

## اصول و کاربردهای علم مواد در مهندسی مکانیک

فصل هشتم:  
آلیاژها  
نمودارهای فازی نوع ۲

اصول علم مواد - دکتر فراهناکیان

1 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1




## نمودار فازی نوع ۲

- نمودار فازی نوع ۲، دو فلز در حالت مذاب کاملاً در هم محلول و در حالت جامد کاملاً نامحلول هستند.
- به این نکته باید توجه کرد که هیچ دو فلزی کاملاً در هم نامحلول نیستند ولی در بعضی موارد آن قدر حد حلالیت ناچیز است که می شود آن ها را نامحلول در نظر گرفت.
- نقطه انجماد هر جسم خالص با افزودن جسم دوم کاهش می یابد به شرط آنکه ماده افزوده شده در حالت مایع محلول و در حالت جامد نامحلول باشد.

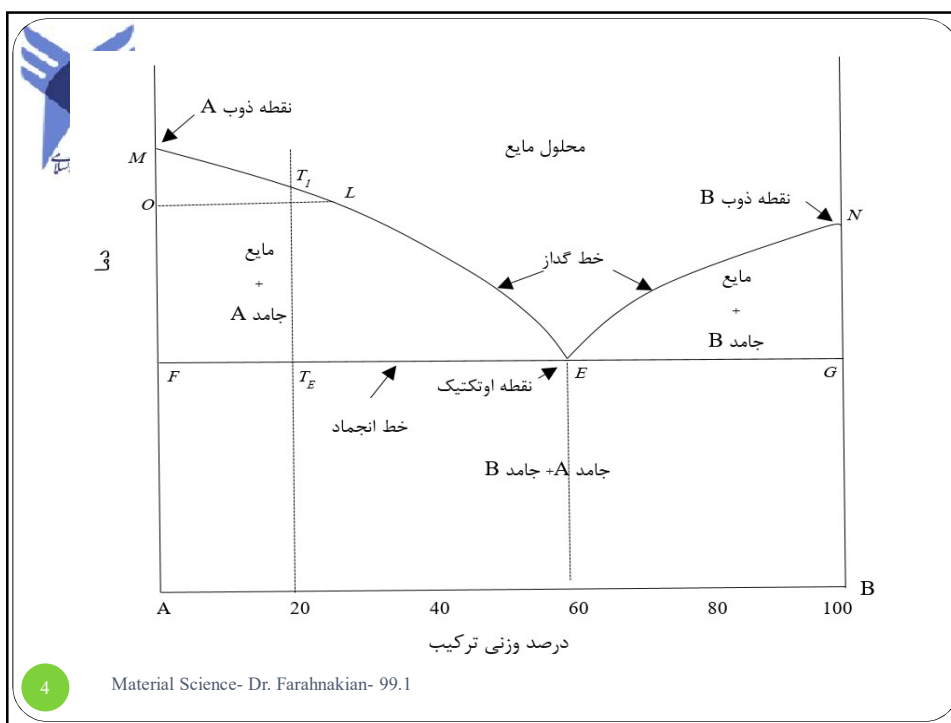
اصول علم مواد - دکتر فراهناکیان

2 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



- در شکل آلیاژ 100A-0B را در نظر بگیرید، در نقطه M مذاب منجمد می‌شود.
- در آلیاژ 90A-10B ، بعد از رسیدن به خط مذاب، با کاهش حد حلالیت، اولین جوانه‌های فلز A پدیدار می‌شود و مذاب از B غنی‌تر می‌شود.
- با کاهش دما، جوانه‌های A رشد می‌کنند و مذاب از B غنی‌تر می‌شود تا آنجا که در دمای  $T_E$  مذاب مایه از B باید جامد شود.
- همین اتفاق برای دیگر آلیاژهای سمت چپ نقطه E اتفاق می‌افتد.

3 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1





- به همین صورت آلیاژ 0A-100B را در نظر بگیرید، در نقطه N مذاب منجمد می شود.
- در آلیاژ 10A-90B ، بعد از رسیدن به خط مذاب، اولین جوانه های B پدیدار می شود و مذاب غنی تر از A می شود.
- با کاهش دما، جوانه های B رشد کرده و مذاب از A غنی تر می شود تا آنجا که در نقطه  $T_E$  مذاب غنی از A باید جامد شود.
- همین اتفاق برای دیگر آلیاژهای سمت راست نقطه E اتفاق می افتد.


