


اصول و کاربردهای علم مواد در مهندسی مکانیک

فصل هشتم:
آلیاژها
نمودارهای فازی نوع ۱

اصول علم مواد - دکتر فراهناکیان

1 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



مقدمه

- آلیاژ ماده‌ای است با خواص فلزی و تشکیل شده از دو یا چند عنصر شیمیایی که حداقل یکی از آنها فلز باشد.
- اگر سیستم از دو عنصر تشکیل شده باشد، سیستم آلیاژی دوتایی و اگر از سه عنصر تشکیل شده باشد، سیستم سه‌تایی نامیده می‌شود.
- با توجه به اینکه حد حلالیت یک عنصر در عنصر دیگر با توجه به دما تغییر می‌کند، برای پیش‌بینی وجود فازها و مقدار فازها برای یک آلیاژ با ترکیب مشخص، بایستی از نمودارهای تعادلی فازها استفاده نمود.

اصول علم مواد - دکتر فراهناکیان

2 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



تشکیل آلیاژها

- آلیاژ ممکن است همگن یکنواخت یا مخلوط باشد.
- اگر آلیاژ از یک فاز تشکیل شده باشد همگن است.
- اگر آلیاژ از چند فاز تشکیل شده باشد مخلوط است.
- هر ساختار که قابل رؤیت و از لحاظ فیزیکی یکنواخت و ریزساختاری مجزا داشته باشد را **فاز** گویند.
- برخی از فلزات آلوتروپیک هستند. بنابراین وقتی ساختار فلزات آلوتروپیک تغییر کند فاز آنها تغییر می کند.

3

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



- در حالت جامد سه فاز می تواند وجود داشته باشد:

- ۱- فلز خالص
- ۲- فاز آلیاژی (ترکیب واسطه)
- ۳- محلول جامد.

- تمام فلزها در شرایط تعادل نقطه ذوب و انجماد معینی از خود دارند.

4

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



فاز آلیاژی (ترکیب واسطه)

- ترکیب شیمیایی، از آمیختن عناصر تشکیل می‌شود و دارای خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی متفاوت از اجزای تشکیل‌دهنده خود را دارد. اغلب ترکیب‌های شیمیایی، نقطه ذوب مشخصی دارند.
- در نمودارهای تعادلی، فازهای آلیاژی واسطه فازهایی هستند که اجزای شیمیایی آن‌ها واسطه بین دو فلز خالص هستند و ساختار بلوری آن‌ها متفاوت از اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها است. معمول‌ترین فازهای آلیاژی عبارت‌اند از:

- ترکیب بین فلزی یا ظرفیتی
- ترکیب بین نشینی
- ترکیب الکترونی

5

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



فاز آلیاژی (ترکیب واسطه)

الف) ترکیب بین فلزی یا ظرفیتی:

- بین فلزهای غیرمشابه از لحاظ شیمیایی و طبق قوانین ظرفیت شیمیایی، ترکیب ایجاد می‌شوند.
- این ترکیب‌ها، پیوند قوی یونی یا کووالانسی دارند و خواص آن‌ها غیرفلزی است.
- رسانندگی الکتریکی و شکل‌پذیری آن‌ها ضعیف است و ساختار بلوری پیچیده دارند.
- مثل: Cu_2Se , MgSn , Mg_2Pb , CaSe

6

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



فاز آلیاژی (ترکیب واسطه)

- (ب) ترکیب بین نشینی:
- این ترکیب بین فلزهای انتقالی مانند اسکاندیوم، تیتانیوم، تانتالیوم، تنگستن و آهن همراه با H و N و C و B و O به وجود می‌آید.
- لغت بین نشینی یعنی این پنج عنصر که اتم‌های کوچکی دارند در فضای ساختار شبکه فلزها قرار می‌گیرند.
- ترکیب‌های بین نشینی فلزی، ترکیب‌های فوق‌العاده سخت هستند و نقطه ذوب بالا دارند.
- مثل TiH و CrN , W_2C , Fe_3C , Fe_4N , TaC , TiC .
- این ترکیب‌ها در سخت کردن فولاد مفید بوده و در ابزارهای کاربردی سمانته شده به کار می‌روند.

