

## تبلور دانه های فلزی :

در فرایندهای تغییر شکل فلزات در دمای معمولی محیط تا دماهای کمتر از نصف دمای ذوب فلز، با ازدیاد تغییر شکل، چگالی نابجاییها افزایش می یابد.

در فرایندهای تغییر شکل فلزات در دمای معمولی محیط تا دماهای کمتر از نصف دمای ذوب فلز، با ازدیاد تغییر شکل، چگالی نابجاییها افزایش می یابد. اما با تجمع نابجاییها پشت موانعی از قبیل ناخالصیها و مرزدانه ها و همچنین تلاقی آنها، از تحرک نابجاییها کاسته می شود و در نتیجه استحکام و حد تسلیم افزایش و انعطاف پذیری کاهش می یابد. انرژی داخلی فلز تغییر شکل سرد یافته بیشتر از فلز تغییر شکل نیافته است. ساختار شبکه نابجایی حاصل از فلز تغییر شکل یافته از لحاظ مکانیکی پایدار اما از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار است. پدیده کار سختی و یا کرنش سختی که در حین تغییر شکل سرد رخ می دهد، می تواند از طریق انجام پدیده متقابلی به نام پدیده نرم شدن (softening) که با تغییر آرایش و چگالی نابجایی همراه است، جبران شود. بنابراین می توان با حرارت دادن نمونه تغییر شکل سرد یافته و افزایش دما، آن را از حالت پایداری مکانیکی خارج و شرایط را برای انجام پدیده نرم شدن فراهم آورد. در اینجا پدیده های مهمی که منجر به نرم شدن فلز تغییر شکل یافته می شوند، بازیابی و تبلور مجدد هستند. بازیابی در فلزات با stacking fault energy یا S.F.E بالا مثل آلومینیم، راحت تر رخ می دهد و شامل نفوذ اتمها و جای خالی، و صعود و حرکت نابجاییها است که منجر به آرایش خاصی در موقعیت نابجاییها می شود؛ به گونه ای که ساختار حاصل شبکه چند ضلعی با مرز دانه های فرعی یا مرز های با زاویه کم را می سازد. در مقابل تبلور مجدد یا recrystallization در فلزات با شبکه F.C.C که S.F.E پایینی دارند (مثل مس) اتفاق می افتد. تشکیل دانه های هم محور جدید در مرحله گرم کردن، بجای ساختمان فلز تغییر شکل یافته، تبلور مجدد نامیده می شود. در فلزی مانند مس بازیابی نقطه ای در دمای محیط انجام می شود برای مشاهده آن می توان مقاومت الکتریکی مس نورد شده را در دمای محیط و دمایی حدود ۵ درجه سانتیگراد با هم مقایسه کرد.

تبلور مجدد عبارتست از جایگزینی ساختار کار سرد شده با دسته جدیدی از دانه های فاقد کرنش. این پدیده با کاهش سختی و استحکام و افزایش نرمی اثبات می شود. چگالی نابجاییها در این پدیده به شدت کم شده و آثار کارسختی حذف می گردد.

فرایند تبلور مجدد شامل جوانه زنی یک ناحیه فاقد کرنش است که مرز آن می تواند زمینه دارای کرنش را ضمن حرکت به درون ماده فاقد کرنش دگرگون کند. با رشد مرز از جوانه ها، نابجاییها یکدیگر را خنثی کرده و حذف می شوند.

در حدود ۲ الی ۳ درصد کرنش، دانسیته نابجاییها در داخل دانه و مرز دانه یکسان است و نشانه توزیع یکنواخت کرنش در ساختار است. اما در اثر تغییر شکل زیاد، دانسیته نابجاییها در مرز دانه بیشتر شده و

توزیع کرنش در ساختار ناهمگن تر می شود، در این حالت دو برابر انرژی مرز دانه انرژی ذخیره شده خواهیم داشت.