5 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



### آلیاژ اوتکتیک

- حال آلیاژ 40A-60B را در نظر بگیرید، تا قبل از دمای  $T_E$  مذاب وجود دارد و بعد از رسیدن به نقطه  $T_E$  مذاب باید به جامد تبدیل شود.
- فرض کنید، اولین ذرات A جامد شود، محلول مذاب از B غنی می شود و ترکیب مذاب به سمت راست نقطه E متمایل می شود، پس باید ذرات B منجمد شوند. حال مذاب غنی از A می شود و ترکیب مذاب به سمت چپ نقطه E متمایل می شود.
- بنابراین در دمای ثابت، مذاب متناوباً به صورت فلز خالص A و فلز خالص B منجمد می شود. در نتیجه جامد تشکیل شده، مخلوط فوق العاده ظریفی است که تنها زیر میکروسکوپ قابل مشاهده است. و به این مخلوط، مخلوط اوتکتیک گویند.


6 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



تبدیل مذاب با ترکیب E به دو جامد را واکنش اوتکتیک گویند. مخلوط اوتکتیک پایین‌ترین دمای ذوب را در نمودار فازی دارد.


جامد B + جامد A → مذاب

$L \xrightarrow{T_E} \alpha + \beta$



اصول علم

7 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



- سرد شدن تعادلی آلیاژ هیپو اوتکتیک 80A-20B را در نظر بگیرید.
- تا قبل از نقطه T1 آلیاژ، مذاب است و پس از کاهش دما در نقطه T2 اولین جوانه‌های فلز A تشکیل می‌شود و با ادامه سرد کردن، مقدار جامد فلز A بیشتر شده و مذاب از B غنی می‌شود، تا اینکه در دمای  $T_E$  ترکیب مذاب به ترکیب اوتکتیک می‌رسد و در این دما مذاب باقی‌مانده به جامد اوتکتیک تبدیل می‌شود.


ترکیب شیمیایی و مقدار فاز جامد و مذاب در دمای  $T_1$  به صورت زیر است.

$$T_1 \Rightarrow A = \frac{10}{30} \times 100 = 33\% \quad L_1(70A - 30B) = \frac{20}{30} \times 100 = 67\%$$

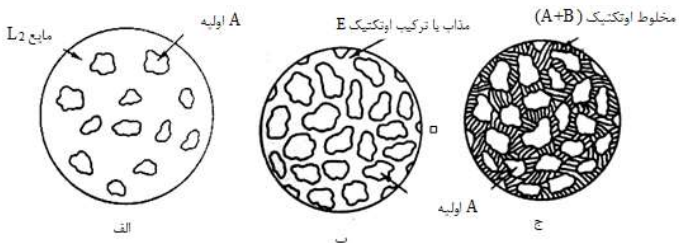
در دمای  $T_{E+\epsilon}$ ، ترکیب شیمیایی و مقدار فاز جامد و مذاب به صورت زیر است.

$$T_{E+\epsilon} \Rightarrow A = \frac{40}{70} \times 100 = 57\% \quad L_E(40A - 60B) = \frac{20}{70} \times 100 = 29\%$$

8 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1




• پس در دمای  $T_{E-\varepsilon}$ ، مقدار مذاب باقیمانده، به جامد اوتکتیک تبدیل می‌شود. بنابراین پس از انجماد، ریزساختار شامل ۶۷ درصد دانه‌های A اولیه و ۳۳ درصد مخلوط اوتکتیک (A+B) خواهد بود.



الف      ب      ج

مذاب L2      A اولیه      مذاب یا ترکیب اوتکتیک E      مخلوط اوتکتیک (A+B)

9      Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1




• حال آلیاژ هایپر اوتکتیک 10A-90B را در نظر بگیرید. تا قبل از خط مذاب، آلیاژ در حالت مذاب بوده و با کاهش دما، اولین جوانه‌های فلز B تشکیل می‌شود و مذاب از فلز A غنی می‌شود. با کاهش بیشتر دما، دانه‌های B بزرگ‌تر شده تا در دمای  $T_E$  مذاب باقیمانده به مخلوط اوتکتیک جامد تبدیل می‌شود. در دمای  $T_{E+\varepsilon}$  ترکیب شیمیایی و مقدار فاز جامد و مذاب بصورت زیر است:

• بنابراین در دمای محیط، آلیاژ شامل ۷۵ درصد دانه‌های اولیه B که در ۲۵ درصد مخلوط اوتکتیک (A+B) محیط شده، می‌باشد.

