

Μεταλλουργικά φαινόμενα συγκολλήσεων - Πυρηνοποίηση

ΔΙΔΑΣΚΕΙΝ 8

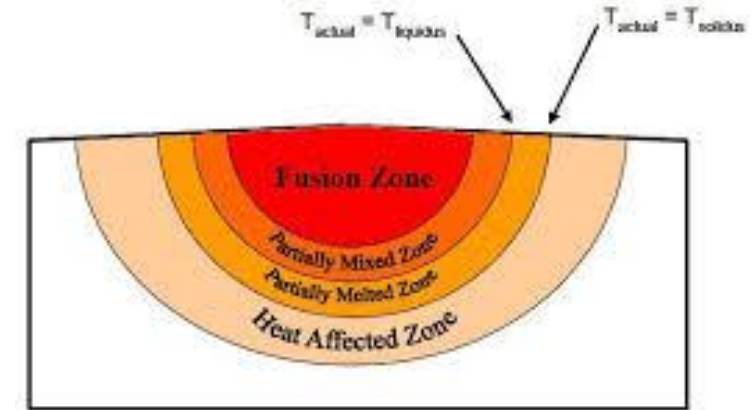
ΜΕΡΟΣ Α

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ
ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

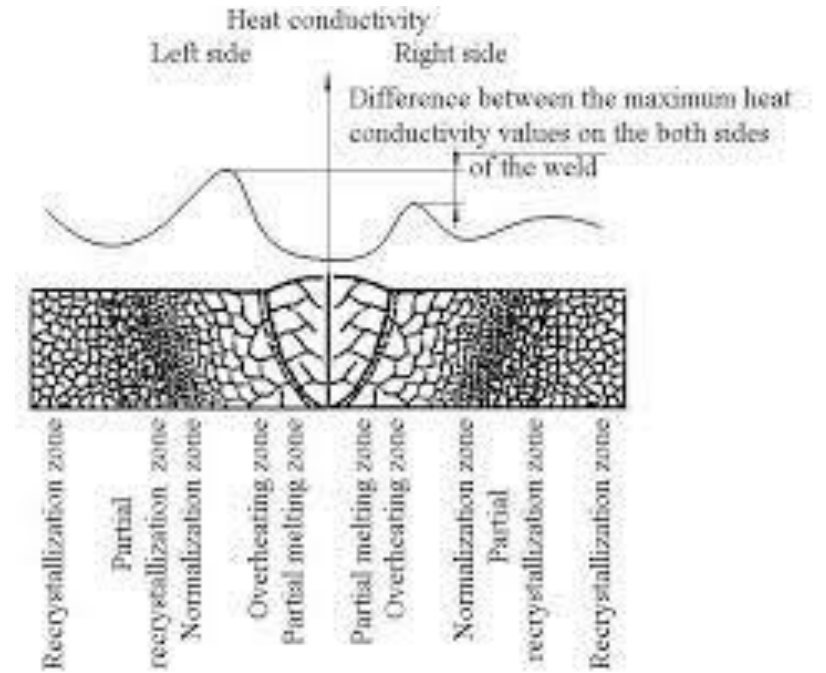
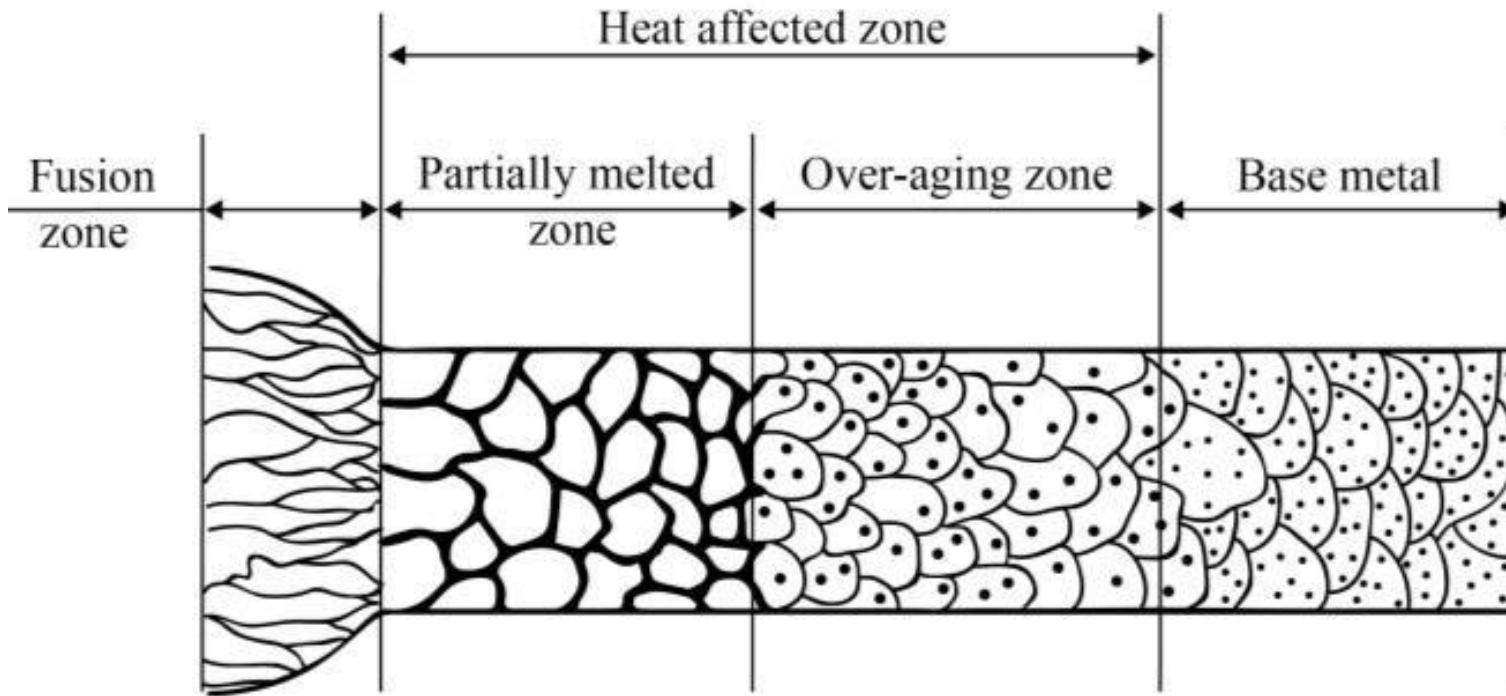
Μακρογραφική παρατήρηση ραφής συγκόλλησης τήξης

Σε συγκολλήσεις τήξης παρατηρούνται 4 Ζώνες:

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



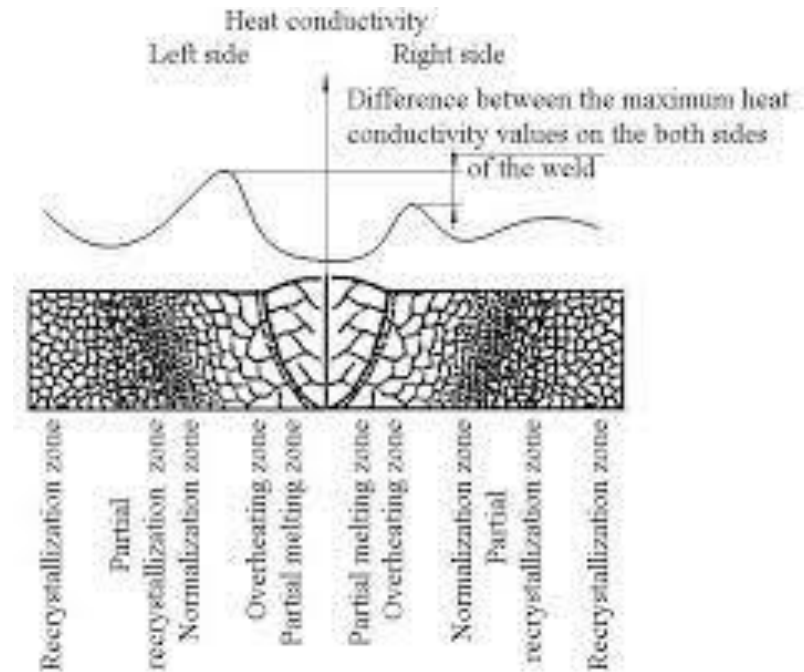
Μακρογραφική παρατήρηση ραφής συγκόλλησης τήξης



Μέταλλο συγκόλλησης (ΜΣ)

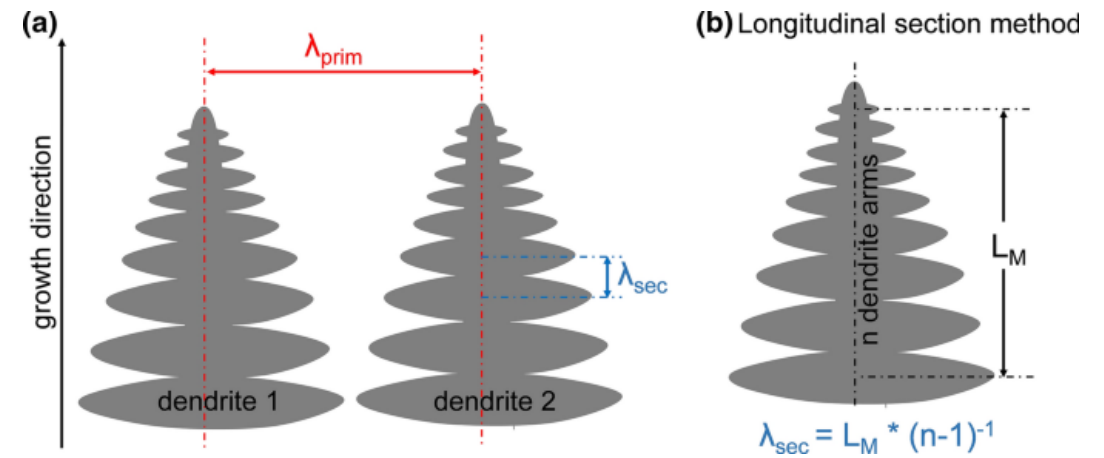
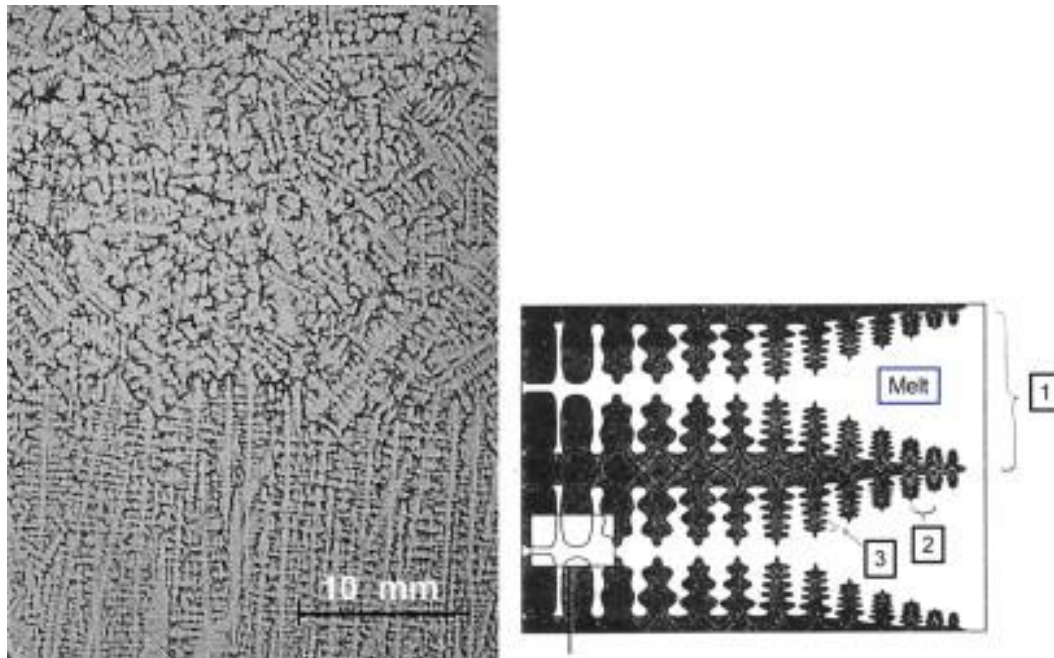
Σε συγκολλήσεις τήξης στο μέταλλο συγκόλλησης

