

### انجماد فلزات

هدف‌های رفتاری: از فراگیر انتظار می‌رود در پایان این فصل بتواند:

- ۱- اهمیت نقش کلی انجماد را بیان کند.
- ۲- خاصیت تبلور فلزات و آلیاژها را در اثر انجماد توضیح دهد.
- ۳- چگونگی وقوع پدیده انجماد را در مواد فلزی شرح دهد.

### ۳- انجماد فلزات

#### مقدمه

بررسی فلزات و آلیاژها بدون مطالعه ساختمان و مشخصات آنها در حالت مایع و جامد امکان‌پذیر نمی‌باشد. شناخت طبیعت فلزات و استفاده از نتایج به‌دست آمده می‌تواند در روش‌های تهیه فلزات راهنما بوده و همچنین می‌توان خواص فلزات را با آگاهی از طبیعت آنها مطابق با نیازهای بشری تغییر داد.

#### ۱-۳- طبیعت و ساختمان فلزات

برای درک طبیعت و ساختمان فلزات ابتدا لازم است سه حالتی را که یک ماده می‌تواند دارا باشد مورد بررسی قرار داد. این سه حالت عبارتند از حالات جامد، مایع و بخار. ساده‌ترین مثال در این زمینه بررسی حالات مختلف آب می‌باشد که در درجه حرارت‌های زیر صفر به صورت جامد یا یخ، در درجه حرارت‌های بین صفر و صد درجه سانتی‌گراد به صورت مایع یا آب و در درجه حرارت بالاتر از صد درجه سانتی‌گراد به صورت بخار موجود است.

یخ دارای شکل و حجم مشخص بوده و استحکام آن نیز محدود است در صورتی که آب با آن که دارای حجم معینی است ولی دارای شکل مشخصی نمی‌باشد یعنی شکل ظرف را به خود می‌گیرد. استحکام آن نیز از یخ بسیار کمتر است. بخار نه دارای شکل مشخصی است و نه حجم معینی دارد.

این حالات را می‌توان به تمام اجسام دیگر نیز ارتباط داد. البته استثنائات کمی نیز وجود دارند که پرداختن به آن‌ها از بحث این کتاب خارج است. به‌طور کلی اجسام به سه صورت جامد، مایع و گاز وجود دارند. موادی که دارای شکل و حجم مشخص باشند جامد، آن‌هایی که دارای حجم مشخص و شکل نامعین باشند مایع و موادی که نه شکل و نه حجم مشخص و معینی داشته باشند گاز نامیده می‌شوند.

گازها دارای ساختمان داخلی نامنظم بوده به این معنی که اتم‌ها جای مشخصی نسبت به یکدیگر نداشته و دائماً در حرکت می‌باشند. نیروی جاذبه بین اتم‌ها در گاز اندک است. گازها را به آسانی می‌توان تحت فشار قرار داد و شکل آن‌ها را به صورت ظرف محتوی خود تغییر داد.

در مایعات فاصله بین اتم‌ها از گازها به مراتب کم‌تر است و به همین دلیل مایعات اغلب تراکم‌ناپذیرند. نیروی بین اتم‌ها در مایع نسبت به گازها زیاد است و ملکول‌ها می‌توانند با حفظ فاصله بین خود حرکت کرده و شکل ظرف را به خود گیرند. در جامدات مانند مایعات فاصله بین اتم‌ها کم بوده ولی نیروی بین اتم‌ها در حالت جامد خیلی زیادتر است به هر حال اتم‌ها نسبت به یکدیگر در فواصل مشخص و معینی قرار دارند. به‌طور کلی شکلی از ماده که در آن اتم‌ها با فواصل زیاد نسبت به یکدیگر قرار گرفته و نیروی خیلی کمی بین آن‌ها برقرار است گاز نامیده می‌شود که شکل و حجم آن‌ها را به آسانی می‌توان تغییر داد. مایعات شکلی از ماده هستند که نیروی بین اتم‌های آن‌ها نسبتاً کم بوده ولی فاصله آن‌ها از یکدیگر چندان زیاد نمی‌باشد. مایعات تراکم‌ناپذیر بوده و حجم آن‌ها به آسانی تغییر نمی‌کند ولی به سهولت شکل خود را تغییر می‌دهند.

شکلی از ماده که در آن فاصله بین اتم‌ها کم بوده و یک نیروی جاذبه قوی بین آن‌ها موجود است جامد نامیده می‌شود. جامدات تراکم‌ناپذیر بوده و شکل و حجم آن‌ها را نمی‌توان به آسانی تغییر داد.

برای درک بهتر مطالب فوق می‌توان حالات یخ، آب و بخار آب را در نظر گرفت. با تغییر عواملی مثل درجه حرارت و فشار می‌توان امکان تغییر حرکت و جنبش اتم‌ها و ملکول‌ها را به وجود آورد مثلاً با زیاد کردن فشار و کم کردن درجه حرارت می‌توان یک گاز را به مایع تبدیل کرد. از میان دو عامل بالا درجه حرارت دارای اهمیت زیادتری بوده و کنترل آن نیز آسان‌تر انجام می‌شود.

برای تبدیل کردن مایع به جامد می‌توان درجه حرارت آن را کاهش داد. در حالی که تبدیل حالت مایع به جامد با زیاد کردن فشار با مشکلات بیش‌تری به خصوص از نظر عملی همراه می‌باشد. همان‌طوری که قبلاً گفته شد اتم‌ها در حالت جامد نسبت به یکدیگر موقعیت مشخص و معینی را دارا می‌باشند. به این نحوه توزیع اتم‌ها در جامد شبکه کریستالی گفته می‌شود. بسیاری از غیر فلزات در حالت جامد دارای نظم و ترتیب مشخص کریستالی نبوده که این مواد اجسام آمورف یا بی‌شکل نامیده می‌شود.

با مطالعه ساختمان اتمی ماده می‌توان به آمورف بودن یا کریستالی بودن آن پی برد. اتم‌ها در ساختمان کریستالی نیز دارای حرکت شدیدی بوده اما این حرکت به صورت ارتعاشی و حول یک نقطه معین و ثابت انجام می‌گیرد. با آن‌که اتم‌های فلز دارای حرکت ارتعاشی در محل خود می‌باشند با وجود این قادرند که از یک فلز به فلز دیگر منتقل شوند. به این نوع انتقال و حرکت از یک فلز به فلز دیگر دیفوزیون<sup>۱</sup> (نفوذ) گفته می‌شود.

سال‌ها پیش در یک آزمایش دو قطعه فلزی سرب و طلا را بعد از تمیز کردن سطحشان توسط گیره‌ای به یکدیگر متصل کرده و بعد از گذشت چهار سال دو قطعه را از یکدیگر جدا نمودند. تجزیه شیمیایی در محل اتصال دو قطعه نشان داد که طلا به مقدار حدود ۸ میلی‌متر به داخل سرب پیش‌روی کرده است. حرکت و پیشروی اتم‌های طلا در سرب توسط دیفوزیون انجام گرفته است.

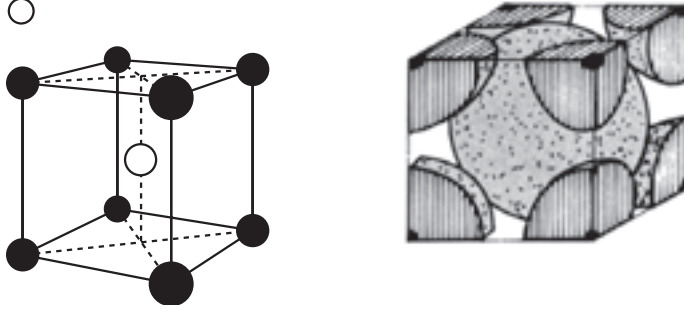
تمام فلزات تک اتمی بوده بدین معنی که شبکه کریستالی آن‌ها از اتم‌های انفرادی تشکیل یافته است. به عبارت دیگر فلزات از گردهمایی ملکول‌ها تشکیل نمی‌یابند.

اتم‌های جامد در فضا می‌توانند در هر سه جهت انتقال یافته و منجر به پیدایش یک ساختمان سه بعدی گردند. این ساختمان متقارن بوده که شبکه فضایی نامیده می‌شود.

شبکه فلزات در حالت جامد به سه نوع مختلف تقسیم‌بندی می‌گردد. نوع اول حالتی است که نحوه قرار گرفتن اتم‌ها، یک مکعب را تشکیل می‌دهد. به این معنی که چهار اتم در بالا و چهار اتم در پایین رئوس این مکعب قرار گرفته‌اند همان‌طوری که در شکل (الف-۱) دیده می‌شود یک اتم نیز در مرکز مکعب یعنی محل تقاطع قطرهای مستقر می‌باشد این سیستم بلوری سیستم مکعبی اتم در مرکز نام دارد و با علامت اختصاری<sup>۲</sup> «B.C.C» نشان داده می‌شود.

طریقه دومی که اتم‌ها می‌توانند در یک شبکه فلزی قرار گیرند حالتی است که هشت اتم گوشه‌های مکعب را اشغال می‌کنند و شش اتم دیگر به ترتیب در مرکز سطوح مکعب قرار می‌گیرند. به این طریقه قرار گرفتن اتم‌ها، شبکه مکعبی با اتم در مرکز سطوح یا شبکه کریستالی «F.C.C» گفته می‌شود (شکل ب ۱-۳).

● اتم در گوشه‌ها  
○ اتم در مرکز مکعب



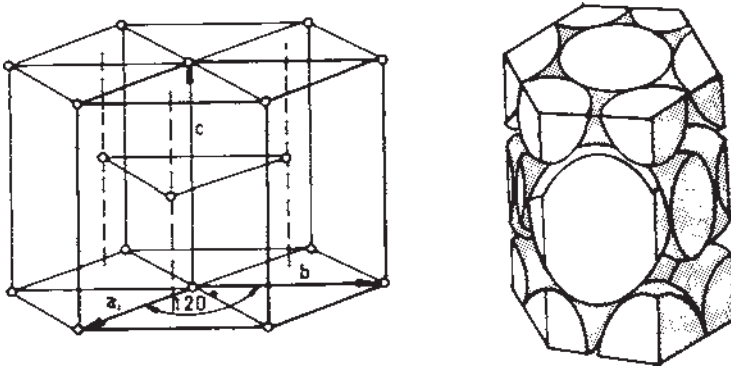
شکل ۱-۳ الف

● اتم در گوشه‌ها  
○ اتم در مرکز سطوح



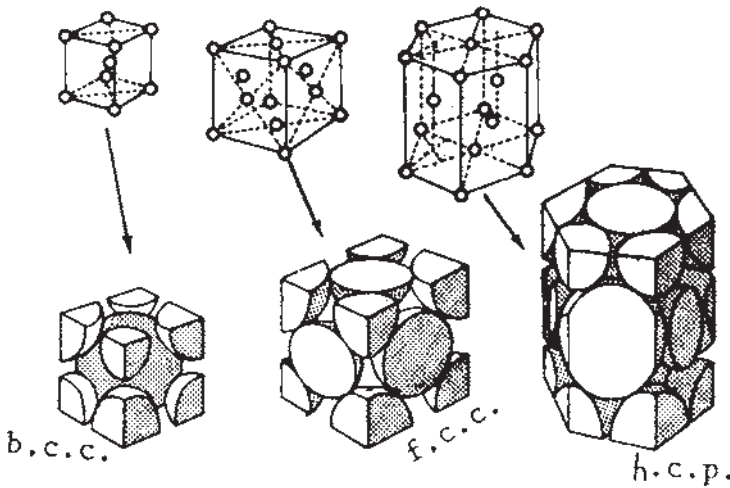
شکل ۱-۳ ب

سومین نوع شبکه، سیستم بلوری شش وجهی متراکم (HCP) می باشد: آرایش اتم‌ها در این سیستم، به گونه‌ای است که سلول واحدی به شکل هشت وجهی منتظم را تشکیل می‌دهند. همان گونه که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود، ۶ اتم در شش رأس هر یک از سطوح بالایی و پایینی و یک اتم در مرکز هر یک از آن‌ها وجود دارند. علاوه بر آن، ۳ اتم نیز در داخل سلول واحد، مستقر هستند. این سه اتم، در میانه‌ی سلول و در امتدادهایی که از مراکز مثلث‌های موجود در سطوح بالایی و پایینی، به صورت یک در میان می‌گذرند، قرار دارند.



شکل ۲-۳ سلول واحد شبکه H.C.P

در شکل ۳-۳ انواع سه گانه مهم شبکه‌های کریستالی به طور شماتیک نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۳ اشکال سه گانه شبکه‌های فضایی فلزات

در حقیقت شبکه‌های کریستالی فلزات ۱۴ نوع می‌باشند که به شبکه‌های چهارده‌گانه «براه» معروف هستند ولی به دلیل آن که فلزات عموماً در یکی از شبکه‌های سه‌گانه f.c.c, b.c.c و یا h.c.p متبلور می‌گردند از ذکر بقیه شبکه‌ها خودداری می‌شود.

