

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اصول متالورژی ریخته‌گری

رشته متالورژی

زمینه صنعت

شاخه آموزش فنی و حرفه‌ای

شماره درس ۲۳۴۰

| | |
|----------|---|
| ۶۷۱ | ثقفیان لاریجانی، حسن |
| /۲ | اصول متالورژی ریخته‌گری / مؤلفان: حسن ثقفیان لاریجانی، منصور امامی. |
| الف ۶۶ ث | – [ویرایش دوم] / بازسازی و تجدید نظر: کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف رشته متالورژی. |
| ۱۳۹۳ | – تهران: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۳. |
| | ۱۴۶ص. – منصور. – (آموزش فنی و حرفه‌ای؛ شماره درس ۲۳۴۰) |
| | متون درسی رشته متالورژی، زمینه صنعت. |
| | ۱. ریخته‌گری. ۲. متالورژی. الف. امامی، منصور. ب. ایران. وزارت آموزش و پرورش. کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف رشته متالورژی. ج. عنوان. د. فروست. |

همکاران محترم و دانش‌آموزان عزیز :

پیشنهادات و نظرات خود را درباره محتوای این کتاب به نشانی
تهران - صندوق پستی شماره ۴۸۷۴/۱۵ دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی
و حرفه‌ای و کاردانش، ارسال فرمایند.

info@tvoccd.sch.ir

پیام‌نگار (ایمیل)

www.tvoccd.sch.ir

وب‌گاه (وب‌سایت)

این کتاب با توجه به برنامه سالی - واحدی و براساس پیشنهاد هنرآموزان رشته متالورژی
سراسر کشور در گردهمایی مهرماه ۸۱ در آذرماه سال ۱۳۸۴ توسط کمیسیون تخصصی
برنامه‌ریزی و تألیف رشته متالورژی بازسازی و تجدید نظر گردید.

وزارت آموزش و پرورش سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف : دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش

نام کتاب : اصول متالورژی ریخته‌گری - ۴/۴۸۰

مؤلفان : حسن نقیانی لاریجانی، منصور امامی

آماده‌سازی و نظارت بر چاپ و توزیع : اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی

تهران : خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)

تلفن : ۹-۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار : ۰۹۲۶۶۰۸۸۳۰، کدپستی : ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹

وب‌سایت : www.chap.sch.ir

صفحه‌آرا : فائزه محسن شیرازی

طراح جلد : علیرضا رضائی‌کُر

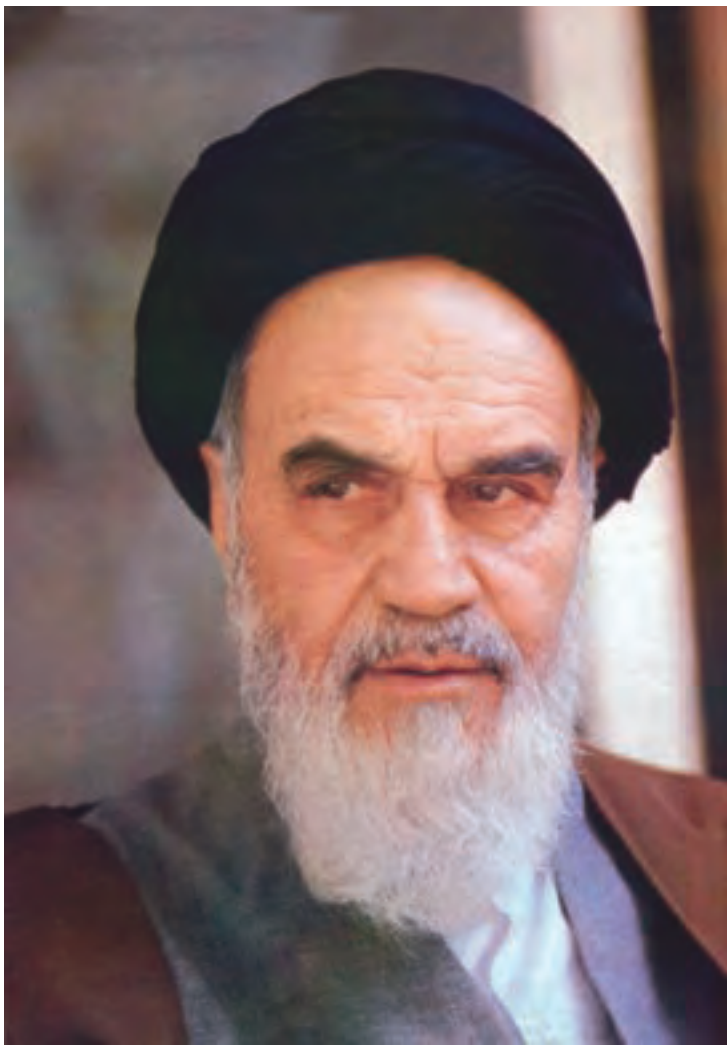
ناشر : شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران - تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)

تلفن : ۵-۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار : ۰۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی : ۳۷۵۱۵-۱۳۹

چاپخانه : سمانگ

سال انتشار : ۱۳۹۳

حق چاپ محفوظ است.



اول باید اخلاصتان را قوی بکنید، ایمانتان را قوی بکنید، ... و این
اخلاص و ایمان، شما را تقویت می کند و روحیه شما را بالا می برد و نیروی
شما جوری می شود که هیچ قدرتی نمی تواند (با شما) مقابله کند.
امام خمینی (ره)

فهرست

| | |
|----|--|
| ۱ | پیشگفتار |
| ۳ | فصل اوّل : مشخصات حالت مایع |
| ۳ | ۱-۱- حالات سه گانه ماده |
| ۴ | ۱-۲- نقطه ذوب و گرمای نهان گداز |
| ۷ | ۱-۳- گرمای ویژه |
| ۷ | ۱-۴- ضریب انبساط حرارتی |
| ۷ | ۱-۵- تغییرات ابعادی در ذوب و انجماد |
| ۱۰ | ۱-۶- چگالی (جرم حجمی) |
| ۱۱ | ۱-۷- انتقال حرارت |
| ۱۱ | ۱-۸- گران روی (ویسکوزیته) |
| ۱۱ | ۱-۹- تنش سطحی |
| ۱۲ | ۱-۱۰- فشار بخار |
| ۱۳ | ۱-۱۱- سیالیت (رو یا قابلیت پر کردن قالب) |
| ۱۴ | ۱-۱۱-۱- عوامل مؤثر در سیالیت |
| ۱۶ | پرسش |
| ۱۷ | فصل دوم : عملیات کیفی |
| ۱۷ | ۲-۱- گاز و عملیات گاز زدایی |
| ۱۸ | ۲-۱-۱- واکنش گاز در مذاب |
| ۱۸ | ۲-۱-۲- منابع تولید گاز در مذاب |
| ۲۳ | ۲-۱-۳- انحلال گازها در مذاب |
| ۲۳ | ۲-۱-۴- چگونگی ایجاد مک های گازی |
| ۲۷ | ۲-۱-۵- عوامل مؤثر در میزان مک های گازی |
| ۲۸ | ۲-۱-۶- روش های اندازه گیری گاز در مذاب |
| ۳۰ | ۲-۱-۷- روش های جلوگیری از مک های گازی |
| ۳۱ | ۲-۱-۸- روش های گاززدایی |
| ۳۴ | ۲-۲- آخال و آخال زدایی |
| ۳۴ | ۲-۲-۱- انواع آخال ها |
| ۳۶ | ۲-۲-۲- اکسیداسیون و اکسیدها |
| ۳۶ | ۲-۲-۳- منابع ایجاد آخال و پیشگیری از آن |
| ۳۷ | ۲-۲-۴- آخال زدایی |

- ۴۱ ۵-۲-۲- عملیات فیلتر کردن مذاب
 ۴۱ ۳-۲- تلقیح (جوانه زایی و ...)
 ۴۴ ۱-۳-۲- مزایا و عیوب جوانه زایی
 ۴۵ پریش

فصل سوم : انجماد فلزات

- ۴۶ ۱-۳- طبیعت و ساختمان فلزات
 ۴۶ ۲-۳- رفتار فلزات خالص در هنگام انجماد
 ۵۱ ۳-۳- مشخصات آلیاژها و رفتار آنها در هنگام انجماد
 ۵۴ ۱-۳-۳- آلیاژهای محلول جامد
 ۵۶ ۲-۳-۳- آلیاژهای یوتکتیک
 ۶۱ ۳-۳-۳- ترکیبات بین فلزی
 ۶۱ ۴-۳-۳- نمودارهای فازی
 ۶۲ ۴-۳- چگونگی انجماد فلز در قطعات ریختگی
 ۶۲ ۱-۳-۴- انقباض حجمی در قطعات ریختگی
 ۶۵ ۲-۳-۴- چگونگی انجماد فلزات خالص
 ۶۸ ۳-۳-۴- سرعت انجماد در قطعات ریختگی
 ۷۴ ۴-۳-۴- چگونگی انجماد فلز در گوشه ها
 ۷۷ ۵-۳-۴- چگونگی انجماد در آلیاژها
 ۸۱ پریش

فصل چهارم : اصول تغذیه گذاری در قطعه های ریختگی

- ۸۲ ۱-۴- انقباض فلزات و لزوم استفاده از تغذیه
 ۸۲ ۱-۴-۱- تغذیه در قطعه های ریختگی
 ۸۳ ۲-۴- انجماد و اصول تغذیه
 ۸۴ ۱-۴-۲- فلزات و آلیاژهای با دامنه انجماد کوتاه (انجماد پوسته ای)
 ۸۶ ۲-۴-۲- فلزات و آلیاژهای با دامنه انجماد طولانی (انجماد خمیری)
 ۸۸ ۳-۴-۲- فلزات و آلیاژهای با دامنه انجماد متوسط (انجماد میانی)
 ۹۲ ۳-۴- محل تغذیه و انجماد جهت دار
 ۹۵ ۱-۴-۳- جهت انجماد
 ۹۵ ۲-۴-۳- محل تغذیه در قطعات ریختگی با سطوح مقطع غیر یکنواخت
 ۹۷ ۴-۴- اجزای تغذیه
 ۹۹ ۱-۴-۴- منبع تغذیه

- ۱۰۰ ۲-۴-۴- گلویی تغذیه
- ۱۰۳ ۵-۴- انواع تغذیه
- ۱۰۳ ۱-۵-۴- انواع تغذیه براساس محل قرارگرفتن تغذیه، قبل یا بعد از محفظه قالب
- ۱۰۶ ۲-۵-۴- انواع تغذیه براساس موقعیت قرار گرفتن تغذیه نسبت به قطعه
- ۱۰۷ ۳-۵-۴- انواع تغذیه براساس ارتباط تغذیه با اتمسفر محیط
- ۱۱۱ ۶-۴- روشهای افزایش راندمان تغذیه (کمک تغذیه)
- ۱۱۲ ۱-۶-۴- استفاده از مواد عایق و گرمازا
- ۱۱۴ ۲-۶-۴- استفاده از مبرد
- ۱۱۷ ۳-۶-۴- طراحی سیستم راهگامی و بارریزی
- ۱۱۹ پرسش

فصل پنجم : سیستم راهگامی

- ۱۲۱ ۱-۵- اجزای یک سیستم راهگامی
- ۱۲۳ ۱-۱-۵- حوضچه (قیف) بالای راهگام بارریز
- ۱۲۵ ۲-۱-۵- راهگام بارریز (لوله راهگام)
- ۱۲۶ ۳-۱-۵- حوضچه پای راهگام بارریز
- ۱۲۷ ۴-۱-۵- کانالهای اصلی (راهبار) و فرعی (راهبار)
- ۱۲۸ ۵-۱-۵- طرح مناسب برای اتصال اجزای سیستم راهگامی
- ۱۲۹ ۲-۵- انواع سیستمهای راهگامی
- ۱۳۲ ۳-۵- روشهای راهگام گذاری (روشهای تعبیه سیستمهای راهگامی)
- ۱۳۳ ۱-۳-۵- روش راهگام گذاری از بالا
- ۱۳۵ ۲-۳-۵- روش راهگام گذاری از پایین
- ۱۳۶ ۳-۳-۵- روش راهگام گذاری در سطح جدایش
- ۱۳۷ ۴-۳-۵- سیستمهای راهگامی مرکب (چندتایی)
- ۱۴۰ ۴-۵- روشهای آخالگیری در سیستمهای راهگامی
- ۱۴۰ ۱-۴-۵- روشهای جداسازی مواد ناخواسته براساس اختلاف در وزن مخصوص
- ۱۴۰ استفاده از کانال ممتد
- ۱۴۲ ۲-۴-۵- استفاده از صافی (فیلتر)
- ۱۴۴ پرسش

- ۱۴۵ فهرست منابع اصلی

پیشگفتار

هرچند ریخته‌گری از دیرباز به عنوان یک صنعت شناخته شده است و از قدیمی‌ترین شاخه‌های متالورژی به شمار می‌رود، با این حال، در طی سالیان متمادی، بیش‌تر توجهات به سوی جنبه‌های عملی محض و مَتکی به تجربه و مهارت این صنعت معطوف گشته و بنابراین، به عنوان یک علم، کمتر از آن یاد شده است. اما بتدریج با افزایش نیازهای انسان و پیدایش کاربردهای جدید برای قطعات فلزی، انگیزه‌ی برخورد علمی با این صنعت فراهم گردید؛ به گونه‌ای که امروزه این حقیقت بخوبی شناخته شده است که دستیابی به محصولاتی با کیفیت بهتر و کارایی مؤثرتر، به همراه صرف انرژی و مواد کمتر و در زمانی کوتاه‌تر، مستلزم نگرشی علمی به صنعت ریخته‌گری می‌باشد. بنابراین ریخته‌گری را باید مجموعه‌ای از علوم، صنایع و طراحی دانست که با شناخت صحیح این عوامل و ایجاد ارتباطی منطقی میان آن‌ها، می‌توان به حداکثر بهره‌دهی از امکانات تولیدی دست یافت.

در کتاب حاضر سعی شده است تا مبانی علمی فرآیند ریخته‌گری، تا حد امکان با زبانی ساده مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند. در این راستا، با توجه به این که اولین قدم در ریخته‌گری قطعات، تهیه‌ی مذابی با مشخصات مطلوب از مواد فلزی مورد نظر می‌باشد. لذا فصول ۱ و ۲ به تشریح اصول کلی در عملیات ذوب شامل ویژگی‌های فیزیکی و متالورژیکی حالت مایع (مذاب) و مبانی عملیات کیفی مذاب اختصاص داده شده است. اصول علمی و عملی در انجماد مواد فلزی به همراه مبانی علمی و عملی در ارتباط با طراحی تغذیه و سیستم‌های راهگاهی نیز در سه فصل آخر مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

در این جا ذکر این نکته حایز اهمیت فراوان است که مطالب این کتاب با توجه به محتوا و جایگاه سایر دروس گنجانده شده در برنامه‌ی نظام جدید آموزشی تهیه و تدوین شده است و بدون شک همانند هر کار جدیدی، خالی از اشکال نیست. از این رو، رایه‌ی نظرات اصلاحی و راهنمایی‌های استادان و دبیران محترم به منظور ارتقای کیفیت این کتاب، موجب کمال امتنان و سپاسگزاری است.

مؤلفان

هدف کلی

آشنایی با مبانی و اصول متالورژیکی ریخته‌گری

مشخصات حالت مایع

هدف های رفتاری: از فراگیر انتظار می رود در پایان این فصل بتواند:

- ۱- حالات سه گانه ماده را توضیح دهد.
- ۲- خواص فیزیکی فلزات را به طور کامل تشریح کند.

۱- مشخصات حالت مایع

۱-۱- حالات سه گانه ماده

اجسام از نظر فیزیکی به سه حالت جامد، مایع و گاز دیده می شوند. هر جسمی در شرایط طبیعی (محیط) فقط به صورت یکی از حالات سه گانه فوق وجود دارد و برای تبدیل و انتقال آن به یکی از حالات دیگر صرف کار و انرژی لازم است.

در شرایط معین، اتم های ماده در ارتباط با یکدیگر بوده و دارای انرژی معین و محدودی هستند که تغییرات این انرژی باعث تغییر حالت جسم و تغییر بعضی از خواص ماده می گردد.

در شرایط محیط (فشار یک اتمسفر و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد) هر ماده ای به حالت معینی پایدار می باشد برای مثال آلومینیم و آهن به صورت جامد، آب به صورت مایع و هوا به صورت گاز می باشند.

اجسام جامد دارای شکل و حجم معین هستند و این بدان معنی است که دامنه ارتعاشات اتم ها از حدود معینی تجاوز نمی کند و اتم ها در ارتباط کامل با هم هستند. جامدات از پایداری و استحکام بالایی برخوردارند و برای لغزاندن اتم های آن ها بر روی هم نیروی زیادی لازم است و گاه مقدار این نیرو به حدی است که به جای لغزاندن، در جسم تغییر حالت ایجاد می شود.

مایعات دارای حجم ثابت هستند ولی شکل معینی ندارند و شکل ظرف را به خود می‌گیرند. اتم‌های مایع با صرف انرژی کمتری بر روی هم می‌لغزند و استحکام موجود در قطعات جامد به روانی و سیالیت تبدیل می‌گردد. انرژی لازم برای لغزاندن اتم‌ها در حالت جامد 10^2 برابر این انرژی برای حالت مایع است. گازها در حالتی قرار دارند که حجم و شکل آن‌ها ثابت نیست و از این رو ارتباط اتم‌های گازی بسیار کم است. با توجه به مطالب ساده فوق چنین استنباط می‌گردد که جامدات و مایعات از تشابه خواص فیزیکی بیش‌تری برخوردار بوده و گازها بطور کلی مشخصات متفاوتی با آن‌ها دارند.

هنگامی که سخن از تغییر حالت اجسام به میان می‌آید تأمین انرژی برای انجام کار لازم نیز اهمیت زیاد می‌یابد. ساده‌ترین نوع تأمین انرژی، منابع حرارتی است و لذا حرارت در متالورژی برای ذوب کردن و حرارت‌گیری برای انجماد مهم‌ترین عامل فیزیکی مورد مطالعه است. حرارت مانند انرژی مکانیکی غیرقابل لمس است و نمی‌توان برای آن واحدی تهیه نمود و در موزه نگهداری کرد (واحد طول، واحد وزن ...). و لذا واحد حرارت، مقدار حرارتی است که بتواند دمای جسم یا یک سیستم را یک واحد تغییر دهد.

در ترمودینامیک^۱ برای حرارت سه واحد، کالری، کیلوکالری و BTU (واحد حرارتی بریتانیا) وجود دارد. کالری مقدار حرارتی است که درجه حرارت یک گرم آب را به مقدار یک درجه سانتی‌گراد بالا ببرد (به عبارت علمی از $14/5$ درجه به $15/5$ درجه سانتی‌گراد برساند). کیلوکالری واحد حرارتی بزرگتری است و برابر 1000 کالری است. BTU مقدار حرارتی است که درجه حرارت یک پوند آب (453 گرم) را به میزان یک درجه فارنهایت افزایش دهد. در سیستم SI واحد حرارت ژول (J) می‌باشد (یک کالری برابر $4/189$ ژول می‌باشد).

۲-۱- نقطه ذوب و گرمای نهان‌گداز

هنگامی که به یک جامد و یا یک فلز حرارت داده می‌شود، دامنه ارتعاشات اتم‌ها، پیوسته افزایش می‌یابد و در حقیقت فاصله بین اتمی کمی بیش‌تر می‌شود. با افزایش مقدار حرارت، درجه حرارت جسم بالا رفته و بالاخره به درجه حرارتی می‌رسد که حد نهایی ارتعاشات و فاصله اتمی در حالت جامد است. در چنین درجه حرارتی ساختمان جامد به حالتی می‌رسد که در صورت افزایش انرژی (حرارت) می‌تواند از حالت جامد خارج شده و به حالت مایع تبدیل گردد. این درجه حرارت را نقطه ذوب جسم می‌نامند. در جدول ۱-۱ نقطه ذوب بعضی از فلزات و عناصر صنعتی آورده شده است.