- ❑ 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



Δενδρίτες

Πυρήνες στερεού που μεγαλώνουν σε σχήμα κλαδιού



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)

Φαινόμενα που επηρεάζουν τη δομή του υλικού

- ❑ Μεταφορά μάζας
- ❑ Χημικά φαινόμενα
- ❑ Θερμικά φαινόμενα, δλδ θέρμανση και ψύξη → στερεοποίηση

Δυνάμεις που ενεργούν στην μεταφορά μάζας στο μέταλλο συγκόλλησης

Δύναμη

Επιφανειακή τάση γ

Δύναμη Lorentz F_L

Βαρύτητα - Άνωση F_g

Αντίσταση τριβής πλάσματος - Διατμητική τάση στο μέταλλο
συγκόλλησης F_D

Χημικά φαινόμενα

Ο ρυθμός των χημικών φαινομένων και ειδικά των χημικών αντιδράσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία

- ❑ Εξάχνωση (π.χ. εξάχνωση Mg σε κράματα Al)
- ❑ Αλληλεπίδραση μετάλλου περιβάλλοντος, είτε στη διεπιφάνεια είτε με απορρόφηση (π.χ. διάλυση N_2 , O_2 , H_2)
- ❑ Χημικές αντιδράσεις στο τηγμένο μέταλλο (π.χ. αποθείωση , αποκραμάτωση)
- ❑ Αλληλεπίδραση σκωρίας τηγμένου μετάλλου

Ανάλυση Μετάδοσης Θερμότητας στις συγκολλήσεις τόξου

- Στην φάση της μετακίνησης του τόξου κατά μήκους των τεμαχίων
- Θεωρούμε μόνιμες συνθήκες
- Σε σύστημα αναφοράς που κινείται μαζί με το τόξο
- Δηλαδή με την ταχύτητα συγκόλλησης

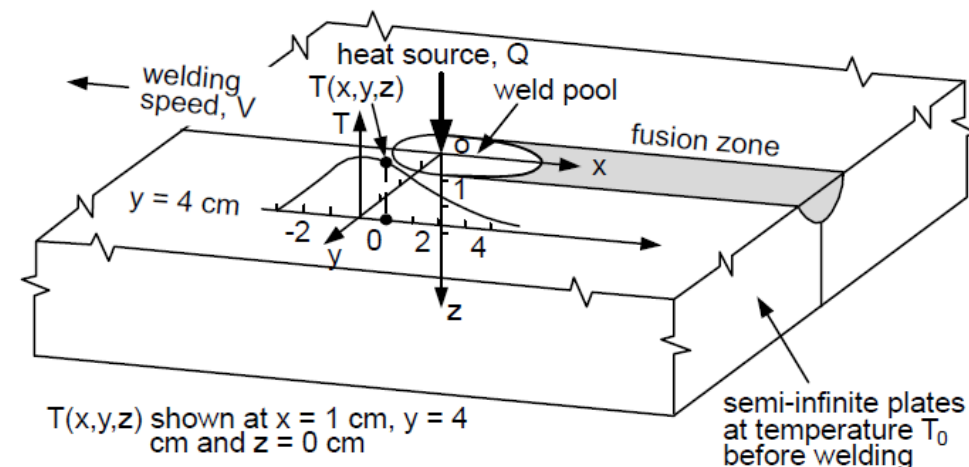


Figure 2.17 Three-dimensional heat flow during welding of semi-infinite workpiece.

Ανάλυση Μετάδοση Θερμότητας στις συγκολλήσεις τόξου

- Επομένως με κατάλληλο μετασχηματισμό θεωρούμε ημι-μόνιμες συνθήκες (quasi-stationary state)

$$w = x - ut$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{-u}{a} \frac{\partial T}{\partial w}$$

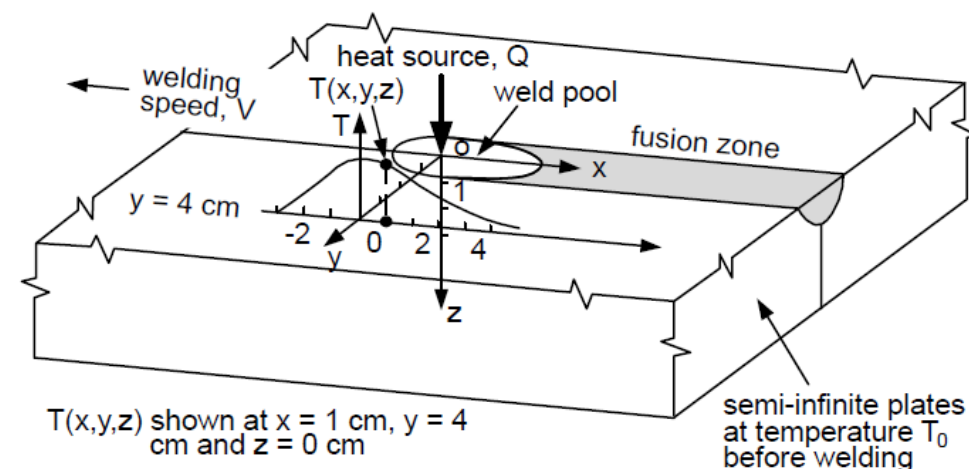


Figure 2.17 Three-dimensional heat flow during welding of semi-infinite workpiece.

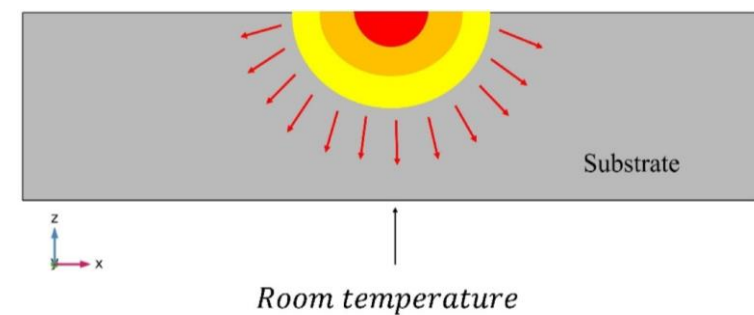
Συνοριακές συνθήκες – Λύσεις Rosenthal

- Θεωρούμε ημιάπειρη επίπεδη πλάκα άπειρου πάχους

$$T = T_0, R \rightarrow \infty$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, z = 0$$

$$Q = \lim_{R \rightarrow \infty} -2\pi R^2 k \frac{\partial T}{\partial R}$$

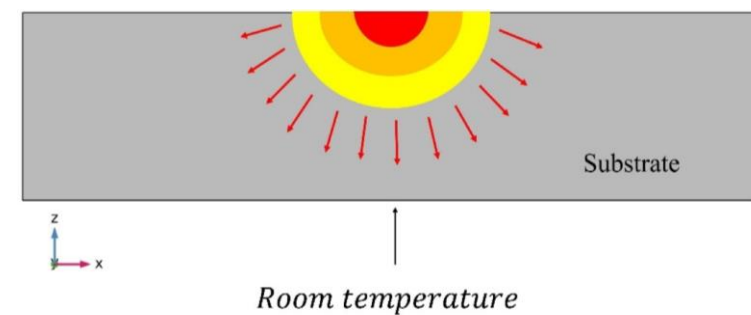


Συνοριακές συνθήκες – Λύσεις Rosenthal

- Θεωρούμε ημιάπειρη επίπεδη πλάκα περασμένου πάχους

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, z = 0 \text{ και } z = H$$

$$Q = \lim_{R \rightarrow \infty} -2\pi R^2 k \frac{\partial T}{\partial R}$$



Λύσεις Rosenthal

- Έλασμα άπειρου πάχους

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

- Έλασμα πεπερασμένου πάχους

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\frac{u}{2a}w} \left[\frac{e^{-\frac{u}{2a}R}}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{e^{-\frac{u}{2a}R_n}}{R_n} + \frac{e^{-\frac{u}{2a}R'_n}}{R'_n} \right) \right]$$

$$R_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nH - z)^2}$$

$$R'_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nH + z)^2}$$

Ρυθμός ψύξης – Λύσεις Adams

□ Έλασμα άπειρου πάχους $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{2\pi k(T - T_0)}{h} = 2\pi k \frac{u(T - T_0)}{Q}$

□ Έλασμα πεπερασμένου πάχους $\frac{\partial T}{\partial t} = 2\pi k \rho c_p \left(\frac{H}{h}\right)^2 (T - T_0)^2$

□ «Σχετικό πάχος» ελάσματος $H_0 = H \sqrt{\frac{\rho c_p (T - T_0)}{h}}$

$$w = x - ut$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{\text{ΑΣ}} = -u \frac{\partial T}{\partial w}$$

$$h = \frac{Q}{u}$$

$H_0 < 0.75$
πεπερασμένο πάχος

ΜΕΡΟΣ Β

ΠΥΡΗΝΟΠΟΪΗΣΗ ΣΤΙΣ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Αραίωση του βασικού μετάλλου

- Στις συγκολλήσεις ένα ποσοστό του μητρικού τήκτεται μαζί με το πληρωτικό υλικό, δημιουργώντας το μέταλλο συγκόλλησης
- Η αραίωση (D) του βασικού μετάλλου ορίζεται ως

$$D = \frac{100\%w}{W}$$

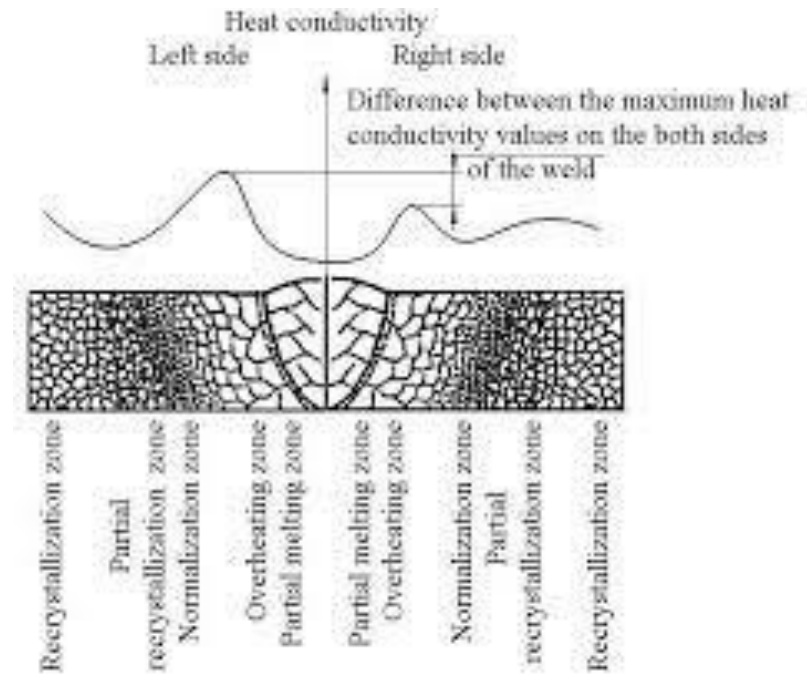
w : το βάρος του τήγματος του βασικού μετάλλου
 W : το βάρος του μετάλλου συγκόλλησης

- Συνήθως $D \in [20\%, 40\%]$
- $D = 0$, στις συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης
- $D = 100\%$, στις συγκολλήσεις αντίστασης

Διαφορισμός

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

- a) Μακροδιαφορισμό
- b) Μικροδιαφορισμό



Μακροδιαφορισμός

- ❑ Η χημική ανομοιογένεια που παρατηρείται σε όλη την έκταση του μετάλλου συγκόλλησης
- ❑ Κατά τη στερεοποίηση το υγρό μέταλλο εμπλουτίζεται συνεχώς με ακαθαρσίες
- ❑ Έτσι το τμήμα που στερεοποιείται πρώτο έχει τις λιγότερες ακαθαρσίες, και το τελευταίο τις περισσότερες

