

۱- حضور و غیاب

۲- پیش‌آزمون (تشریحی، شفاهی، تستی) از مطالب جلسه قبل

۳- یادآوری مطالب جلسه قبل

موضوع: سرعت انجماد در قطعات ریختگی

برای آمادگی ذهنی هنرجویان ابتدا چند سوال درباره موضوع مربوطه، به صورت تعاملی ارائه شود. سؤالاتی مانند:

۱- اگر بتوان سرعت انجماد فلز مذاب را طوری افزایش داد که در کیفیت قطعه تغییر ایجاد نشود، چه تأثیری بر تولید قطعه ریختگی خواهد داشت؟

۲- به نظر شما افزایش سرعت انجماد چه تأثیری بر ساختار و خواص قطعه خواهد داشت؟

۳- آیا می‌توانید روشی برای اندازه‌گیری سرعت انجماد فلز مذاب پیشنهاد کنید؟

۴- مراحل انجماد مذاب در قطعه ریختگی کدامند؟

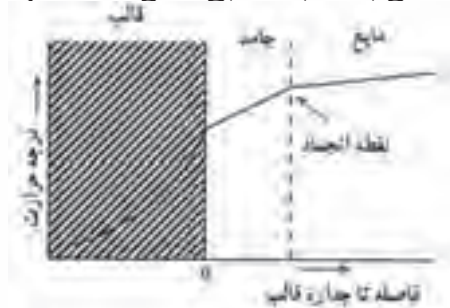
۳-۴-۳- سرعت انجماد در قطعات ریختگی: اثر سرعت انجماد فلز مذاب در ریخته‌گری از جهات

مختلفی مانند تأثیر در تولید قطعه، ساختار فلز، خواص مکانیکی و مهم است. به‌طوری که افزایش سرعت انجماد سبب می‌شود که مذاب فلز درون قالب، در زمان کوتاه‌تری منجمد شود و در یک فاصله زمانی مشخص تعداد قطعه بیشتری تولید گردد. بنابراین، اگر بتوان سرعت انجماد فلز مذاب در قالب را به‌گونه‌ای افزایش داد که در خواص قطعه تغییر نامطلوبی ایجاد نشود، می‌توان تعداد قطعه تولیدی را افزایش داد و از لحاظ اقتصادی با هزینه کمتری، تعداد قطعه بیشتری را تولید نمود. از طرف دیگر، سرعت انجماد می‌تواند خواص و ساختار میکروسکوپی قطعه را تغییر دهد؛ به گونه‌ای که اگر سرعت انجماد یا به عبارت دیگر، سرعت سرد شدن مذاب افزایش یابد، تعداد بسیار زیادی جوانه جامد (هسته جامد) در مذاب به‌وجود می‌آید که با ادامه رشد آن‌ها، یک ساختار میکروسکوپی با دانه‌های ریز تشکیل می‌شود. این ساختار، دارای خواص مکانیکی نسبتاً خوبی می‌باشد. در چنین ساختاری، به علت ریز بودن دانه‌ها، تعداد مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، برای تغییر شکل ساختار دانه ریز، نیاز به نیرو و تنش بیشتری خواهد بود بنابراین، قطعه استحکام بیشتری از خود نشان خواهد داد. از طرف دیگر، ساختار دانه ریز قابلیت انعطاف خوبی دارد. پس در ساختار ریز دانه، افزایش استحکام با افزایش انعطاف‌پذیری همراه خواهد بود و در دمای محیط قطعه مقاومت خوبی در برابر نیروهای مکانیکی خواهد داشت.

اگر سرعت انجماد، یا به عبارت دیگر، سرعت سرد کردن مذاب کم شود، تعداد جوانه‌ها (هسته‌های) جامد کم خواهد شد؛ بنابراین، با ادامه رشد جوانه‌ها به ساختار با دانه‌های درشت خواهیم رسید. در قطعات با ساختار میکروسکوپی قطعات با دانه‌های درشت، با توجه به کم بودن مقدار مرز دانه‌ها، استحکام نسبت به قطعات با ساختار دانه‌ریز کمتر است، اما در دماهای بالا قطعه با ساختار دانه درشت مقاومت بهتری در برابر اعمال نیرو نسبت به قطعه با ساختار دانه ریز، خواهد داشت. افزایش سرعت انجماد مذاب سبب می‌شود که سرعت سرد شدن مذاب افزایش یابد و شیب دمایی بیشتری بین قشر جامد شده و مذاب به وجود آید که موجب انجماد جهت‌دار مذاب می‌شود. به عبارت دیگر، با نزدیک شدن به پوسته جامد، دما کاهش خواهد یافت. در انجماد جهت‌دار، مذابی که در آخرین مرحله منجمد می‌شود، در قسمت تغذیه‌ی قالب قرار می‌گیرد. بنابراین، حفره‌ی انقباضی از درون قطعه به تغذیه منتقل می‌شود و قطعه فاقد حفره‌ی انقباضی خواهد بود. از طرف دیگر، ریز شدن دانه‌ها در اثر افزایش سرعت انجماد، از به وجود آمدن حفرات انقباضی بزرگ در قطعه جلوگیری می‌کند و در نتیجه، پس از انجماد جهت‌دار، یک ساختار یکنواخت و هموزن در قطعه ایجاد شود.

در مورد قطعاتی که پس از انجماد نیاز به عملیات حرارتی دارند، افزایش سرعت انجماد باعث می‌شود که مذاب در شرایط غیرتعادلی منجمد شود. در نتیجه، میزان تنش‌های باقیمانده در قطعه افزایش خواهد یافت و ترکیب شیمیایی قطعه، یکنواخت نخواهد بود. همچنین، ساختار قطعه دانه‌ریز خواهد شد و تعداد زیادی مرز دانه‌ها در قطعه وجود خواهد داشت که مراکز پرتنش در قطعه می‌باشند. این موارد نشان‌دهنده وجود انرژی نهفته‌ای در قطعه ریخته شده با سرعت انجماد بالا است. بنابراین، اگر چنین قطعه‌ای تحت عملیات حرارتی قرار گیرد، سیکل (دما یا زمان) عملیات حرارتی کاهش خواهد یافت زیرا، انرژی نهفته، سبب افزایش سرعت عملیات حرارتی خواهد شد.

در یک قالب ریخته‌گری، سرعت سرد شدن مذاب به میزان گرمای خارج شده از طریق دیواره قالب بستگی دارد. به عبارت دیگر، هرچه انتقال حرارت قالب بیشتر باشد، سرعت سرد شدن مذاب بیشتر خواهد بود و هرچه انتقال حرارت قالب کمتر باشد، سرعت سرد شدن مذاب کمتر خواهد بود. درحقیقت، توانایی دیواره قالب در جذب گرمای مذاب به خود، انتقال آن به محیط خارج بر سرعت انجماد مذاب تأثیر خواهد داشت. برای درک این مطلب، می‌توان دیواره یک قالب ماسه‌ای را در تماس با مذاب، مطابق شکل ۳-۳۰، در نظر گرفت.



شکل ۳-۳۰- نمایش شیب حرارتی در قالب، جامد، و فصل مشترک جامد و مایع

دمای دیواره قالب برابر دمای محیط است. بنابراین، هنگامی که مذاب به داخل قالب ریخته می‌شود و در مجاورت دیواره قالب قرار می‌گیرد، با توجه به این که، دمای مذاب بسیار بالاتر از دمای دیواره قالب است، اختلاف دمای زیادی بین مذاب و دیواره قالب وجود خواهد داشت. این مسأله، سبب انتقال حرارت از طرف مذاب به سمت دیواره خواهد شد. بنابراین، مذابی که در تماس با دیواره قالب مسطح است، به سرعت گرمای خود را به دیواره قالب منتقل می‌کند و سریع‌تر منجمد می‌شود. در نتیجه، یک پوسته جامد فلزی در مجاورت دیواره قالب تشکیل می‌شود. از این مرحله به بعد گرمای مذاب باقیمانده ابتدا به پوسته جامد و سپس به دیواره قالب منتقل می‌شود و با گذشت زمان، به تدریج مقدار مذاب بیشتری به جامد تبدیل شده و ضخامت پوسته جامد بیشتر می‌شود. اما به دلیل بالابودن دمای پوسته جامد اولیه، که خود تازه منجمد شده است، سرعت انجماد مذاب باقیمانده نسبت به سرعت انجماد پوسته اولیه کمتر خواهد بود. در حقیقت، اختلاف دمای بین مذاب و پوسته اولیه کمتر از اختلاف دمای مذاب اولیه در تماس با دیواره قالب و دیواره قالب خواهد بود. بنابراین، انتقال حرارت در مذاب باقیمانده با سرعت کمتری انجام خواهد شد و در نتیجه، سرعت انجماد کاهش خواهد یافت.

در فصل مشترک بین مذاب و پوسته جامد تشکیل شده، دمای مذاب برابر دمای نقطه انجماد فلز می‌باشد و برای منجمد شدن مذاب، باید گرمای مذاب از فصل مشترک مذاب و پوسته جامد و به سمت دیواره قالب انتقال پیدا کند.

فرض کنیم مذاب روی یک دیواره بزرگ مسطح منجمد شود، در این حالت انتقال حرارت از مذاب به دیواره، در جهت عمود بر سطح دیواره صورت خواهد گرفت. در چنین حالتی، براساس نتایج آزمایش‌های انجام شده ضخامت مذاب منجمد شده با جذر زمان انجماد نسبت مستقیم دارد. به عبارت دیگر:

$$D \propto \sqrt{t}$$

که در آن:

D : ضخامت لایه منجمد شده بر حسب میلی‌متر (mm)

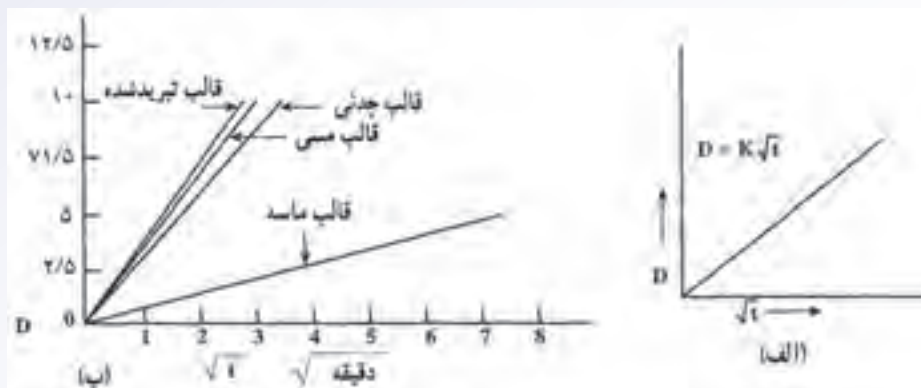
t : زمان از ابتدای انجماد بر حسب دقیقه (min) است.