جدول ۱-۳ فلزاتی را که در اثر انجماد با شبکه‌های کریستالی B.C.C و F.C.C و H.C.P متبلور می‌شوند نشان می‌دهد.

جدول ۱-۳- شبکه کریستالی بعضی عناصر

H.C.P	B.C.C	F.C.C
Be برلیوم	Fe ( ) آهن آلفا	Al آلومینیم
Ti تیتانیم	W تنگستن	Cu مس
Zn روی	Na سدیم	Fe(!) آهن گاما
Zr زیرکنیم	Cr کرم	Pt پلاتین
Cd کادمیم	Li لیتیم	Pb سرب
Co کبالت	Mo مولیبدن	AU طلا
Mg منیزیم	Nb نئوبیم	Ni نیکل
	V وانادیم	Ag نقره
		Pd پالادیم

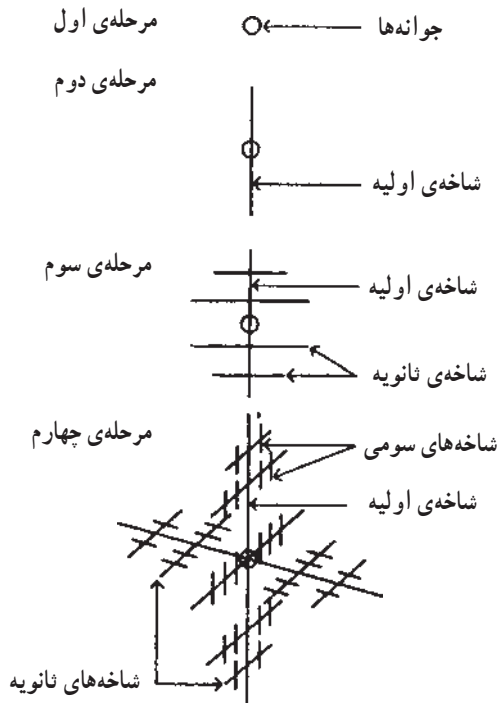
## ۲-۳- رفتار فلزات خالص در هنگام انجماد

همان‌طور که آب در صفر درجه سانتی‌گراد یخ می‌بندد، فلزات مذاب نیز در یک درجه حرارت معین منجمد می‌شوند.

هر قدر حرارت با سهولت بیش‌تری از دیواره‌های قالب محتوی مذاب خارج گردد سرعت سردشدن مذاب نیز زیادتر خواهد بود و همچنین هرچه سطح تماس مذاب با هوا بیش‌تر باشد سرعت سردشدن نیز زیادتر خواهد بود.

دیواره‌های قالب و هوایی که مذاب با آن در تماس است در بیش‌تر موارد از فلز مذاب سردتر بوده و در نتیجه حرارت مذاب می‌تواند به این نقاط منتقل گردد. به همین دلیل نقاطی از مذاب که در تماس با دیواره‌های قالب است و همچنین نقاط سطحی مذاب که با هوا مجاور است سریع‌تر از نقاط دیگر منجمد می‌شوند.

همراه با سرد شدن فلز مذاب نیروی بین اتم‌های تشکیل دهنده فلز کاهش یافته و در نتیجه اتم‌ها به یکدیگر نزدیک شده و حرکات ارتعاشی آن‌ها نیز کاهش می‌یابد. در ادامه سرد شدن مذاب اولین کریستال‌های جامد در داخل مذاب تشکیل می‌شود. این گونه کریستال‌های جامد اولیه به علت آن‌که در داخل مذاب قرار دارند می‌توانند به آسانی در تمام جهات رشد کنند (شکل ۳-۴).



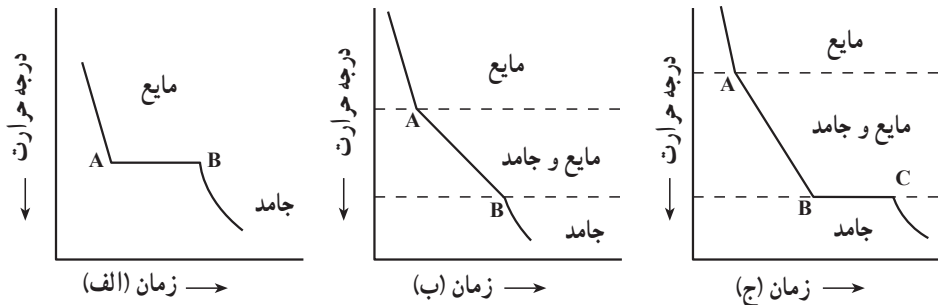
شکل ۳-۴- نمای رشد دندریتی در مذاب

چنان‌چه سطح پولیش شده فلز جامدی در زیر میکروسکپ مشاهده شود دانه‌های بسیاری دیده می‌شود که دارای اشکال مختلفی هستند. این دانه‌ها در حین انجماد در نقاط مختلف مذاب تشکیل شده و رشد نموده و آن قدر بزرگ می‌شوند تا به یکدیگر برخورد کرده و در این نقاط رشدشان متوقف می‌شود. اصطلاحاً محلی را که دانه‌ها به یکدیگر برخورد می‌کنند مرزدانه می‌نامند.

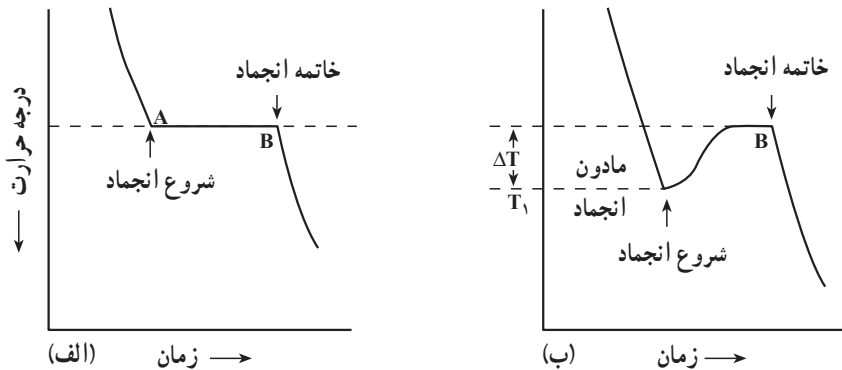
خواص مکانیکی فلزات تا حد زیادی به اندازه دانه‌ها، مقدار و ماهیت مرزدانه‌ها بستگی دارد. فلزات و آلیاژهایی که در دمای محیط استفاده می‌شوند نظیر اکثر قطعات اتومبیل، تراکتور و غیره

بهترین مشخصات مکانیکی را در حالتی دارند که ساختمان میکروسکوپی آن‌ها از دانه‌های ریز تشکیل شده باشد. برعکس قطعاتی که در دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند نظیر درب و قطعات مختلف کوره، پره توربین‌های احتراقی و قطعات مصرفی در دماهای بالا بهتر است دارای دانه‌های درشت باشند.

با استفاده از منحنی‌های سردشدن مذاب، می‌توان نحوه انجماد فلز را مورد بررسی قرار داد. همان طوری که در شکل ۳-۵ نشان داده شده انجماد فلز تابعی از زمان و درجه حرارت می‌باشد. هنگامی که فلز خالص از حالت مایع به جامد تبدیل می‌شود تغییرات فیزیکی در چنین فلزی در درجه حرارت ثابتی انجام می‌گیرد. همان طوری که در شکل الف ۳-۵ نشان داده شده انجماد از نقطه A شروع شده و تا هنگامی که تمام مذاب به جامد تبدیل نگردد درجه حرارت تغییر نمی‌کند پس از آن که تمام مذاب در نقطه B جامد گردید با گذشت زمان درجه حرارت فلز جامد نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۵- نمودارهای سردشدن مذاب که بیانگر تغییرات فیزیکی مذاب در حین انجماد می‌باشد (الف) برای فلزات خالص (ب) آلیاژی که عناصر متشکله آن در یکدیگر حل شده‌اند (ج) آلیاژی که عناصر متشکله آن در یکدیگر حل نشده‌اند.



شکل ۳-۶- نمودار سردشدن مذاب فلزی خالص (الف) سردشدن مذاب در شرایط تعادل (ب) سردشدن مذاب تحت شرایط مادون انجماد



در آلیاژی که عناصر تشکیل دهنده آن در یکدیگر به صورت محلول است، انجماد از نقطه A شروع شده و در نقطه B خاتمه می‌یابد به هر حال انجماد در چنین آلیاژی در درجه حرارت ثابتی انجام نمی‌شود بلکه در مراحل انجماد با گذشت زمان درجه حرارت نیز کاهش می‌یابد شکل ب-۵-۳ و در شکل ج-۵-۳ منحنی سرد شدن آلیاژی که عناصر متشکله آن در یکدیگر غیر محلولند نشان داده شده است.

فلزات خالص دارای مشخصات ویژه‌ای در مقایسه با آلیاژها می‌باشند. نظیر قابلیت هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، نقطه ذوب بالا، قابلیت انعطاف بیشتر، تنش تسلیم و تنش نهایی کمتر و در بعضی از حالات دارای مقاومت در مقابل خوردگی بهتری می‌باشند.

نقطه ذوب و درجه حرارت انجماد فلزات خالص معمولاً یکی می‌باشد. در شکل الف-۵-۳ نمودار سرد شدن مذاب یک فلز خالص نشان داده شده است. مذاب در جریان سرد شدن حرارت خود را با سرعت تقریباً ثابتی به قالب منتقل کرده تا به درجه حرارت انجماد A برسد. به محض رسیدن به نقطه A تا انجماد کامل مذاب یعنی تبدیل مایع به جامد، درجه حرارت ثابت می‌ماند، زمان مشخص شده در فاصله AB نشان‌دهنده مراحل تشکیل جوانه‌ها، دندریت‌ها و جامد شدن کامل مذاب می‌باشد. منحنی نشان داده شده بعد از نقطه B نشان‌دهنده سرد شدن قطعه در حالت جامد می‌باشد.

از آنجایی که سرد کردن مذاب معمولاً با سرعت زیادی انجام می‌شود پیدایش جامدهای اولیه در مذاب در نقطه ذوب یا درجه حرارت انجماد ترمودینامیکی (یعنی نقطه A) انجام نشده بلکه مقداری به تأخیر می‌افتد و به عبارت بهتر جوانه‌ها در زیر درجه حرارت انجماد تشکیل می‌گردند. این تفاوت درجه حرارت مادون انجماد نامیده شده و با  $\Delta T$  نشان داده می‌شود. در نقطه  $T_1$  کریستال‌های جامد ناگهان جوانه‌زده و در مذاب با سرعت زیادی افزایش می‌یابند. همراه با جوانه‌زنی جامدهای اولیه گرمای نهان انجماد این جوانه‌ها آزاد شده و باعث می‌گردد که درجه حرارت افزایش یافته و معمولاً به درجه حرارت انجماد فلز نزدیک شود.

جوانه‌زنی آلیاژها نیز تحت مادون انجماد انجام گرفته و مشخصات فیزیکی و مکانیکی قطعه‌های ریختگی بستگی زیادی به میزان مادون انجماد دارد.

### ۳-۳- مشخصات آلیاژها و رفتار آنها در هنگام انجماد

اگر چه فلزات خالص به تنهایی دارای موارد مصرف صنعتی زیادی هستند با این وجود برای بهبود مشخصات و ایجاد تغییرات مناسب در آنها عناصر آلیاژی را به فلزات خالص اضافه می‌کنند. فلزات آلیاژ شده یا به طور کلی آلیاژها معمولاً از فلزات خالص مستحکم‌تر می‌باشند. برای مثال با

افزودن عناصر آلیاژی به آهن خالص و انجام عملیات حرارتی می‌توان استحکام آهن را تا شش برابر افزایش داد. همچنین اضافه کردن عناصر آلیاژی به فلز خالص به منظور اصلاح و بهبود استحکام فلز در درجه حرارت‌های بالا، قابلیت ماشین‌کاری، مقاومت در برابر خوردگی، رنگ و دیگر مشخصات فیزیکی و شیمیایی می‌باشد.

در مواردی نیز افزودن عناصر آلیاژی به فلز خالص صرفاً به خاطر اصلاح مشخصات ریخته‌گری آن می‌باشد. این عمل معمولاً باعث کاهش نقطه ذوب فلز و تغییر در رفتار آن در هنگام انجماد می‌گردد.

همان‌طوری که گفته شد عناصر آلیاژی معمولاً نقطه ذوب فلزات خالص را کاهش می‌دهند. به علاوه این عناصر فاصله حرارتی را که فلز تحت آن ذوب و یا جامد می‌گردد، افزایش می‌دهد. فلزات خالص در یک درجه حرارت معین ذوب و یا جامد شده در حالی که آلیاژها در یک فاصله حرارتی محدود و یا گسترده ذوب و یا جامد می‌گردند.