### عوامل موثر بر تبلور مجدد عبارتند از:

- ۱) میزان تغییر شکل یا کرنش اعمالی،
- ۲) درجه حرارت،
- ۳) مدت زمان نگهداشتن در دمای تبلور مجدد،
- ۴) اندازه دانه اولیه،
- ۵) آنالیز شیمیایی فلز،
- ۶) میزان بازیابی قبل از شروع تبلور مجدد.

### توجه به نکات زیر در پدیده **recrystallization** ضروری بنظر می رسد:

- تبلور مجدد فقط در صورتی می تواند انجام گیرد که مقدار حداقل تغییر شکل معینی انجام گرفته باشد.
  - هر چقدر میزان این تغییر شکل بیشتر باشد، دمای پایین تری برای تبلور مجدد مورد نیاز است و دانه تبلور یافته نیز کوچکتر خواهد شد.
  - با کاهش دمای تبلور مجدد مدت زمان حرارت دادن طولانی تر می شود.
  - اندازه نهایی دانه های تبلور مجدد یافته به میزان کرنش اعمالی و دمای تبلور مجدد بستگی دارد؛
  - هر چقدر اندازه دانه های اولیه کوچکتر باشد، میزان تغییر شکل مورد نیاز برای یک دمای تبلور مجدد معین کوچکتر است.
  - دمای تبلور مجدد با افزایش میزان خلوص فلز کاهش می یابد.
  - اگر دانه های جدید فاقد کرنش در دمایی بیشتر از دمای لازم برای تبلور مجدد حرارت داده شوند، اندازه دانه بسیار زیاد خواهد شد.
  - دمای تبلور مجدد یک دمای ثابتی نیست و به عوامل فوق بستگی دارد، اما در کارهای عملی دمای تبلور مجدد، دمایی تعریف می شود که در آن: تبلور مجدد آلیاژی که تغییر شکل سرد یافته (به مقدار زیاد) در مدت یک ساعت بطور کامل انجام گیرد.
- تبلور مجدد را می توان برای فلزات خالص صنعتی به کمک رابطه  $(T > T_m - 0.4, 0.5)$  بصورت تقریبی تخمین زد. البته برای مسی که ۲-۳ درصد کرنش داشته باشد، دمای تبلور مجدد  $T_m / 0.5$  یعنی حدوداً ۴۰۰ درجه سانتیگراد قابل تصور است اما با افزایش میزان تغییر شکل و مثلاً برای ۹۰ درصد تغییر شکل، دمای تبلور مجدد کاهش یافته و به سمت ۲۰۰ درجه سانتیگراد میل می کند.

سینتیک تبلور مجدد: با افزایش دما، افزایش میزان کرنش، و کاهش اندازه دانه، سرعت پدیده تبلور مجدد بیشتر می شود.

نکته دیگر آنکه ریزساختار تبلور مجدد یافته در حالت تعادل ترمودینامیکی نیست. از این رو با طولانی تر شدن زمان حرارت دهی دانه های کریستالی به رشد خود ادامه می دهند. نیرو محرکه رشد دانه ها، انرژی مرز دانه (کاهش انرژی آزاد) حاصل از کاهش سطح خارجی مرزدانه ها در واحد حجم نسبت به افزایش اندازه دانه است. مرحله رشد دانه به شدت به درجه حرارت بستگی دارد. تبلور مجدد ثانویه نیز در مرحله رشد دانه، شناسایی شده است: در تبلور مجدد ثانویه فقط تعدادی از دانه ها بطور ترجیحی رشد می کنند، بطوری که در حین تبلور مجدد ثانویه دانه های بزرگتر در کنار دانه های نسبتاً کوچک تبلور مجدد اولیه شکل می گیرند.

در فرایند recrystallization فلزاتی چون مس و آهن و آلومینیم، گاهی کریستالهای جدید در موقعیتهای مرتبی که تعیین شده است رشد می کنند، و بافت یا texture تبلور مجدد می سازند. این texture اغلب با texture تغییر شکل فرق دارد اما در بعضی موارد ممکن است این دو یکسان باشند.