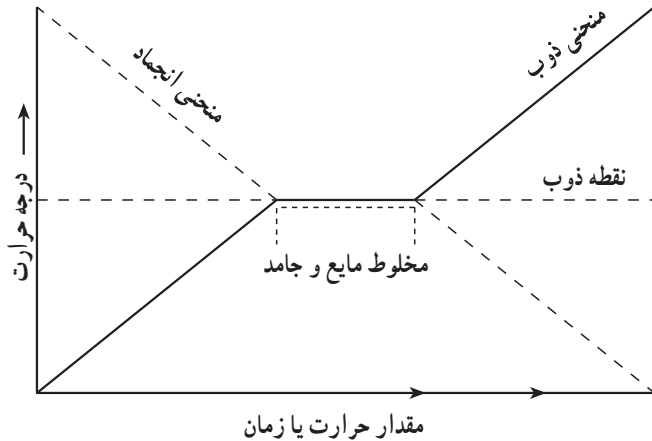
۱- علم مطالعه روابط بین کار و گرما

جدول ۱-۱- نقطه ذوب برخی از عناصر صنعتی (درجه سانتی‌گراد)

| نقطه ذوب | نماد شیمیایی | نام عنصر | نقطه ذوب | نماد شیمیایی | نام عنصر |
|----------|--------------|----------|----------|--------------|-----------|
| ۹۷/۵ | Na | سدیم | ۶۶۰ | Al | آلومینیم |
| ۳۲۷ | Pb | سرب | ۶۳۰ | Sb | آنتیموان |
| ۲۱۷ | Se | سلنیوم | ۱۵۳۹ | Fe | آهن |
| ۱۴۱۰ | Si | سیلیسیم | ۱۵۴۰ | Sr | استرانسیم |
| ۱۰۶۳ | Au | طلا | ۱۱۳۲ | U | اورانیوم |
| ۲۳۲ | Sn | قلع | ۲۴۵۵ | Ir | ایریدیم |
| ۳۲۱ | Cd | کادمیوم | ۱۵۶ | In | ایندیوم |
| ۱۴۹۵ | Co | کبالت | ۷۱۴ | Ba | باریم |
| ۳۷۰۰ | C | کربن | (۲۱۰۰) | B | بر |
| ۱۸۷۵ | Cr | کرم | ۱۲۷۷ | Be | برلیوم |
| ۸۳۹ | Ca | کلسیم | ۲۷۱ | Bi | بیسموت |
| ۳۰ | Ga | گالیوم | ۶۳/۷ | K | پتاسیم |
| ۱۸۰ | Li | لیتیم | ۱۷۶۹ | Pt | پلاتین |
| ۱۰۸۳ | Cu | مس | ۲۵۰ | Pu | پلونیوم |
| ۱۲۴۵ | Mn | منگنز | ۳۴۱۰ | W | تنگستن |
| ۶۵۱ | Mg | منیزیم | ۱۷۵۰ | Th | توریم |
| ۲۶۱۰ | Mo | مولیبدن | ۱۶۷۰ | Ti | تیتانیوم |
| ۹۶۰ | Ag | نقره | (-۳۹) | Hg | جیوه |
| ۱۴۵۳ | Ni | نیکل | ۷۰۰ | Ra | رادیوم |
| ۲۴۷۰ | Nb | نیوبیوم | ۴۱۹ | Zn | روی |
| ۱۸۶۰ | V | وانادیم | ۱۸۵۲ | Zr | زیرکنیوم |
| | | | ۹۳۷ | Ge | ژرمنیوم |

تغییر حالت کلی در درجه حرارت ذوب، مستلزم صرف انرژی حرارتی اضافی است. این انرژی باید توانایی جدا کردن اتم‌ها از یکدیگر را به فاصله کافی برای تبدیل ساختمانی جامد به مایع دارا باشد. چنین انرژی حرارتی را گرمای گداز یا گرمای نهان ذوب می‌نامند. گرمای نهان گداز مقدار حرارتی است که واحد جرم جسم (فلز خالص) لازم دارد تا پس از رسیدن به درجه حرارت ذوب، بدون تغییر دما به مایع تبدیل گردد همچنین مایع پس از رسیدن به نقطه ذوب (انجماد) مقداری حرارت از دست می‌دهد تا جامد شود. در شکل ۱-۱ منحنی ذوب و انجماد یک فلز خالص نشان

داده شده است.



شکل ۱-۱- منحنی ذوب و انجماد فلز خالص

بدیهی است تغییرات فشار در نقطه ذوب مؤثر می‌باشد. تجربه نشان داده است برای اجسامی که در اثر ذوب حجمشان کم می‌شود (یخ و بیسموت)، افزایش فشار باعث کاهش نقطه ذوب می‌شود، به طوری که ازدیاد فشار به مقدار یک اتمسفر باعث نزول نقطه ذوب یخ به میزان 0.0075°C درجه سانتی‌گراد می‌گردد. از سوی دیگر برای اجسامی که در هنگام ذوب حجمشان زیاد می‌شود (اکثر فلزات و ترکیبات) افزایش فشار باعث بالا رفتن نقطه ذوب می‌گردد. در مورد یخ نکته مهم آن است که اعمال فشار تا 3200 اتمسفر باعث نزول نقطه ذوب شده و پس از آن فشار باعث افزایش نقطه ذوب می‌گردد و در فشار 20 هزار اتمسفر نقطه ذوب یخ به 8° درجه سانتی‌گراد می‌رسد که به یخ داغ موسوم است.

آلیاژها از مخلوط کردن و محلول کردن عناصر در یکدیگر به وجود می‌آیند در جریان ذوب، درجه حرارت ثابتی ندارند و برخلاف فلزات خالص نقطه ذوب و انجمادشان یکسان نیست. این موضوع به روابط ترمودینامیکی، شیمیایی و تحولات متعددی بستگی دارد که توضیح آن‌ها نیازمند مطالعات مقدماتی بسیاری می‌باشد. بنابراین در مورد آلیاژها، نقطه ذوب درجه حرارتی است که در هنگام گرم کردن اولین قطره‌های مذاب ظاهر می‌شوند، در حالی که نقطه انجماد، درجه حرارتی است که در جریان سرد کردن مذاب، اولین هسته‌های جامد در آلیاژ تشکیل می‌شود. براساس قرارداد

فاصله درجه حرارتی ذوب و انجماد را فاصله انجماد یا دامنه انجماد می‌نامند. بدین ترتیب دامنه انجماد فلزات خالص و ترکیبات شیمیایی خالص صفر بوده و مذاب در یک درجه حرارت ثابت به جامد تبدیل می‌شود.

۳-۱- گرمای ویژه

هرگاه چند جسم مختلف در یک محیط قرار گیرند، پس از مدتی درجه حرارت تمام آن‌ها یکسان می‌شود، ولی مقدار حرارت جذب شده توسط آن‌ها برابر نیست و به ظرفیت حرارتی آن‌ها بستگی دارد.

گرمای ویژه یک جسم مقدار حرارتی است که درجه حرارت واحد جرم جسم را یک درجه سانتی‌گراد بالا ببرد. گرمای ویژه برحسب $\left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{C}^\circ}\right)$ یا $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}^\circ}\right)$ یا $\left(\frac{\text{BTU}}{\text{Lb} \cdot \text{F}^\circ}\right)$ بیان می‌شود. نقطه ذوب، گرمای ویژه اجسام (در حالت جامد و مایع) و گرمای نهان‌گداز آن‌ها می‌تواند در محاسبه و طرح ساختمان کوره‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۴-۱- ضریب انبساط حرارتی

معمولاً مواد در اثر حرارت انبساط پیدا می‌کنند. محاسبه و تعیین مقدار انبساط از نکات مهم در طراحی قطعات و طراحی قالب و مدل می‌باشد. انبساط جامدات بسیار کم می‌باشد با این وجود در مورد جامدات به دلیل قابلیت اندازه‌گیری ابعاد، انبساط طولی محاسبه می‌گردد که مطالب محاسباتی آن در کتاب محاسبات فنی تخصصی آورده شده است.

۵-۱- تغییرات ابعادی در ذوب و انجماد

تغییرات طولی جامدات و یا تغییرات حجمی مایعات در اثر درجه حرارت تقریباً از فرمول ساده و خطی زیر تبعیت می‌کنند.

$$x = a + bT$$

x: تغییرات طولی

a و b: ضرایب ثابت

T: درجه حرارت

در نقطه انجماد (نقطه ذوب)، تغییرات مقدار حرارت باعث تغییر نوع اتصال اتم‌ها می‌گردد و جامد را به مذاب و یا مذاب را به جامد مبدل می‌سازد. در چنین حالتی پدیده انبساط یا انقباض حجمی با درجه حرارت رابطه ساده‌ای نداشته و بیش‌تر به تبدیلات ساختمانی فلز مربوط می‌شود. بیش‌تر عناصر و ترکیبات در مراحل مختلف ذوب انبساط پیدا می‌کنند در این‌جا تغییرات حجمی یک فلز یا یک آلیاژ در سه منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

منطقه اول (جامد) تغییرات حرارتی این منطقه که از درجه حرارت محیط تا نقطه ذوب ادامه دارد، دارای انبساطی است که با قوانین فیزیکی انبساط مطابقت دارد و به سهولت قابل محاسبه است. در این منطقه به دلیل جامد بودن جسم و داشتن شکل و حجم معین مقدار انبساط خطی مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

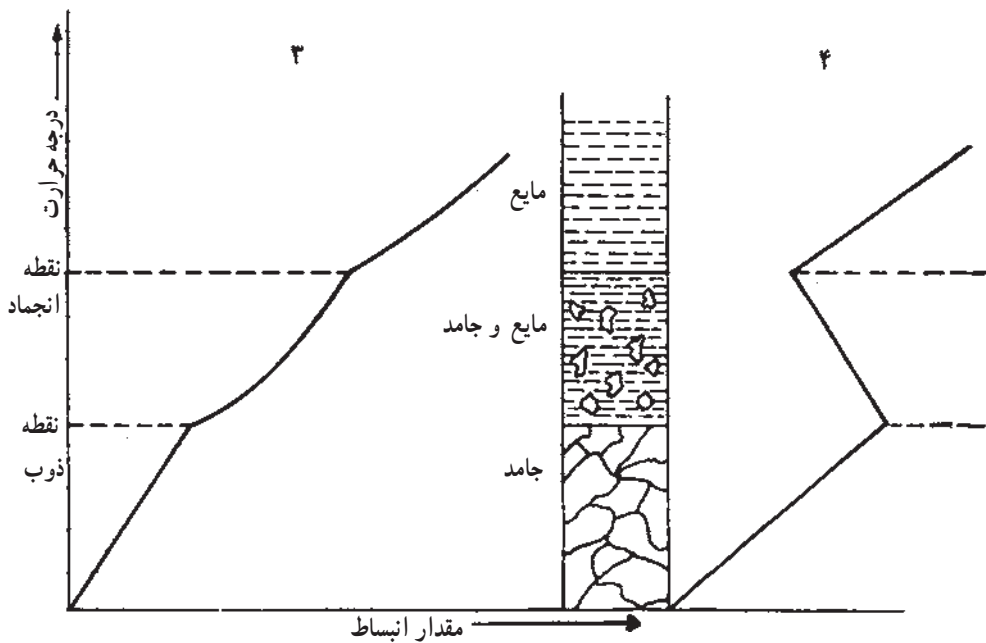
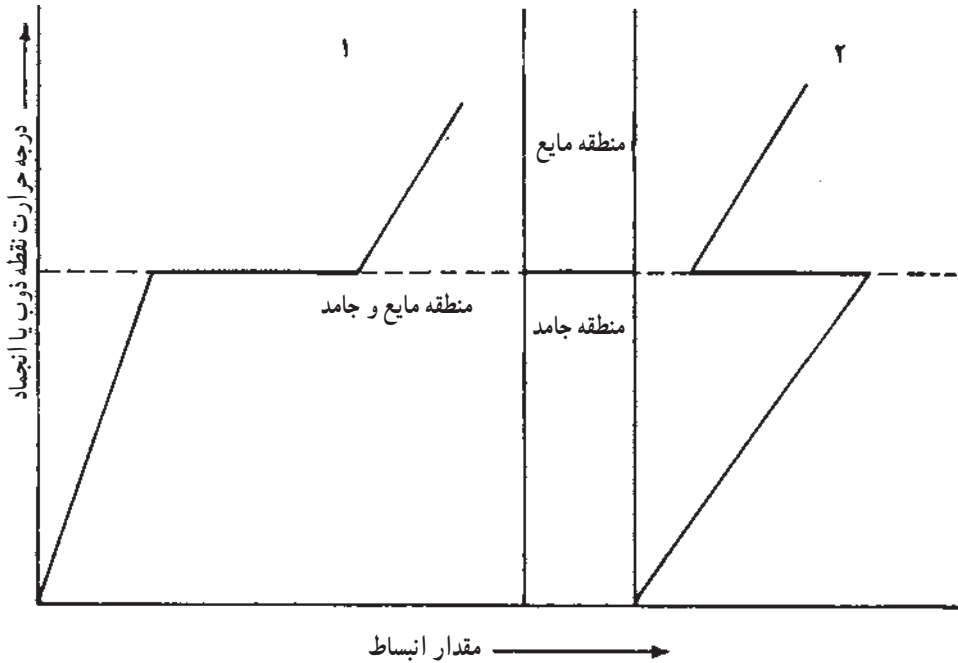
منطقه دوم (منطقه جامد و مایع یا دامنه انجماد) همان‌گونه که گفته شد انبساط این منطقه در جریان ذوب به شکل ساختمانی مایع و جامد بستگی دارد و عموماً فلزات و آلیاژها در این منطقه ۲ تا ۸ درصد انبساط پیدا می‌کنند. فلزات و آلیاژهای معدودی هستند که در جریان ذوب در این منطقه به جای انبساط، انقباض می‌یابند.

بیسموت، آنتیموان، چدن خاکستری و یخ دارای چنین شرایطی می‌باشند و دلیل آن نیز در مورد هر یک متفاوت است. شکل ۱-۲ دیاگرام انبساط یک فلزخالص و یک آلیاژ فرضی جامد را در جریان ذوب نشان می‌دهد.

منطقه سوم (مایع) برای ریخته‌گری فلزات و آلیاژها همواره لازم است که پس از ذوب کامل، درجه حرارت مذاب را افزایش داد تا در زمان حمل و نقل و بارریزی، روانی خود را از دست ندهد که آن را درجه حرارت فوق ذوب می‌نامند. انبساط منطقه سوم از نقطه ذوب تا درجه فوق ذوب (یا درجه حرارت ریختن) ادامه دارد. مقادیر انبساط مربوط به این منطقه مطابق قوانین فیزیکی و براساس ضریب انبساط حجمی مطالعه می‌شود.

مسائلی که در مورد انبساط حرارتی بیان گردید، در ریخته‌گری اهمیت چندانی ندارد، زیرا قطعات در کوره گرم می‌شوند و انبساط آن‌ها همان‌قدر که بتواند در فضاهاى خالی کوره جبران شود، اهمیت دیگری ندارد. آنچه که در ریخته‌گری حائز اهمیت است انقباض و یا تغییرات حجمی جسم در مراحل مختلف سردشدن می‌باشد و شاید تغییرات حجمی در جریان انجماد، مهم‌ترین مطلبی باشد که ریخته‌گران از قدیم با آن روبه‌رو بوده‌اند و هنوز هم در بسیاری موارد قادر به حل مشکلات ناشی از آن نیستند.

هنگامی که فلز مذاب در درجه حرارت فوق ذوب (درجه حرارت ریختن) به‌داخل قالب ریخته



۱ و ۲ فلز خالص ۳ و ۴ آلیاژ

۱ و ۳ فلز و آلیاژی که در دامنه ذوب انبساط دارند (اکثر فلزات و آلیاژها)

۲ و ۴ فلز و آلیاژی که در دامنه ذوب انقباض دارند (فرضاً بیسموت و چدن)

شکل ۱-۲- دیاگرام انبساط فلز خالص و آلیاژ در جریان ذوب

می‌شود، معمولاً محفظه قالب که حجم ثابتی دارد پر می‌شود و لذا انقباضات مربوط به مناطق مختلف همواره کمبودهایی را در قطعه پدید می‌آورد. مهم‌ترین عمل ریخته‌گران جبران این کمبودها می‌باشد که برای درک بیشتر، بررسی چگونگی انقباض در مراحل مختلف ذوب و انجماد لازم است.

۱-۵-۱- منطقه مایع

اگر قالب توسط مذابی با درجه حرارت فوق‌گداز (فوق ذوب) پر شود، انقباض ناشی از کاهش درجه حرارت مایع از فوق ذوب تا نقطه انجماد باید جبران شود. انقباض مایعات به صورت کمبود حجم در قسمت فوقانی مشاهده می‌شود. ریخته‌گران معتقد هستند که بارریزی باید با چنان سرعتی انجام گیرد که پر شدن قالب با افت کافی درجه حرارت مذاب هم‌زمان باشد. تعبیه صحیح سیستم راهگاهی که در فصل ۵ تشریح خواهد شد می‌تواند تا اندازه‌ی زیادی این مشکل را حل کند.

۱-۵-۲- منطقه جامد و مایع

در آغاز انجماد، هنگامی که ذرات جامد و مایع با هم در حال تعادل هستند، نمی‌توان مذاب اضافی به قالب وارد نمود. از طرف دیگر کمبود حجم این منطقه در یک نقطه متمرکز نمی‌شود و در سراسر قطعه پراکنده می‌گردد. مشکلات مربوط به این انقباض پس از شناختن مدل‌های انجماد (فصل ۳) و سیستم تغذیه‌گذاری (فصل ۴) مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱-۵-۳- منطقه جامد

پس از پایان انجماد، کاهش درجه حرارت از نقطه ذوب تا محیط باعث کاهش ابعاد قطعه می‌گردد.

انقباض فقط در سیستم طراحی، مدل‌سازی و ساخت قالب مؤثر است که در کتاب رسم مدل و قالب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از مجموع آنچه گفته شد، چنین استنباط می‌گردد که اشکالات متعدد ناشی از انقباض در کلیه مراحل ریخته‌گری، طراحی و مدل‌سازی، تکنولوژی قالب و انجماد حائز اهمیت می‌باشد. همچنین اثرات درجه حرارت فوق ذوب، ترکیب آلیاژ و چگونگی انجماد در میزان انقباض و مشکلات ناشی از آن بسیار مهم است.

۱-۶- چگالی (جرم حجمی)

جرم واحد حجم را چگالی جسم می‌نامند که برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و یا کیلوگرم بر متر مکعب بیان می‌شود.

بر اساس روابط متالورژیکی چگالی فلزات و عناصر خالص کاملاً به ساختمان بلوری و شکل هندسی آن‌ها بستگی دارد. تأثیر عوامل فیزیکی (درجه حرارت و فشار) و عوامل شیمیایی (ترکیب آلیاژ) در تغییرات چگالی کاملاً مشخص است.

انبساط طولی و حجمی اجسام و رابطه آن با درجه حرارت، تأثیر حرارت در افزایش (کاهش) حجم قطعات و مایعات را مشخص می‌نماید. با توجه به ثابت بودن جرم جسم در هر یک از حالت‌های مایع و جامد، چگالی اجسام به استثنای چند مورد خاص با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد.

۷-۱- انتقال حرارت

بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، اجسام مختلف در حالت طبیعی، حرارت خود را به محیط خارج (هوا یا جسم دیگر) انتقال می‌دهند. بدیهی است عمل انتقال حرارت در درون یک جسم نیز انجام می‌گیرد. اجسامی که می‌توانند حرارت خود را به سایر قسمت‌ها و یا اجسام دیگر انتقال دهند «هادی» و اجسامی که قادر به عمل انتقال حرارت نیستند «عایق» نامیده می‌شوند. بسیاری از عناصر و ترکیبات وجود دارند که در حد فاصل دو دسته فوق قرار گرفته و به «نیمه‌هادی‌ها» معروف می‌باشند.