Μακροδιαφορισμός

- ❑ Η πιο σημαντική αιτία παρατηρείται στις ετερογενής συγκολλήσεις
- ❑ Όταν διαφορετικά τήγματα μετάλλων προσπαθούν να αναμιχθούν και σχηματίζεται ένα «μωσαϊκό»
- ❑ Ο μακροδιαφορισμός είναι πιο έντονος σε παχιά ελάσματα (μεγάλη μάζα, αργός ρυθμός ψύξης)
- ❑ Συμπερασματικά οι ιδιότητες των συγκολλήσεων διαφέρουν σημαντικά από περιοχή σε περιοχή

Μικροδιαφορισμός

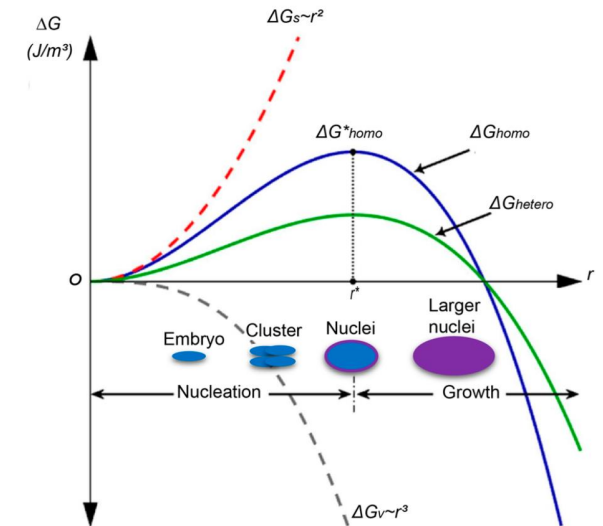
- ❑ Η χημική ανομοιογένεια που παρατηρείται σε επίπεδο κόκκου
- ❑ Οφείλεται στην ταχεία στερεοποίηση του κράματος
- ❑ Όπου πραγματοποιείται ανακατανομή της διαλυμένης ουσίας στη διεπιφάνεια στερεού – υγρού S/L
- ❑ Όταν η διεπιφάνεια S/L δεν είναι σταθερή πραγματοποιείται δενδριτική ανάπτυξη

Μικροδιαφορισμός

- ❑ Έτσι οι δενδρίτες εμφανίζουν διαφορετική σύσταση στο κέντρο τους, απ' ότι στα άκρα τους
- ❑ Επιπροσθέτως μεταξύ των κλάδων των δενδριτών σχηματίζονται ζώνες πλούσιες σε διαλυμένο υγρό
- ❑ Καθώς εκεί παγιδεύονται μικρές ποσότητες που στερεοποιούνται τελευταίες (ενδοδενδριτικός διαφορισμός)
- ❑ Συμπερασματικά παρατηρείται ανομοιογένεια στις μηχανικές ιδιότητες καθώς και στην αντοχή ή και προσβολή σε διάβρωση

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

Παραδοχές

- ❑ Σφαιρικό σχήμα πυρήνων
- ❑ Μακροσκοπική προσέγγιση – Όχι σε μικροσκοπική κλίμακα

Μαθηματική διατύπωση πυρηνοποίησης σε υγρή φάση

Για **ομογενή πυρηνοποίηση** σφαιρικού πυρήνα η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας είναι

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma_{S/L} + \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_\varepsilon$$

$$\Delta G_v = \frac{L\Delta T}{T_m}, \text{ η κινητήριοις δύναμη και } L \text{ η λανθάνουσα θερμότητα}$$

$$\gamma_{S/L} = \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{T,P} \text{ η επιφανειακή δύναμη}$$

$$\Delta G_\varepsilon = \frac{1}{2} E \varepsilon^2, \text{ η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης}$$

Λανθάνουσα Θερμότητα

- Η ποσότητα θερμότητας που απορροφά ή αποδίδει ένα υλικό κατά την μετατροπή από στερεό σε υγρό ή αντίστροφα.
- Με άλλα λόγια η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται μέχρι να πραγματοποιηθεί η αλλαγή φάσης
- Αλλά καταναλώνεται ή εκλύεται λόγω της αλλαγής φάσης

Μαθηματική διατύπωση πυρηνοποίησης σε υγρή φάση

$$\Delta G = \underbrace{\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v}_{\text{Αρνητικός}} + \underbrace{4\pi r^2 \gamma_{S/L}}_{\text{Θετικός}} + \underbrace{\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_e}_{\text{Θετικός}}$$

Αρνητικός

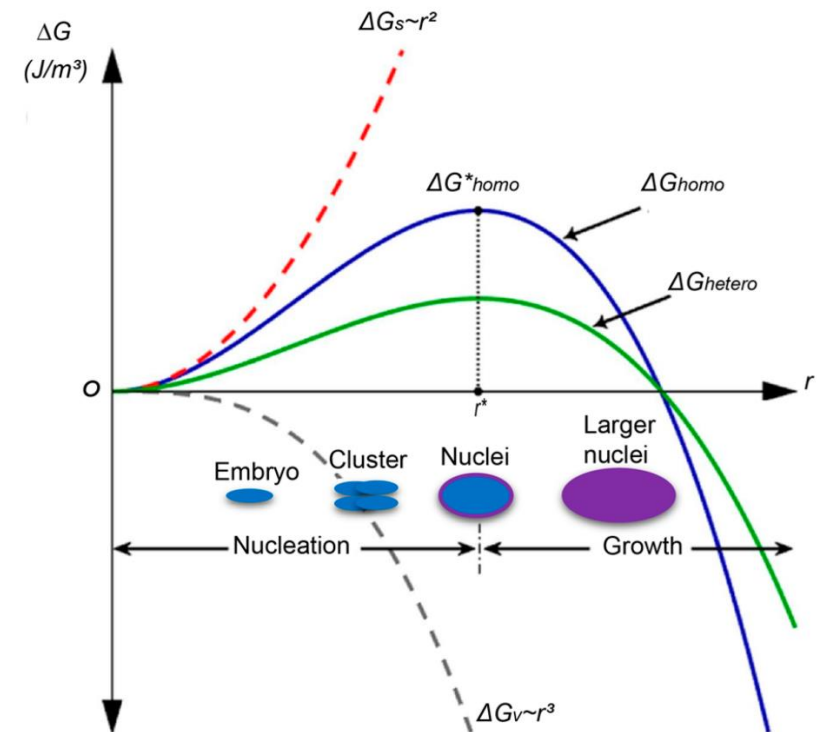
Μείωση ΔG
λόγω
σχηματισμού
στερεού

Θετικός

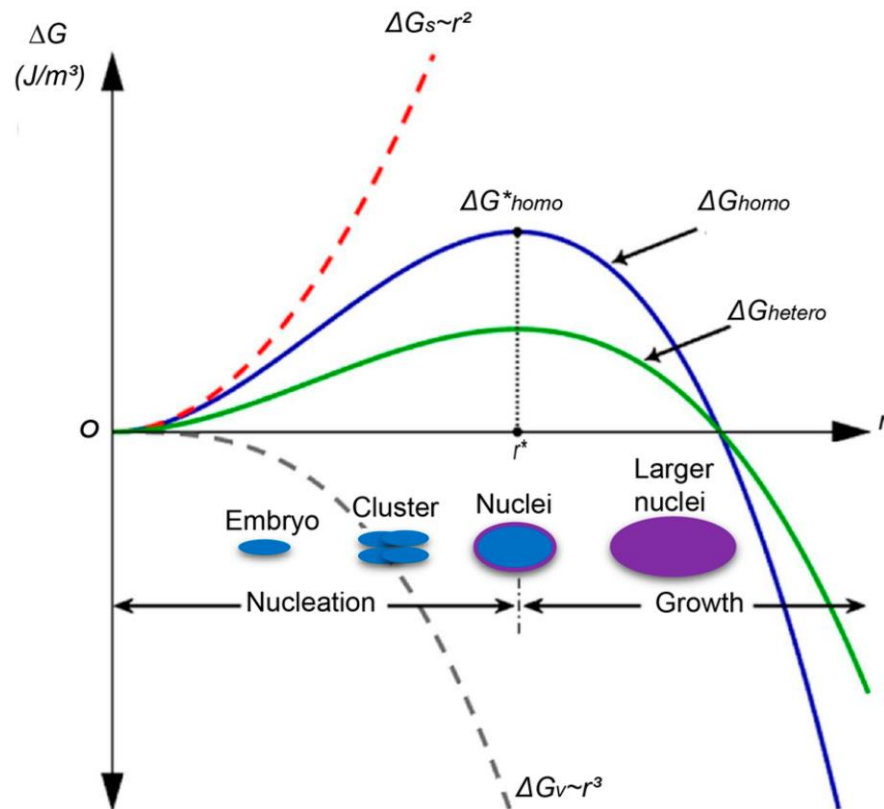
«κόστος»
δημιουργίας
επιφάνειας

Θετικός

Ανάπτυξη
ελαστικών
παραμορφώσεων
στο κρυσταλλικό
πλέγμα



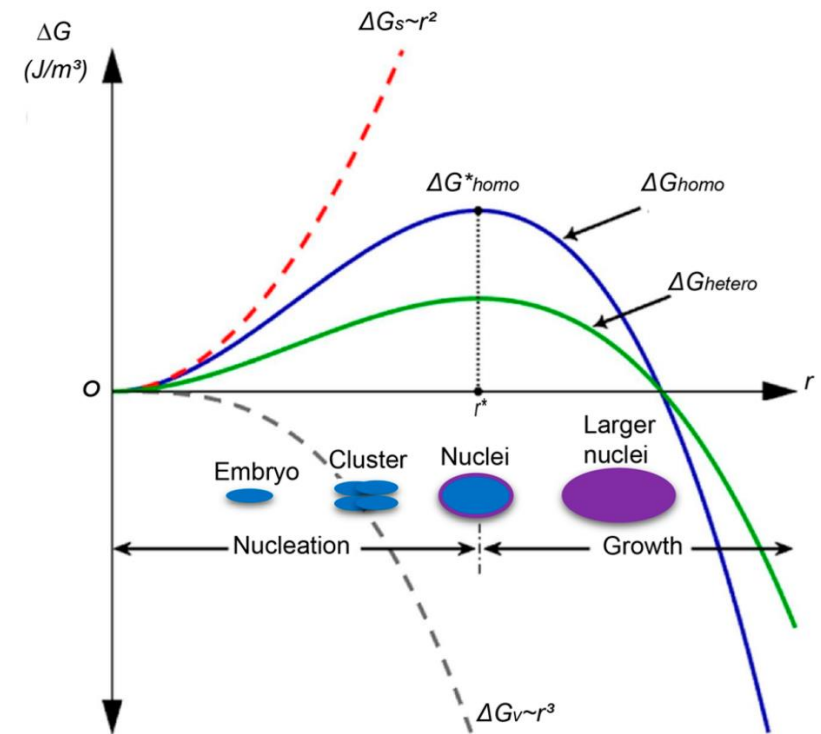
Μαθηματική διατύπωση πυρηνοποίησης σε υγρή φάση



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

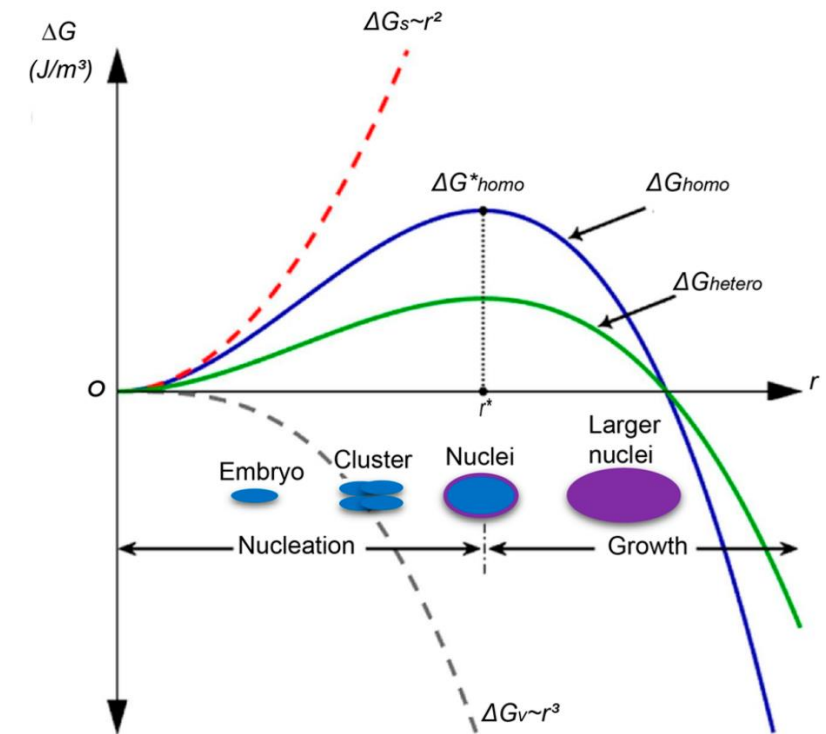
Ενέργεια ενεργοποίησης

Η ελάχιστη ενέργεια που θα πρέπει να διαθέτουν τα άτομα ή μόρια για να ξεκινήσει μια διεργασία (π.χ. χημικές αντιδράσεις, διάχυση, ανακρυστάλλωση, αλλαγή φάσης κλπ.)