اگر ورق مس را پس از نوردکاری سرد تا کاهش مقطع ۸۰ درصد یا بیشتر، آنیل کنند، بافتی مکعبی تشکیل می دهد که در آن امتدادهای  $<100>$  با امتدادهای نوردکاری، پهنا و ضخامت ورق همراستا می باشد در تحقیقی که با همکاری آژانس بین المللی انرژی اتمی و مرکز بین المللی فیزیک تئوری در سال ۱۹۸۷ در مراکز دانشگاهی مصر انجام گرفت، توان اورامی بعنوان پارامتری مستقل از دما در تبلور مجدد مس خالص (حین فرایند آنیل ایزوترمال و ایزوکرونال به معنی همدمای و همزمان) مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق مشاهده شد که جوانه زنی مس خالص در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد آغاز می شود؛ توان اورامی مستقل از دما و برابر ۱ بدست آمد؛ ضریب ثابت  $K$  در معادله اورامی وابسته به دما بوده و با افزایش دما زیاد می شود، این مقدار برای دماهای ۳۰۰ و ۳۵۰ درجه سانتیگراد به ترتیب  $0.0002$  و  $0.00075$  گزارش شده است؛ در تحقیق دیگری که توسط Kazeminazhad & Karimi Taheri انجام شده است، سیمهای مسی (مس خالص ۹۹ درصد) نورد تخت (بعنوان یک فرایند تغییر شکل ناهمگن) و سپس آنیل شده، و تبلور مجدد و توزیع اندازه دانه در نمونه های نهایی مورد بررسی قرار گرفته است. انرژی ذخیره شده در نمونه ها بعد از نورد تخت از سطح به مرکز افزایش می یابد، همچنین کرنش موثر ماکزیمم و مینیمم به ترتیب در مرکز و سطح نمونه ها بدست می آیند، این نشانه عدم یکنواختی در توزیع کرنش و انرژی ذخیره شده بعد از نورد تخت در ماده مورد نظر است و می تواند باعث عدم یکنواختی ساختار بعد از آنیل هم بشود. به دلیل دانسیته بالای جوانه ها در مناطق با انرژی ذخیره شده بیشتر، بعد از فرایند آنیل و وقوع پدیده تبلور مجدد، اندازه دانه ها نیز از سطح به مغز نمونه ریزتر می شوند.

Christian، توان اورامی (Avrami Exponent) را برای جوانه زنی از سایت‌های اشباع در مس و در همه بازه های دمایی عدد ۳ و با آنالیز دو بعدی تغییر شکل همگن عدد ۲ گزارش کرده است. اما در این تحقیق با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو، و رسم نمودار تغییرات کسر تبلور یافته بر حسب زمان، توان اورامی (شیب نمودار) ۱ بدست آمد که در سازگاری با عدد گزارش شده از Rollett et al. برای تغییر شکل ناهمگن فلزات می باشد. دلیل توان اورامی کوچکتر در تغییر شکلهای ناهمگن به دلیل تبدیل تبلور مجدد سریع به تبلور مجدد با سرعت کمتر می باشد. نمودار تغییرات کسر تبلور یافته بر حسب زمان به شکل S ناقص است که این امر می تواند به دلیل شیب کم ابتدای تبلور مجدد باشد. به دلیل آنکه سینتیک رشد دانه در دانه های ریز بیشتر از دانه های درشت است، با افزایش زمان آنیل و رشد دانه، تفاوت بین اندازه دانه ها در مناطق مختلف کمتر می شود.

اما در تحقیق دیگری که بر روی آلیاژ ۵۰۸۳ آلومینیوم انجام شده است، کاملاً عکس مشاهدات فوق گزارش شده است: تمرکز بیشتر انرژی ذخیره شده در سطح نمونه های نورد شده، به دلیل وجود اصطکاک و کرنشهای برشی در سطح تماس نمونه با غلطک و به دنبال آن اندازه دانه ریزتر در سطح نمونه ها. در پایان این نکته را بار دیگر متذکر می شویم که کنترل فرایندهایی چون تبلور مجدد می تواند متخصصان شکلهای فلزات را در بدست آوردن خواص مطلوب بعد از کار گرم یاری رساند.