برای هر آلیاژ معین درجه حرارتی (درجه حرارت لیکوئیدوس)<sup>۱</sup> وجود دارد که بالای آن، آلیاژ به صورت مایع وجود دارد. همچنین درجه حرارت دیگری (درجه حرارت سالییدوس)<sup>۲</sup> وجود دارد که در زیر آن آلیاژ به صورت جامد باقی می‌ماند. در درجه حرارت‌های بین درجه حرارت لیکوئیدوس و سالییدوس آلیاژ به صورت خمیری و مخلوطی از جامد و مایع می‌باشد. فاصله بین درجه حرارت لیکوئیدوس و سالییدوس را دامنه انجماد گویند. در شکل ۷-۳ موضوع فوق به صورت شماتیکی نشان داده شده است.

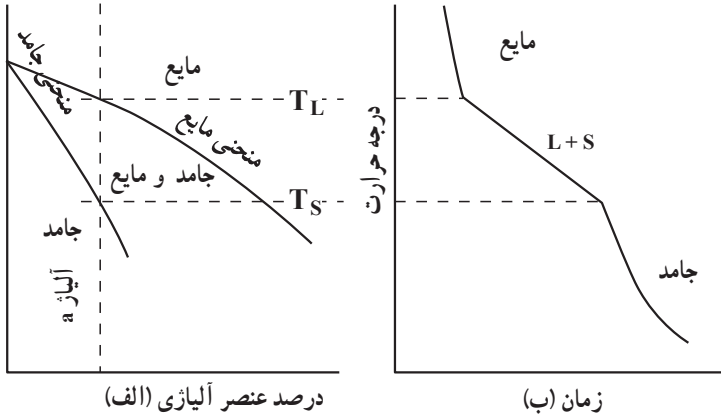
بر مبنای این شکل هنگامی که مذاب آلیاژ a به آهستگی سرد گردد انجماد آن در نقطه  $T_1$  آغاز شده و در نقطه  $T_s$  خاتمه می‌یابد. نمودار سرد شدن این آلیاژ با منحنی سرد شدن فلز خالص آن همان‌طوری که در شکل ۷-۳ نشان داده شده بسیار متفاوت می‌باشد.

چنانچه آلیاژ فوق را در بوت‌های ذوب کرده و سپس مذاب در بوت‌های آهستگی سرد گردد و همچنین توسط وسیله‌ای مناسب نمودار کاهش درجه حرارت نسبت به زمان رسم شود مشاهده خواهد شد که مذاب تا رسیدن به درجه حرارت  $T_1$  نسبتاً سریع سرد می‌گردد. در بین درجه حرارت‌های  $T_1$  و  $T_s$  که انجماد آلیاژ انجام می‌شود سرعت سرد شدن مذاب به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. زیر

---

۱-Liquidus

۲-Solidus



شکل ۷-۳- تأثیر عنصر آلیاژی در درجه حرارت انجماد یک فلز (الف) تغییرات درجه حرارت انجماد نسبت به درصد عنصر آلیاژی (ب) نمودار سرد شدن یک آلیاژ در شرایط ایده آل (سرد شدن تعادلی)

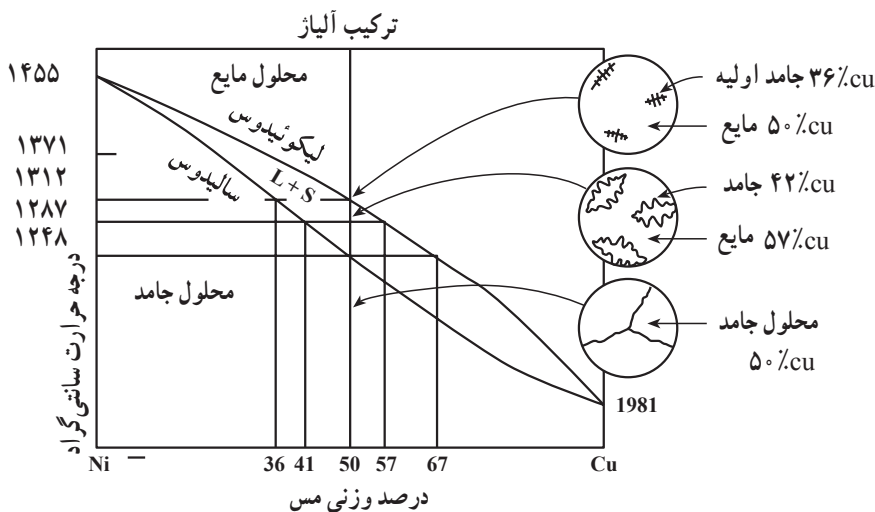
درجه حرارت  $T_S$  که آلیاژ کاملاً جامد گردیده فلز مجدداً با سرعت بیش تری سرد می‌گردد. چنانچه دو یا چند فلز در درجه حرارت و فشار معین به صورت یکنواخت درآیند یک سیستم آلیاژی را به وجود می‌آورند. آلیاژهایی که از دو عنصر تشکیل شده باشند سیستم دوتایی و اگر از سه عنصر تشکیل یافته باشند سیستم سه تایی نامیده می‌شوند. همچنین آلیاژ تشکیل شده از چهار عنصر را سیستم چهارتایی می‌نامند.

### ۱-۳-۳- آلیاژهای محلول جامد

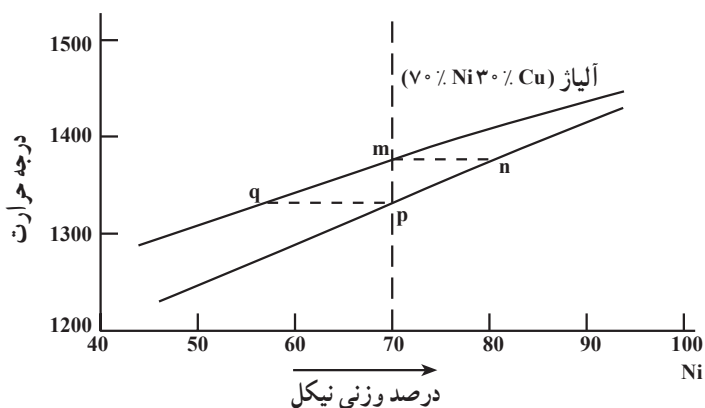
دو فلز که کاملاً در حالت مایع در یکدیگر محلولند رفتاری شبیه آب و الکل را دارا می‌باشند. که می‌توان آن را در حالت مایع شبیه یک ماده واحد در نظر گرفت. طلا و نقره از جمله آلیاژهایی هستند که چه در حالت مایع و چه در حالت جامد کاملاً در یکدیگر محلول‌اند.

طلا و نقره را می‌توان با هر درصدی در یکدیگر حل نمود بدون آن که تغییر چندانی در ساختمان کریستالی آن‌ها به وجود آید، (به جز تغییر رنگ ظاهر آلیاژ) مس و نیکل نیز دارای رفتاری مشابه طلا و نقره هستند. هنگامی که مس و نیکل به صورت آلیاژ درآیند محلول به دست آمده دارای استحکام بالاتری نسبت به هر یک از عناصر تشکیل دهنده آلیاژ می‌باشد.

چنانچه آلیاژی متشکل از ۵۰ درصد اتم‌های مس و ۵۰ درصد اتم‌های نیکل باشد، آلیاژ دارای ساختمان واحد f.c.c بوده زیرا هر دو فلز مس و نیکل دارای چنین ساختمانی هستند. در شکل ۸-۳ نمودار تعادل سیستم فوق نشان داده شده است.



شکل ۸-۳- نمودار تعادل نیکل - مس



شکل ۹-۳- سیستم آلیاژی نیکل - مس - برای آلیاژی متشکل از ۷۰ درصد نیکل و ۳۰ درصد مس، m درجه حرارتی است که انجماد مذاب آغاز شده و p نشان دهنده خاتمه انجماد مذاب می باشد. n نشان دهنده ترکیب اولین جامدی است که در مذاب به وجود آمده و q نشان دهنده ترکیب آخرین مذابی است که به جامد تبدیل می گردد.

بالای خط لیکوئیدوس آلیاژ با هر نسبتی از مس و نیکل به صورت محلول مذاب بوده و در زیر خط سالییدوس به صورت محلول جامد می باشند. به هر حال مابین خطوط مایع و جامد دو فاز جامد و مایع در کنار یکدیگر وجود داشته و این قسمت را منطقه خمیری سیستم می نامند. چنانچه خطی که نشان دهنده آلیاژی متشکل از ۷۰ درصد نیکل و ۳۰ درصد مس است در نمودار تعادلی نشان داده شده

در شکل ۹-۳ رسم شود می‌توان به سهولت دریافت که انجماد چنین آلیاژی در ۱۳۷۵ درجه سانتی‌گراد آغاز می‌گردد. در صورتی که دو خط افقی  $mn$  و  $qp$  را رسم کنیم تا با خطوط لیکوئیدوس و سالییدوس تلاقی کند می‌توان دریافت که اولین جزء جامد شده این آلیاژ نشان داده شده در نقطه  $n$  محتوی ۸۰ درصد نیکل خواهد بود. مفهوم غنی‌بودن این جزء جامد شده از نیکل آن است که مذاب باقی مانده دارای درصدی کمتر از ۷۰ درصد نیکل می‌باشد. طبیعی است در جریان ادامه سرد کردن مذاب مرتباً به مقدار جامد افزوده شده و از مقدار مذاب باقی مانده کاسته می‌گردد. همچنین ادامه سرد کردن مذاب تا رسیدن به انجماد کامل همزمان با کاهش مقدار نیکل، هم در جامد و هم در مایع خواهد بود.

جامد در نقطه  $p$  محتوی ۷۰ درصد نیکل و در نقطه  $q$  آخرین مایع باقی مانده دارای حدود ۵۶ درصد نیکل می‌باشد. به سهولت می‌توان ترکیب مذاب هر آلیاژی را در هر درجه حرارتی، از روی خط مایع و ترکیب جامد را در هر لحظه از روی خط جامد به دست آورد. برای مثال در درجه حرارت ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد مایع دارای ۶۲ درصد و جامد محتوی ۷۴ درصد نیکل می‌باشند. در ارتباط با ترکیب هر آلیاژ، خط سالییدوس نشان دهنده شروع ذوب شدن آلیاژ بوده و خط لیکوئیدوس مبین خاتمه ذوب می‌باشد. یعنی ذوب و انجماد فلز را می‌توان به صورت یک عمل معکوس یکدیگر در نظر گرفت. در آلیاژ فوق چنانچه مذاب به آهستگی جامد گردد فرصت کافی برای نفوذ دو عنصر نیکل و مس در یکدیگر بوده بنابراین قطعه جامد شده یا ریخته‌گی دارای ساختمانی هموزن شامل ۷۰ درصد نیکل و ۳۰ درصد مس خواهد بود.

مطالعه نمودارهای تعادلی فلزات اطلاعات گران‌قیمتی را در اختیار ما قرار می‌دهند زیرا از طریق مطالعه این نمودار می‌توان به ساختمان قطعه و در نتیجه مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها پی برد. همچنین اطلاعات مفید دیگر نظیر شروع و خاتمه انجماد، رفتار انجماد و درجه حرارت ریختن مذاب را می‌توان به دست آورد. آگاهی از دامنه حرارتی انجماد آلیاژ اطلاعات مهمی در ارتباط با رفتار فلز در ریخته‌گری نظیر مسائل مربوط به انقباض، حفره‌های انقباضی و گازی، ترک‌های حرارتی در قطعات و سیالیت مذاب را در اختیار قرار می‌دهد.

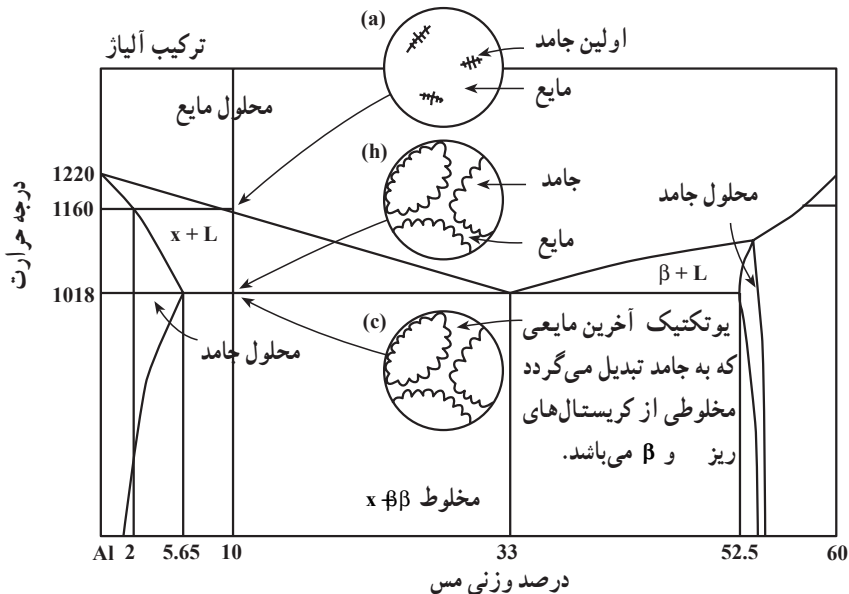
برای مثال در مواردی که مادون انجماد زیاد باشد قطعات دارای دانه‌های ریز بوده و در نتیجه دارای استحکام بیش‌تری خواهند بود. مشخصات آلیاژی از دو فلز بستگی کامل به نحوه قرار گرفتن دو عنصر در یکدیگر دارد. دو عنصر ممکن است در حالت مایع کاملاً در یکدیگر به

صورت محلول بوده و یا کاملاً در یکدیگر به صورت غیر محلول باشند، نظیر آب و روغن که به صورت دو لایه مجزا در کنار هم قرار می گیرند. عناصر تشکیل دهنده چنین آلیاژی پس از جامد شدن نیز به صورت مجزا از یکدیگر قرار خواهند گرفت. چنین حالتی را مخلوط مکانیکی عناصر می نامند. قلع و کادمیم در حالت جامد کاملاً در یکدیگر به صورت غیر محلول بوده در حالی که آلیاژهای آلومینیم - مس دارای حلالیت محدود در یکدیگر می باشند.

