rightarrow 2H + O$
- Το υδρογόνο εισχωρεί στο τήγμα και διαχέεται εύκολα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών
- Κατά τη στερεοποίηση (μετασχηματισμούς ωστενίτη) η διαλυτότητα του υδρογόνου μειώνεται απότομα



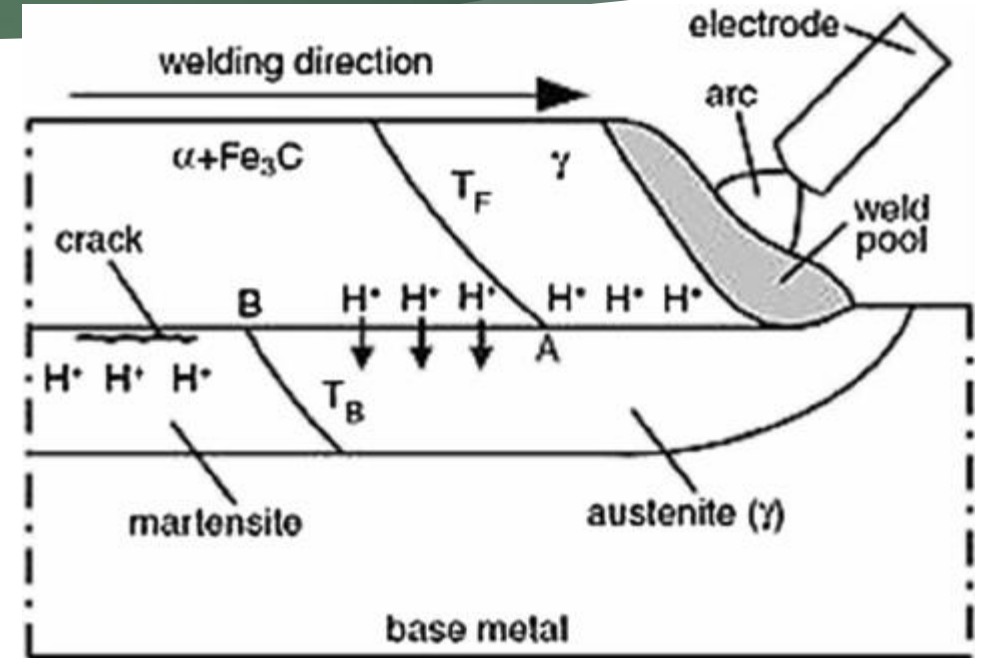
α , φερρίτης

$\alpha + F_3C$, μίγμα φερρίτη και σεμεντίτη

γ , ωστενίτης

Ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου (Hydrogen Embrittlement)

- Η διαλυτότητα του υδρογόνου στον μαρτενσίτη είναι σχεδόν μηδενική
- Έτσι οι φυσαλίδες H έχουν την τάση να διαφύγουν
- Συνεπώς αναπτύσσονται πιέσεις της τάξης $10^{10} - 10^{12} atm$
- Με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών στον εύθραυστο μαρτενσίτη