حرارت یک جسم به سه طریق به محیط دیگر انتقال می‌یابد. هدایت، جابه‌جایی و تشعشع سه طریق انتقال حرارت می‌باشند که در فصل ۱ کتاب محاسبات فنی تخصصی تعریف و تشریح شده‌اند. در ریخته‌گری و به خصوص در کوره‌های صنعتی پدیده انتقال حرارت از هر سه طریق فوق انجام می‌گیرد، در حالی که در مورد انجماد فلز، عملاً قابلیت هدایت قالب عامل اصلی انتقال حرارت مذاب به خارج محسوب می‌گردد.

۸-۱- گران روی (ویسکوزیته)

اصطکاک درونی سیال را ویسکوزیته یا گران روی می‌گویند. به عنوان مثال بیرون ریختن آب از یک ظرف راحت‌تر از بیرون ریختن شربت است زیرا ویسکوزیته شربت بیش‌تر از آب است. در ریخته‌گری، «گران روی» فلزات مایع در طراحی سیستم‌های راهگامی و پرشدن قالب از اهمیت زیادی برخوردار است به طوری که در کارهای عملی به جای استفاده از شرایط «گران روی» که مبنای فیزیکی دارد از شرایط «سیالیت» یا روانی که مختص ریخته‌گری است استفاده می‌کنند.

۹-۱- تنش سطحی

در یک لایه از مایع نسبت نیروی سطحی (F) به طول مؤثر (L) که نیرو در آن اثر می‌کند را تنش سطحی گویند که از رابطه (۹-۱) به دست می‌آید؛ مانند قرار گرفتن سوزن در روی سطح آب.

$$\gamma = \frac{F}{L} \quad (9-1)$$

که در این رابطه:

F: نیرو بر حسب نیوتن (N)

L: طول بر حسب متر (m)

γ : تنش سطحی بر حسب نیوتن بر متر ($\frac{N}{m}$)

تنش سطحی فلزات مایع بر حسب ترکیب شیمیایی آن‌ها تغییر می‌کند. علاوه بر این، حضور فیلم (لایه‌ی) اکسیدی در شرایط ذوب، به دلیل جامد بودن، معمولاً موجب افزایش تنش سطحی می‌گردد. این پدیده ممکن است اشکالات متعددی را در انجماد قطعه بخصوص در سطح رویی و گوشه‌های تیز ایجاد کند که عملاً از مرغوبیت قطعه ریخته‌گری می‌کاهد.

۱۰-۱- فشار بخار

فلزات مایع مانند سایر مایعات حاوی گازهایی از اتم‌های خود هستند که معمولاً در شرایط ذوب و ریخته‌گری، فشار ناچیزی دارند و به همین دلیل در داخل مذاب باقی می‌مانند. فشار بخار در چنین حالتی با افزایش درجه حرارت زیاد می‌شود و در نزدیک نقطه جوش به حدود یک اتمسفر می‌رسد. معدودی از فلزات مانند منیزیم، روی، جیوه، کادمیم و آنتیموان در شرایط ذوب و در حالت مایع دارای فشار بخار زیادی هستند که امکان خروج قسمتی از آن‌ها را در شرایط ذوب تسهیل می‌کند. این فلزات به عنوان عنصر اصلی و یا به عنوان عنصر آلیاژی در ذوب و ریخته‌گری اشکالات متعددی را فراهم می‌آورند.

عموماً، فشار بخار اکثر فلزات در شرایط ذوب بسیار کم است ولی در مورد عناصری با فشار بخار زیاد حتی الامکان از اضافه کردن آن‌ها به مذاب به صورت خالص اجتناب می‌شود.

ذوب منیزیم به دلایل فوق به سهولت انجام نمی‌گیرد و برای ساختن آلیاژهایی که به منیزیم نیاز دارند از آلیاژهای این عنصر استفاده می‌شود. افزودن منیزیم برای ساخت انواع چدن با گرافیت کروی، فسفر جهت تصفیه مس، و روی در ساخت برنج‌ها از مهم‌ترین مواردی هستند که از نظر فشار

بخار مورد توجه قرار می‌گیرند. جدا از مطالب فوق بخار بسیاری از عناصر سمی بوده و باعث آلودگی محیط کار و کاهش شرایط مناسب محیط‌زیست می‌گردد.

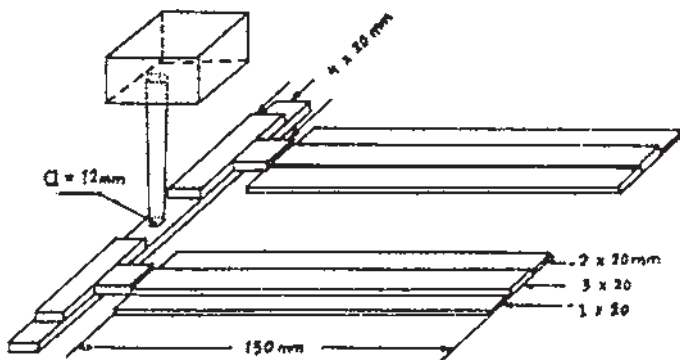
۱۱-۱- سیالیت (رو یا قابلیت پرکردن قالب)

کیفیت و توان مذاب در پرکردن قالب اهمیت فراوانی در ریخته‌گری دارد. بنابراین سیالیت عبارت است از قابلیت پرکردن تمام قسمت‌های قالب توسط آلیاژ مذاب. با توجه به تعریف، چنین استنباط می‌گردد که سیالیت مانند گران‌روی و هدایت حرارتی یک مقیاس فیزیکی نیست، بلکه نشان‌دهنده کیفیت مذاب می‌باشد که تحت شرایط گوناگون ریخته‌گری و قالب تغییر می‌کند و به همین دلیل در بسیاری موارد از آن بعنوان «سیالیت ریخته‌گری» یاد می‌شود.

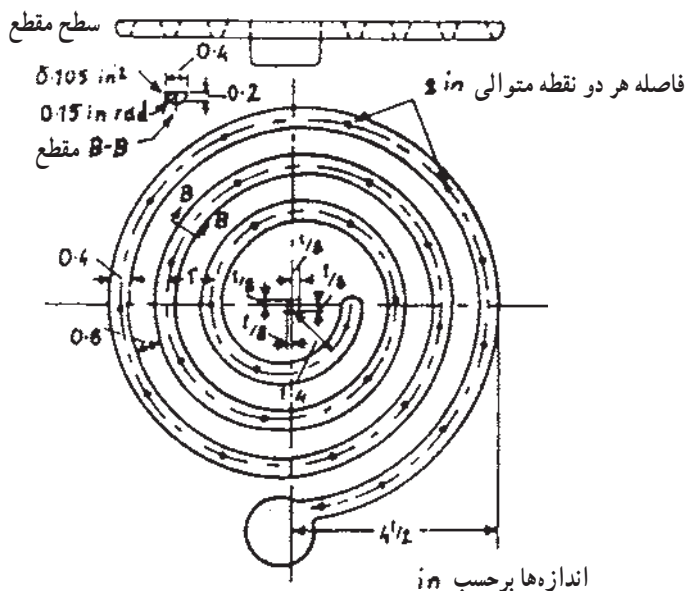
«گران‌روی» در تعیین سیالیت آلیاژها و فلزات از اهمیت خاصی برخوردار است و تأثیر فراوانی در سرعت مذاب دارد. ولی نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داده است که این خاصیت در پرکردن قالب عامل قطعی و نهایی محسوب نمی‌شود.

در فرآیند ریخته‌گری، انجاماد زود هنگام مذاب ناشی از انتقال حرارت سریع مذاب از قالب، شرایط حرارتی مذاب، چگونگی انجاماد، سرعت جنبشی مذاب و نیروی چسبندگی مذاب به جداره قالب، از اهمیت بیش‌تری برای پرکردن قالب برخوردار می‌باشند.

با تأکید بر این امر که سیالیت آلیاژ مذاب، یک عامل ریخته‌گری است و نه یک عامل فیزیکی، برای تعیین حدود سیالیت نیز آزمایشات گوناگونی انجام می‌شود که بتوان شرایط ریخته‌گری قطعات را مشخص کرد. آزمایش صفحه شکل (۳-۱) و آزمایش ماریچ شکل (۴-۱) نمونه‌هایی برای اندازه‌گیری سیالیت در شرایط خاص کارگاه می‌باشند. مدل ماریچ یا صفحه، درون موادی که برای ساخت قالب به کار می‌رود، قالب‌گیری می‌شوند. سپس فلز مذاب با سرعت و ارتفاع معین به داخل



شکل ۳-۱- آزمایش صفحه برای تعیین سیالیت



شکل ۴-۱- آزمایش ماریچ برای تعیین سیالیت

قالب ریخته می‌شود. نسبت طولی که مذاب در نمونه ماریچ طی می‌کند تا جامد شود و یا نسبت سطح پر شده در نمونه صفحه، می‌تواند سیالیت نسبی مذاب را در شرایط آزمایش تعیین کند.

۱-۱۱-۱ عوامل مؤثر در سیالیت

درجه حرارت: افزایش درجه حرارت مذاب مهم‌ترین عامل پر شدن قالب است. از طرف دیگر باید توجه داشت که درجه حرارت می‌تواند اثرات نامطلوبی در خواص دیگر داشته باشد. جذب گاز، اکسید شدن، و افزایش میزان انقباض در صورت افزایش درجه حرارت تشدید می‌گردند.

ترکیب شیمیایی: عناصر مختلفی که در یک آلیاژ حضور دارند به دلیل تأثیر در ساختمان مایع بر «گران روی» آلیاژ و به پیروی از آن بر سیالیت فلز تأثیر می‌گذارند. تأثیر عناصر مختلف در تغییرات سیالیت یک فلز به چگونگی رفتار دو عنصر بستگی دارد. در آلیاژهای یوتکتیک با نزدیک شدن به نقطه یوتکتیک سیالیت زیادتر می‌شود.

تنش سطحی: تنش سطحی در مورد کانال‌ها و گوشه‌هایی که به قطر 0.5° تا 5 میلی‌متر هستند، مانع از پر کردن کامل قالب می‌شود و لذا تأثیر پدیده تنش سطحی در سیالیت آلیاژ و به خصوص در طراحی مدل‌های آزمایشی همواره مورد توجه است.

مواد قالب: تأثیر مواد قالب و خاصیت هدایت حرارتی آن‌ها از نکاتی است که در چگونگی

پرشدن قالب اهمیت ویژه‌ای دارد. گرمای ویژه‌ی عناصر، ضریب هدایت حرارتی، فشردگی قالب و نوع پوشش مصرفی در قالب از عوامل مؤثر می‌باشند. بدین ترتیب قابلیت پرشدن قالب‌هایی که از مواد دیرگداز و عایق ساخته می‌شوند به مراتب بیش‌تر از قالب‌های فلزی می‌باشد.

تغییرات مقطع و شکل قالب، سیستم راهگاهی و ابعاد و ارتفاع اجزاء آن از نکات عمده دیگری است که در تعیین سیالیت مذاب مؤثر می‌باشند.

اثرات سطحی قالب: زبری سطح قالب با ایجاد نیروهای اصطکاکی، باعث کُندشدن جریان مذاب و در نتیجه کاهش سیالیت آن می‌گردد. در قالب‌های ماسه‌ای با انتخاب ماسه‌های دانه‌ریز، این اصطکاک تا حد زیادی از بین می‌رود. علاوه بر این آزمایشات گوناگون نشان داده است که در اثر استفاده از مواد پوشش قالب، سیالیت به مقدار زیادی افزایش پیدا می‌کند. مواد پوشش با ایجاد سطوح صیقلی و نیز کنترل مطلوب مشخصات ترشوندگی قالب در فصل مشترک فلز-قالب، موجب کاهش اصطکاک و تماس مذاب و قالب می‌شوند و ضمن کاهش قدرت سردکنندگی قالب، سیالیت مذاب را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند.

اثرات فشار هوا: همزمان با ورود مذاب به داخل قالب، هوای موجود در محفظه قالب که به سرعت انبساط می‌یابد، از آن خارج می‌گردد. در صورتی که این هوا نتواند از طریق منافذ موجود در قالب خارج شود، فشار آن موجب کُندشدن و توقف جریان مذاب و در نتیجه کاهش سیالیت آن می‌گردد.

در پایان، ذکر این نکته ضروری است که هر چند عوامل مذکور در سیالیت ریخته‌گری از اهمیت زیادی برخوردار هستند ولی کنترل آن‌ها بدون اعمال شرایط مناسب، از نظر دبی بارریزی و زمان بارریزی، اثرات مفید و مطلوبی را به دنبال نخواهد داشت؛ زیرا در صورت کم‌بودن دبی و یا طولانی شدن زمان بارریزی، سیالیت مذاب به طور وسیعی کاهش پیدا می‌کند.

پرسش

- ۱- حالات مختلف یک ماده را شرح دهید.
- ۲- نقطه‌ی ذوب و گرمای نهان گداز را توضیح دهید.
- ۳- گرمای ویژه را تعریف نمایید.
- ۴- تغییرات حجمی یک فلز را در مناطق مختلف شرح دهید.
- ۵- گران روی را تعریف کنید.
- ۶- سیالیت در ریخته‌گری به چه مفهومی است؟
- ۷- عوامل مؤثر در سیالیت را شرح دهید.
- ۸- مواد قالب چگونه بر سیالیت مذاب تأثیر می‌گذارند؟

عملیات کیفی

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

- ۱- گاز، منابع تولید گاز و عملیات گاززدایی را تشریح کند.
- ۲- آخال، منابع تولید آخال و آخال‌زدایی را شرح دهد.
- ۳- عملیات تلقیح را تشریح کند.

۲- عملیات کیفی

تعریف: بنا به تعریف، عملیات کیفی به مجموعه عملیاتی گفته می‌شود که در خلال ذوب و ریخته‌گری به منظور بهبود بخشیدن به خواص متالورژیکی، مکانیکی، فیزیکی و ریخته‌گری قطعات انجام می‌گیرد.

اهم این عملیات عبارتند از:

الف - عملیات گاززدایی

ب - عملیات آخال‌زدایی و ...

ج - عملیات تلقیح (جوانه‌زایی)

در این فصل، عملیات فوق، به طور جداگانه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲- گاز و عملیات گاززدایی

بی‌شک، وجود مک‌های گازی، یکی از مهم‌ترین عیب‌ها در قطعات ریخته‌گری آلیاژهای مختلف محسوب می‌گردد. عموماً مک‌ها در نتیجه محبوس شدن گاز در حین عملیات ریخته‌گری و انجماد به وجود می‌آید.

۱-۱-۲- واکنش گاز در مذاب

گازها با مذاب واکنش‌های متفاوتی دارند که با توجه به تأثیرشان در فلز مذاب، آن‌ها را به سه گروه تقسیم نموده‌اند.

الف - اثر شیمیایی: برخی از گازها، بر اثر تماس با فلز مذاب، با آن واکنش شیمیایی انجام می‌دهند. این واکنش‌ها منجر به تشکیل ترکیبات شیمیایی مانند اکسیدها، نیتروورها، سولفیدها، کربورها و غیره می‌شوند. این ترکیبات در فلز مذاب معمولاً به صورت ذرات ریز جامد و یا در بعضی موارد به صورت مذاب ظاهر می‌شوند. در این رابطه می‌توان به ترکیب جامد اکسید آلومینیم (Al_2O_3) در مذاب آلومینیم اشاره کرد. واکنش‌های شیمیایی در همین فصل، در قسمت ۲-۲ «آخال و آخال‌زدایی» مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ب- اثر فیزیکی (انحلال): تعدادی از گازها ممکن است در مذاب حل شوند. این گونه گازها معمولاً میل به ترکیب شیمیایی با مذاب ندارند و در مذاب به صورت اتمی انحلال می‌یابند. به عنوان مثال، می‌توان انحلال گاز هیدروژن در مذاب آلومینیم را ذکر کرد^۱.

ج - خنثی: بعضی از گازها با مذاب نه میل به ترکیب شیمیایی و نه اثر شیمیایی دارند. به این گروه از گازها، گازهای خنثی یا بی‌اثر می‌گویند. مانند گازهای هلیوم و یا نیتروژن در مذاب آلومینیم که خنثی می‌باشند. از این نوع گازها، همان‌گونه که بعداً ملاحظه خواهید کرد، به منظور گاززدایی مذاب استفاده می‌شود.

۲-۱-۲- منابع تولید گاز در مذاب

منابع تولید گاز در مذاب عبارتند از:

الف - هوای محیط

ب - سوخت و محصولات احتراق

ج - مواد نسوز

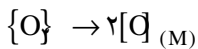
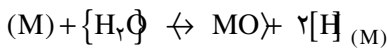
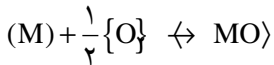
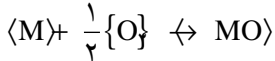
د - وسایل و ابزارهای ذوب

ه - مواد شارژ

و - مواد قالب و ماهیچه

۱- باید توجه داشت که برخی از گازهای مرکب، هم اثر شیمیایی و هم اثر شیمیایی - فیزیکی بر مذاب دارند. مانند بخار آب که منجر به تشکیل اکسید و نیز انحلال گاز هیدروژن در مذاب می‌شود.

الف — هوای محیط: وجود گازهایی مانند هیدروژن، اکسیژن، ازت و بخار آب در هوای محیط ذوب، با انجام واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی موجب تلفات عناصر آلیاژی و تشکیل مواد ترکیبات ناخواسته و حضور آن‌ها در مذاب می‌گردد. شکل کلی این واکنش‌ها به صورت زیر است:



علامت‌های $\langle \rangle$ ، $()$ و $\{ \}$ به ترتیب نشانگر حالت‌های جامد، مایع و گاز از عناصر و مواد

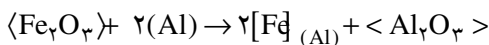
می‌باشند. M ، علامت عمومی برای فلز است و علامت $[]_{(M)}$ نیز نشان‌دهنده‌ی حضور عنصر مربوط،

به شکل محلول در مذاب است.

ب — سوخت و محصولات احتراق: انواع و اقسام مواد آلی حاوی کربن و هیدروژن، نوعی سوخت به‌شمار می‌آیند. سوخت‌های معمولی، عموماً حاوی ترکیبات هیدروکربوره به فرمول عمومی $C_m H_n$ همراه با رطوبت، مقادیر کمی گوگرد، خاکستر (در مورد سوخت‌های مایع و گازی ناچیز است) و نیز ترکیبات ئیدروژن سولفور هستند. محصولات احتراق انواع سوخت‌ها، ترکیباتی نظیر SO_2 ، H_2O ، CO ، CO_2 را شامل می‌شود که ممکن است نسبت به مذاب بی‌اثر نباشند و موجب تلفات ذوب و یا افزودن مواد اضافی در مذاب گردند.

ج — نسوزها: برای ذوب و نگهداری مذاب فلزات و آلیاژها، از مواد دیرگداز یا نسوز استفاده می‌شود. از ویژگی‌های مهم این مواد که معمولاً در کوره‌ها، نگه‌دارنده‌ها، پاتیل‌ها و بوت‌ها به کار گرفته می‌شوند، دیرگدازی بالا، عایق حرارتی خوب و بی‌اثر بودن نسبت به مذاب و سرباره را می‌توان نام برد. وجود مواد ناخالصی در نسوزها، ضمن کاهش دادن نقطه‌ی دیرگدازی، موجب واکنش شیمیایی و نیز داخل شدن مکانیکی آن‌ها در مذاب می‌گردد. همچنین خستگی پاتیل، حرکت و برخورد مذاب با جداره‌ی کوره و بالاخره سایش و برخوردهای ضربه‌ای مواد شارژ، از عوامل دیگری هستند که دخول مکانیکی مواد نسوز به درون مذاب و در نتیجه آلودگی آن را به دنبال دارند.