$$T_{E+\varepsilon} \Rightarrow B = \frac{30}{40} \times 100 = 75\%, \quad L_E (\varepsilon \cdot A - 60 \cdot B) = \frac{10}{40} \times 100 = 25\%$$

10      Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



### نمودار فازی نوع ۳

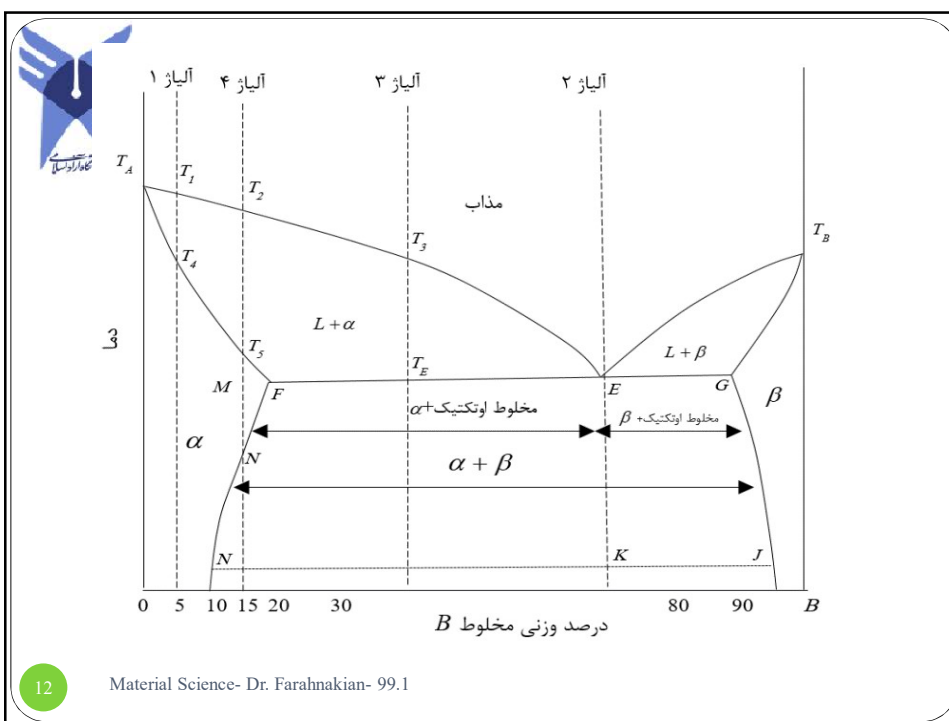
- در این حالت، دو فلز در حالت مذاب کاملاً محلول و در حالت جامد فقط تا حدودی محلول هستند. این نوع رایج‌ترین و مهم‌ترین سیستم آلیاژی است.
- نقاط ذوب فلزهای خالص  $T_A$  و  $T_B$  می‌باشند. چون این دو فلز در حالت جامد مقداری در هم حل می‌شوند، در نمودارهای فازی این نوع، محلول‌های جامد و مخلوطی از محلول‌های جامد وجود دارد.

در این نمودار سه منطقه تک فازی مذاب  $L$ ، محلول جامد  $\alpha$  و محلول جامد  $\beta$  وجود دارد. همچنین سه منطقه دوفازی  $L+\beta$ ،  $L+\alpha$  و  $\alpha+\beta$  وجود دارد.

اصول

11

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1





## سرد شدن تعادلی آلیاژ ۱، ترکیب 95A-5B

- سرد شدن تعادلی آلیاژ ۱، ترکیب 95A-5B را در نظر بگیرید.
- آلیاژ قبل از نقطه T1 مذاب محلول است و با کاهش دما در نقطه T1 اولین جوانه‌های محلول جامد  $\alpha$  تشکیل می‌شود
- با ادامه سرد شدن، دانه‌های  $\alpha$  بزرگ‌تر شده و مقدار مذاب کاهش می‌یابد و سرانجام در نقطه T4 محلول جامد همگن  $\alpha$  تشکیل می‌شود.
- و تا رسیدن به دمای محیط نیز این حالت حفظ می‌شود.

