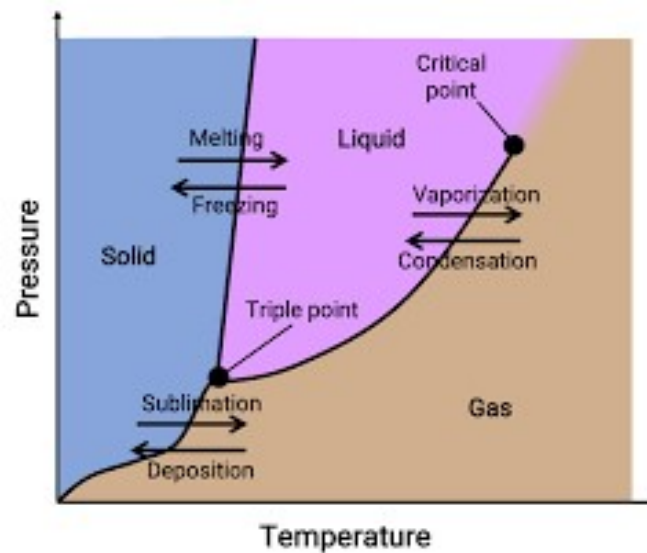


Διαγράμματα φάσης



Περιέχει περιεχόμενο και υλικό από τα συγγράμματα:

Callister W. D., Rethwisch D. G. Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 10η Έκδοση, Εκδ. Α. Τζιόλα & Υιοί, 2022

Β. Ζασπάλης, Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 2η Έκδοση, Εκδ. Α. Τζιόλα & Υιοί, 2020

- Όταν συνδυάζουμε δύο στοιχεία...
ποια είναι η προκύπτουσα
κατάσταση ισορροπίας;
- Ειδικότερα, εάν καθορίσουμε...
 - τη σύσταση (π.χ. wt% Cu-wt% Ni),
και
 - τη θερμοκρασία (T)

τότε...

Πόσες φάσεις δημιουργούνται;
Ποια είναι η σύσταση κάθε φάσης;
Ποια είναι η ποσότητα κάθε φάσης;



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΕΩΝ

Ισορροπίες φάσεων και όριο διαλυτότητας

- **Διάλυμα** – στερεό, υγρό, ή αέριο, μία μεμονωμένη φάση
- **Μείγμα** – περισσότερες από μία φάση

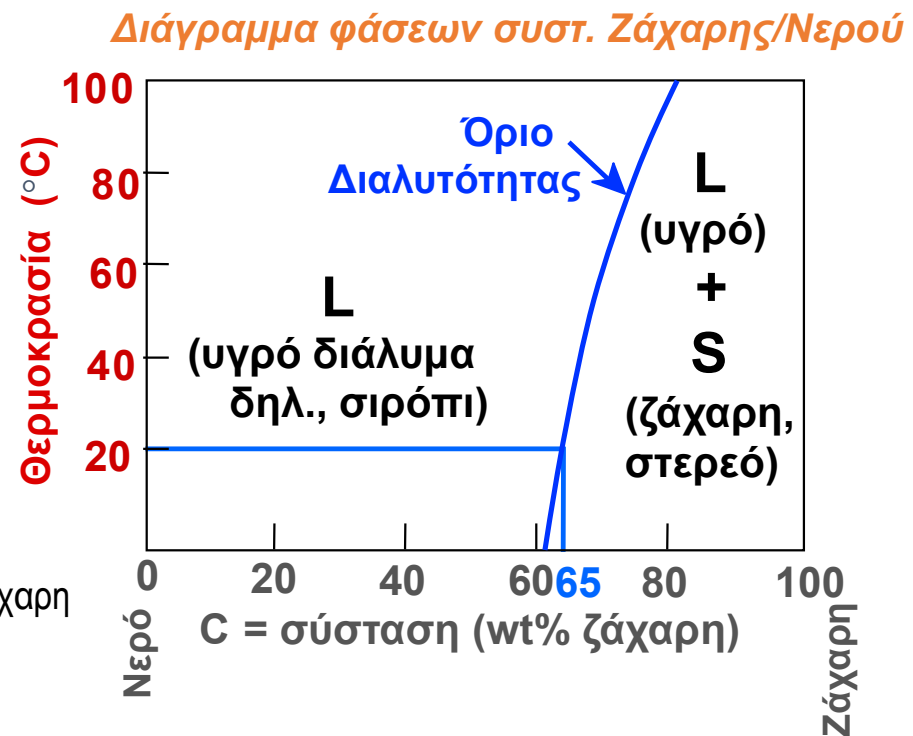
- **Όριο διαλυτότητας:**
Η μέγιστη συγκέντρωση
για την οποία υπάρχει
διάλυμα με μόνο μία φάση.

Ερώτημα: Ποιο είναι το όριο
διαλυτότητας για τη ζάχαρη
στο νερό, στους 20°C;

Απάντηση: 65 wt% ζάχαρη.

20°C: Εάν $C < 65 \text{ wt\% ζάχαρη}$ => σιρόπι

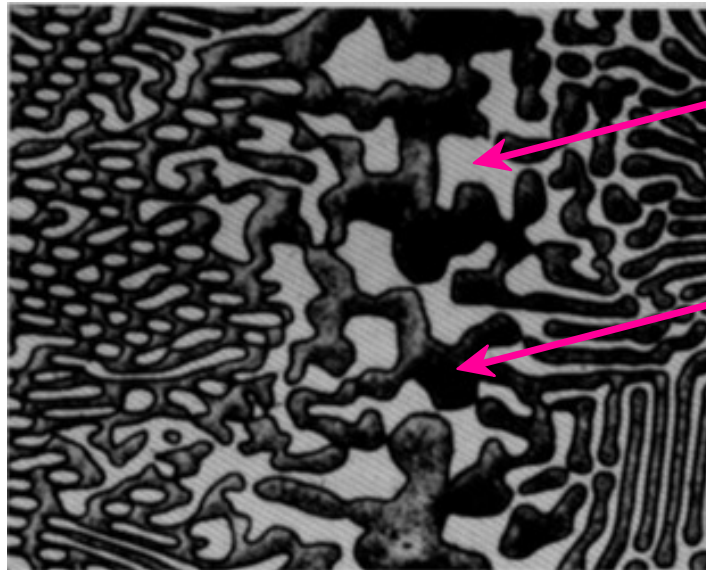
20°C: Εάν $C > 65 \text{ wt\% ζάχαρη}$ => σιρόπι + ζάχαρη



Συστατικά και φάσεις

- **Συστατικά:**
Τα στοιχεία, ή οι ενώσεις στοιχείων που εμπεριέχονται σε ένα κράμα (π.χ., Al και Cu)
- **Φάσεις:**
Οι φυσικά και χημικά διακριτές περιοχές υλικού που σχηματίζονται (π.χ., α και β).

κράμα
αλουμινίου-
χαλκού

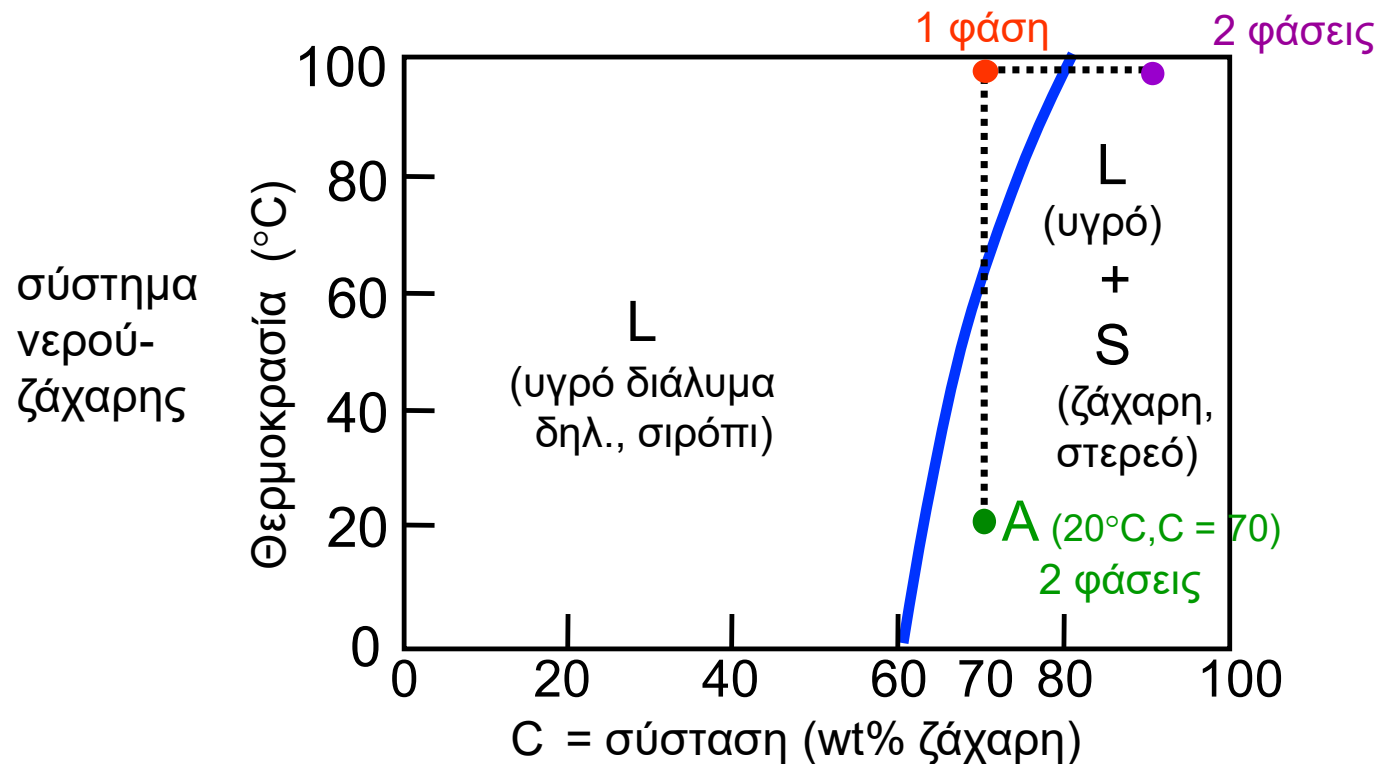


β (φωτεινόχρωμη
φάση)

α (σκούροχρωμη
φάση)

Επίδραση της θερμοκρασίας & σύστασης

- Η μεταβολή της T μπορεί να μεταβάλλει τον αριθμό των φάσεων: διαδρομή **A** έως **B**.
- Η μεταβολή της C μπορεί να μεταβάλλει τον αριθμό των φάσεων: διαδρομή **B** έως **D**.



Κριτήρια για στερεά διαλυτότητα

Απλό σύστημα (π.χ., διάλυμα Ni-Cu)

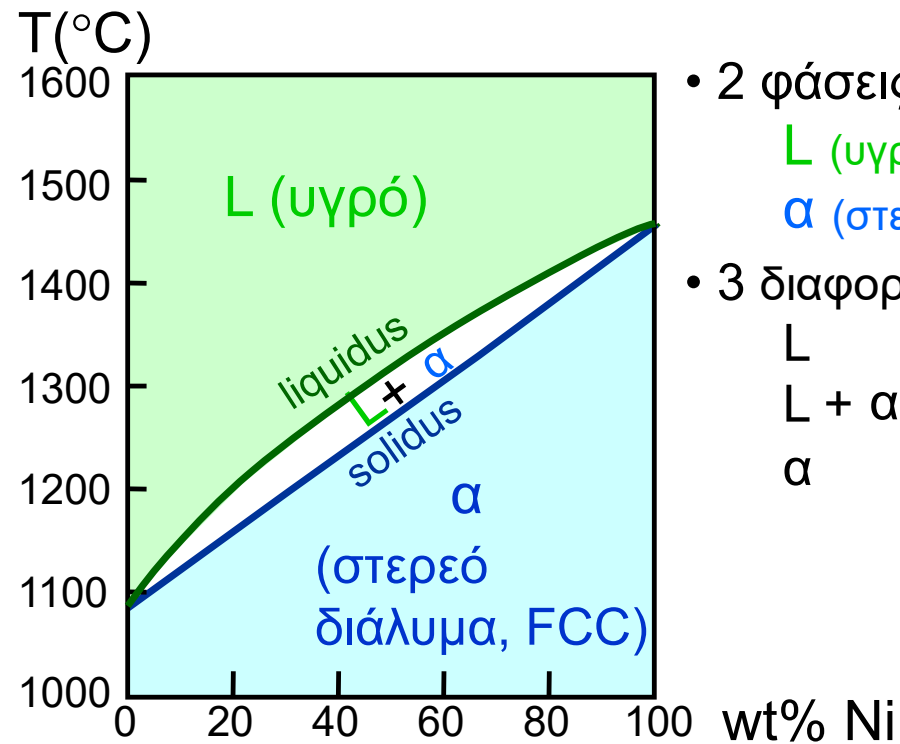
	Κρυσταλλική δομή	Ηλεκτρ- αρνητικότητα	r (nm)
Ni	FCC	1.9	0.1246
Cu	FCC	1.8	0.1278

- Αμφότερα τα συστατικά έχουν την ίδια κρυσταλλική δομή (FCC), παρόμοιες ηλεκτραρνητικότητες και ατομικές ακτίνες (κανόνες [W. Hume-Rothery](#)), αυτό υποδεικνύει υψηλή αμοιβαία διαλυτότητα.
- Τα Ni και Cu είναι πλήρως διαλυτά το ένα στο άλλο, σε όλες τις αναλογίες.