### ۲-۳-۳- آلیاژهای یوتکتیک

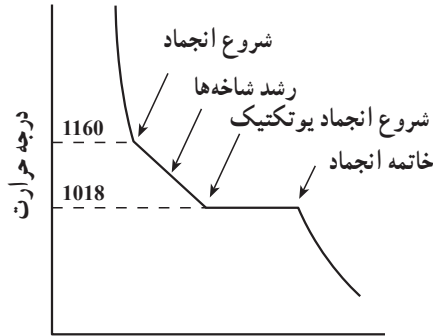
فلزاتی که با هر نسبتی در یکدیگر محلول نبوده و به صورت مخلوط مکانیکی عمل می نمایند این دسته از آلیاژها را تشکیل می دهند. ساختمان آلیاژهای این خانواده در حالت جامد از دو جزء کریستالی متفاوت از نظر ترکیب شیمیایی (و در بعضی از مواقع ساختمان مختلف) تشکیل می گردد. این دو جزء کریستالی به صورت مخلوط مکانیکی متشکل از دانه های بسیار ریز در کنار یکدیگر وجود دارند. بعضی از فلزات در حالت جامد کاملاً در یکدیگر غیر محلول می باشند مثال در این مورد آلیاژ قلع - کادمیم می باشد. ساختمان این آلیاژ متشکل از کریستال های بسیار ریز قلع خالص و کادمیم خالص خواهد بود.

در اغلب موارد آلیاژی یافت می شوند که در حالت جامد قابلیت حلالیت محدودی از عنصر آلیاژی را دارا می باشند. مثالی در این مورد آلیاژ دوتایی آلومینیم - مس می باشد.



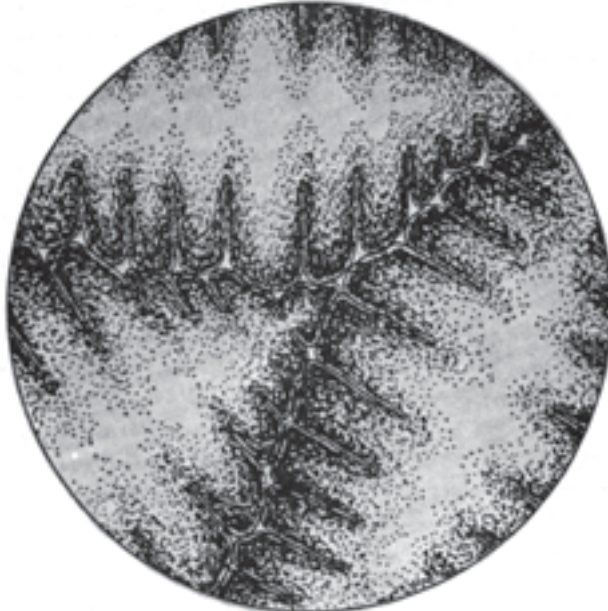
شکل ۱۰-۳- نمودار تعادلی آلومینیم - مس

معمولاً مخلوط‌های مکانیکی نتیجه فعل و انفعالات یوتکتیکی بوده که به عنوان مثال در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. در شکل ۳-۱۱ نمودار سردشدن یک آلیاژ فرویوتکتیک که به آهستگی سرد شده است نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌گردد در درجه حرارت یوتکتیک آلیاژ مانند فلز خالص در دمای ثابت از حالت مذاب به جامد تبدیل می‌گردد.



شکل ۳-۱۱- منحنی سردشدن آلیاژ فرویوتکتیک ۹۰ درصد آلومینیم و ۱۰ درصد مس

هنگامی که فلزات در شرایط ریخته‌گری یعنی با سرعت زیاد، در قالب‌های ماسه یا فلزی جامد می‌گردند؛ فرصت برای دیفوزیون عناصر آلیاژی در یکدیگر موجود نبوده، در نتیجه جامدهای از پیش



شکل ۳-۱۲

تشکیل یافته در مذاب از نظر عنصر آلیاژی نسبت به قسمت‌هایی که بعداً جامد می‌گردد غنی یا فقیرتر بوده که خود موجب عدم یکنواختی توزیع عنصر آلیاژی در ساختمان قطعات می‌گردد. چنین عدم یکنواختی عناصر آلیاژی در ساختمان فلز، جدایش نامیده می‌شود که خود منشأ بسیاری از نارسایی‌ها در مشخصات قطعه ریختگی می‌باشد. در شکل ۱۲-۳ نوعی از این جدایش نشان داده شده است. به هر حال با انجام عملیات حرارتی می‌توان ساختمانی هموزن به دست آورد. چنانچه قطعات را پس از جامد شدن مجدداً حرارت دهیم فرصت کافی برای نفوذ عناصر آلیاژی به وجود آمده و جدایش‌ها را می‌توان کاهش داد یا از بین برد.

### ۳-۳-۳ ترکیبات بین فلزی

بعضی از فلزات می‌توانند با فلز دیگر در نسبت معینی تولید یک ترکیب شیمیایی را بنمایند، به چنین محصولی ترکیبات بین فلزی می‌گویند. مثال در این مورد سیستم آلیاژی نیکل - منیزیم می‌باشد. آلیاژهایی که محتوی مقادیر زیادی از این گونه ترکیبات بین فلزی هستند از نظر صنعتی مورد توجه نبوده زیرا وجود مقادیر بیش از حد این گونه ترکیبات که خود سخت و شکننده هستند موجب کاهش استحکام و قابلیت انعطاف قطعات می‌گردد. به هر حال وجود این گونه ترکیبات در مقادیر کم در اکثر قطعات ریختگی نه تنها مشکلی را به وجود نمی‌آورد بلکه موجب افزایش استحکام قطعات نیز می‌گردد.

### ۳-۳-۴ نمودارهای فازی

تا کنون چند نمونه از نمودارهای فازی برای بعضی از انواع آلیاژهای دوتایی مورد بررسی قرار گرفت. به هر حال ذکر این نکته بسیار ضروری است که انواع دیگر سیستم‌های آلیاژی نیز وجود دارند. نمودارهای تعادلی به عنوان یک ابزار بسیار سودمند همواره مورد استفاده متالورژها می‌باشند. این گونه نمودارها نوع فاز موجود برای هر درصدی از عنصر یا عناصر آلیاژی در هر درجه حرارتی را در اختیار قرار می‌دهند. نمودارهای تعادلی بهترین نوع عملیات حرارتی که می‌بایستی روی قطعات انجام گیرد را در اختیار متالورژ قرار می‌دهند. از آنجایی که درجه حرارت‌های ذوب و انجماد آلیاژ در نمودارهای تعادلی نشان داده شده‌اند لذا می‌توان با مراجعه به نمودارهای تعادلی آلیاژها، بهترین درجه حرارت ممکن برای ریخته‌گری قطعات را به دست آورد.

بررسی دامنه انجماد یک آلیاژ اطلاعات بسیار مهمی در رابطه با نحوه جبران حفره‌های انقباضی، جلوگیری از ترک خوردگی قطعات در مراحل سردشدن در قالب و میزان سیالیت مذاب را در اختیار قرار می‌دهد.



## ۴-۳- چگونگی انجماد فلز در قطعات ریختگی

مهم‌ترین عامل مؤثر در تهیه قطعات مرغوب ریختگی توجه به چگونگی انجماد مذاب در قالب می‌باشد. تکنیک‌های مربوط به ذوب، انتقال مذاب و مسائل مربوط به تهیه قالب‌ها امروزه در بیش‌تر قریب به اتفاق کارگاه‌های خوب ریخته‌گری استفاده می‌شود. به‌رحال پس از آنکه محفظه قالب از مذاب پرگردید انجماد فلز آغاز می‌گردد. چگونگی انجماد مذاب از دیرباز به صورت رمز در نزد ریخته‌گران وجود داشته و با کوشش محققان فیزیک و شیمی و متالورژی بسیاری از اسرار انجماد مذاب روشن گردیده است. این واقعیتی است که در حال حاضر نیز مسائل بسیاری در زمینه چگونگی انجماد فلزات وجود دارد که پاسخ‌گویی به آن‌ها نیاز به مطالعات و تحقیقات بسیار دارد.

به هر صورت: تهیه قطعات ریختگی مرغوب بدون آگاهی از چگونگی انجماد فلز امکان‌پذیر نبوده و بدون تردید از دیدگاه علمی، انجماد فلزات یکی از اساسی‌ترین مباحث ریخته‌گری می‌باشد. در این بخش کوشش شده تا چگونگی انجماد فلز به بیان بسیار ساده و بدون ذکر عوامل مهمی نظیر تغییرات انرژی و روابط ریاضی مربوط به انجماد مذاب آورده شود.

ساده‌ترین روش مطالعه چگونگی انجماد مذاب در قالب، بررسی مسائل مربوط به انتقال حرارت در ارتباط با شکل قطعات ریختگی در یک قالب ماسه‌ای می‌باشد. این بررسی را می‌توان تحت سه عنوان زیر انجام داد.

الف - قوانین اولیه انتقال حرارت.

ب - متغیرهای مربوط به شکل و اندازه قطعه ریختگی.

ج - متغیرهای مربوط به قالب و نوع فلز ریختگی.

از آنجایی که مرغوبیت قطعات ریختگی و در نتیجه میزان قطعات نامرغوب برگشتی (به علت معایب داخلی در قطعات) مستقیماً به چگونگی انجماد فلز مربوط می‌گردد لذا چگونگی انجماد فلز شدیداً مورد توجه ریخته‌گران می‌باشد.

## ۴-۳-۱- انقباض حجمی در قطعات ریختگی

یکی از رویدادهای مهمی که همواره به همراه انجماد مذاب انجام می‌شود انقباض حجمی فلز و به همراه آن ایجاد حفره‌های انقباضی در قطعات ریختگی می‌باشد. چنانچه منظور ما تهیه قطعات ریختگی سالم باشد لازم است در جهت از بین بردن و یا کاهش دادن چنین حفره‌های انقباضی کوشش شود. مذاب در محفظه قالب به طور ناگهانی و همه جانبه جامد نگردیده بلکه انجماد آن از قسمت‌های نازک قطعه که سریع‌تر از قسمت‌های ضخیم سرد می‌گردد آغاز می‌شود. سردشدن چنین پوسته‌ای

از مذاب با مقداری انقباض در قطعه ریختگی همراه می‌باشد. این انقباض از طریق مذابی که در مجاورت (یعنی قسمت ضخیم‌تر قطعه) قسمت‌های نازک قطعه وجود دارد، جبران می‌گردد. چنین پدیده‌ای تا جامد شدن کامل قطعه تکرار شده و همواره انقباض در قسمت‌های نازک‌تر توسط قسمت‌های ضخیم‌تر جبران می‌گردد. در آخرین مراحل انجماد، به دلیل عدم وجود مذاب کافی برای جبران انقباضات، حفره‌ای در قطعه به وجود می‌آید که به آن حفره انقباضی می‌گویند. حفره انقباضی در ضخیم‌ترین قسمت قالب (گرم‌ترین نقطه) به وجود می‌آید. به سهولت می‌توان توسط قراردادن یک کانال اضافی از مذاب به نام تغذیه در مجاورت چنین قسمتی، حفره نهایی انقباضی به وجود آمده را پر کرد. از بحث فوق می‌توان چنین نتیجه گرفت که سردترین قسمت قطعه ریختگی قسمت‌های نازک قطعه یا پوسته خارجی قطعه بوده و گرم‌ترین منطقه قطعه در درون تغذیه خواهد بود.

