

## نمودارهای تعادلی فازها

- اجزای تشکیل دهنده یک آلیاژ از نظر ماهیت، مقدار و تعداد، تابع درجه حرارت، فشار و ترکیب شیمیایی هستند.
- به دلیل تغییر ریزساختار آلیاژها با شرایط یاد شده، دسترسی به این تغییرات قبل از تهیه هر آلیاژ، ضروری است.
- نمودارهای تعادلی فازها حاوی کلیه اطلاعات مربوط به تاثیر این شرایط در حالت تعادلی سیستم های آلیاژی هستند.

### تعریف حالت تعادلی (تعریف عمومی)

۱. ویژگی های سیستم با گذشت زمان تغییر نمی کند.
۲. در صورت وجود مسیرهای مختلف برای برقراری حالت تعادل، با تغییر دادن متغیرهای سیستم، حالت یکسان و متشابهی حاصل گردد.

## قانون فازی گیبس

- تعریف شرایط تعادل به صورت رابطه ای میان تعداد فازها و اجزای تشکیل دهنده یک سیستم:

$$F = C - P + N$$

P: تعداد فازها

F: درجه آزادی

C: تعداد اجزای تشکیل دهنده

N: تعداد متغیرهای غیرترکیبی (درجه حرارت و فشار)

## تعریف درجه آزادی $F$

تعداد متغیرهای خارجی که می توانند مستقل از یکدیگر تغییر داده شوند ولی تغییری در تعداد فازهایی که با یکدیگر در حال تعادل هستند، حاصل نگردد.

## نمودار تعادل فازی در سیستم تک جزئی

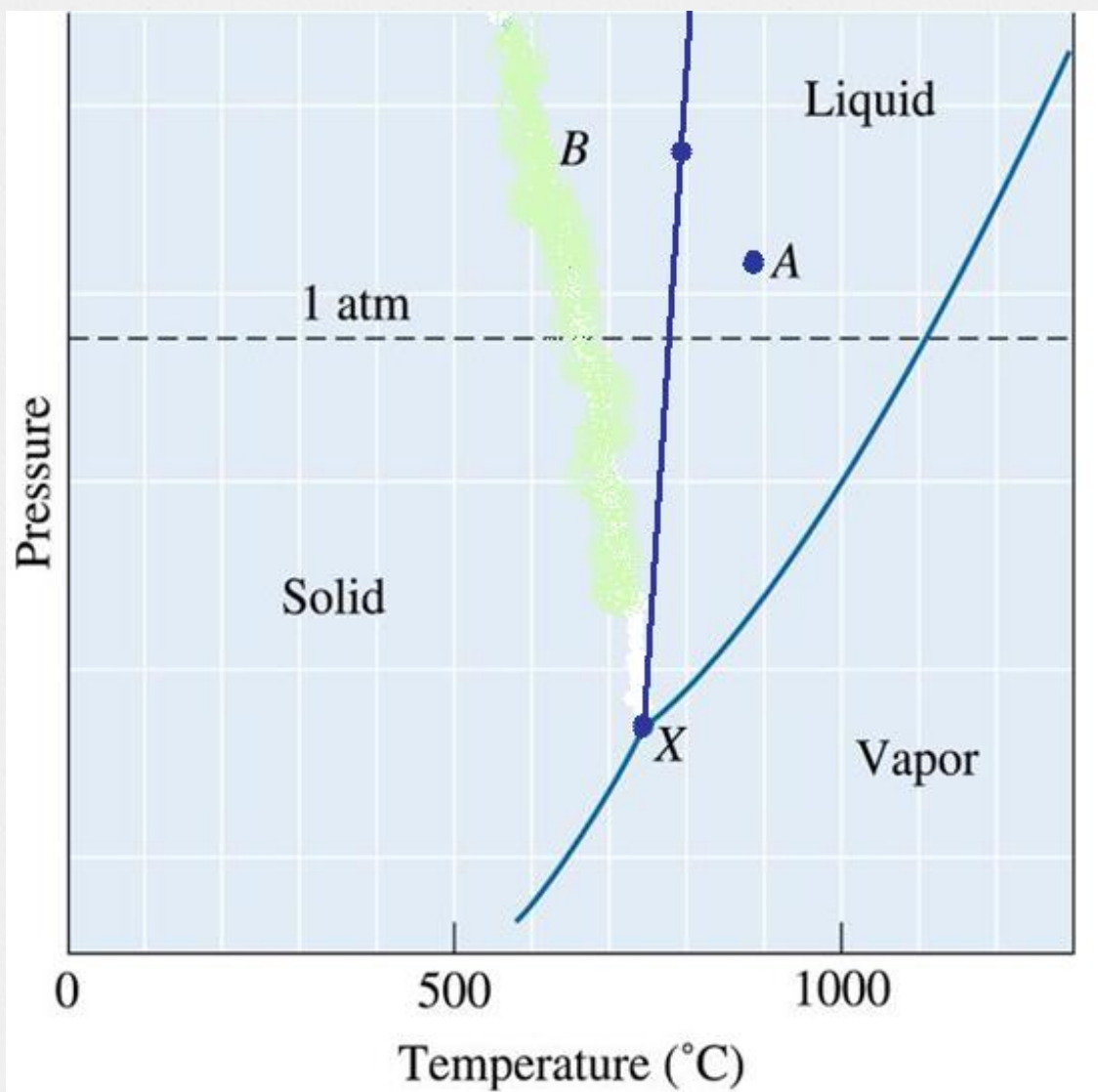
• قانون فازی گیبس

$$F = 1 - P + 2$$

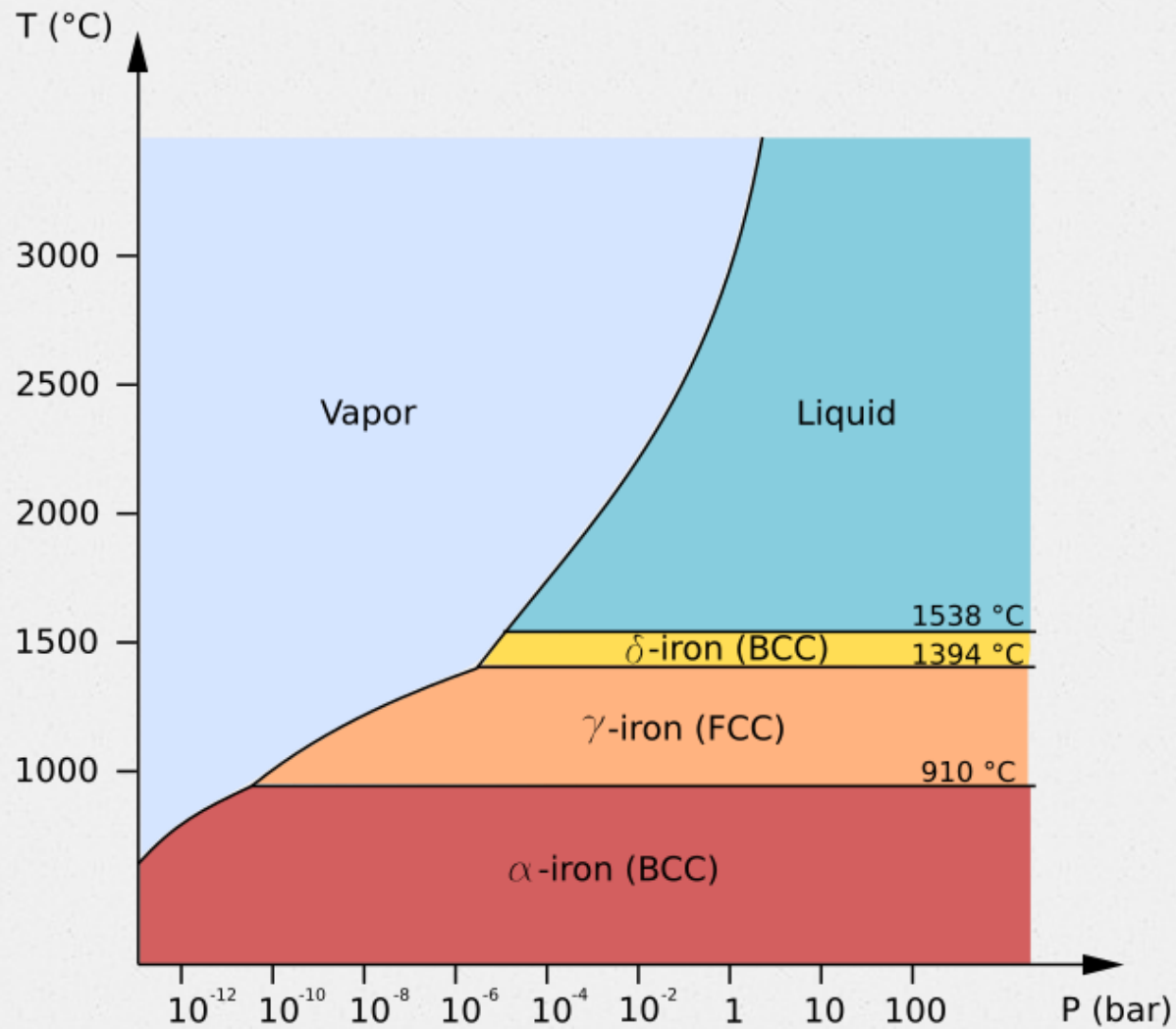
$$F = 3 - P$$

• در سیستم های تک جزئی (فلزات خالص)، منظور از فاز همان حالت ماده است.

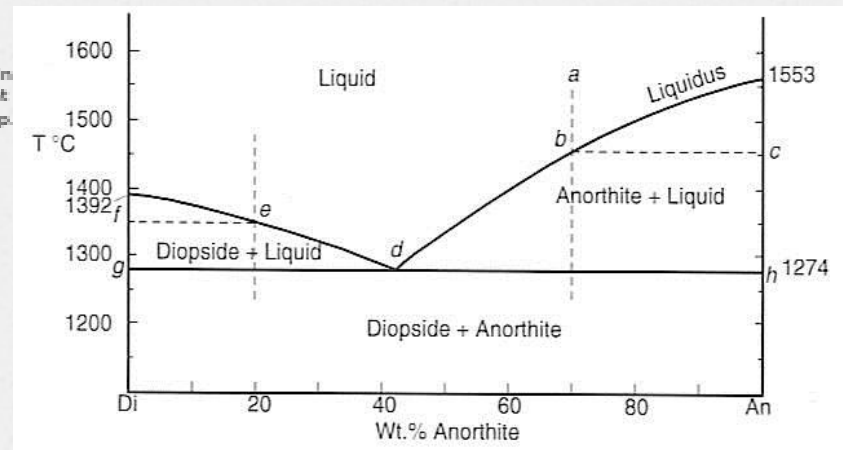
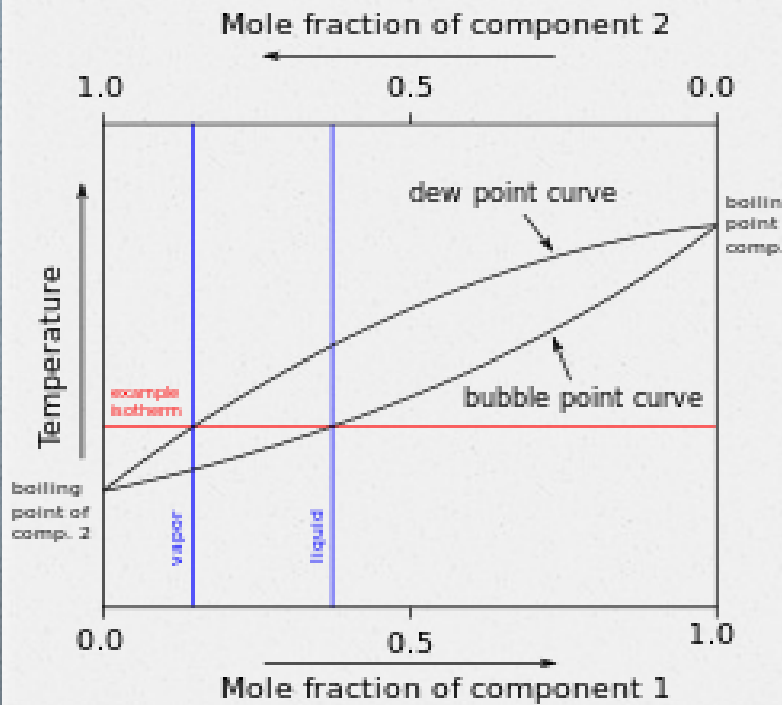




## نمودار تعادل فازی تک جزئی آهن



# نمودارهای فازي دو جزئی

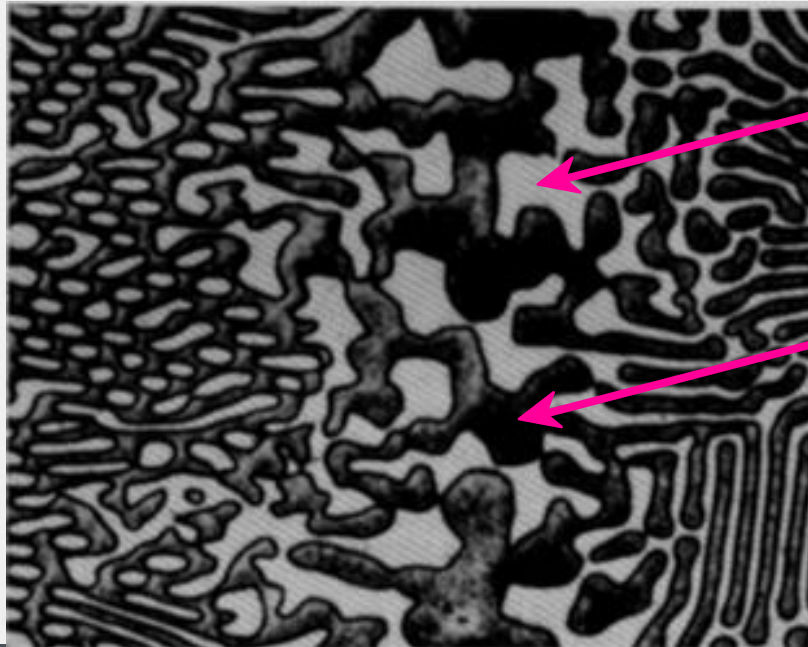




# Components and Phases

- **Components:**  
The elements or compounds which are present in the mixture  
(e.g., Al and Cu)
- **Phases:**  
The physically and chemically distinct material regions  
that result (e.g., ✓ and 🚲).