برای این که این تناسب به تساوی تبدیل شود، به یک ضریب نیاز می‌باشد. اگر این ضریب را q بنامیم، خواهیم داشت:

$$D = q\sqrt{t}$$

که در آن، q ثابت انجماد است و واحد آن میلی‌متر بر مجذور دقیقه می‌باشد. مقدار این ثابت به جنس و شرایط انجماد فلز بستگی دارد و برای هر فلزی مقداری ثابت است. بنابراین، همان‌طور که در شکل ۳-۳۱ الف مشاهده می‌شود، نمودار ضخامت لایه منجمد شده (D) بر حسب جذر زمان به صورت خطی خواهد بود. یعنی، هرچه زمان افزایش یابد، جذر آن نیز افزایش یافته و متناسب با آن، ضخامت لایه منجمد شده افزایش می‌یابد. این نمودار برای ریخته‌گری شمش‌های فولادی ساده کربنی در قالب‌های مختلف شامل قالب ماسه‌ای،

چدنی، مسی و تبرید شده مطابق شکل ۳-۳۱ ب رسم شده است. همان طور که ملاحظه می شود، هرچه قدرت سردکنندگی قالب بیشتر باشد، شیب نمودار بیشتر خواهد بود. به عنوان مثال قدرت سردکنندگی قالب های ماسه ای از قالب های فلزی کمتر است؛ بنابراین، شیب نمودار سرعت انجماد فولاد مذاب در قالب ماسه ای نسبت به شیب خط مربوط به انجماد در قالب فلزی کمتر است. از طرف دیگر، شیب نمودار سرعت انجماد فولاد مذاب در قالب تبرید شده از شیب خطوط مربوط به انجماد در دیگر قالب ها بیشتر است. یعنی مذاب در قالب تبریدی در زمان کمتری نسبت به قالب های دیگر منجمد می شود.



شکل ۳-۳۱- سرعت انجماد تابعی از زمان برای یک قالب با سطوح مسطح

براساس مطالعات انجام شده، در صورتی که فولاد مذاب با فوق گداز ۵۰ درجه سلسیوس در قالب فلزی ریخته شود، رابطه بین ضخامت قشر جامد شده با زمان انجماد به صورت زیر خواهد بود:

$$D = 22 / 85 \sqrt{t - 3}$$

اگر با استفاده از یک نوع فلز مذاب چند قطعه ریختگی با ابعاد و اشکال مختلف در قالب های با جنس مشابه ریخته گری شود، ملاحظه می شود که هرچه حجم قطعه بیشتر باشد، قطعه به زمان بیشتری برای انجماد نیاز دارد و هرچه حجم قطعه کمتر باشد، زمان انجماد کمتر خواهد بود. البته میزان سطح کل قطعه نیز در زمان انجماد تأثیرگذار است؛ هرچه سطح قطعه بیشتر باشد، انتقال حرارت از قطعه به خارج بهتر صورت گرفته و در نتیجه، قطعه سریع تر منجمد می شود. و به همین ترتیب، سطح کل قطعه کوچکتر باشد، انتقال حرارت از قطعه به خارج کمتر صورت گرفته و زمان انجماد طولانی تر است. با توجه به این مساله، چورنیف قانونی را به دست آورد که براساس آن زمان لازم برای انجماد کامل مذاب به مجذور نسبت حجم به سطح قطعه بستگی دارد. به عبارت دیگر، خواهیم داشت:

$$K \left(\frac{\text{حجم قطعه}}{\text{سطح قطعه}} \right)^2 = \text{زمان انجماد قطعه}$$

که در آن ثابت K به نحوه انجماد فلز مذاب بستگی دارد.

با توجه به رابطه فوق، اگر بخواهیم مکعبی فولادی به ضلع ۵ سانتی متر را ریخته گری کنیم، زمان لازم برای انجماد آن حدود یک چهارم ($\frac{1}{4}$) زمان لازم برای انجماد مکعب فولادی به ضلع ۱۰ سانتی متر خواهد بود. لازم به ذکر است که فرض می شود فولاد مذاب در دمای یکسان به داخل هر دو قالب مکعب ریخته شده است. برای محاسبه نسبت زمان های انجماد دو مکعب، ابتدا حجم و سطح دو مکعب را محاسبه می کنیم و سپس در رابطه چورنیف قرار می دهیم و زمان های انجماد بدست آمده را بر یکدیگر تقسیم می کنیم. به این ترتیب، زمان لازم برای انجماد مکعب فولادی به طول ۵ سانتی متر به شکل زیر محاسبه می شود:

$$\text{حجم مکعب} = 5 \times 5 \times 5 = 125 \text{ cm}^3 \quad \text{سطح کل مکعب} = 6 \times 5 \times 5 = 150 \text{ cm}^2$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{زمان لازم برای انجماد} \\ \text{مکعب به طول ۵ سانتی متر} \end{array} \right) t_1 = K \left(\frac{\text{حجم مکعب}}{\text{سطح مکعب}} \right)^2$$

$$t_1 = K \left(\frac{125}{150} \right)^2$$

$$t_1 = K \left(\frac{25}{36} \right)$$

و زمان انجماد برای مکعب به طول ۱۰ سانتی متر به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\text{حجم مکعب} = 10 \times 10 \times 10 = 1000 \text{ cm}^3 \quad \text{سطح مکعب} = 6 \times 10 \times 10 = 600 \text{ cm}^2$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{زمان لازم برای انجماد مکعب} \\ \text{به طول ۱۰ سانتی متر} \end{array} \right) t_2 = K \left(\frac{\text{حجم مکعب}}{\text{سطح مکعب}} \right)^2$$

$$t_2 = K \left(\frac{1000}{600} \right)^2$$

$$t_2 = K \left(\frac{25}{9} \right)$$

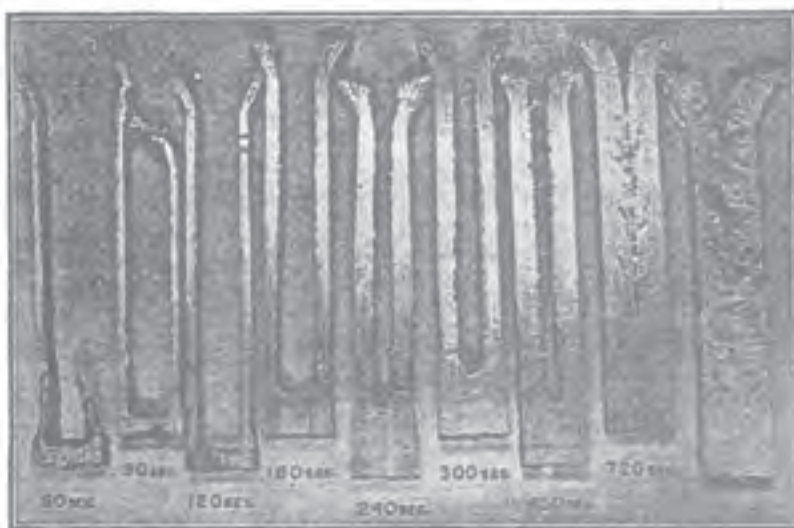
برای مقایسه زمان انجماد دو مکعب t_1 را بر t_2 تقسیم می کنیم.

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{K \left(\frac{25}{36} \right)}{K \left(\frac{25}{9} \right)} \Rightarrow \frac{t_1}{t_2} = \frac{9}{36} \Rightarrow \frac{t_1}{t_2} = \frac{1}{4}$$

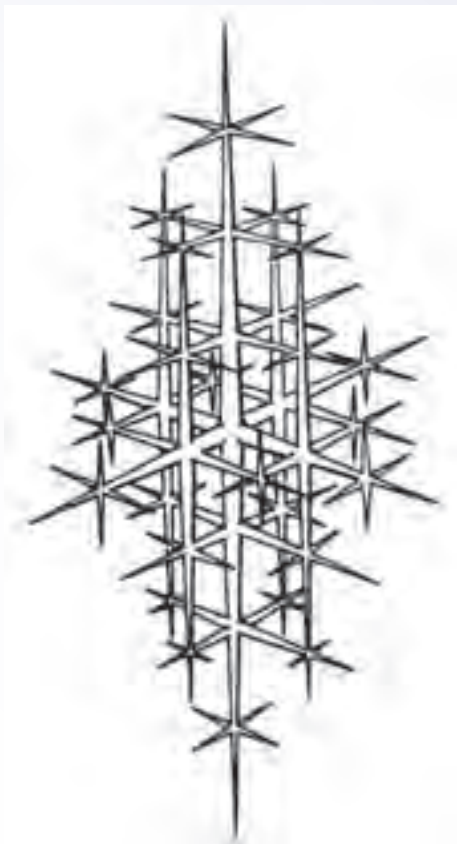
لازم به توضیح است که، K برای ریخته گری هر دو مکعب فولادی یکسان است. بنابراین زمان لازم برای انجماد مکعب به طول ۵ سانتی متر، $\frac{1}{4}$ زمان لازم برای انجماد مکعب به طول ۱۰ سانتی متر است. رابطه چورنیف یک رابطه تقریبی است و تأثیر گوشه های قالب و عوامل مهم دیگر در آن در نظر گرفته نشده است. اما این رابطه به صورت الگویی در تخمین زمان انجماد مورد استفاده ریخته گران قرار می گیرد، ریخته گران با اندازه گیری زمان

انجماد قطعات ریخته‌گری و به کمک این رابطه مقدار K را به دست می‌آورند و از آن برای محاسبه زمان انجماد قطعات با اشکال دیگر از همان جنس فلز مذاب، استفاده می‌کنند.