### بررسی انجماد جهت دار آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیوم :

#### انجماد :

هدف اصلی در ریخته گری، انجماد فلز یا آلیاژ در داخل قالب است. در حالی که زمان انجماد نسبت به دیگر بخش های اصلی در ریخته گری نسبتاً کوتاه است، ولی مهم ترین پدیده ای است که می تواند ساختار درونی و خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه را با توجه به مجموعه عملیات کیفی مذاب تعیین کند. انجماد به اختصار استحاله و تغییر ساختار مایع به جامد تعریف شده است و از این رو نوعی تبدیل و یا تحویل ساختاری محسوب می شود که بر اساس کلیه تغییرات فیزیکی، ترمودینامیکی و متالورژیکی مستلزم نگرشی همه جانبه بر سه بخش است.

**الف - تبلور:** جوانه زنی یا تشکیل هسته جامد از فلز مایع که عبارتست از تحول ساختاری مجموعه یا مجموعه هایی از اتم های مایع به جامد.

**ب - رشد:** که عبارتست از افزایش تدریجی اتم ها از حالت مایع بر روی سطوح بلوری موجود.

**پ - شرایط :** که در هر صورت مستلزم مطالعه شرایط تعادلی و غیر تعادلی و تأثیر شرایط غیر تعادلی در چگونگی انجماد و قسمت های تبلور و رشد است.

هر یک از بخش های سه گانه فوق (که عملاً تفکیک بین آنها توجیه پذیر نیست) بر ساختار دانه ای، ساختار ترکیبی و فازی و به طور کلی بر ساختار ریختگی «as cast structure» که شامل ناهمگنی های دیگر

نظیر مک های گازی، انقباضی و آخال نیز می باشد تأثیر کرده، خواص نهایی قطعه را تعیین می نماید. از طرف دیگر بر اساس مطالعات متعدد و متنوع تأثیر ساختار ریختگی بر عملیات بعدی قطعات نظیر ساختار حرارتی «as heat treated structure» و یا ساختار نوردی «structure as wrought» قابل ملاحظه می باشد. با توجه به مطالب فوق، مطالعه و بررسی انجماد که دامنه وسیعی از علوم را در بر می گیرد. به عنوان ضرورت اولیه در ریخته گری مطرح می شود تا با تکیه بر مبانی علمی و با توجه به مشخصات فیزیکی و گرمایی آلیاژ مذاب، مجموعه عملیات کیفی، مشخصات گرمایی، شیمیایی و مکانیکی قالب، بتوان روند انجماد و خواص نهایی محصول را پیش بینی نمود و آن را بهبود بخشید.

برای انجماد تعاریف متفاوتی به عمل آمده است که دو تعریف زیر را می توان به عنوان سرآغازی برای ورود در مبحث انجماد، انتخاب و توجیه نمود.

۱- انجماد عبارتست از تشکیل هسته های یکنواخت و طبیعی از ساختار مایع و رشد تدریجی آنها که در هر حال شرایط غیر تعادلی نیز بر آن حاکم است.

در تعریف فوق، موضوع تبلور و تشکیل هسته های یکنواخت و طبیعی از مایع، با آنکه تحقیقات وسیعی را به خود اختصاص داده است، هنوز به طور جامع و همه جانبه مورد اتفاق نظر قرار نگرفته است.

۲- انجماد عبارتست از رشد تدریجی بلورها با افزایش اتم از حالت مایع بر روی سطوح آنها که در زمانی معین بر آن افزوده شده و یا آنرا ترک می کنند و در هر حال تحت تأثیر شرایط غیر تعادلی نیز قرار می گیرند.