7

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



ج) ترکیب الکترونی:

نمودارهای تعادلی Cu , Ag , Fe و Ni با فلزهای Cd , Mg , Zn , Sn و Al به هم شباهت دارد و تعدادی از فازهای واسطه با ساختار شبکه‌ای مشابه در آنها تشکیل می‌شوند.

این فازهای واسطه به همراه ترکیب‌هایی پیدا می‌شوند که در سیستم‌های خود نسبت الکترون‌های ظرفیتی به اتم‌هایشان مقداری معین است و به همین دلیل به آن‌ها ترکیب‌های الکترونی گفته می‌شود.

- مثال در $AgZn$ ، نقره یک الکترون ظرفیتی و روی دو الکترون ظرفیتی دارند. دو اتم موجود روی هم سه الکترون ظرفیتی دارند یعنی نسبت الکترون ظرفیتی به اتم، ۳ به ۲ است.
- مثال دیگر Cu_9Al_4 است، مس یک الکترون ظرفیتی و آلومینیوم سه الکترون ظرفیتی دارند یعنی نسبت الکترون ظرفیتی به اتم، ۲۱ به ۱۳ است. بسیاری از ترکیب‌های الکترونی خواص مشابه محلول‌های جامد دارند، داکتیل هستند و سختی کمی دارند.

8

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



محلول جامد

- هر محلول از حلال و حل شونده تشکیل شده است مانند آب و نمک. مقدار حل شونده معمولاً تابعی از دما بوده و با افزایش دما افزایش می‌یابد.
- محلول سه حالت غیراشباع، اشباع و فوق اشباع دارد. هم زدن یا سریع سرد کردن، باعث ایجاد محلول فوق اشباع می‌شود.
- حالت فوق اشباع غیر پایدار است و طی زمان کافی محلول با دفع مقدار اضافه محلول اشباع می‌شود.
- محلول جامد، متشکل از دو اتم بود و در یک نوع شبکه فضایی به یکدیگر ملحق شده‌اند. معمولاً اختلاف زیادی در حد حلالیت در حالت جامد و مایع وجود دارد.
- محلول‌های جامد بر دو نوع محلول جامد جانشینی و محلول جامد بین نشینی می‌باشند.

9

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



محلول جامد جانشینی

- اتم‌های ماده حل شونده جایگزین اتم‌های ماده حلال در ساختار شبکه می‌شود. چند عامل مقدار حلالیت را در سیستم‌های آلیاژی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۱- **ساختار بلوری:** دو عنصر در صورتی می‌توانند کامل در هم حل شوند که ساختار بلوری یکسان دارند. مثل نیکل و مس که هر دو FCC هستند.

۲- **اندازه نسبی:** برای تشکیل محلول جامد، اختلاف شعاع اتمی حلال و حل شونده باید کمتر از ۱۵ درصد باشد. اگر اختلاف بین ۸ تا ۱۵ درصد باشد حلالیت کاهش می‌یابد و بالاتر از ۱۵ درصد محلول جامد محدود تشکیل می‌شود. آنتیموان و بیسموت که هر دو HCP هستند و اختلاف شعاع آن‌ها ۷ درصد است، کامل در هم حل می‌شوند.

سرب و نقره هر دو FCC هستند و اختلاف شعاع ۲۰ درصد است. سرب در نقره ۱/۵ درصد حل می‌شود و نقره در سرب ۰/۱ درصد حل می‌شود.

10

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



محلول جامد جانشینی

۳- **میل به ترکیب شیمیایی:** هر مقدار میل ترکیب شیمیایی بیشتر باشد حلالیت کمتر و تمایل به تشکیل ترکیب شیمیایی بیشتر است. هرچقدر فاصله در جدول تناوبی بیشتر باشد میل ترکیب شیمیایی شدیدتر است.