Aluminum-  
Copper  
Alloy



🚲 (lighter  
phase)

✓ (darker  
phase)

## انواع نمودار های تعادل فازي دو جزئي

### ۱. انحلال کامل اجزاء در حالت مایع

- الف) انحلال کامل در حالت جامد (نوع اول)
- ب) نا محلول در حالت جامد: واکنش اتکتیک (نوع دوم)
- ج) انحلال جزئي در حالت جامد: واکنش اتکتیک (نوع سوم)
- د) تشکیل یک فاز میانی با ذوب متجانس (نوع چهارم) **Congruent-melting intermediate phase**
- ه) واکنش پریتکتیک (نوع پنجم)

### ۲. انحلال جزئي در حالت مایع: واکنش مونوتکتیک (نوع ششم)

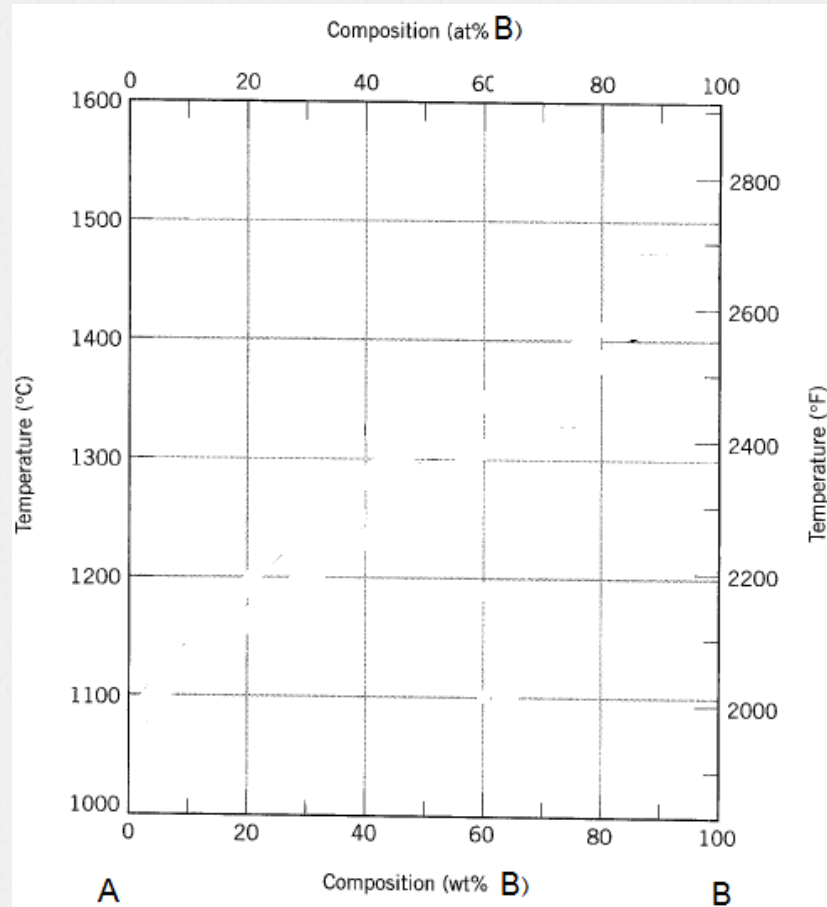
### ۳. نامحلول در حالت های جامد و مایع: (نوع هفتم)

### ۴. تحول در حالت جامد

- الف) تغییر آلوتروپی
- ب) تبدیل منظم - نا منظم
- ج) واکنش اتکتوئید
- د) واکنش پریتکتوئید



## مختصات یک نمودار فازی دو جزئی



تبدیل درصد وزنی به درصد اتمی

$$A = \frac{100 X}{X + Y(M/N)} \text{ درصد اتمی}$$

$$B = \frac{100 Y(M/N)}{X + Y(M/N)} \text{ درصد اتمی}$$

M = وزن اتمی عنصر A

N = وزن اتمی عنصر B

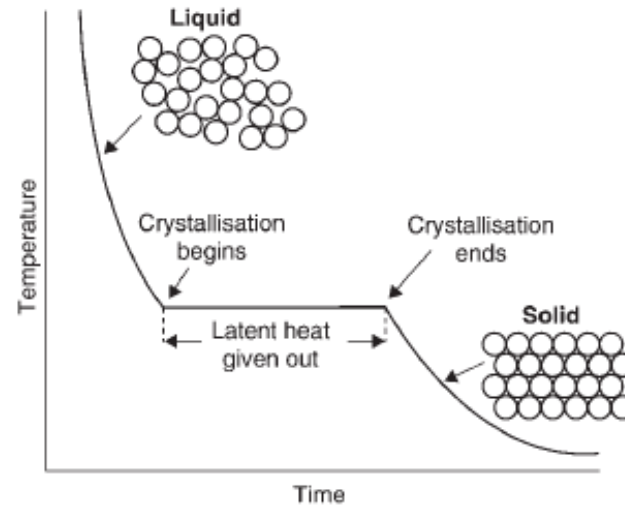
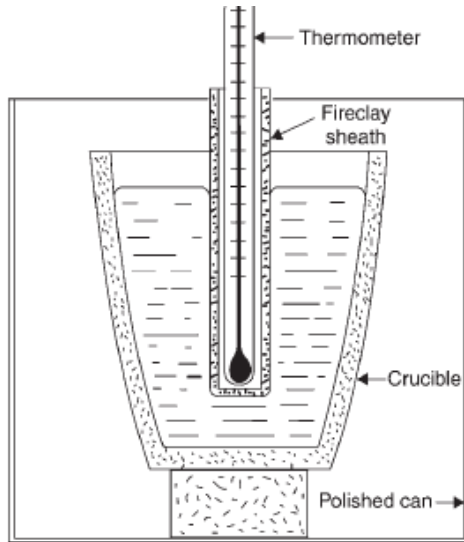
X = درصد وزنی عنصر A

Y = درصد وزنی عنصر B

## روش های متداول در رسم نمودار های تعادلی فازها

### • آنالیز حرارتی

رسم منحنی سرد شدن تعادلی  
و تعیین نقاط شروع و خاتمه انجماد



### • متالوگرافی

حرارت دادن ماده ی فلزی تا درجه حرارت های مختلف و سپس سرد نمودن سریع تا دمای محیط و بررسی ریز ساختار های مربوطه

### • تفرق اشعه X

تابش اشعه X به ماده فلزی سریع سرد شده از دماهای بالا و شناسایی فازهای تشکیل شده از طریق تغییرات ایجاد شده در ابعاد شبکه و یا ایجاد شبکه ی جدید

## نمودار تعادلی فازها (نوع اول)

انحلال کامل اجزاء تشکیل دهنده در حالت های مایع و جامد

اگر دو فلز در حالت جامد کاملاً در یکدیگر حل شوند تنها فاز جامد حاصل محلول جامد جانشینی خواهد بود. در این حالت دو فلز عموماً ساختار بلوری یکسان و اختلاف شعاع اتمی کمتر از ۸٪ دارند.

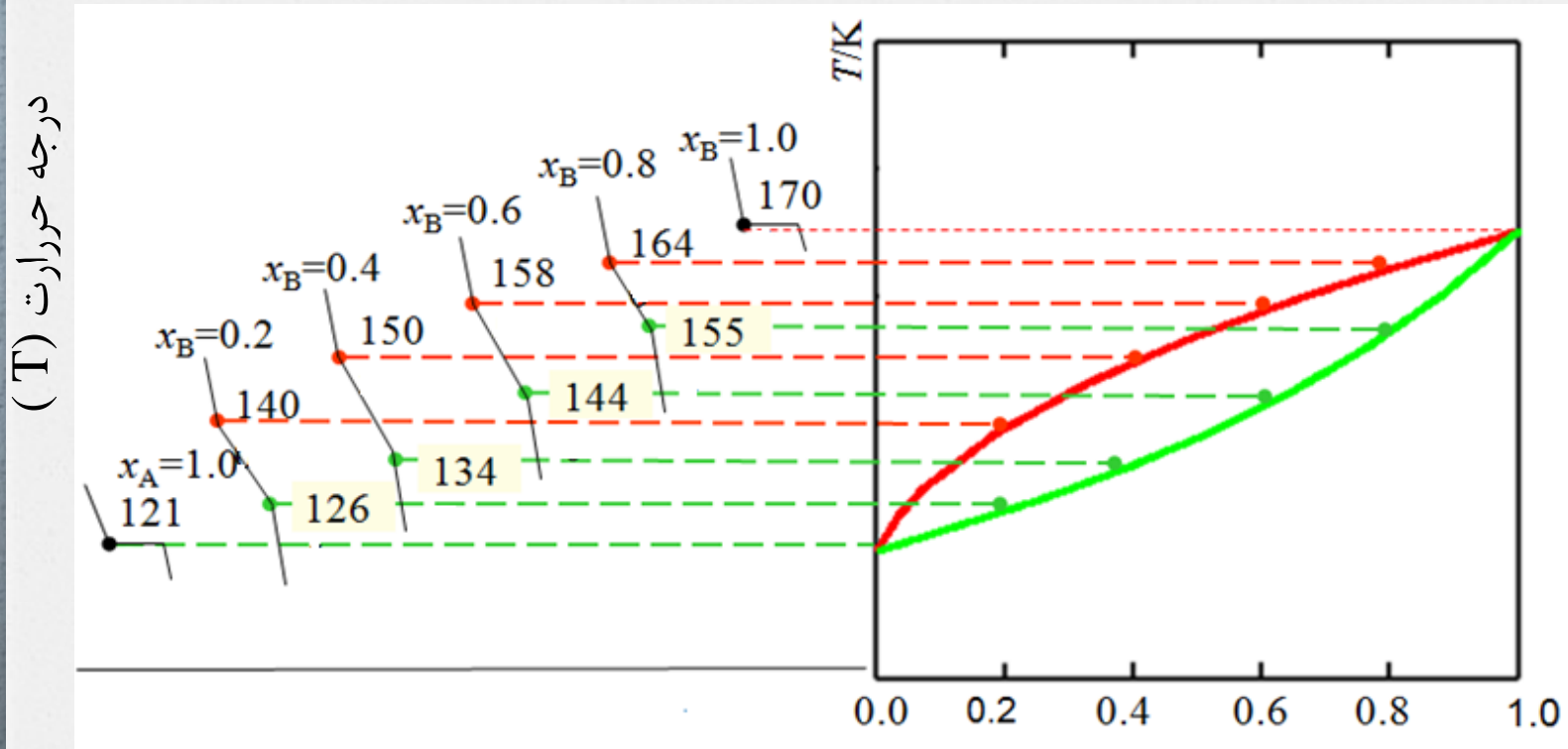
رسم گروهی منحنی های سرد کردن برای ترکیبها یا آلیاژهای مختلف فلزهای A و B برای مشاهده ارتباط این منحنی ها با هم و سپس رسم نمودار فازی انجام می گیرد، به نحوی که هر منحنی دستگاه مختصات ویژه خود را دارد یعنی محور زمان برای هر منحنی دارای نقطه صفر جداگانه ای است.

زمان (t)

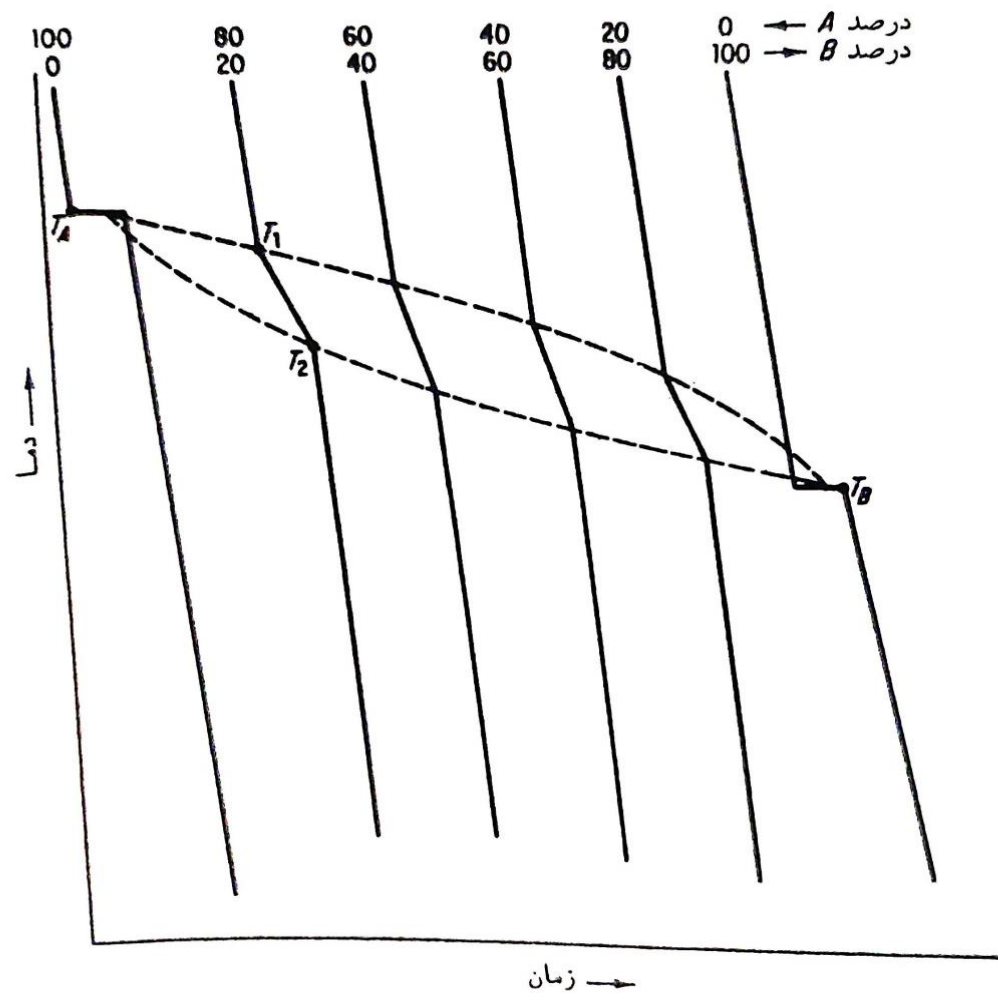


## انحلال کامل اجزاء تشکیل دهنده در حالت های مایع و جامد

منحنی سرد شدن فلزات خالص A و B دارای خط انجماد افقی است چون آغاز و پایان انجماد در یک دمای ثابت رخ می دهد. سایر ترکیبهای بین A و B محلول جامد تشکیل می دهند. بنابراین منحنی آنها دارای دو شکست یا تغییر شیب است. اولین شکست نشانگر دمای آغاز انجماد و دومین شکست نشانگر دمای پایان انجماد است.