همان‌طور که گفته شد، با استفاده از رابطه $D = K\sqrt{t-c}$ می‌توان در هر لحظه انجماد، ضخامت لایه منجمد شده را به دست آورد. برای این منظور باید ضرایب ثابت K و C را با استفاده از روش‌های تجربی برای انجماد یک فلز مذاب مشخص در یک قالب معین به دست آورد. برای به دست آوردن این ثوابت به روش آزمایش، به عنوان مثال می‌توان چند قالب با ابعاد و جنس مشابه تهیه نمود و در آن‌ها به مقدار مساوی فلز مذاب با جنس یکسان ریخت، سپس در فواصل زمانی مختلف مذاب داخل قالب را تخلیه کرد و ضخامت لایه جامد شده را اندازه گرفت و در نهایت، باید زمان و ضخامت لایه منجمد شده را در رابطه $D = K\sqrt{t-c}$ قرار داد و مقادیر K و C را به دست آورد. شکل ۳-۳۲، به طور شماتیک زمان انجماد و ضخامت لایه منجمد شده را در قالب‌های مشابه با فلز مذاب یکسان نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هرچه زمان بیشتر شده، ضخامت قشر جامد شده نیز افزایش یافته است که با جای گذاری اندازه‌گیری ضخامت و پوسته منجمد شده و زمان انجماد آن در رابطه فوق، می‌توان مقادیر K و C را به دست آورد و از این رابطه برای ریخته‌گری قطعات مشابه استفاده کرد.



شکل ۳-۳۲



شکل ۳-۳۳- شکل شماتیک دندریت

هنگامی که مذاب داخل قالب ریخته می‌شود، به محض تماس با دیواره قالب یک لایه جامد در سطح دیواره قالب ایجاد می‌شود و در ادامه انجماد، این لایه به سمت مذاب پیشروی می‌کند تا قطعه به طور کامل منجمد شود. با توجه به نحوه خروج گرما از مذاب به خارج، این لایه جامد به صورت شاخ و برگ درخت کاج، که اصطلاحاً دندریت گفته می‌شود، در داخل مذاب رشد می‌کند و به طرف مرکز مذاب که گرم ترین منطقه قطعه ریخته‌گری است، پیش می‌رود و رشد آن تا انجماد کامل مذاب، ادامه می‌یابد. در شکل ۳-۳۳ نحوه رشد دندریتی به طور شماتیک نشان داده شده است؛ از لایه جامد شده ابتدایی در مجاورت دیواره قالب شاخ و برگ‌های جامد به وجود آمده، رشد این شاخ و برگ‌ها به سمت مرکز قطعه تا پایان انجماد مذاب ادامه می‌یابد.

هنگامی که مذاب در محفظه قالب در حال انجماد است، سه منطقه مختلف در قطعه ریختگی در حال انجماد قابل تشخیص است؛

۱- منطقه جامد (لایه جامد) که در مجاورت دیواره قالب بوده و از تماس مذاب با دیواره قالب ایجاد می‌شود.

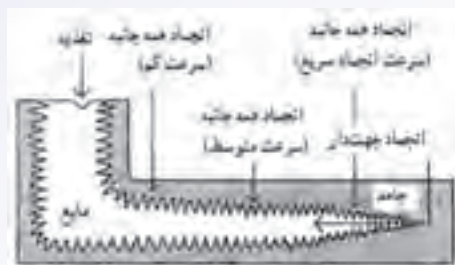
۲- منطقه خمیری که پس از منطقه جامد می‌باشد و از مخلوط مذاب و کریستال‌های جامد و دندریت تشکیل شده است.

۳- منطقه مذاب که پس از منطقه خمیری قرار دارد.

اندازه، شکل و ماهیت منطقه خمیری تأثیر زیادی بر کیفیت قطعه ریختگی دارد. به طوری که هرچه منطقه خمیری کوچکتر باشد، امکان به وجود آمدن مک‌های انقباض در قطعه کمتر است و در نتیجه، قطعه مرغوب‌تر خواهد بود.

به عنوان مثال، می‌توان انجماد یک قطعه ریختگی مطابق شکل ۳-۳۴ را نشان داد. در این حالت، قطعه دارای سه منطقه جامد، خمیری و مذاب می‌باشد. با توجه به شکل، مشخص می‌شود که در گوشه‌های خارجی جسم که از دو سطح گرما خارج می‌شود، مذاب سریع‌تر منجمد شده و در نتیجه، ضخامت لایه جامد بیشتر است

(مانند گوشه‌های سمت راست قطعه). اما در قسمت‌هایی که گوشه داخلی وجود دارد، به علت کم بودن انتقال حرارت از مذاب به خارج، ضخامت لایه منجمد شده کمتر است؛ در نتیجه، سرعت انجماد نیز در این نقاط کمتر است (مانند گوشه سمت چپ در قسمت بالای قطعه). همان‌طور که در شکل ۳-۳۴ ملاحظه می‌شود، در قسمت سمت چپ قطعه، از یک کانال اضافی مذاب یا تغذیه برای جبران و پر کردن حفره‌های انقباضی ایجاد شده در حین انجماد استفاده شده است.

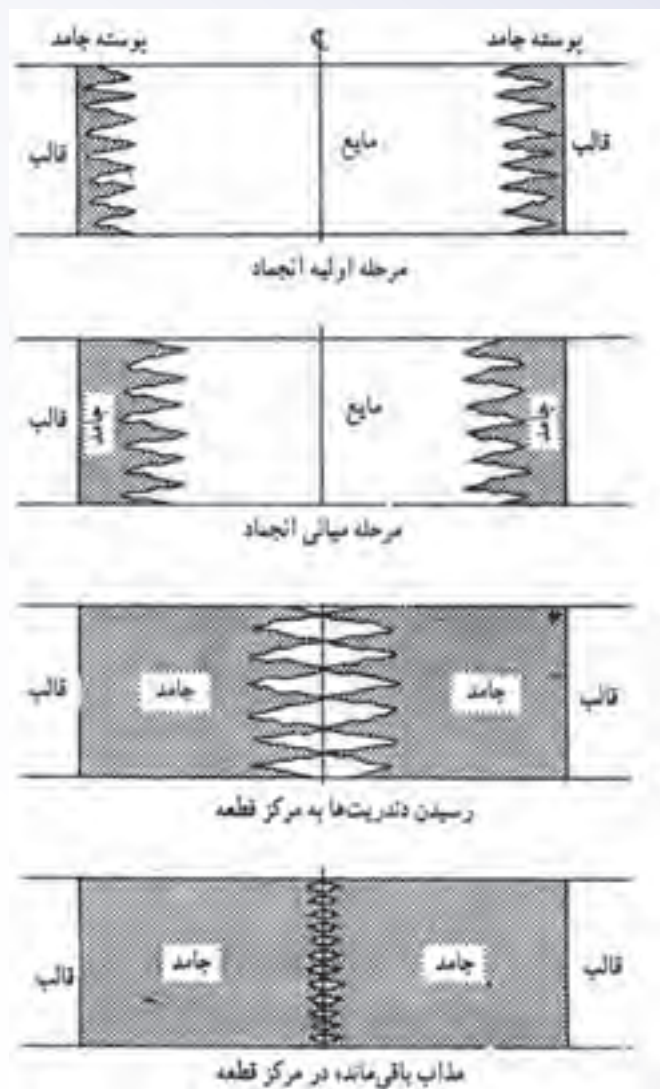


شکل ۳-۳۴- نحوه شماتیک رشد مذاب روی جداره قالب

با توجه به شکل ۳-۳۵، قسمت جامد در تماس با مذاب که در حال رشد می‌باشد و جبهه انجماد نامیده می‌شود، به صورت دندانانه دندانانه و به شکل موجی به سمت مرکز قطعه پیشروی می‌کند. این دندانها تا جایی رشد می‌کند که در مرکز قطعه از دو طرف به یکدیگر برسند. سپس، رشد آن‌ها متوقف می‌شود و نمی‌توانند به حرکت خود ادامه دهند و در این حالت، مقداری مذاب بین این دندانها باقی می‌ماند که در مرحله پایانی انجماد به جامد تبدیل می‌شوند. این مراحل انجماد در شکل ۳-۳۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پس از رسیدن دندانها به یکدیگر، مذاب باقی‌مانده در بین آن‌ها در آخرین مرحله انجماد به جامد تبدیل می‌شود و در اثر انقباض در حین انجماد، حفره‌های انقباضی در مرکز قطعه به وجود می‌آید.

سرعت انجماد مذاب به هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی فلز مذاب و ماده قالب بستگی دارد. هرچه هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی فلز مذاب و ماده قالب بیشتر باشد، گرمای مذاب سریع‌تر به خارج منتقل شده و مذاب سریع‌تر منجمد می‌شود. به عنوان مثال، مذاب در قالب‌های فلزی و گرافیتی نسبت به مذاب در قالب ماسه‌ای سریع‌تر سرد شده و در نتیجه، سریع‌تر منجمد می‌شود.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، بهترین نوع انجماد قطعه ریخته‌گری، انجماد جهت‌دار یا کنترل شده است که در آن انجماد مذاب از دورترین قسمت‌های قالب نسبت به تغذیه شروع شده و آخرین مرحله انجماد در تغذیه انجام می‌شود. در این حالت، حفرات و مک‌های انقباضی در تغذیه تشکیل می‌شوند. از طرف دیگر، گازها و ناخالصی‌های موجود در مذاب توسط جبهه انجماد به سمت تغذیه حرکت کرده و از قطعه رانده می‌شوند پس از انجماد، با جدا کردن تغذیه، به قطعه با کیفیت مناسب خواهیم رسید.