۴- **ظرفیت نسبی:** اگر ظرفیت شیمیایی حل شونده و حلال مغایر باشد تعداد الکترون‌های ظرفیتی تغییر خواهد کرد. ساختارهای بلوری به کاهش نسبت الکترونی حساس‌ترند تا افزایش آن، یعنی فلز ظرفیت بالا مقدار کمتری از فلز ظرفیت پایین را حل می‌کند.

آلومینیوم و نیکل هر دو FCC هستند و اختلاف اندازه اتمی ۱۴ درصد است. نیکل ۵ درصد آلومینیوم حل می‌کند. اما آلومینیوم ۰/۰۴ درصد نیکل حل می‌کند. ساختار شبکه‌ای محللول جامد، اساساً همان ساختار حلال است با اندکی تفاوت در پارامتر طول و عرض شبکه. اگر ساختار اتم حل شونده بزرگ‌تر از حلال باشد ساختار منبسط می‌شود و بالعکس.

11

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



• محلول جامد بین نشینی


• در این نوع محللول، اتمی با شعاع کوچک‌تر در فضای موجود ساختار شبکه اتم‌های حلال که بزرگ‌تر هستند، قرار می‌گیرد. چون فضاهای موجود در ساختار فلزات محدود هستند فقط اتم‌هایی که شعاع اتمی آن‌ها کوچک‌تر از یک آنگستروم است، ایجاد محللول بین نشینی می‌کنند. این اتم‌ها عبارت‌اند از هیدروژن (۰/۴۶ آنگستروم)، بور (۰/۹۷ آنگستروم)، کربن (۰/۷۷ آنگستروم)، نیتروژن (۰/۷۱ آنگستروم) و اکسیژن (۰/۶۰ آنگستروم).

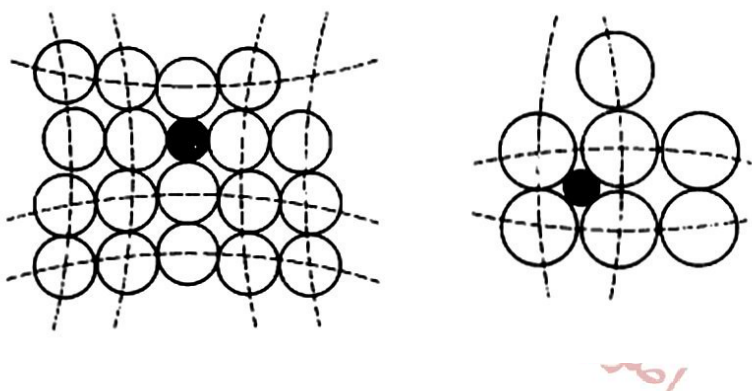
• اگر تعداد اتم‌های حل شونده کم باشند محللول جامد بین نشینی ایجاد می‌شود و در صورتی که از حد اشباع بگذرد ترکیب بین نشینی ایجاد می‌شود. هنگام تشکیل این نوع محللول ساختار شبکه منبسط می‌شود.

• محللول‌های جامد بین نشینی حلالیت محدودی دارند و از اهمیت کمی برخوردارند، البته استثناهای بزرگی مثل کربن در آهن وجود دارد. حلالیت کربن در آهن (FCC) ۲ درصد است در حالی که در آهن α ، (BCC) ۰/۰۲۵ درصد است.


12

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1


 در هر دو نوع محلول جامد، در اطراف اتم حل شونده، ساختار دچار واپیچش شده که این واپیچش بر حرکت نابجاییها در صفحه لغزشی اثر گذاشته و استحکام را افزایش می دهد.