ترکیب شیمیایی (جزء مولی) منحنی های سرد شدن تعادلی (ترکیبات مختلف از اجزاء A و B)

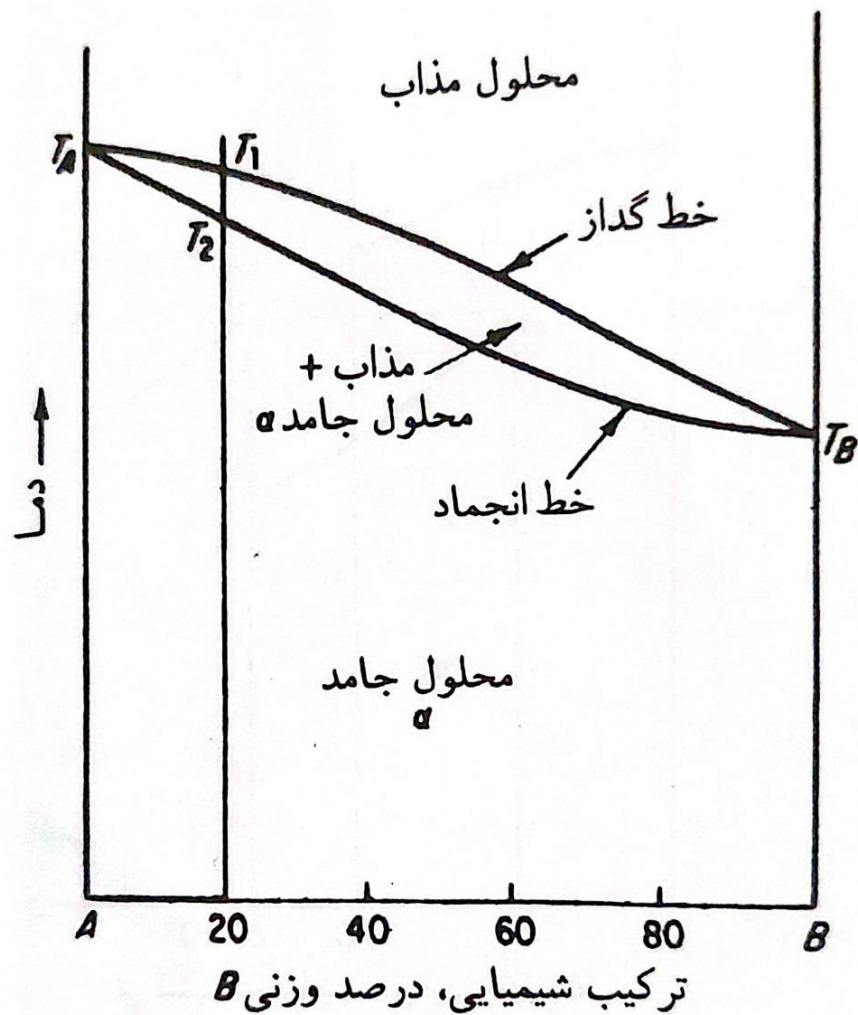


گروهی از منحنیهای سردکردن برای آلیاژهای مختلف سیستمی با خلالت کامل. خط‌چینها نشاندهنده شکل نمودار فازی است.

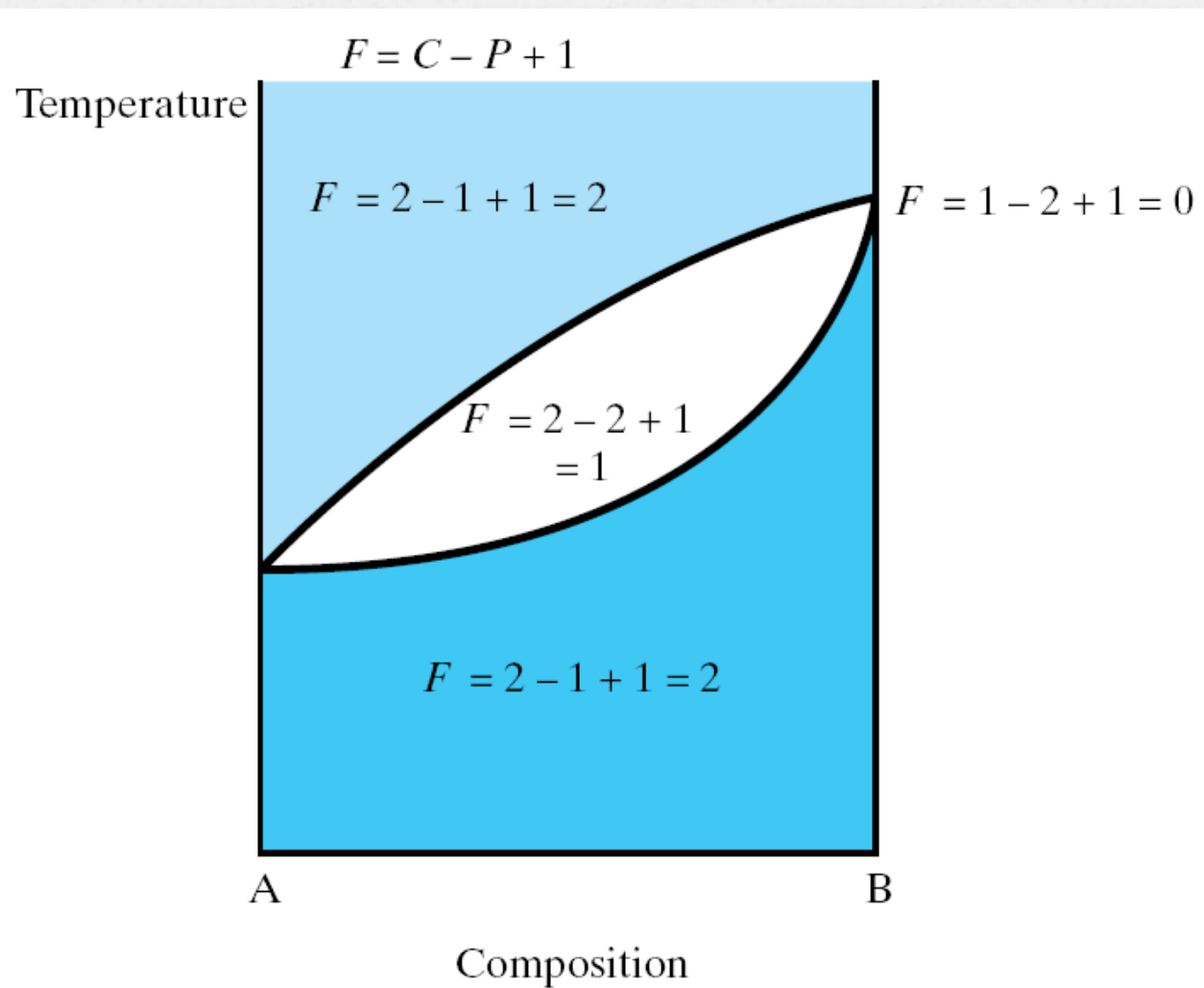
## انحلال کامل اجزاء تشکیل دهنده در حالت های مایع و جامد

- ✓ خط بالایی نمودار فازی از وصل کردن نقطه هایی که آغاز انجماد را نشان می دهند به وجود آمده و خط گداز نام دارد.
- ✓ خط پایینی نمودار فازی از اتصال نقطه های پایان انجماد حاصل شده است و خط انجماد نام دارد.
- ✓ منطقه بالای خط گداز منطقه تک فاز است و هر آلیاژی در این منطقه محلول مذاب همگن خواهد بود.
- ✓ منطقه زیر خط انجماد منطقه تک فاز است و هر آلیاژی در این منطقه محلول جامد همگن خواهد بود.
- ✓ بین خط های گداز و انجماد منطقه دوفاز قرار دارد و هر آلیاژ در این ناحیه به صورت مخلوطی از محلول جامد و محلول مذاب خواهد بود.





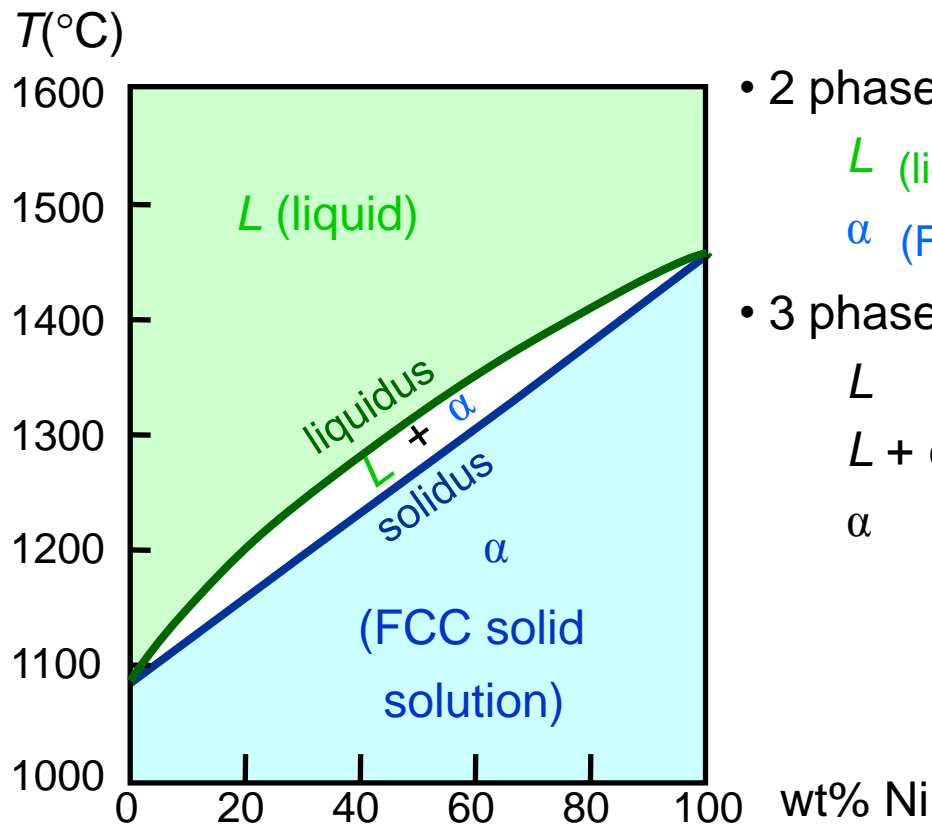
نمودار فازی دو فلز که در حالت‌های مذاب و جامد کاملاً در هم محلول‌اند.



# Phase Diagrams

- Indicate phases as function of  $T$ ,  $C_o$ , and  $P$ .
- For this course:
  - binary systems: just 2 components.
  - independent variables:  $T$  and  $C_o$  ( $P = 1$  atm is almost always used).

- **Phase Diagram for Cu-Ni system**



- 2 phases:

$L$  (liquid)

$\alpha$  (FCC solid solution)

- 3 phase fields:

$L$

$L + \alpha$

$\alpha$



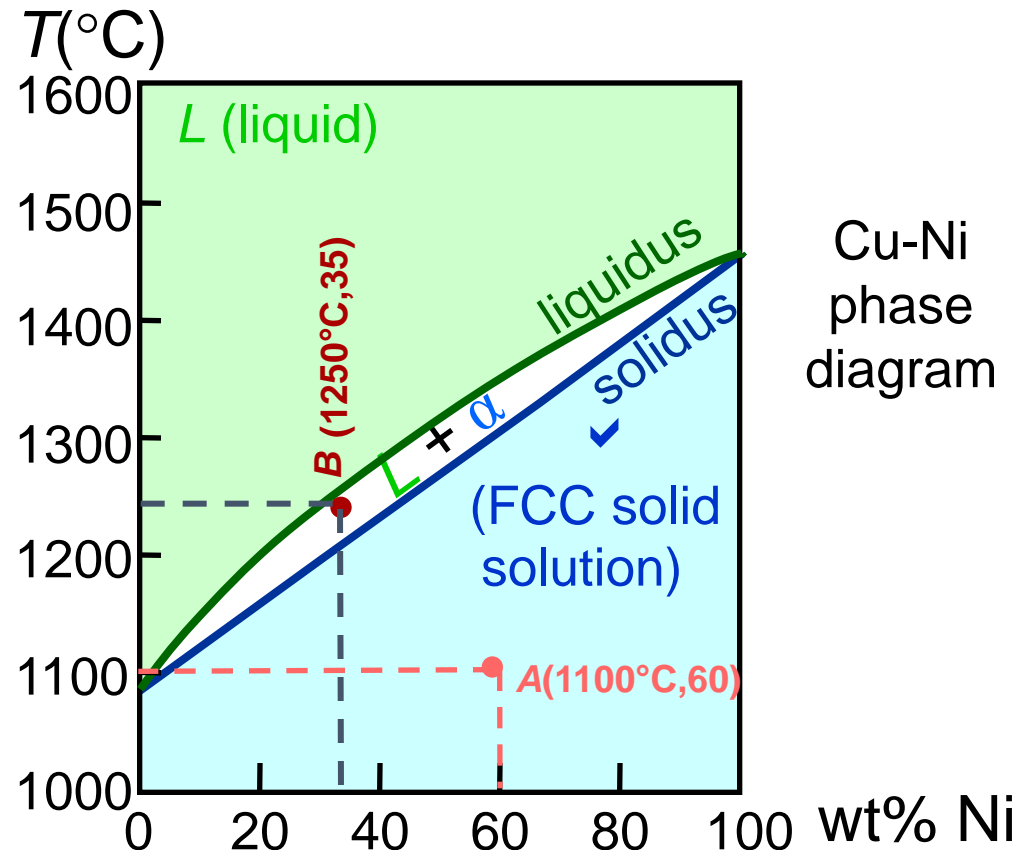
# Phase Diagrams: number and types of phases

- Rule 1: If we know  $T$  and  $C_o$ , then we know:
  - the number and types of phases present.

- Examples:

$A(1100^{\circ}\text{C}, 60)$ :  
1 phase:  $\alpha$

$B(1250^{\circ}\text{C}, 35)$ :  
2 phases:  $L + \alpha$



# PHASE DIAGRAMS: composition of phases

- Rule 2: If we know  $T$  and  $C_0$ , then we know:
  - the composition of each phase.