د - وسایل و ابزارهای ذوب: یکی دیگر از منابع آلودگی مذاب، به هنگام ذوب فلزات و آلیاژها، وسایل و ابزارهایی هستند که به منظور افزودن عناصر و مواد مورد نیاز به مذاب، به هم زدن و یکنواخت کردن مذاب و نمونه برداری و ... به کار می روند. به عنوان مثال، جذب شدن آهن از وسایل آهنی توسط مذاب آلومینیم و نیز تلف شدن مذاب در اثر واکنش شیمیایی آن با مواد اکسیدی را می توان نام برد:



ه - مواد بار (شارژ): مواد اصلی برای بار یا شارژ یک کوره، با توجه به جنبه های متالورژیکی و اقتصادی، معمولاً شامل شمش های اولیه و ثانویه، برگشتی ها و قراضه ها می باشد. شمش های اولیه موادی هستند که مستقیماً از کوره های ذوب مادر و یا الکترولیز اولیه، تهیه می گردند. این شمش ها ممکن است با درجه خلوصی برابر ۹۹ تا ۹۹/۹ درصد (در مورد اکثر فلزات غیر آهنی) و یا به صورت ناخالص به همراه چند عنصر (در مورد چدن ها) تولید شوند. در هر حال، وجود ناخالصی در این شمش ها می تواند محدودیت هایی را از نظر ترکیب شیمیایی نهایی آلیاژ مذاب به وجود آورد. به عنوان مثال، شمش های محصول کوره ی بلند که به آهن خام موسوم هستند، علاوه بر داشتن عناصری مانند کربن، سیلیسیم و منگنز، دارای مقادیری فسفر و گوگرد نیز می باشند. با توجه به اثرات نامطلوب فسفر و گوگرد در خواص و مشخصات قطعه ریختگی، حذف آن ها قبل از مذاب ریزی امری ضروری است.

شمش های ثانویه یا آلیاژی، موادی هستند که با اهداف خاص و از پیش مشخص شده تهیه می گردند. این شمش ها ممکن است با عملیات الکترولیز مجدد و یا تصفیه، به صورت موادی با درجه خلوص بالاتر تهیه شوند و یا آن که بر اساس ترکیب شیمیایی آلیاژهای متداول در مصارف صنعتی تهیه گردند و بدون نیاز به آلیاژ سازی کامل مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، کاربرد این شمش ها باید بر اساس ترکیب شیمیایی مورد نظر صورت گیرد؛ قراضه ها، معمولاً شامل زایده ها و اضافات (دورریز) و قطعات فرسوده می باشند که بنابر دلایل اقتصادی در ریخته گری به مصرف می رسند. با توجه به این که این مواد، عموماً از بقایای وسایل و تجهیزات متنوع هستند و شناخت دقیقی نسبت به ماهیت آن ها وجود ندارد، از این رو کنترل ترکیب شیمیایی آن ها بسیار دشوار است. و استفاده صحیح و مطلوب از آن ها، مستلزم اطلاع کامل بر عناصر آلیاژی و نیز نمونه برداری از مذاب می باشد. علاوه بر این، معمولاً این مواد با ترکیبات و مواد ناخواسته ای از قبیل مواد اکسیدی (قطعات آهنی زنگ زده)، رطوبت، مواد روغنی و غیره همراه هستند که برای جلوگیری از

آلودگی مذاب، برطرف کردن آن‌ها ضروری است. زائده‌های قطعات ریختگی از قبیل راه‌گاه، تغذیه و قطعات معیوب در یک واحد تولیدی به برگشتی موسوم می‌باشد. تفاوت اساسی این مواد با قراضه‌ها، مشخص بودن ترکیب شیمیایی و نحوه‌ی تولید آن‌ها در واحد مربوط می‌باشد. چنان‌چه این مواد در اندازه و شکل‌های مناسب وجود داشته باشد، می‌تواند همانند شمش‌های آلیاژی مورد استفاده قرار گیرد. در هر حال، برگشتی‌ها برای واحد تولیدی دیگر و در صورت عدم شناخت ترکیب شیمیایی و شرایط تولید آن‌ها، قراضه محسوب می‌شوند و می‌توانند کنترل ترکیب شیمیایی مذاب را دچار اشکال نمایند. برگشتی‌ها، در صورت همراه بودن با ماسه و مواد و ترکیبات ناخواسته، سبب آلودگی مذاب می‌گردند.

سوفاره یا براده نیز از انواع قراضه‌ها می‌باشد که در اثر تراشکاری قطعات ریختگی یا نوردی به دست می‌آید. در این ماده، که به‌عنوان یک ماده اولیه‌ی ارزان در صنایع ریخته‌گری به مصرف می‌رسد، نسبت سطح به حجم بسیار بالاست. از این رو این مواد به هنگام ذوب شدیداً واکنش‌پذیر هستند و با تولید مواد ناخواسته اکسیدی، مذاب را آلوده می‌سازند. معمولاً به منظور استفاده‌ی مطلوب از براده‌ها، بایستی آن‌ها را پس از شست‌وشو با محلول رقیق سود و خشک کردن به‌صورت خسته (بریکت)های فشرده‌ای درآورد. در هر حال استفاده از براده‌ها به‌عنوان بار جامد اولیه هیچ‌گاه توصیه نمی‌گردد؛ بلکه روش درست و مناسب، غوطه‌ور نمودن آن‌ها در زیر لایه‌های مذاب می‌باشد.

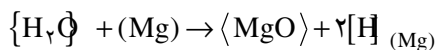
بدین ترتیب مشخص می‌گردد کنترل ترکیب شیمیایی مذاب، با توجه به مجموعه‌ی واکنش‌های ذکرشده از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین دلیل با کنترل فرآیند ذوب و نیز مراقبت‌های لازم در زمینه‌های انتخاب مواد، وسایل و تجهیزات و تکنولوژی ذوب، ترکیب شیمیایی مذاب را باید به نحو مطلوبی کنترل نمود.

در جدول ۱-۲ درصد تلفات عناصر مختلف تحت شرایط نوع شارژ و کوره، درج شده است.

جدول ۱-۲- درصد تلفات عناصر مختلف تحت شرایط نوع شارژ و کوره

| عنصر | شمش های اولیه | | | برگشتی ها و قراضه | | |
|----------|---------------|--------------|-------------|-------------------|--------------|-------------|
| | کوره الکتريکي | کوره شعله ای | کوره بته ای | کوره الکتريکي | کوره شعله ای | کوره بته ای |
| آلومینیم | ۱-۱/۲ | ۱-۲ | ۱-۱/۵ | ۱-۲ | ۲/۵-۳ | ۱/۵-۲ |
| منیزیم | ۲-۳ | ۳-۵ | ۲/۵-۳/۵ | ۳-۵ | ۳-۱۰ | ۳-۶ |
| برلیوم | ۲-۳ | ۳-۵ | ۲/۵-۳/۵ | ۳-۵ | ۵-۱۰ | ۳-۶ |
| سدیم | ۲-۳ | ۳-۵ | ۲/۵-۳/۵ | ۳-۵ | ۵-۱۰ | ۴-۷ |
| روی | ۱-۳ | ۲-۴ | ۱-۳ | ۲-۳ | ۳-۵ | ۲-۴ |
| منگنز | ۰/۵ | ۱-۲ | ۰/۵-۱ | ۱-۲ | ۲-۳ | ۱-۲ |
| قلع | ۰/۵ | ۱-۱/۵ | ۰/۵-۱ | ۱-۱/۵ | ۱/۵-۲ | ۱/۵-۲ |
| آهن | ۰/۵ | ۰/۵-۱ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۵-۱ | ۰/۵ |
| نیکل | ۰/۵ | ۰/۵-۱ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۵-۱ | ۰/۵ |
| سیلیسیم | ۰/۵ | ۱-۱/۵ | ۰/۵-۱ | ۱-۱/۵ | ۱/۵-۲ | ۱-۲ |
| مس | ۰/۵ | ۱-۲ | ۰/۵-۱ | ۱-۲ | ۲-۳ | ۱-۲ |
| سرب | ۰/۵-۲ | ۱-۲ | ۱-۲ | ۱-۲ | ۱/۵-۲/۵ | ۱-۲ |

و - قالب: مواد قالب علاوه بر ورود ناخواسته به داخل مذاب، ممکن است با انجام واکنش های شیمیایی و شیمی - فیزیکی با مذاب موجب آلوده شدن آن و در نتیجه ایجاد مواد و ترکیبات ناخواسته در قطعه ریختگی گردد. به عنوان مثال رطوبت در مواد قالب می تواند به دو صورت شیمیایی و شیمی - فیزیکی با مذاب واکنش کرده و ضایعاتی سطحی یا درونی در قطعه به وجود آورد. این واکنش در مورد مذاب منیزیم، به صورت زیر است:

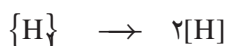


دراثر انجماد، هیدروژن محلول از انحلال خارج می شود و در نتیجه حفره هایی در لایه های سطحی و یا درون قطعه تشکیل می گردد. علاوه بر رطوبت، هر گونه مواد قابل تبخیر در قالب نیز ممکن است بدین صورت عمل نماید. واکنش میان اکسید آهن موجود در مذاب فولاد (چدن) و سیلیس قالب یکی دیگر از این نمونه ها می باشد که مهم ترین عامل ماسه جوش^۱ و هم جوش شدن ماسه به سطح قطعه ریختگی فولادی است.

۱- Burn in

۳-۱-۲- انحلال گازها در مذاب

مهمترین گازهای محلول در مذاب عبارتند از: SO_2 ، CO ، CO_2 ، H_2O ، H_2 ، O_2 ، N_2 و... که در این میان هیدروژن به دلیل داشتن قطر اتمی کوچک، در اکثر فلزات و آلیاژها بیشترین انحلال را دارد. به همین دلیل همواره مورد بحث و بررسی محققین قرار گرفته است. به طور کلی گازها برای انحلال در مذاب باید از حالت مولکولی خارج شوند و به حالت اتمی در آیند. یعنی:



اتمی \rightarrow مولکولی

انحلال گازها در فلزات به عوامل مختلفی بستگی دارد که مهمترین آن‌ها عبارتند از:

الف - درجه‌ی حرارت: انحلال گازها در فلزات معمولاً با بالا رفتن درجه‌ی حرارت افزایش می‌یابد. جدول ۲-۲ رابطه‌ی انحلال گاز هیدروژن با درجه‌ی حرارت را در فلز آلومینیم نشان می‌دهد.

جدول ۲-۲- اثر درجه‌ی حرارت بر انحلال هیدروژن در آلومینیم

| مقدار هیدروژن حل شده CC/۱۰۰ gr | درجه‌ی حرارت برحسب سانتی‌گراد | حالت |
|-----------------------------------|----------------------------------|-----------|
| 1×10^{-7} | ۰ | حالت جامد |
| 1×10^{-3} | ۳۰۰ | حالت جامد |
| 5×10^{-3} | ۴۰۰ | حالت جامد |
| 12×10^{-3} | ۵۰۰ | حالت جامد |
| 26×10^{-3} | ۶۰۰ | حالت جامد |
| 36×10^{-3} | ۶۶۰ | حالت جامد |
| 69×10^{-2} | ۶۶۰ | حالت مذاب |
| 92×10^{-2} | ۷۰۰ | حالت مذاب |
| ۱/۰۷ | ۷۲۵ | حالت مذاب |
| ۱/۲۳ | ۷۵۰ | حالت مذاب |
| ۱/۶۷ | ۸۰۰ | حالت مذاب |
| ۲/۱۵ | ۸۵۰ | حالت مذاب |

ب – فشار: با افزایش فشار، انحلال گاز در مذاب غالباً بیشتر می‌شود.
 ج – عناصر آلیازی: عناصر آلیازی اثر متفاوتی بر انحلال گاز در فلزات (حالت جامد و مذاب) دارند. برخی عناصر آلیازی انحلال گاز را افزایش و گروهی دیگر کاهش می‌دهند. جدول ۲-۳ تاثیر عناصر آلیازی را بر انحلال هیدروژن در آلومینیم نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳- قابلیت انحلال هیدروژن در آلومینیم و چند آلیاژ آن

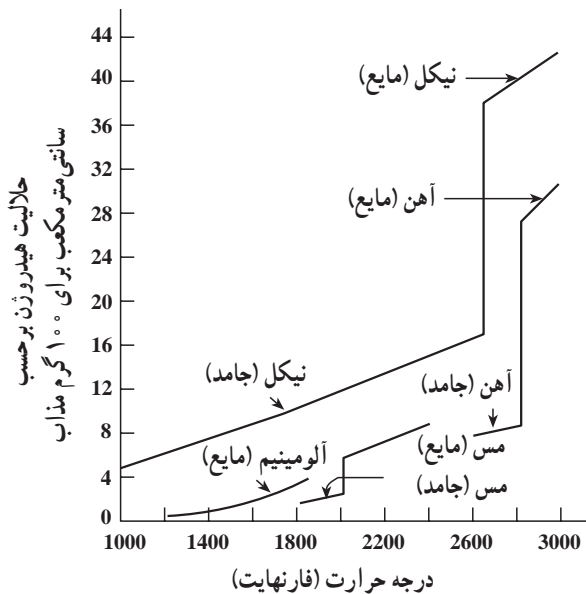
| قابلیت انحلال PPM | آلیاژ |
|----------------------|--|
| ۱/۲ | آلومینیم خالص |
| ۰/۸۱ | آلیاژ آلومینیم با ۷ درصد سیلیسیم و ۳ درصد منیزیم |
| ۰/۸۸ | آلیاژ آلومینیم با ۴/۵ درصد مس |
| ۰/۶۷ | آلیاژ آلومینیم با ۱۶ درصد سیلیسیم و ۳/۵ درصد مس |
| ۱/۱۵ | آلیاژ آلومینیم با ۴ درصد منیزیم و ۲ درصد سیلیسیم |

۴-۱-۲- چگونگی ایجاد مک‌های گازی

همان‌گونه که در جدول ۲-۲ مشاهده می‌شود؛ گازها درحالت مذاب نسبت به حالت جامد انحلال بیشتری در فلزات دارند. با کاهش درجه حرارت، گازهای حل شده در مذاب (به صورت اتمی) به تدریج از حالت اتمی در مذاب خارج می‌شوند و به صورت مولکولی (حباب) درمی‌آیند. در این صورت گازهای مولکولی آرام آرام از سطح مذاب خارج می‌شوند. سرعت خروج حباب‌های گازی ایجاد شده به عوامل مختلفی بستگی دارد که از آن جمله گرانیروی مذاب، اندازه‌ی حباب و شکل و عمق پاتیل را می‌توان نام برد. بدیهی است با کاهش درجه‌ی حرارت، گرانیروی مذاب افزایش می‌یابد. در نتیجه سرعت خروج حباب‌های گازی به تدریج کاهش می‌یابد. با شروع انجماد مذاب دو پدیده مهم در تشکیل حباب‌های گازی مؤثرند؛ که به دلیل اهمیت موضوع به طور جداگانه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند:

الف- خروج گازها از حلالیت: در بسیاری از فلزات و آلیاژها اختلاف حلالیت گاز در حالت جامد و مذاب بسیار زیاد است (شکل ۱-۲).

بدیهی است در هنگام انجماد، گازهای زیادی از حالت اتمی (انحلال) به حالت مولکولی تبدیل می‌گردند به گونه‌ای که ناگهان مقدار این تحول به چندین برابر افزایش می‌یابد. به عبارت ساده‌تر در یک فاصله‌ی زمانی کوتاه، مقادیر زیادی از گازهای حل شده به حباب‌های گازی تبدیل می‌شوند.

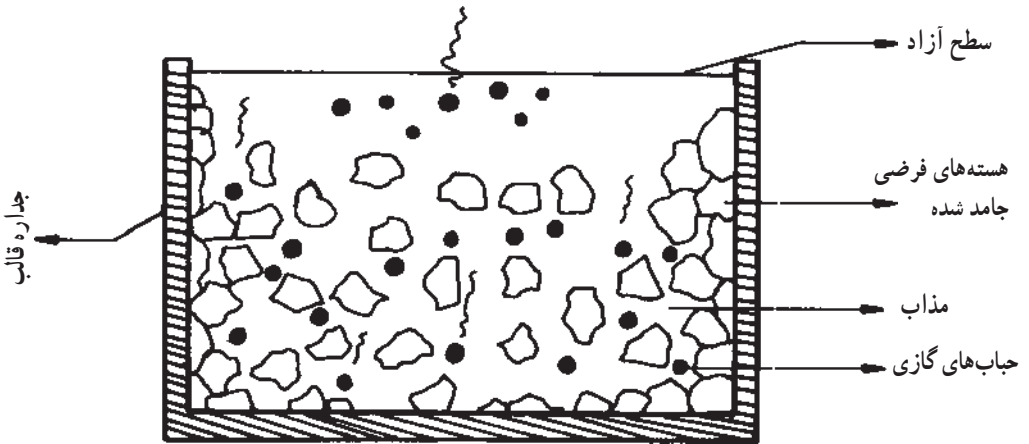


شکل ۱-۲- تأثیر درجه حرارت در حلالیت هیدروژن

ب- محبوس شدن حباب‌ها: اگر فرض شود که حباب‌های گازی ایجاد شده در هنگام انجماد (دامنه انجماد) بتوانند به گونه‌ای از مذاب خارج گردند؛ در این صورت مشکلی به نام مک و تخلخل گازی در قطعات ریختگی وجود نخواهد داشت. اما در عمل به دلیل افزایش گرانشی مذاب و نیز وجود هسته‌های جامد، حرکت حباب‌های گازی به‌طور جدی با مشکل مواجه می‌شوند. به عبارت دیگر حباب‌های گازی در لابلای ذرات جامد محبوس می‌شوند. شکل ۲-۲ به‌طور شماتیک این موضوع را نشان می‌دهد.

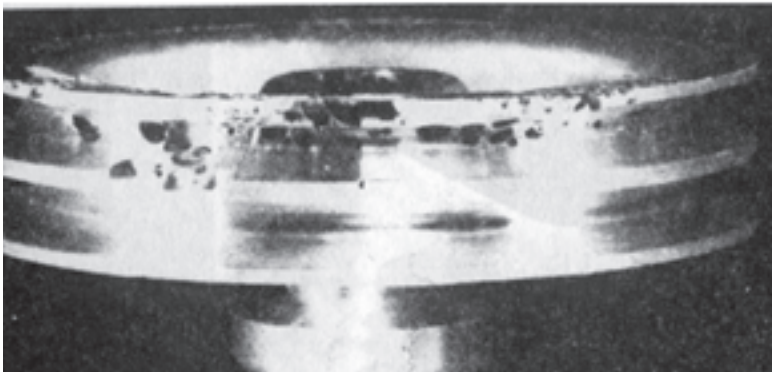
بدیهی است که اولاً حجم زیاد حباب‌های گازی ایجاد شده در یک فاصله‌ی زمانی کم و ثانیاً

موانع ایجاد شده در مسیر خروج این حباب‌ها به عنوان علت اصلی ایجاد مک‌های گازی در قطعات ریختگی تلقی می‌گردد.



شکل ۲-۲- نمای شماتیک از محبوس شدن حباب‌های گازی در لابلای ذرات جامد ایجاد شده

شکل ۲-۳- چگونگی شکل‌گیری مک‌های گازی ناشی از محبوس شدن حباب‌های گازی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳- آلیاژ آلومینیم، قالب ماسه‌ای تر

۵-۱-۲- عوامل مؤثر در میزان مک‌های گازی

میزان مک‌های ایجاد شده در قطعه‌های ریختگی به عوامل زیادی بستگی دارد که مهمترین آن‌ها عبارتند از:

الف - مقدار اختلاف حلالیت گاز در حالت جامد و مذاب: کاملاً واضح است هرچه این اختلاف بیشتر باشد، مک‌های گازی بیشتری در قطعه‌ها ایجاد می‌شود. به عنوان مثال مقدار مک‌های گازی ناشی از هیدروژن در آلیاژهای آلومینیم به مراتب بیشتر از آلیاژهای مس است.

ب - نوع انجماد: مشکل محبوس شدن حباب‌های گازی در آلیاژهای با انجماد خمیری نسبت به آلیاژهای با انجماد پوسته‌ای^۱ بحرانی تر است. در نتیجه مک‌های گازی بیشتری در قطعه‌های ریختگی ایجاد می‌شود.

ج - سرعت سرد کردن مذاب: تأثیر سرعت سرد کردن مذاب بر مقدار مک‌های گازی بدین شرح است:

- در سرعت‌های بسیار کم به دلیل این که حباب‌های گازی ایجاد شده امکان خروج از مذاب را می‌یابند مک‌های گازی کاهش می‌یابد.

البته این میزان سرعت سرد کردن معمولاً غیر عملی است و در شرایط معمول ریخته‌گری حاصل نمی‌شود.