13

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



- حال آلیاژ 30A-70B که ترکیب اوتکتیک است را در نظر بگیرید. آلیاژ تا قبل از نقطه TE مذاب است. در دمای مذاب در دمای ثابت، دچار واکنش اوتکتیک شده و مخلوط بسیار ظریفی از دو جامد تشکیل می‌شود. مقدار فازها در دمای  $T_{E+\epsilon}$  به صورت زیر است:

$$T_{E+\epsilon} \Rightarrow \alpha(80A - 20B) = \frac{90-70}{90-20} \times 100 = 28/6\%, \quad \beta(10A - 90B) = \frac{50}{70} \times 100 = 71/4\%$$

- بنابراین در دمای  $T_{E-\epsilon}$  مقادیر نسبی فاز  $\alpha$  و  $\beta$  در مخلوط اوتکتیک برابر با ۲۸/۶ درصد و ۷۱/۴ درصد است. البته با کاهش دما، در دمای محیط به دلیل تغییر حد حلالیت B در A، مقادیر نسبی فاز  $\alpha$  و  $\beta$  مقداری تغییر می‌کند.

$$\Rightarrow \alpha(90A - 10B) = \frac{95-70}{95-10} \times 100 = 29/4\%, \quad \beta(50A - 95B) = \frac{60}{85} \times 100 = 70/6\%$$

14

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



### ج) سرد شدن تعادلی آلیاژ ۳، ترکیب 60A-40B

- تا قبل از دمای T3 مذاب است و سپس شروع به انجماد به صورت محلول جامد  $\alpha$  اولیه (پرواوتکتیک) می کند و مذاب از B غنی می شود. به طور مثال در دمای TE مقدار فازها و ترکیب شیمیایی آنها به صورت زیر است:

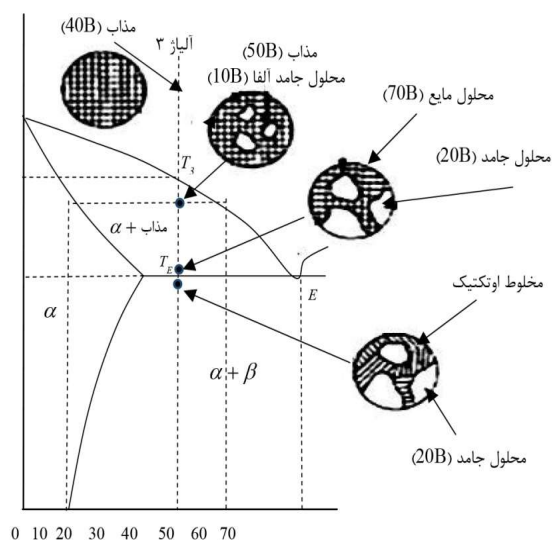
$$T_i \Rightarrow \alpha(90A - 10B) = \frac{50-40}{50-10} \times 100 = 25\%, \quad L(50A - 50B) = \frac{40-10}{50-10} \times 100 = 75\%$$

- در نقطه  $T_{E+\epsilon}$  ترکیب شیمیایی مذاب به ترکیب اوتکتیک می رسد. در این دما، مقدار و ترکیب شیمیایی فازها به صورت زیر خواهد بود:

$$T_{E+\epsilon} \Rightarrow \alpha(80A - 20B) = \frac{70-40}{70-20} \times 100 = 60\%, \quad L_E(30A - 57B) = \frac{40-20}{70-20} \times 100 = 40\%$$

15

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



16

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



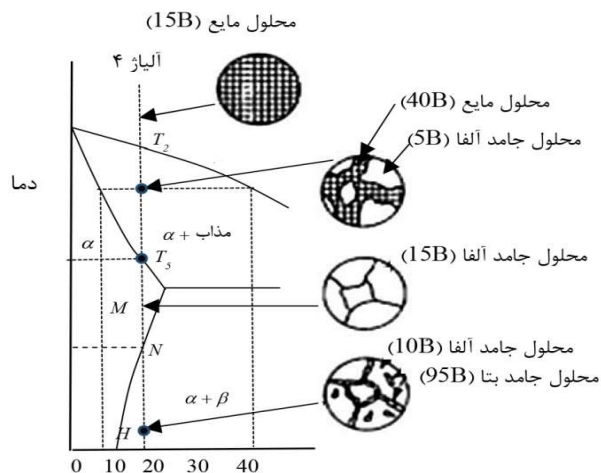


- (د) سرد شدن تعادلی آلیاژ ۴، ترکیب را در نظر بگیرید.
- آلیاژ قبل از نقطه T2 مذاب محلول است. انجماد در نقطه T2 شروع شده و در نقطه T5 کامل می‌شود و جامد تک فاز همگن  $\alpha$  به وجود می‌آید.
- با ادامه سرد شدن محلول جامد به حد اشباع خود در نقطه N می‌رسد و محلول از B اشباع می‌شود.
- با کم شدن بیشتر دما، فلز B به صورت محلول جامد  $\beta$  رسوب می‌کند. بنابراین در دمای محیط فاز اوتکتیک  $\alpha+\beta$  در مرز دانه‌ها رسوب می‌کند.
- مقدار فازها و ترکیب شیمیایی آن‌ها در محیط برابر خواهد بود با:

$$\Rightarrow \alpha(90A-10B) = \frac{95-70}{95-10} \times 100 = 29/4\%, \beta(50A-95B) = \frac{60}{85} \times 100 = 70/6\%$$

17

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



18

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



## خواص سیستم‌های آلیاژی اوتکتیک

- خواص هر آلیاژ چند فازی به مشخصه‌های هر کدام از فازها و همچنین نحوه توزیع این فازها در ریزساختار بستگی دارد. در بسیاری از سیستم‌های آلیاژی اوتکتیک که در صنعت اهمیت دارند، یک فاز نسبتاً ضعیف و موم‌سان و دیگری سخت و شکننده است.
- در این آلیاژها اگر از ناحیه موم‌سان به نقطه اوتکتیک نزدیک شویم استحکام آلیاژ افزایش می‌یابد. پس از ترکیب اوتکتیک به دلیل کاهش مقدار فاز اوتکتیک و افزایش مقدار فاز ترد استحکام کاهش می‌یابد.
- سیستم اوتکتیک معمولاً حداکثر استحکام را دارد. نکته مهم دیگر این است که خواص حاصل از یک مخلوط بسیار شبیه فاز پیوسته می‌باشد. با افزایش آهنگ سرد کردن در حین انجماد، مخلوط اوتکتیک ریزتر و مقدار حجم آن بیشتر و دانه‌ها ریزتر می‌شود که باعث افزایش استحکام آلیاژ خواهد شد.

19

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



## برخی استفاده‌های اوتکتیک:

- آلیاژهای اوتکتیک برای لحیم‌کاری و جوش‌کاری، مثل آلیاژ قلع و سرب (آلیاژ اوتکتیک ۶۳ درصد قلع و ۳۷ درصد سرب دارای نقطه ذوب ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد است).
- آلیاژهای ریخته‌گری، مانند آلومینیوم- سیلیس (آلیاژ اوتکتیک ۸۶ درصد آلومینیوم و ۱۴ درصد سیلیس دارای نقطه ذوب ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد است) و چدن (آلیاژ ۹۶ درصد آهن، ۳/۴ درصد کربن دارای نقطه ذوب ۱۱۳۰ درجه سانتی‌گراد است).
- عکس‌العمل دمایی، مانند فلز فیلد برای اطفاء حریق (فلز فیلد یک آلیاژ اوتکتیک ۵/۳۲ درصد بیسموت، ۵۱ درصد ایندیوم و ۵/۱۶ درصد قلع است که نقطه ذوب آن ۶۲ درجه سانتی‌گراد است و در شیر وسایل اطفای حریق استفاده می‌شود).

20

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



## برخی استفاده‌های اوتکتیک:

- جایگزین‌های غیر سمی برای جیوه مثل گالینستن. (گالینستن یک آلیاژ اوتکتیک از ۶۸ درصد گالیوم، ۲۲ درصد ایندیوم و ۱۰ درصد قلع است که دمای ذوب آن ۱۹- درجه سانتی‌گراد است).
- آلیاژهای اوتکتیک سدیم و پتاسیم (۷۷ درصد پتاسیم و ۳۳ درصد سدیم با نقطه ذوب ۱۲- و نقطه جوش ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد) در دمای اتاق مایع هستند و به‌عنوان سردکننده در واکنش‌های سریع هسته‌ای نوترون به کار می‌رود.
- عینک‌های فلزی آزمایشگاهی با استحکام بسیار بالا و مقاوم در برابر خوردگی.