- Examples:

$C_0 = 35\text{wt\%Ni}$

At  $T_A$ :

Only Liquid (L)

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

At  $T_D$ :

Only Solid ( $\alpha$ )

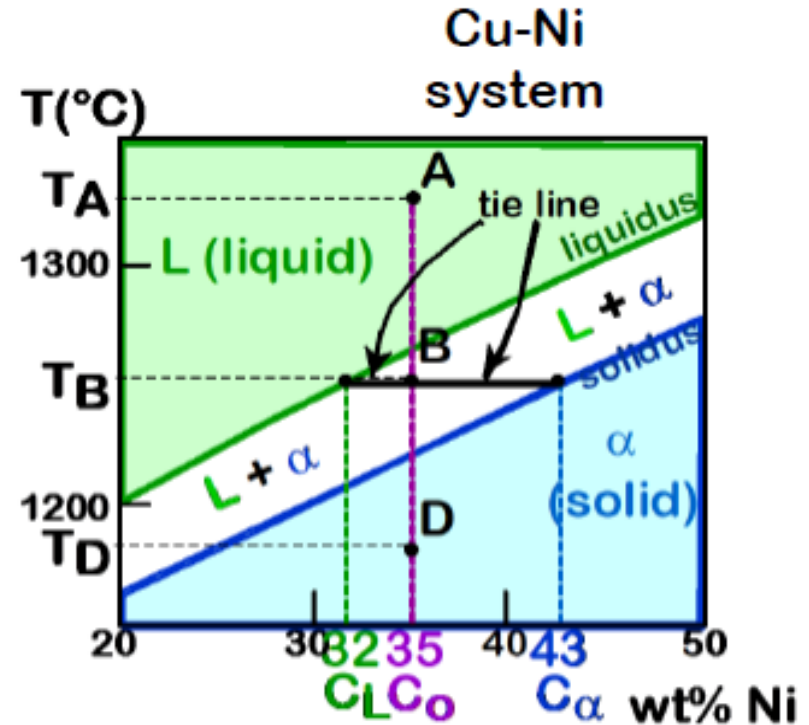
$C_\alpha = C_0 (= 35\text{wt\% Ni})$

At  $T_B$ :

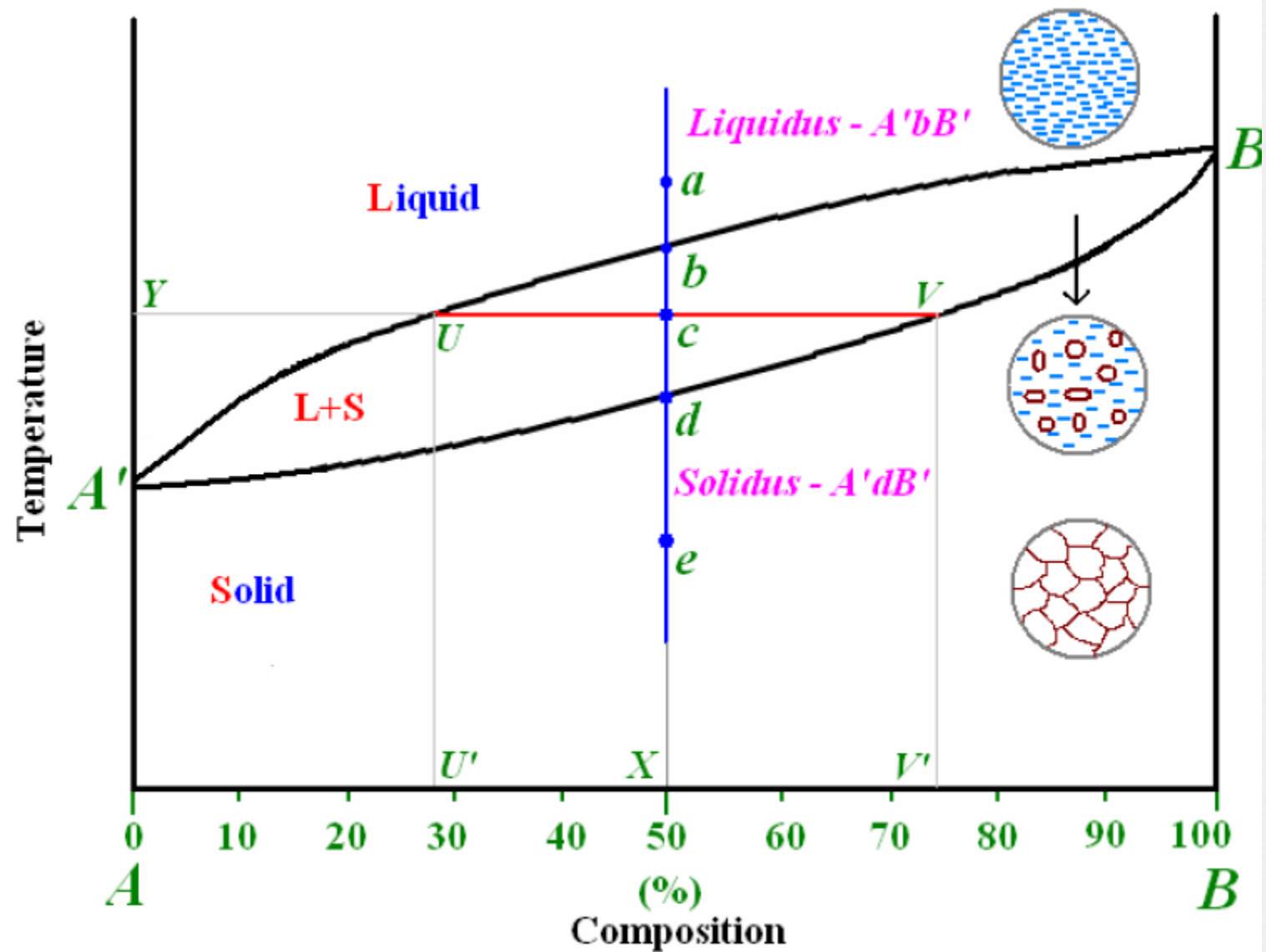
Both  $\alpha$  and L

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

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

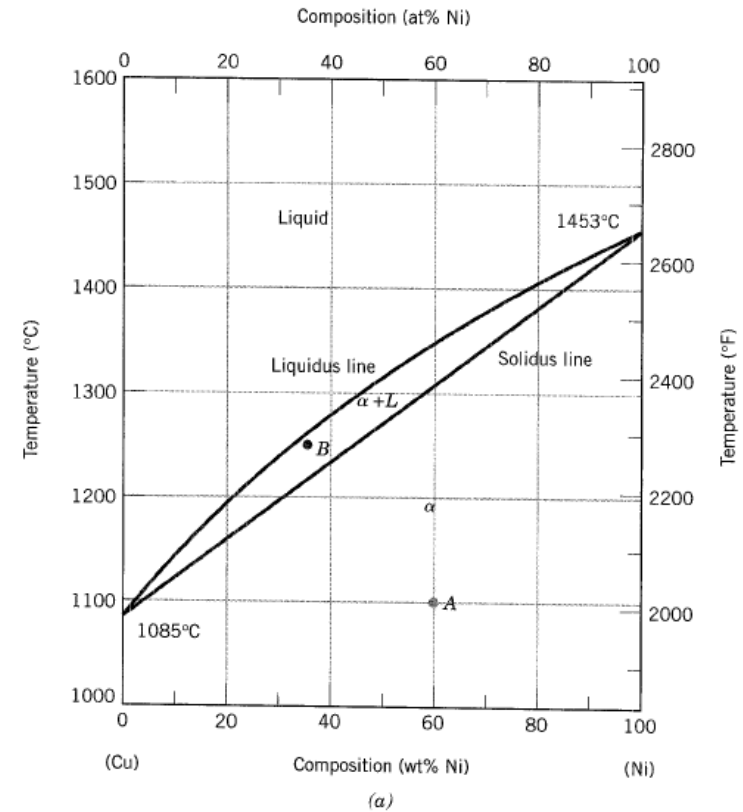
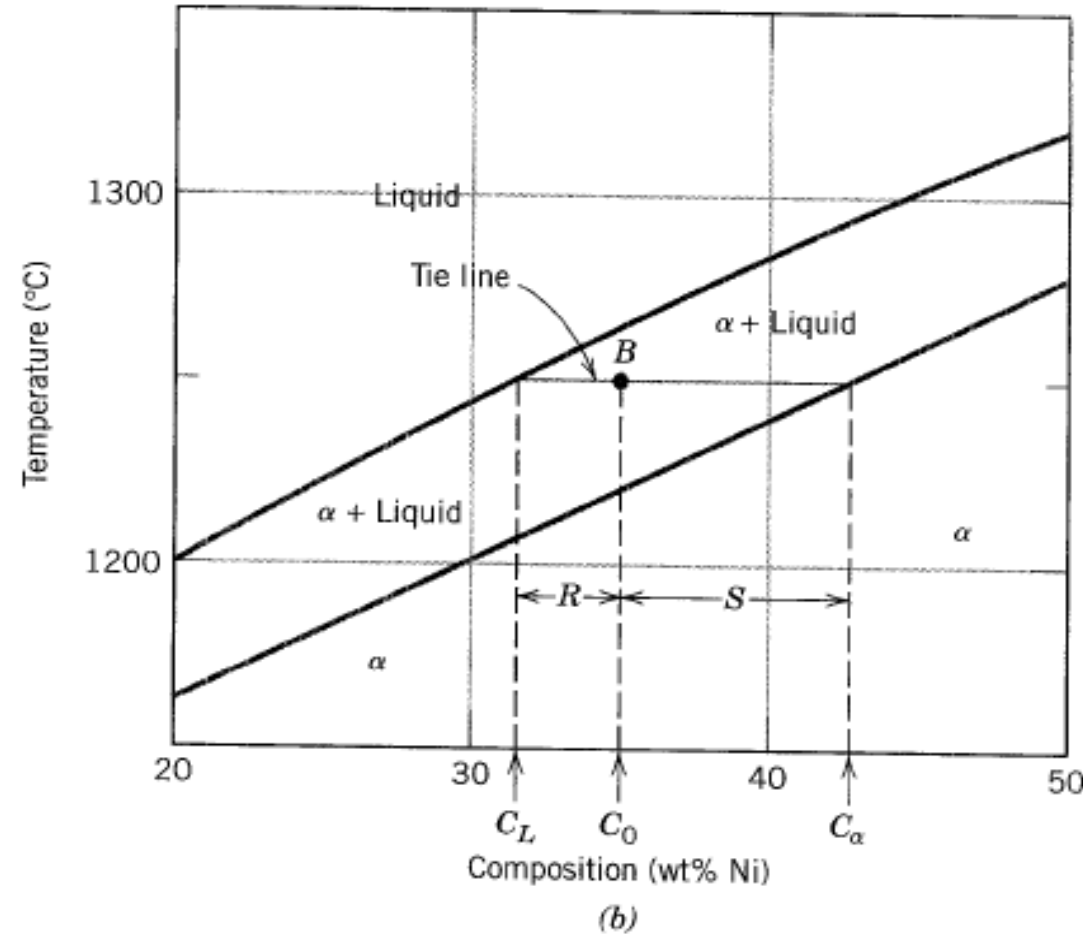


قانون ۲ ترکیب شیمیایی فازها: در هر دمای مشخص برای تعیین ترکیب شیمیایی واقعی فازهای هر آلیاژ در حال تعادل، باید در منطقه دوفازی خط افقی از دمای موردنظر به نام خط رابط رسم کنیم تا مرزهای منطقه دوفازی را در دو نقطه قطع کند. حال از نقطه تقاطع خطوطی به محورهاقی عمود می کشیم و ترکیب شیمیایی را مستقیماً از روی آنها می خوانیم.





# تعیین درصد وزنی فازها



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

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

**قانون ۳ مقدار نسبی هر فاز:** برای مشخص کردن مقدار نسبی دو فاز در تعادل، در هر دمای معین از منطقه دوفازی خطی عمودی که مشخص کننده آلیاژ است و خطی افقی در دمای موردنظر تا مرزهای منطقه رسم می کنیم. خط عمودی خط افقی را به دو بخش تقسیم می کند که طول هر بخش با مقدار فازهای موجود نسبت معکوس دارد. این قانون را قانون اهرم می نامند و می توان محل تقاطع دو خط را به عنوان تکیه گاه اهرم دانست. طول بازوهای اهرم ضربدر مقدار فاز موجود در هر طرف باید با هم برابر باشند.

# PHASE DIAGRAMS: weight fractions of phases

- Rule 3: If we know T and C<sub>0</sub>, then we know:  
--the amount of each phase (given in wt%).

- Examples:

**C<sub>0</sub> = 35wt%Ni**

At T<sub>A</sub>: Only Liquid (L)

$$W_L = 100\text{wt}\%, W_\alpha = 0$$

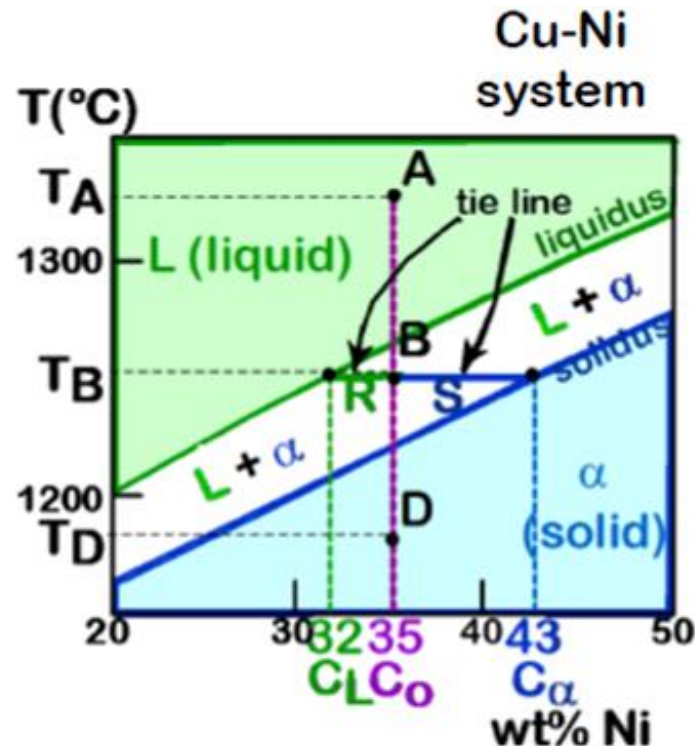
At T<sub>D</sub>: Only Solid (α)

$$W_L = 0, W_\alpha = 100\text{wt}\%$$

At T<sub>B</sub>: Both α and L

$$W_L = \frac{S}{R + S} = \frac{43 - 35}{43 - 32} = 73\text{wt}\%$$

$$W_\alpha = \frac{R}{R + S} = 27\text{wt}\%$$



# THE LEVER RULE: A PROOF

- Sum of weight fractions:
- Conservation of mass (Ni):
- Combine above equations:

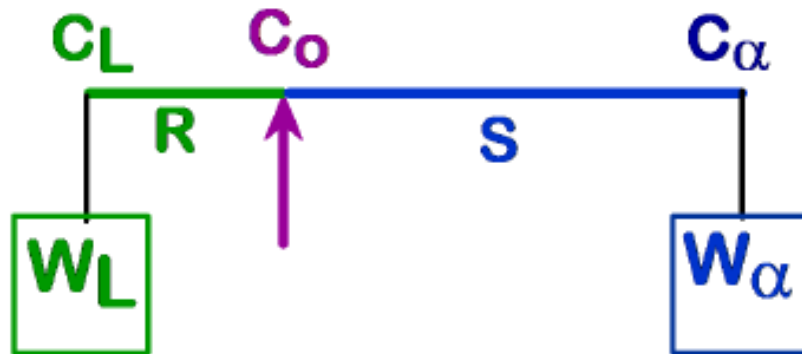
$$W_L + W_\alpha = 1$$

$$C_o = W_L C_L + W_\alpha C_\alpha$$

$$W_L = \frac{C_\alpha - C_o}{C_\alpha - C_L} = \frac{\text{S}}{\text{R} + \text{S}}$$

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

- A geometric interpretation:



moment equilibrium:

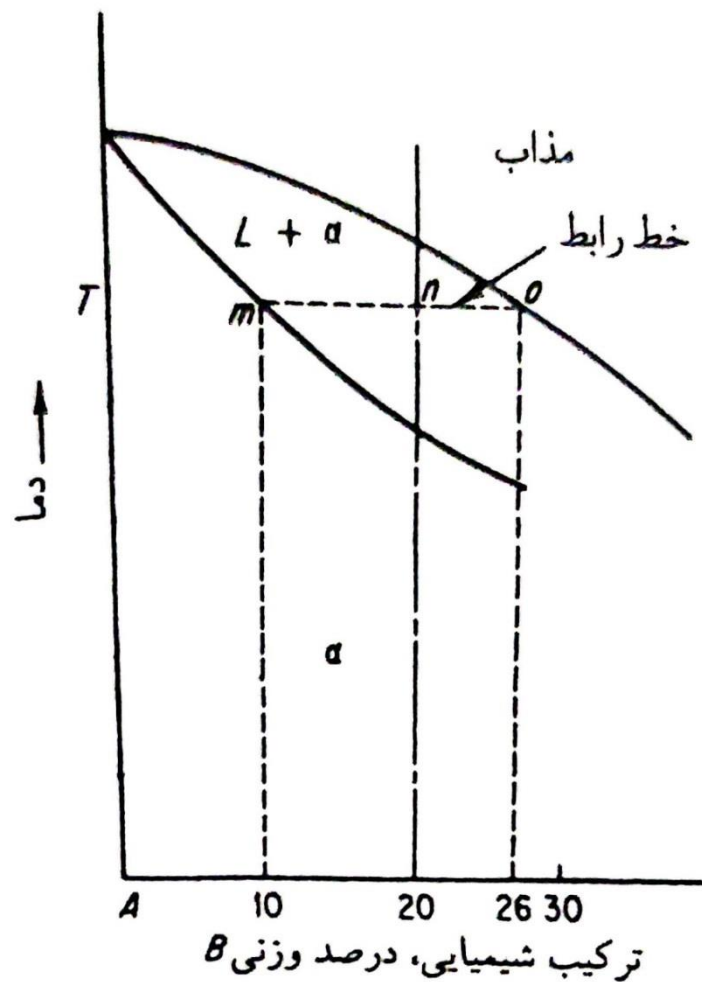
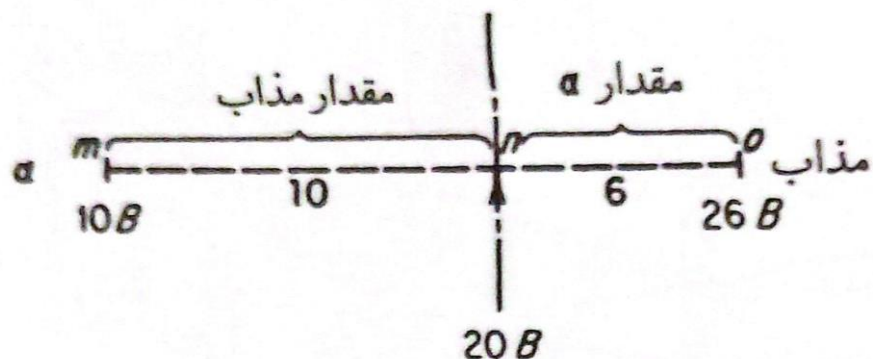
$$W_L R = W_\alpha S$$

$1 - W_\alpha$

solving gives Lever Rule



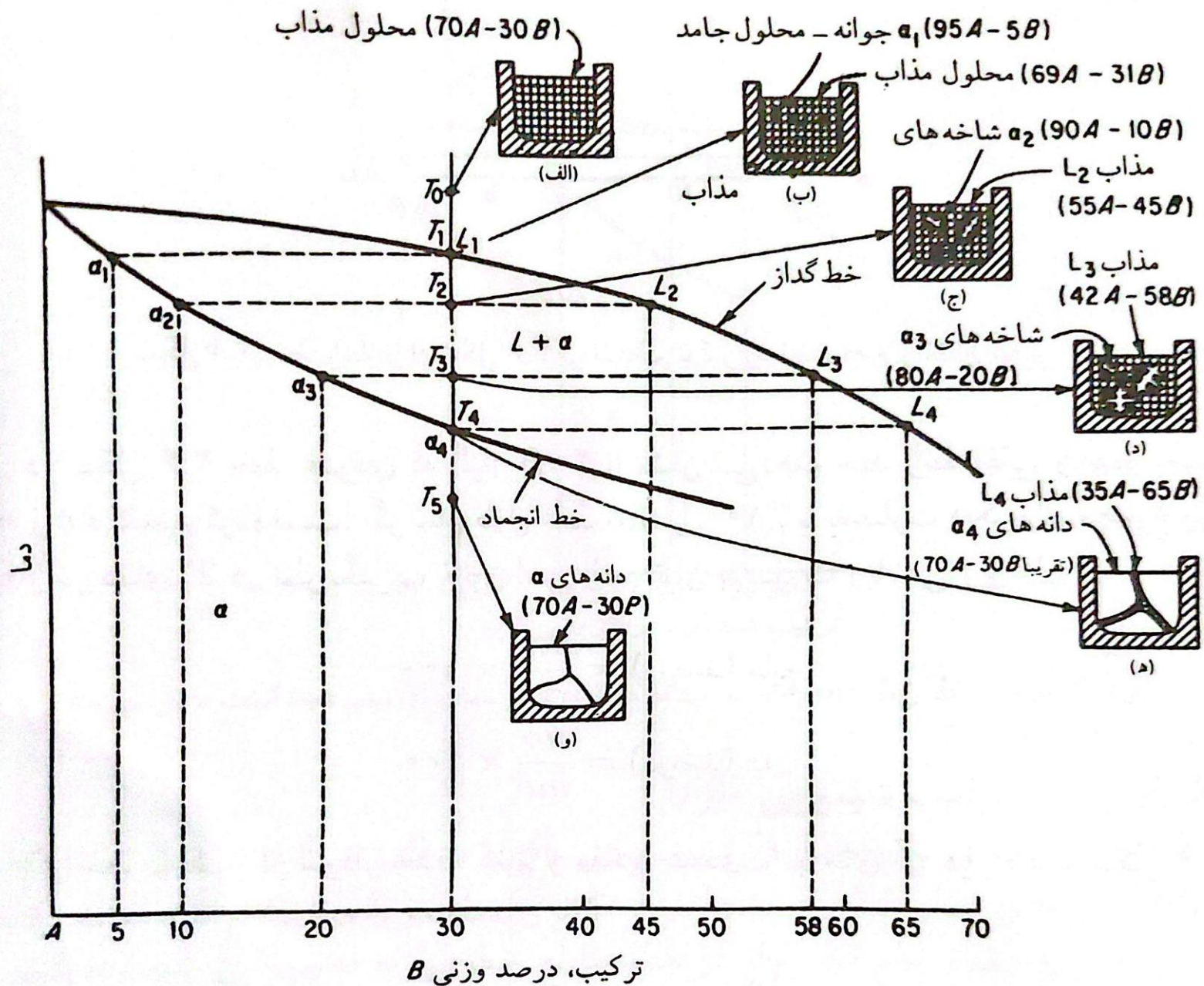
# قانون اهرم



نمودار خط رابط  $mo$  را که در منطقه دوفازی و در دمای  $T$  رسم شده است نشان می دهد.

## سرد کردن تعادلی یک آلیاژ محلول جامد بسیار آهسته سرد کردن آلیاژ 70 A- 30 B تحت شرایط تعادلی:

- این آلیاژ در دمای  $T_0$  یک محلول مذاب ممکن نک فاز است و تا رسیدن به دمای  $T_1$  در این وضعیت باقی می ماند.
- در دمای  $T_1$  که بر خط گداز واقع است انجماد آغاز می شود و اولین جوانه از محلول جامد تشکیل می شود.
- اولین جوانه محلول جامد  $\alpha_1$  از فلز A که نقطه ذوب بالاتری دارد بسیار غنی است و ترکیب آن 95 A- 5 B است. چون محلول جامد حاصل غنی از A است مذاب باقیمانده باید غنی از B شود. تنها کمی بعد از آغاز انجماد ترکیب مذاب به سورت 69 A – 31 B خواهد بود.
- وقتی به دمای پایینتر  $T_2$  برسیم ترکیب مذاب در  $L_2$  خواهد بود. تنها محلول جامد در تعادل با  $L_2$  یعنی تنها محلول جامد تشکیل شده در  $T_2$ ،  $\alpha_2$  با ترکیب 10 B است. لذا با کاهش دما نه تنها مذاب بلکه محلول جامد هم از B غنیتر می شود. در  $T_2$  بلورهای  $\alpha_1$  تشکیل می شوند و هسته هایی با ترکیب  $\alpha_1$  و همچنین شاخه ها را احاطه می کنند. برای رسیدن به حالت تعادل در  $T_2$ ، ترکیب کل فاز جامد باید  $\alpha_2$  باشد. این امر مستلزم نفوذ اتم های B به درون هسته ای غنی از A است. نه تنها اتم های B جامد تازه تشکیل شده بلکه اتم های متعلق به مذاب نیز باید در نفوذ شرکت کنند. این حالت تنها موقعی امکانپذیر است که سرعت سرد شدن بسیار آهسته باشد تا نفوذ همپای رشد بلور صورت گیرد.



آهسته سرد کردن آلیاژ ۳۰ B - ۷۰ A، ریز ساختار را در نقطه های مختلف در طی انجماد نشان می دهد



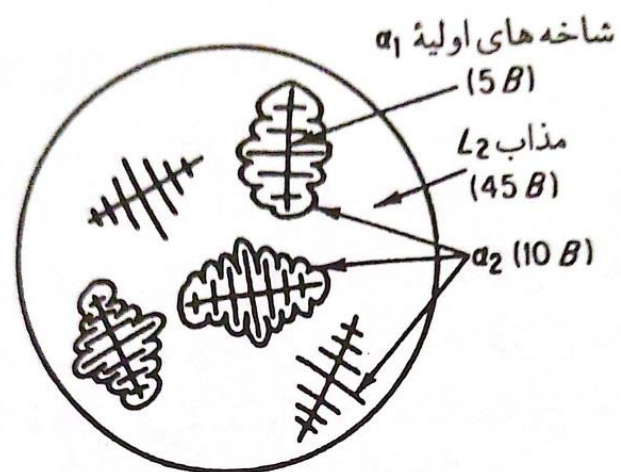
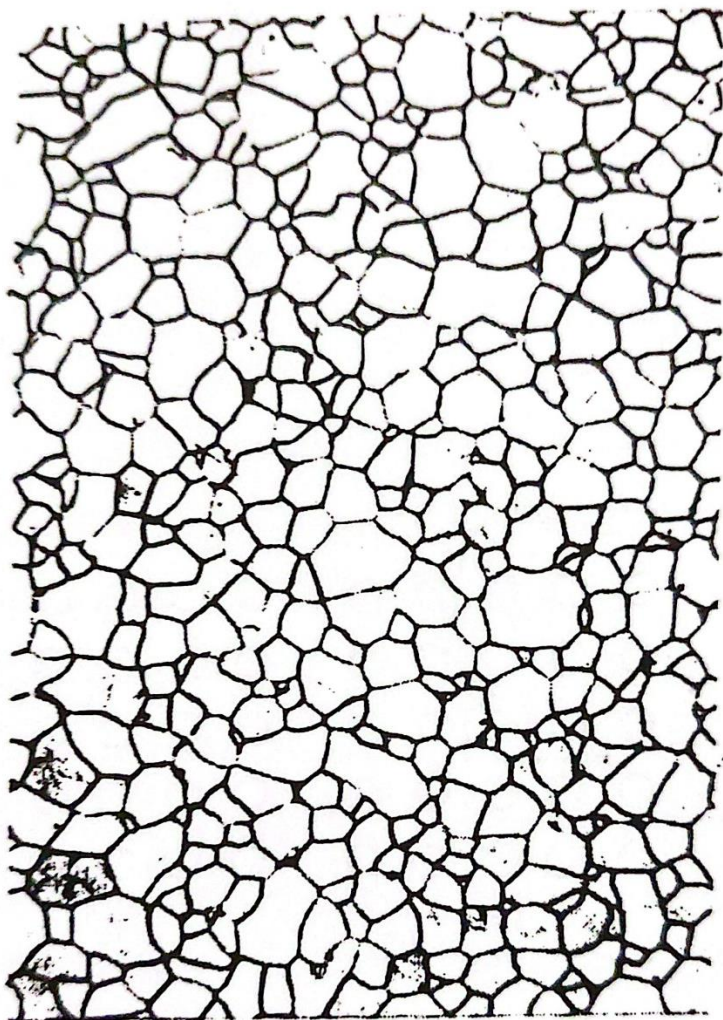
## سرد کردن تعادلی یک آلیاژ محلول جامد

مقادیر نسبی محلول های جامد و مذاب در **T2** با استفاده از قانون اهرم:

$$\text{مذاب (درصد)} = \frac{\alpha_2 T_2}{\alpha_2 L_2} \times 100 = \frac{20}{35} \times 100 = 57\%$$

$$\alpha_2 (\text{درصد}) = \frac{T_2 L_2}{\alpha_2 L_2} \times 100 = \frac{15}{35} \times 100 = 43\%$$

با افت دما محلول جامد به بهای کم شدن مقدار مذاب به رشد خود ادامه می دهد. ترکیب محلول جامد طبق خط انجماد و ترکیب فاز مذاب طبق خط گداز تغییر می کند و هر دو فاز از B غنیتر می شوند. در T3 تقریباً سه چهارم ماده را محلول جامد تشکیل می دهد. سرانجام در نقطه T4 به خط انجماد می رسیم و آخرین قطره مذاب یا L4 که از B بسیار غنی است در مرزدانه ها منجمد می شود. اما با نفوذ اتم ها محلول جامد دارای ترکیب یکنواخت  $\alpha$  خواهد شد که ترکیب کلی آلیاژ است. ریزساختار یک آلیاژ محلول جامد اهسته سرد شده تنها شامل دانه و مرزدانه است. نفوذ باعث تشکیل دانه های همگن می شود و درون دانه ها هیچ تغییر ترکیب شیمیایی مشاهده نمی شود.