- در سرعت‌های بالا (مانند روش‌های ریژه و آبگرد) گازها به صورت محلول فوق اشباع در مذاب باقی می‌مانند و از خروج آن‌ها از حلالیت ممانعت می‌شود. در نتیجه باعث کاهش مک‌های گازی در قطعه‌های ریختگی می‌شود.

د - آخال‌ها (ناخالصی‌ها): وجود اکسیدها و دیگر ناخالصی‌ها (آخال‌ها) در مذاب باعث افزایش مک‌های گازی در قطعه‌های ریختگی می‌شود. معمولاً در اطراف آخال‌ها، ریز مک‌های گازی زیادی مشاهده می‌شود.

در تشکیل حباب‌های گازی حضور مقدار کمی آخال و سرباره در مذاب، بسیار مؤثر می‌باشد. به طور کلی تولید قطعات سالم عاری از مک منوط به حذف آخال‌ها می‌باشد.

ه - عناصر آلیاژی: عناصر آلیاژی علاوه بر این که در میزان حلالیت گاز در مذاب تأثیر دارد، می‌توانند در مقدار مک‌های گازی نیز اثر بگذارد. از طرف دیگر میزان تخلخل با افزایش دامنه‌ی

۱- در مورد انجماد خمیری و پوسته‌ای در فصل چهارم بحث شده است.

انجماد افزایش می‌یابد.

و — سیستم راهگاهی: سیستم راهگاهی صحیح در کاهش مقدار مک‌های گازی نقش مهمی ایفا می‌کند. به عبارت دیگر طراحی غلط سیستم راهگاهی باعث حبس هوا و در نتیجه ایجاد مک‌های درشت می‌شود.

ز — شکل، اندازه و وزن قطعه: مقدار مک و تخلخل در قطعه‌های بزرگ و پیچیده نسبت به قطعه‌های ساده و کوچک بیشتر است.

۶-۱-۲ — روش‌های اندازه‌گیری گاز در مذاب

امروزه به دلیل تأثیر زیادی که وجود مک‌های گازی در کیفیت قطعه‌های ریخته‌گری دارند، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری گاز در مذاب وجود دارد. بعضی از این روش‌ها به این قرار است:

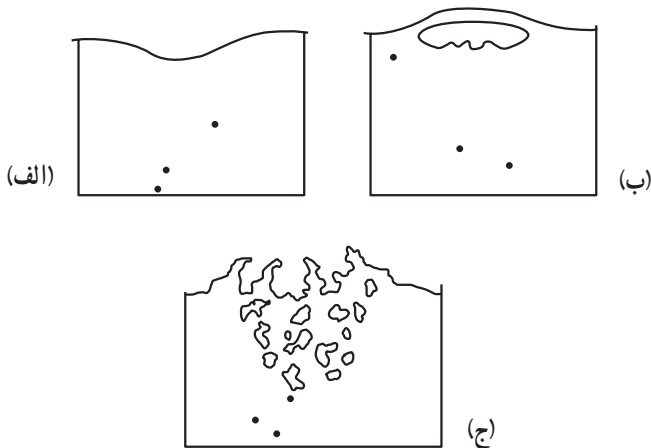
— رادیوگرافی قطعات ریخته‌گری شده با اشعه‌ی ایکس^۱: این روش به طور گسترده در صنایع برای کنترل کیفی غیر مخرب قطعه‌های ریخته‌گری به کار می‌رود. در این روش مک‌های ریز که ناشی از گاز یا انقباض پراکنده می‌باشد، در روی فیلم عکاسی به وسیله اشعه‌ی X به صورت نقاط تیره دیده می‌شود.

— مشاهده‌ی سطح نمونه قطعه‌ی ریخته‌شده: این روش که بسیار عملی و کاربردی می‌باشد در کارخانجات ریخته‌گری بویژه ریخته‌گری آلومینیم مورد استفاده زیادی دارد. برای این آزمایش قالب‌های استوانه‌ای از ماسه خشک به قطر ۷/۵ تا ۹ سانتی‌متر و ارتفاع ۷/۵ تا ۹ سانتی‌متر تهیه می‌شود.

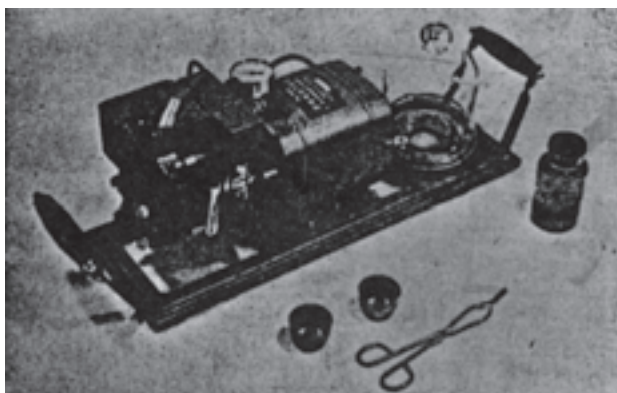
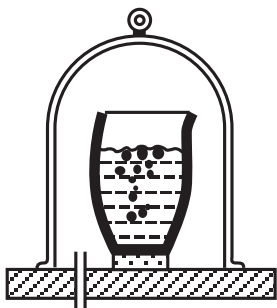
هنگامی که مذاب آماده‌ی بارریزی می‌شود به منظور مشخص شدن وجود یا عدم وجود گاز در مذاب، مقداری از آن، در قالب‌های استوانه‌ای تهیه شده، ریخته می‌شود. با مشاهده‌ی سطح نمونه منجمد شده، می‌توان به وجود گاز در مذاب پی برد. شکل ۴-۲ به‌طور شماتیک سطح نمونه را در این آزمایش نشان می‌دهد. در صورتی که سطح نمونه مانند شکل الف-۴-۲ فرو رفته و نیز صاف و براق باشد نشانگر عدم وجود گاز در مذاب است. اگر سطح نمونه مانند شکل ب-۴-۲ بدون فرورفتگی باشد در این حالت مقداری گاز در مذاب موجود است. بالاخره چنان‌چه سطح نمونه مانند شکل ج-۴-۲ برآمده (پف کرده) و خشن باشد، در این حالت مقدار زیادی گاز در مذاب وجود دارد.

— انجماد نمونه تحت شرایط خلأ: در این روش مقادیر کمی مذاب (معمولاً چند صد گرم) تحت شرایط خلأ نسبی منجمد می‌شود. حباب‌های شکسته شده در سطح نمونه و تعداد و اندازه‌ی

مک‌ها در نمونه‌ی منجمد شده، مشخص‌کننده مقدار تقریبی گاز موجود در مذاب می‌باشد. شکل ۲-۵ دستگاه اندازه‌گیری گاز تحت شرایط خلأ را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴- شماتیک نمونه‌های استوانه‌ای برای آزمایش وجود گاز



شکل ۲-۵- اندازه‌گیری گاز تحت شرایط خلأ

— آزمایش وزن مخصوص: با یک آزمایش ساده به کمک وزن مخصوص می‌توان به طور کیفی به وجود گاز در فلز پی برد. در این روش وزن مخصوص نمونه با وزن مخصوص واقعی آلیاژ مقایسه می‌شود. درعین حال می‌توان با کمک رابطه‌ی تقریبی ساده مقدار تخلخل را محاسبه کرد.

$$\%V = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \times 100 \quad (2-1)$$

که در این رابطه :

ρ_0 : وزن مخصوص آلیاژ سالم

ρ : وزن مخصوص نمونه

V : درصد تخلخل

— روش آلتراسونیک^۱: استفاده از امواج صوت برای تعیین عیوب داخلی فلزات یک روش بسیار قدیمی می باشد بدین صورت که اگر به یک قطعه فلز با چکش ضربه وارد شود امواج صوتی مشخصی در فلز ایجاد می گردد که شدت آن در اثر وجود عیوب داخلی تحت تأثیر قرار می گیرد با این روش عیوب بزرگ را می توان مشخص نمود.

روش جدیدتر استفاده از امواج ماوراء صوت با فرکانس ۱ تا ۵ میلیون هرتز می باشد که آلتراسونیک نام دارد. آلتراسونیک یک روش تست غیر مخرب سریع و قابل اعتماد است که برای شناسایی و تعیین اندازه عیوب داخلی فلزات به کار می رود که این روش بیش تر در صنعت مورد استفاده می باشد.

۷-۱-۲- روش های جلوگیری از مک های گازی

کاملاً واضح است که تولید قطعات عاری از مک، در درجه اول مستلزم پیش گیری از ورود گاز به داخل مذاب و همچنین جلوگیری از ایجاد مک های گازی در قطعات می باشد، برای پیش گیری روش های مختلفی وجود دارد که این روش ها عبارتند از :

- ۱- استفاده از مواد شارژ و کمک ذوب تمیز و عاری از رطوبت
- ۲- کنترل احتراق به جهت ممانعت از احتراق ناقص و افزایش گازهایی نظیر H_2 ، CO ، CO_2 ، H_2O و SO_2 در اتمسفر کوره ذوب.
- ۳- ممانعت از طولانی شدن زمان ذوب و ننگه داری مذاب برای جلوگیری از تماس زیاد گاز با مذاب.

۴- کاهش سطح مذاب : میزان حل شدن گاز رابطه مستقیم با سطح مذاب دارد یعنی هرچه سطح تماس مذاب با اتمسفر کم تر باشد مقدار حل شدن گازها کم تر خواهد شد.

۵- استفاده از مواد پوششی در سرباره به منظور جلوگیری از تماس مذاب با محیط اطراف.

۶- کنترل درجه ی حرارت مذاب به منظور جلوگیری از افزایش حلالیت گاز در مذاب.

۷- جلوگیری از تلاطم مذاب برای ممانعت از محبوس شدن گاز در حین بارریزی.

۸- طراحی سیستم‌های راهگامی مطلوب برای هدایت گازهای موجود در مذاب به محل مناسب.

۸-۱-۲- روش‌های گاززدایی

— روش‌های گاززدایی با استفاده از کاهش فشار خارجی: با توجه به رابطه فشار خارجی با قابلیت انحلال گاز در مذاب (قانون سیورت)، با کاهش فشار خارجی امکان تشکیل حباب‌های گازی در فشارهای کم‌تر به وجود می‌آید. به عبارت دیگر با کاهش فشار خارجی سرعت خارج شدن گازها از حلالیت و تبدیل به حباب‌های گازی (تبدیل از حالت اتمی به مولکولی) افزایش می‌یابد. مکانیزم روش گاززدایی تحت شرایط خلأ براساس موارد فوق می‌باشد. اگر مذاب تحت شرایط خلأ قرار گیرد هیدروژن به شکل مولکولی آزاد می‌گردد. در این صورت گاز به شکل حباب‌های فرار درمی‌آید و به سطح مذاب صعود می‌کند. سرعت خروج هیدروژن به درجه‌ی خلأ بستگی دارد.

در حال حاضر روش گاززدایی در خلأ برای تولید قطعه‌هایی با کیفیت بالا و با تکنولوژی‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به طور کلی این روش برای گاززدایی آلیاژهای با نقطه ذوب پایین کاربرد بیشتری دارد. (برای آلیاژهای با نقطه‌ی ذوب بالا این تجهیزات بسیار گران می‌باشد) همچنین در مورد آلیاژهایی که فشار بخار آنها بالاست به دلیل تلفات زیاد مذاب، این روش به کار نمی‌رود. محدودیت‌های دیگر این روش، طولانی شدن زمان گاززدایی و کاهش درجه حرارت مذاب می‌باشد.

— روش‌های گاززدایی با استفاده از افزایش فشار داخلی در مذاب: تأثیر افزایش فشار درونی مذاب به قرار زیر است:

الف- تسهیل در خارج شدن گاز از حالت انحلال (اتمی به مولکولی)

ب- جذب حباب‌های گازی ایجاد شده به وسیله‌ی گازهای تزریق شده به داخل مذاب.

ج- افزایش سرعت خارج شدن گازها از مذاب.

روش افزایش فشار درونی مذاب از مهمترین و یرمصرف‌ترین روش‌های گاززدایی می‌باشد که خود به چندین روش مختلف اصلی تقسیم می‌گردد:

الف- استفاده از گازهای بی اثر: در این روش گازهای بی اثر به شکل حباب‌های هوا از پایین بوته یا پاتیل به داخل مذاب تزریق می‌شوند. در ابتدا فشار جزئی گازهای محلول (مانند H) در داخل حباب گاز بی اثر صفر است ولی در مسیر حرکت مقداری گاز را به داخل خود جذب می‌کند.

این فرآیند با تولید حباب‌های زیاد ادامه پیدا می‌کند و به تدریج مقدار گاز محلول در مذاب کم می‌شود. باید توجه نمود که از نظر عملی غیرممکن است بتوان تمام گازها را از مذاب خارج نمود. گازهای بی‌اثر نسبت به مذاب عموماً گازهایی نظیر آرگن و هلیوم هستند که برای تمامی فلزات و آلیاژها بی‌اثر می‌باشند. به دلیل گرانی این گازها معمولاً می‌توان از گازهای ارزان‌تر که نسبت به مذاب خاصی بی‌اثر هستند استفاده کرد. به عنوان مثال گاز نیتروژن در شرایط کلی برای آلومینیم و اکثر آلیاژهای آن بی‌اثر محسوب می‌شود. درحالی‌که این گاز برای چدن نه تنها بی‌اثر نیست بلکه به‌عنوان یک گاز محلول در مذاب می‌باشد که باید آن را از مذاب خارج نمود. جدول ۴-۲ مهمترین گاززدها را برای آلیاژهای مختلف نشان می‌دهد.

به‌طور خلاصه ازت برای آلومینیم و آلیاژهای آن، گاز بی‌اثر است. اگرچه برای برخی آلیاژهای آلومینیم بی‌اثر محسوب نمی‌شود.

برای مس و آلیاژهای آن، گازهای ازت و گاز کربنیک به کار می‌رود. برای فولادها گاز کربنیک و اکسید کربن به کار می‌رود.

مهم‌ترین عواملی که در افزایش راندمان گاززدایی با استفاده از گازها مؤثر است، عبارتند از:

۱- حباب‌های گازی دمیده شده به داخل مذاب باید حتی‌الامکان کوچک باشند؛ زیرا حباب‌های درشت با سرعت بیشتری به طرف سطح مذاب حرکت می‌کنند. در نتیجه زمان تماس با مذاب و گازهای محلول در آن به حداقل می‌رسد. و برعکس، هرچه حباب‌ها ریزتر باشند با سرعت کمتری به سطح مذاب می‌رسند و تماس بیشتری با گازهای محلول در مذاب داشته و امکان جذب و خارج نمودن گازهای بیشتری را از مذاب دارند.

۲- پخش یکنواخت؛ با پخش یکنواخت حباب‌ها در درون مذاب، امکان تماس حباب‌ها با گازها از نزدیک وجود دارد و در نتیجه راندمان و سرعت گاززدایی بهبود می‌یابد.

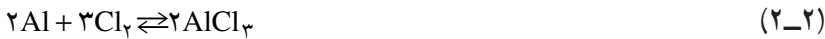
۳- عمق حمام مذاب؛ یکی دیگر از فاکتورهای مؤثر بر بازدهی گاززدایی، عمق حمام مذاب است. گاز باید در پایین‌ترین قسمت ظرف (بوتله یا پاتیل) وارد شود. هرچه عمق ظرف بیشتر باشد مدت زمان تماس حباب با مذاب بیشتر است و بازدهی افزایش می‌یابد.

۴- عدم رطوبت در گاز؛ گاز بی‌اثر باید حاوی حداقل رطوبت باشد.

جدول ۴-۲- چگونگی گاززدایی و تصفیه مذاب از گازها و آخال‌ها

| نوع فلز اصلی | گاز | نوع واکنش | نام عملیات | مواد مؤثر بر عملیات کیفی |
|--------------|----------------|--|---------------------------|--|
| آلومینیم | H _۲ | انحلالی (Al) [H] | گاززدایی | ازت، کلر، مخلوط ۳۰-۷۰ و یا ۱۰-۹۰ ازت و کلر مواد قابل تبخیر نظیر C _۲ Cl _۶ ، CCl _۴ انواع کلرورها و فلئورهای چندگانه |
| | O _۲ | ترکیبی < Al _۲ O _۳ > | آخال زدایی | کلرورها و فلئورهای سدیم، پتاسیم و گاه کلسیم |
| فولاد | H _۲ | انحلالی (Fe) [H] | گاززدایی | گاز CO در ضمن تصفیه مقدار هیدروژن را کاهش می‌دهد. |
| | O _۲ | انحلالی (Fe) [O] ترکیبی انواع اکسیدها | اکسیژن زدایی فلاکس زنی | منیزیم، آلومینیم، تیتانیم، سیلیسیم و آلیاژهای آنها استفاده از فلاکس‌های حاوی کلسیم و سدیم عموماً براساس ترکیبات کربناتی و کاربیدی |
| | S | انحلالی (Fe) [S] | گوگردزدایی | مواد حاوی منیزیم، منگنز، کلسیم، کاربید کلسیم |
| | N _۲ | انحلالی (Fe) [N] ترکیبی نیترورها | گاززدایی | نظیر هیدروژن در آهن Al، Ti نیز می‌توانند نیترورها را خارج سازند، فلاکس‌های کلسیم و منیزیم |
| مس | H _۲ | انحلالی (Cu) [H] | گاززدایی | ازت، گاز کربنیک و مواد قابل تبخیر، و در بسیاری موارد اکسیژن زدایی کافی است. |
| | O _۲ | انحلالی (Cu) [O] ترکیبی Cu _۲ O | اکسیژن زدایی فلاکس زنی | فسفر، کربن، لیتیم، کلسیم فلاکس‌های حاوی سیلیس، براکس و ... |
| | S | انحلالی (Cu) [S] ترکیبی Cu _۲ S | فلاکس زنی فلاکس زنی | کنترل در مواد شارژ فلاکس‌های حاوی سیلیسیم، براکس و بُر |
| منیزیم | H _۲ | انحلالی (Mg) [H] | گاززدایی | مانند آلومینیم از ازت بیش‌تر و کلر کم‌تر استفاده می‌شود. |
| | O _۲ | ترکیبی < MgO > ترکیبی (Mg _۲ N _۲) | آخال زدایی آخال زدایی | مواد کلروره، کلرور منیزیم، اسیدبوریک فلوربات آمونیم، ترکیبات حاوی گوگرد نظیر فوق |

ب – استفاده از گازهای فعال: در برخی موارد ممکن است برای گاززدایی، به جای گازهای خنثی، از گازهای فعال استفاده نمود. این گازها معمولاً هنگامی که وارد مذاب می‌شوند با آن ترکیب می‌گردند. حاصل این واکنش، به وجود آمدن یک گاز جدید است. این گاز نسبت به مذاب خنثی است و همانند گازهای خنثی عمل می‌کند. به عنوان مثال، کُلر یکی از گازهای فعال در ارتباط با آلومینیم می‌باشد. این گاز هنگامی که وارد مذاب می‌شود واکنش ۲-۲ را با آلومینیم مذاب ایجاد می‌کند.



کلرید آلومینیم ($AlCl_3$) در درجه حرارت محیط، به صورت جامد است ولی در درجه‌ی حرارت مذاب آلومینیم، شکل گازی دارد.

گاز کلرید آلومینیم، همانند گازهای خنثی و با همان مکانیزم گاززدایی عمل می‌کند. در بسیاری موارد ممکن است به جای استفاده‌ی مستقیم از گازهای فعال ترکیبات آن‌ها را به کار برد.

این ترکیبات، معمولاً به صورت جامد یا مایع می‌باشند و هنگامی که وارد مذاب می‌شوند تجزیه می‌گردند و گازهای لازم را برای گاززدایی فراهم می‌آورند. مانند هگزا کلروراتان، تتراکلرورکربن و نمک‌های کلر.

۲-۲- آخال^۱ و آخال زدایی

آخال به کلیه ناخالصی‌های ترکیبی فلزی و غیرفلزی گفته می‌شود که در فلز مذاب به وجود می‌آیند. آخال‌ها، شامل مجموعه اکسیدهای ساده، سولفیدها، نیتريد‌ها، کلرورها و... یا ترکیبات مختلف آن‌ها هستند. آخال، روی خواص مکانیکی، متالورژیکی، فیزیکی و ریخته‌گری فلزات تأثیر مهمی دارد.