Διαγράμματα φάσεων

- Υποδεικνύουν τις φάσεις των υλικών ως συνάρτηση των T , C , και P .
- Για τους σκοπούς του παρόντος μαθήματος:
 - δυαδικά συστήματα: μόνο 2 συστατικά.
 - ανεξάρτητες μεταβλητές: T και C (σχεδόν πάντα χρησιμοποιείται $P = 1 \text{ atm}$).

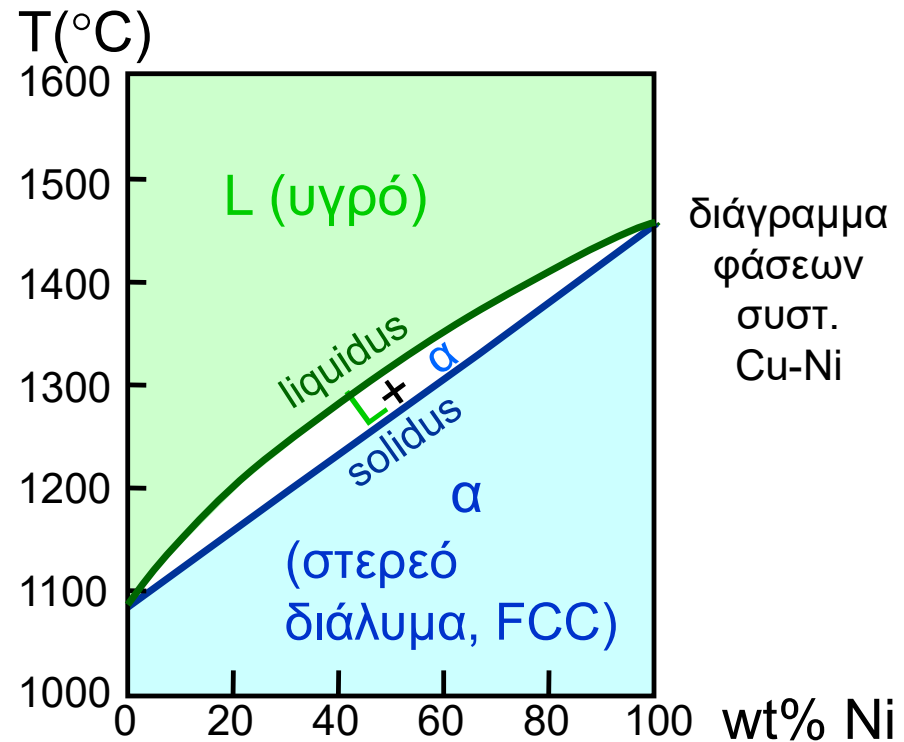
διάγραμμα
φάσεων
για το
σύστημα
Cu-Ni



- 2 φάσεις:
 - L (υγρό)
 - α (στερεό διάλυμα, FCC)
- 3 διαφορετικά πεδία φάσης:
 - L
 - $L + \alpha$
 - α

Ισόμορφα διάγραμμα φάσεων, δυαδικά συστήματα

- Διάγραμμα φάσεων συστήματος Cu-Ni
- Το σύστημα είναι:
 - **δυαδικό**
δηλ., 2 συστατικά:
Cu και Ni.
 - **ισόμορφο**
δηλ., πλήρης διαλυτότητα
του ενός συστατικού
στο άλλο· το πεδίο
φάσης α εκτείνεται
από 0 έως 100 wt% Ni



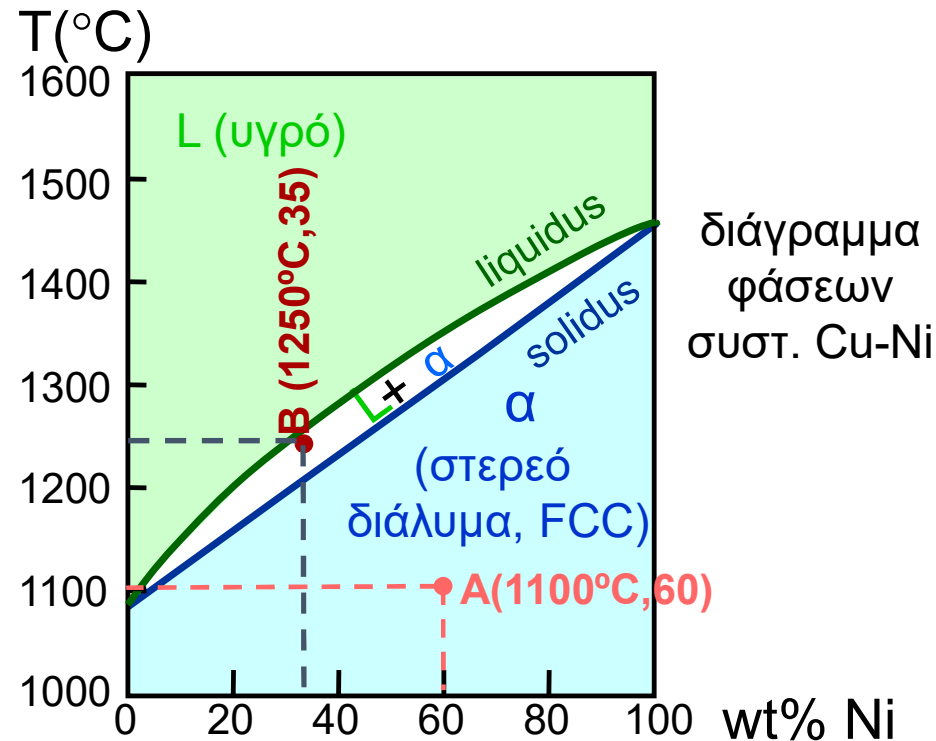
Διαγράμματα φάσεων: Προσδιορισμός υπαρχουσών φάσεων

- **Κανόνας 1:** Εάν γνωρίζουμε τις T και C_0 , τότε γνωρίζουμε επίσης -- ποιες φάσεις υπάρχουν στο κράμα.

- Παραδείγματα:

A(1100°C, 60 wt% Ni):
1 φάση: α

B(1250°C, 35 wt% Ni):
2 φάσεις: L + α



Διαγράμματα φάσεων: Προσδιορισμός των συστάσεων των φάσεων

- **Κανόνας 2:** Εάν γνωρίζουμε τις T και C_0 , μπορούμε να προσδιορίσουμε -- τη σύσταση κάθε φάσης.

- Παραδείγματα:

Δίνεται $C_0 = 35 \text{ wt\% Ni}$

Σε $T_A = 1320^\circ\text{C}$:

παρούσα μόνο η υγρή (L) φάση

$C_L = C_0$ ($= 35 \text{ wt\% Ni}$)

Σε $T_D = 1190^\circ\text{C}$:

παρούσα μόνο η στερεά (α) φάση

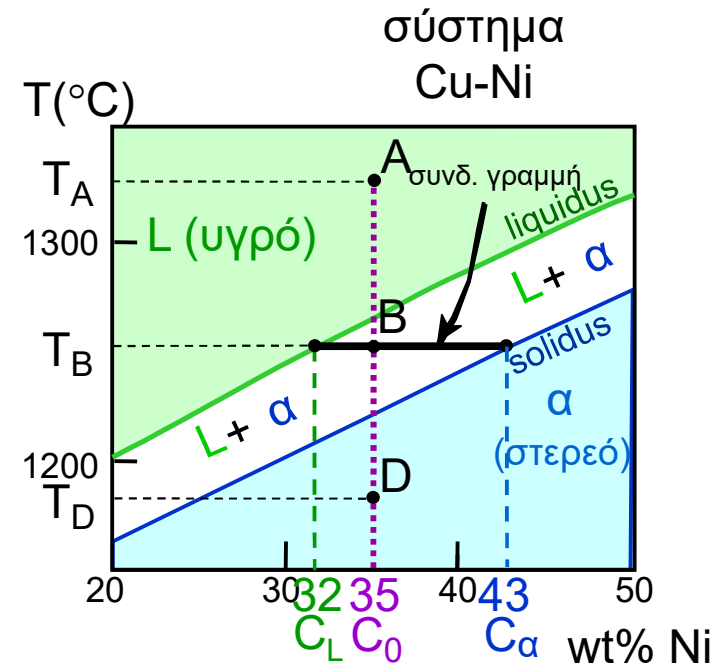
$C_\alpha = C_0$ ($= 35 \text{ wt\% Ni}$)

Σε $T_B = 1250^\circ\text{C}$:

Παρούσες αμφότερες οι φάσεις α και L

$C_L = C_{\text{liquidus}}$ ($= 32 \text{ wt\% Ni}$)

$C_\alpha = C_{\text{solidus}}$ ($= 43 \text{ wt\% Ni}$)



Διαγράμματα φάσεων: Προσδιορισμός των κλασμάτων βάρους των φάσεων

- **Κανόνας 3:** Εάν γνωρίζουμε τις T και C_0 , μπορούμε να προσδιορίσουμε -- το κλάσμα βάρους κάθε φάσης.
- Παραδείγματα:

Δίνεται $C_0 = 35 \text{ wt\% Ni}$

Σε T_A : παρούσα μόνο η υγρή (L) φάση

$$W_L = 1.00, W_\alpha = 0$$

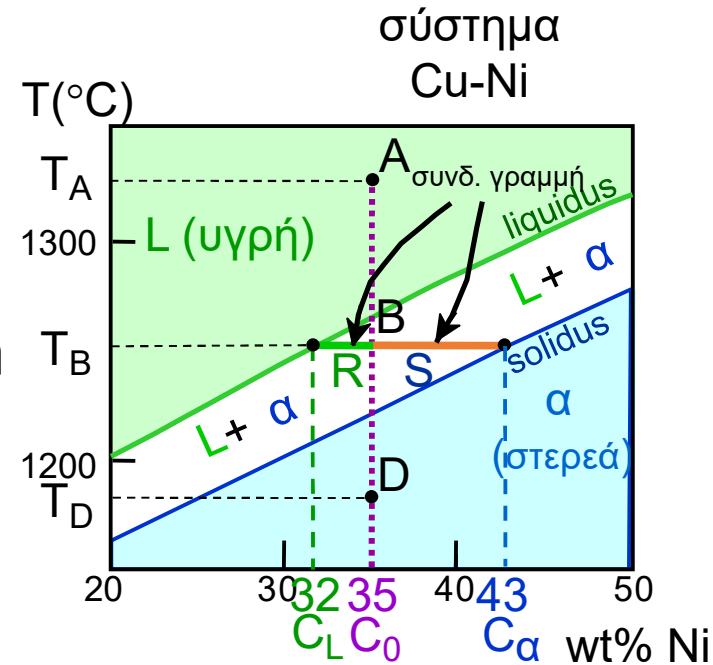
Σε T_D : παρούσα μόνο η στερεά (α) φάση

$$W_L = 0, W_\alpha = 1.00$$

Σε T_B : παρούσες αμφότερες οι φάσεις α και L

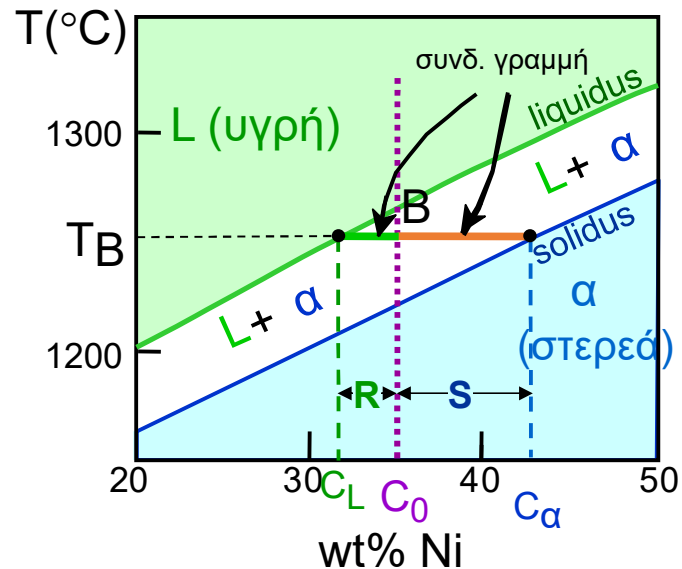
$$W_L = \frac{S}{R+S} = \frac{43-35}{43-32} = 0.73$$

$$W_\alpha = \frac{R}{R+S} = 0.27$$

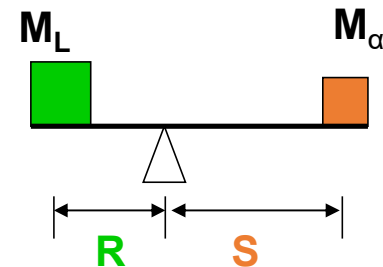


Ο κανόνας του μοχλού

- Συνδετική γραμμή – ενώνει τις φάσεις που είναι παρούσες στην κατάσταση ισορροπίας