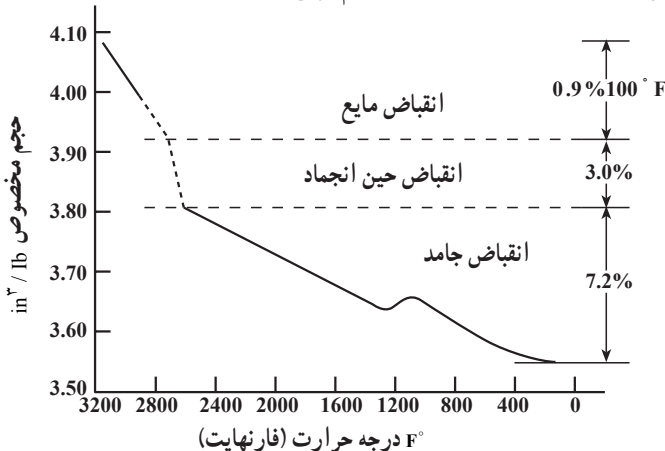
همان‌طوری که قبلاً گفته شد فلزات و آلیاژها در مراحل انجماد و سرد شدن در قالب (به استثناء بیسموت و بعضی از آلیاژها نظیر چدن‌های خاکستری و انواع چدن با گرافیت کروی) منقبض می‌گردند. این انقباض در سه مرحله متمایز اتفاق می‌افتد.

انقباض مایع<sup>۱</sup> - از درجه حرارت ریختن مذاب آغاز شده و تا رسیدن به نقطه انجماد فلز ادامه می‌یابد.

انقباض حین انجماد<sup>۲</sup> - از هنگام شروع تا خاتمه انجماد انجام می‌گیرد.

انقباض جامد<sup>۳</sup> - از خاتمه انجماد یعنی جامد شدن قطعه شروع شده و تا رسیدن فلز به درجه حرارت محیط ادامه می‌یابد.

در شکل ۱۳-۳ مراحل انقباض در یک فولاد ساده کم کربن نشان داده شده است.



شکل ۱۳-۳

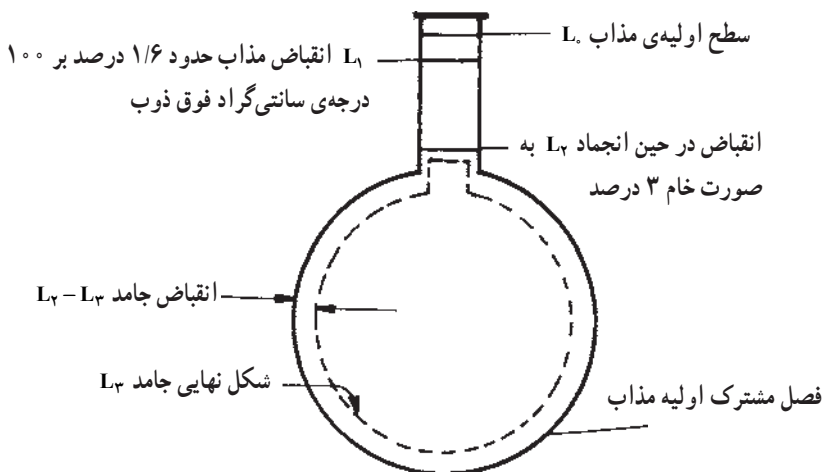
۱- Liquid shrinkage

۲- Solidification shrinkage

۳- Solid shrinkage

همچنین در شکل ۱۴-۳ به طور شماتیکی سه نوع انقباض یاد شده مشخص گردیده‌اند. تصور کنید که فلز مذاب در داخل یک بالن شیشه‌ای به عنوان قالب ریخته شده است و به صورت یکنواخت سرد می‌گردد.

پس از آن که مذاب به داخل بالن شیشه‌ای ریخته شده مذاب به سطح  $L_1$  می‌رسد، انقباض فلز مذاب تا رسیدن به درجه حرارت انجماد، سطح مذاب را از  $L_1$  به سطح  $L_2$  می‌رساند یعنی اختلاف سطح  $L_1 - L_2$  نشان دهنده مقدار انقباض مذاب خواهد بود.



شکل ۱۴-۳- نمایش شماتیکی انقباض فولاد ساده‌ی کربنی، در این شکل، مذاب به داخل بالن شیشه‌ای فرضی ریخته شده است.

انقباض حین انجماد سطح فلز را از  $L_1$  به  $L_2$  می‌رساند. رسیدن سطح  $L_1$  به  $L_2$  به طور سریع انجام شده و  $L_1 - L_2$  نمایش مقدار انقباض حاصل از انجماد خواهد بود. همان طوری که قبلاً گفته شد انقباض مذاب برای فولادهای ساده کم‌کربن حدود ۱/۶ درصد برای کاهش هر صد درجه سانتی‌گراد بوده در حالی که انقباض حاصل از انجماد حدود ۳ درصد می‌باشد.

انقباض مایع در بیش‌تر چدن‌های خاکستری حدود ۲/۲ درصد برای هر صد درجه سانتی‌گراد بوده در حالی که انقباض ضمن انجماد آن بستگی به عوامل زیادی از جمله میزان گرافیت آزاد در چدن و مقدار تغییر شکل و افزایش حجم قالب در جریان انجماد قطعات ریخته‌گی دارد.

انجماد چدن‌ها نیز نظیر فولادها در سه مرحله مایع، خمیری و جامد انجام می‌گیرد منتها این نوع آلیاژها به جای آن که در مراحل انجماد منقبض شوند منبسط نیز می‌شوند. مرحله انبساط چدن‌ها به این دلیل است که در هنگام تبدیل حالت مذاب به جامد، کربن به صورت آزاد در چدن شروع به تشکیل شدن می‌کند. چون این کربن که اصطلاحاً «گرافیت» نامیده می‌شود در حالت جامد حجم بیش‌تری را در مقایسه با حالت مایع اشغال می‌کند لذا تشکیل کربن آزاد در چدن همواره همراه با انبساط قطعه ریختگی می‌باشد.

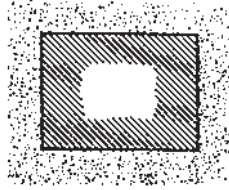
با مراجعه به شکل ۱۴-۳ می‌توان چنین نتیجه گرفت که در انتهای مرحله انجماد یعنی جامدشدن کامل قطعه تا رسیده به درجه حرارت محیط انقباض جامد موجب می‌گردد تا قطعه از تمام جهات کوچک شده و از سطح  $L_2$  به سطح  $L_3$  برسد.

از آنچه که قبلاً گفته شد می‌توان چنین نتیجه گرفت که منظور از بکاربردن یک کانال اضافی از مذاب (به نام تغذیه) در اکثر قطعات ریختگی جبران کمبود فلز مذاب در اثر انقباض‌های به وجود آمده در مراحل سردشدن مذاب از درجه حرارت ریختن تا جامدشدن کامل قطعه می‌باشد. یا به عبارت دیگر مهم‌ترین وظیفه یک تغذیه آن است که فلز را در خود تا هنگامی که قطعه ریختگی کاملاً جامد نشده به صورت مذاب نگهدارد. در چنین صورتی تغذیه نه تنها می‌تواند حفره‌های انقباضی مربوط به مرحله سردشدن مذاب تا شروع انجماد (انقباض مذاب) را جبران کند بلکه می‌تواند حفره‌های انقباضی ایجاد شده در مرحله انجماد را نیز پر نماید.

انقباض قطعه در حالت جامد که در حقیقت کوچک‌شدن همه جانبه قطعه ریختگی است را مدل‌ساز می‌تواند با بزرگ‌تر در نظر گرفتن مدل جبران کند. به هر حال به این نکته مهم توجه کنید که عدم کنترل صحیح انقباض فلز در حالت جامد می‌تواند موجب معایبی نظیر تابیدن و به وجود آمدن ترک‌های حرارتی در قطعات ریختگی گردد.

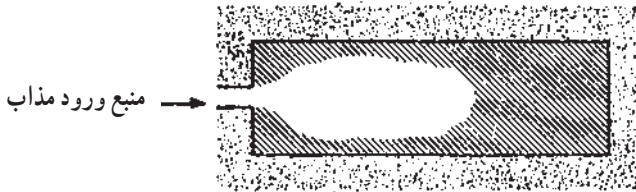
## ۲-۴-۳- چگونگی انجماد فلزات خالص

هنگامی که فلز مذاب در داخل قالبی ریخته شود انجماد آن به دو صورت انجام می‌گیرد:  
الف - انجماد همه جانبه - انجماد مذاب از جداره قالب شروع شده و پوسته جامد فلز به تدریج به طرف مرکز قطعه شبیه آنچه که در شکل ۱۵-۳ نشان داده شده ادامه می‌یابد.



شکل ۳-۱۵- انجماد همه جانبه

ب- انجماد جهت دار یا کنترل شده - در این نوع انجماد همان طوری که در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده انجماد از دورترین قسمت قالب نسبت به راهگاهی که مذاب از آن وارد محفظه قالب می شود شروع شده و به طرف راهگاه ادامه می یابد.



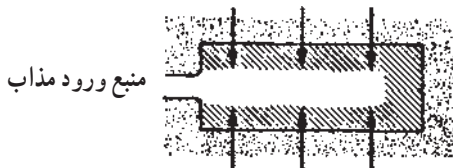
شکل ۳-۱۶- نمایش انجماد جهت دار

در یک قطعه ریختگی هر دو نوع انجماد فوق اتفاق می افتد. در شکل ۳-۱۷ انجماد جهت دار با فلش هایی نشان داده شده است.



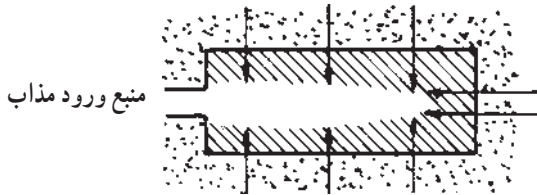
شکل ۳-۱۷

در شکل ۳-۱۸ انجماد همه جانبه که به طرف مرکز قطعه ریختگی است با فلش نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۸

شکل ۱۹-۳ همان قطعه بالا را نشان می‌دهد و همان طوری که توسط فلش‌هایی نشان داده شده است انجماد هم به طرف منبع ورود مذاب (انجماد جهت‌دار) و هم به طرف مرکز قطعه (انجماد همه جانبه) ادامه دارد.



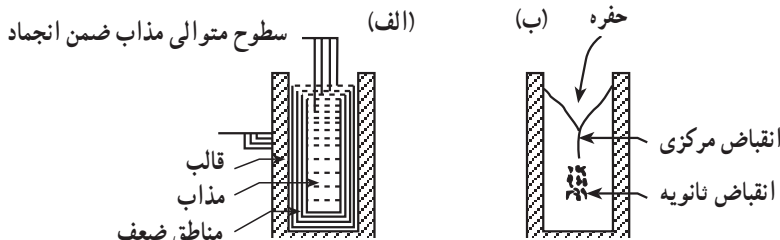
شکل ۱۹-۳

انجماد جهت‌دار در یک قطعه ریختگی این حسن را دارد که آخرین مذابی که در قالب جامد می‌شود در نزدیکی راهگاه بوده و در نتیجه حفره‌های انقباضی (بعدهاً در مورد آن‌ها مفصلاً بحث خواهد شد) در نزدیکی منبع ورود مذاب به وجود می‌آید. این حفره‌ها بعداً از طریق مذابی که در راهگاه وجود دارد پرمی‌شوند.

در صورتی که انجماد فلز مذاب در قالب فلزی به صورت عمودی که در تهیه بیش‌تر شمش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، مورد مطالعه قرار گیرد، به سهولت می‌توان دریافت که انجماد مذاب به صورت نشان داده شده در شکل ۲۰-۳ از جداره‌های قالب شروع شده و به طرف گرم‌ترین قسمت قالب ادامه می‌یابد.

در قطعه جامد شده معمولاً دو نوع حفره‌های انقباضی به وجود می‌آید.

۱- حفره انقباضی بزرگ در قسمت فوقانی قطعه ۲- حفره‌های ریزی که در مرکز قطعه به وجود می‌آیند. بدیهی است هر دو نوع حفره‌های انقباضی نتیجه انقباض حاصل از انجماد



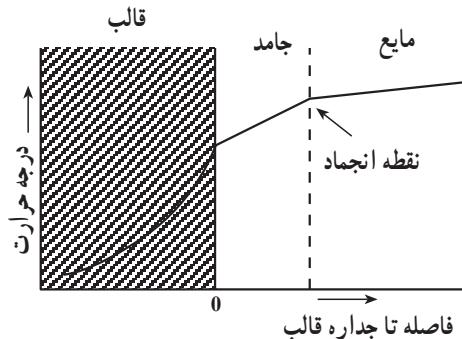
شکل ۲۰-۳ چگونه ایجاد حفره‌های انقباضی در یک شمش ریختگی

قطعه می‌باشند. در صورتی که مذاب بتواند از قسمت بالای قطعه به طرف قسمت پایین قطعه جریان یابد حفره‌های نوع مرکزی از مذاب پر شده و عملاً از بین می‌روند. در حالی که عدم دقت در طراحی قطعات موجب می‌گردد تا کریستال‌های جامد در حال تشکیل به گونه‌ای در مذاب پیشرفت کنند که همراه با رسیدن آن‌ها به مرکز قطعه مانع از رسیدن مذاب از قسمت‌های فوقانی قطعه به قسمت مرکزی گردد. یعنی مذاب موجود در مرکز قطعه در غیاب مذاب اضافی که نقش تغذیه را عهده‌دار است جامد می‌گردد.