تصویر ساده آلیاژ  $30 B$  در دمای  $T_2$  قبل از انجام نفوذ

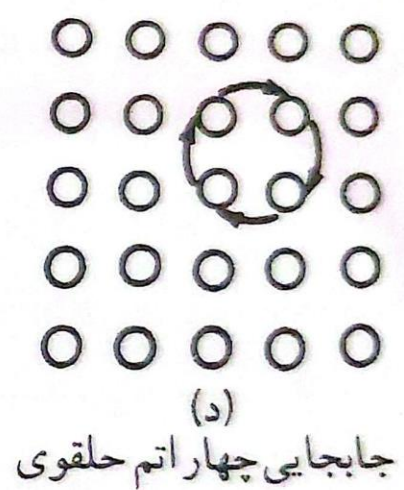
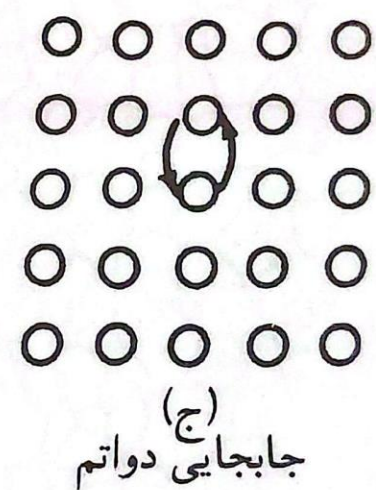
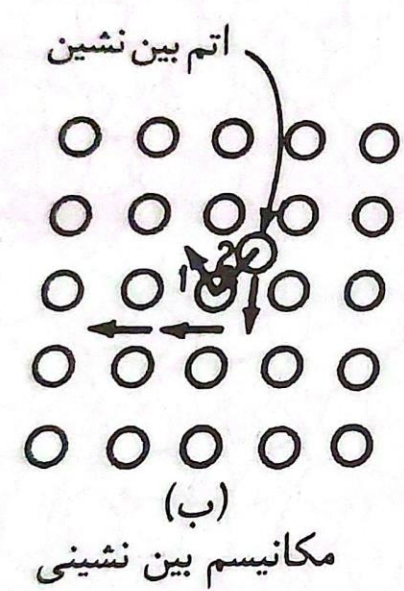
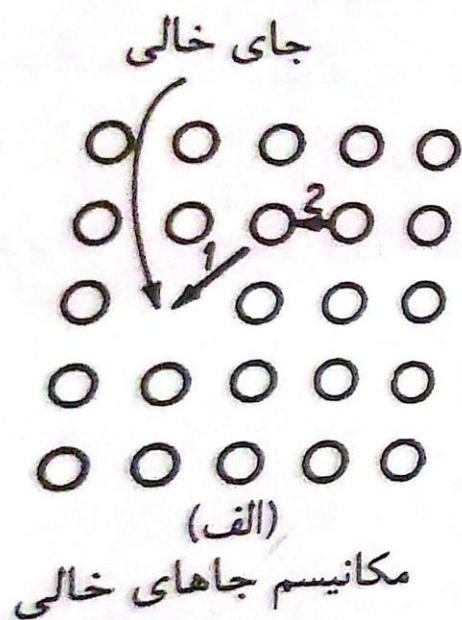
ریز ساختار یک آلیاژ محلول جامد آهن با بزرگنمایی  $100\times$ .

❖ نفوذ یا حرکت اتم ها در حالت جامد پدیده مهمی است. با آهسته سرد شدن و از طریق مکانیسم نفوذ، ساختار شاخه ای محو و دانه ها همگن می شوند.

❖ نفوذ اصولاً ماهیت آماری دارد و نتیجه حرکت های اتفاقی تک تک اتمهاست. در حالیکه مسیر هر اتم ممکن است زیگ زاگ یا غیرقابل پیش بینی باشد. وقتی تعداد زیادی از اتم ها چنین حرکتی کنند جریانی سازمان یافته پدید می آید.

❖ نفوذ در محلول های جامد جانشینی به سه طریق رخ می دهد: مکانیسم جاهای خالی، مکانیسم بین نشینی و مکانیسم جا به جا شدن اتم ها. جاهای خالی و محل های بین نشینی به صورت طبیعی در ساختار بلوری وجود دارد. این نقص باعث تسهیل نفوذ یا پرش اتم های مجاور می شود.





نمایش ساده‌ای از مکانیسمهای نفوذ.

## شکل الف:

چگونه یک اتم حل شده با پرش به داخل جای خالی یک فاصله اتمی را به چپ طی می کند. البته احتمال پریدن هر اتم دیگر مجاور به جای خالی نیز همین قدر است. با پرش اتم جای خالی به سمت راست منتقل می شود و محل قبلی اتم را اشغال می کند و در این حالت برای تعویض جای اتفاقی بعدی آماده است.

## شکل ب:

در مکانیسم بین نشینی اتمی از جای طبیعی خود به یک محل در بین اتم ها حرکت می کند و جای خالی شده را یک اتم بین نشینی اشغال می کند؛ به طوری که نفوذ می تواند با جابجا شدن یک اتم بین نشین در بلور صورت گیرد اما این رخداد در محلول های جامد بین نشینی محتملتر است.

## شکل ج:

حرکت اتم ها با تعویض مستقیم دو اتم مجاور

## شکل د:

چرخش حلقه ای ۴ اتم نیز امکانپذیر است. اما این حالت ها تنها در شرایط خاصی پدید می آیند چون مسایل فیزیکی ناشی از ازدحام اتم های فشرده مجاور باعث افزایش موانع در برابر نفوذ می شود.

➤ بررسی های آزمایشگاهی نشان داده است استفاده از جاهای خالی روش اصلی نفوذ در فلزات است. آهنگ نفوذ در آلیاژهای سریع سرد شده بسیار بیشتر از آهنگ نفوذ در همان آلیاژ است که آهسته سرد شده باشد. علت این اختلاف وجود جاهای خالی بیشتر در آلیاژهای سریع سرد شده است. مهاجرت جاهای خالی در مقایسه با دیگر روش ها انرژی مهاجرت کمتری دارد.

➤ آهنگ نفوذ یک فلز در دیگری با ثابت نفوذ مشخص و با واحد سانتی متر مربع بر ثانیه بیان می شود. ثابت نفوذ تابعی از چند متغیر است که مهمترین آنها دما است. به عنوان قاعده ای عمومی می توان گفت با هر ۲۰ درجه سلسیوس افزایش دما ثابت نفوذ دو برابر می شود. این پدیده عجیبی نیست زیرا تمامی اتم ها در حوالی موضع تعادل خود در شبکه نوسان می کنند و با افزایش دما دامنه لرزش نیز افزایش می یابد. انرژی که به این لرزش گرمایی کمک می کند و غالباً انرژی گرمایی نامیده می شود برای پرش اتم از محل خود در شبکه تحت شرایط مناسب کفایت می کند. آلیاژ همگن بیشترین انرژی آزاد را دارد که نیروی رانش نفوذ محسوب می شود.



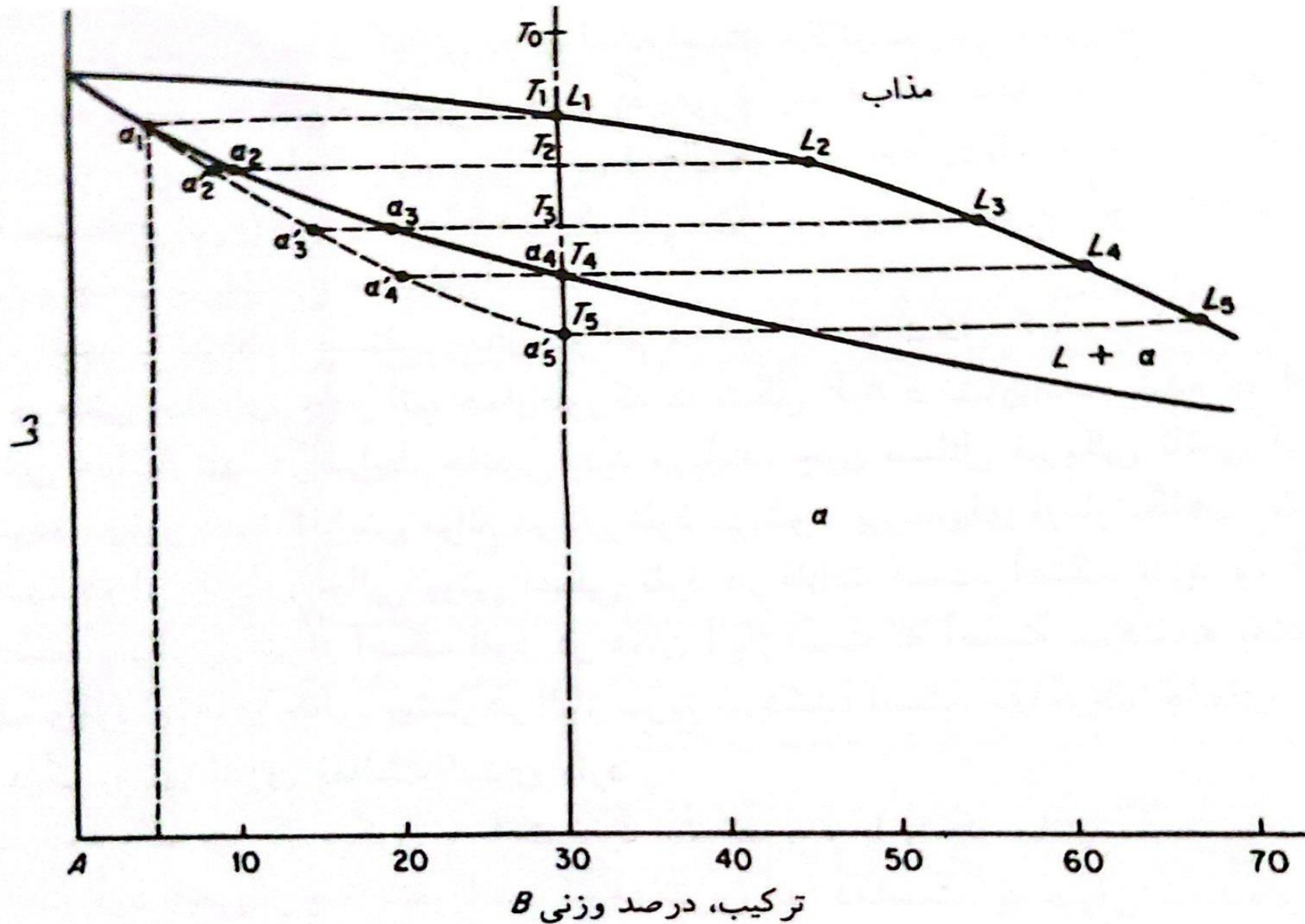
## سرد شدن غیر تعادلی - منشا مغزه بندی

در عمل سرد کردن آلیاژ در شرایط تعادلی بسیار مشکل است. چون آهنگ نفوذ در حالت جامد بسیار پایین است؛ بنابراین انتظار می رود با سرد کردن معمولی شرایط با آنچه نمودار تعادلی نشان می دهد تفاوت داشته باشد.

مجدداً به آلیاژ 30B مراجعه می کنیم. انجماد در  $T_1$  شروع می شود، باعث تشکیل محلول جامد با ترکیب  $\alpha_1$  می شود. در  $T_2$  مذاب در  $L_2$  قرار دارد و محلول جامد با ترکیب  $\alpha_2$  تشکیل می شود. چون آهنگ نفوذ خیلی پایینتر از آن است که همپای رشد بلور پیش رود زمان کافی برای یکنواخت شدن جامد وجود ندارد و متوسط ترکیب بین  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  است که آن را  $\alpha'_2$  می خوانیم. با افت دما ترکیب شیمیایی متوسط از شرایط تعادلی دورتر می شود. مشاهده می شود ترکیب محلول جامد مطابق خط انجماد غیر تعادلی از  $\alpha_1$  به  $\alpha'_5$  تغییر می کند که با خط چین نشان داده شده است.

از سوی دیگر مذاب همان ترکیب خط گداز را دارد زیرا نفوذ در مذاب نسبتاً سریع است. در  $T_3$  ترکیب متوسط جامد به جای  $\alpha_3$ ،  $\alpha'_3$  است. در شرایط سرد شدن تعادلی انجماد باید در  $T_4$  کامل شود. در حالی که ترکیب متوسط محلول جامد  $\alpha'_4$  است و به ترکیب آلیاژ نرسیده است. بنابراین باید هنوز مقداری مذاب وجود داشته باشد. با اعمال قانون اهرم در  $T_4$  خواهیم داشت:

$$\alpha'_4 (\text{درصد}) = \frac{T_4 L_4}{\alpha'_4 L_4} \times 100 \approx 75\% \quad L_4 (\text{درصد}) = \frac{\alpha'_4 T_4}{\alpha'_4 L_4} \times 100 \approx 25\%$$



سرد شدن غیر تعادلی، منشأ مغزه‌بندی.

بنابراین انجماد تا T5 ادامه می یابد. در این دما ترکیب محلول جامد  $\alpha'5$  با ترکیب آلیاژ یکی می شود و انجماد خاتمه می یابد. آخرین مذاب منجمد شده یعنی L5 نسبت به آخرین مذابی که در شرایط تعادلی باید منجمد شود از عنصر B غنیتر است. هرچه آلیاژ سریعتر سرد شود گستره ترکیب شیمیایی آلیاژ منجمد شده گسترده تر خواهد بود. چون آهنگ حمله شیمیایی بسته به ترکیب شیمیایی تغییر می کند حاکمی مناسب باعث آشکار شدن ساختار شاخه ای در زیر میکروسکوپ می شود.

جامد نهایی شامل ساختاری مغزه دار است که در قسمت مرکزی آن فلز با نقطه ذوب بالا وجود دارد و با پوسته ای از ترکیب زود ذوبتر که دیرتر منجمد شده احاطه شده است. شرایط فوق را مغزه بندی یا جدانشینی شاخه ای می گویند.

به طور خلاصه سرد شدن غیرتعادلی باعث پیدایش گستره دمایی بالایی می شود که در آن دو فاز مذاب و جامد وجود دارند. انجماد نهایی در دمایی پایینتر از آنچه نمودار تعادلی نشان داده اتفاق می افتد. آخرین مذابی که منجمد می شود از فلز زود ذوب غنی است. و چون نفوذ همپای رشد بلور نیست ترکیب شیمیایی از مغزه به سمت پوست دانه ها تغییر می کند. سریعتر شدن آهنگ سرد شدن اثرات فوق را تشدید می کند.