Είναι το κλάσμα βάρους κάθε φάσης;
Σκεφτείτε τη συνδετική γραμμή ως μοχλό



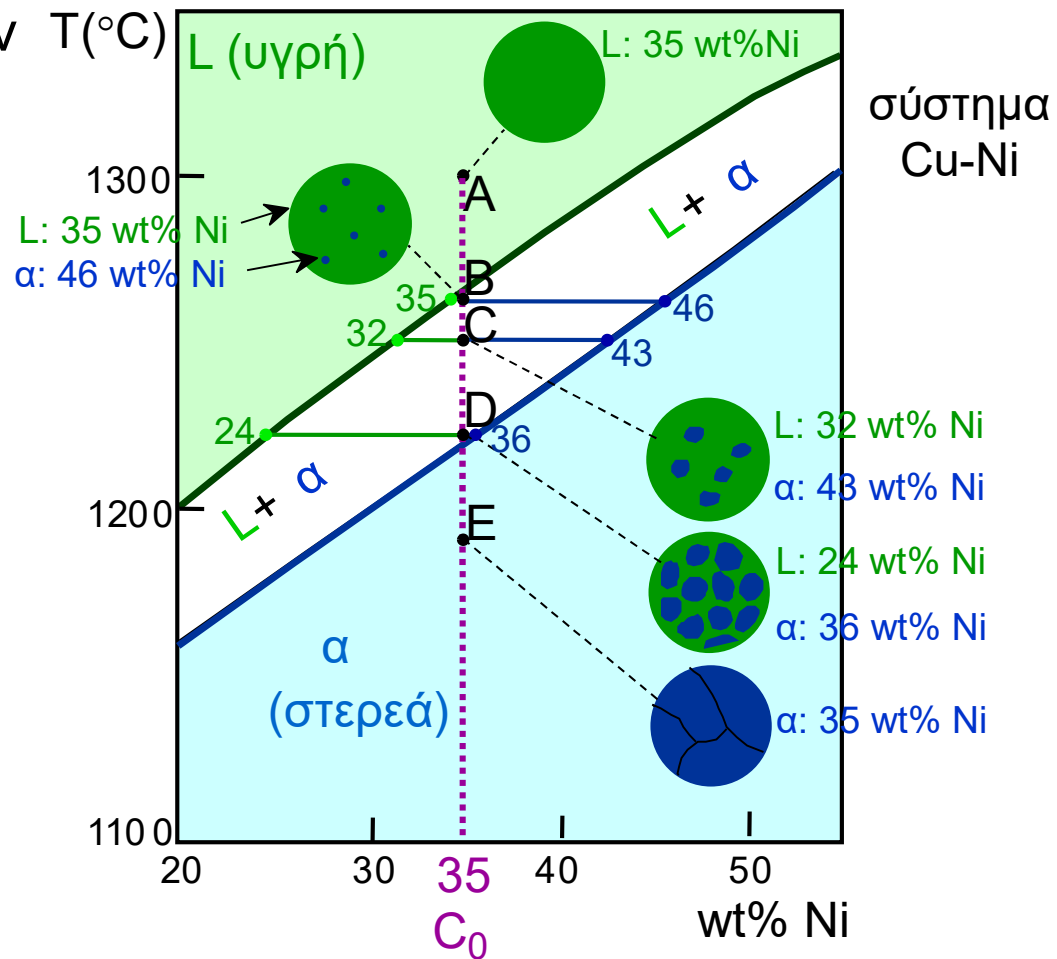
$$M_{\alpha} \times S = M_L \times R$$

$$W_L = \frac{M_L}{M_L + M_{\alpha}} = \frac{S}{R + S} = \frac{C_{\alpha} - C_0}{C_{\alpha} - C_L}$$

$$W_{\alpha} = \frac{R}{R + S} = \frac{C_0 - C_L}{C_{\alpha} - C_L}$$

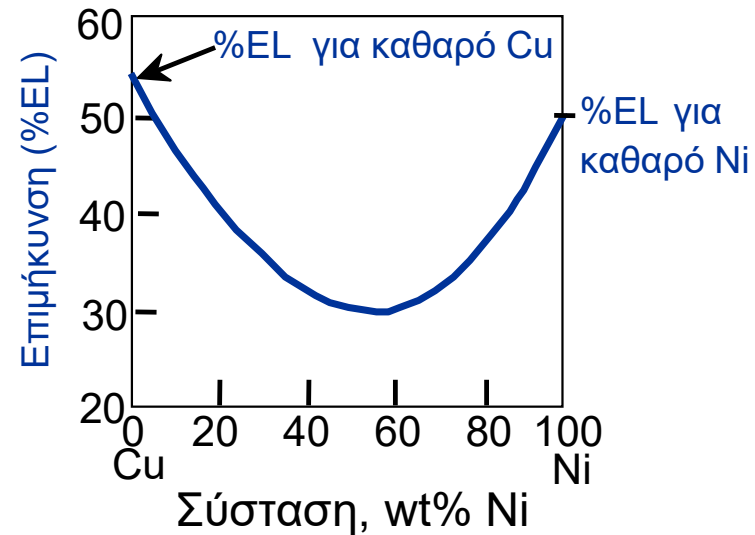
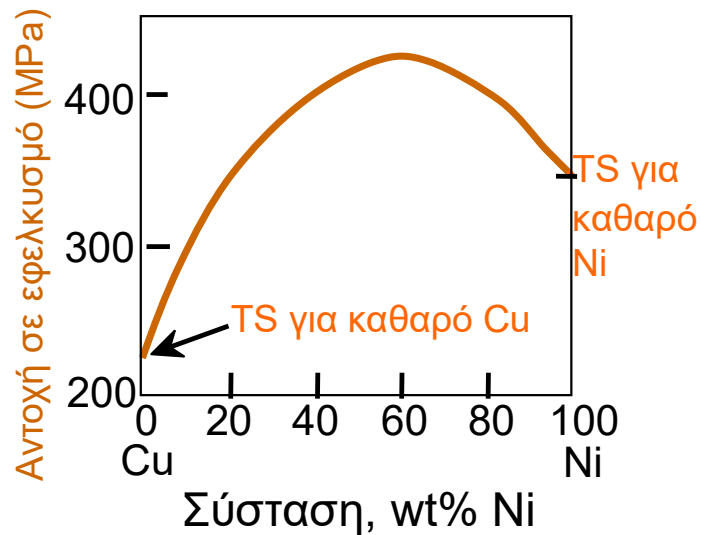
Παράδειγμα: Ψύξη κράματος Cu-Ni

- Διάγραμμα φάσεων συστήματος Cu-Ni.
- Διερεύνηση των μικροδομικών μεταβολών που λαμβάνουν χώρα κατά την ψύξη του κράματος με $C_0 = 35 \text{ wt\% Ni}$



Μηχανικές ιδιότητες: Σύστημα Cu-Ni

- Ισχυροποίηση του στερεού διαλύματος με επίδραση σε:
 - αντοχή σε εφελκυσμό (TS) -- ολκιμότητα (%EL)



Δυαδικά-ευτηκτικά συστήματα

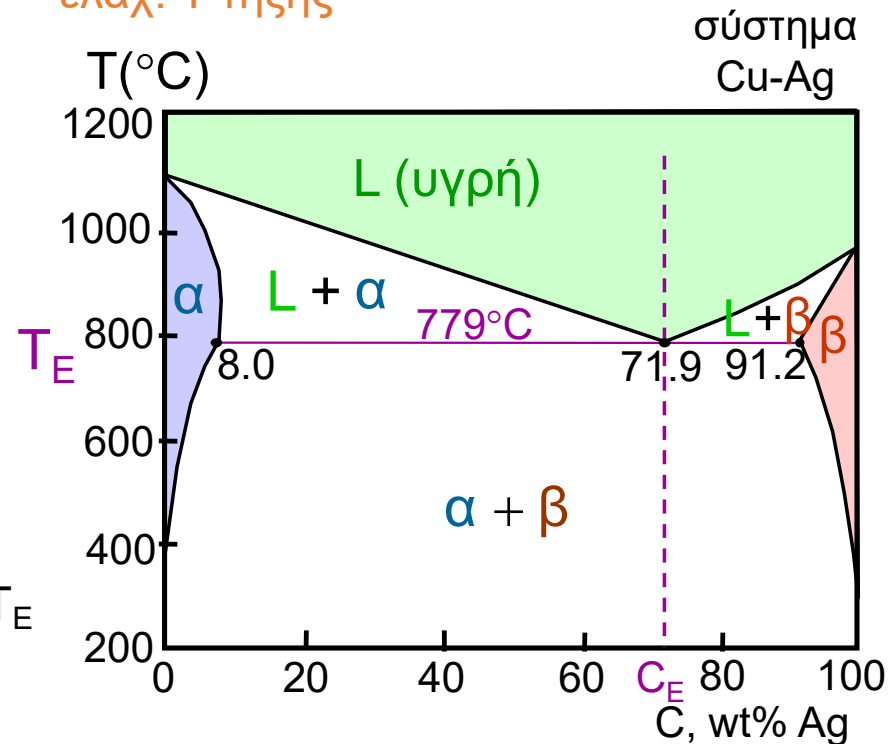
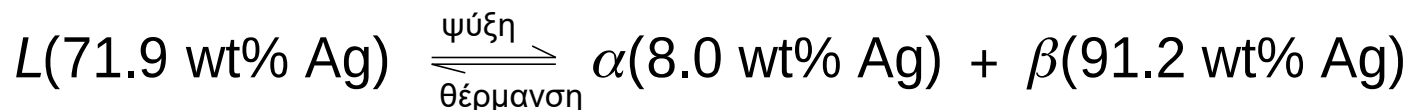
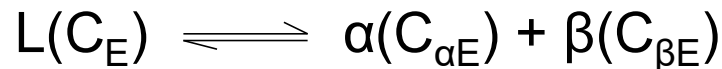
2 συστατικά

ειδική σύσταση με
ελάχ. T τήξης

Π.χ.: Σύστημα Cu-Ag

- 3 διακριτές περιοχές φάσεων (L, α, β)
- Περιορισμένη διαλυτότητα:
 - α: κυρίως Cu
 - β: κυρίως Ag
- T_E : δεν υφίσταται υγρή φάση κάτω από την T_E
- C_E : Σύσταση σε θερμοκρασία T_E

• Ευτηκτική αντίδραση



Παράδειγμα 1: Ευτηκτικό σύστημα Pb-Sn

- Για το κράμα 40 wt% Sn – 60 wt% Pb στους 150 °C, να προσδιοριστούν:
 - οι παρούσες φάσεις

Απάντηση: $\alpha + \beta$

-- Οι συστάσεις των φάσεων

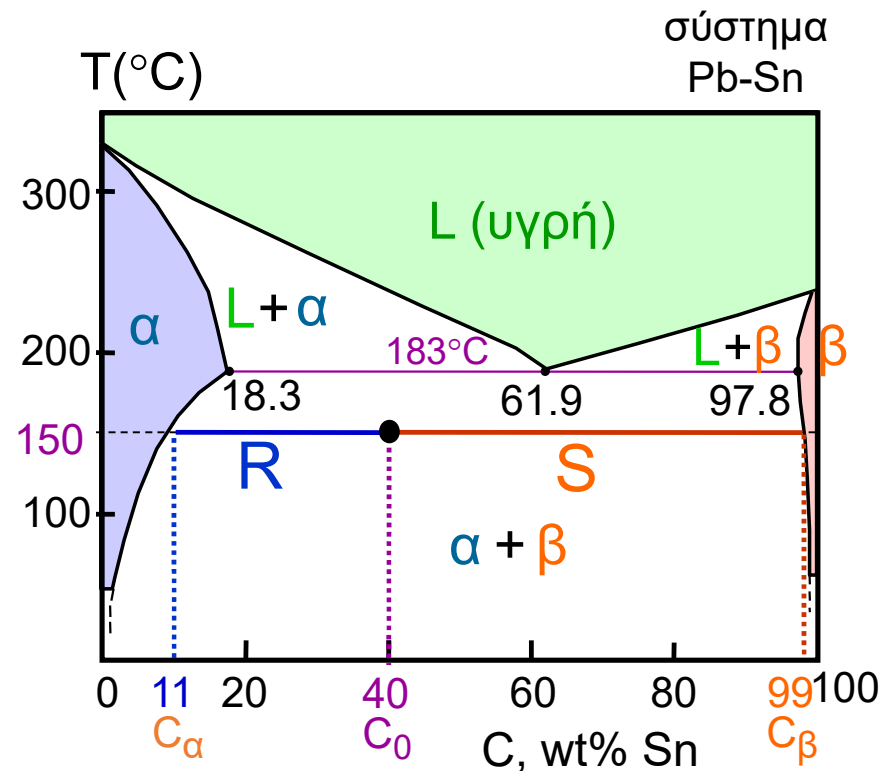
Απάντηση: $C_\alpha = 11 \text{ wt\% Sn}$
 $C_\beta = 99 \text{ wt\% Sn}$