شکل ۳-۳۵- مراحل مختلف انجماد به طور شماتیکی

آلیاژهای با فاصله کم بین دمای لیکوئیدوس و سالییدوس، یا به عبارت دیگر دامنه انجماد کم، دارای منطقه خمیری کوتاهی در جبهه انجماد می‌باشد. از طرف دیگر، هرچه هدایت حرارتی قالب بیشتر باشد، شیب حرارتی مذاب و قالب بیشتر شده و در نتیجه، عرضی منطقه خمیری کمتر خواهد شد. کم شدن عرض منطقه خمیری سبب افزایش مرغوبیت قطعه ریختگی می‌شود. بنابراین، می‌توان با افزایش هدایت حرارتی قالب در دورترین قسمت‌های قالب نسبت به تغذیه، شیب حرارتی قالب را افزایش داد. برای این منظور، می‌توان قطعات فلزی از جنس مس و آلومینیم و چدن را در این مناطق قالب قرار داد تا شیب حرارتی قالب بیشتر شود. در نتیجه عرض منطقه خمیری کاهش یافته و مرغوبیت قطعه ریختگی افزایش می‌یابد.

در پایان جلسه:

- جمع بندی مطالب این جلسه توسط هنرآموز
- تکالیف برای منزل هنرجویان: مطالعه متن درس و آمادگی برای آزمون جلسه آینده.

۱- حضور و غیاب

۲- پیش‌آزمون (به صورت کتبی، شفاهی، پاسخ کوتاه و ...)

۳- یادآوری مطالب جلسه قبل

موضوع:

- چگونگی انجماد فلز در گوشه‌ها،

- چگونگی انجماد در آلیاژها.

برای تفهیم مطالب درسی و آمادگی ذهنی هنجریان قبل از تدریس سؤالاتی که جنبه تفکر و مرور مطالب

قبل دارد به صورت تعاملی با هنجریان مطرح شود؛ سؤالاتی مانند:

۱- آیا انجماد فلز در قطعات مسطح با قطعات دارای گوشه، یکسان است؟

۲- به نظر شما نحوه انجماد مذاب در گوشه‌های قطعه چگونه است؟

۳- آیا امکان به وجود آمدن مک انقباضی در گوشه‌ها وجود دارد؟

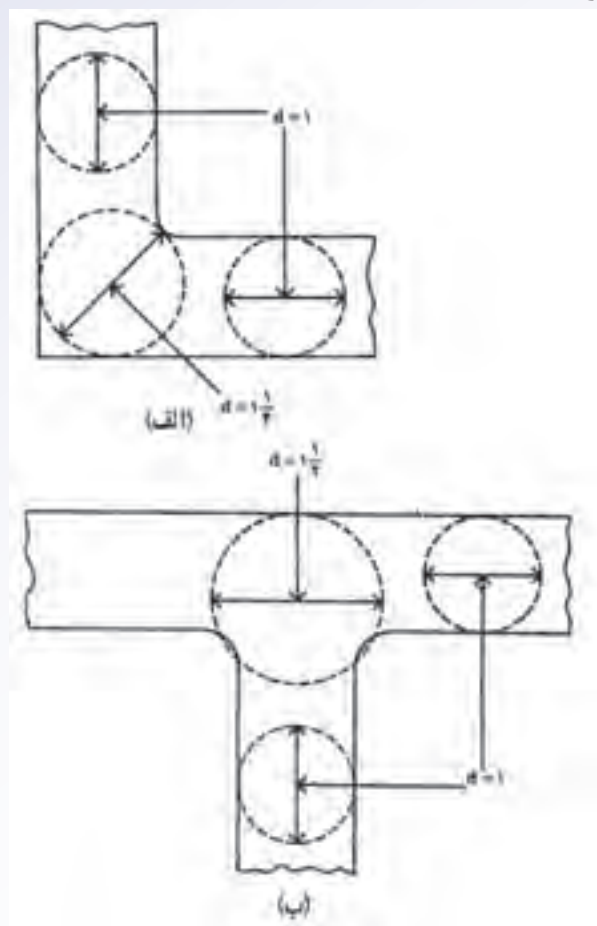
۴- آیا جبهه انجماد آلیاژها مانند فلزات خالص مسطح است؟

۵- آیا ساختار میکروسکوپی قطعه ریختگی از دانه‌های یکسان تشکیل شده است؟

۴-۳- چگونگی انجماد فلز در گوشه‌ها: تاکنون با چگونگی انجماد مذاب روی سطوح صاف قالب آشنا

شدیم. اما در گوشه‌های قطعه، نحوه انجماد مذاب با انجماد روی سطوح صاف متفاوت است معمولاً در گوشه‌های قالب، مانند گوشه‌های اتصال به شکل‌های T و L، مقدار مذاب بیشتر از سطوح صاف است، زیرا ضخامت قطعه در گوشه‌ها نسبت به ضخامت قطعه در سطوح صاف بیشتر است. بنابراین، انجماد مذاب در گوشه‌ها نسبت به سطوح صاف، آهسته‌تر صورت می‌گیرد. برای مشخص کردن اختلاف ضخامت قطعه در گوشه‌ها و قسمت‌های صاف قطعه کافی است دایره‌های محیطی در قسمت‌های صاف قطعه و گوشه‌های قطعه رسم کنیم و قطر آن‌ها را اندازه بگیریم. مشخص می‌شود که قطر دایره محیطی در گوشه‌های اتصال L شکل (مانند شکل ۳۶-۳ الف) و اتصال T شکل (مانند شکل ۳۶-۳ ب) از قطر دایره محیطی در قسمت‌های صاف قطعه بزرگتر است. حتی می‌توان

گفت دایره محیطی در محل اتصال T شکل از دایره محیطی در محل اتصال L شکل با ضخامت‌های یکسان در قسمت‌های صاف دو طرف بزرگتر است.



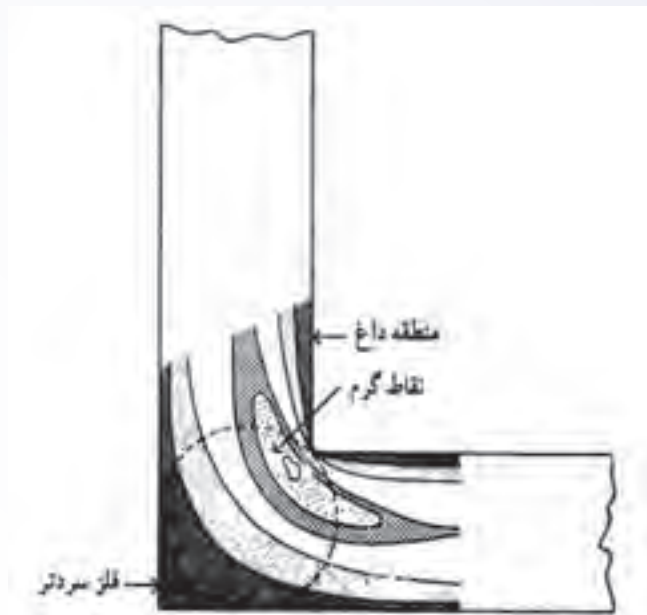
شکل ۳۶-۳. نحوه تعیین ضخیم ترین قسمت قطعه الف- اتصال L ب- اتصال T

با توجه به این که ضخامت در گوشه‌ها نسبت به قسمت‌های صاف بیشتر است، انجماد مذاب در آن‌ها آهسته‌تر بوده و در نتیجه، آخرین مرحله انجماد در گوشه‌ها صورت خواهد گرفت. یعنی، قسمت‌های صاف قطعه سریع‌تر منجمد شده و مذاب موجود در گوشه‌ها در آخرین مرحله انجماد، جامد می‌شوند. در نتیجه، امکان بوجود آمدن حفرات انقباضی در گوشه‌ها بسیار زیاد است. در قطعات L شکل، ضخیم‌ترین قسمت قطعه، محل اتصال قسمت‌های افقی و عمودی قطعه خواهد بود. بنابراین، در این نقاط امکان به‌وجود آمدن حفرات انقباضی وجود دارد. همچنین در مورد قطعات T شکل، ضخیم‌ترین قسمت محل اتصال قسمت‌های افقی و عمودی قطعه است که در آن نقاط امکان تشکیل حفرات انقباضی نسبت به قسمت‌های دیگر بیشتر است، زیرا در آخرین مرحله انجماد، مذاب موجود در این قسمت به جامد تبدیل می‌شود.

اگر در هنگام انجماد قطعه L شکل، دما در نقاط مختلف در محل گوشه اندازه‌گیری شود و نقاطی که دارای

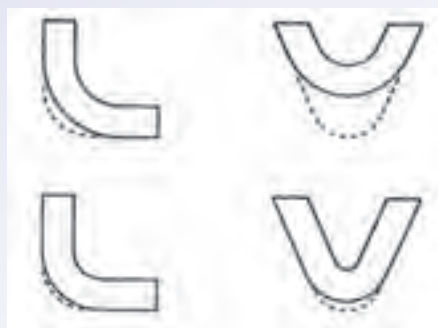
دمای یکسان هستند با یک خط به هم وصل شوند خطوطی به دست می‌آید که به نام خطوط ایزوترم یا همدمای معروف هستند (مطابق شکل ۳-۳۷) همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، منطقه مشخص شده در گوشه، گرم‌ترین نقطه قطعه خواهد بود.

نحوه گسترش و ادامه انجماد یک قطعه L شکل توسط خطوط ایزوترم (هم‌دمای) در شکل ۳-۳۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۷- خطوط هم دما در محل اتصال L شکل

بنابراین به دلیل ضخامت زیاد قطعه در گوشه‌ها، حفره انقباضی در این نقاط، که منطقه تمرکز حرارت در قطعه هستند، تشکیل خواهند شد. با توجه به این که، این گوشه‌ها دارای رأس تیز هستند، در قسمت داخلی آن‌ها انتقال حرارت نسبت به قسمت خارجی آن‌ها کمتر صورت می‌گیرد بنابراین، برای رفع این مشکل باید از گوشه‌های تیز اجتناب کرد و به جای آن‌ها از قوس‌های با شعاع مناسب استفاده کرد، تا انتقال حرارت از تمام نقاط در قسمت گوشه، چه داخلی و چه خارجی، به طور یکسان صورت گیرد. اگر قوس‌ها با شعاع مناسب انتخاب نشوند، منطقه تمرکز حرارتی در گوشه‌ها باقی خواهد ماند و در نتیجه، امکان تشکیل حفرات انقباضی افزایش خواهد یافت. برای رفع این مشکل باید قوس‌ها را، مطابق شکل ۳-۳۸، بزرگتر در نظر گرفت، تا از تمرکز حرارت در گوشه‌ها جلوگیری شود.