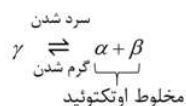
21

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



## واکنش اوتکتوئید

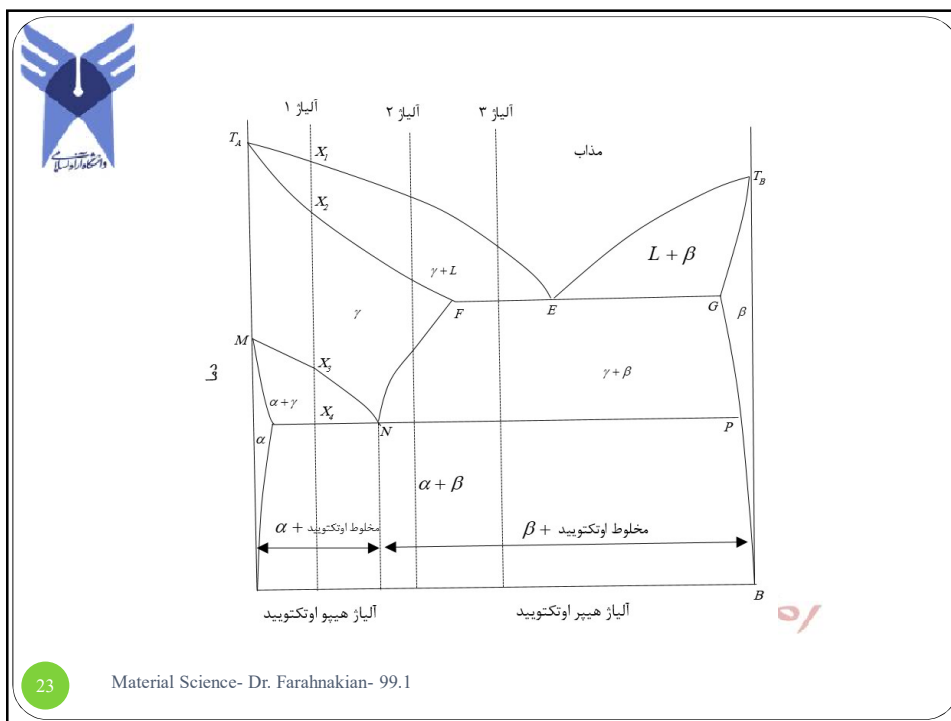
- واکنش اوتکتوئید، واکنش رایج در حالت جامد است و شبیه اوتکتیک می‌باشد که در حالت جامد صورت می‌گیرد و یک جامد به دو جامد تبدیل می‌شود.


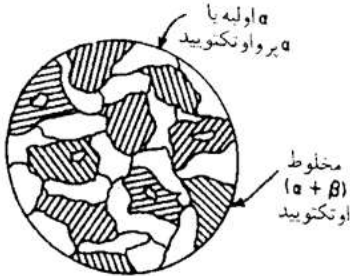


- مخلوط اوتکتوئید مانند مخلوط اوتکتیک شبیه اثرانگشت و ظریف است.
- نقطه M نشان‌دهنده تغییر آلوتروپیک فلز خاص A است و با افزایش B در ترکیب شیمیایی آلیاژ، دمای تغییر آلوتروپیک کاهش می‌یابد و به حداقلی در نقطه N می‌رسد که به این نقطه، نقطه اوتکتوئید گویند.

22

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1




اولیه یا  $\alpha$  پرواوتکتوئید

مخلوط  $(\alpha + \beta)$  اوتکتوئید

ریزساختار آلیاژ هیپو اوتکتوئید آهسته سرد شده

اصول

25 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



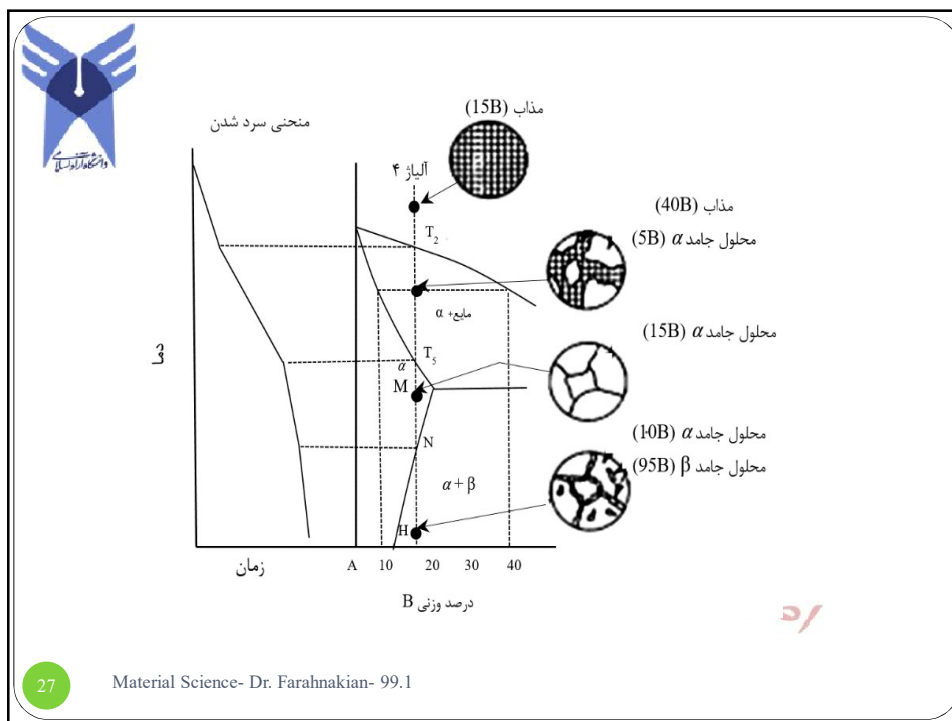
## پیرسختی (Aging)