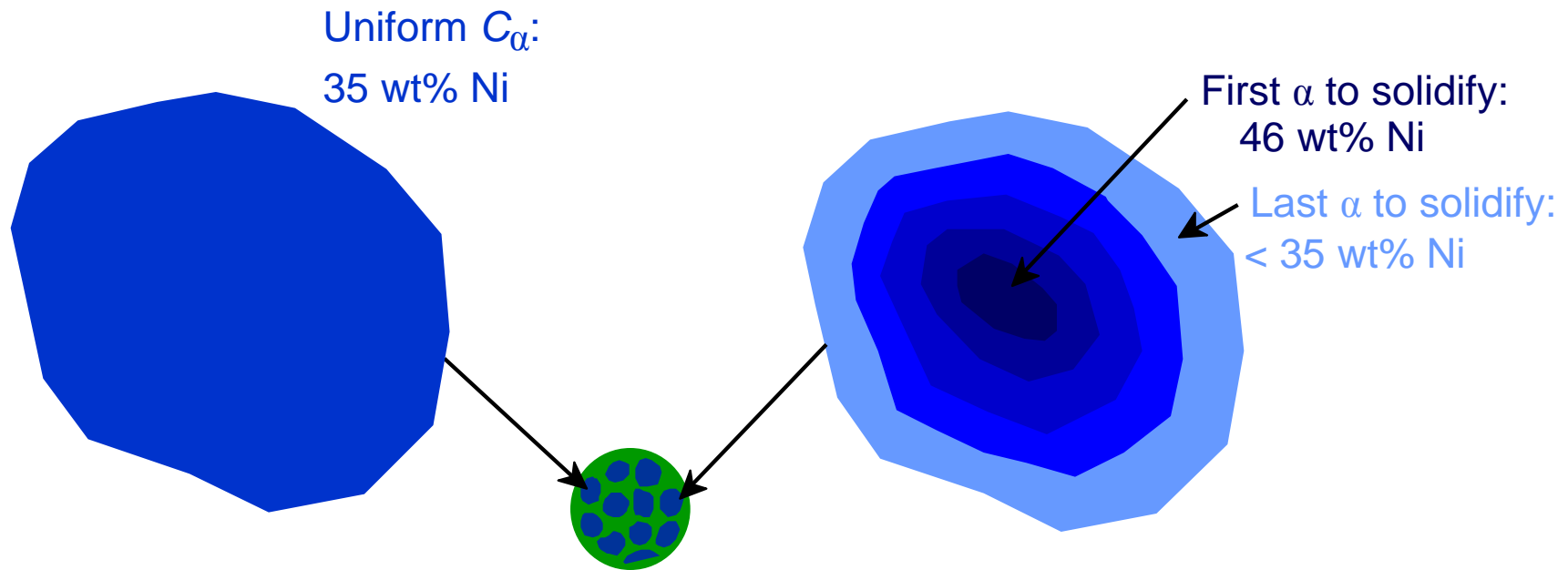


شاخه‌های ریز مغزه‌دار شده در آلیاژ مس-سرب، بزرگنمایی  $\times 100$ .

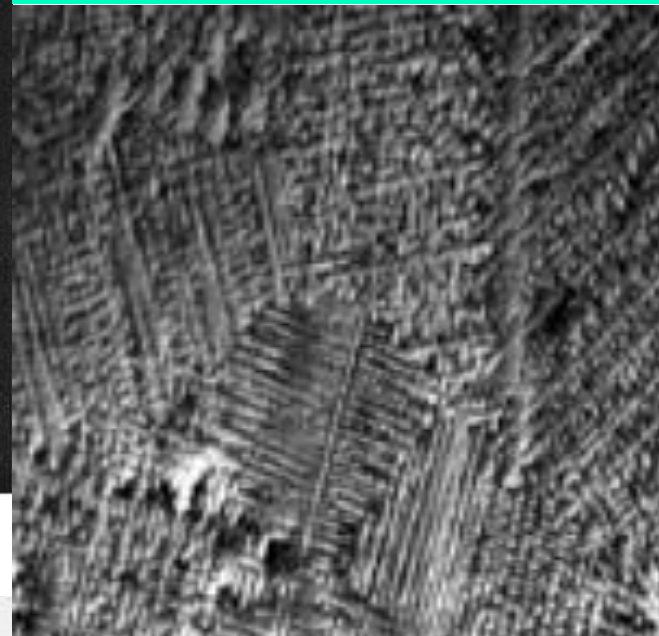
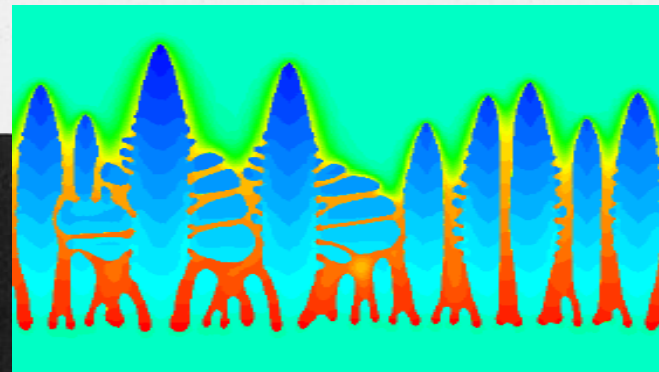
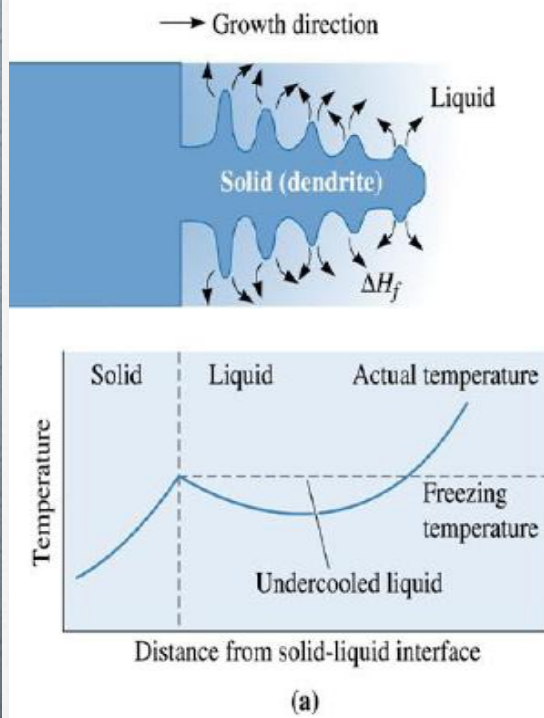


# Cored vs Equilibrium Structures

- $C_\alpha$  changes as we solidify.
- Cu-Ni case: First  $\alpha$  to solidify has  $C_\alpha = 46$  wt% Ni.  
Last  $\alpha$  to solidify has  $C_\alpha = 35$  wt% Ni.
- Slow rate of cooling:  
Equilibrium structure
- Fast rate of cooling:  
Cored structure

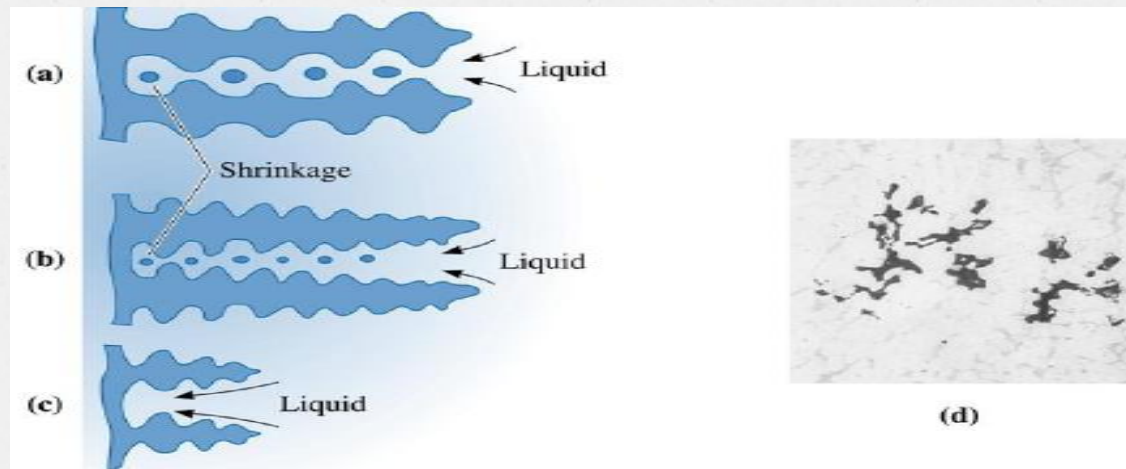


## تشکیل ساختار شاخه ای (دندریتی)



## ویژگی های ساختار میکروسکوپی دندریتی:

- کاهش مقاومت به خوردگی
- کاهش قابلیت شکل پذیری
- ایجاد ذوب های موضعی (کاهش استحکام و مقاومت مکانیکی)



انجماد آهسته  
انجام عملیات حرارتی همگن سازی

راه حل ؟



## همگن سازی

در فلزات ریختگی ساختارهای مغزه دار زیاد دیده می شود. از بحث قبلی در باره منشا ساختارهای مغزه دار مشخص می شود که آخرین جامد تشکیل شده در مرزدانه ها و فضای بین شاخه ای از فلزی با نقطه ذوب پایینتر غنی است. بسته به خواص این فلز، مرزدانه ها ممکن است به صورت صفحه های ضعیف عمل کنند. همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی به صورت جدی نایکنواخت می شوند و در بعضی موارد هم امکان خوردگی بین دانه ای در اثر حمله انتخابی یک محلول خورنده به وجود می آید. بنابراین غالبا ساختار مغزه دار نامطلوب است.

دو روش برای رفع مشکل مغزه بندی وجود دارد. یکی جلوگیری از تشکیل مغزه با آهسته سرد کردن مذاب که این کار باعث تولید دانه های درشت می شود و به زمان بسیار طولانی نیاز دارد. روش مناسب صنعتی یکسان کردن ترمیم یا همگن سازی ساختار مغزه دار با انجام نفوذ در حالت جامد است.

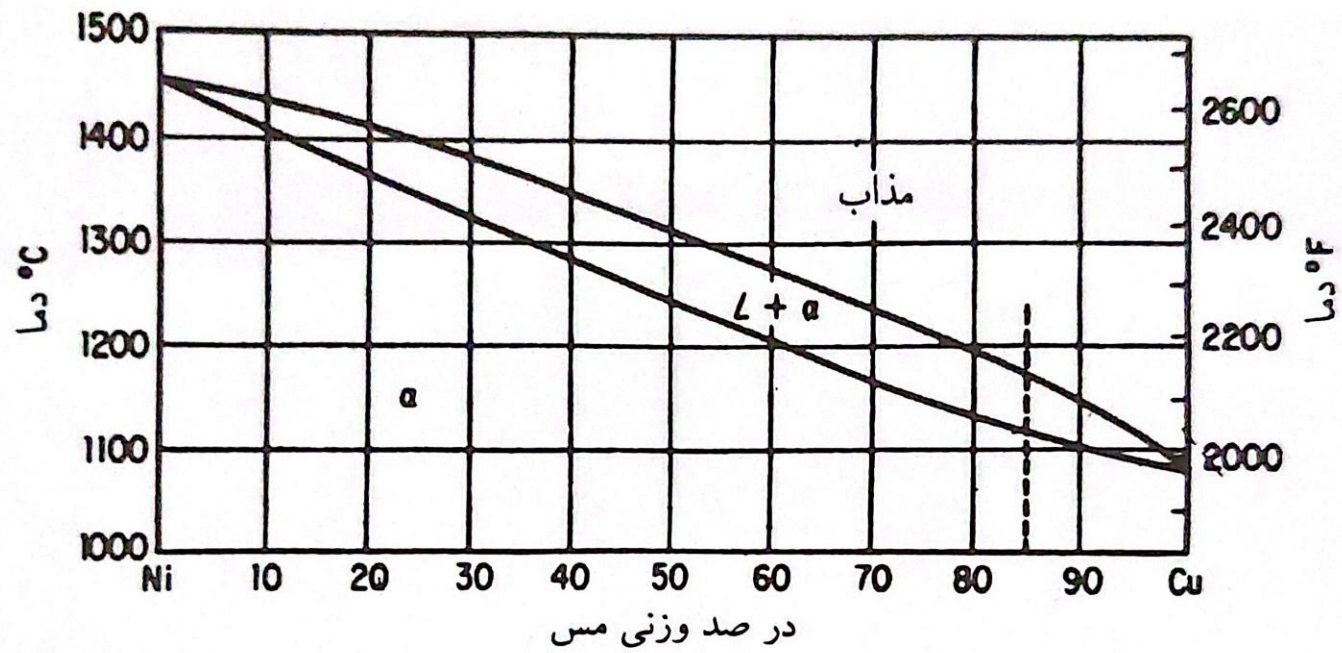


✓ در دمای محیط در اغلب فلزات آهنگ نفوذ بسیار پایین است. اما با گرم کردن آلیاژ تا دمایی زیر خط انجماد نفوذ سریعتر صورت می گیرد و همگن سازی در زمان نسبتاً کوتاهی انجام می شود.

✓ در نمودار تعادلی مس-نیکل آلیاژ  $85 \text{ Cu} - 15 \text{ Ni}$  با خط چین نشان داده شده است. اثر همگن سازی ساختار مغزه دار آلیاژ  $85 \text{ Cu} - 15 \text{ Ni}$  در تصاویر نشان داده شده است.

✓ اولین تصویر ریزساختار آلیاژ ریخته شده در قالب دارای چاشگر را که به سرعت سرد شده نشان می دهد. همانطور که از نمودار پیش بینی می شود اولین جامد تشکیل شده در محور مرکزی شاخه ها غنی از نیکل است. به دلیل سریع سرد شدن تفاوت فاحشی بین مقدار نیکل محور مرکزی شاخه ها و فضای بین شاخه ها وجود دارد. این تفاوت با حکاکی مناسب آشکار می شود.

✓ عکس بعدی همین نمونه را پس از ۳ ساعت گرما دیدن در دمای  $750^\circ \text{C}$  نشان می دهد. نفوذ متقابل اتم های نیکل و مس بین هسته های غنی از نیکل و نقاط غنی از مس تفاوت ترکیب شیمیایی را تا حدودی کاهش داده است.



نمودار تعادلی مس-نیکل.



❖ ریزساختار همین نمونه که به مدت ۹ ساعت در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  گرما داده شده است در عکس سوم دیده می شود. ترکیب کاملاً یکسان شده و شاخه ها ناپدید شده اند. مرزدانه ها به وضوح مشاهده می شود. ذرات سیاه اخال های اکسید مس یا اکسید نیکل است.

❖ شکل چهارم همین آلیاژ را که در قالب گرم به آهستگی سرد شده است نشان می دهد. ساختار شاخه ای درشت تر از آلیاژ ریخته شده در قالب دارای چایشگر است.

❖ در شکل آخر همان نمونه را بعد از ۱۵ ساعت گرما دیدن در  $950^{\circ}\text{C}$  مشاهده می کنیم. حالا ساختار کاملاً همگن شده است. علی رغم آنکه تفاوت ترکیب شیمیایی اولیه در ساختار با شاخه های درشت در مقایسه با ساختار با شاخه های ریز کمتر است برای همگن سازی این ساختار به زمان زیادتری نیاز است، چون اتم های نیکل و مس باید در ساختار درشت به فواصل دورتری نفوذ کنند. در این عملیات باید بسیار دقت کرد تا خط انجماد قطع نشود که در غیر این صورت درمرزدانه ها مذاب تشکیل می شود و شکل و خواص فیزیکی قطعه خراب خواهد شد.