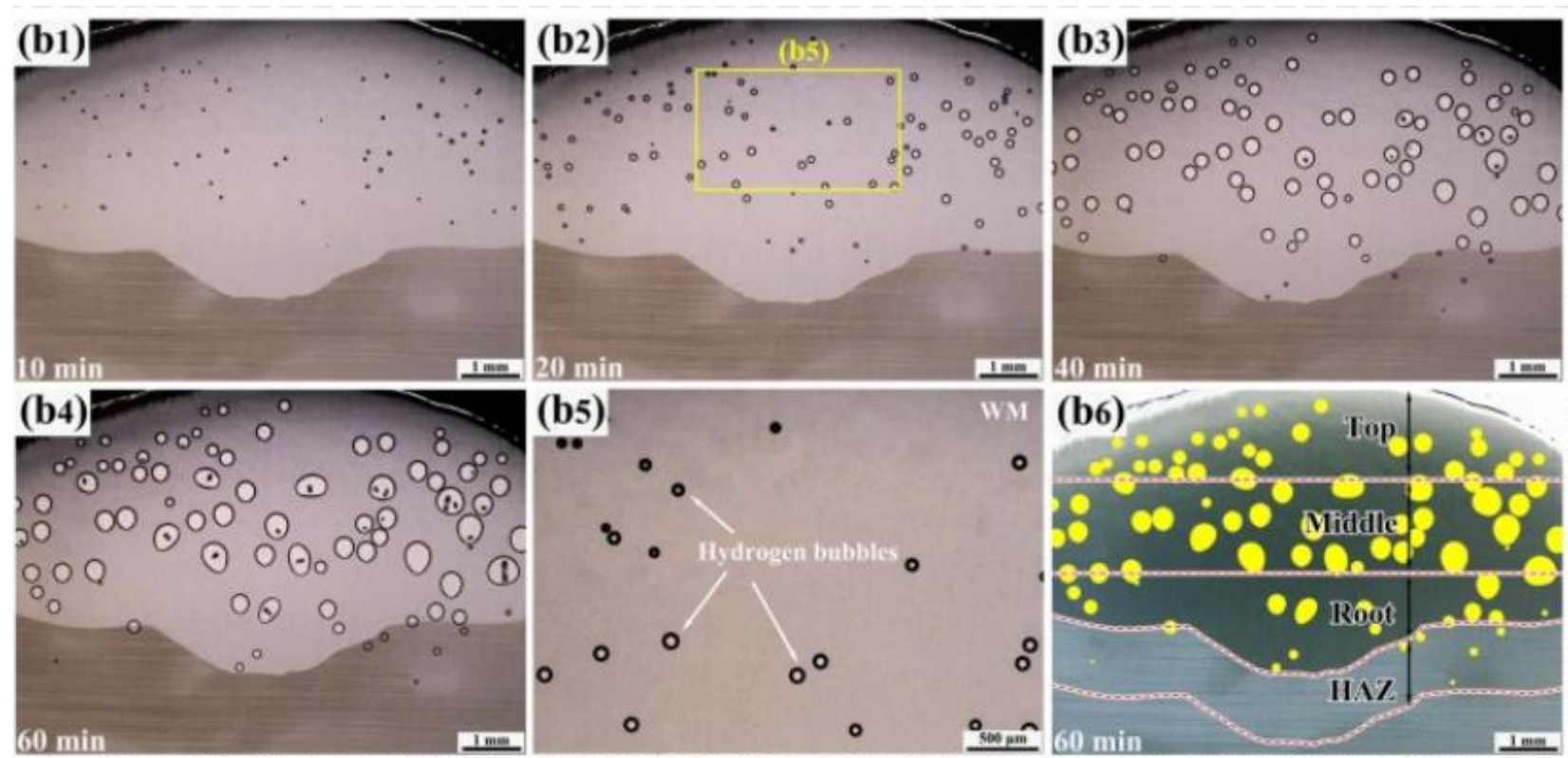
α , φερρίτης

$\alpha + F_3C$, μίγμα φερρίτη και σεμεντίτη

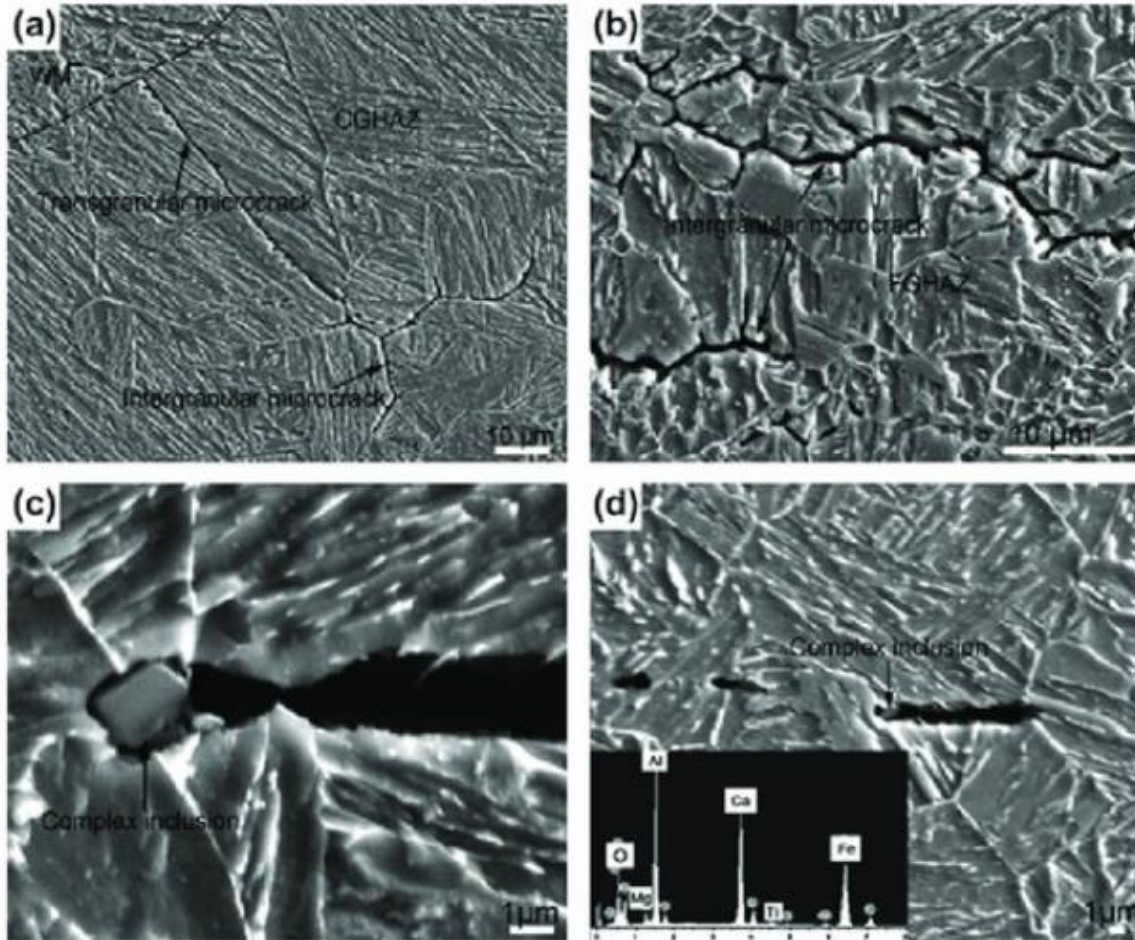
γ , ωστενίτης

Ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου (Hydrogen Embrittlement)

64



Ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου (Hydrogen Embrittlement)



Figure

Caption

Figure 3. Microcrack morphologies of the specimens with different heat inputs: (a-c) 0.92 kJ/mm, (d) 1.54 kJ/mm; (a) and (b) intergranular cracking in the CGHAZ and FGHAZ, respectively; (c) and (d) transgranular cracking attached to the inclusions in the FGHAZ (the inserted figure showing the chemical composition of inclusions).

This figure was uploaded by [Liangyun Lan](#)

Content may be subject to copyright.

Ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου (Hydrogen Embrittlement)

Οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα C, κραματικών στοιχείων ή S σε χάλυβες.
Αντιμετωπίζεται με

- Χρήση ηλεκτροδίων χαμηλού υδρογόνου
- Υψηλή προθέρμανση των τεμαχίων
- Επαρκής θερμοκρασίας περάσματος

Προθέρμανση

- Πολύ απλή και αποτελεσματική μέθοδος
- Ειδικά σε τεμάχια με μεγάλο πάχος
- Επιβράδυνση της ψύξης (κατά 1/2, 1/3 κ.ο.κ)
- Ανάλογα το ισοδύναμο άνθρακα, επιλέγεται η θερμοκρασία προθέρμανσης

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

C_{eq}	$T(^{\circ}C)$
< 0.45	-
0.45– 0.6	90 – 200
> 0.6	200 - 400

Ερωτήσεις απορίες

ΜΕΡΟΣ Γ

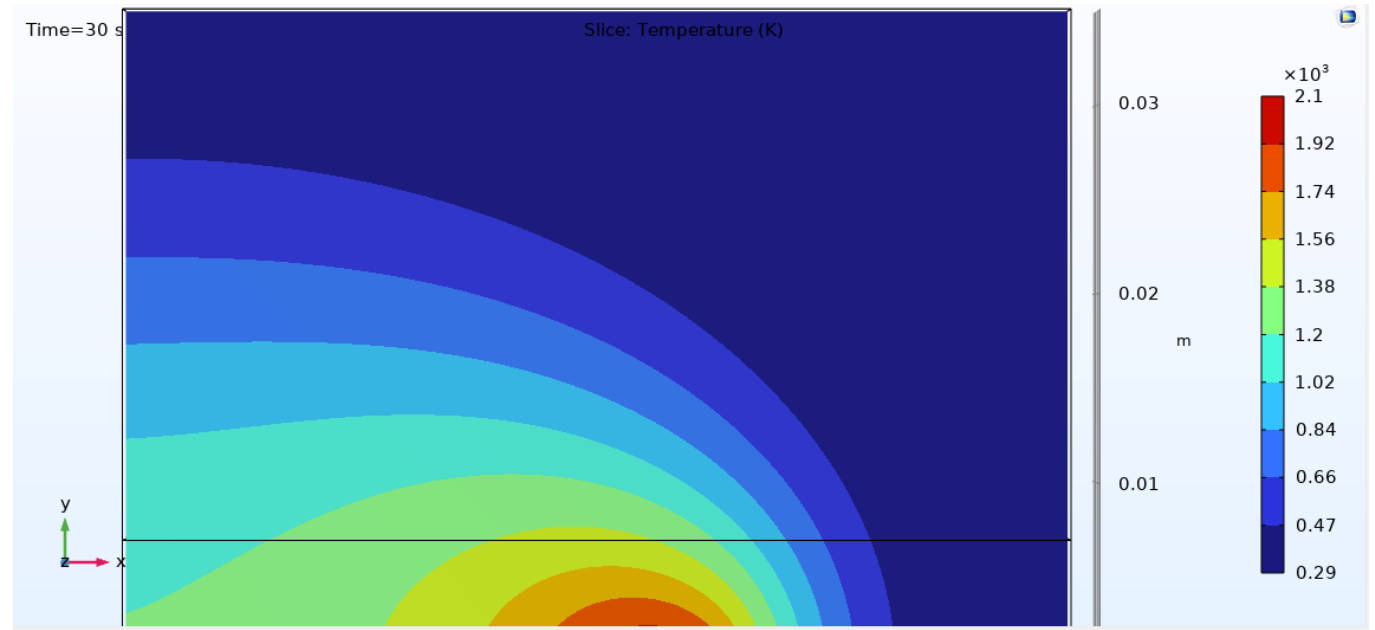
LIVE DEMO ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ G
ΜΕ FEM