شکل ۳-۳۸

در قطعاتی که دارای شکل + (شکل ۳-۳۹ الف) هستند، معمولاً مرکز قطعه، به دلیل داشتن ضخامت بیشتر نسبت به قسمت‌های دیگر قطعه، دیرتر منجمد (در آخرین مرحله انجماد) می‌شود. بنابراین، احتمال به‌وجود آمدن حفره انقباضی در مرکز چنین قطعاتی بسیار زیاد است و حتی می‌توان گفت نسبت به قطعات با شکل‌های L یا V احتمال تشکیل حفره انقباضی بیشتر خواهد بود. بنابراین، باید به روشی از تمرکز حرارت در قسمت مرکزی قطعه جلوگیری کرد. به این منظور، در این قطعات از ماهیچه استفاده می‌شود تا قسمت مرکزی قطعه به صورت توخالی (شکل ۳-۳۹ ب) درآید. به این ترتیب، ضخامت قطعه در آن قسمت‌ها کاهش یافته، سریع‌تر منجمد شده و از به‌وجود آمدن حفرات انقباضی جلوگیری می‌شود. روش دیگر برای جلوگیری از تمرکز حرارتی در قسمت مرکزی قطعه، تغییر شکل قطعه به صورت شکل ۳-۳۹ ج است به شکلی که، قطعه دارای دو اتصال T شکل به جای شکل + می‌شود.



شکل ۳-۳۹

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با ایجاد حفره توخالی در قسمت مرکزی قطعه و یا تغییر شکل قطعه، تمرکز حرارتی از قسمت مرکزی قطعه برداشته شده است.

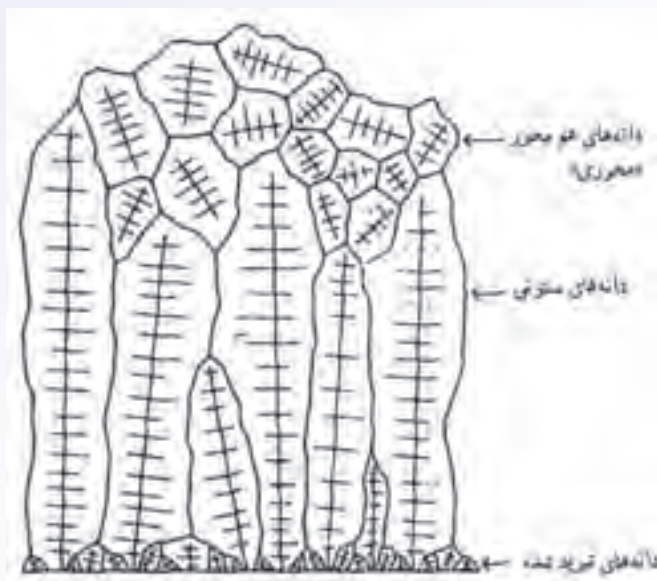
۳-۴-۵- چگونگی انجماد در آلیاژها: هنگامی که فلز خالص به داخل قالب ریخته می‌شود، ابتدا یک

پوسته جامد در مجاورت دیواره‌های قالب تشکیل می‌شود و با گذشت زمان ضخامت این لایه جامد افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، فصل مشترک لایه جامد و مذاب تقریباً به صورت مسطح در داخل مذاب پیش می‌رود، تا زمانی که تمام مذاب به جامد تبدیل شود. اما در مورد آلیاژها، هنگامی که مذاب به داخل قالب ریخته می‌شود، به دلیل سرد بودن دیواره قالب ابتدا پوسته جامد در مجاورت دیواره قالب ایجاد می‌شود در اثر انجماد این پوسته، مقداری از عناصر آلیاژی موجود در آن، از طرف پوسته جامد در فصل مشترک جامد و مایع به داخل مذاب رانده می‌شود. این عناصر آلیاژی سبب می‌شوند که درصد عنصر آلیاژی در مذاب مجاور فصل مشترک جامد و مایع (جبهه انجماد) افزایش یابد این افزایش درصد عنصر آلیاژی سبب کاهش نقطه ذوب نسبت به فلز خالص شود. بنابراین، نحوه انجماد آلیاژ در این منطقه نسبت به فلز خالص متفاوت خواهد بود. در این حالت، جبهه انجماد مانند فلز خالص به صورت مسطح پیشروی نخواهد کرد، بلکه به صورت دندریتی در مذاب حرکت می‌کند؛ شاخ و برگ‌های متعددی در مذاب ایجاد کرده و به رشد خود ادامه می‌دهد. علت رشد دندریتی، به وجود آمدن مناطقی در مذاب است که نسبت به مناطق اطراف خود عنصر آلیاژی کمتری دارند. بنابراین، در آن مناطق، که اندازه آن‌ها کوچک است، جامدی به وجود می‌آید که در نهایت به شکل دندریت خواهد شد.

در این جا، ذکر این نکته لازم است که در فلزات خالص نیز با توجه به گرم‌تر بودن مرکز قطعه از قسمت‌های خارجی آن مذاب ممکن است به صورت دندریتی (دندانه دندانه) منجمد شود. اما به دلیل خالص بودن فلز، طول دندریت‌ها نسبت به طول دندریت در آلیاژ کوتاه‌تر خواهد بود. بدیهی است که، در صورت اضافه کردن عناصر آلیاژی در فلز خالص، طول دندریت‌ها افزایش خواهد یافت.

هنگامی که مذاب فلز به داخل قالب ریخته می‌شود به دلیل سرد بودن دیواره قالب و کاهش سریع دمای مذاب در ابتدا پوسته‌ای جامد در مجاورت دیواره قالب تشکیل می‌شود. از آن جا که مذاب در مجاورت دیواره قالب با سرعت زیاد منجمد می‌شود، پوسته جامد شامل کریستال‌های بسیار ریز خواهد بود، که به آن دانه‌های تبرید شده یا سریع سرد شده گفته می‌شود. علت تشکیل این لایه، ایجاد هسته‌های جامد بسیار زیاد در مذاب به علت کاهش سریع دمای مذاب می‌باشد. پس از تشکیل لایه جامد در مجاورت دیواره قالب، جبهه انجماد به صورت کریستال‌های دندریتی درشت رشد می‌کند، زیرا یک شیب حرارتی از لایه منجمد شده و دیواره قالب تا مرکز قطعه ایجاد می‌شود. در نتیجه، این کریستال‌ها به طرف مرکز قطعه، که دمای بالاتری نسبت به سایر نقاط دارد و منطقه تمرکز حرارتی قطعه است، با سرعت بیشتری رشد کرده و دانه‌های ستونی ایجاد می‌کند. جهت رشد کریستال‌های ستونی در جهت شیب حرارتی موجود در قالب است. به عبارت دیگر، جهت رشد ستون‌ها نشان‌دهنده جهت انجماد قطعه است. ذکر این نکته لازم است که سرعت سرد شدن مذاب و در نتیجه سرعت انجماد در این مرحله، کمتر از مرحله تشکیل پوسته جامد است. بنابراین کریستال‌های دندریتی ستونی به وجود آمده، درشت‌تر از دانه‌های تبرید شده در پوسته جامد اولیه است. رشد دانه‌های ستونی تا زمانی ادامه می‌یابد

که شیب حرارتی یا اختلاف دمای بین جامد و مذاب به شدت کاهش می‌یابد. در این صورت، رشد دانه‌های ستونی متوقف می‌شود و در مذاب باقی‌مانده در مرکز قطعه هسته‌های جامد به وجود می‌آید. این هسته‌ها می‌توانند در تمام جهات رشد کنند و برخلاف دانه‌های ستونی تنها در جهت انجماد رشد نمی‌کنند. در نتیجه، در این قسمت قطعه ریختگی، دانه‌ها یا کریستال‌های هم‌محور که در تمام جهات رشد کرده و به یکدیگر رسیده‌اند، به وجود می‌آید. در شکل ۴۰-۳، ساختمان ماکروسکوپی قسمتی از قطعه ریختگی نشان داده شده است.



شکل ۴۰-۳. نمای شماتیک مقطع جنبی یک قطعه ریختگی

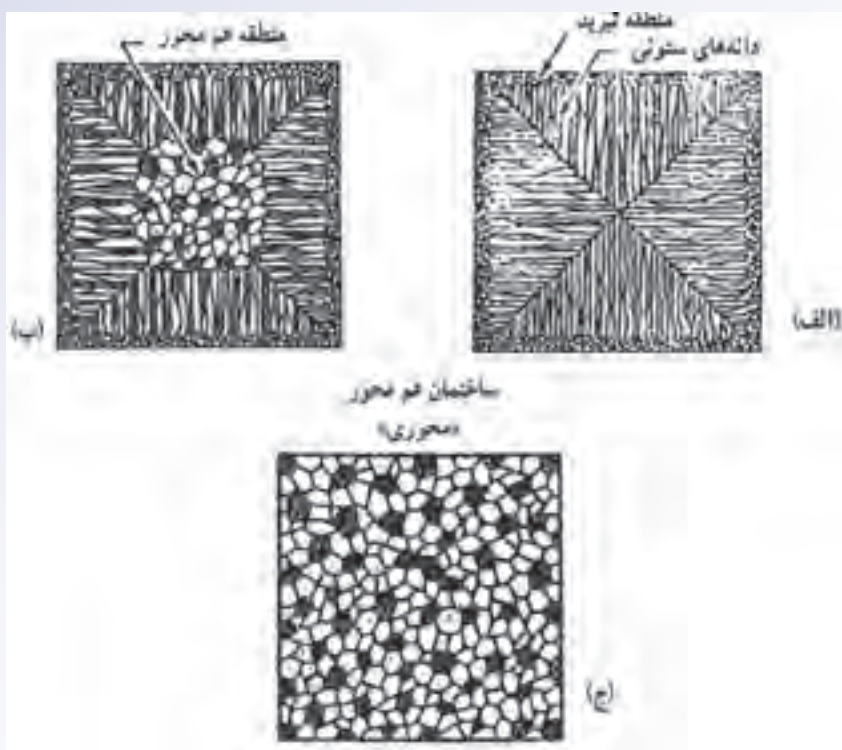
همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، دانه‌های تبریدی که در سطح قالب ایجاد می‌شوند بسیار ریز هستند. بعد از تشکیل دانه‌های تبریدی، با توجه به جهت انجماد، دانه‌های ستونی به وجود آمده است و رشد آن‌ها تا زمانی ادامه یافته که در مذاب شیب حرارتی وجود داشته است. پس از دانه‌های ستونی، دانه‌های هم‌محور، که در تمام جهات رشد کرده‌اند، ایجاد شده است.