13 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1


 ساختار آلیاژ

ساختار آلیاژ

```

    graph TD
      A[ساختار آلیاژ] --> B[همگن]
      A --> C[مخلوط]
      B --> D[محلول جامد]
      B --> E[فاز آلیاژی]
      D --> F[جانشینی]
      D --> G[بین نشینی]
      E --> H["(ترکیب واسطه)"]
      H --> I[بین فلزی]
      H --> J[بین نشینی]
      H --> K[الکترونی]
      C --> L[هر ترکیب از فازهای جامد]
      L --> M[فلز خالص]
      L --> N[محلول جامد]
      L --> O[آلیاژ واسطه]
  
```

14 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



نمودارهای فازی

- در صنعت، بیشتر فلزاتی که به کار می‌رود به صورت آلیاژ (ترکیب دو یا چند عنصر) هستند.
- با توجه به اینکه حد حلالیت یک عنصر در عنصر دیگر با توجه به دما تغییر می‌کند، برای پیش‌بینی وجود فازها و مقدار فازها برای یک آلیاژ با ترکیب مشخص، بایستی از نمودارهای تعادلی فازها استفاده نمود

15

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



روش‌های تجربی برای تشکیل نمودار فازی

- **تحلیل گرمایی:** این روش یک روش آزمایشگاهی قدیمی است. برای تعیین خطوط تعادل، با انتخاب نمونه‌هایی با ترکیب‌های مختلف، تغییرات دما نسبت به زمان سرد یا گرم کردن، آرام و پیوسته اندازه‌گیری می‌شود. منحنی سرد شدن در هنگام تغییر فاز تغییر شیب می‌دهد زیرا با تغییر فاز گرما ایجاد می‌شود. با تفسیر منحنی سرد شدن، تغییر فازها تشخیص داده می‌شود.
- **متالوگرافی:** این روش شامل گرم کردن نمونه در دماهای مختلف و سریع سرد کردن و بررسی نمونه زیر میکروسکوپ است. این روش نیاز به تفسیر دارد، زیرا در هنگام سرد کردن سریع نیز ممکن است تغییر فاز اتفاق بیفتد.
- **پراش پرتو X:** در این روش، ابعاد شبکه اندازه‌گیری می‌شود و با تغییر ساختار بلوری به وقوع تغییر فاز پی برده می‌شود. این روش ساده و دقیق است.

16

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



انواع نمودارهای دوتایی

حالت مایع کاملاً محلول

- در حالت جامد کاملاً محلول اند.
- در حالت جامد غیر محلول اند- واکنش اوتکتیک
- در حالت جامد مقداری محلول اند- واکنش اوتکتیک
- فاز میانی یا ذوب متجانس تشکیل می دهد.
- واکنش پری تکتیک
- در حالت مذاب مقداری محلول اند- واکنشی مونوتکتیک

17

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1




اجزایی که در حالت مذاب و جامد نامحلول اند.

- تبدیل های در حالت جامد:
- تغییرات آلوتروپیک
- منظم- نامنظم
- واکنش اوتکتوئید
- واکنش پریکتوئید
- در نمودارهای فازی معمولاً دما بر حسب درجه سلسیوس بر محور عمودی و ترکیب شیمیایی آلیاژ بر حسب درصد وزنی بر روی محور افقی نشان داده می شوند.