Συγκόλληση επίπεδων πλακών Ti

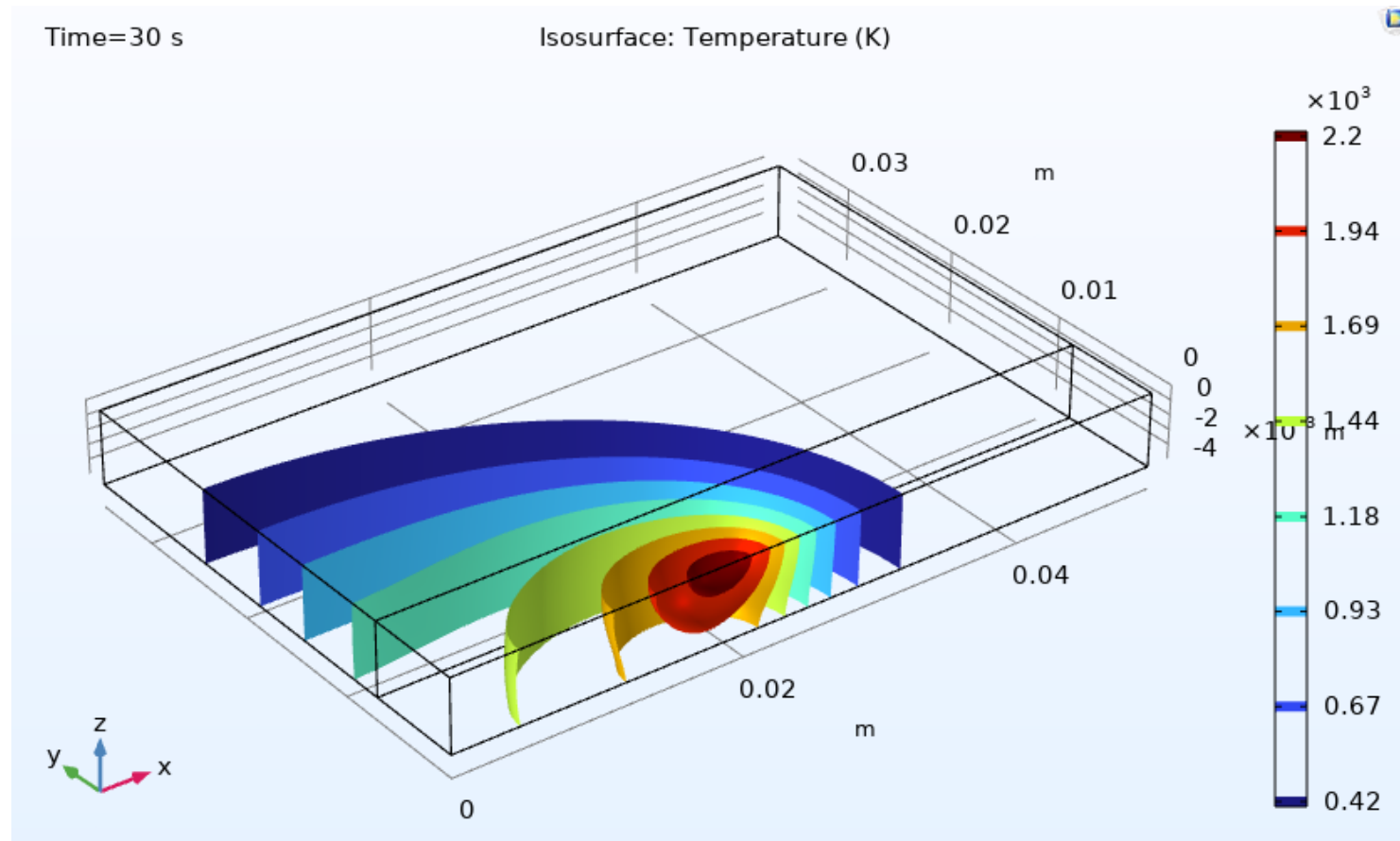
Το παράδειγμα είναι διαθέσιμο στον σύνδεσμο:

<https://www.comsol.com/model/welding-of-a-titanium-plate-110151>

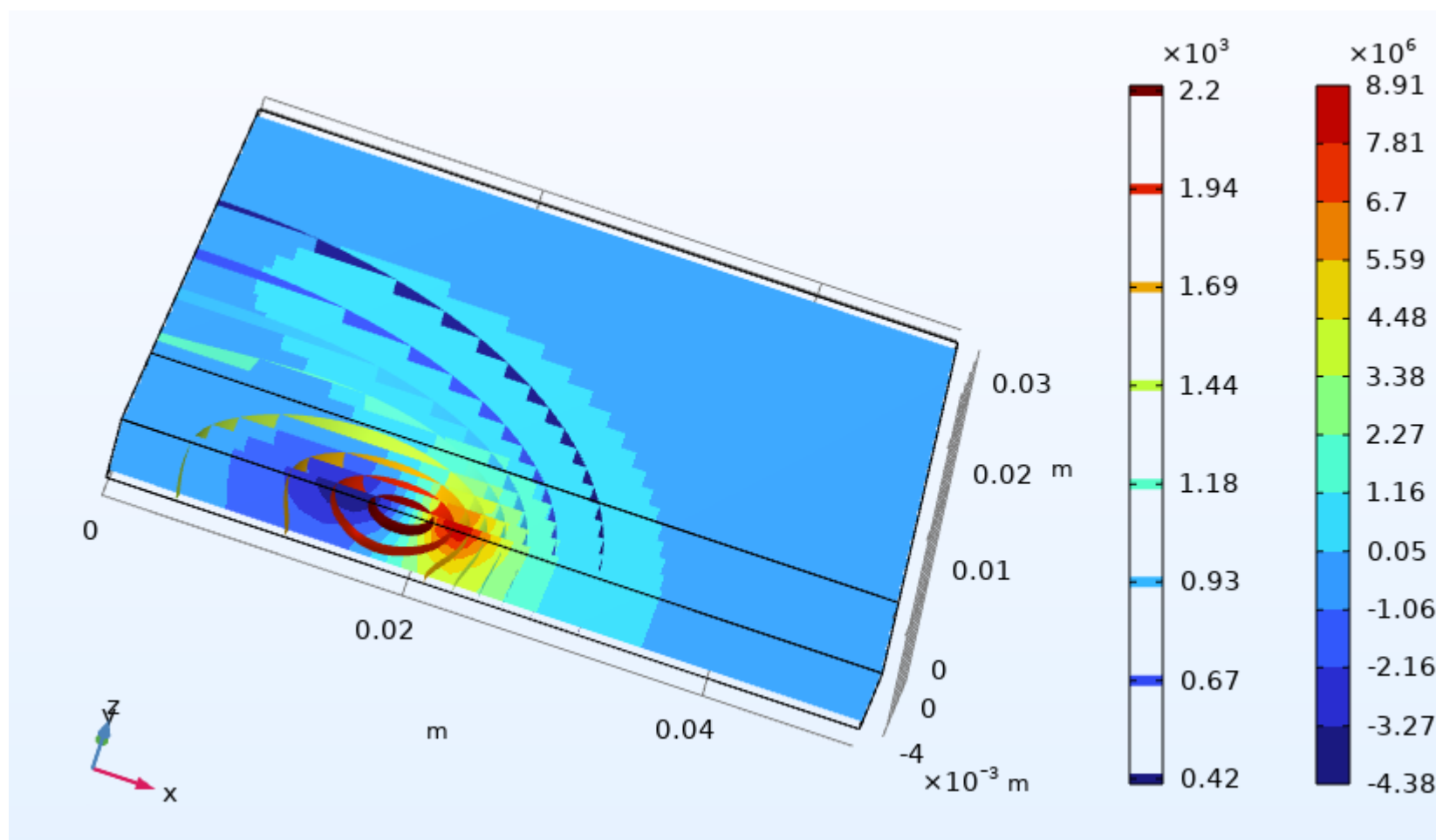
□ Ένα πέρασμα