### ۳-۲-۳- سرعت انجماد در قطعات ریختگی

از جهات بسیار آگاهی از سرعت انجماد مذاب برای ریخته‌گران از اهمیت زیادی برخوردار است که مهم‌ترین آن جنبه اقتصادی موضوع می‌باشد. هر قدر مذاب در قالب سریع‌تر جامد گردد می‌توان در زمان معین به تولید بیشتری از قطعات ریختگی دست یافت. سرعت زیاد انجماد موجب ریزتر شدن دانه‌ها در قطعات ریختگی شده و در نتیجه استحکام آن‌ها افزایش می‌یابد. به هر حال در مواردی که قطعات ریختگی در دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند، دانه‌های درشت‌تر ارجحیت داشته و در نتیجه سرعت انجماد کم، مورد نظر قرار خواهد گرفت. همچنین افزایش سرعت انجماد مذاب به همراه انجماد جهت‌دار موجب حذف حفره‌های انقباضی در قطعات ریختگی شده و از طرف دیگر به هموزن نمودن ساختمان قطعات ریختگی کمک بسیار زیادی می‌کند.

در مورد قطعات ریختگی که نیاز به عملیات حرارتی دارند سرد کردن سریع مذاب موجب کوتاه‌تر کردن سیکل عملیات حرارتی می‌شود. برای مثال در یک قالب سرعت سرد شدن مذاب بستگی به انتقال حرارت قالب دارد یعنی جداره قالب با چه سرعتی بتواند حرارت مذاب را جذب و به خارج انتقال دهد. برای بررسی مسئله فوق شکل ساده‌ای از یک قالب ماسه‌ای نظیر شکل ۲۱-۳ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲۱-۳- نمایش شیب حرارتی در قالب، جامد، و فصل مشترک جامد و مایع

چنانچه قالب در درجه حرارت محیط قرارداشته باشد و سطح تماس آن با مذاب به صورت مسطح باشد، اندکی پس از تماس مذاب با جداره قالب پوسته‌ای از مذاب به صورتی که در شکل فوق نشان داده شده جامد می‌گردد. با خروج مداوم حرارت مذاب توسط پوسته اولیه جامد و جداره قالب، قشر جامد شده با گذشت زمان ضخیم‌تر می‌گردد.

درجه حرارت فصل مشترک بین مایع و جامد برابر درجه حرارت انجماد فلز بوده و حرارت مذاب بایستی از این فصل مشترک گذشته و به طرف جداره قالب جریان یابد. در صورتی که انجماد مذاب روی یک سطح بزرگ مسطوی از قالب انجام گیرد می‌توان چنین در نظر داشت که انتقال حرارت عمود بر سطح قالب انجام می‌گیرد. در چنین حالتی ضخامت مذاب جامد شده (D) با جذر زمان (t) نسبت مستقیم دارد یعنی:

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

D: ضخامت لایه منجمد شده بر حسب mm

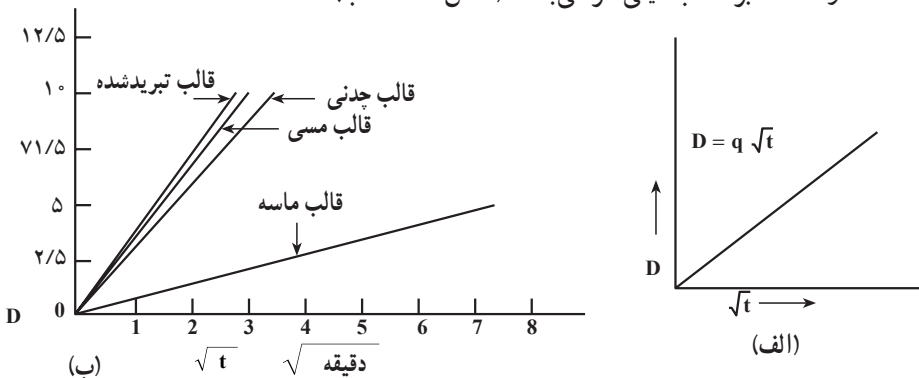
t: زمان از شروع انجماد بر حسب min

q: ثابت انجماد بر حسب  $\frac{1}{\text{min}^2}$  mm

در شکل ۲۲-۳ الف رابطه D و  $\sqrt{t}$  به طور شماتیکی نشان داده شده است. برای مثال مطالعات انجام شده در ریخته‌گری شمش‌های فولادی ساده کربنی نشان داده در صورتی که فولاد با  $50^\circ$  درجه سانتی‌گراد فوق‌گداز به داخل قالب فلزی ریخته شود ضخامت قشر جامد شده را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

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

که واحد D بر حسب میلی‌متر می‌باشد (شکل ۲۲-۳ ب).





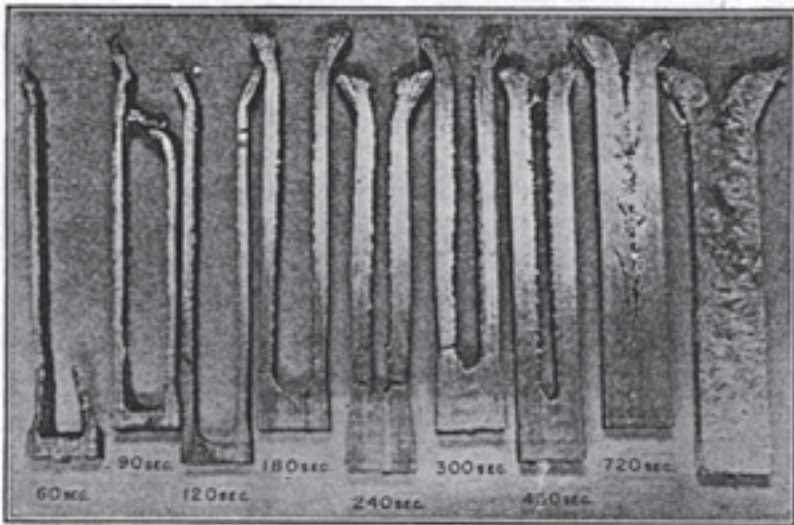
در صورتی که چند قطعه ریختگی با اشکال و اندازه‌های مختلفی در قالب با یک جنس و فلز مشابه ریخته شود زمان لازم برای انجماد کامل مذاب بستگی به مجذور نسبت حجم به سطح آن‌ها دارد. این رابطه توسط چورنیف به دست آمده و به قانون یا قاعده چورنیف معروف است.

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

بر مبنای این رابطه یک مکعب فولادی به طول ۵ سانتی متر برای منجمد شدن نیاز به  $\frac{1}{4}$  زمان لازم برای مکعبی فولادی به طول ۱۰ سانتی متر را دارد. (در صورتی که فولاد در دماهای یکسانی به داخل قالب ریخته شده باشد) رابطه فوق اگر چه از دقت بسیار زیادی برخوردار نیست به هر حال از نظر اصول ریخته‌گری و مهندسی از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

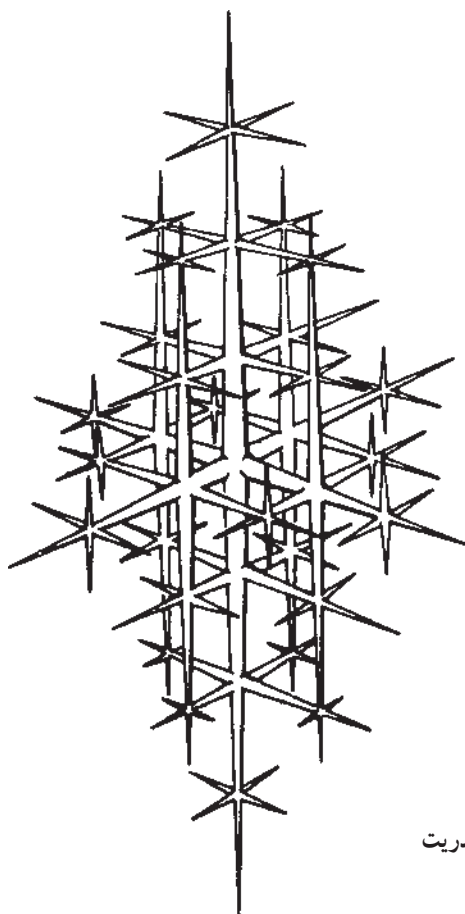
اگر چه رابطه بالا یعنی رابطه چورنیف تقریبی بوده و تأثیر گوشه‌ها در قالب و بعضی از عوامل مهم دیگر در نظر گرفته نشده است. به هر حال این رابطه الگویی است که می‌تواند مورد استفاده ریخته‌گران قرار گیرد. ریخته‌گران می‌توانند اقدام به تعیین ضریب K برای قطعات ریختگی تولیدی خود نموده و روابط دقیق‌تر را با اساس معیارهای تجربی به دست آورند.

همان طوری که قبلاً گفته شد از طریق رابطه  $D = K\sqrt{t-C}$  که (K و C اعداد ثابتی هستند) می‌توان در هر لحظه ضخامت قشر جامد شده را اندازه گرفت. روش‌های بسیار ساده‌ای وجود دارند



شکل ۲۳-۳

که توسط آن‌ها می‌توان به سهولت ضرایب  $K$  و  $C$  را به دست آورده و پس از قراردادن آن‌ها در رابطه فوق یک رابطه تجربی مفیدی را به دست آورد. بدیهی است با در دست داشتن چنین رابطه‌ای در کارگاه می‌توان سرعت سردشدن مذاب در قالب را (در صورتی که شرایط ریخته‌گری مشابه شرایط آزمایش تعیین ضرایب  $K$  و  $C$  باشد) از طریق محاسبه ساده به دست آورد. در صورتی که فلز و آلیاژ مورد مطالعه را به صورت مذاب و در درجه حرارت معین به داخل تعداد زیادی قالب‌های آزمایش مشابه ریخته و در فواصل زمانی مختلف مذاب موجود در آن‌ها خالی شود شکلی شبیه آنچه که در شکل ۲۳-۳ نشان داده شده است به دست می‌آید. بدیهی است از طریق اندازه‌گیری ضخامت قشر جامد شده در هر زمان و قراردادن مقادیر لازم در رابطه  $D = K\sqrt{t-C}$  ضرایب  $K$  و  $C$  را می‌توان به دست آورده و از آن برای ریخته‌گری قطعات مشابه همواره استفاده نمود.

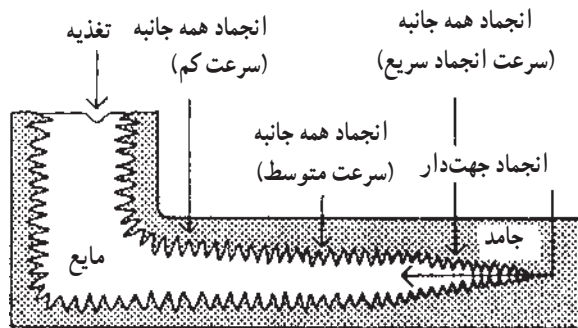


همان طوری که قبلاً گفته شد مذاب به مجرد تماس با جداره قالب جامد شده و این قشر جامد در اکثر قریب به اتفاق فلزات در شرایط ریخته‌گری متداول به صورت شاخه و برگ‌های درخت کاج یا دندریت در داخل مذاب شکل ۲۴-۳ به طرف گرم‌ترین منطقه قطعه ریختگی (معمولاً مرکز قطعه) رشد می‌نماید. رشد دندریتی به صورت پی‌درپی روی قشرهای پیش جامد شده ادامه می‌یابد.

شکل ۲۴-۳- شکل شماتیکی دندریت

در مراحلی که انجماد مذاب در قطعه ریختگی جریان دارد سه منطقه متمایز در قطعه وجود خواهد داشت که عبارتند از :

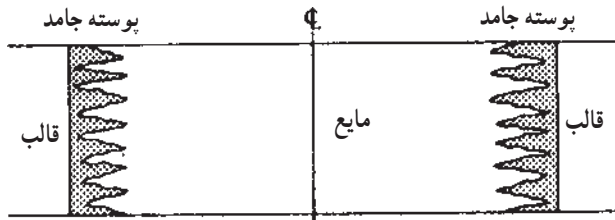
- ۱- منطقه جامد که در مجاورت جداره قالب قرار دارد.
  - ۲- منطقه خمیری که از مذاب و کریستال‌های جامد و دندریت تشکیل یافته است و در مجاورت منطقه جامد قرار دارد.
  - ۳- منطقه مذاب که پس از منطقه خمیری قرار دارد. ماهیت منطقه خمیری از نظر وسعت و شکل تأثیر بسیار زیادی در مرغوبیت قطعات ریختگی دارد.
- در شکل ۲۵-۳ نحوه انجماد یک قطعه ساده ریختگی نشان داده شده است. جهت پرکردن و جریان حفره‌های انقباضی در این قطعه از تغذیه با کانال اضافی از مذاب استفاده گردیده است. آنجایی که در گوشه‌های خارجی قالب ماسه‌ای، قابلیت انتقال و خارج کردن قالب بیش‌تر از گوشه‌های داخلی و دیگر قسمت‌های قالب می‌باشد، مذاب در مجاورت این قسمت سریع‌تر سرد شده و در نتیجه جامد بیش‌تری تشکیل گردیده است. برعکس در گوشه‌های داخلی میزان انتقال حرارت کمتر بوده و در نتیجه مذاب نیز با سرعت کمتری جامد می‌گردد.