Κρίσιμη ακτίνα πυρηνοποίησης

- Η ανάπτυξη στερεών με $r < r^*$ αυξάνει την ελεύθερη ενέργεια, έτσι τα σωματίδια επανατήκονται
- Η ανάπτυξη στερεών με $r > r^*$ ελαττώνει την ελεύθερη ενέργεια, συνεπώς αυτοί οι πυρήνες συμβάλουν στην στερεοποίηση

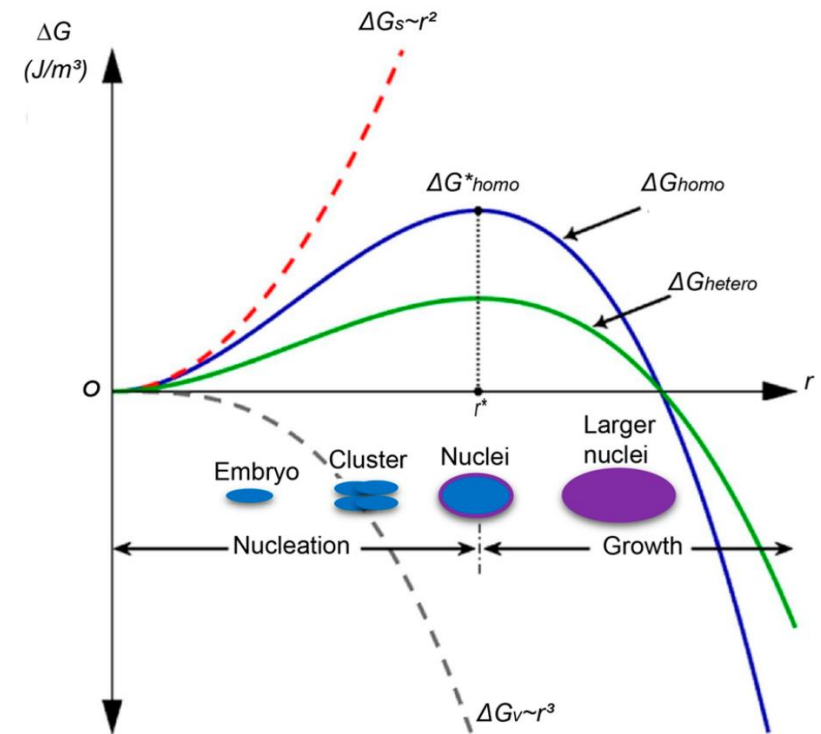


Κρίσιμη ακτίνα πυρηνοποίησης

□ Παίρνοντας την παράγωγο $\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = 0$

$$r^* = -\frac{2\gamma_{SL}}{\Delta G_v + \Delta G_e}$$

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma_{SL}^3}{3(\Delta G_v + \Delta G_e)^2}$$

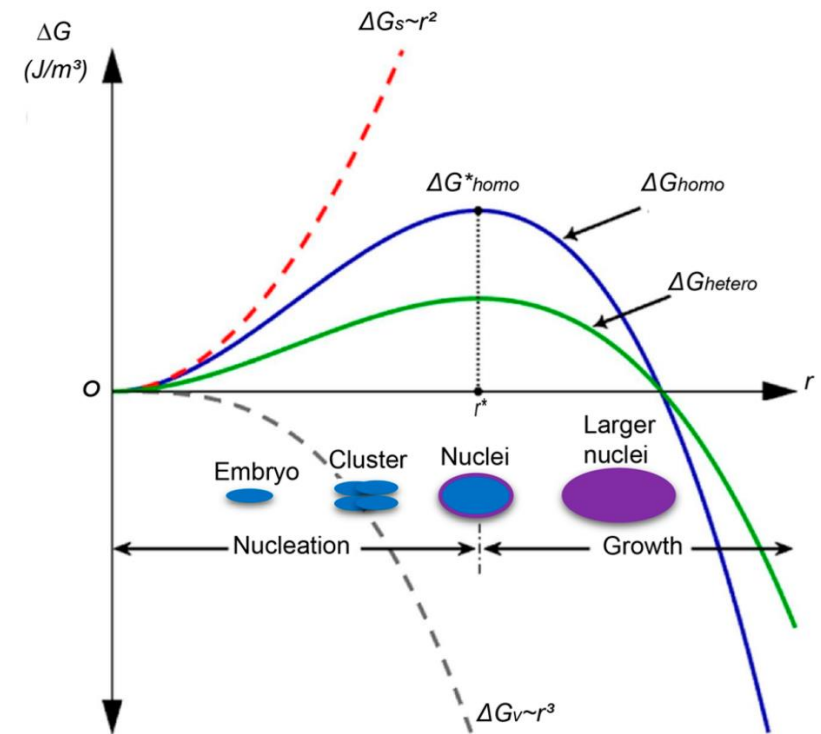


Κρίσιμη ακτίνα πυρηνοποίησης

- Παίρνοντας την παράγωγο $\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = 0$
- Αγνοώντας την ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης

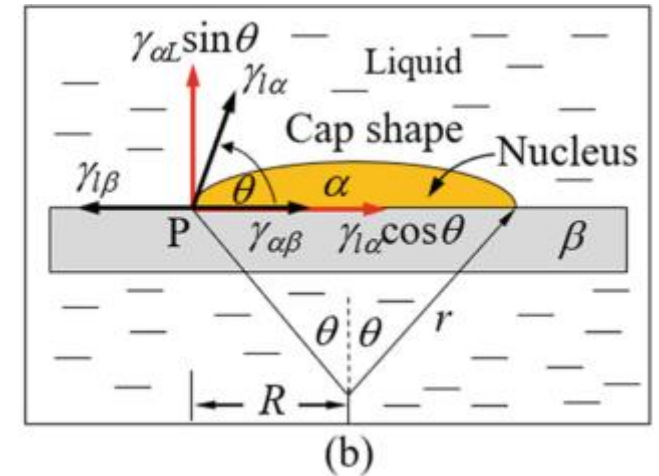
$$r^* = -\frac{2\gamma_{SL}T_m}{L} \frac{1}{\Delta T}$$

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma_{SL}^3T_m^2}{3L^2} \frac{1}{\Delta T^2}$$



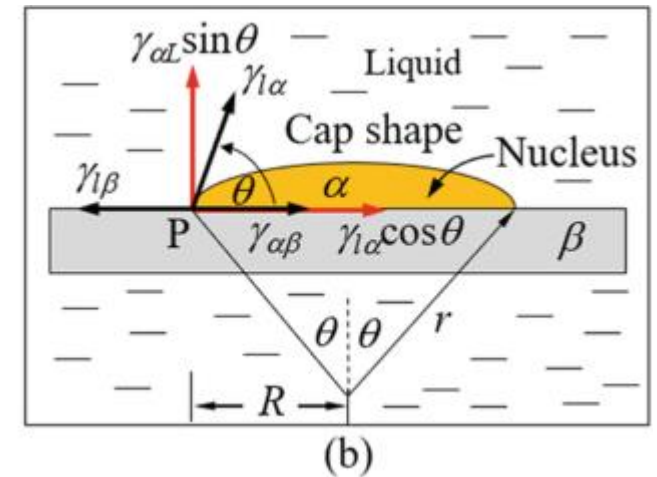
Ετερογενής πυρηνοποίηση

- Η ομογενής πυρηνοποίηση είναι πολύ σπάνιο φαινόμενο, διότι απαιτεί πολύ μεγάλες τιμές ενέργειας ενεργοποίησης
- Έτσι η πυρηνοποίηση είναι σχεδόν πάντα ετερογενής
- Δηλαδή πραγματοποιείται πάνω σε άλλες επιφάνειες



Ετερογενής πυρηνοποίηση

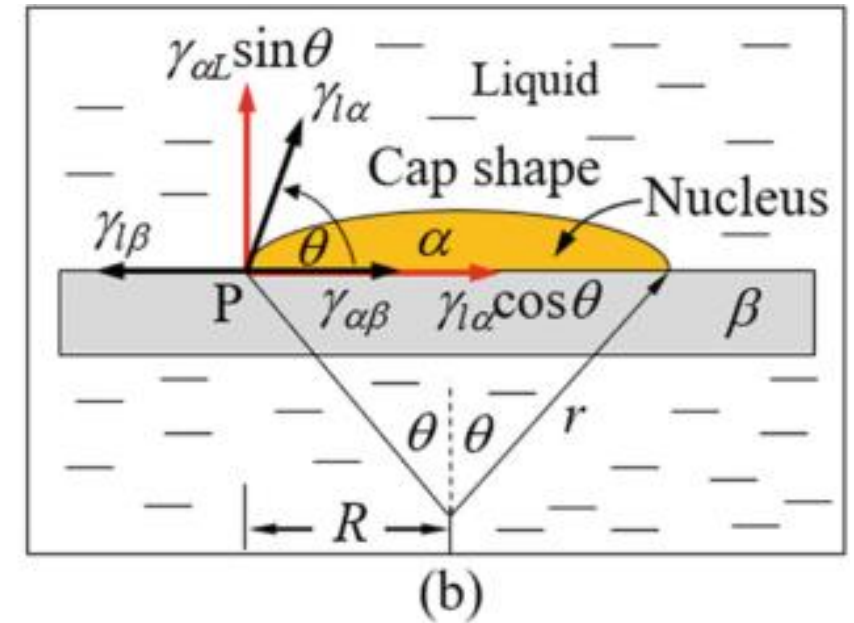
- Η ετερογενής πυρηνοποίηση πραγματοποιείται σε ατέλειες της δομής της επιφάνειας καταλύτη (οπές, αταξίες, σύνορα κόκκων κ.α.)
- Καθώς ένα μέρος της ελεύθερης ενέργειας των ατελειών οδηγεί στην υπέρβαση του ενεργειακού φραγμού, για την πραγματοποίηση της πυρηνοποίησης



Ετερογενής πυρηνοποίηση

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

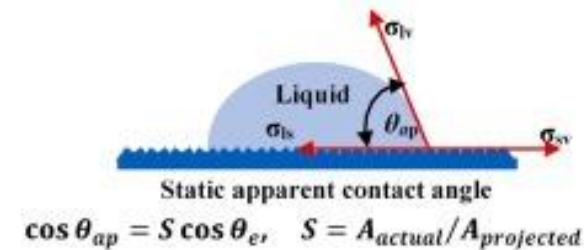
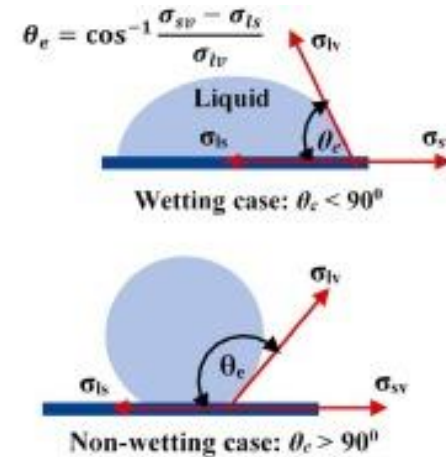
$$f(\theta) = \frac{1}{2}(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2$$