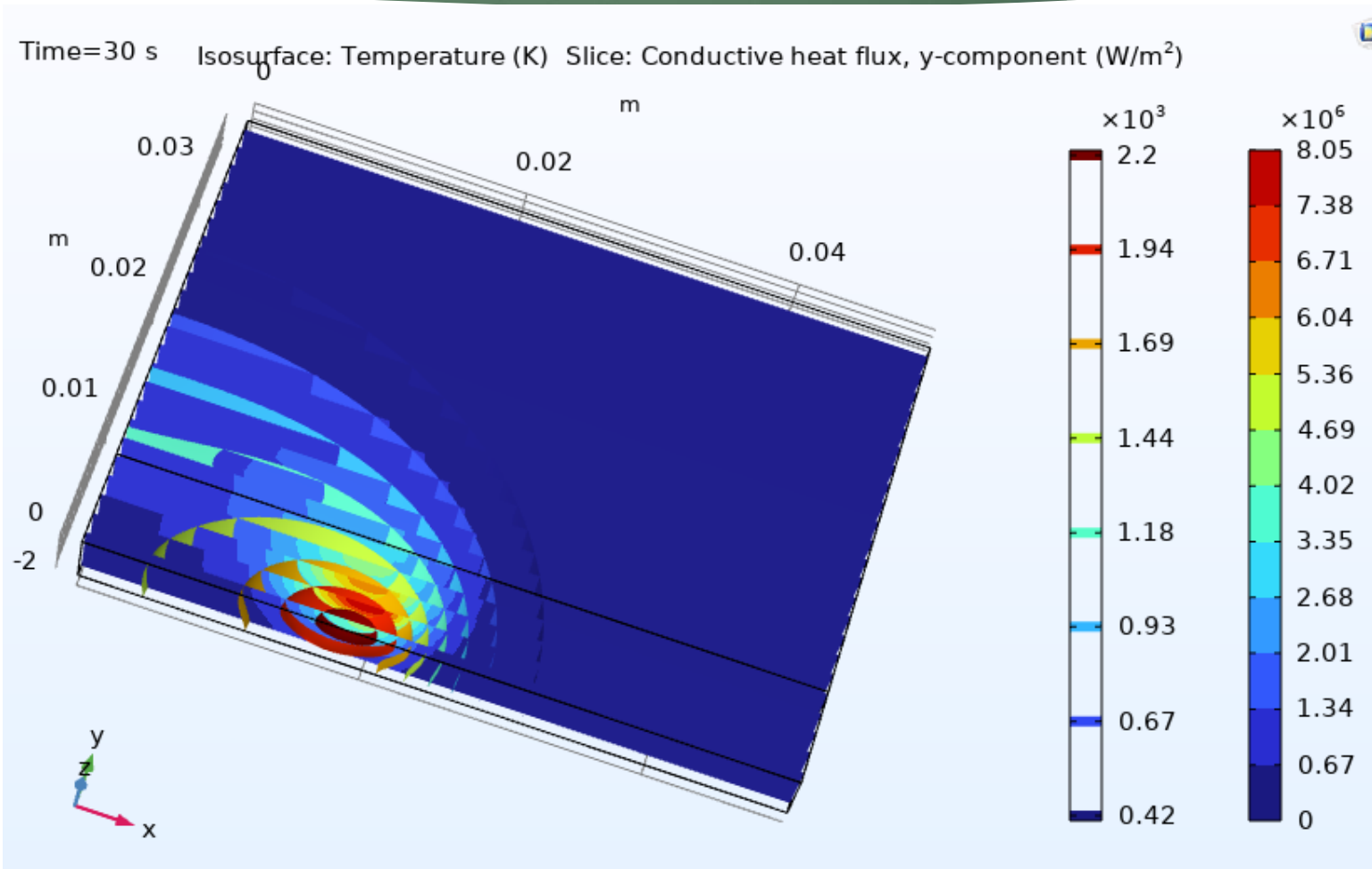
Temperature isosurface



x component



y component



z component