18

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

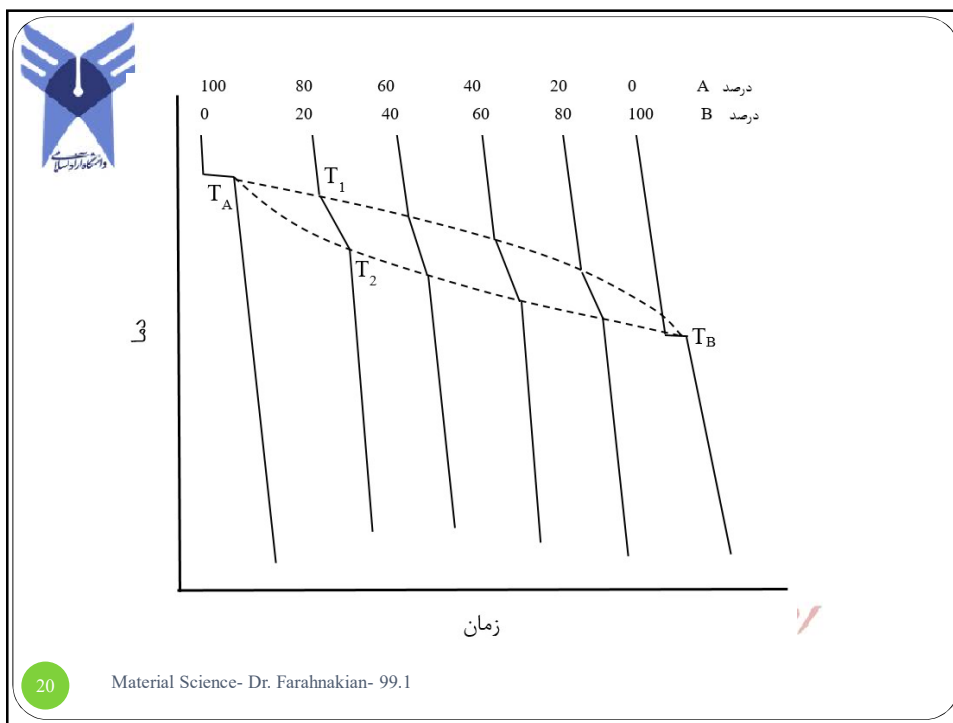


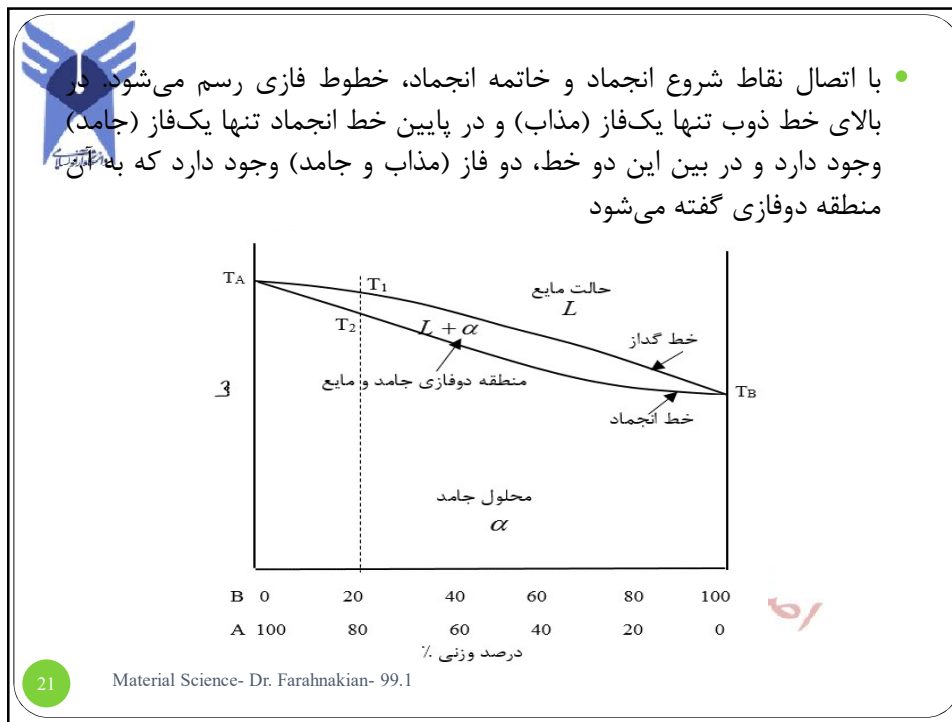
نمودار فازی نوع ۱


- در نمودار فازی نوع ۱، دو فلز در حالت‌های مذاب و جامد کاملاً در هم محلول‌اند.
- دو فلز A و B را در نظر بگیرید که در حالت مایع و حالت جامد در هم کامل حل می‌شوند.
- دو فلز A و B خط انجماد افقی دارند ولی بقیه ترکیب‌های A و B محلول جامد هستند و منحنی انجماد آن‌ها در نقطه T1 و T2 تغییر شیب دارند.
- T1 نشانگر شروع انجماد و T2 خاتمه انجماد است.