Ετερογενής πυρηνοποίηση

Έτσι όταν

- $\theta = 0$, πλήρης διαβροχή και $\Delta G \rightarrow 0$
- $\theta = 90$, $\Delta G_{het} = \Delta G_{hom}$
- Γενικά για $\theta < 10^\circ$ απαιτούνται μικρές τιμές υπέρψησης ΔT
- Όταν θ μεγάλο τότε η κατακόρυφη συνιστώσα είναι σημαντική και δυσχεραίνει τη στερεοποίηση



Ετερογενής πυρηνοποίηση

Η ετερογενής πυρηνοποίηση είναι πολύ σημαντική στις συγκολλήσεις καθώς

- ❑ Περισσότερα κέντρα πυρηνοποίησης ανά μονάδα όγκου οδηγεί σε περισσότερους πυρήνες κρυστάλλωσης
- ❑ Κάθε πυρήνας μορφοποιείται σε κόκκος στερεού
- ❑ Ελαττώνοντας το μέγεθος των κόκκων

Ετερογενής πυρηνοποίηση

- ❑ Η ετερογενής πυρηνοποίηση πραγματοποιείται με εμβολιασμό του υγρού προσθήκες, που αντιδρούν με το υγρό
- ❑ Σχηματίζοντας θέσεις για ετερογενή πυρηνοποίηση
- ❑ Ο εμβολιασμός επιδιώκεται να γίνεται σε πολλές θέσεις έτσι ώστε να προκληθεί εκλέπτυνση των κόκκων

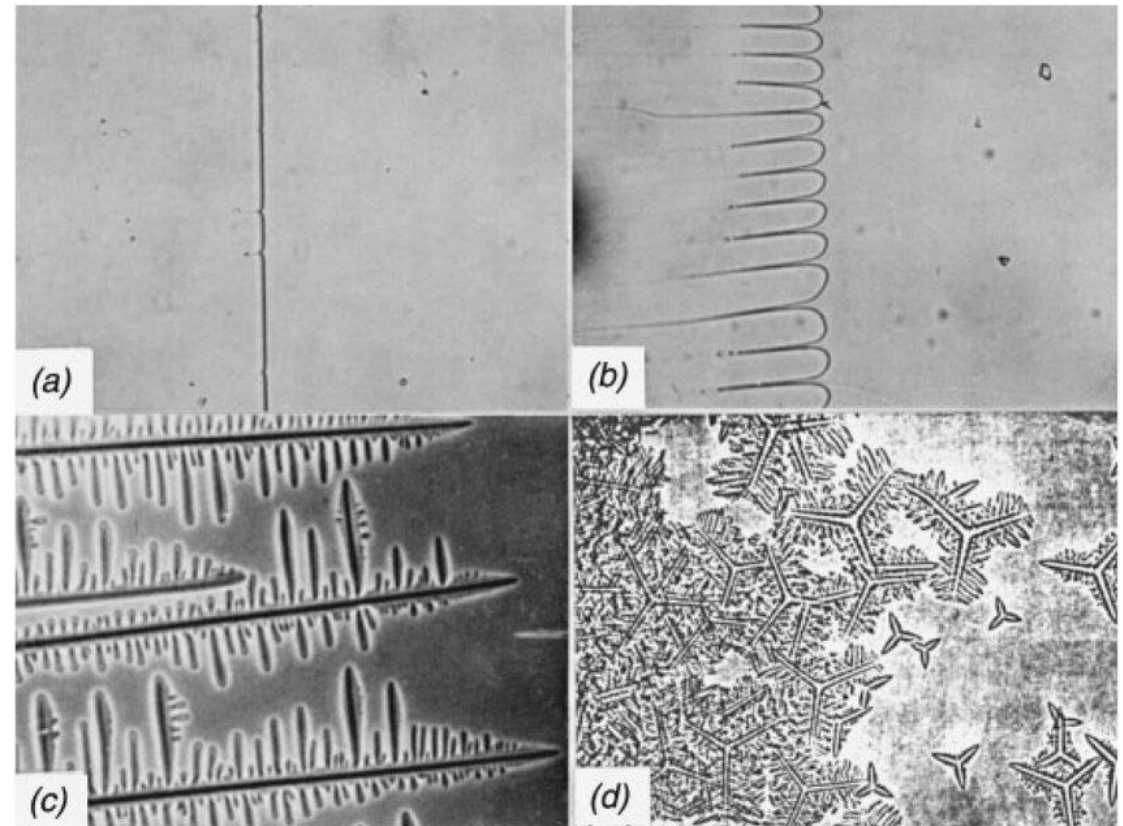
Επιλογή καταλύτη στην ετερογενή πυρηνοποίηση

Παράγοντες που επηρεάζουν την ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού αποτελούν

- ❑ Η συνάφεια των κρυσταλλικών πλεγμάτων των δύο δομών
- ❑ Η χημική φύση του σχηματιζόμενου υποστρώματος
- ❑ Οι ατέλειες της επιφάνειας του του σχηματιζόμενου υποστρώματος

Μορφολογία ανάπτυξης πυρήνων

- Επίπεδη ανάπτυξη
- Δενδριτική ανάπτυξη
- Κυψελοειδής ανάπτυξη



Μαθηματική διατύπωση κριτηρίου σχηματιζόμενης μορφολογίας

Παραδοχές

- ❑ Δυαδικά κράματα
- ❑ Καθαρή μονοδιάστατη αγωγή στη στερεή φάση
- ❑ Επίπεδη και ημιάπειρη διεπιφάνεια
- ❑ Σταθερή ταχύτητα συγκόλλησης

Μαθηματική διατύπωση κριτηρίου σχηματιζόμενης μορφολογίας

$$D_L \nabla^2 C_L - \mathbf{v} \cdot \nabla C_L = 0 \Rightarrow$$

$$D_L \frac{\partial^2 C_L}{\partial x^2} - R \frac{\partial C_L}{\partial x} = 0$$

$$C_L(x=0) = \frac{C_0}{k}, \quad k = \frac{C_S}{C_L}$$

$$C_L(x) = C_0 + (C_L(0) - C_0) e^{-Rx/D_L}$$

Μαθηματική διατύπωση κριτηρίου σχηματιζόμενης μορφολογίας

- Η κατανομή της θερμοκρασίας liquidus μεταβάλλεται με την αύξηση της διαλυμένης ουσίας

$$\frac{\partial T_L}{\partial x} = m \frac{\partial C_L}{\partial x}$$

m η κλίση της Liquidus στο διάγραμμα φάσης

Μαθηματική διατύπωση κριτηρίου σχηματιζόμενης μορφολογίας

$$\frac{\partial T_L}{\partial x} = m \frac{\partial C_L}{\partial x}$$

$$C_L(x) = C_0 + (C_L(0) - C_0)e^{-Rx/D_L}$$



$$\frac{\partial T_L}{\partial x} = -m \frac{(C_0/k)(1-k)}{D_L} R$$



$$\left(\frac{G}{R} \right)_{crit} = |m| \frac{C_0(1-k)}{kD_L}$$

$$G = |\nabla T|$$

Μαθηματική διατύπωση κριτηρίου σχηματιζόμενης μορφολογίας

$$\left(\frac{G}{R}\right)_{crit} > |m| \frac{C_0(1-k)}{kD_L}$$

Εξίσωση συνταγματικής υπόψηξης

Η διεπιφάνεια στερεού υγρού είναι σταθερή και η πυρηνοποίηση είναι επίπεδη

* π.χ. σε κράμα Al-Si, το Al είναι το διάλυμα, ενώ το Si αποτελεί την διαλυμένη ουσία. Δηλαδή η εξίσωση συνταγματικής υπόψηξης εφαρμόζεται για το Si

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

Στις συγκολλήσεις

- ❑ Κράματα πολλών στοιχείων
- ❑ Η διεπιφάνεια δεν είναι επίπεδη
- ❑ Η θερμική ροή είναι πολυδιάστατη
- ❑ Στη λίμνη συγκόλλησης παρατηρείται συναγωγή

Αστάθεια διεπιφάνειας

- Στην πραγματικότητα το κριτήριο αστάθειας στις συγκολλήσεις είναι

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

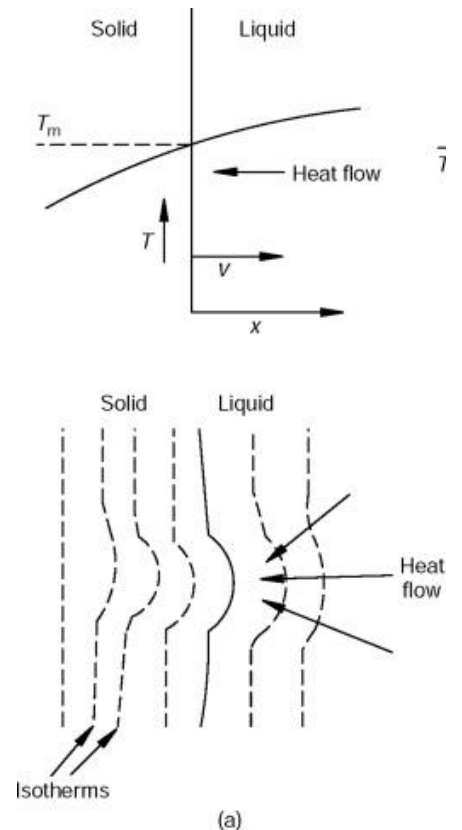
Ερωτήσεις απορίες

ΜΕΡΟΣ Γ

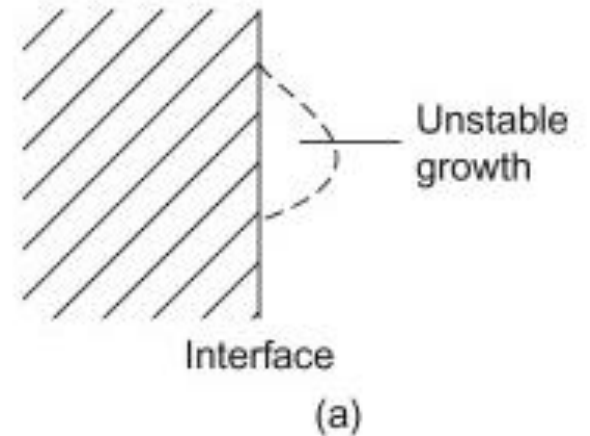
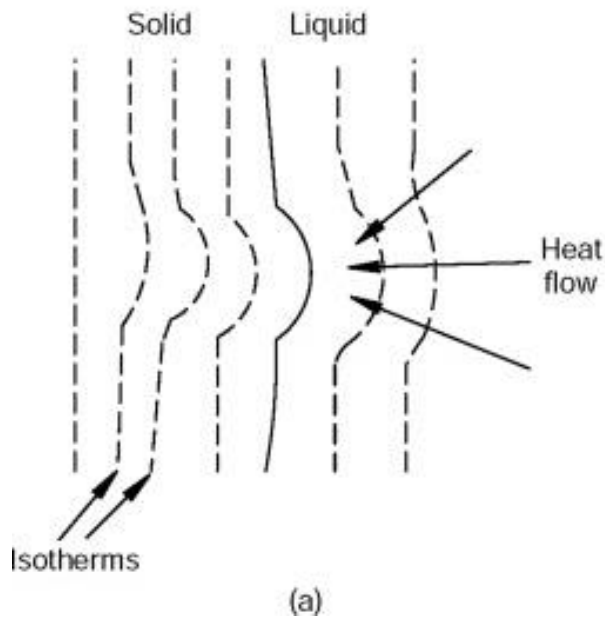
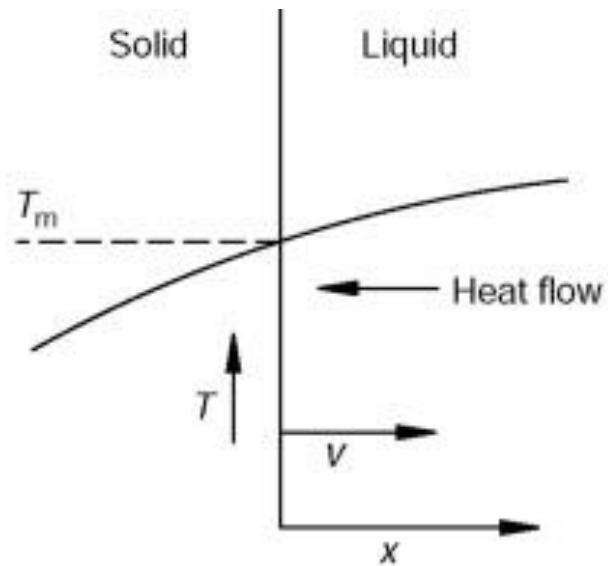
ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΠΥΡΗΝΩΝ

Επίπεδη ανάπτυξη

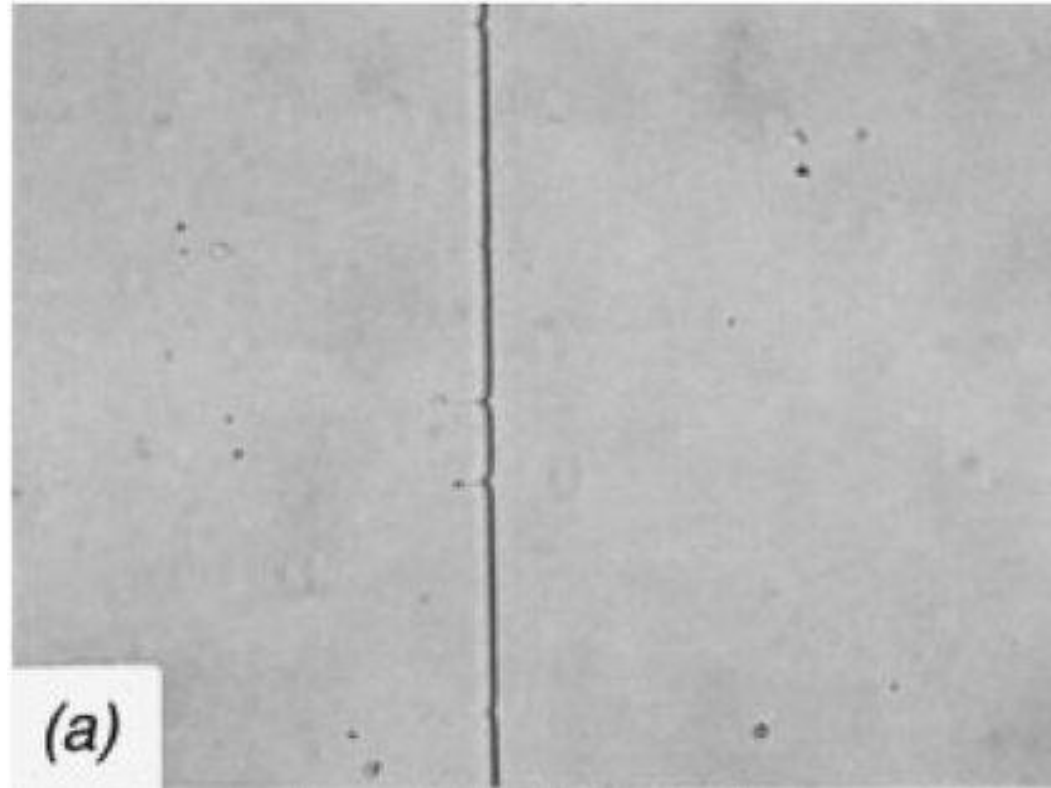
- Η διεπιφάνεια S/L παραμένει επίπεδη μετά τη στερεοποίηση
- Προϋποθέτει θετική κλίση της χωρικής παραγώγου της θερμοκρασίας
- Το στερεό αναπτύσσεται σε υπέρθερμο υγρό



Επίπεδη ανάπτυξη

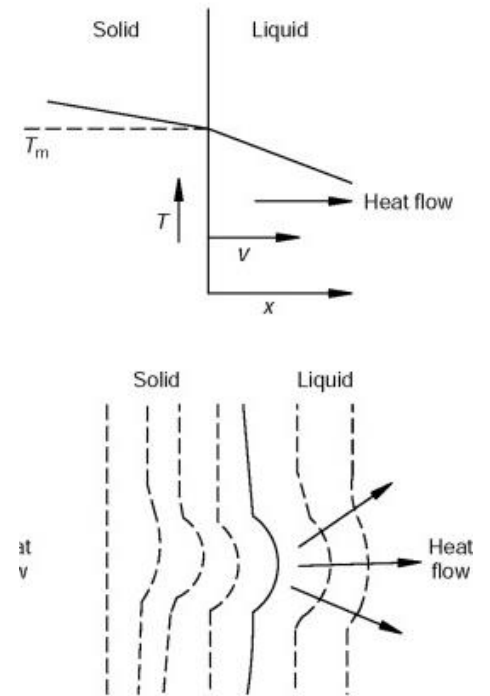


Επίπεδη ανάπτυξη

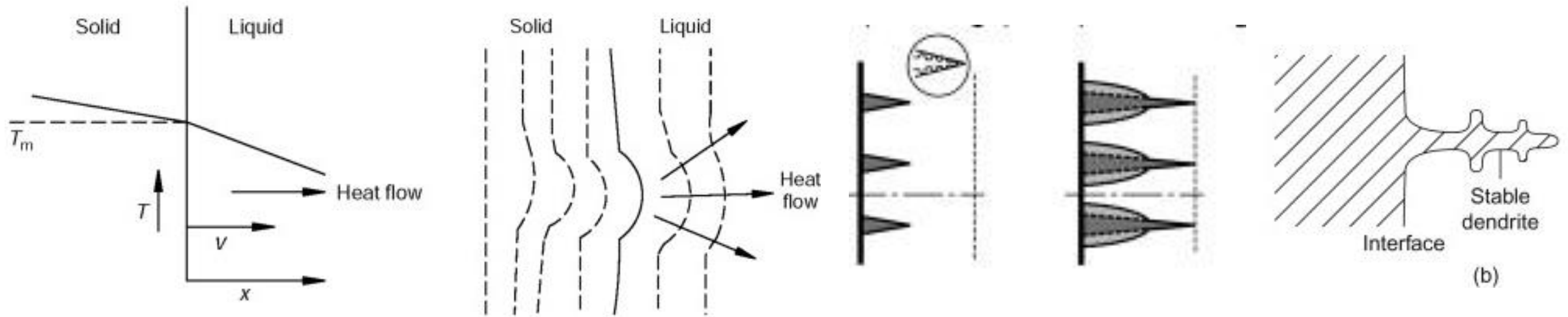


Δενδριτική ανάπτυξη

- ❑ Το στερεό αναπτύσσεται σε υγρή φάση με υπέρψηση σε θερμοκρασία μικρότερη της θερμοκρασίας τήξης
- ❑ Προϋποθέτει αρνητική κλίση της χωρικής παραγώγου της θερμοκρασίας
- ❑ Η διεπιφάνεια S/L είναι ασταθής και παράγονται πρωτογενείς, δευτερογενείς ακόμη και τριτογενείς κλάδοι



Δενδριτική ανάπτυξη



Δενδριτική ανάπτυξη λόγω συστασιακής υπέρψησης

- ❑ Δενδριτική ανάπτυξη μπορεί να πραγματοποιηθεί και με θετική κλίση της χωρικής παραγωγού της θερμοκρασίας λόγω συστασιακής υπέρψησης
- ❑ π.χ. σε κράμα Al-Si μετά την αρχική μεταβολή της φάσης το πυρήτιο αποβάλλεται στο υγρό
- ❑ Έτσι μπροστά από την διεπιφάνεια S/L σχηματίζεται μια ζώνη πλούσια σε Si
- ❑ Η οποία μετακινείται μαζί με την διεπιφάνεια S/L

Δενδριτική ανάπτυξη λόγω συστασιακής υπέρψησης

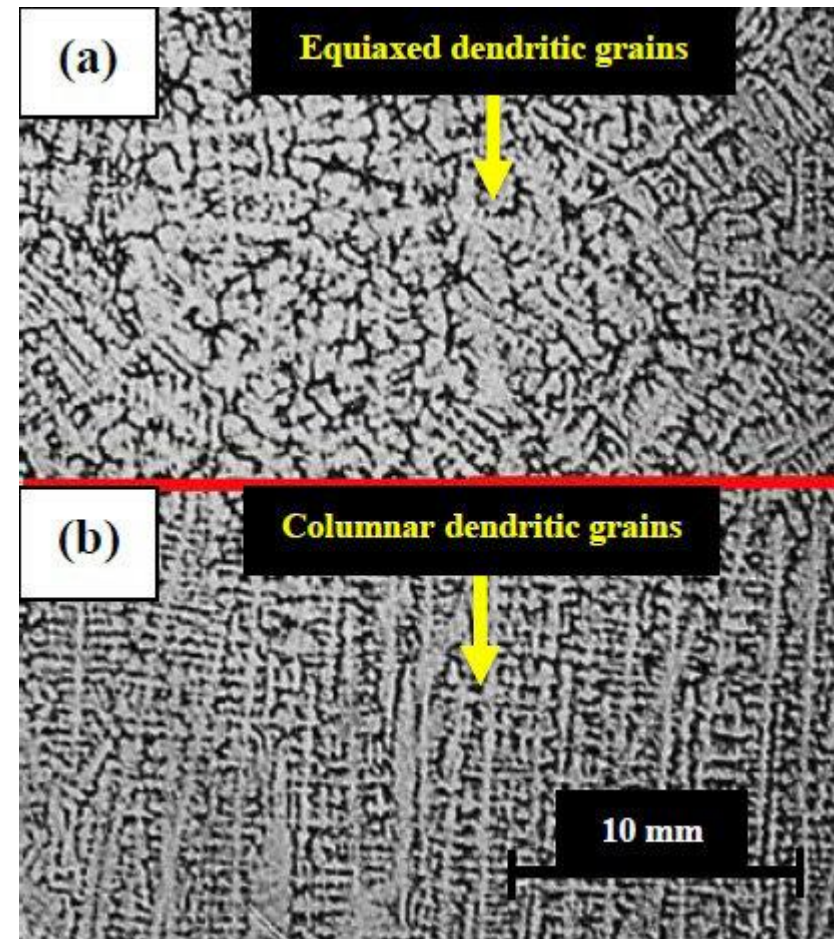
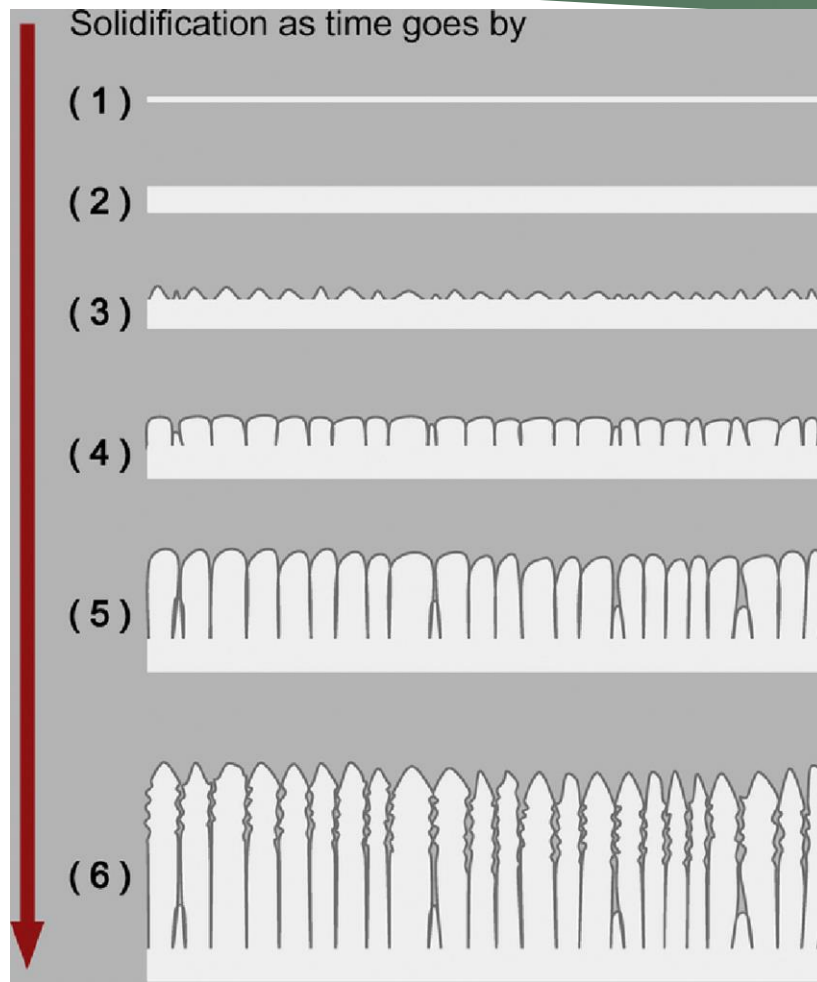
Σε αυτή την πλούσια σε Si ζώνη