۱-۲-۲- انواع آخال‌ها

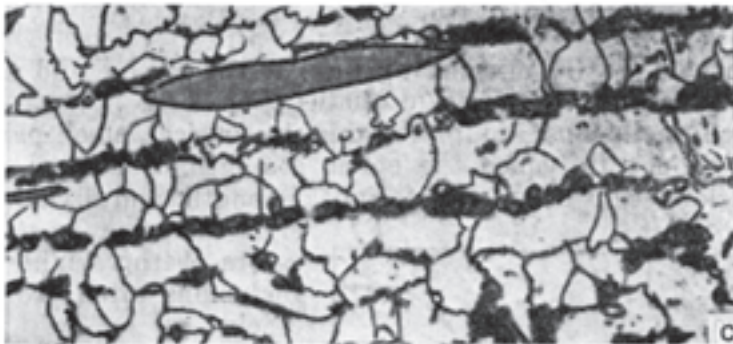
در یک تقسیم‌بندی، اصولاً دو گروه آخال وجود دارد:

الف – آخال‌هایی که در نتیجه‌ی عوامل خارجی موجود به وجود آمده و وارد مذاب می‌شوند. مانند: سرباره‌ها، ذرات مواد قالب، مواد نسوز و... در بیشتر حالات، این آخال‌ها ماکروسکوپی هستند و با چشم غیر مسلح قابل رؤیت می‌باشند (شکل ۲-۶). این نوع آخال، هم در سطح و هم در مقطع شکست قطعه‌ها مشاهده شده است.



شکل ۲-۶- نمونه از قطعه‌ای با عیوب آخال و مک‌های میکروسکوپی

ب- آخال‌هایی که در اثر واکنش‌های شیمیایی در داخل مذاب به وجود می‌آیند: این آخال‌ها شامل سولفیدها، نیتريد‌ها، یا اکسیدها، کلورورها و غیره می‌باشند. این نوع آخال‌ها عموماً بسیار کوچک هستند و با میکروسکوپ قابل مشاهده و بررسی می‌باشند. آن‌ها معمولاً به طور یکنواخت در ساختار میکروسکوپی قطعه‌ها پراکنده می‌باشند. شکل ۲-۷ پخش آخال‌ها را در مرز دانه‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد.



شکل ۲-۷- آخال‌های سولفیدی در فولاد ۰/۲۵٪ کربن اچ شده در محلول نیتال ۲۰٪ بزرگنمایی ۵۰۰

۲-۲-۲- اکسیداسیون و اکسیدها

به طور کلی، هیچ فلز یا آلیاژ صنعتی در برابر گازهای اکسیدکننده، به ویژه اکسیژن، مقاوم نیست. از این رو، از اکسیدها عموماً به عنوان مهم ترین آخال در کلیه آلیاژهای صنعتی نام برده می شود. واکنش پذیری عناصر مختلف با اکسیژن متفاوت است. از عوامل مهم دیگر در اکسیداسیون، سرعت اکسید شدن می باشد که بستگی به نحوه تشکیل قشر اکسید دارد.

در یک مقایسه ی ساده بین آهن و آلومینیم، می توان ملاحظه کرد که آلومینیم اگرچه میل ترکیب شدیدتری با اکسیژن دارد اما به دلیل ایجاد قشر اکسید غیرمتخلخل در سطح، از نفوذ اکسیژن به قسمت های داخلی جلوگیری می کند و در نتیجه اکسیداسیون متوقف یا کاهش می یابد. در حالی که در مورد آهن، علی رغم این که میل ترکیب کمتری با اکسیژن دارد به دلیل تخلخل زیاد در قشر اکسید شده، به سرعت قسمت های داخلی نیز اکسید می شوند.

اکسیدهای حاصل از اکسیداسیون، معمولاً ساده یا ترکیبی از چند اکسید می باشند. اکسیدها به صورت ذرات جامد و غیر محلول در مذاب می باشند. احتمال محلول شدن اکسیژن یا اکسید فلز در مذاب بسیار کم است. معمولاً ترکیب حاصل از اکسید فلز به صورت ذرات جامد شناور در مذاب می باشد که در صورت خارج نشدن از مذاب، به صورت آخال در قطعه باقی می ماند.

۲-۲-۳- منابع ایجاد آخال و پیشگیری از آن

— مواد شارژ (بار): یکی از مهمترین منابع ایجاد آخال های مختلف مواد شارژ می باشد. وجود مواد اکسید شده، رطوبت و... در مواد شارژ از موارد مهم در ایجاد آخال است.

— اندازه ی مواد شارژ (بار): مواد بار ریز و سطح اکسایش زیاد در افزایش آخال ها مؤثر است. براده های برگشتی از عملیات ماشین کاری موجب افزایش اکسیدها در قطعه ها می شوند.

— ترتیب باردهی: نحوه و ترتیب افزودن مواد مختلف به کوره در مقدار آخال مؤثر است. معمولاً موادی که میزان اکسیداسیون زیادتری دارند، در صورت امکان از همان ابتدا شارژ نمی شوند.

— هم زدن و آشفته ساختن مذاب: در برخی موارد هم زدن مذاب به منظور دستیابی به آلیاژهای همگن و مناسب ضروری است. در مورد آلیاژهایی مانند آلیاژهای آلومینیم به هم زدن مذاب، باعث به هم خوردن قشر اکسید سطح می شود و مقدار آخال در مذاب را افزایش می دهد.

— محیط اطراف کوره: محیط اطراف کوره می تواند اکسیدی، خنثی یا احیایی باشد که انتخاب هر کدام از آن ها در مقدار آخال تأثیر می گذارد.

— درجه حرارت ذوب: با افزایش درجه‌ی حرارت فوق ذوب، مقدار آخال‌ها عموماً افزایش می‌یابد.

— زمان نگهداری مذاب: زمان نگهداری مذاب نیز تأثیری همانند درجه حرارت دارد.
— نوع کوره: کوره‌هایی که سوخت و یا محصول احتراق در آن‌ها با مذاب در تماس هستند، مقدار آخال بیشتری در مذاب ایجاد می‌کنند. از طرف دیگر، جلوگیری از خراب شدن کوره و وارد شدن ذرات بوته و آجرنسوز به داخل مذاب ضروری است.

— وسایل و تجهیزات در ذوب: استفاده از ابزارهای تمیز و پوشش داده شده در کاهش مقدار آخال مؤثر است. به عنوان مثال، در ذوب آلومینیم استفاده از وسایل آهنی بدون پوشش موجب خورده شدن آهن توسط آلومینیم می‌شود و آخال‌های میکروسکوپی ایجاد می‌کند.

— بارریزی: نحوه‌ی بارریزی به جهت تماس با محیط اطراف، در مقدار آخال تأثیر دارد.

— قالب: استفاده از مواد قالب و پوشش مناسب و نیز خشک کردن آن، در کاهش مقدار آخال تأثیر زیادی دارد.

از طرف دیگر افزایش استحکام قالب و نیز تمیز کردن آن، از ورود ذرات ماسه به داخل قالب جلوگیری می‌کند.

— سیستم راهگاهی: اجتناب از ایجاد گوشه‌های تیز برای کاهش آخال ضروری می‌باشد.
از طرف دیگر، سیستم راهگاهی باید به گونه‌ای طراحی شود تا ذرات با منشأ خارجی در داخل حوضچه پای راهگاه و یا کانال مُتد گیر کرده، وارد محفظه‌ی قالب نشود. درحقیقت یکی از وظایف مهم سیستم راهگاهی، جلوگیری از ورود آخال‌ها به داخل مذاب می‌باشد.

— درجه حرارت بارریزی: افزایش درجه حرارت بارریزی، امکان انجام واکنش مذاب را با مواد نسوز و مواد قالب، بیشتر فراهم می‌آورد.

۴-۲-۲- آخال‌زدایی

بنا به تعریف، آخال‌زدایی به مجموعه‌ی عملیاتی گفته می‌شود که به منظور جلوگیری و حذف یا کاهش اثرات نامطلوب آخال‌ها (ذرات اکسیدی، نیتروژن، کربورها و...) به کار می‌رود.

برای آخال‌زدایی از فلاکس^۱ استفاده می‌شود. فلاکس‌ها ترکیبات متنوع و متعددی هستند که برای جلوگیری از اکسیدشدن، یا برای احیاکردن و یا به منظور جداکردن آخال‌ها از مذاب استفاده می‌شوند. فلاکس‌های مهم که معمولاً برای آخال‌زدایی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

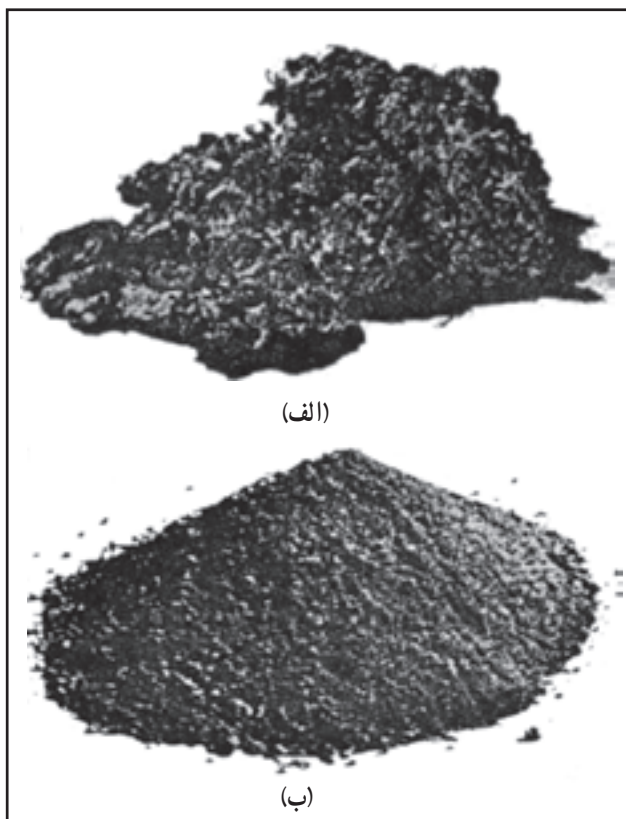
۱- Flaxes

۱- فلاکس‌های پوششی^۱: این فلاکس‌ها به منظور به وجود آوردن سدّی در برابر نفوذ اکسیژن به داخل مذاب طراحی شده‌اند. این فلاکس‌ها عموماً ممکن است به صورت جامد و خشک و یا به صورت مذاب در سطح فلز مذاب ظاهر گردند. بعضی از فلاکس‌های پوششی می‌تواند در ایجاد سرباره‌ی مناسب مؤثر باشد. عموماً سرباره به دلیل آغشتگی که به مذاب دارد، به راحتی از مذاب جدا نمی‌شود و در هنگام سرباره‌گیری، مقدار زیادی مواد مذاب را همراه خود خارج می‌کند. با استفاده از نوعی فلاکس، قابلیت آغشتگی سرباره با مذاب کاهش می‌یابد و به راحتی از آن جدا می‌شود و بدین

ترتیب از تلفات مذاب کاسته می‌شود.

شکل ۸-۲ الف نوعی سرباره قبل از عمل کرد فلاکس و شکل ۸-۲ ب بعد از عمل کرد فلاکس را نشان می‌دهد.

آزمایشات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از فلاکس‌های پوششی، مقدار تلفات مذاب را تا ۵۰٪ کاهش می‌دهد و به همین نسبت از میزان آخال‌های موجود در مذاب می‌کاهد. فلاکس‌های پوششی برای تمیز کردن مذاب کاربرد زیادی ندارند.



شکل ۸-۲- عکس سرباره‌ی آلومینیم (الف) قبل از فلاکس زنی (ب) بعد از فلاکس زنی

۲- فلاکس‌های تمیزکننده^۲: فلاکس‌های تمیزکننده به منظور جداسازی ذرات آخال معلق و خارج کردن آن‌ها از مذاب به کار می‌روند و مهم‌ترین وظایف آنها عبارتند از:

۱- Cover Flaxes

۲- Cleaning Flaxes

الف – کاهش وزن مخصوص: به منظور سرعت بخشیدن به خروج آخال‌ها، استفاده از فلاکس‌هایی که بتواند وزن مخصوص آخال را کاهش دهد می‌تواند بسیار مؤثر باشد. آخال در مذاب به سه حالت می‌تواند وجود داشته باشد:

- به سرباره بیاید.
- در مذاب، به صورت شناور باقی بماند.
- به صورت لجن در کف بوته (کوره) ته نشین شود.

در جدول ۵-۲، وزن مخصوص چند ترکیب در مقایسه با فلز مذاب آمده است.

جدول ۵-۲- وزن مخصوص چند ترکیب در مقایسه با فلز مذاب

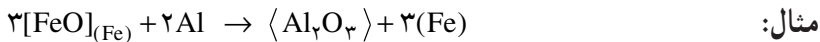
| فلزات | وزن مخصوص در حالت مایع g/cm ^۳ | ترکیبات | وزن مخصوص ترکیبات g/cm ^۳ |
|-------|---|--------------------------------|--|
| Cu | ۸/۲۲ | CuCl _۲ | ۳/۰۵ |
| | | CuO | ۵/۶ |
| Al | ۲/۳ | Al _۲ O _۳ | ۴ |
| | | AlCl _۳ | ۱/۵۲ |
| | | سرباره‌های اکسیدی | ۱/۸ |
| Fe | ۶/۹ | FeO | |
| | | Fe _۲ O _۳ | |
| | | Fe _۲ O _۴ | ۵/۱ |
| | | FeCl _۲ | ۲/۵۲ |
| | | FeCl _۳ | ۲/۸۰ |
| | | سرباره آهنی | ۳-۴/۲ |
| Mg | ۱/۵ | MgO | ۳/۶ |
| | | MgCl _۲ | ۲/۳ |
| Zn | ۶/۵ | ZnS | ۳/۹ |
| | | ZnCl _۲ | ۲/۷۵ |
| | | ZnO | ۵/۶ |
| | | خاک نسوز و SiO _۲ | ۲ |

ب- کاهش آغشتگی به مذاب: آغشتگی آخال به مذاب، موجب کاهش سرعت خروج آخال از مذاب می‌شود. بنابراین استفاده از فلاکس‌هایی که بتواند این آغشتگی را کاهش دهد، موجب تسهیل در خروج آخال از مذاب می‌شود. بعضی از فلاکس‌ها می‌توانند در فصل مشترک مذاب و آخال لایه‌ای از فیلم نازک ایجاد نمایند و در نتیجه آغشتگی آخال به مذاب را کاهش دهند. استفاده از برخی گازها (مانند آن‌چه در مورد گاززدایی گفته شد) می‌تواند یک لایه نازک هوا بین آخال و مذاب ایجاد کند که علاوه بر کاهش وزن مخصوص، آغشتگی به مذاب را نیز، کاهش می‌دهد.

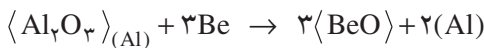
ج- افزایش نقطه‌گداز: برخی از آخال‌ها در شرایط ذوب به صورت مذاب هستند لذا جدا کردن آن‌ها از مذاب با تلف شدن مذاب همراه است. در این حالت از موادی که بتواند با افزایش نقطه‌ی ذوب، آخال سرباره‌گیری را آسان کند استفاده می‌شود.

۵-۲-۲- روش‌های ترکیبی آخال زدایی

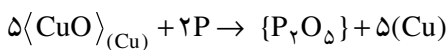
در این روش حذف آخال با عناصری صورت می‌گیرد که نسبت به فلز مذاب، میل ترکیبی بیشتری با اکسیژن، نیتروژن و... دارند. از اکسیژن‌زدایی، می‌توان به عنوان مهمترین فرآیند در این روش نام برد.



که در آن مذاب آهن با آلومینیم اکسیژن‌زدایی می‌شود.



که در آن مذاب آلومینیم با برلیم اکسیژن‌زدایی می‌شود.



که در آن مذاب مس با فسفر اکسیژن‌زدایی می‌شود.

مهم‌ترین شرایط برای اکسیژن‌زدایی عبارتند از:

۱- عنصر اضافه شده برای اکسیژن‌زدایی باید میل ترکیب زیادتری با اکسیژن نسبت به مذاب داشته باشد.

۲- عنصر اضافه شده، نباید خود باعث به هم خوردن ترکیب شیمیایی مذاب شود و از طرف دیگر نباید ایجاد آخال در مذاب نماید.

۳- چگالی اکسید جدید باید کمتر از اکسید اصلی باشد تا بتواند به راحتی به سطح مذاب بیاید.

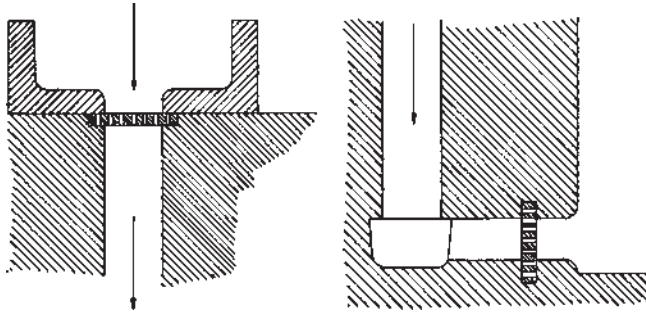
۴- قابلیت آغشتگی به مذاب نداشته باشد تا بتواند به راحتی از مذاب خارج شود.

۵- از جهت عملی اضافه نمودن آن به مذاب مشکل نباشد.

۲-۲-۶- عملیات فیلتر کردن مذاب

حذف کامل آخال‌ها، به وسیله‌ی عملیات آخال زدایی مشکل می‌باشد. لذا برای آلیاژهایی که وجود حتی مقدار جزئی آخال‌های ریز میکروسکوپی باعث کاهش خواص قطعه‌ها می‌شود و به منظور تولید قطعه‌ها با کیفیت بالا از عملیات فیلتر کردن مذاب استفاده می‌شود. عملیات فیلتر کردن می‌تواند در پاتیل و یا حتی سیستم راهگاهی انجام شود. در این عملیات مذاب از داخل فیلترهای خاصی عبور می‌کند و در نتیجه آخال‌های ریز و درشت در لابلای ذرات فیلتر گیر می‌کنند و مذاب صاف و عاری از آخال به دست می‌آید.

شکل ۲-۹ روش‌های فیلتر کردن را برای آلومینیم نشان می‌دهد.



شکل ۲-۹- شماتیک روش‌های فیلتر کردن برای آلومینیم در سیستم راهگاهی

۲-۳- تلقیح (جوانه‌زایی و ...)

اضافه کردن بعضی از عناصر به مذاب در مقادیر جزئی می‌تواند موجب بهبود خواص ریخته‌گری، مکانیکی و فیزیکی قطعات ریختگی گردد. این عناصر در آخرین لحظات تهیه مذاب و معمولاً قبل از ریختن فلز مذاب به داخل قالب اضافه می‌شوند.

اضافه کردن این عناصر به مقدار جزئی به آلیاژهای آلومینیم - منیزیم موجب ریزش دانه‌ها گشته و همچنین در چدن‌های خاکستری باعث کمک به ایجاد گرافیت آزاد می‌گردد.

برای مثال اضافه کردن کم‌تر از ۰/۲ درصد تیتانیم یا ۰/۲ درصد بُر به آلومینیم می‌تواند اندازه دانه‌های آلومینیم و آلیاژهای آن را از ۲/۵ میلی‌متر به ۰/۱ میلی‌متر تقلیل دهد. همچنین اضافه کردن حدود ۰/۲ درصد سدیم و یا ۰/۳ درصد استرانسیم در آلیاژهای آلومینیم - سیلیسیم می‌تواند

اندازه را صدها بار ریزتر نماید.

در مورد چدن‌ها اضافه کردن مقدار کمی سیلیسیم به مذاب می‌تواند به ایجاد گرافیت آزاد در چدن کمک کرده و به خصوص در قطعات با جداره‌های نازک مانع از سفیدشدن چدن در این ضخامت‌ها گردد.