مهم‌ترین عملیات حرارتی آلیاژهای غیر آهنی، پیرسختی یا رسوب سختی است. در این روش آلیاژ باید دو شرط داشته باشد:

- (۱) در نمودار تعادلی باید مقداری حلالیت در حالت جامد وجود داشته باشد.
- (۲) شیب خط حلالیت به نحوی باشد که در دمای پایین‌تر، حلالیت کمتر باشد.

اصول علم مواد - دکتر فرناکیان

26 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



## مراحل عملیات پیر سختی

عملیات حرارتی پیر سختی شامل دو مرحله است:

- ۱- باید عملیات محلولی انجام داد یعنی این که آلیاژ را گرم کرد تا تمام بتای اضافی حل و ساختار، محلول جامد همگن آلفا شود.
- سپس آلیاژ سریعاً سرد شود تا محلول فوق اشباعی حاصل شود که بتای اضافه در آن حبس شده باشد. که اگر آلفا فاز داکتیل باشد فاز داکتیلی به وجود می آید.
- آب دادن شدید باعث واپیچش قطعات می شود پس بهتر است پاشش آب داشته باشیم.

28

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

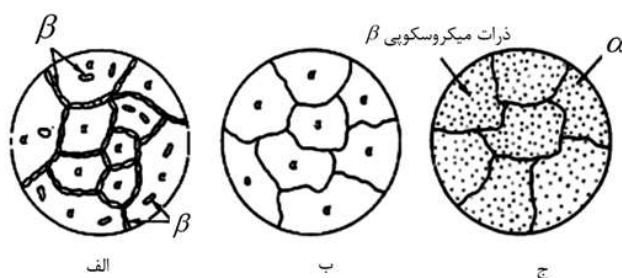


• ۲- سپس باید فرآیند پیرسازی انجام شود. آلیاژ آب داده شده، محلول جامد فوق اشباع بوده و ناپایدار است و فاز حل شده اضافی تمایل به خروج دارد. خارج شدن رسوب توسط پدیده نفوذ صورت می‌گیرد. بنابراین پیرسازی وابسته به دما و زمان است.

• رسوب فاز دوم باعث واپیچش شبکه و سختی زیاد می‌شود. آلیاژ آب داده شده، محلول جامدی فوق اشباع و ناپایدار است، بطوریکه فاز حل شده اضافی با توجه به دما، تمایل به خروج از محلول دارد. یعنی پس از مدت زمانی قطعه به حداکثر سختی خود می‌رسد.

29

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



ریزساختار آلیاژ الف) پس از آهسته سرد شدن، ب) پس از گرم کردن و سریع سرد کردن، ج) پس از پیرسازی