-- Η σχετική ποσότητα
κάθε φάσης

Απάντηση:

$$W_\alpha = \frac{S}{R+S} = \frac{C_\beta - C_0}{C_\beta - C_\alpha}$$
$$= \frac{99 - 40}{99 - 11} = \frac{59}{88} = 0.67$$

$$W_\beta = \frac{R}{R+S} = \frac{C_0 - C_\alpha}{C_\beta - C_\alpha}$$
$$= \frac{40 - 11}{99 - 11} = \frac{29}{88} = 0.33$$



Παράδειγμα 2: Ευτηκτικό σύστημα Pb-Sn

- Για το κράμα 40 wt% Sn – 60 wt% Pb στους 220 °C, να προσδιοριστούν:

-- Οι παρούσες φάσεις

Απάντηση: $\alpha + L$

-- Οι συστάσεις των φάσεων

Απάντηση: $C_\alpha = 17 \text{ wt\% Sn}$

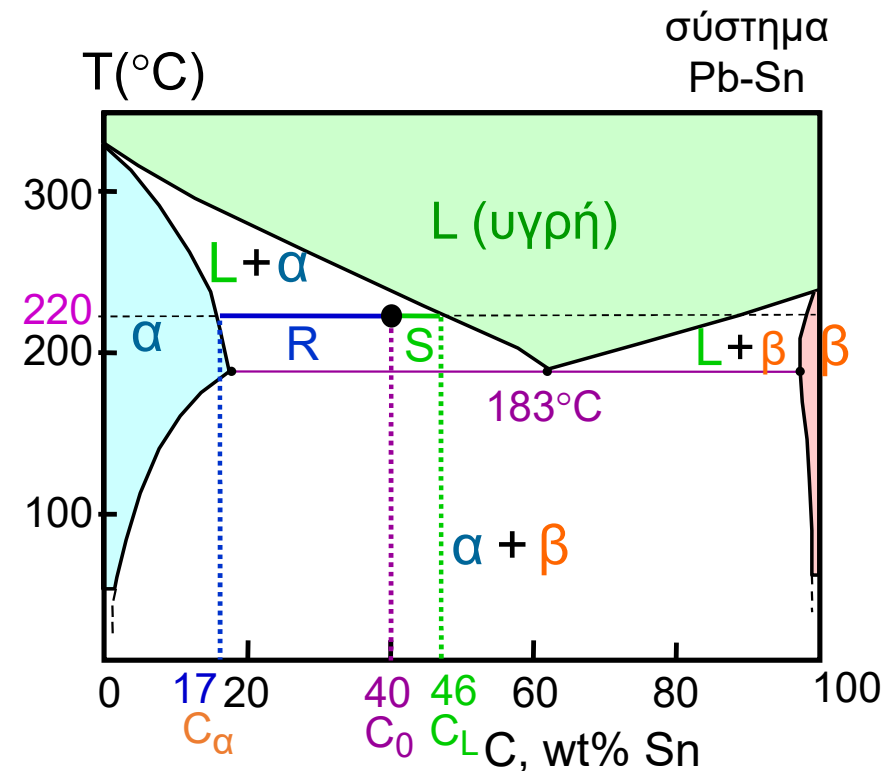
$C_L = 46 \text{ wt\% Sn}$

-- Η σχετική ποσότητα
κάθε φάσης

Απάντηση:

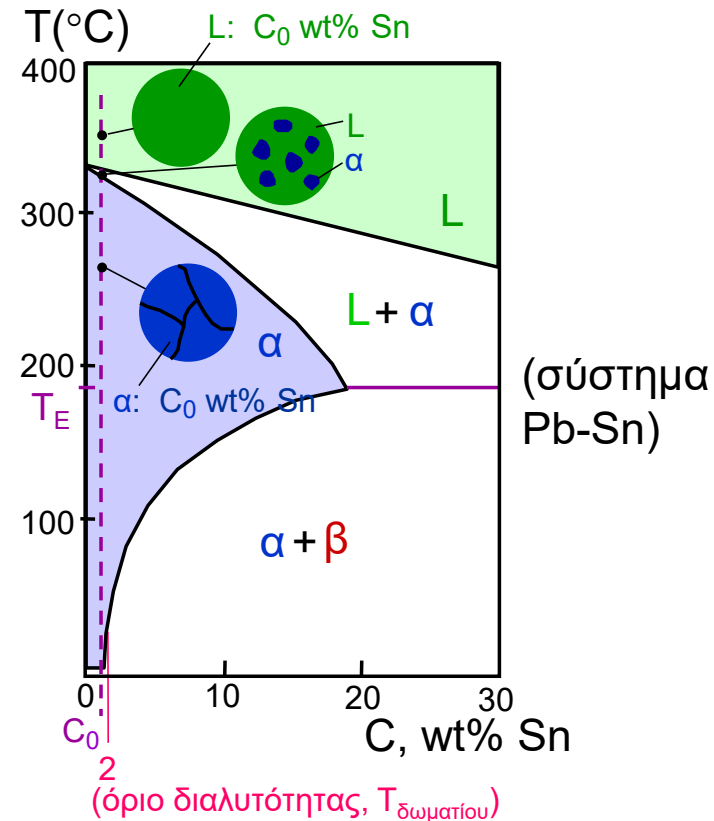
$$W_\alpha = \frac{C_L - C_0}{C_L - C_\alpha} = \frac{46 - 40}{46 - 17}$$
$$= \frac{6}{29} = 0.21$$

$$W_L = \frac{C_0 - C_\alpha}{C_L - C_\alpha} = \frac{23}{29} = 0.79$$



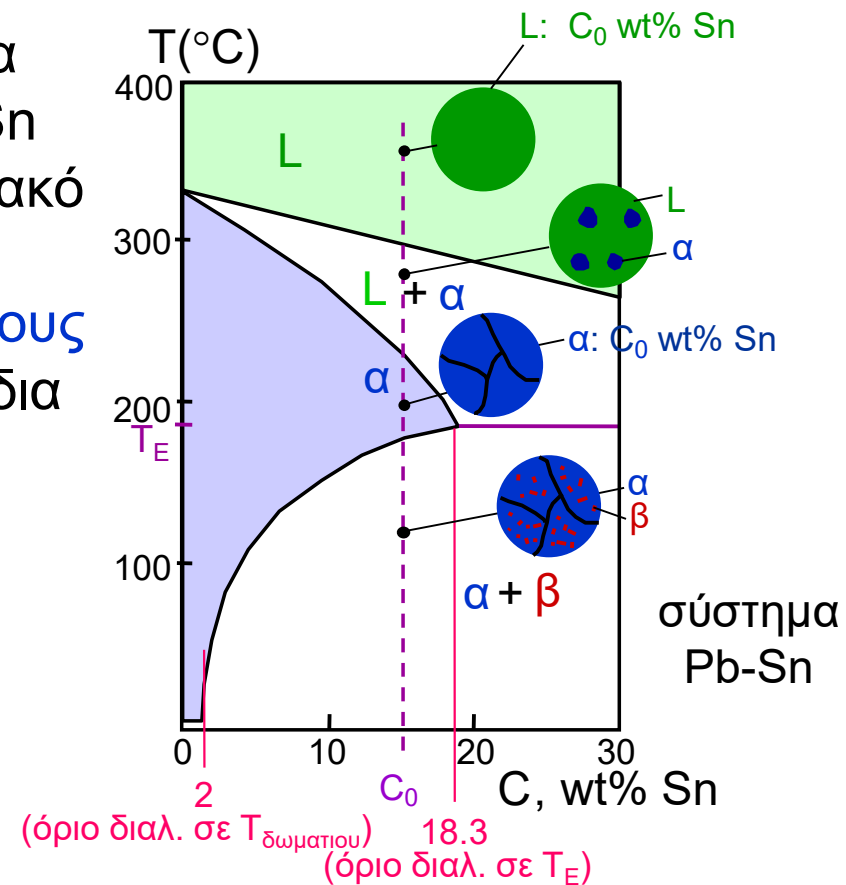
Ανάπτυξη μικροδομών σε ευτηκτικά συστήματα (1)

- Για κράματα Pb-Sn στα οποία $C_0 < 2 \text{ wt\% Sn}$
- Αποτέλεσμα σε θερμοκρασία δωματίου
 - πολυκρυσταλλικό, με τους κόκκους της φάσης α να έχουν σύσταση C_0



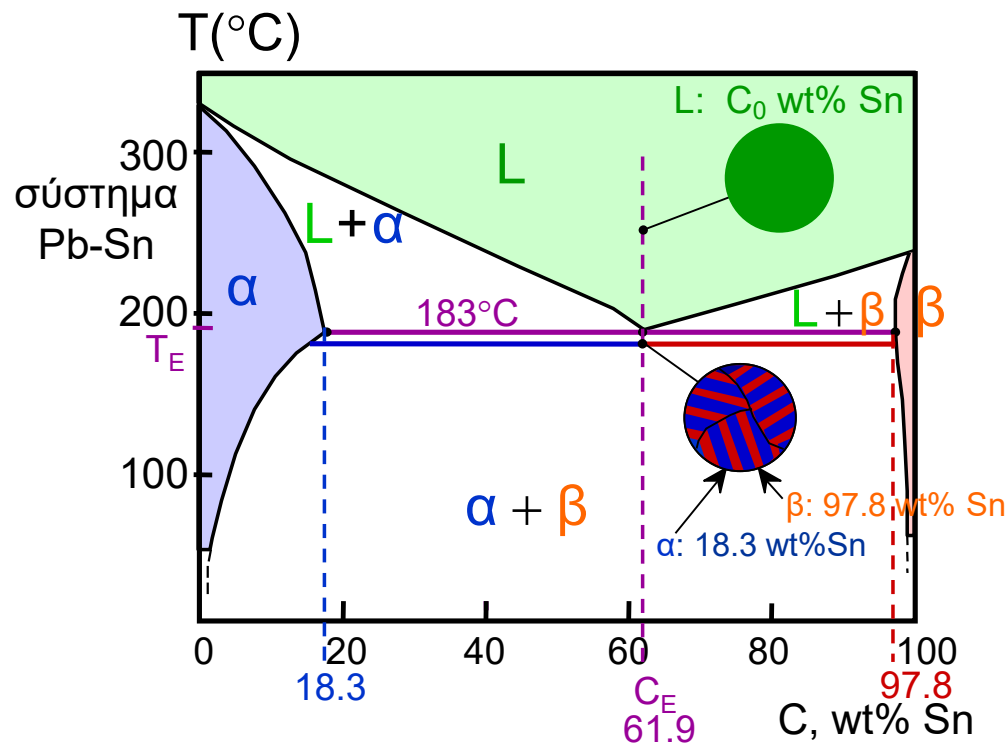
Ανάπτυξη μικροδομών σε ευτηκτικά συστήματα (2)

- Για κράματα Pb-Sn στα οποία $2 \text{ wt\% Sn} < C_0 < 18.3 \text{ wt\% Sn}$
- Αποτέλεσμα στο θερμοκρασιακό εύρος $\alpha + \beta$
 - πολυκρυσταλλικό, με **κόκκους** α -φάσης και μικρά σωματίδια β -φάσης



Ανάπτυξη μικροδομών σε ευτηκτικά συστήματα (3)

- Για κράματα Pb-Sn με σύσταση $C_0 = C_E$
- Αποτέλεσμα: ανάπτυξη ευτηκτικής μικροδομής (λαμελοειδής δομή)
-- εναλλάξ στρώματα (lamellae) των φάσεων α και β .