اصول علم مواد - دکتر فراهناکیان

19 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1





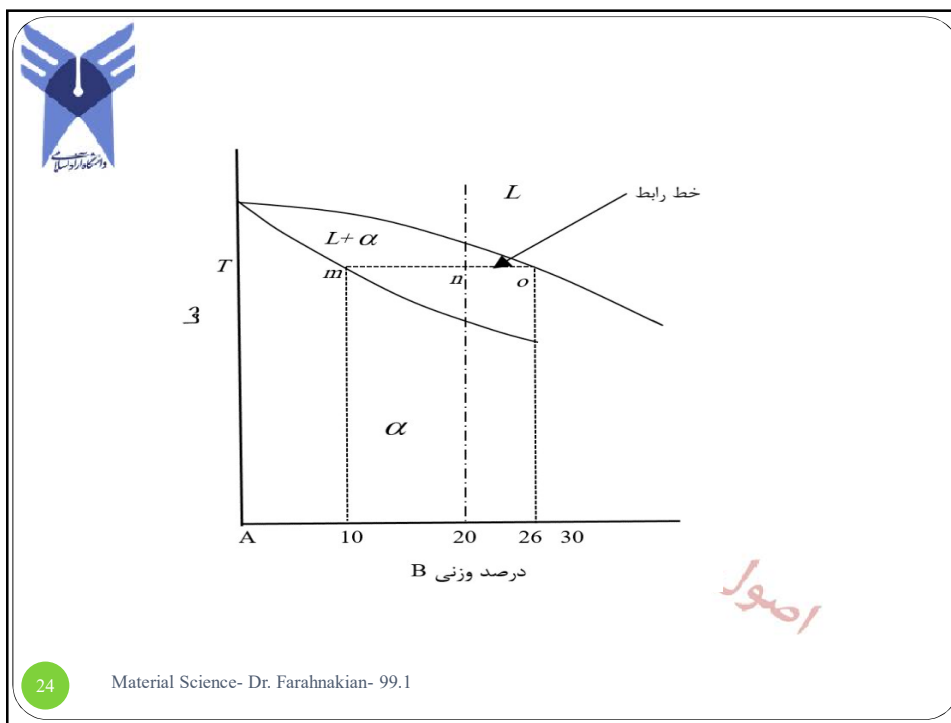


• مثال: آلیاژ 80A-20B در دمای T1، یک آلیاژ در منطقه دوفازی است که با رسم خط رابط، ترکیب شیمیایی فاز جامد و مایع در این دما مشخص می‌شود.

• نقطه محل تقاطع خط رابط با خط انجماد ترکیب شیمیایی فاز جامد α را نشان می‌دهد که 90A-10B است و به همین صورت محل تقاطع خط رابط با خط مذاب ترکیب شیمیایی فاز مایع را نشان می‌دهد که برابر است با 74A-26B

اصول علم مواد - دکتر فراهناکیان

23 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1





قانون ۲ مقدار نسبی هر فاز (قانون اهرم)

- خط افقی توسط خط عمودی به دو بخش تقسیم می‌شود که طول هر قسمت با مقدار فازهای موجود رابطه عکس دارد و به همین دلیل به آن قانون اهرم گفته می‌شود.
- خط رابط برای آلیاژ 80A-20B نشان داده شده است. اگر تمام طول خط m_o ، ۱۰۰ در نظر گرفته شود، قانون اهرم برای به دست آوردن مقدار فاز جامد و مایع به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$L\% = \frac{mn}{mo} = \frac{20-10}{26-10} = \frac{10}{16} = 62.5\%$$