30

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



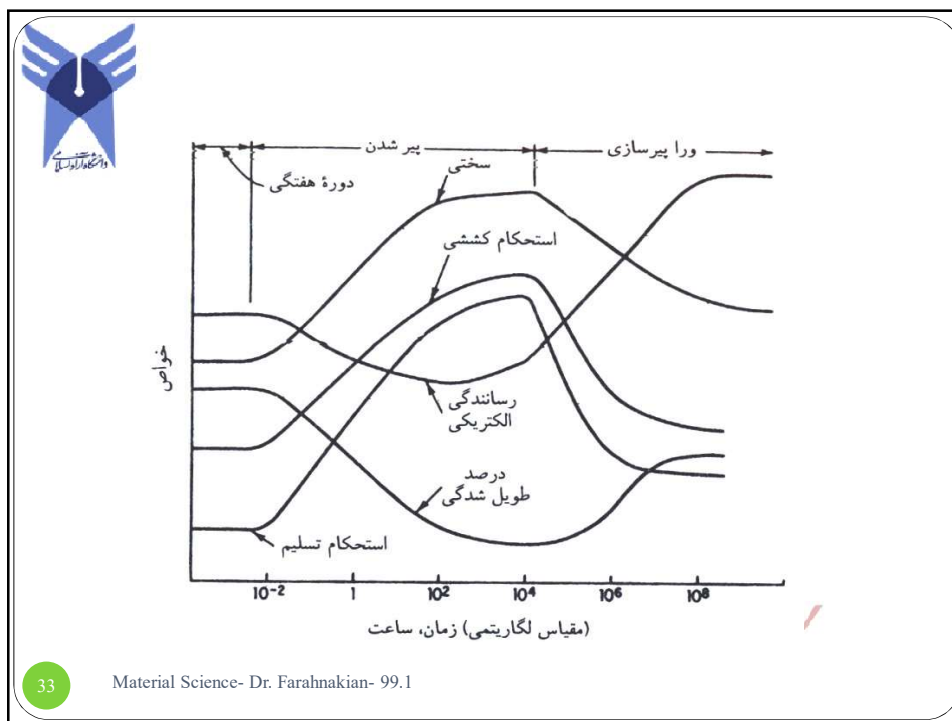
- اگر در دمای محیط این کار انجام شود (پس از ۴ الی ۵ روز) پیر سختی طبیعی و اگر احتیاج به دمای بالاتر از محیط باشد پیر سختی مصنوعی می-نامند.
- خنک نگه داشتن آلیاژ فرایند پیرسازی را به تعویق می-اندازد. در صنایع هوایی پرچ‌های آلیاژ آلومینیوم را پس از کوئنچ در یخ خشک ۷۳- تا ۴۵- نگه‌داشته و آن‌ها را پرچ می-کنند (فاز نرم)، سپس در دمای محیط پیر سختی می-شوند و استحکام خود را به دست می-آورند.
- مستحکم شدن یک آلیاژ به دلیل دو عامل توزیع یکنواخت و ظریف رسوبات میکروسکوپی و واپیچش ساختار شبکه به‌وسیله این ذرات، قبل از این‌که به رؤیت برسند (شبکه همدوس) ناشی می-شود.



## نظریه شبکه همدوس

- الف) آلیاژ پس از آب دادن در شرایط فوق اشباع وجود دارد و اتم‌های حل‌شده به‌صورت همگن در ساختار شبکه توزیع شده‌اند.
- ب) دوره نهفتگی اتم‌های اضافه حل‌شده تمایل به مهاجرت به صفحه‌های بلور شناختی خاصی دارند تا نطفه‌های رسوب را تشکیل دهند.
- ج) در پیر شدن این خوشه‌ها، یک ساختار بلوری میانی (شبکه انتقالی) را تشکیل داده و تطابق هم دوستی خود را با ساختار شبکه زمینه حفظ می-کنند. پارامتر شبکه اضافه با حلال تفاوت دارد و در نتیجه پیوند اتم‌ها (همدوسی) مقدار قابل توجهی واپیچش در زمینه به وجود می-آورد. این واپیچش حرکت نابجایی‌ها را به تاخیر انداخته و سبب افزایش سختی و استحکام می-شود.
- د) ورا پیر: سرانجام فاز اضافی ساختار شبکه خودش را تشکیل داده و واپیچش کم می-شود و سختی و استحکام کاهش می-یابد.





- در جدول زیر تغییرات خواص مکانیکی آلیاژ مس- برلیوم دو درصد نشان داده شده است. این آلیاژ خواص منحصر بفردی دارد.
- در حالیکه ضریب رسانش گرمایی و الکتریکی خوبی دارد، اگر بر روی آن عملیات حرارتی پیرسختی انجام شود استحکام آن در حد استحکام فولادهای سخت شده می شود.

آلیاژ مس برلیوم ۲ درصد

سختی - راکول	درصد طولیل شدگی	استحکام کششی	آلیاژ و شرایط آن
B ۴۵-۶۵	۳۵-۵۰	۶۰-۸۰	تاب کاری
C ۳۶-۴۰	۵-۸	۱۶۵-۱۸۰	پیرسازی

34 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1