هم‌چنین اضافه کردن مقدار جزئی منیزیم (حدود ۰/۰۵ درصد) به مذابی با ترکیب شیمیایی چدن خاکستری می‌توان گرافیت‌های ورقه‌ای را به صورت کروی درآورده و از این طریق مشخصات مکانیکی به مقدار شگفت‌آوری اصلاح گردد.

عمل جوانه‌زایی هم یکی از موارد تلقیح می‌باشد، در این عملیات معمولاً مواد تلقیح (جوانه‌زا) متناسب با نوع آلیاژ از ترکیبات مختلف انتخاب می‌شوند. مواد جوانه‌زا باید دارای شرایطی به شرح ذیل باشند:

— **دیرگدازی:** نقطه‌ی ذوب جوانه‌زا باید بالاتر از درجه‌ی حرارت مذاب باشد تا در شرایط معمولی در فلز مذاب ذوب نشود.

— **قابلیت آغشتگی به مذاب:** مواد جوانه‌زا باید قابلیت آغشتگی به مذاب را داشته باشد تا بتواند به عنوان هسته عمل نماید.

— **ساختار کریستالی:** ساختار کریستالی مواد جوانه‌زا باید به ساختار فلز مذاب نزدیک باشد. جدول ۶-۲ مواد جوانه‌زای اصلی را برای آلیاژهای مختلف نشان می‌دهد. پس از مشخص شدن شرایط مواد جوانه‌زا، در اینجا لازم است به نکاتی که باید در مورد عملیات جوانه‌زایی به آن توجه نمود، اشاره شود.

۱— **زمان جوانه‌زایی:** از نکات عملی مهم در جوانه‌زایی، انتخاب زمان مناسب برای جوانه‌زایی است. به عنوان مثال، در صورتی که جوانه‌زایی قبل از عملیات گاززدایی و آخال‌زدایی انجام شود، در این صورت، عملیات فوق باعث حذف جوانه‌زاها می‌شود. معمولاً جوانه‌زاها را در آخرین مرحله به مذاب اضافه می‌کنند و حتی در برخی موارد در سیستم راهگاهی به مذاب اضافه می‌شوند.

۲— **درجه حرارت و زمان (میرایی):** درجه‌ی حرارت و زمان، عواملی اساسی در بازدهی جوانه‌زایی محسوب می‌گردد. در صورتی که درجه حرارت، بالا و یا زمان نگهداری مذاب پس از جوانه‌زایی طولانی باشد راندمان جوانه‌زایی به شدت کاهش می‌یابد؛ چرا که در این حالت تعدادی از مواد جوانه‌زا در مذاب حل می‌شود.

جدول ۶-۲- مشخصات اصلی مواد جوانه‌زا

| سیستم آلیاژی درصد عنصر دوم | فاز اصلی که کنترل می‌شود | ریزکننده‌ها درصد وزنی | تأثیر در ساختمان | ترکیب احتمالی حاصل برای ریزکردن |
|--|-----------------------------------|---|--|--|
| Mg _{۷۰} -Al _{۱۰} | Mg α | C _۰ Cl _۰ ۰۵ FeCl _۰ ۱-۲ فوق ذوب تا ۸۴°C | تقلیل اندازه شبکه به ۰/۰۳ تا ۰/۱ میلی‌متر | ترکیب حاصل Al _۰ C _۰ یا تشکیل (Fe-Mg)Al _۰ |
| Mg _{۴۰} -Zn _{۵۰} | Mg α | Zr ۰/۰۷ | مانند فوق | هسته‌های Zr و یا MgZr |
| ۴Cu Al(Mg) Zn | Al α | Ti ۰/۰۵-۰/۱ B ۰/۰۰۵-۰/۰۰۱ | تقلیل تا ۰/۱ میلی‌متر | TiC - AlB - TiB _۰ و خاصیت محدود کردن رشد توسط B.Ti |
| Al ۵-۱۲Si Al ۱۶-۲۰Si | اوتکتیکی Si فاز اولیه Si | Na ۰/۰۱ P ۰/۰۰۵ | تقلیل دانه‌های سیلیسیم به ۰/۰۰۱ ^{mm} تقلیل دانه‌های سیلیسیم به ۰/۰۰۱ ^{mm} | Na هسته AlP |
| Cu ۲۵-۴۵ Zr _n | α Cu کریستال β | Fe ۱-۲ ZrB ۰/۰۵ | تقلیل به ۰/۱-۰/۲ میلی‌متر | فعل و انفعال پرتکتیکی با Fe و وجود هسته ZrB _۰ |
| Fe _۳ -۴C برای چدن خاکستر | Fe _۰ C اوتکتیک یا C | FeSi ۰/۰۵ CoSi ۰/۰۲ SiMnZr ۰/۰۲ SiC ۰/۰۲ | تعویض سماتیت به گرافیت لایه‌ای | قابلیت‌های گرافیت‌زایی |
| Fe ۴-۴/۵C | چدن لایه‌ای | Mg ۰/۰۴-۰/۰۶ Ce ۰/۰۰۵-۰/۰۱ همراه با فروسیلیسیم ۰/۷۵ | تغییر لایه گرافیت به گرافیت کروی | کاملاً مشخص نیست احتمال ترکیب MgO و آزاد شدن C از CO |
| Fe ۳-۳/۷C چدن چکش‌خوار | در انجماد Fe _۰ C | B ۰/۰۰۲ Al ۰/۰۰۴ B ۰/۰۰۲ Te ۰/۰۰۲ | توسعه گرافیت شدن جلوگیری از تشکیل | مشخص نیست مشخص نیست |

۳- اندازه‌ی جوانه‌زها: اندازه‌ی جوانه‌زها باید مناسب انتخاب شود. چنانچه اندازه‌ی ذرات جوانه‌زا خیلی بزرگ باشد، باعث غیریکنواختی در قطعات ریختگی می‌شود و خواصّ قطعه‌ی ریختگی را کاهش می‌دهد و برعکس، در صورتی که جوانه‌زها خیلی ریز باشند ممکن است در مذاب حل شده، راندمان جوانه‌زایی کاهش یابد.

براساس تجربه اندازه‌ی جوانه‌زای مناسب برای آلیاژهای مختلف به دست می‌آید.

۴- پخش یکنواخت: پخش یکنواخت جوانه‌زها در مذاب، اهمّیت زیادی در بهبود کیفیتّ قطعات ریختگی دارد.

۵- مقدار جوانه‌زا: مقدار جوانه‌زا باید حدّ معینی داشته باشد. چنانچه مقدار جوانه‌زا کم باشد ریزدانه‌گی به دست نمی‌آید. همچنین در صورتی که تعداد جوانه‌زها خیلی زیاد باشد، به دلیل حذف اثرات یکدیگر امکان درشت‌دانه‌گی وجود دارد.

۱-۲-۳- مزایا و عیوب جوانه‌زایی

الف- مزیتها

۱- خواصّ مکانیکی: خواصّ مکانیکی سختی، استحکام، مقاومت به ضربه بهبود می‌یابد.

۲- مک‌های گازی و انقباض: مک‌های گازی و انقباضی کوچک‌تر شده، در برخی موارد

حذف می‌شوند.

۳- یکنواختی خواص در جهات مختلف بهبود می‌یابد.

۴- حسّاسیت به ایجاد ترک‌های حین انجماد در ریخته‌گری کاهش می‌یابد.

۵- خاصیتّ قابلیتّ ماشین‌کاری را بهبود می‌بخشند.

۶- عملیاتّ تمام‌کاری مانند (پولیشکاری، آبکاری) در مورد قطعات جوانه‌زایی شده، نتایج

مطلوبتری دارد.

۷- قابلیتّ پذیرش عملیاتّ حرارتی در مورد آن افزایش می‌یابد.

ب- عیبها

۱- سیالیتّ ریخته‌گری را کاهش می‌دهد.

۲- ناخالصی را در مذاب و قطعه افزایش می‌دهد.

- ۱- واکنش گاز با مذاب را دسته‌بندی نموده، در مورد هر کدام به اختصار توضیح دهید.
- ۲- مهمترین منابع تولید کننده‌ی گاز در مذاب را نام ببرید.
- ۳- انحلال گازها در مذاب، چگونه انجام می‌شود؟
- ۴- عوامل مؤثر بر انحلال گاز در مذاب را توضیح دهید.
- ۵- مکانیزم ایجاد مک‌های گازی را به طور کامل توضیح دهید.
- ۶- عوامل مؤثر در میزان مک‌های گازی را نام ببرید.
- ۷- روش مشاهده‌ی سطح نمونه‌ی قطعه‌ی ریخته شده برای اندازه‌گیری گاز در مذاب را توضیح دهید.
- ۸- نکات مهم در پیشگیری ورود گاز به مذاب را نام ببرید.
- ۹- روش‌های گاززدایی را نام ببرید.
- ۱۰- مکانیزم گاززدایی به وسیله‌ی گازهای بی‌اثر را توضیح دهید.
- ۱۱- عوامل مؤثر در افزایش راندمان گاززدایی با استفاده از گاز را توضیح دهید.
- ۱۲- گاززدایی با گازهای فعال چیست؟ وجه تمایز و تشابه آن را با گازهای خنثی تشریح نمایید.
- ۱۳- انواع آخال را نام برده، در مورد هر کدام مختصراً توضیح دهید.
- ۱۴- منابع ایجاد آخال و راه پیشگیری از آن چیست؟
- ۱۵- آخال‌زدایی را تعریف نمایید.
- ۱۶- نقش فلاکسهای پوششی را توضیح دهید.
- ۱۷- نقش فلاکسهای تمیزکننده را مختصراً توضیح دهید.
- ۱۸- روش ترکیبی را در حذف آخال توضیح دهید.
- ۱۹- عملیات فیلتر کردن چیست و به چه منظوری انجام می‌شود؟
- ۲۰- تلقیح چیست؟
- ۲۱- شرایط جوانه‌زها را نام ببرید.
- ۲۲- مزایا و معایب جوانه‌زها را نام ببرید.

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 به دست 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^۱ (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.

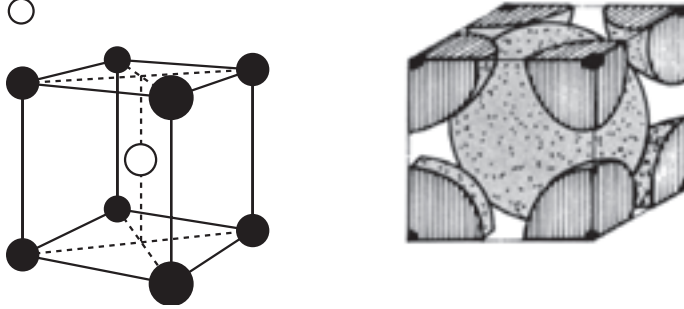
تمام فلزات تک اتمی بوده بدین معنی که شبکه کریستالی آن‌ها از اتم‌های انفرادی تشکیل یافته است. به عبارت دیگر فلزات از گردهمایی ملکول‌ها تشکیل نمی‌یابند.

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^۲ «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



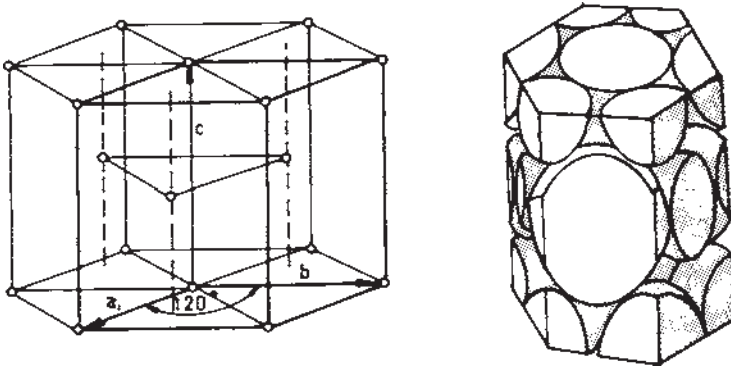
شکل ۱-۳ الف

● اتم در گوشه‌ها
○ اتم در مرکز سطوح



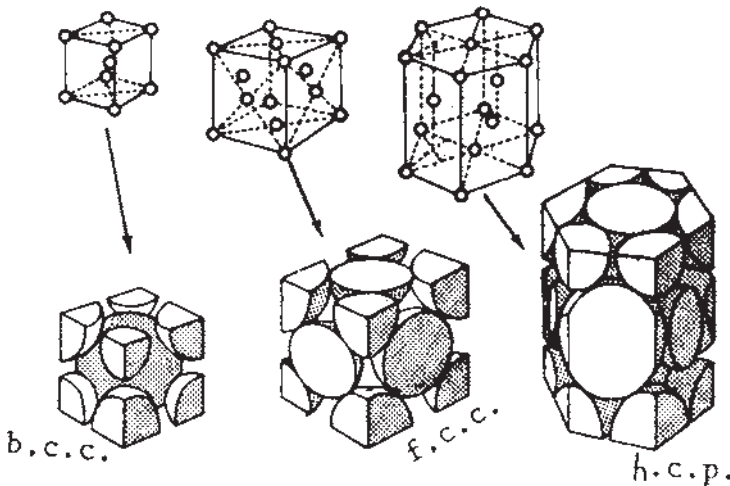
شکل ۱-۳ ب

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 |

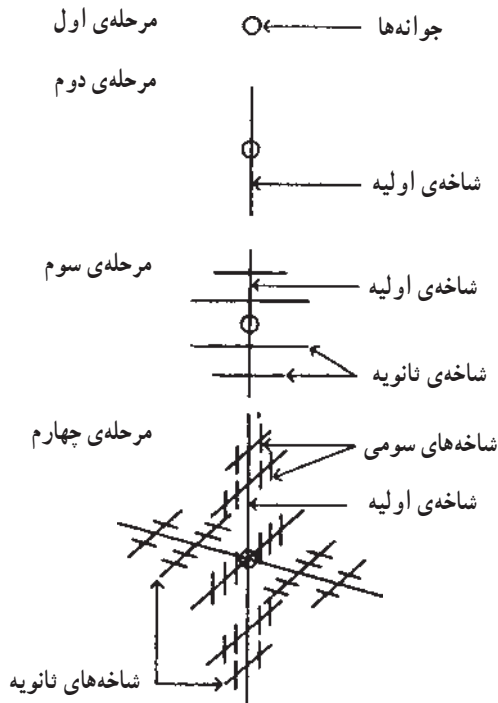
۲-۳- رفتار فلزات خالص در هنگام انجماد

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 سرد شدن مذاب نیز زیادتر خواهد بود و همچنین هر چه سطح تماس مذاب با هوا بیش‌تر باشد سرعت سرد شدن 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).



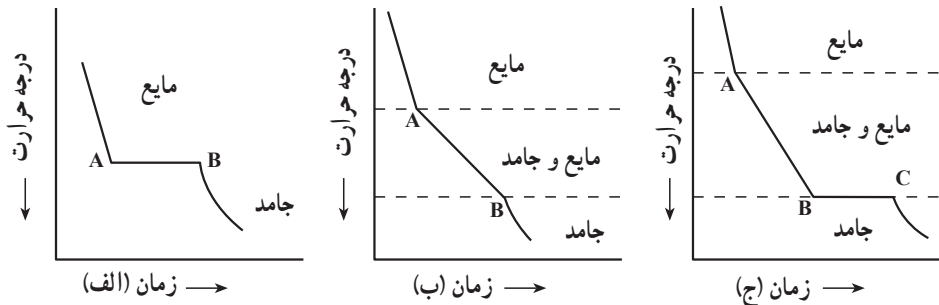
شکل ۳-۴- نمای رشد دندریتی در مذاب

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.

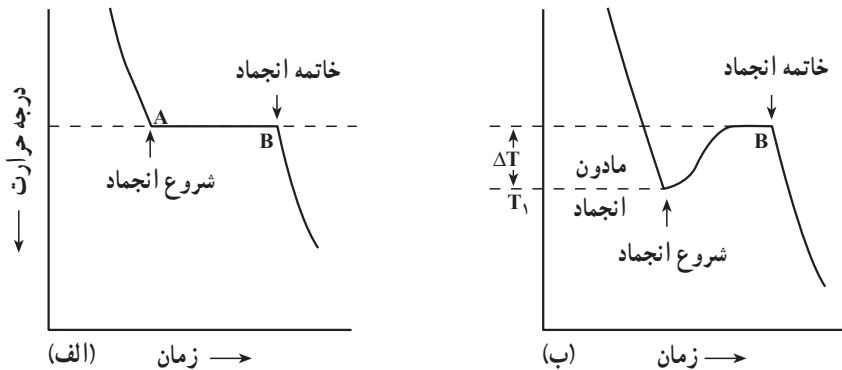
خواص مکانیکی فلزات تا حد زیادی به اندازه دانه‌ها، مقدار و ماهیت مرزدانه‌ها بستگی دارد. فلزات و آلیاژهایی که در دمای محیط استفاده می‌شوند نظیر اکثر قطعات اتومبیل، تراکتور و غیره

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 ΔT 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.

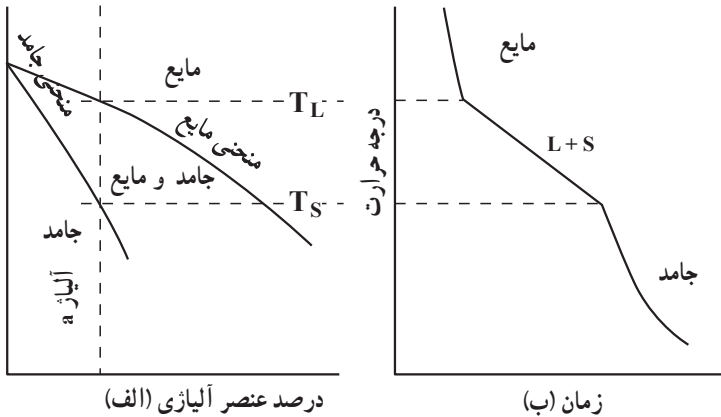
برای هر آلیاژ معین درجه حرارتی (درجه حرارت لیکوئیدوس)^۱ وجود دارد که بالای آن، آلیاژ به صورت مایع وجود دارد. همچنین درجه حرارت دیگری (درجه حرارت سالییدوس)^۲ وجود دارد که در زیر آن آلیاژ به صورت جامد باقی می‌ماند. در درجه حرارت‌های بین درجه حرارت لیکوئیدوس و سالییدوس آلیاژ به صورت خمیری و مخلوطی از جامد 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 بوت‌ها به 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)

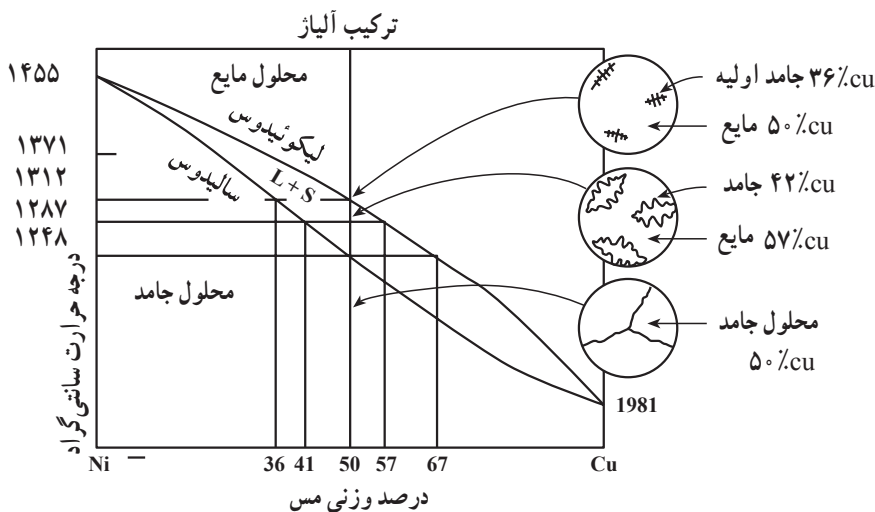
درجه حرارت T_S که آلیاژ کاملاً جامد گردیده فلز مجدداً با سرعت بیش تری سرد می‌گردد. چنانچه دو یا چند فلز در درجه حرارت و فشار معین به صورت یکنواخت درآیند یک سیستم آلیاژی را به وجود می‌آورند. آلیاژهایی که از دو عنصر تشکیل شده باشند سیستم دوتایی و اگر از سه عنصر تشکیل یافته باشند سیستم سه تایی نامیده می‌شوند.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

۱-۳-۳- آلیاژهای محلول جامد

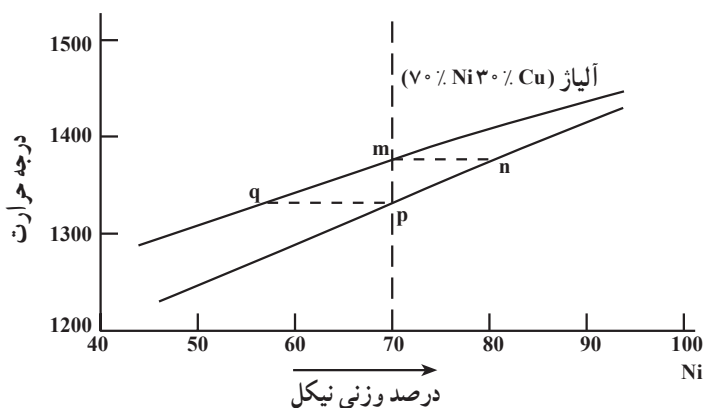
دو فلز که کاملاً در حالت مایع در یکدیگر محلولند رفتاری شبیه آب و الکل را دارا می‌باشند. که می‌توان آن را در حالت مایع شبیه یک ماده واحد در نظر گرفت. طلا و نقره از جمله آلیاژهایی هستند که چه در حالت مایع و چه در حالت جامد کاملاً در یکدیگر محلول‌اند.