برای تعیین ساختار مناسب قطعه ریختگی لازم است که کاربرد آن قطعه مشخص شود. به عنوان مثال، در قطعاتی که با توجه به نوع استفاده آن‌ها نیاز به مقاومت به سایش و سختی بالای سطح دارند، بهتر است سطح قطعه از نوع دانه‌های تبرید شده باشد، زیرا این دانه‌ها ریز بوده و سختی و مقاومت به سایش بالاتری را نسبت به بقیه ساختارها از خود نشان می‌دهند. دانه‌های تبرید شده در شکل ۴۱-۳ الف نشان داده شده است. در این ساختار، سرعت انجماد به حدی بالا بوده است که ضخامت لایه شامل دانه‌های تبرید شده افزایش یافته است. پس از آن دانه‌های ستونی و در انتها، دانه‌های هم‌محور در مرکز قطعه ایجاد شده است. برای مثال اگر قطعه از آلومینیم یا آلیاژهای حاوی روی به روش ریخته‌گری تحت فشار در قالب‌های فلزی تولید شود، نسبت به قطعات

تولید شده به روش ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای دارای سطوح با سختی زیادتری خواهند بود زیرا سرعت انجماد در روش تخت فشار نسبت به روش قالب ماسه‌ای بیشتر می‌باشد. بنابراین، برای تولید قطعاتی مانند دستگیره درب اتومبیل که در تماس مداوم با دست می‌باشند و احتمال سایش سطح آن‌ها زیاد است، بهتر است که مذاب در قالب فلزی ریخته شود، تا سطح قطعه از سختی و مقاومت به سایش بالاتری برخوردار باشد.

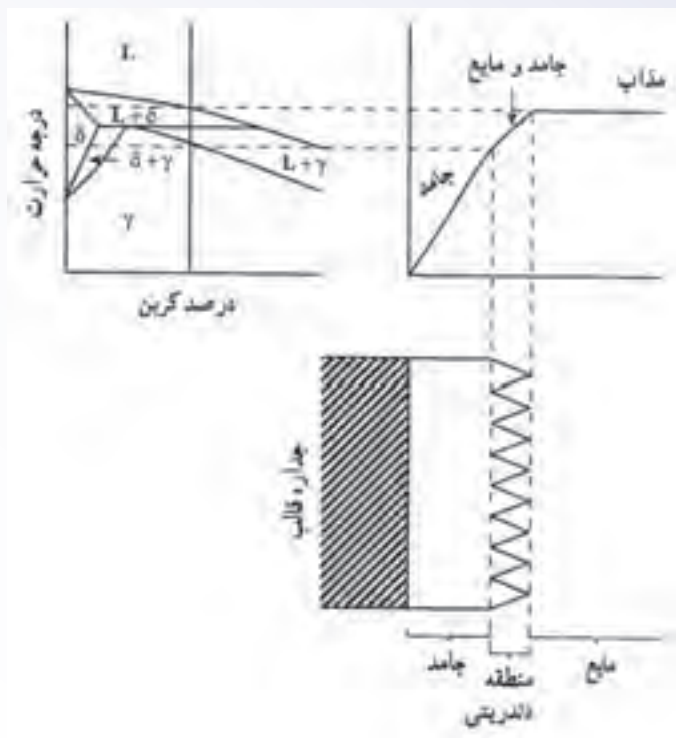
در شکل ۳-۴۱ ب، قطعه ریختگی با ساختمان کریستال‌های ستونی نشان داده شده است. در این قطعه، هنگامی که مذاب به داخل قالب ریخته شده، ابتدا دانه‌های تبرید شده در مجاورت دیواره قالب تشکیل شده است و سرعت انجماد به حدی بوده است که دانه‌های ستونی تا مرکز قطعه رشد کرده و دانه‌های هم‌محور در مرکز قطعه ایجاد نشده است. با توجه به این که رشد دانه‌های ستونی در جهت انجماد (خلاف جهت انتقال حرارت) می‌باشد و انجماد آن‌ها به صورت جهت‌دار است، حفره‌های گازی و ناخالصی‌ها در این ساختار بسیار کمتر از ساختمان دانه‌های هم‌محور به جود می‌آید. اما این قطعات در جهت رشد دانه‌های ستونی خواص مکانیکی بهتری نسبت به جهت عمود بر جهت رشد دانه‌ها نشان می‌دهند و مقاومت قطعه در جهت‌های دیگر مانند جهت عمود بر جهت رشد دانه‌ها بسیار کم است. بنابراین در هنگام استفاده از قطعات با ساختمان دانه‌های ستونی باید جهت نیروی اعمالی بر قطعه در جهت رشد دانه‌های ستونی باشد زیرا در غیر این صورت قطعه تنها مدت زمان کوتاهی در برابر نیروی اعمالی مقاومت می‌کند. به عنوان مثال، بهتر است پره‌های توربین دارای ساختمان کریستالی ستونی باشد چون، در جهت رشد دانه‌ها مقاومت بهتری در برابر نیروها از خود نشان می‌دهد. همچنین در مورد فلزات و آلیاژهای مغناطیسی، قطعات با ساختمان دانه‌های ستونی خواص مغناطیسی بهتری از خود نشان می‌دهند.

در شکل ۳-۴۱ ج - قطعه ریختگی با دانه‌ها هم‌محور نشان داده شده است. در این حالت، دانه‌ها در تمام جهات رشد یکسان دارند و انجماد آن‌ها جهت‌دار نیست. بنابراین خواص مکانیکی قطعه در تمام جهات تقریباً یکسان خواهد بود. به همین دلیل، ساختمان با دانه‌های هم‌محور بیشتر در طراحی قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. می‌توان تقریباً در اکثر قطعات با کاربردهای معمول از فلز با دانه‌های هم‌محور استفاده کرد. برای ایجاد ساختمان هم‌محور در قطعه ریختگی در هنگام ریخته‌گری روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها، استفاده از مواد جوانه‌زا در مذاب است. به عنوان مثال، برای آلیاژهای آلومینیم از جوانه‌زهای تیتانیم و بُر، برای آلیاژهای منیزیم، از کربن، برای چدن از سیلیسیم و برای فولاد از تیتانیم استفاده می‌شود.



شکل ۴۱-۳. نمونه دانه ها در فلز ریختگی

همان‌طور که توضیح داده شد عرض منطقه خمیری در جلوی جبهه انجماد تأثیر بسیار مهمی در کیفیت قطعات ریختگی دارد؛ به طوری که، هرچه عرض منطقه خمیری بیشتر باشد، احتمال ایجاد مک‌های انقباضی و گازی بیشتر است زیرا در هنگام انجماد در منطقه خمیری، به علت عرض زیاد این منطقه، امکان باقی ماندن و به تله افتادن گازها و ناخالصی‌ها در بین شاخه‌های دندریت ایجاد شده در آن منطقه بیشتر است. از طرف دیگر، در حین انجماد، مذاب باقی مانده بین شاخه‌های دندریت ارتباط خود را با مذاب قسمت‌های دیگر از دست می‌دهد. بنابراین هنگامی که این مذاب منجمد می‌شود، امکان مذاب‌رسانی از قسمت‌های دیگر قطعه به آن قسمت وجود ندارد و انقباض در حین انجماد سبب به وجود آمدن حفره‌های انقباضی در آن قسمت قطعه می‌شود زیرا این حالت در آلیاژهای با دامنه انجماد زیاد که منطقه خمیری با عرض زیادی دارند و وقتی سرعت انجماد به حدی کم است که شیب حرارتی بین مذاب و قالب کم می‌شود، به وجود می‌آید، اما، در آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاه، عرض منطقه خمیری کمتر بوده و امکان به تله افتادن ناخالصی و مک‌های گازی در بین شاخه‌های دندریت و ایجاد مک‌های انقباضی کمتر است. بنابراین، قطعه مرغوب‌تر خواهد بود. شکل ۴۲-۳، ارتباط دامنه انجماد (فاصله دمایی بین دمای لیکوئیدوس و سالییدوس) و شیب حرارتی (اختلاف بین دمای مذاب و جامد تشکیل شده و قالب) با عرض منطقه خمیری را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴۲- رابطه بین نمودار تعادل آهن و کربن (برای فولاد با ۰/۳ درصد کربن) و رفتار انجماد آن

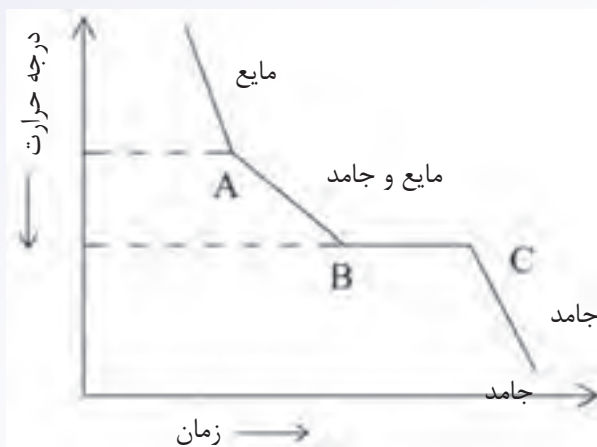
همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، هرچه دامنه انجماد یا فاصله دمایی بین دمای لیکوئیدوس و سالییدوس بیشتر باشد، عرض منطقه خمیری نیز بیشتر خواهد بود و برعکس. از طرف دیگر، هرچه شیب حرارتی در جبهه انجماد یا اختلاف دمای بین مذاب و جامد تشکیل شده و قالب بیشتر باشد، یعنی، انتقال حرارت از طریق جامد تشکیل شده و قالب بهتر صورت گیرد، عرض منطقه خمیری کمتر خواهد شد.