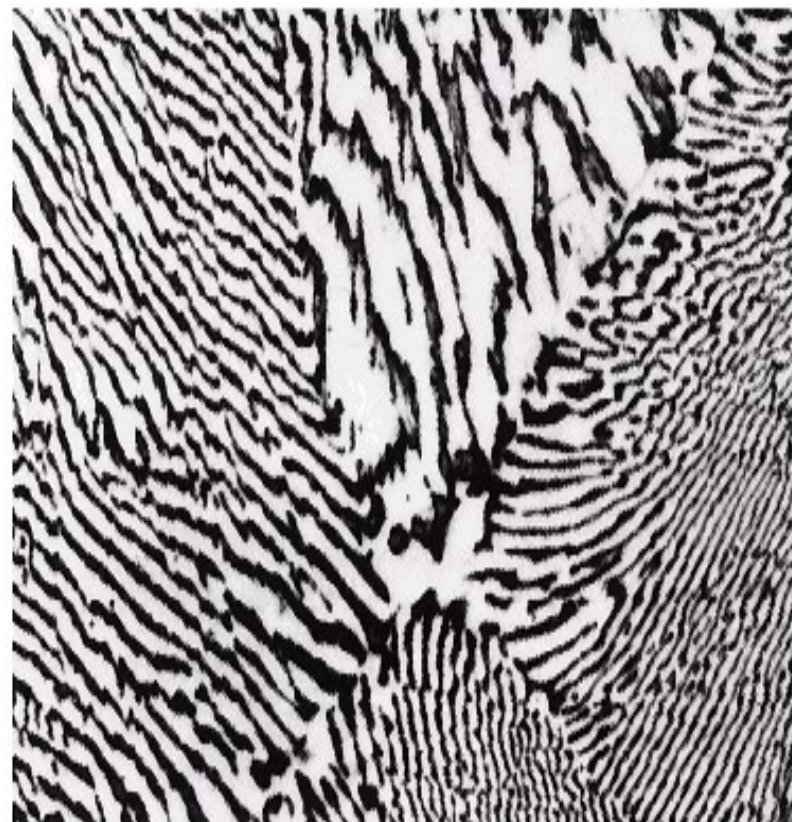
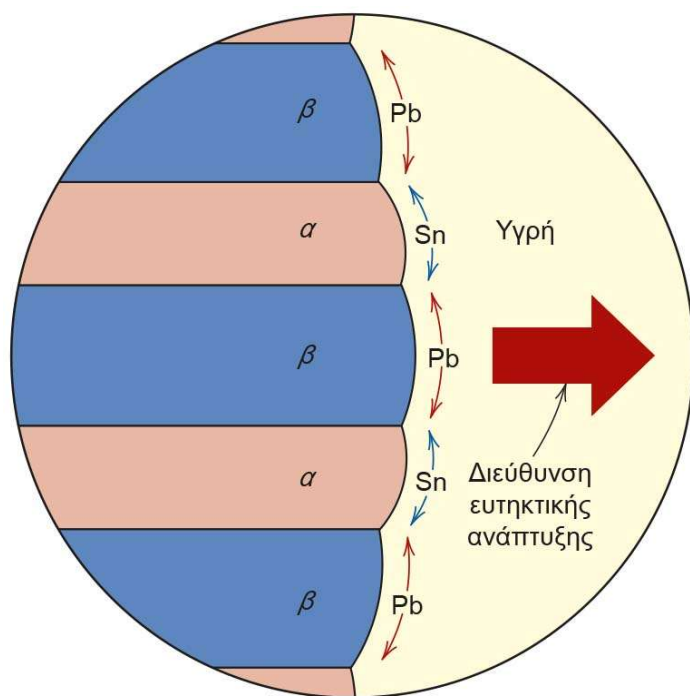


Μικροφωτογραφία
ευτηκτικής μικροδομής
σε κράμα Pb-Sn



$160 \mu\text{m}$

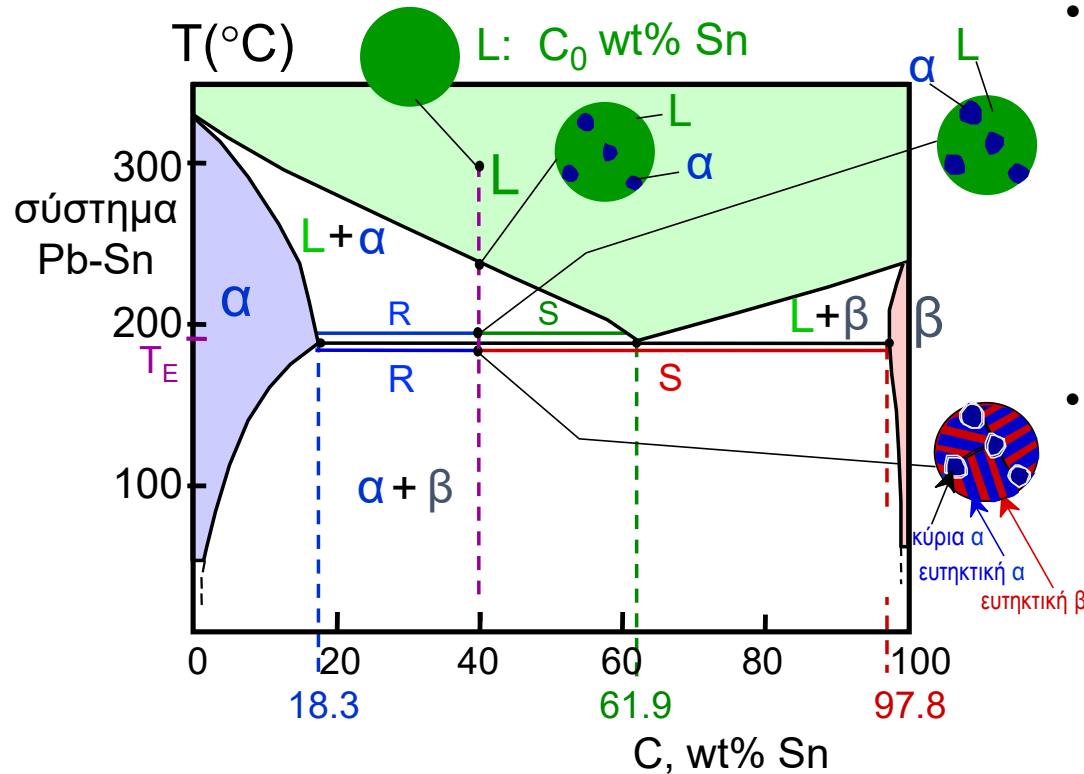
Φυλλοειδής* ευτηκτική δομή



* Λαμελοειδής

Ανάπτυξη μικροδομών σε ευτηκτικά συστήματα (4)

- Για κράματα Pb-Sn στα οποία $18.3 \text{ wt\% Sn} < C_0 < 61.9 \text{ wt\% Sn}$
- Αποτέλεσμα: σωματίδια φάσης α και ένα ευτηκτικό μικροσυστατικό



- Οριακά πάνω από την T_E :

$C_\alpha = 18.3 \text{ wt\% Sn}$

$C_1 = 61.9 \text{ wt\% Sn}$

$$W_{\alpha} = \frac{S}{R + S} = 0.50$$

$$W_L = (1 - W_\alpha) = 0.50$$

- Οριακά κάτω από την T_E :