- λόγω της ύπαρξης Si, η T_{Liquidus} αυξάνεται
- Έτσι τοπικά στο υγρό $T < T_m$
- Η συστασιακή υπέρψηση ευνοείται έναντι της επίπεδης ανάπτυξης εάν

$$\frac{G}{R} < \frac{T_L - T_L}{D_L}$$

- Έτσι ευνοείται σε μεγάλες ταχύτητες στερεοποίησης (συγκολλήσεις)

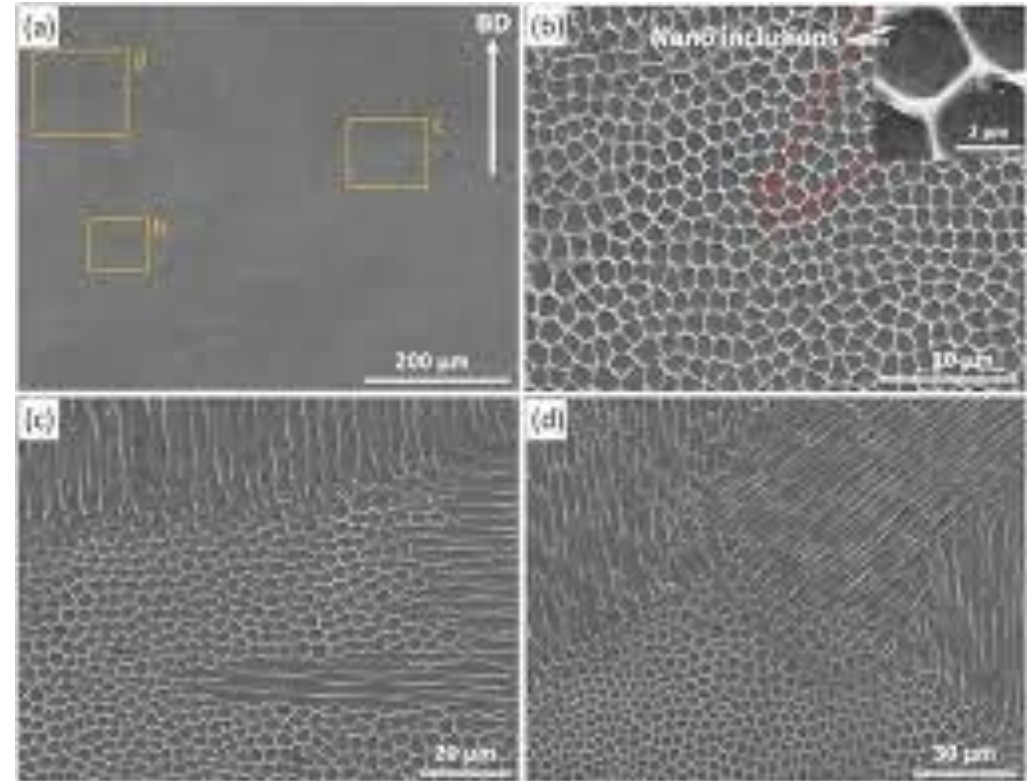
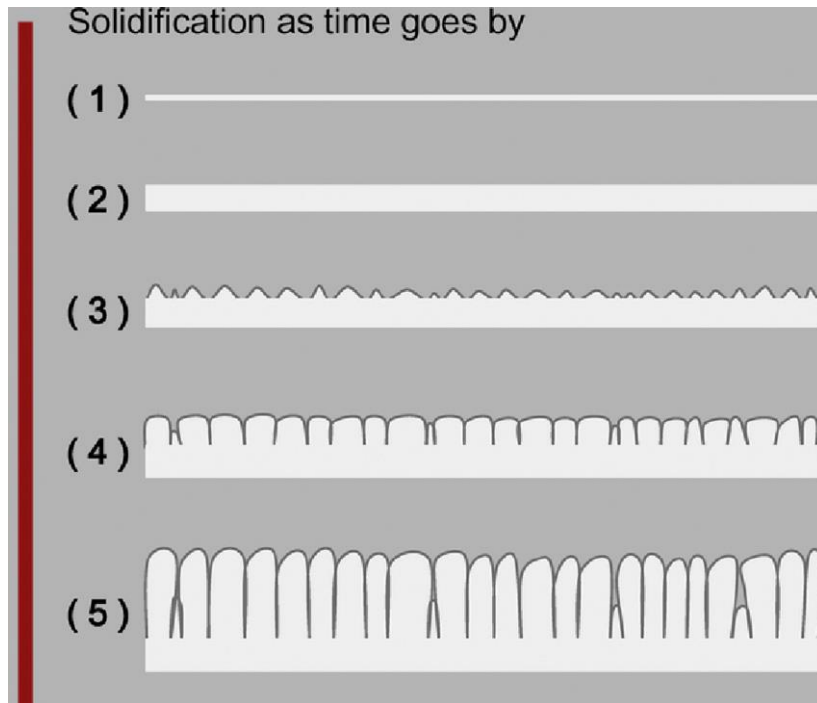
Δενδριτική ανάπτυξη



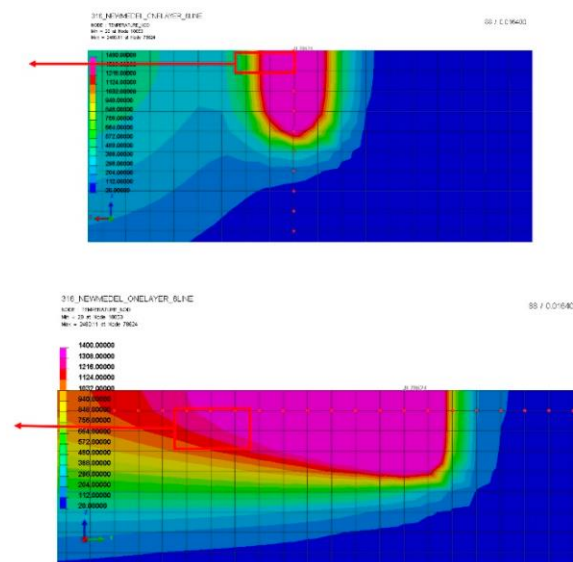
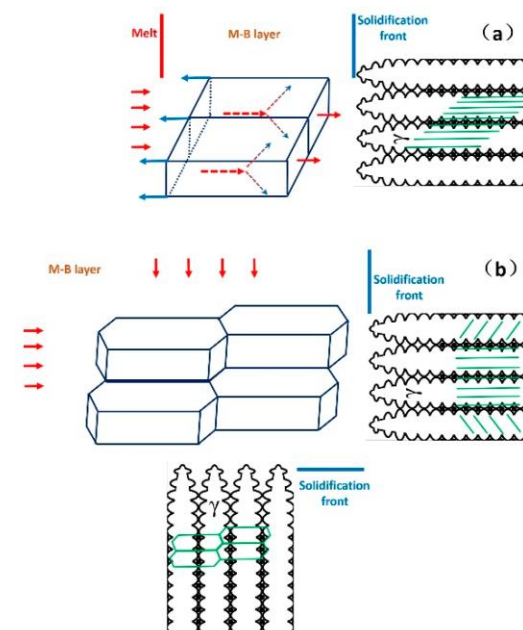
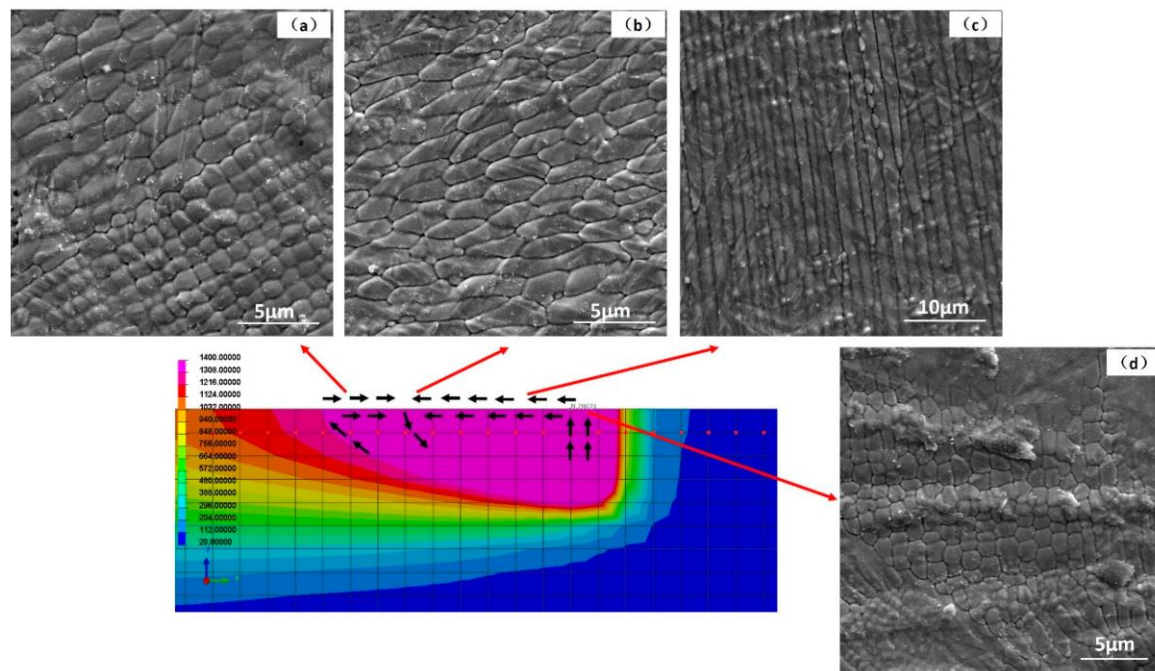
Κυψελοειδής ανάπτυξη

- ❑ Όταν η υγρή φάση, που βρίσκεται σε κατάσταση υπόψηξης, μπρόστα από την διεπιφάνεια S/L έχει **μικρό πλάτος**
- ❑ Έτσι δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη δενδριτών
- ❑ Συνεπώς η διαπιφάνεια διασπάται σε κυψέλες
- ❑ Οι οποίες επιμηκύνονται στη διεύθυνση της στερεοποίησης