در پایان جلسه:

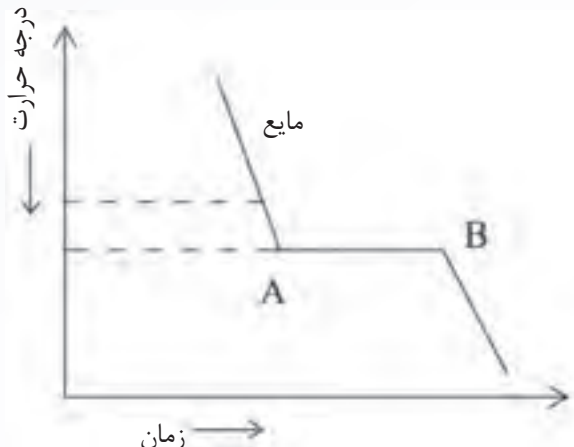
- جمع بندی مطالب این جلسه توسط هنرآموز
- تکالیف برای منزل هنرجویان: مطالعه متن درس و آمادگی برای آزمون جلسه آینده.

ارزشیابی (۳)

- ۱- تأثیر افزودن عناصر آلیاژی به فلزات خالص از نظر ریخته‌گری چیست؟ نمودار سردشدن را برای فلز خالص و آلیاژ رسم نمایید.
- ۲- مراحل انقباض فلزات را هنگام انجماد شرح دهید.
- ۳- نمودارهای سردشدن مذاب (الف و ب) هرکدام مربوط به انجماد چه فلز و یا آلیاژی هستند؟ توضیح دهید.



(ب)

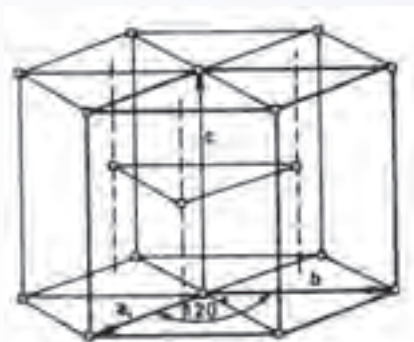


(الف)

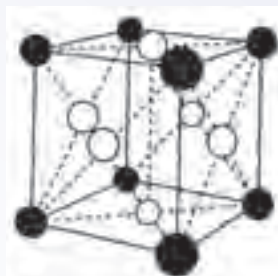
- ۴- الف) آلیاژهای یوتکتیک را توضیح دهید.
- ب) ساختمان آلیاژهای یوتکتیک چگونه است؟
- ۵- انواع انجماد را نام ببرید.
- ۶- سه نوع شبکه کریستالی مهم در فلزات را نام ببرید. سلول واحد هریک را با رسم شکل نشان دهید.
- ۷- انجماد همه‌جانبه را همراه با رسم شکل توضیح دهید.
- ۸- انواع دانه‌هایی را که در حین انجماد فلزات و آلیاژها به وجود می‌آیند نام ببرید.
- ۹- نمودار سردشدن مذاب آلیاژی را که عناصر تشکیل‌دهنده آن در یکدیگر حل شده‌اند رسم کنید.
- ۱۰- انجماد جهت‌دار یا کنترل‌شده را با رسم شکل توضیح دهید.
- ۱۱- مادون انجماد را تعریف کنید.

- ۱۲- جدایش را تعریف نموده و بگویید چگونه می‌توان آن را از بین برد.
- ۱۳- انجماد فلزات خالص به چند صورت انجام می‌شود؟ نام برده و توضیح دهید.
- ۱۴- چگونگی تشکیل دانه‌های تبریدی را شرح دهید. کاربرد این نوع دانه‌ها در چه نوع قطعاتی است؟
- ۱۵- نام هریک از شبکه‌های کریستالی (سیستم‌های بلوری) نشان داده شده در شکل الف و ب را

بنویسید.

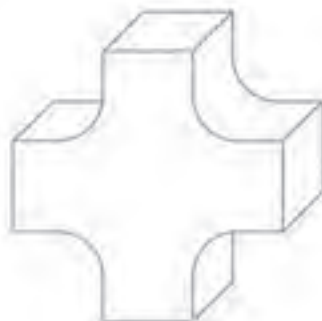


(ب)



(الف)

- ۱۶- خواص مکانیکی ساختارهای با دانه‌های ستونی و دانه‌های هم‌محور چه تفاوتی دارند؟
- ۱۷- نمودار سردشدن مذاب فلز خالص و آلیاژ (آلیاژی که عناصر آن در یکدیگر حل شده باشند) را جداگانه رسم نموده و تفاوت‌های بین آن نمودارها را با دلیل توضیح دهید.
- ۱۸- جامد شدن سریع مذاب در قالب چه اثری بر قطعات ریختگی دارد؟ توضیح دهید.
- ۱۹- در قطعه مطابق شکل زیر، که قالب آن به سرعت از مذاب پر شود، حفره انقباضی در کدام قسمت تشکیل خواهد شد؟ دلیل آن را توضیح دهید.



اصول تغذیه‌گذاری در قطعه‌های ریختگی

هدف

- ۱- آشنایی با نحوه انجماد آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاه، طولانی و میانی.
- ۲- آشنایی با اصول تغذیه در آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاه، میانی و طولانی.
- ۳- آشنایی با محل تغذیه و انجماد جهت دار
- ۴- آشنایی با اجزای تغذیه
- ۵- آشنایی با انواع تغذیه
- ۶- آشنایی با روش‌های افزایش راندمان تغذیه.

مفاهیم کلی

- ۱- تغذیه‌گذاری و انقباض فلزات
- ۲- انجماد آلیاژهای مختلف با دامنه انجماد متفاوت و نحوه تغذیه‌گذاری در آن‌ها.
- ۳- تعیین عمل مناسب تغذیه
- ۴- اجزای تغذیه
- ۵- انواع تغذیه
- ۶- روش‌های افزایش کارایی تغذیه

مفاهیم اساسی

- ۱- تغذیه‌گذاری در ریخته‌گری عملی است برای جبران تغییرات حجمی فلز در حالت مایع و حین انجماد به منظور تولید قطعات ریختگی عاری از عیوب انقباضی
- ۲- هنگامی که مذاب سرد می‌شود، سه نوع انقباض در آن اتفاق می‌افتد، انقباض در حالت مایع، انقباض در حین انجماد و انقباض در حالت جامد.
- ۳- انقباض در حالت جامد در مدلسازی جبران می‌شود و اما انقباض در حالت مذاب و حین انجماد با مذاب اضافی یا تغذیه جبران می‌شود.
- ۴- وظیفه اصلی تغذیه، متمرکز کردن انقباض مذاب و فراهم آوردن امکان مذاب‌رسانی به

قسمت‌های در حال انجماد قطعه ریختگی است.

۵- آلیاژها از نظر نحوه انجماد به سه گروه، آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاه (کمتر از 50°C)، آلیاژهای با دامنه انجماد متوسط (بین 50°C تا 110°C) و آلیاژهای با دامنه انجماد طولانی (بیشتر از 110°C) تقسیم می‌شوند.

۶- در آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاه یا با انجماد پوسته‌ای، جبهه انجماد تقریباً صاف و هموار است.

۷- در آلیاژهای با دامنه انجماد طولانی یا با انجماد خمیری، انجماد در اطراف جداره قالب به صورت پوسته‌ای شروع می‌شود. اما پس از آن به صورت خمیری (مخلوط مذاب و جامد) ادامه می‌یابد.

۸- در آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاه، معمولاً حفرات انقباضی در قسمت‌های ضخیم، یا به عبارت دیگر در گرم‌ترین قسمت قطعه، به وجود می‌آید.

۹- در آلیاژهای با دامنه انجماد طولانی، مک‌های انقباضی درشت در گرم‌ترین قسمت قطعه و مک‌های انقباضی ریز به صورت پراکنده در تمام قسمت‌های قطعه به وجود می‌آید.

۱۰- در آلیاژهای با دامنه انجماد متوسط یا انجماد میانی، انجماد به صورت پوسته‌ای از جداره قالب شروع شده و پس از آن به صورت ترکیبی از دو حالت پوسته‌ای و خمیری ادامه می‌یابد.

۱۱- افزایش سرعت سردکردن در تغییر نحوه انجماد از حالت خمیری به پوسته‌ای بسیار مؤثر است.

۱۲- جهت انجماد در تعیین محل مناسب تغذیه مهم است به طوری که بهتر است انجماد از دورترین قسمت قطعه نسبت به تغذیه آغاز شود، به صورت جهت‌دار ادامه یابد و در تغذیه پایان یابد.

۱۳- عوامل مؤثر بر جهت انجماد عبارتند از: نوع آلیاژ و مدل انجماد آن، ابعاد محفظه قالب و نحوه طراحی قطعه ریختگی.

۱۴- تغذیه باید در مجاورت نقاطی از قطعه ریختگی قرار گیرد که از نقاط دیگر گرم‌تر باشند.

۱۵- نقاط گرم در یک قطعه ریختگی عبارتند از: نقاطی که حجم مذاب در آن‌ها بیشتر از قسمت‌های دیگر قطعه است و گوشه‌های داخلی که در مجاورت این نقاط باشد. زیرا انتقال حرارت در آن‌ها به کندی انجام می‌شود.

۱۶- تغذیه باید در محلی قرار داده شود که کمترین حجم مذاب در آن وجود داشته باشد و به کمک تغذیه، عمل مذاب‌رسانی به صورت کامل انجام گیرد.