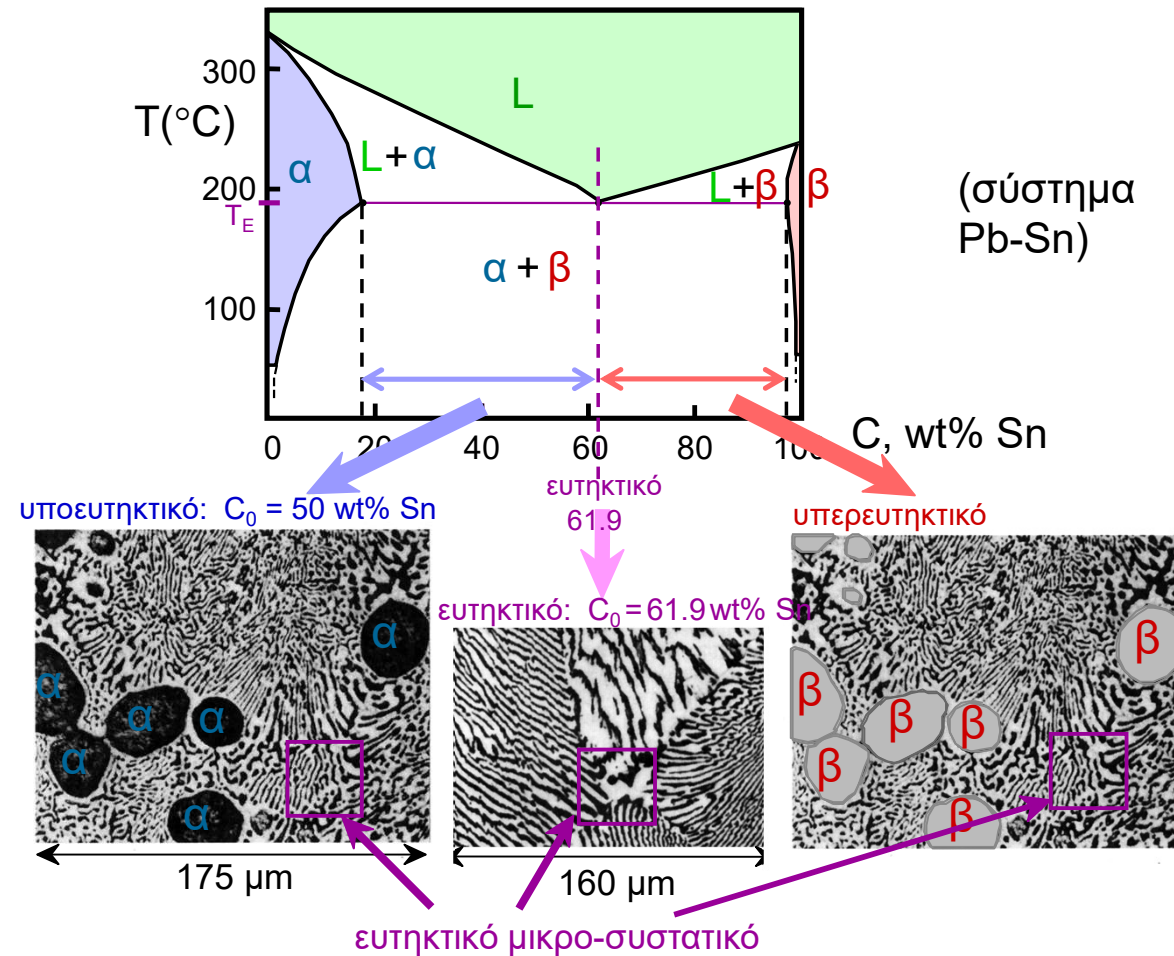
$C_\alpha = 18.3 \text{ wt\% Sn}$

$C_\beta = 97.8 \text{ wt\% Sn}$

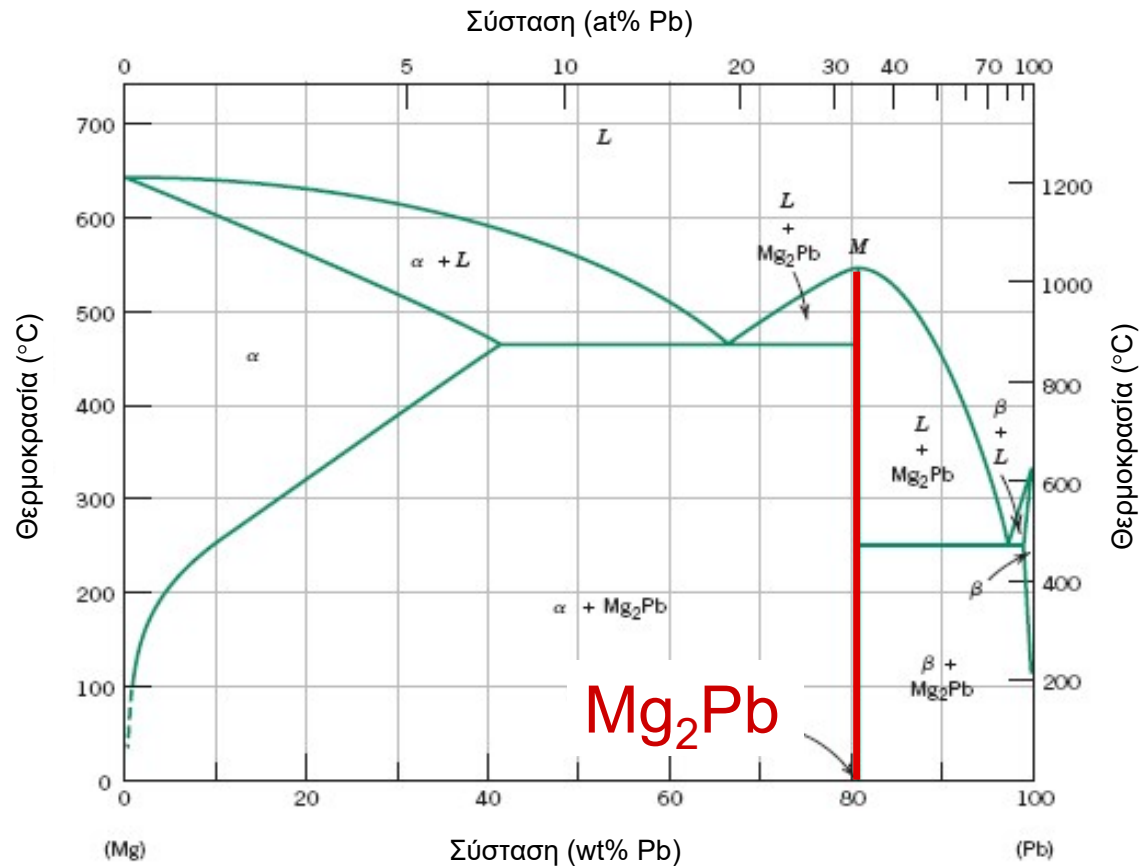
$$W_{\alpha} = \frac{S}{R + S} = 0.73$$

$$w_{\beta} = 0.27$$

Υποευτηκτικά & υπερευτηκτικά συστήματα



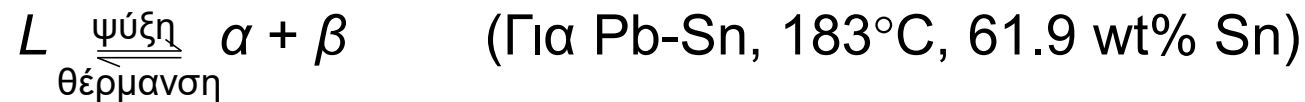
Διαμεταλλικές ενώσεις



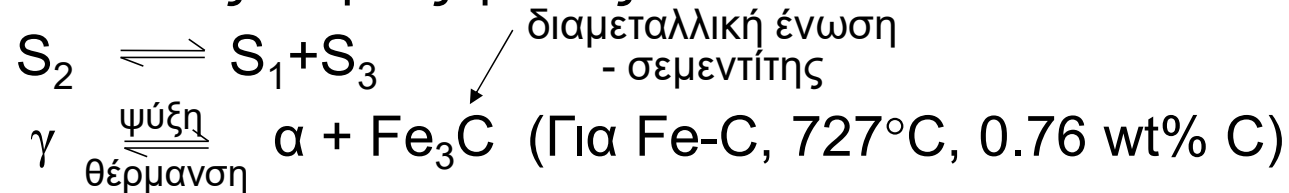
Σημείωση: Η διαμεταλλική ένωση υφίσταται ως γραμμή (και όχι επιφάνεια) στο διάγραμμα, λόγω στοιχειομετρίας (δηλ. η σύσταση της ένωσης είναι σταθερή).

Ευτηκτικά, ευτηκτοειδή & περιτηκτικά συστήματα

- **Ευτηκτικό** – μετασχηματισμός υγρού σε δύο στερεές φάσεις



- **Ευτηκτοειδές** – μετασχηματισμός μιας στερεάς φάσης σε δύο άλλες στερεές φάσεις



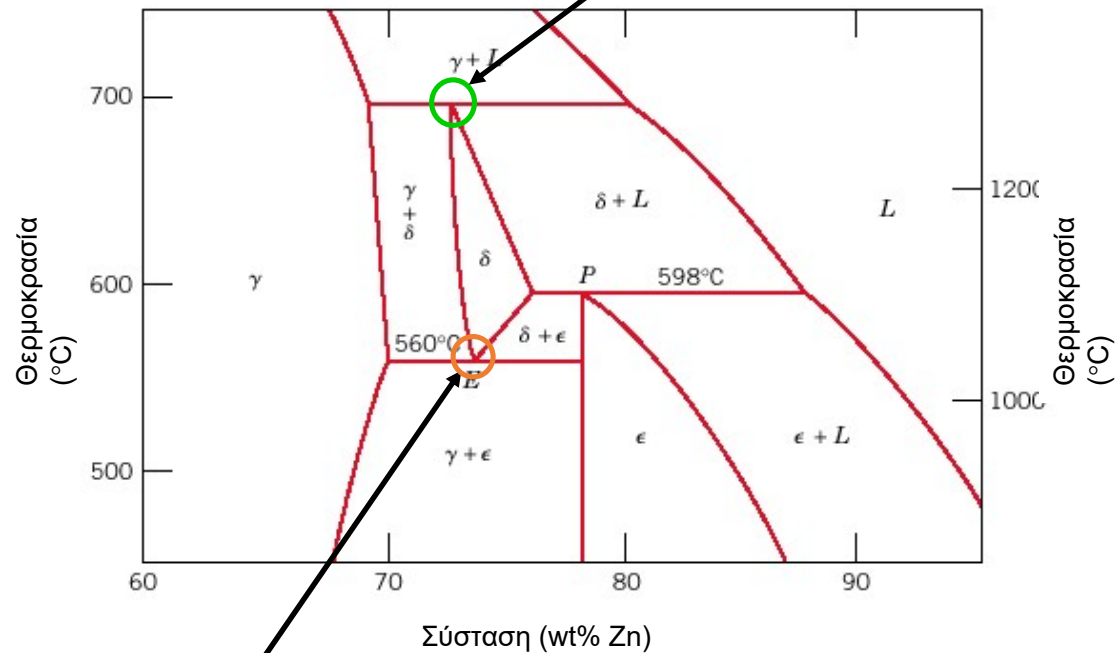
- **Περιτηκτικό** - μετασχηματισμός υγρού και μιας στερεάς φάσης σε μία δεύτερη στερεά φάση



Ευτηκτοειδής & περιτηκτικός μετασχηματισμός

Διάγραμμα φάσεων
συστήματος Cu-Zn

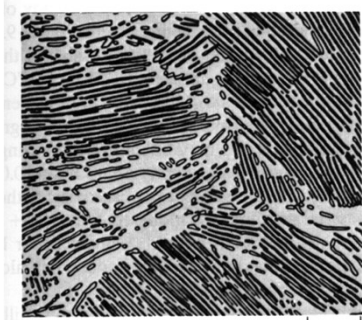
Περιτηκτικός μετασχηματισμός $\gamma + L \rightleftharpoons \delta$



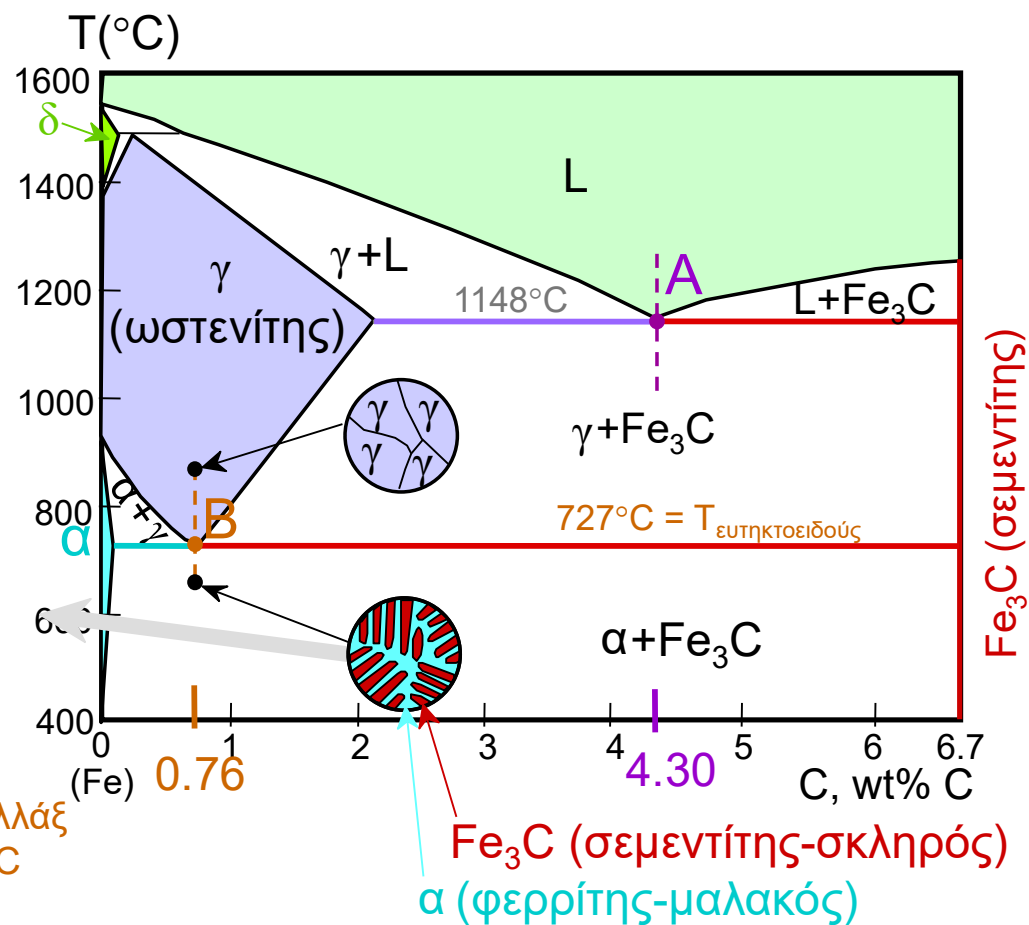
Ευτηκτοειδής μετασχηματισμός $\delta \rightleftharpoons \gamma + \epsilon$

Διάγραμμα φάσεων σιδήρου-άνθρακα (Fe-C)

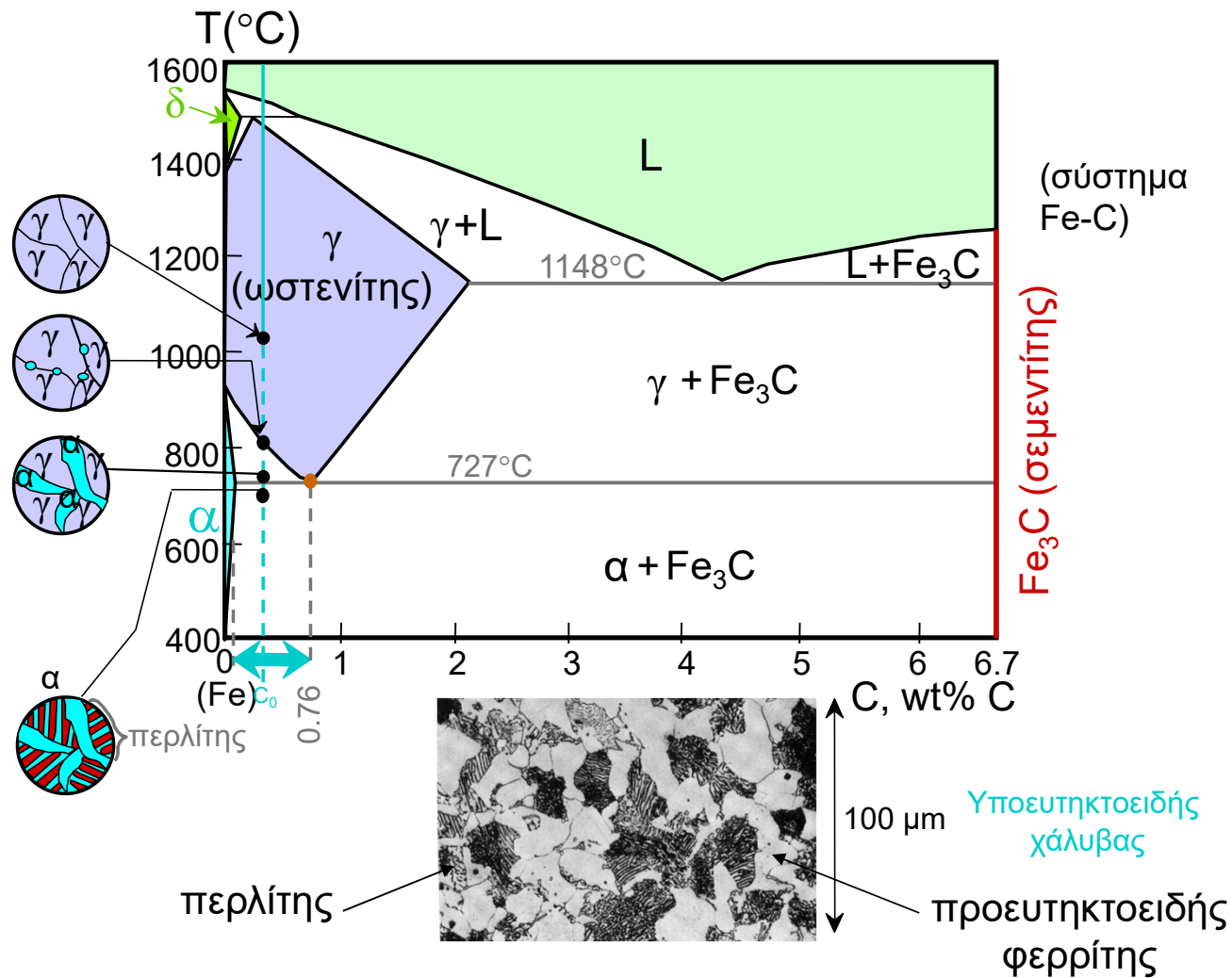
- 2 σημαντικά σημεία
 - **ευτηκτικό (A):**
 $L \Rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$
 - **ευτηκτοειδές (B):**
 $\gamma \Rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$