در این تعریف با توجه به پذیرش هسته های جامد، توضیح و تشریح انجماد با سهولت بیشتری انجام می شود، زیرا در اولین لحظه ای که سیستم در آغاز تغییر حالت واقع شود، فصل مشترکی پایدار بین دو مجموعه اتمی ایجاد خواهد شد که می توان انجماد را با افزایش و حرکت تدریجی اتم های مایع از سطوح انرژی بالاتر به سطح انرژی پایین تر توجیه و تعریف نمود. در مباحث مربوط به ریخته گری و در شرایط صنعتی، به دلیل وجود هسته های جامد، موضوع تبلور و جوانه زنی از اهمیت کمتری برخوردار شده و تعریف دوم با نگرشی بر فعال شدن هسته ها (هسته های غیر یکنواخت «Heterogenous nucleation» وسعت عملی بیشتری پیدا می نماید. در حالی که از نظر علمی تبلور و تشکیل هسته های یکنواخت از مایع (هسته های یکنواخت «Homogenous nucleation»)، مشمول نظریه های گوناگون بوده و توجیه ترمودینامیکی آن مستلزم مطالعات مقدماتی وسیع و توضیحات کیفی و علمی است. با این وجود و با توجه به تأثیر تبلور در ساختار قطعات ریختگی در هر دو مورد باید اطلاعات کافی به عمل آید.

مکانیسم انجماد در ابتدا توسط «Tammann» بیان گردید: «که انجماد فقط یک تغییر شکل فازی است». در هنگام سرد شدن، فلز مایع مقداری انرژی از دست می دهد که در نتیجه نسبت به حالت جامد در مجموعه ناپایدارتر قرار می گیرد، در چنین حالتی، کاهش فاصله بین اتمی، کاهش ارتعاشات اتمی و افزایش

نیروهای بین اتمی، موجب می شود که سرعت حرکت مستقل دو اتم همسایه نسبت به هم کاهش یافته و در نتیجه حالت پایداری با نام ساختار جامد تشکیل شود. نظریه های دیگر مبنی بر کاهش انرژی داخلی (به دلیل آزاد شدن گرمای نهان گداز) و هم چنین کاهش انتروپی و درجه حرارت است، که مجموعاً انرژی آزاد در سیستم مایع را با کاهش درجه حرارت، افزایش داده و در نتیجه تغییر حالت آنها از نظم کم دامنه به نظم پر دامنه را ایجاد می نماید. نظریه های مربوط به محاسبات تغییرات انرژی آزاد و اندازه های هسته، عموماً یکی از مشخصات تغییر حالت مایع به جامد بیان را کرده است. در هر کدام از مجموع نظریه های ابراز شده، موضوع وجود یا عدم وجود فصل مشترک، موجب تناقضات مختلف در بیان تبلور می شود. زیرا اگر نوعی تحول (تشکیل ساختار جامد) و یا تبدیل تدریجی (رشد) در انجماد اتفاق افتد، ناگزیر باید فصل مشترک کافی برای انجام چنان تبدیل یا تحولی موجود باشد، از طرف دیگر قبول فصل مشترک به مفهوم پذیرش وجود هسته های اولیه است که توجیه تبلور و جوانه زنی را به مطالعات و بررسی های دیگر نیازمند می نماید. اولین مشکل در بیان فوق آن است که اگر فصل مشترکی وجود ندارد، لذا هیچ منطقه ای با سطح انرژی متفاوت وجود نداشته در نتیجه تغییر حالت از مایع به ساختار دیگر، مفهوم نخواهد داشت. می دانیم که در هر مجموعه اتمی، تعدادی اتم وجود دارد در سطح انرژی بالاتری نسبت به میانگین انرژی سیستم قرار دارند:

که در آن «N» تعداد دفعاتی است که در یک ثانیه یک اتم مشمول انرژی مازاد می گردد و «NQ» نیز تعداد اتم با انرژی مازاد است. با کاهش درجه حرارت، اتم های با سطح انرژی بالاتر دارای سرعت کمتری شده و تعدادی از آنها در کنار هم قرار گرفته و نوعی خوشه «Cluster» در میان مجموعه مذاب تشکیل می دهند، با کاهش بیشتر درجه حرارت، اندازه هر خوشه بزرگتر شده و در یک اندازه معین در حالتی قرار می گیرد که می تواند نوعی فصل مشترک حرارتی ناپایدار با مذاب ایجاد نماید. اتم هایی که در چنین حالتی قرار می گیرند به تدریج از درجه پایداری بیشتری برخوردار شده و تخمک «embryo» نامیده می شوند. تخمک ها حالتی شبه بلور داشته و درجه نظم پر دامنه تری نسبت به مایع دارند، با بزرگ شدن تخمک ها و افزایش انرژی آزاد درون آنها، ناگزیر اتم ها در درون خود به حالتی که سطح انرژی را کاهش دهد، استحاله می یابند که در این حال آنرا جوانه و یا هسته «nuclei» می نامند. چنین تغییر حالتی با وجود فصل مشترک حرارتی توجیه شده و در نهایت به فصل مشترک هندسی (که خود نیز نوعی فصل مشترک حرارتی است) تبدیل می شود. بدیهی است اندازه تخمک و تعداد آن در هر شرایطی، اندازه و تعداد هسته های اولیه را، تعیین می کند و از این رو در کتاب های مختلف، موضوع انجماد از طریق اندازه تخمک و یا اندازه هسته مورد مطالعه قرار گرفته است که در هر دو صورت توجیهی برای تبلور از مایع و اندازه هسته و در نهایت اندازه دانه محسوب می شود.

## مادون انجماد :

هر روشی که برای توجیه و بیان تبلور از فاز مایع به کار رود، مستلزم تشریح دقیق پایداری مجازی مایع در دماهای زیر نقطه ذوب می باشد که مباحث مربوط به مادون انجماد «فوق تبرید» را در بر می گیرد. هر فلز دارای نقطه ذوبی است [«Tg» یا «Tm»] که جامد و مایع با هم در حال تعادل بوده و بالاتر و یا پایین تر از آن نقطه به ترتیب جامد یا مایع پایدار نیستند. با تجربه ثابت شده است که یک مایع را می توان در دماهای بسیار پایین تر از نقطه ذوب تعادلی خود پایدار نگاه داشت، به طور مثال نیکل و یا آلومینیم را می توان در تحت شرایط مناسب تا ۲۵۰ و ۱۵۰ درجه سانتی گراد پائین تر از نقطه ذوب آنها برای زمان نامحدود به صورت مذاب نگهداری نمود. بدیهی است در چنین شرایطی ذرات جامد در مذاب حضور نداشته و مذاب در شرایط پایداری مجازی «metastable» قرار دارد. پایداری مجازی مذاب در دماهای زیر نقطه ذوب در تحت شرایط مادون انجماد «super cooling = undercooling» انجام می گیرد.

در هر درجه حرارت پائین تر از دمای ذوب، انرژی آزاد سیستم جامد کمتر از مایع است، که از نظر ترمودینامیکی تعریف و اثبات شده و از این رو تغییر و تبدیل مایع به جامد در دماهای پائین تر از دمای تعادلی، تغییراتی طبیعی است. ولی سؤال اصلی این است که چرا چنین تغییراتی به صورت حقیقی انجام نمی گیرد. به آن گونه که قبلاً توضیح داده شد، انجماد وقتی حاصل می شود که شرایط رشد بلورهای جامد فراهم شود، و لذا تبدیل ساختار مایع به جامد، بدواً باید در شرایط تشکیل بلورهای بسیار کوچک بررسی گردد. هرگاه هسته جامد کروی و به شعاع «r» فرض شود، تغییرات «dr» (بزرگ شدن هسته). مستلزم اعمال فشار «dp» است.

H. Daneshmandi