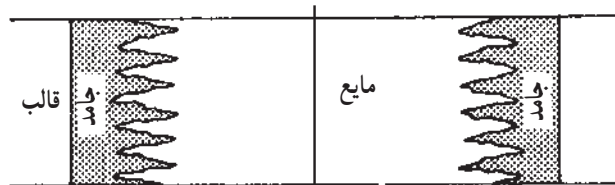
شکل ۲۵-۳- نحوه شماتیکی رشد مذاب روی جداره قالب

همان‌طوری که در این شکل دیده می‌شود جبهه انجماد به صورت دندان‌دانه دندان‌دانه و به شکل امواجی به طرف مرکز قطعه که فلز مذاب قرار دارد در حال پیشروی می‌باشد. بدیهی است در مرحله‌ای که سر دندان‌ها از دو طرف رشد نمایند در مرکز قطعه به یکدیگر رسیده و دیگر ادامه رشد و حرکت آن‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. همواره در بین این دندان‌ها (دندریت‌ها)

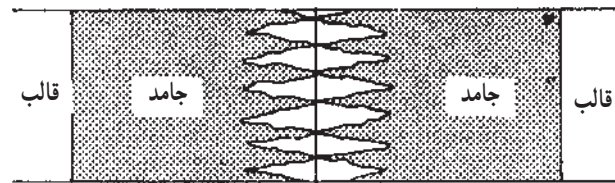
آخرین مذاب باقیمانده در قطعه قرار دارد که در مراحل انتهایی انجماد به جامد تبدیل می‌گردد. در شکل ۲۶-۳ موضوع فوق به طور شماتیکی و به وضوح نشان داده شده است.



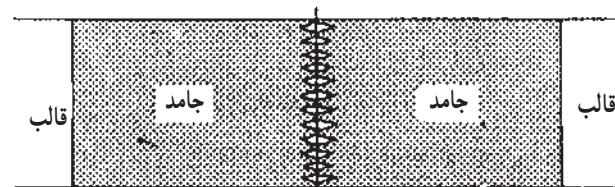
مرحله اولیه انجماد



مرحله میانی انجماد



رسیدن دندریت‌ها به مرکز قطعه



مذاب باقی مانده در مرکز قطعه

شکل ۲۶-۳. مراحل مختلف انجماد به طور شماتیکی

بدیهی است سرعت منجمد شدن مذاب بستگی به قابلیت هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی فلز و به ویژه قالب دارد. قالب‌های فلزی و گرافیتی به مراتب مذاب را سریع‌تر از قالب‌های ماسه‌ای سرد کرده و در نتیجه قطعات ریختگی در قالب‌های فلزی در مقایسه با قالب‌های ماسه‌ای سریع‌تر جامد می‌گردند.

در قطعاتی که انجماد مذاب از دورترین قسمت‌های قالب به سمت تغذیه شروع شده و انجماد آخرین قسمت مذاب در تغذیه انجام شود چنین انجمادی، انجماد جهت‌دار یا کنترل‌شده نامیده می‌شود و همان‌طوری که قبلاً گفته شد ایده‌آل‌ترین نوع انجماد در قطعات ریختگی می‌باشد.

بدیهی است تحت چنین شرایطی حفره‌های انقباضی در تغذیه به وجود می‌آیند (تغذیه یک قسمت اضافی بوده و بعداً از قطعه جدا می‌گردد) و قطعه تا مقدار بسیار زیادی عاری از حفره‌های انقباضی خواهد بود. از طرف دیگر گازها و ناخالصی موجود در مذاب توسط جبهه انجماد به طرف مذاب موجود در تغذیه رانده می‌شود و قطعات ریختگی با مرغوبیت زیادی به دست می‌آیند.

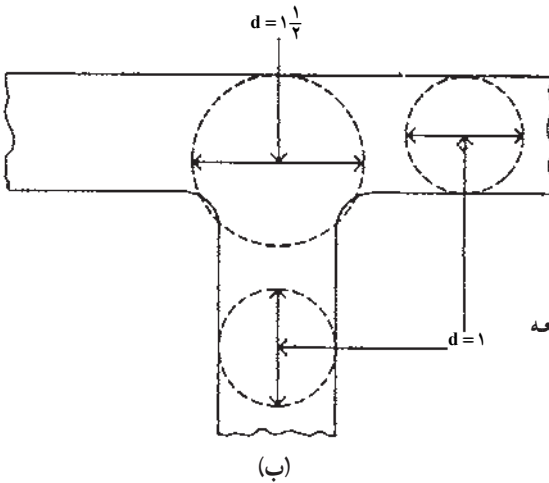
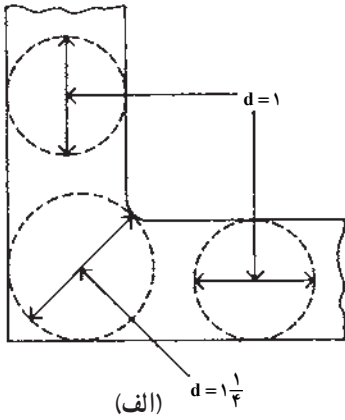
آلیاژی که دارای فاصله محدود لیکوئیدوس و سالییدوس (دامنه‌ی انجماد کم) است دارای منطقه خمیری کوتاهی نیز در جلوی جبهه انجماد می‌باشد. شیب حرارتی در قالب نیز (اختلاف درجه حرارت برای واحد طول) تأثیر مشابه‌ای بر عرض منطقه خمیری دارد. یعنی هر قدر شیب حرارتی قالب تندتر (بیش‌تر) گردد عرض منطقه خمیری نیز کاهش می‌یابد. بدیهی است توسط قراردادن قطعه یا قطعاتی فلزی (به خصوص مس، آلومینیم، چدن) و یا گرافیت در دورترین قسمت‌های قالب به طرف تغذیه می‌توان انجماد فلز را تحت شیب حرارتی تند انجام داد. به این نکته مهم توجه کنید که انجماد قطعات ریختگی تحت شیب حرارتی تند دارای مزایای بسیار زیادی بوده که اهم آن افزایش مرغوبیت قطعات ریختگی می‌باشد.

#### ۴-۳-۴ چگونگی انجماد فلز در گوشه‌ها

از آنجایی که نحوه انجماد مذاب روی سطوح صاف قالب با گوشه‌ها تفاوت دارد لذا نحوه انجماد مذاب دو نوع اتصال T و L مورد مطالعه قرار می‌گیرند. انجماد مذاب معمولاً در محل‌های اتصال قسمت‌های مختلف قطعه آهسته‌تر از قسمت‌های صاف قطعه انجام می‌گیرد. روش ساده‌ای که برای تعیین قسمت‌هایی از قطعه که ضخیم‌تر از قسمت‌های دیگر قطعه می‌باشد (یعنی محل تمرکز حرارتی) رسم دواپر محیطی در ضخامت‌های مختلف قطعه همان‌طوری که در شکل ۲۷-۳ نشان داده شده می‌باشد.

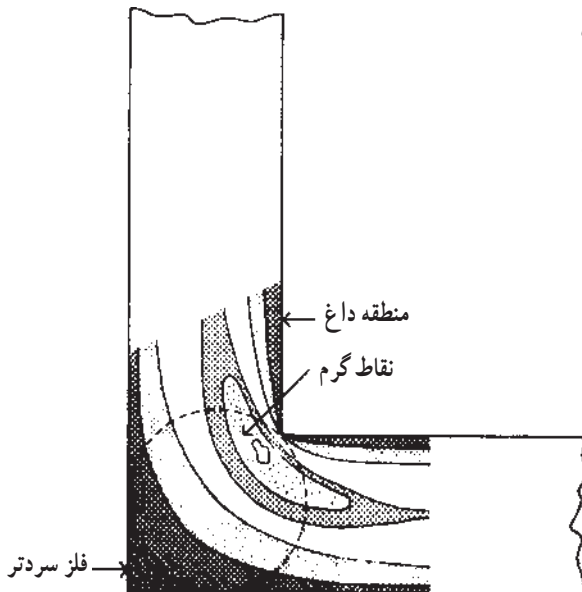
بدیهی است آخرین مذاب باقیمانده در چنین نقاطی بوده و در نتیجه حفره‌های انقباضی نیز در این محل‌های تمرکز حرارتی به وجود می‌آید. در قسمت L شکل ضخیم‌ترین قسمت، محل تماس قسمت‌های افقی و عمودی قطعه خواهد بود. به همین دلیل در چنین قطعاتی امکان وجود حفره‌های

انقباضی در این قسمت‌ها بیش‌تر می‌باشد. همین موضوع در مورد محل برخورد قسمت‌های مختلف سه‌گانه اشکال T شکل نیز وجود دارد.



شکل ۲۷-۳- نحوه تعیین ضخیم‌ترین قسمت قطعه  
الف- اتصال L ب- اتصال T

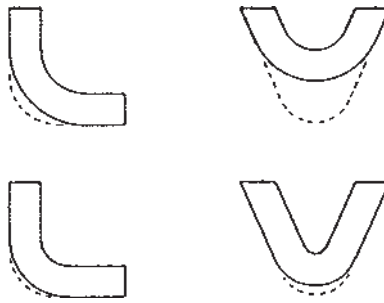
نحوه گسترش و ادامه انجماد یک قطعه L شکل توسط خطوط ایزوترم (هم‌دما) در شکل ۲۸-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲۸-۳- خطوط هم‌دما در محل اتصال L شکل

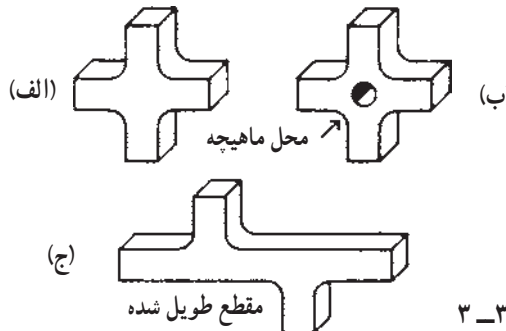
بدیهی است حفره انقباضی در منطقه تمرکز حرارتی نشان داده شده در دایره محیطی در قسمت ضخیم قطعه به وجود خواهد آمد.

اگر چه توسط قوس دادن گوشه‌ها برای مثال در اشکال L و V می‌توان از ایجاد مناطق تمرکز حرارتی جلوگیری نمود با این حال در صورتی که قوس‌های داده شده به درستی انتخاب نگردند باز هم منطقه تمرکز حرارتی در محل اتصال باقی خواهد ماند. نمونه‌ای از این مورد در شکل ۳-۲۹ نشان داده شده که با زیادتر نمودن قوس گوشه‌ها محل‌های تمرکز حرارتی به طور مناسبی کاهش یافته‌اند.



شکل ۳-۲۹

در قطعاتی که شکل + دارند مانند شکل ۳-۲۸ الف مرکز قطعه محل تمرکز حرارتی بوده و احتمال به وجود آمدن حفره‌های انقباضی در چنین شکل‌هایی بیش‌تر از اشکالی نظیر L یا V خواهد بود. یک روش ساده برای جلوگیری از تمرکز حرارتی در مرکز قطعاتی شبیه + استفاده از ماهیچه‌های توخالی است (که بتواند موجب سریع سرد کردن مذاب در آن قسمت گردد) روش دیگر تغییر شکل + به شکلی مشابه T مانند شکل ۳-۳۰ ج می‌باشد.



شکل ۳-۳۰

## ۵-۴-۳- چگونگی انجماد در آلیاژها

هنگامی که فلزی خالص در قالب جامد می‌گردد جبهه انجماد و یا فصل مشترک پوسته جامد و مذاب اغلب به صورت تقریباً مسطحی در داخل مذاب پیشروی می‌کند. هنگامی که مذاب محتوی مقادیری عناصر آلیاژی است این عنصر از طرف پوسته جامد شده در فصل مشترک جامد و مایع به طرف مذاب رانده می‌شود. وجود این عناصر آلیاژی در جبهه انجماد موجب کاهش نقطه ذوب فلز خالص در این منطقه شده و مکانیزم انجماد فلز را تغییر می‌دهد. تحت چنین شرایطی جبهه انجماد به صورت دندردیتی به طرف مذاب پیشرفت کرده و در نتیجه کریستال‌های دندردیتی که دارای شاخ و برگ‌های متعددی است در داخل مذاب به رشد خود ادامه می‌دهند. در فلزات تقریباً خالص صنعتی طول دندردیت‌های پیشرفته در مذاب کوتاه بوده و با افزایش درصد عنصر آلیاژی این طول نیز افزایش می‌یابد.