(الف)



(ب)



(ج)



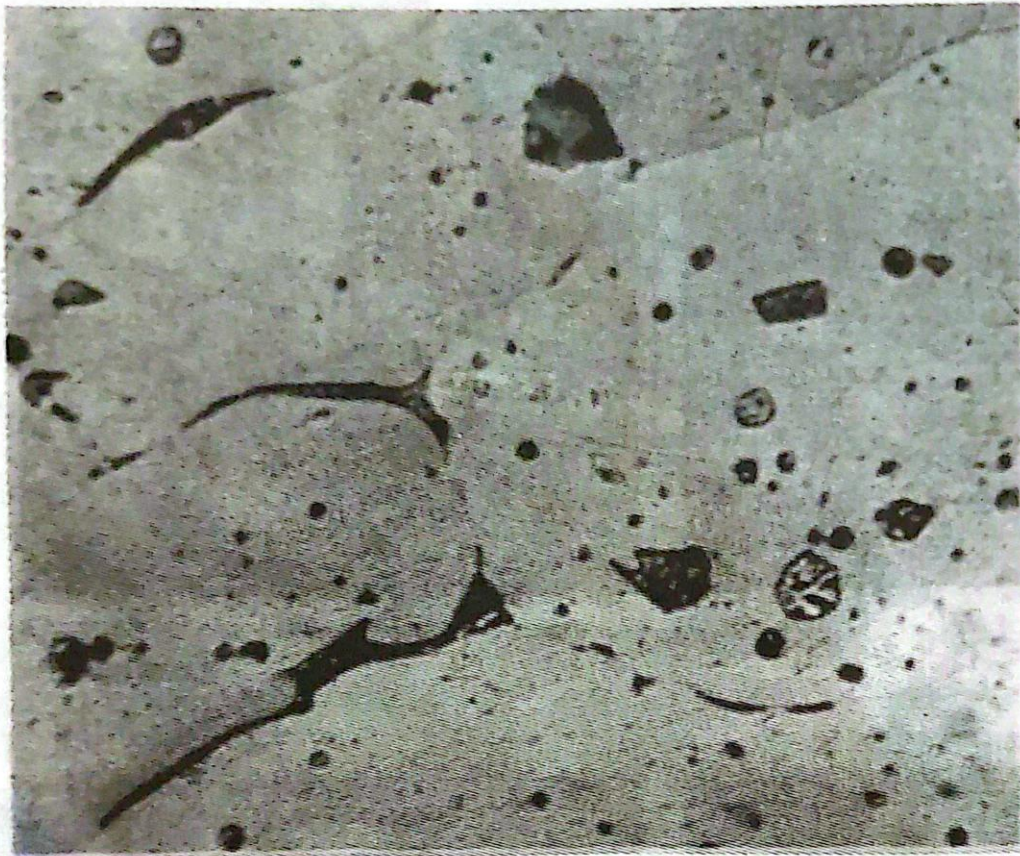
(د)



(هـ)

عکسهایی از ریزساختار آلیاژ  $85\text{Cu} - 15\text{Ni}$ ، (الف) ریخته شده در قالب دارای چاشگر،  $\times 50$ ؛ (ب) ریخته شده در قالب دارای چاشگر، به مدت ۳ ساعت در دمای  $750^\circ\text{C}$  گرما داده شده؛ (ج) ریخته شده در قالب دارای چاشگر، به مدت ۹ ساعت در  $950^\circ\text{C}$  گرما داده شده،  $\times 50$ ؛ (د) ریخته شده در قالب داغ،  $\times 50$ ؛ (هـ) ریخته شده در قالب داغ، سپس به مدت ۱۵ ساعت در دمای  $950^\circ\text{C}$  گرما داده شده.





عکس ریزساختار یک آلیاژ آلومینیم که در حین گرم کردن در مرزدانه‌های آن مذاب تشکیل شده است. بعد از سرد شدن، این قسمت از مرزدانه‌ها به صورت خطوط مرزی تیره دیده می‌شود؛ بزرگنمایی  $\times 100$ .



## خواص آلیاژهای محلول جامد

- عموماً در هر سیستم آلیاژی که یک سری پیوسته از محلول های جامد را تشکیل می دهد اغلب تغییرات خواص واپیچش شبکه بلوری فلز حلال از افزوده شدن فلز محلول ناشی نمی شود.
- مقاومت الکتریکی به واپیچش ساختار شبکه ای وابسته است. چون با افزودن فلز محلول واپیچش شبکه افزایش می یابد و چون هر دو فلز را می توان به عنوان حلال در نظر گرفت بنابراین حداکثر مقاومت الکتریکی باید در میانه گستره ترکیب شینیاپی (۵۰٪-۵۰٪) پدید آید.
- با افزودن مس به نیکل استحکام آلیاژ افزایش می یابد. بنابراین بین مس و نیکل خالص باید آلیاژی با حداکثر استحکام وجود داشته باشد. این آلیاژ حدوداً دو سوم نیکل و یک سوم مس دارد. این آلیاژ بسیار مفید تجاری موندل نام دارد که استحکام و داکتیل بودن را به همراه مقاومت در برابر خوردگی نشان می دهد.
- این حالت در مورد سختی هم صادق است و آلیاژی وجود داد که حداکثر سختی را دارا است. اگرچه لزوماً حداکثر سختی و استحکام کششی نباید در یک ترکیب توأم باشند.

## تغییرات نوع ۱

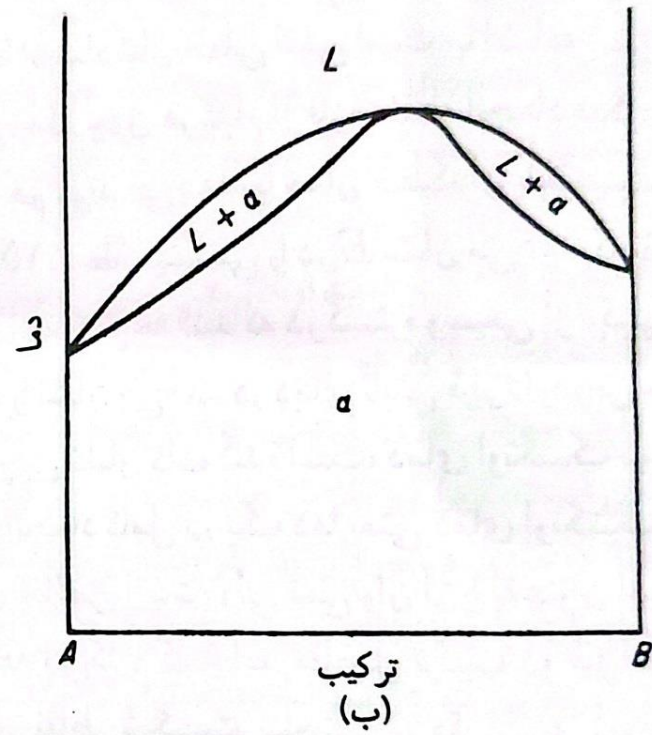
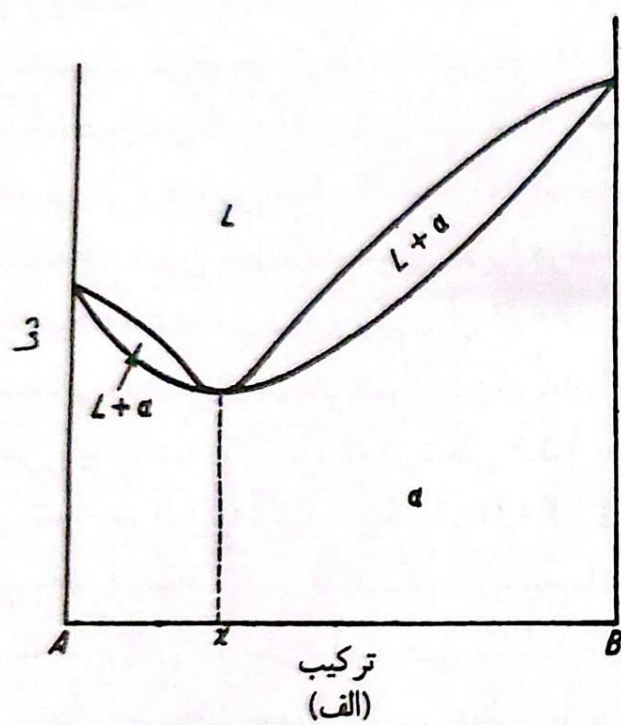
- تمام آلیاژهایی که جزء سیستم نوع ۱ هستند نقطه ذوبی بین نقطه ذوب فلزهای A و B دارند. وجود سیستم آلیاژی که در آن خطه ای انجماد و گداز دارای مینیمم یا ماکزیمم باشد هم ممکن است.
- آلیاژی با ترکیب X را به عنوان فلزی خالص در نظر می گیریم که ترکیب شیمیایی مذاب و جامد آن با هم تفاوت ندارد. آغاز و پایان انجماد در دمایی ثابت و بدون تغییر در ترکیب شیمیایی انجام می پذیرد و منحنی سرد شدن آن خطی افقی خواهد بود. چنین آلیاژهایی آلیاز با ذوب متجانس نامیده می شوند. چون آلیاژ X در آن سری پایین ترین نقطه ذوب را دارد و نمودار تعادلی شبیه نمودار اتکتیک است این آلیاژ را گاهی اتکتیک کاذب می نامند.
- Cu-Au و Ni-Pd مثال هایی از سیستم های آلیاژ هستند که مینیمم دارند. سیستم های دارای ماکزیمم کمیاب هستند و این گونه سیستم های فلزی هنوز شناخته نشده اند.



خواص آلیاژهای تابکاری شده مس-نیکل.

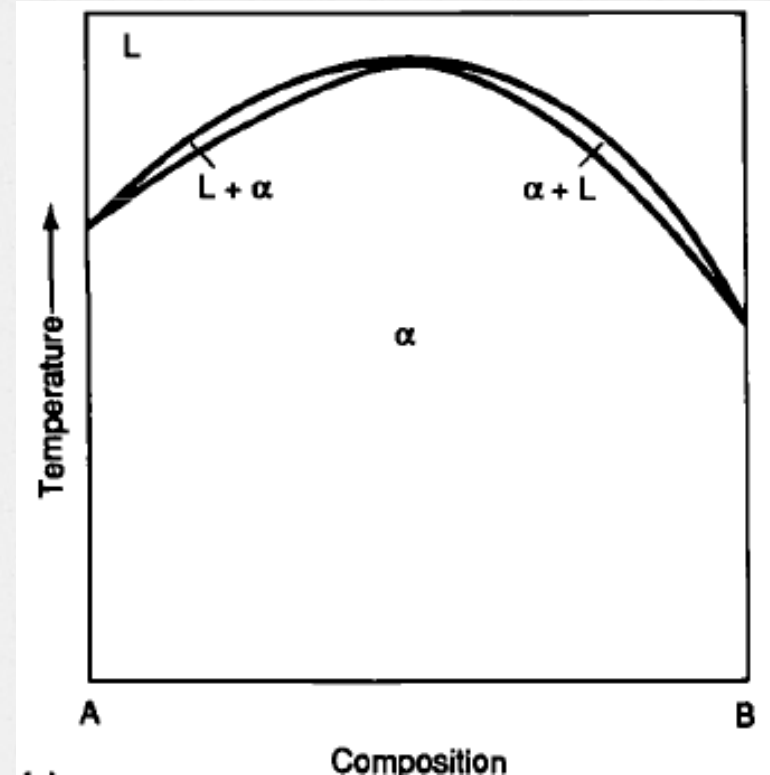
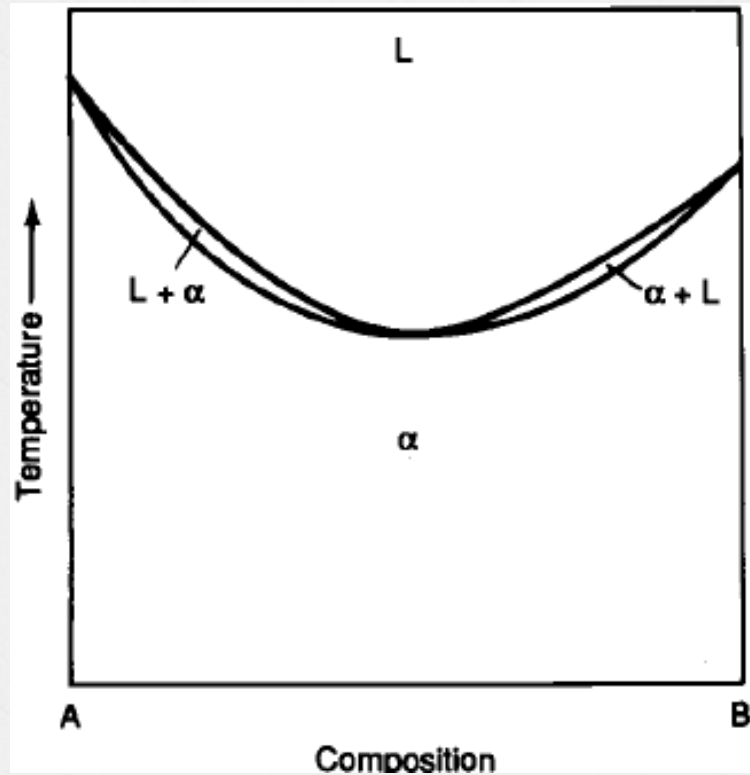
مقاومت الکتریکی $\mu\Omega/\text{cm}^2$	پارامتر شبکه $10^{-8}\text{cm}$	BHN $500\text{ kg}, 10\text{ mm}$	% ازدیاد طول در ۲ اینچ	استحکام کششی psi	% نیکل
۱٫۷	۳٫۶۰۷۳	۳۶	۵۳	۳۰۰۰۰	۰
۱۴	۳٫۵۹۷۵	۵۱	۴۷	۵۳۰۰۰	۱۰
۲۷	۳٫۵۸۷۱	۵۸	۴۳	۳۶۰۰۰	۲۰
۳۸	۳٫۵۷۷۰	۶۷	۴۰	۴۴۰۰۰	۳۰
۴۶	۳٫۵۶۷۹	۷۰	۳۹	۴۸۰۰۰	۴۰
۵۱	۳٫۵۵۹۳	۷۳	۴۱	۵۰۰۰۰	۵۰
۵۰	۳٫۵۵۱۰	۷۴	۴۱	۵۳۰۰۰	۶۰
۴۰	۳٫۵۴۳۲	۷۳	۴۲	۵۳۰۰۰	۷۰
۳۰	۳٫۵۳۵۰	۶۸	۴۳	۵۰۰۰۰	۸۰
۱۹	۳٫۵۲۶۵	۶۱	۴۵	۴۸۰۰۰	۹۰
۶٫۸	۳٫۵۱۷۰	۵۴	۴۸	۴۳۰۰۰	۱۰۰





الف) سیستم محلول جامد دارای مینیمم ب) سیستم محلول جامد دارای ماکزیمم.

## حالت های خاص از نمودار های فازي نوع اول



Cu-Au و Ni-Pd