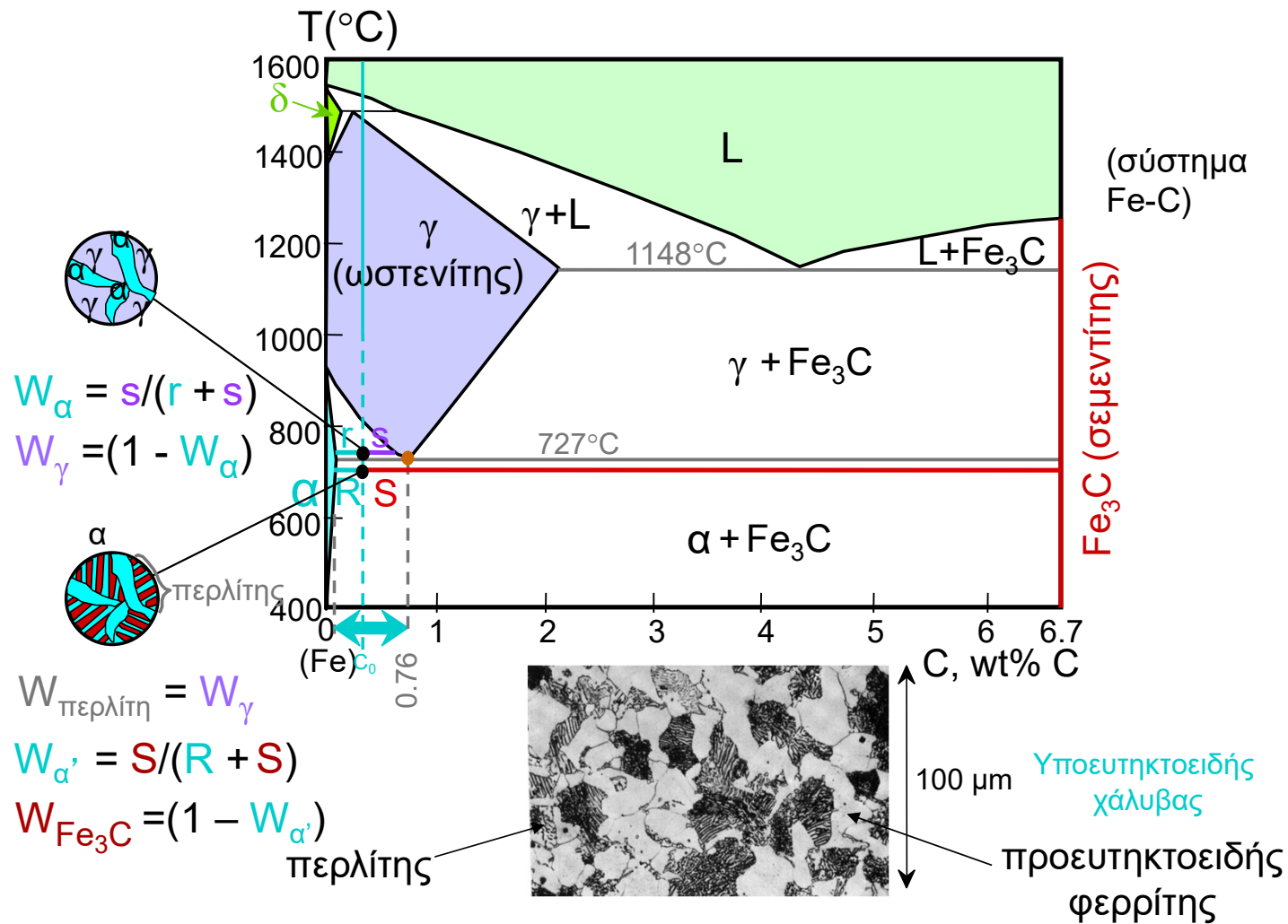
Αποτέλεσμα: Περλίτης = εναλλάξ στρώματα φάσεων α και Fe_3C



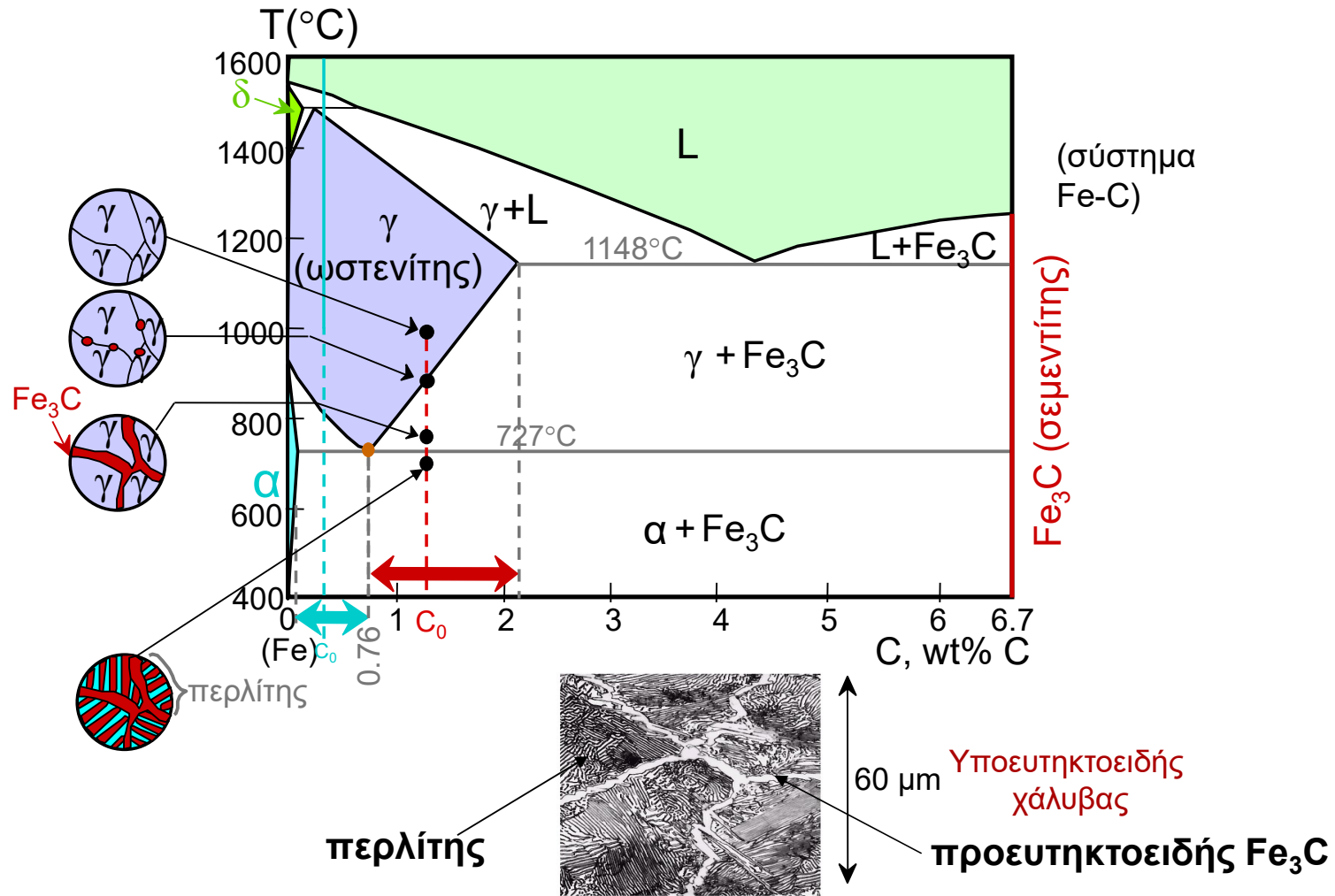
Υποευτηκτοειδής χάλυβας



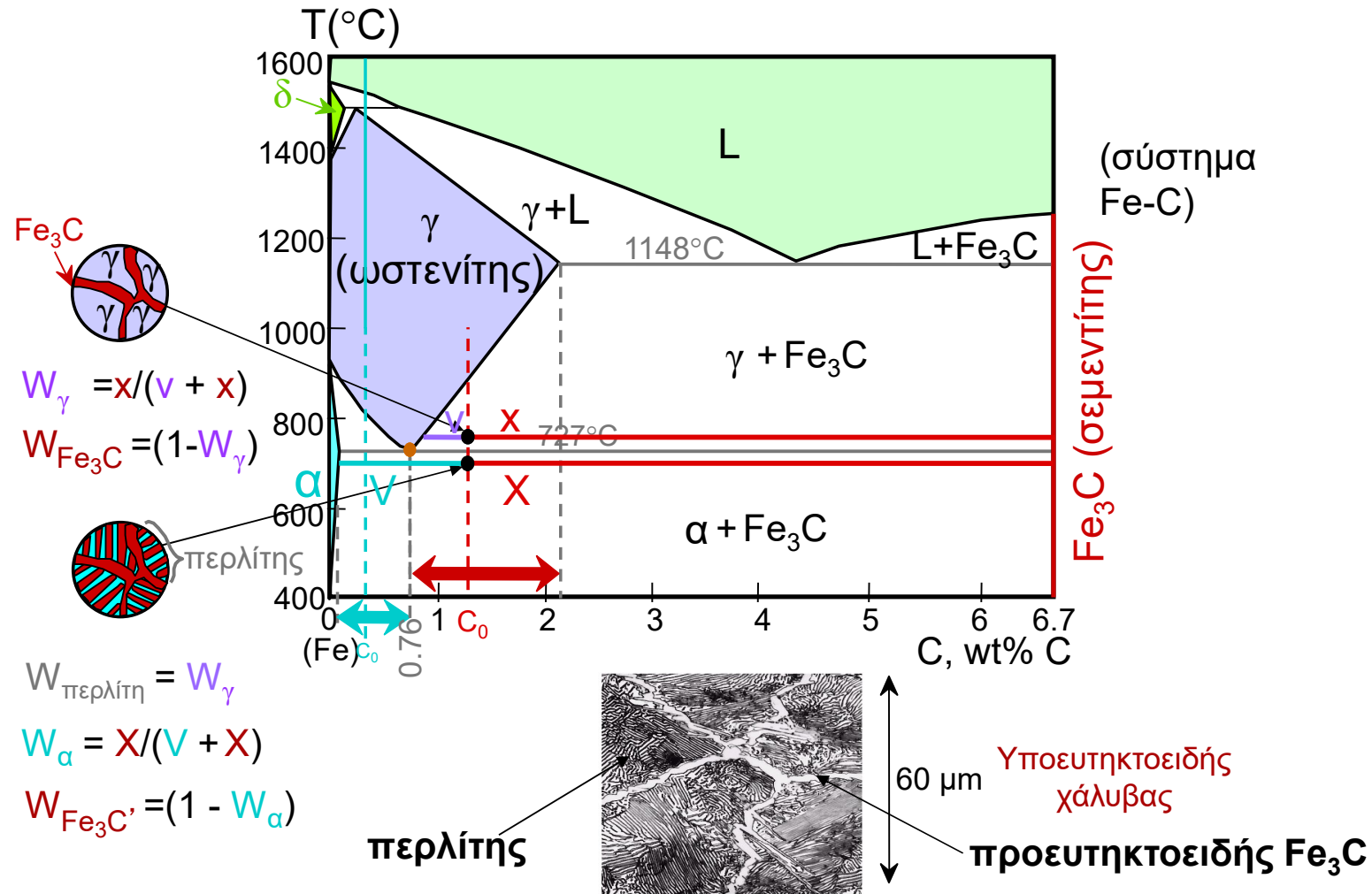
Υποευτηκτοειδής χάλυβας



Υπερευτηκτοειδής χάλυβας



Υπερευνηκτοειδής χάλυβας



Παράδειγμα

Για έναν χάλυβα με σύσταση 99.6 wt% Fe – 0.40 wt% C, σε θερμοκρασία οριακά κάτω από την ευτηκτοειδή, να προσδιοριστούν τα ακόλουθα:

- α) Οι συστάσεις του Fe_3C και του α -φερρίτη.
- β) Η ποσότητα (σε γραμμάρια) του σεμεντίτη που σχηματίζεται σε 100 g χάλυβα.
- γ) Οι ποσότητες περλίτη και προευτηκτοειδή φερρίτης (α) στα 100 g χάλυβα.