$$\alpha\% = \frac{no}{mo} = \frac{26-20}{26-10} = \frac{6}{16} = 37.5\%$$

25

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



سرد کردن تعادلی یک آلیاژ محلول جامد

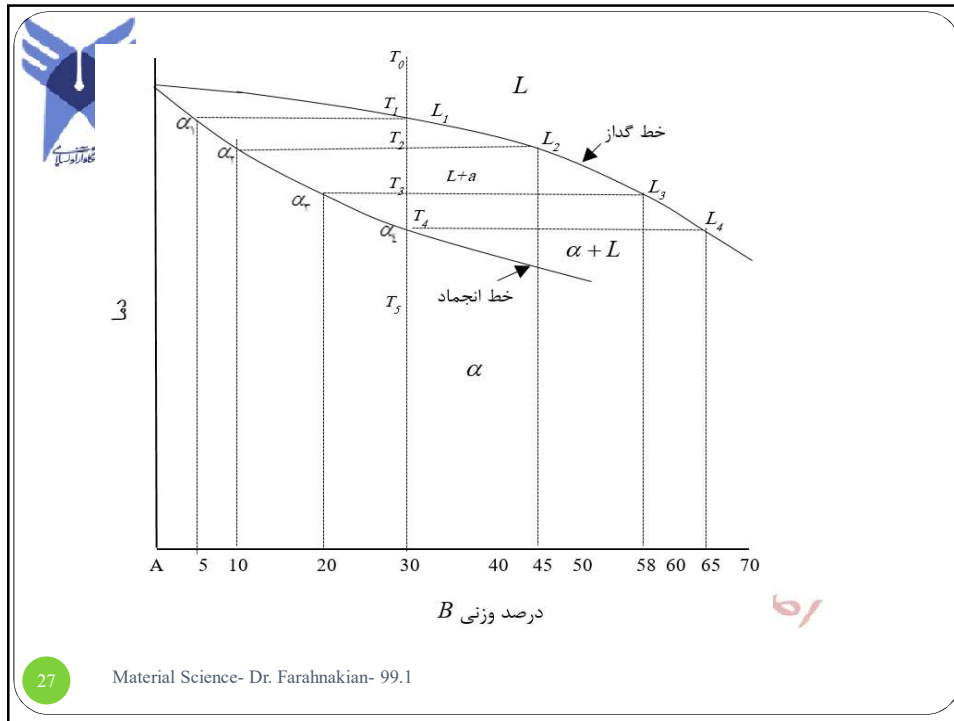
- سرد کردن تعادلی آلیاژ را در نظر بگیرید. منظور از سرد کردن تعادلی این است که آلیاژ به صورت بسیار آهسته سرد شود تا نفوذ اتفاق بیفتد و فازها در هر لحظه همگن باشند.

این آلیاژ در دمای T_1 مذاب همگن تک فاز است و تا رسیدن به دمای T_1 به صورت مذاب همگن باقی می‌ماند. در نقطه T_1 اولین جوانه‌های جامد تشکیل می‌شوند. فرض کنید ۱ درصد جوانه‌های جامد α_1 و ۹۹ درصد مذاب L_1 وجود دارد، ترکیب شیمیایی α_1 و L_1 به صورت زیر است:

$$T_1 \Rightarrow \alpha_1(95A - 5B) = 1\%, \quad L_1(69A - 31B) = 99\%$$

26

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



با ادامه سرد کردن، در دمای T_p ، مقدار فاز جامد افزایش می‌یابد و ترکیب شیمیایی فاز جامد و مذاب تغییر می‌کند، برای رسیدن به حالت تعادل در T_p کل ترکیب فاز جامد باید α_p باشد که مستلزم نفوذ اتم‌های B به درون هسته غنی از A است. نه تنها اتم‌های B جامد تازه تشکیل شده بلکه اتم‌های متعلق به مذاب نیز باید در نفوذ شرکت کنند. این حالت تنها مواقعی امکان‌پذیر است که سرعت سرد شدن بسیار آهسته باشد تا نفوذ همپای رشد بلور صورت گیرد. ترکیب شیمیایی و مقدار فازهای α_p و L_p در دمای T_p به صورت زیر است:

$$T_p \Rightarrow \alpha_p(9.4A - 1.0B) = \frac{45-30}{45-10} \times 100 = 43\% \quad L_p(55.4 - 45B) = \frac{30-10}{45-10} \times 100 = 57\%$$