۱۷- اجزای تغذیه عبارتند از: منبع تغذیه و گلویی تغذیه

۱۸- منبع تغذیه به محلی گفته می‌شود که مذاب لازم را برای جبران انقباض حجمی مذاب و انقباض حین انجماد فراهم کند.

۱۹- منبع تغذیه باید: الف) اندازه مناسب داشته باشد.

ب) در محل مناسب قرار گیرد.

ج) در زمان مناسب منجمد شود.

۲۰- محل اتصال قطعه به تغذیه، گلویی تغذیه گفته می‌شود.

۲۱- انجماد جهت‌دار از قطعه به تغذیه و مذاب‌رسانی صحیح از تغذیه به قطعه هنگامی امکان‌پذیر می‌شود که زمان انجماد گلویی (t_n) بین زمان انجماد قطعه (t_c) و زمان انجماد تغذیه (t_r) قرار گیرد. به عبارت دیگر مدول گلویی (M_n) بین مدول قطعه (M_c) و مدول تغذیه (M_r) قرار گیرد.

$$t_r > t_n > t_c$$

$$M_r > M_n > M_c$$

۲۲- رابطه عمومی برای مدول گلویی برابر است با:

$$M_n = 1/2 M_c$$

۲۳- رابطه مدول گلویی در مورد آلیاژهای با انجماد پوخته‌ای عبارت است از:

$$M_n = 1/1 M_c$$

۲۴- به منظور کاهش هزینه جدا کردن تغذیه از قطعه از ماهیچه برشی استفاده می‌شود.

۲۵- تغذیه براساس محل قرار گرفتن آن و ارتباط با سیستم راهگاهی، به سه روش تقسیم‌بندی می‌شود:

- تقسیم‌بندی تغذیه براساس قرار گرفتن تغذیه قبل یا بعد از محفظه قالب.

- تقسیم‌بندی تغذیه براساس موقعیت قرار گرفتن تغذیه نسبت به قطعه ریختگی.

- تقسیم‌بندی تغذیه براساس ارتباط تغذیه با اتمسفر محیط.

۲۶- انواع تغذیه براساس محل قرار گرفتن تغذیه، قبل یا بعد از محفظه قالب عبارتند از: تغذیه گرم و تغذیه سرد.

۲۷- در تغذیه گرم، تغذیه بین راهباره و قطعه قرار می‌گیرد و مذاب موجود در تغذیه گرم‌تر از مذاب موجود در قطعه است.

۲۸- در تغذیه سرد، قطعه بین راهباره و تغذیه قرار می‌گیرد و مذاب داخل تغذیه نسبت به

قطعه سردتر است.

۲۹- انواع تغذیه براساس موقعیت قرارگرفتن تغذیه نسبت به قطعه عبارتند از:

الف) تغذیه بالایی

ب) تغذیه کناری

ج) تغذیه لب به لب (گوشه بالا)

د) تغذیه از بالا که وظیفه راهگاه بارریز را نیز به عهده دارد.

ه) تغذیه از بالا که جزیی از قسمت بالایی قطعه به شمار می‌رود.

۳۰- انواع تغذیه براساس ارتباط تغذیه با اتمسفر محیط عبارتند از: تغذیه باز و تغذیه کور

۳۱- در تغذیه باز، قسمت بالای منبع تغذیه با هوای محیط در تماس است.

۳۲- در تغذیه کور، تمام اطراف تغذیه به جزء محل اتصال با قطعه ریختگی، با ماسه احاطه

شده است.

۳۳- کمک تغذیه روشی است که به منظور بهبود کیفیت قطعه ریختگی، بالابردن راندمان

ریخته‌گری و درنتیجه، کاهش قیمت تمام‌شده استفاده می‌شود. کمک تغذیه سبب افزایش شیب

دمایی از تغذیه به قطعه می‌شود.

۳۴- روش‌های کمک تغذیه عبارتند از:

- استفاده از مواد عایق و گرمازا

- استفاده از مبرد

- تغییر در طراحی سیستم راهگاهی و بارریزی

- تغییر در طراحی قطعات و مدل

- کنترل دمای بارریزی

۳۵- استفاده از مواد عایق و گرمازا سبب ایجاد شیب دمایی مناسب از تغذیه به قطعه و کاهش

قابل توجه حجم تغذیه می‌شود.

۳۶- مبردها از جنس موادی هستند که هدایت حرارتی بالایی دارند و به منظور افزایش شیب

دمایی از تغذیه به قالب استفاده می‌شوند.

۳۷- دو نوع مبرد وجود دارد، که عبارتند از: ۱- مبردهای خارجی ۲- مبردهای داخلی

۳۸- اصلاح سیستم راهگاهی و بارریزی سبب کاهش مک‌های انقباضی و بهبود کیفیت قطعه

ریختگی می‌شود.

۳۹- تغییر در طراحی بعضی قطعات ریختگی می‌تواند موجب بهبود مذاب‌رسانی و درنتیجه،

تولید قطعه سالم شود.

- ۴۰- دمای بارریزی پایین، سبب کاهش اثر تغذیه خواهد شد.
- ۴۱- دمای بارریزی بالا، سبب افزایش حفره‌های انقباضی می‌شود.

انتظارات آموزشی

الف) در سطح دانش

- ۱- تغذیه‌گذاری را تعریف کند.
- ۲- انواع انقباض در هنگام سرد کردن مذاب تا رسیدن جامد به دمای محیط را نام ببرد.
- ۳- انواع آلیاژها را براساس دامنه انجماد تقسیم‌بندی کند.
- ۴- عوامل مؤثر بر جهت انجماد را نام ببرد.
- ۵- اجزای تغذیه را نام ببرد.
- ۶- منبع تغذیه را تعریف کند و سه شرط اصلی آن را نام ببرد.
- ۷- گلوئی تغذیه را تعریف کند.
- ۸- ماهیچه برشی را تعریف کند.
- ۹- انواع تغذیه را تقسیم‌بندی نماید.
- ۱۰- تغذیه گرم و تغذیه سرد را تعریف کند.
- ۱۱- انواع تغذیه را براساس موقعیت قرارگرفتن تغذیه نسبت به قطعه نام ببرد.
- ۱۲- تغذیه باز و تغذیه کور را تعریف کند.
- ۱۳- کمک تغذیه را تعریف کند.
- ۱۴- روش‌های کمک تغذیه را نام ببرد.
- ۱۵- مبرد را تعریف کند و انواع آن را نام ببرد.

ب) در سطح درک و فهم مطالب

- ۱- انقباض فلزات را از حالت جامد به مایع توضیح دهد.
- ۲- وظیفه اصلی تغذیه را شرح دهد.
- ۳- نحوه انجماد فلزات و آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاه، متوسط و طولانی را توضیح دهد.
- ۴- مراحل انجماد خمیری را شرح دهد.
- ۵- عوامل مؤثر در تعیین محل تغذیه را توضیح دهد.

- ۶- عوامل مؤثر بر جهت انجماد را شرح دهد.
- ۷- دلایل به وجود آمدن نقاط گرم در قطعات ریختگی را توضیح دهد.
- ۸- اثر گلوئی تغذیه بر نحوه انجماد قطعه تغذیه را توضیح دهد.
- ۹- نحوه مذاب‌رسانی در تغذیه‌های گرم و سرد را شرح دهد.
- ۱۰- نحوه عملکرد تغذیه باز را تشریح کند.
- ۱۱- نحوه عملکرد تغذیه کور را تشریح کند.
- ۱۲- تأثیر استفاده از عایق و گرمازا را بر راندمان تغذیه توضیح دهد.
- ۱۳- نحوه عملکرد مبردهای داخلی و خارجی را شرح دهد.
- ۱۴- اثر اصلاح سیستم راهگامی و بارریزی را بر افزایش راندمان تغذیه توضیح دهد.

ج) سطح کاربرد معلومات

- ۱- نحوه جبران انقباض در هنگام انجماد فلزات را توضیح دهد.
- ۲- نحوه انجماد آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاه، متوسط و طولانی را با یکدیگر مقایسه کند.
- ۳- نحوه تشکیل حفره انقباضی در آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاه، متوسط و طولانی را توضیح دهد.
- ۴- ابعاد گلوئی تغذیه را مشخص کند.
- ۵- نحوه عملکرد تغذیه باز و کور را با یکدیگر مقایسه کرده و مورد بررسی قرار دهد.

د) سطح تجزیه و تحلیل

- ۱- انقباض در مراحل مختلف سرد شدن مذاب تا رسیدن به جامد در دمای محیط رامقایسه کند.
- ۲- نحوه انجماد دو قطعه را، یکی با تغذیه و دیگری بدون تغذیه، مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد.
- ۳- تغذیه‌گذاری در آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاه، متوسط و طولانی را با یکدیگر مقایسه کند.
- ۴- اثر سرعت سرد کردن را بر نحوه انجماد آلیاژهای با دامنه انجماد متوسط، مورد بررسی قرار دهد.
- ۵- تغییرات شیب دمایی در تغذیه‌های گرم و سرد را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد.

هـ) در سطح ترکیب و نوآوری

- ۱- نحوه انجماد یک آلیاژ مذاب را در قالب ریخته‌گری پیش‌بینی نماید.
- ۲- نحوه انتقال حرارت از قسمت‌های مختلف قطعه را مشخص نماید.

- ۳- نحوه تغذیه گذاری در یک قطعه ریختگی داده شده را با ذکر علت توضیح دهد.
- ۴- نحوه انجماد یک آلیاژ را با توجه به دامنۀ انجماد پیش بینی نماید.
- ۵- محل تغذیه در یک قطعه داده شده را با توجه به نوع آلیاژ مشخص نماید.
- ۶- با استفاده از روش های کمک تغذیه در ریخته گری یک قطعه، راندمان تغذیه را افزایش دهد.

زمان پیش بینی شده برای تدریس این فصل، ۶ جلسه ۱۰۰ دقیقه ای برای تدریس و ۱ جلسه ۱۰۰ دقیقه ای برای ارزشیابی است.