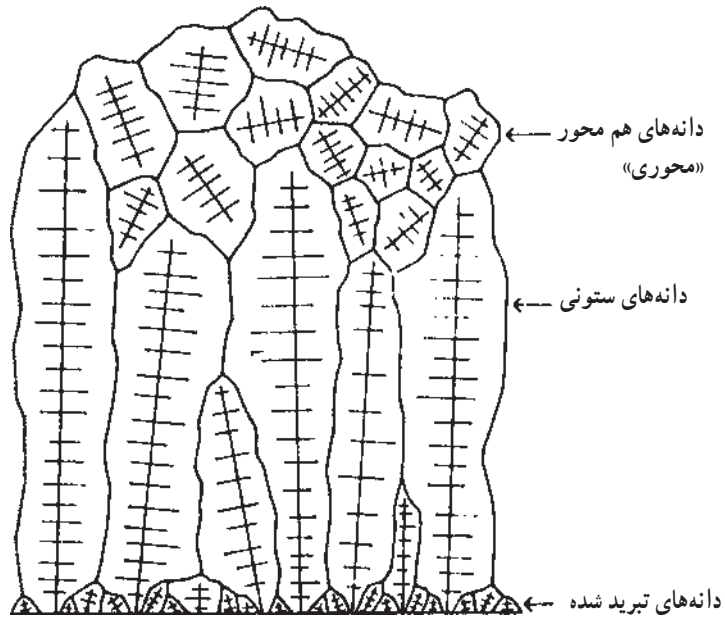
مراحل اولیه انجماد در صورتی که قالب به اندازه کافی سرد باشد با تشکیل سریع پوسته‌ای از فلز جامد همراه می‌باشد. این پوسته دارای ساختمانی با کریستال‌های بسیار ریز بوده که اصطلاحاً دانه‌های تبرید<sup>۱</sup> شده (سریع سرد شده) نامیده می‌شود. پس از تشکیل این لایه، کریستال‌های دندردیتی درشت‌تر از روی این لایه به طرف مرکز حرارتی قطعه شروع به رشد کردن می‌نمایند. معمولاً این نوع کریستال‌های اخیر، به طرف منطقه تمرکز حرارتی قطعه با سرعت بیش‌تری رشد نموده و تشکیل دانه‌های ستونی<sup>۲</sup> را می‌دهند. همیشه جهت رشد کریستال‌های ستونی در جهت شیب حرارتی موجود در قالب بوده و یا به عبارت دیگر مشخص‌کننده این نکته مهم هستند که انجماد قطعه در چه جهتی انجام یافته است. در ادامه رشد کریستال‌های ستونی به مرحله‌ای (معمولاً در مرکز قطعه) می‌رسیم که شیب حرارتی به شدت کاهش یافته و شرایط حرارتی به گونه‌ای است که جوانه‌های موجود در آن منطقه می‌توانند در تمام جهات رشد نمایند و منجر به پیدایش دانه‌ها یا کریستال‌های هم‌محور<sup>۳</sup> گردند. در شکل ۳-۳۱ ساختمان ماکروسکوپی قسمتی از یک قطعه ریختگی نشان داده شده است. در حین ریخته‌گری قطعات، ممکن است ساختارهای مختلفی ایجاد گردد. که در شکل ۳-۳۱ انواع مختلفی از آن نشان داده شده است.

۱-Chilled grains

۲-Columnar grains

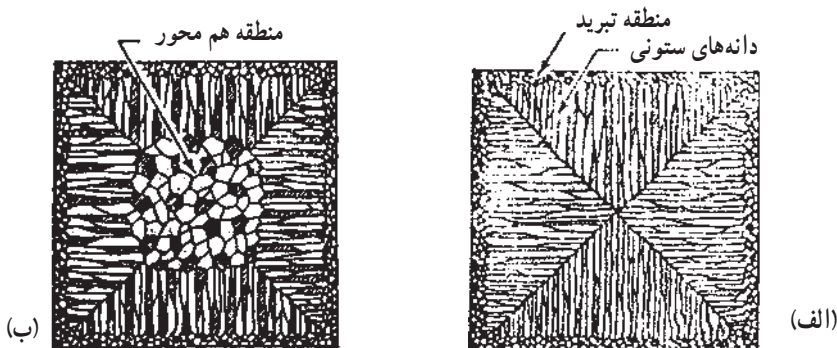
۳-Equiaxed grains or crystals





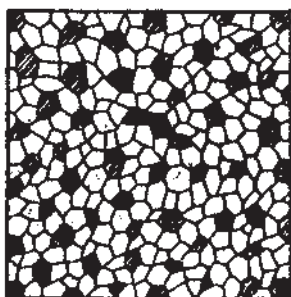
شکل ۳۱-۳- نمای شماتیکی مقطع جنبی یک قطعه ریختگی

در این جا این سؤال مهم ممکن است در ذهن شما ترسیم گردد که برای قطعات ریختگی چه نوع ساختمانی مناسب تر است. اگر چه جواب کافی به این سؤال از بحث ما خارج است به هر حال لازم است به این نکته مهم توجه شود که هر ساختمانی دارای مصارف خاص خود بوده و بسته به شرایط مصرف قطعات، ساختمان مخصوصی مورد نیاز می باشد. در شکل ۳۲-۳ الف دانه‌های تبرید شده به علت ریز بودن کریستال‌های تشکیل دهنده آن، از سختی و مقاومت در مقابل سایش بیش تری برخوردار است. لذا در قطعاتی که نیاز به چنین خصوصیتی می باشد وجود این نوع ساختمان در سطوح قطعات ریختگی دارای مزایای زیادی است. تفاوت مقاومت قطعات ریخته شده آلومینیمی یا آلیاژهای محتوی روی در قالب‌های فلزی به خصوص در روش ریخته‌گری تحت فشار در مقایسه با قطعات ریختگی در قالب‌های ماسه‌ای، آن است که قطعات نوع اول به علت سرعت سرد شدن زیاد در قالب‌های فلزی دارای سطوح با سختی زیادی خواهند بود. طبیعی است دستگیره درب اتومبیل که همواره در اثر تماس با دست در جریان سایش قرار دارد چنانچه در قالب‌های فلزی ریخته شود بهتر است.



ساختمان هم محور

((محوری))



شکل ۳۲-۳- نمونه دانه‌ها در فلز ریختگی

قطعات ریختگی با ساختمان کریستال‌های ستونی شکل ۳۲-۳ ب معمولاً دارای حفره‌های گازی و ناخالصی‌های کمتری در مقایسه با قطعات ریختگی با ساختمان دانه‌های هم محور می‌باشد. ولی از آنجایی که استحکام کریستال‌های ستونی در جهت رشد و عمود بر جهت رشد آن‌ها متفاوت است (در جهت رشد دارای مشخصات مکانیکی بهتری است) بنابراین جز در مواردی که نیرو به قطعات در جهت رشد دانه‌های ستونی اعمال می‌شود، مفید نمی‌باشند. مثالی در این مورد، پره‌های توربین می‌باشند که نوع مرغوب آن دارای ساختمانی با کریستال‌های ستونی می‌باشد. همچنین در مورد فلزات و آلیاژهای مغناطیسی قطعات با ساختمان ستونی بیش‌تر مورد قبول می‌باشند.

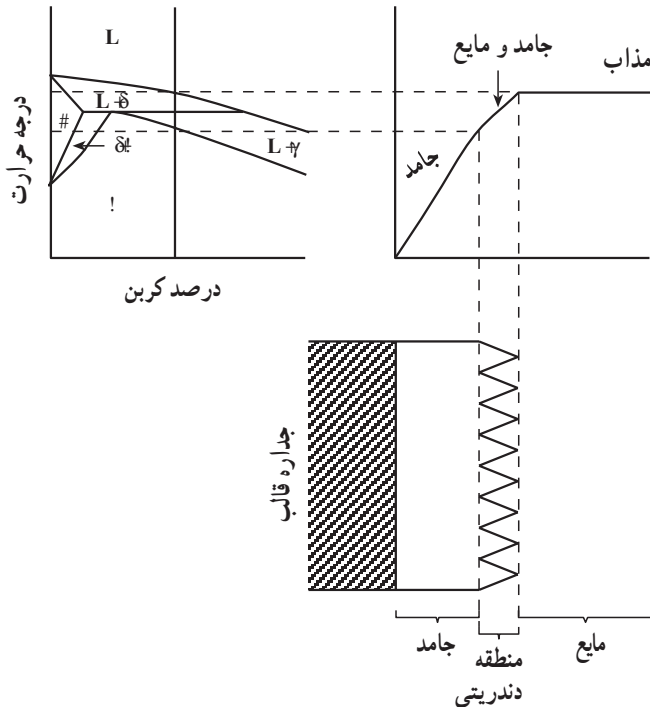
قطعات ریختگی با دانه‌های هم محور شکل ۳۲-۳ ج از آن جهت در ریخته‌گری بیش‌تر مقبول است که از نظر مشخصات مکانیکی در تمام جهات آن یکسان بوده و طراح بیش‌تر می‌تواند روی قطعات طرح شده تکیه نماید. به همین دلیل تمهیدات مختلف در ریخته‌گری وجود دارد که تولید قطعات با ساختمان‌های هم محور را تضمین می‌کند که مهم‌ترین آن‌ها استفاده از مواد جوانه‌زا در ریخته‌گری

است. از جمله اضافه کردن تیتانیوم (Ti) و بر (B) به آلومینیم (Al) مذاب، کربن (C) به منیزیم (Mg) مذاب و سیلیسیم (Si) به چدن مذاب و تیتانیوم به فولاد مذاب را می‌توان نام برد.

همان‌طوری که قبلاً گفته شد یکی از عوامل مهمی که در مرغوبیت قطعات ریختگی مؤثر است عرض منطقه خمیری در هنگام انجماد می‌باشد.

قطعات ریختگی از جنس آلیاژهایی که دارای دامنه انجماد زیاد هستند نسبت به آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاهتر، دارای معایب انقباضی و گازی بیش‌تری می‌باشند. علت این موضوع این است که در انجماد با منطقه خمیری گسترده، امکان گیرکردن و به تله افتادن گازها و ناخالصی‌های مضر بین شاخه‌های دندریت بیش‌تر می‌باشد. علاوه بر آن مذاب برای پرکردن حفره‌های انقباضی ایجاد شده در پوسته جامد با موانع بیش‌تر (شاخه‌های فرعی دندریتی در مذاب) روبرو است.

همان‌طور که در شکل ۳-۳۳ مشاهده می‌شود، مهمترین عوامل مؤثر در عرض منطقه خمیری، دامنه انجماد و شیب حرارتی در جبهه انجماد می‌باشد.



شکل ۳-۳۳- رابطه بین نمودار تعادل آهن و کربن (برای فولاد با ۰/۳ درصد کربن) و رفتار انجماد آن

## پرسش

- ۱- انجماد را تعریف کنید.
- ۲- سیستم‌های معمولی در تبلور فلزات صنعتی کدامند؟ سلول واحد هر یک را به طور شماتیک نشان دهید.
- ۳- رفتار فلزات خالص در هنگام انجماد را توضیح دهید.
- ۴- نمودار سردشدن مذاب فلز خالص و آلیاژ را به طور جداگانه رسم کرده علت اختلاف آن را توضیح دهید.
- ۵- آلیاژهای محلول جامد چیست؟
- ۶- منظور از آلیاژهای یوتکتیک چیست؟
- ۷- مطالعه چگونگی انجماد مذاب در قالب در ارتباط با انتقال حرارت تحت چه عنوان‌هایی بررسی می‌گردد؟ نام ببرید.
- ۸- حفره انقباضی چیست در کجا به وجود می‌آید؟
- ۹- مراحل انقباض فلزات را شرح دهید.
- ۱۰- انواع انجماد را نام برده توضیح دهید.
- ۱۱- کدام یک از دو نوع انجماد همه جانبه و جهت‌دار به تولید قطعات ریختگی سالم منتهی می‌گردد؟ چرا؟
- ۱۲- تأثیر سرعت انجماد در قطعات ریختگی را توضیح دهید.
- ۱۳- ساختارهای مختلفی که در حین ریخته‌گری قطعات ممکن است ایجاد گردد را به وسیله رسم شکل توضیح دهید.
- ۱۴- در قطعاتی که شکل (+) دارند برای برطرف نمودن حفره‌های انقباضی چه راه‌هایی وجود دارد؟ توضیح دهید.