اصول علم



با کاهش دما، محلول جامد به رشد خود ادامه می‌دهد و مقدار مذاب کاهش می‌یابد. ترکیب شیمیایی و مقدار فازهای α_p و L_p در دمای T_p به صورت زیر است:

$$T_p \Rightarrow \alpha_p (80A - 20B) = \frac{58-30}{58-20} \times 100 = 73\%, \quad L_p (42A - 58B) = \frac{30-20}{58-20} \times 100 = 27\%$$

سرانجام در نقطه T_i در خط انجماد، آخرین قطرات مذاب L_i در مرز دانه‌ها منجمد می‌شود. فرض کنید در این دما، ۹۹ درصد جوانه‌های جامد α_i و ۱ درصد مذاب L_i وجود دارد، ترکیب شیمیایی α_i و L_i به صورت زیر است:

$$T_i \Rightarrow \alpha_i (70A - 30B) = 99\%, \quad L_i (35A - 65B) = 1\%$$

اصول

29

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



مغزه‌بندی و همگن‌سازی

- چون سرد کردن بسیار آهسته امکان‌پذیر نیست و آهنگ نفوذ در حالت جامد نیز کم است، امکان یکنواخت شدن بسیار کم است. و جامد نهایی شامل ساختاری مغزه دار است که در قسمت مرکزی آن فلز با نقطه ذوب بالا و پوسته از ترکیب زود ذوب‌تر احاطه می‌شود.
- شرایط فوق را مغزه‌بندی یا جدانشینی شاخه‌ای گویند. به عبارت دیگر، مرز دانه‌ها از فلز زود ذوب غنی است. هرچقدر سرعت سرد کردن بیشتر باشد، اثرهای فوق شدیدتر می‌شود.



61

30

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



- بخصوص اگر فلز زود ذوب‌تر، استحکام پایینی داشته باشد، شکست در مغزه دانه‌ها اتفاق می‌افتند و در بعضی موارد هم، خوردگی بین‌دانه‌ای اتفاق می‌افتد.
- دو روش برای از بین بردن ساختار مغزه بندی امکان‌پذیر است:
 - روش اول، آرام سرد کردن مذاب که باعث درشت‌دانه شدن فلز می‌شود و امر مناسبی نیست.
 - روش مناسب آن است که عملیات حرارتی همگن‌سازی بر روی قطعه پس از ریخته‌گری انجام شود. در همگن‌سازی، آلیاژ تا دمایی زیرخط انجماد گرم شود، در این صورت نفوذ در حالت جامد با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد و ترکیب شیمیایی یکنواخت شده و ساختار مغزه بندی از بین می‌رود. در دانه‌های درشت برای همگن‌سازی زمان و دمای بیشتری نیاز است، چون که اتم‌های فلز در وسط مغزه باید فاصله بیشتری را طی کنند.

31 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



خواص آلیاژهای محلول جامد

- در محلول‌های جامد، خواص فیزیکی و مکانیکی در میانه گستره ترکیب شیمیایی به علت بیشترین واپیچش، بیشترین تغییرات را دارند.
- به‌طور مثال سیستم آلیاژی مس و نیکل را در نظر بگیرید. در سیستم نیکل-مس چون هر دو به‌طور کامل در هم حل می‌شوند هر دو را می‌توان حلال در نظر گرفت. در میانه گستره ترکیب شیمیایی به علت حداکثر واپیچش شبکه، بیشترین مقاومت الکتریکی را دارد.
- همچنین سختی نیکل نیز باید با افزایش مس افزایش یابد. در سیستم مس-نیکل، ترکیب آلیاژی ۶۰ درصد نیکل - ۴۰ درصد مس حداکثر استحکام کششی را دارا است که در صنعت آن را **آلیاژ مونل** گویند.
- آلیاژ مونل استحکام و داکتیل بودن را به همراه مقاومت به خوردگی بالا دارد و به همین دلیل در صنایع شیمیایی و پالایشگاهی مصرف بالایی دارد.

32 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