Κυψελοειδής ανάπτυξη

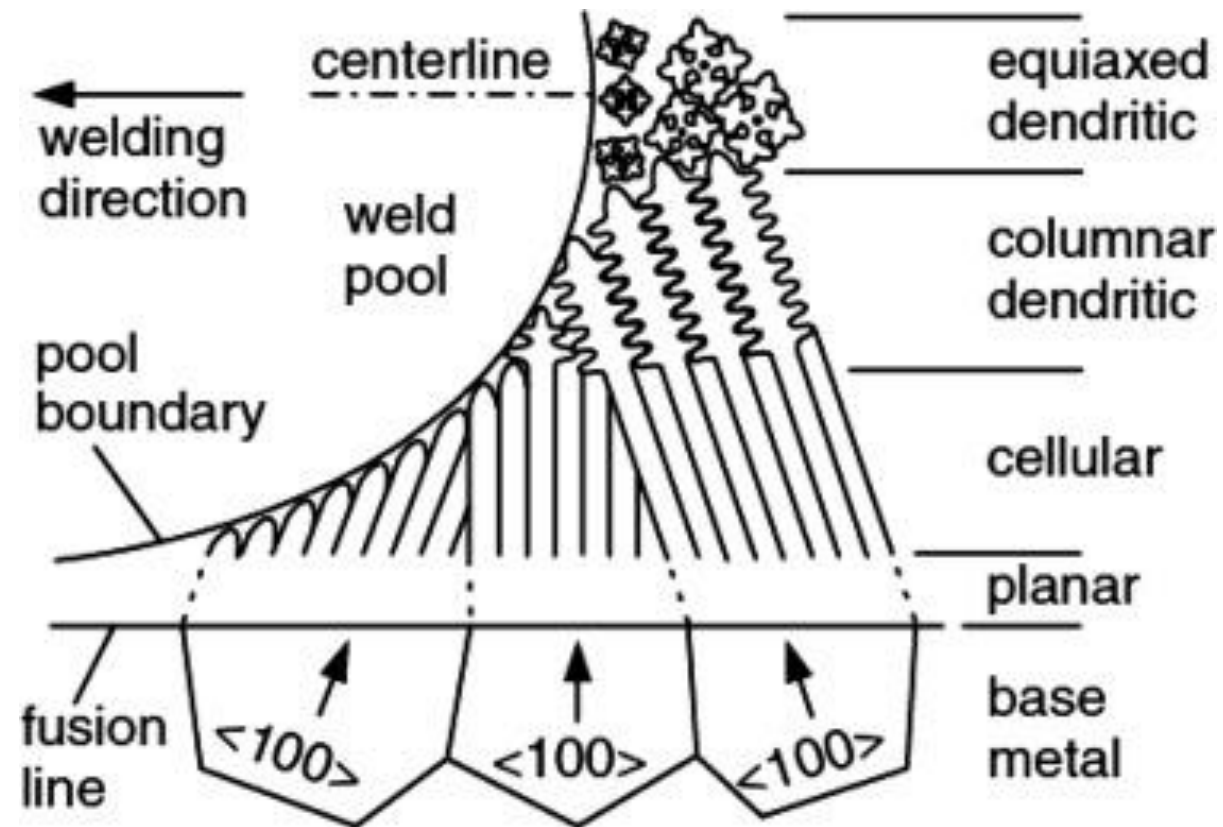


Κυψελοειδής και δενδριτική ανάπτυξη



Πυρηνοποίηση σε συγκολλήσεις χάλυβα

65



Ερωτήσεις απορίες

ΜΕΡΟΣ Δ

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>

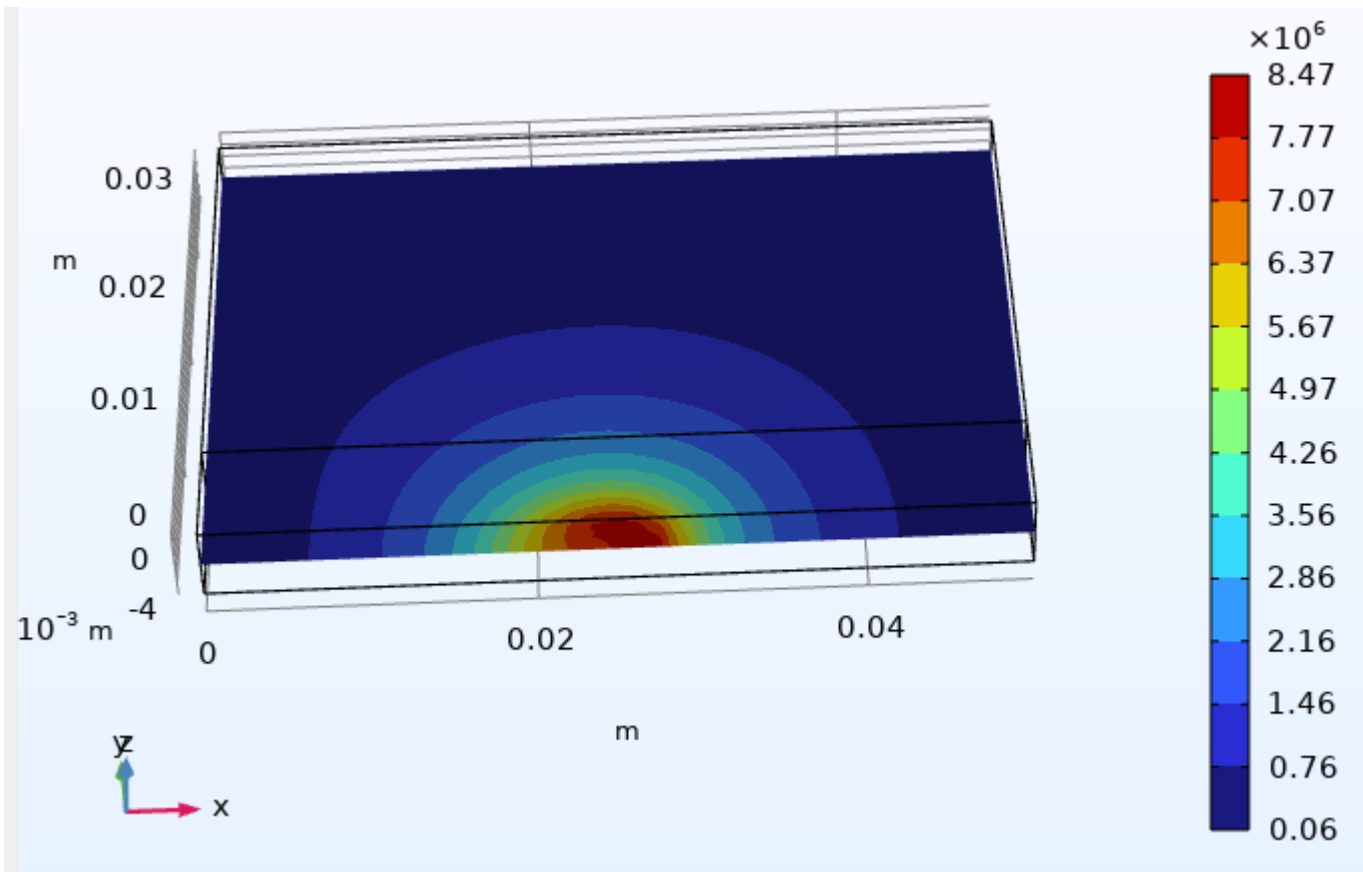
- ❑ Ένα πέρασμα
- ❑ Εμπορικά άλφα-βήτα κράματα αλουμινίου
- ❑ α-φάση: στερεό διάλυμα Al με μικρή διαλυτότητα κραματικών στοιχείων
- ❑ β-φάση: ενδομεταλλική ένωση (intermetallic), συνήθως σκληρή και ψαθυρή
- ❑ Η συσχέτιση της διάλυσης της α-φάσης με τη θερμοκρασία δίνεται

$$\alpha_{1,H,SS}(T) = 2.20655 \times 10^{-31} \times T^{9.88821}$$

TABLE 1: TEMPERATURE-DEPENDENT THERMAL MATERIAL PROPERTIES.

Phase	ρ	C_p	k
Beta	4700kg/m ³	480J/(kg·K) + 0.24m/W · T	0.3W/(m·K) + 0.021m/W · T
Widmanstätten Alpha	4400kg/m ³	480J/(kg·K) + 0.24m/W · T	0.1W/(m·K) + 0.016m/W · T
Martensitic Alpha	4400kg/m ³	480J/(kg·K) + 0.24m/W · T	0.1W/(m·K) + 0.016m/W · T

Χωρικές παράγωγοι - μέτρο

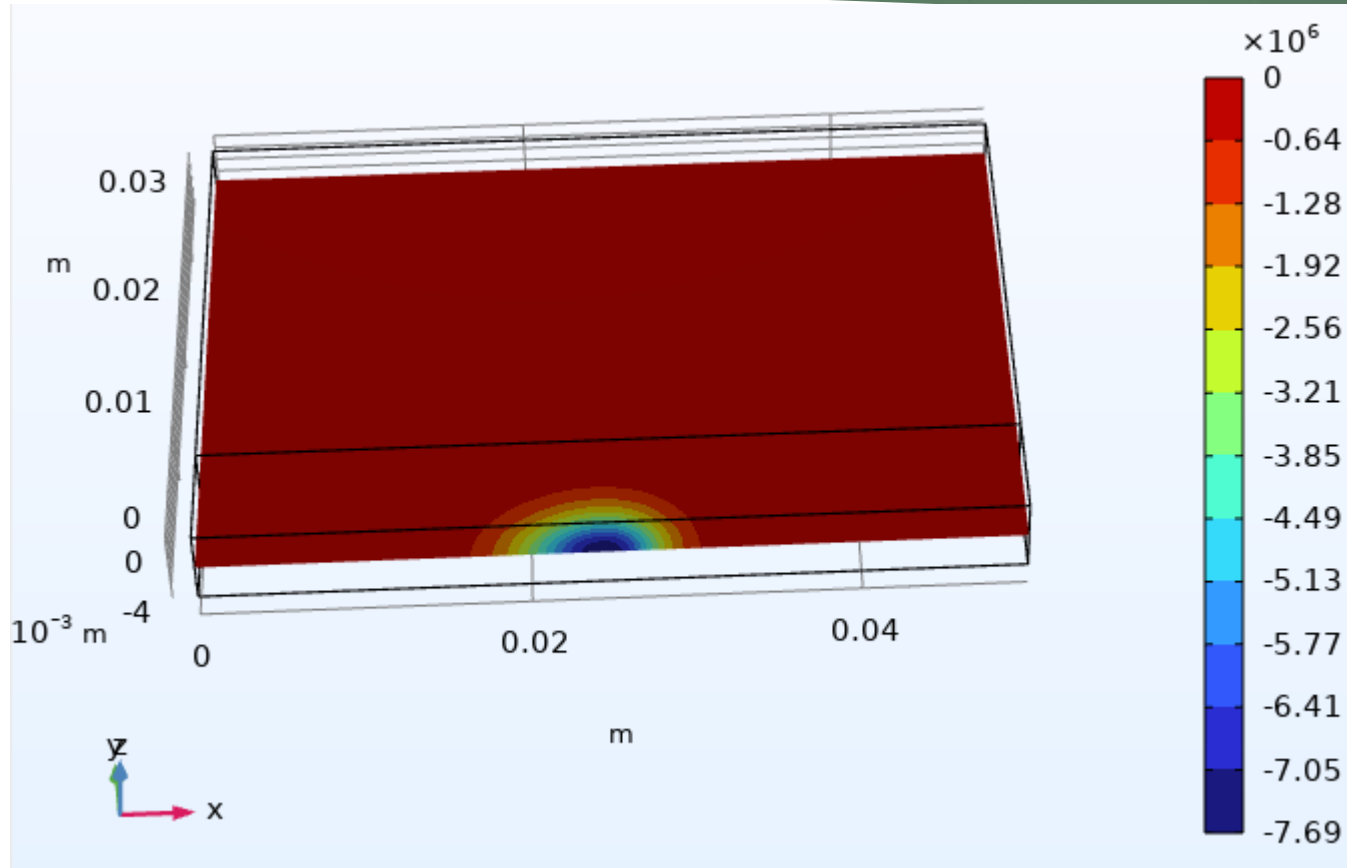


Expression:

$\text{sqrt}(\text{ht.dfluxx}^2 + \text{ht.dfluxy}^2 + \text{ht.dfluxz}^2)$

- 3D Plot Group 12
 - Streamline 1
 - Slice 1
 - Slice 2**
 - Slice 3
 - Isosurface 1
 - Slice 4

Μερικές χωρικές παράγωγοι



Expression:

ht.dfluxz

Unit:

W/m²