Λύση

α) Βάσει της συνδετικής γραμμής RS ακριβώς κάτω από το ευτηκτοειδές σημείο

$$C_{\alpha} = 0.022 \text{ wt\% C}$$

$$C_{\text{Fe}_3\text{C}} = 6.70 \text{ wt\% C}$$

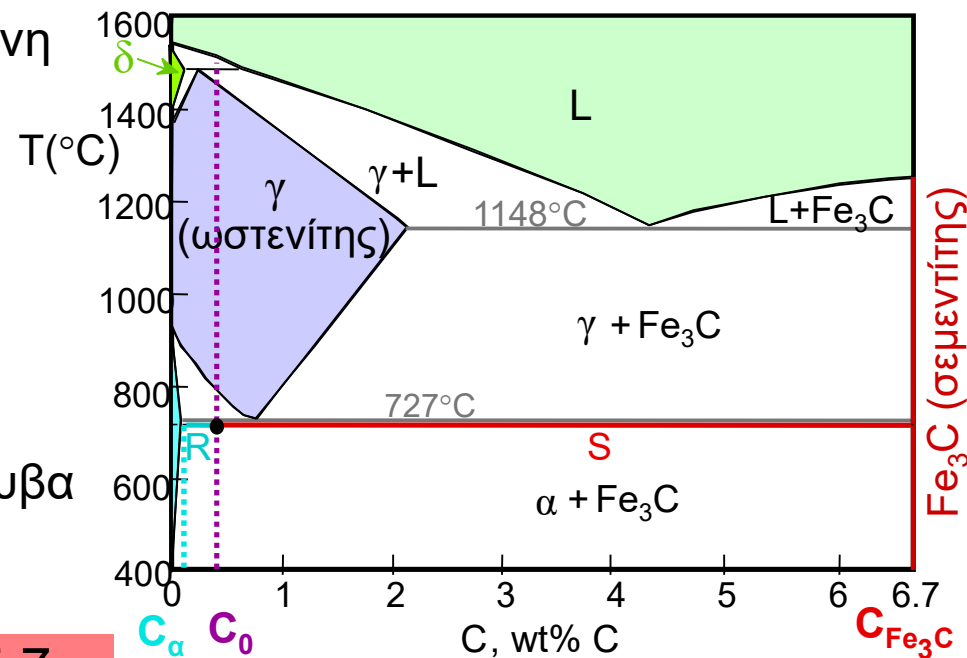
β) Εφαρμόζοντας τον κανόνα του μοχλού με την απεικονιζόμενη συνδ. γραμμή

$$\begin{aligned} W_{\text{Fe}_3\text{C}} &= \frac{R}{R+S} = \frac{C_0 - C_{\alpha}}{C_{\text{Fe}_3\text{C}} - C_{\alpha}} \\ &= \frac{0.40 - 0.022}{6.70 - 0.022} = 0.057 \end{aligned}$$

Ποσότητα Fe_3C στα 100 g χάλυβα

$$= (100 \text{ g}) W_{\text{Fe}_3\text{C}}$$

$$= (100 \text{ g})(0.057) = 5.7 \text{ g}$$



Λύση (συνέχεια)

γ) Βάσει της συνδετικής γραμμής VX ακριβώς πάνω από το ευτηκτοειδές σημείο και με δεδομένο ότι

$$C_0 = 0.40 \text{ wt\% C}$$

$$C_\alpha = 0.022 \text{ wt\% C}$$

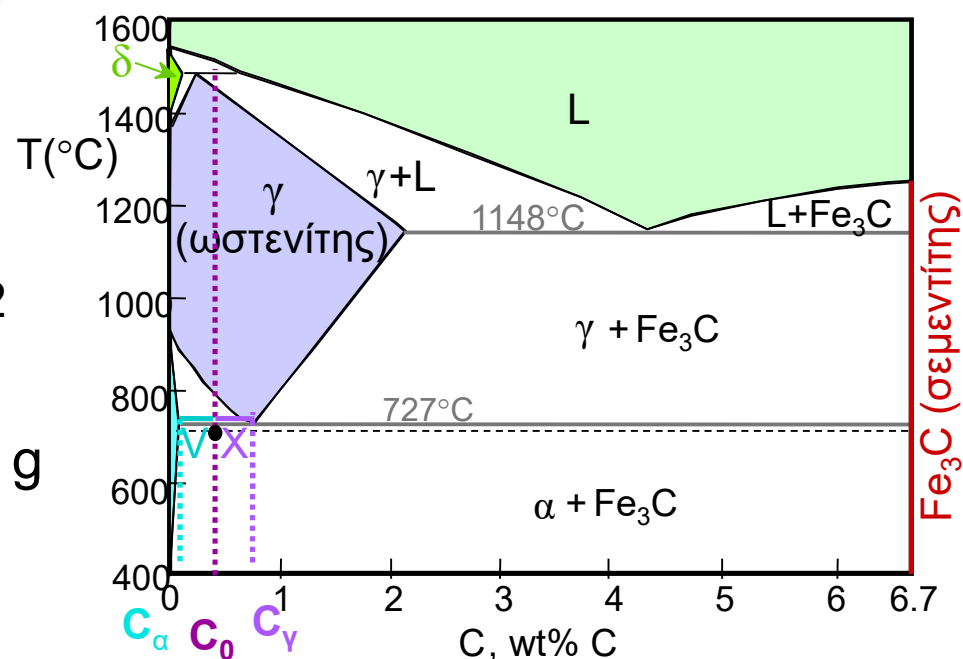
$$C_{\text{περλίτη}} = C_\gamma = 0.76 \text{ wt\% C}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{περλίτη}} &= \frac{V}{V+X} = \frac{C_0 - C_\alpha}{C_\gamma - C_\alpha} \\ &= \frac{0.40 - 0.022}{0.76 - 0.022} = 0.512 \end{aligned}$$

Ποσότητα περλίτη στα 100 g χάλυβα

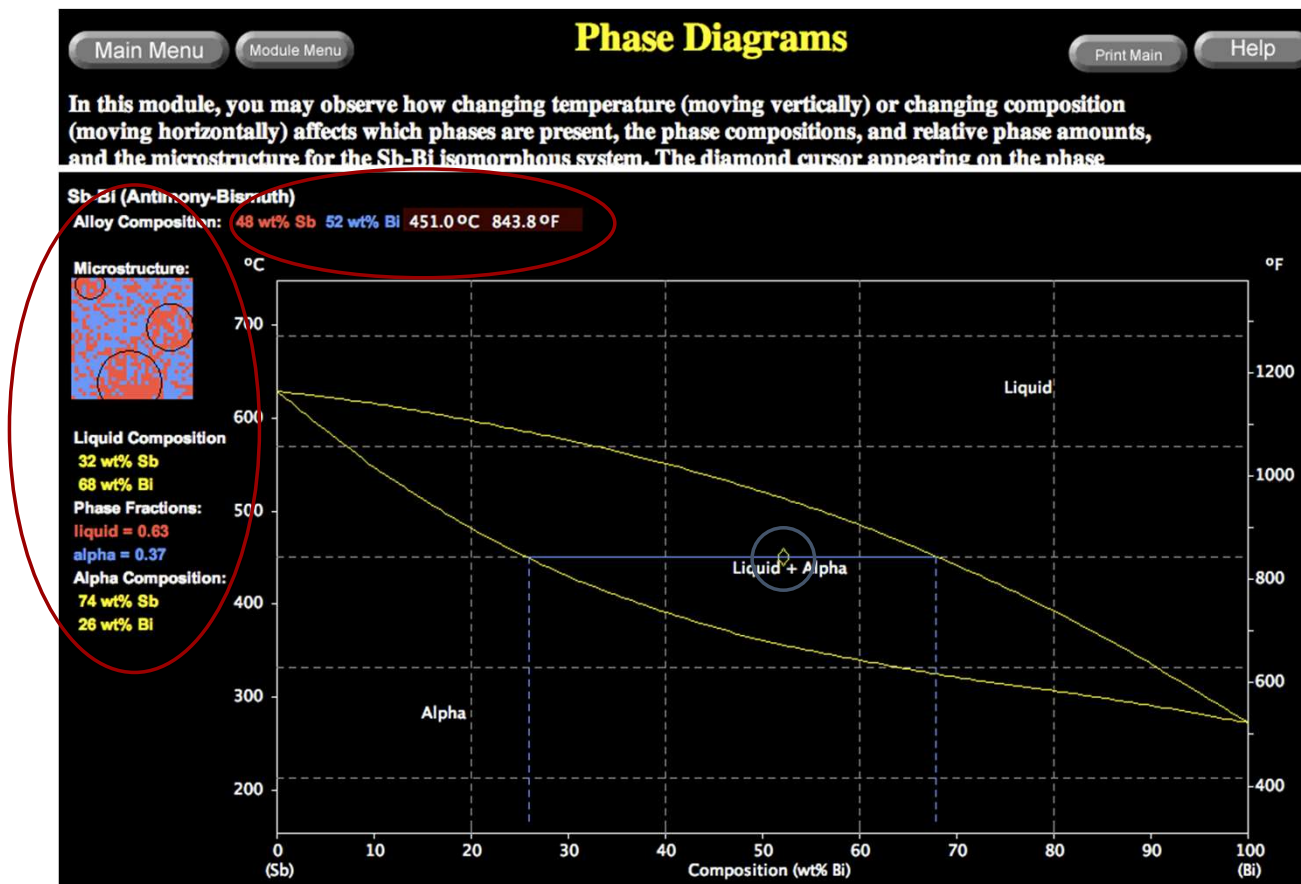
$$= (100 \text{ g}) W_{\text{περλίτη}}$$

$$= (100 \text{ g})(0.512) = 51.2 \text{ g}$$



Προσομοίωση διαγραμμάτων φάσεων

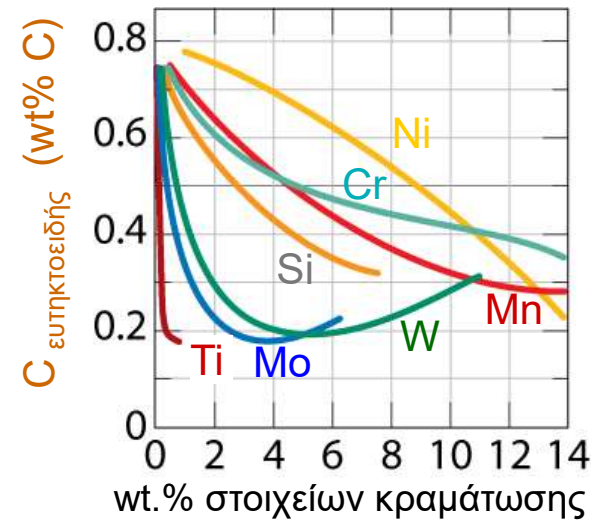
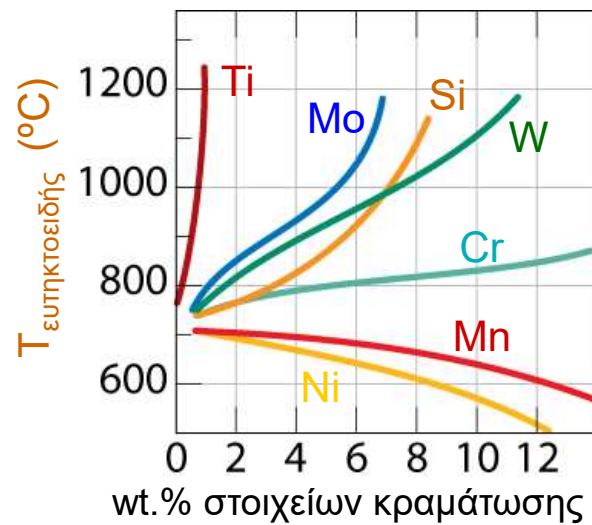
Το διαδραστικό περιβάλλον του λογισμικού VMSE επιτρέπει στους χρήστες να αλλάζουν τη μικροδομή, τις συστάσεις και τα κλάσματα μάζας/βάρους των φάσεων και εμφανίζει άμεσα τα αποτελέσματα.



Αλλαγή της σύστασης του κράματος

Κραμάτωση με άλλα στοιχεία

- Μεταβολή της $T_{\text{ευτηκτοειδούς}}$:
- Μεταβολή της $C_{\text{ευτηκτοειδούς}}$:





ΣΥΝΟΨΗ



- Τα **διαγράμματα φάσεων** είναι εργαλεία τα οποία χρησιμεύουν για τον προσδιορισμό
 - του πλήθους και του τύπου των υπαρχουσών φάσεων,
 - της **σύστασης** κάθε φάσης, και
 - του κλάσματος βάρους κάθε φάσηςεφόσον είναι γνωστή η θερμοκρασία και η σύσταση.
- Η μικροδομή ενός κράματος εξαρτάται από
 - τη σύστασή του, και
 - το εάν ο ρυθμός ψύξης επιτρέπει τη διατήρηση της κατάστασης ισορροπίας ή όχι.
- Οι σημαντικοί μετασχηματισμοί φάσεων βασίζονται **ευτηκτικές, ευτηκτοειδείς** και **περιτηκτικές** αντιδράσεις.