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.

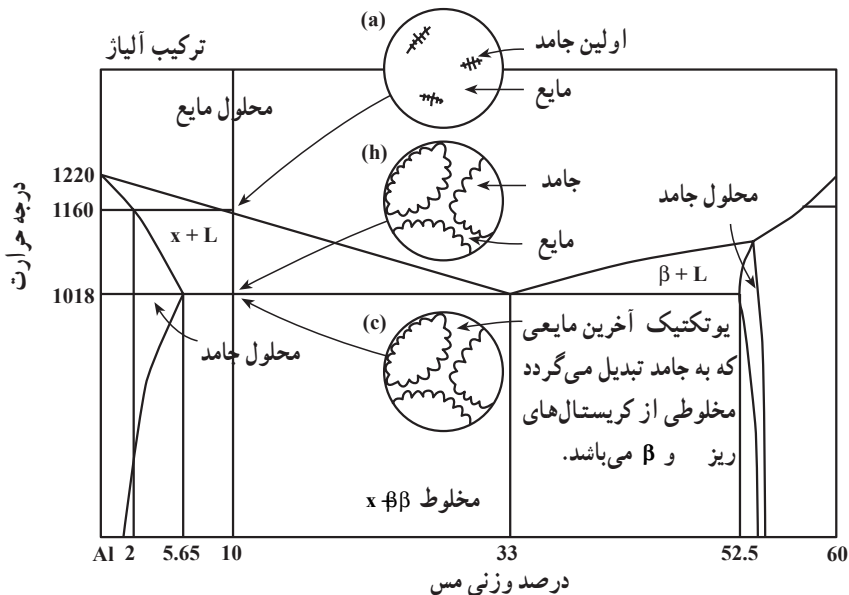
برای مثال در مواردی که مادون انجماد زیاد باشد قطعات دارای دانه‌های ریز بوده و در نتیجه دارای استحکام بیش‌تری خواهند بود. مشخصات آلیاژی از دو فلز بستگی کامل به نحوه قرار گرفتن دو عنصر در یکدیگر دارد. دو عنصر ممکن است در حالت مایع کاملاً در یکدیگر به

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 می‌گیرند. عناصر تشکیل دهنده چنین آلیاژی پس از جامد شدن نیز به صورت مجزا از یکدیگر قرار خواهند گرفت. چنین حالتی را مخلوط مکانیکی عناصر می‌نامند. 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 می‌باشند.

۲-۳-۳- آلیاژهای یوتکتیک

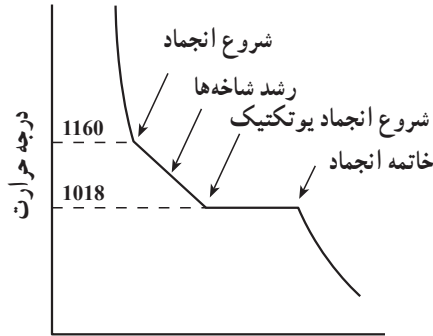
فلزاتی که با هر نسبتی در یکدیگر محلول نبوده و به صورت مخلوط مکانیکی عمل می‌نمایند این دسته از آلیاژها را تشکیل می‌دهند. ساختمان آلیاژهای این خانواده در حالت جامد از دو جزء کریستالی متفاوت از نظر ترکیب شیمیایی (و در بعضی از مواقع ساختمان مختلف) تشکیل می‌گردد. این دو جزء کریستالی به صورت مخلوط مکانیکی متشکل از دانه‌های بسیار ریز در کنار یکدیگر وجود دارند. بعضی از فلزات در حالت جامد کاملاً در یکدیگر غیر محلول می‌باشند مثال در این مورد آلیاژ قلع - کادمیم می‌باشد. ساختمان این آلیاژ متشکل از کریستال‌های بسیار ریز قلع خالص و کادمیم خالص خواهد بود.

در اغلب موارد آلیاژی یافت می‌شوند که در حالت جامد قابلیت حلالیت محدودی از عنصر آلیاژی را دارا می‌باشند. مثالی در این مورد آلیاژ دوتایی آلومینیم - مس می‌باشد.



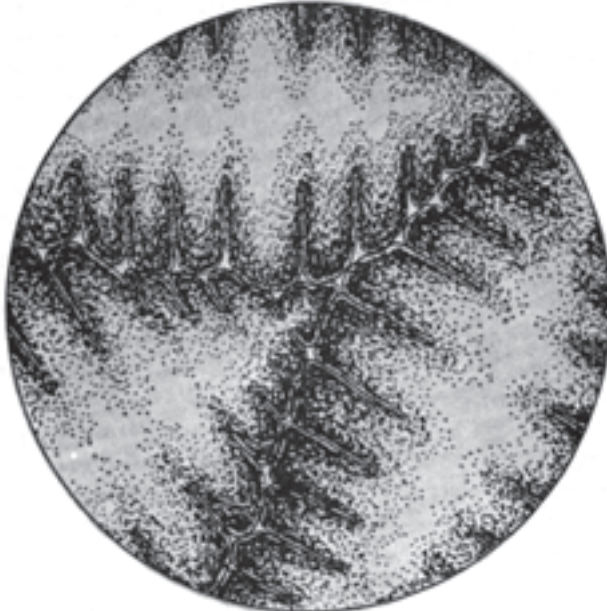
شکل ۱۰-۳- نمودار تعادلی آلومینیم - مس

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.

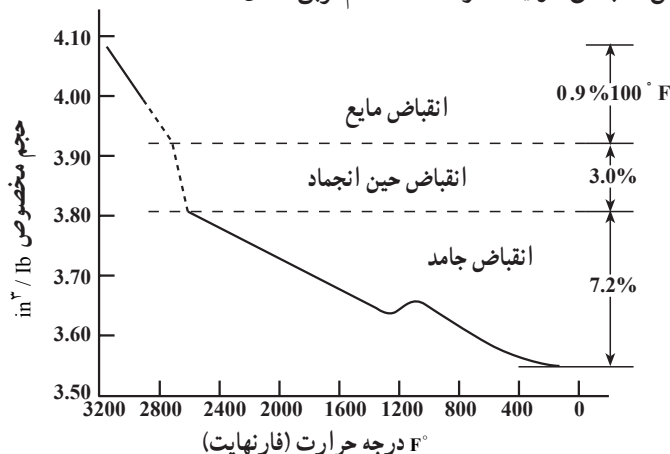
همان‌طوری که قبلاً گفته شد فلزات و آلیاژها در مراحل انجماد و سرد شدن در قالب (به استثناء بیسموت و بعضی از آلیاژها نظیر چدن‌های خاکستری و انواع چدن با گرافیت کروی) منقبض می‌گردند. این انقباض در سه مرحله متمایز اتفاق می‌افتد.

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

انقباض حین انجماد^۲ - از هنگام شروع تا خاتمه انجماد انجام می‌گیرد.

انقباض جامد^۳ - 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

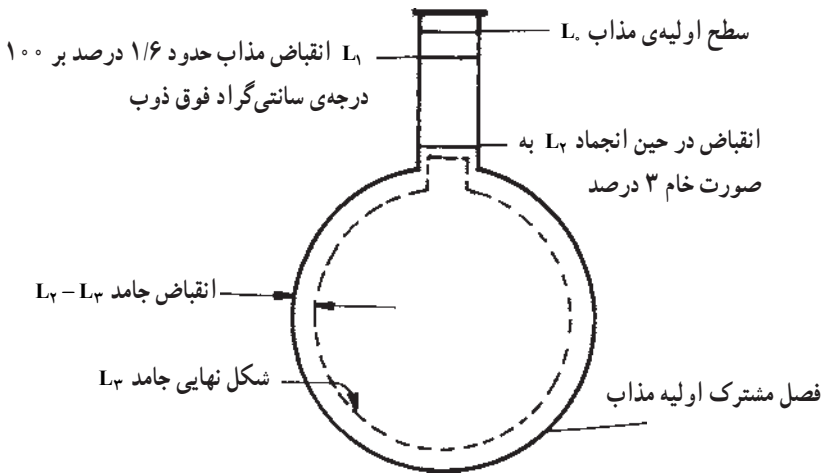
۱- Liquid shrinkage

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.

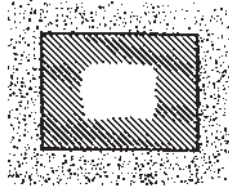
انقباض قطعه در حالت جامد که در حقیقت کوچک‌شدن همه جانبه قطعه ریختگی است را مدل‌ساز می‌تواند با بزرگ‌تر در نظر گرفتن مدل جبران کند. به هر حال به این نکته مهم توجه کنید که عدم کنترل صحیح انقباض فلز در حالت جامد می‌تواند موجب معایبی نظیر تابیدن و به وجود آمدن ترک‌های حرارتی در قطعات ریختگی گردد.

۲-۴-۳- چگونگی انجماد فلزات خالص

هنگامی که فلز مذاب در داخل قالبی ریخته شود انجماد آن به دو صورت انجام می‌گیرد:

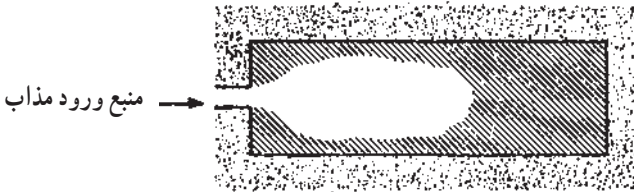
الف - انجماد همه جانبه - انجماد مذاب از جداره قالب شروع شده و پوسته جامد فلز به

تدریج به طرف مرکز قطعه شبیه آنچه که در شکل ۱۵-۳ نشان داده شده ادامه می‌یابد.



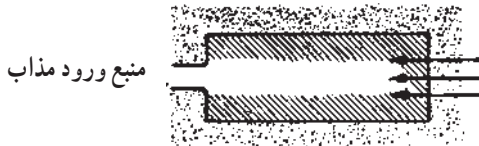
شکل ۳-۱۵- انجماد همه جانبه

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.



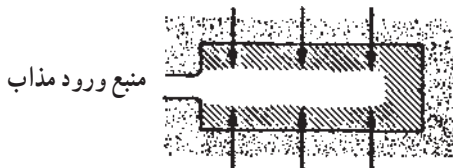
شکل ۳-۱۶- نمایش انجماد جهت دار

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.



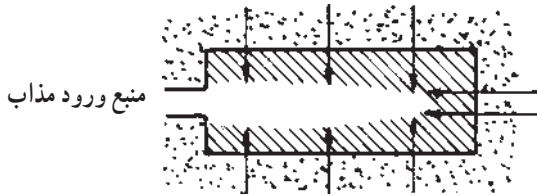
شکل ۳-۱۷

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.



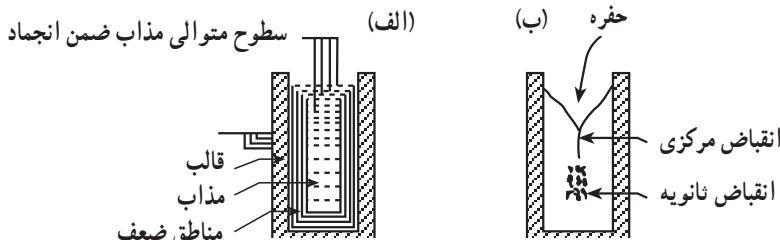
شکل ۱۹-۳

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 (بعدها 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



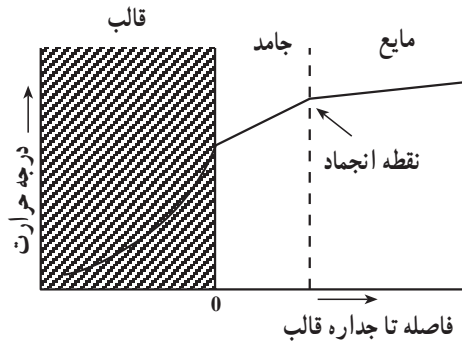
شکل ۲۰-۳ چگونه ایجاد حفره‌های انقباضی در یک شمش ریختگی

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

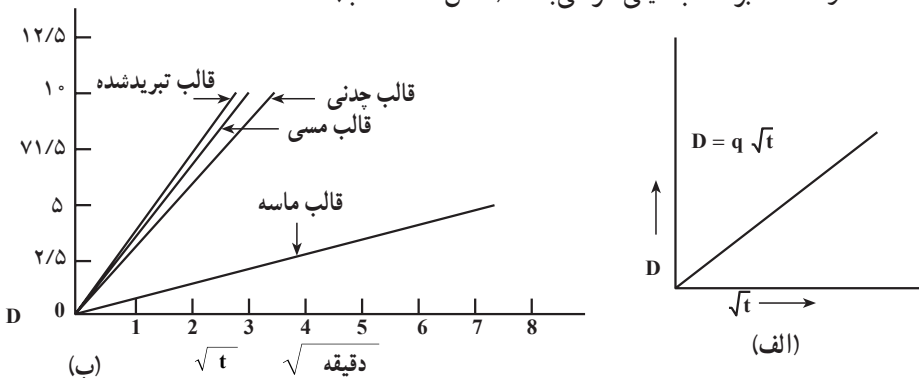
t: زمان از شروع انجماد بر حسب min

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° 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).



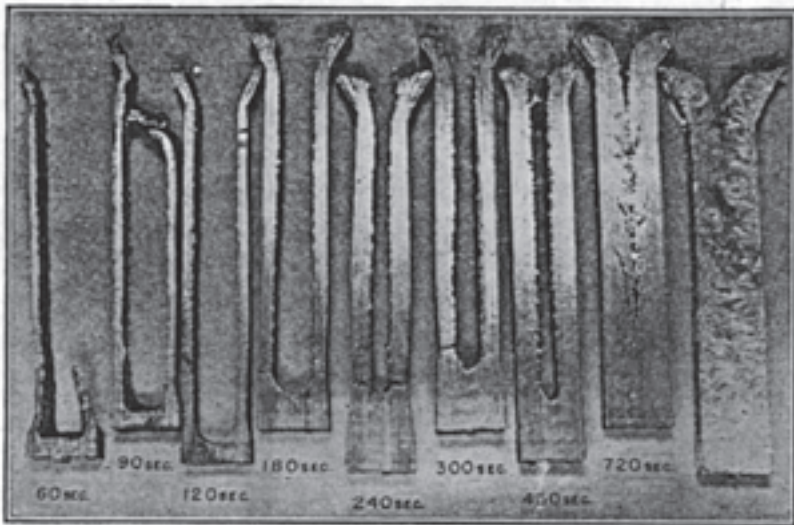
در صورتی که چند قطعه ریختگی با اشکال و اندازه‌های مختلفی در قالب با یک جنس و فلز مشابه ریخته شود زمان لازم برای انجماد کامل مذاب بستگی به مجذور نسبت حجم به سطح آن‌ها دارد. این رابطه توسط چورنیف به دست آمده و به قانون یا قاعده چورنیف معروف است.

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

بر مبنای این رابطه یک مکعب فولادی به طول ۵ سانتی‌متر برای منجمد شدن نیاز به $\frac{1}{4}$ زمان لازم برای مکعبی فولادی به طول ۱۰ سانتی‌متر 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.

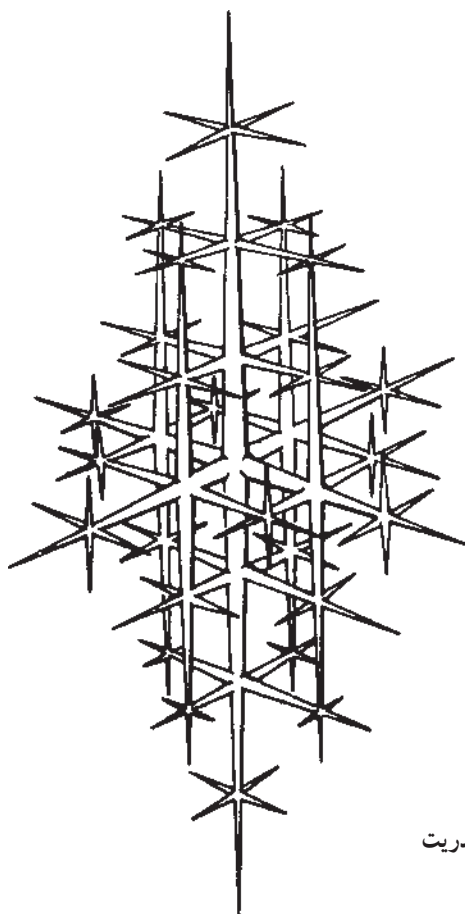
اگر چه رابطه بالا یعنی رابطه چورنیف تقریبی بوده و تأثیر گوشه‌ها در قالب و بعضی از عوامل مهم دیگر در نظر گرفته نشده است. به هر حال این رابطه الگویی است که می‌تواند مورد استفاده ریخته‌گران قرار گیرد. ریخته‌گران می‌توانند اقدام به تعیین ضریب K برای قطعات ریختگی تولیدی خود نموده و روابط دقیق‌تر را با اساس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

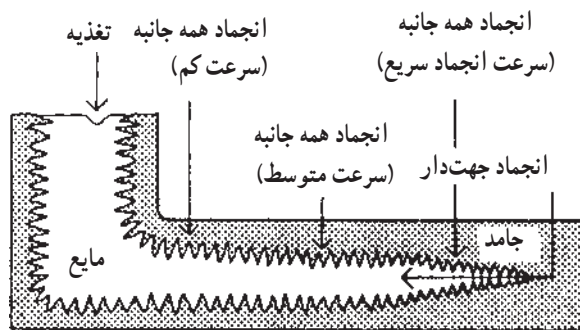


همان طوری که قبلاً گفته شد مذاب به مجرد تماس با جداره قالب جامد شده و این قشر جامد در اکثر قریب به اتفاق فلزات در شرایط ریخته‌گری متداول به صورت شاخه و برگ‌های درخت کاج یا دندریت در داخل مذاب شکل ۲۴-۳ به طرف گرم‌ترین منطقه قطعه ریختگی (معمولاً مرکز قطعه) رشد می‌نماید. رشد دندریتی به صورت پی‌درپی روی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

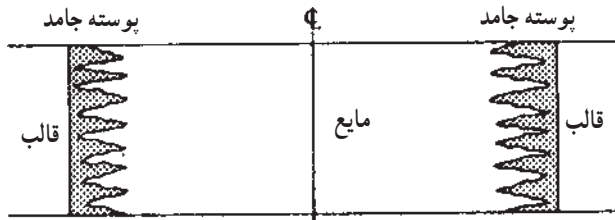
- ۱- منطقه جامد که در مجاورت جداره قالب قرار دارد.
 - ۲- منطقه خمیری که از مذاب و کریستال‌های جامد و دندریت تشکیل یافته است و در مجاورت منطقه جامد قرار دارد.
 - ۳- منطقه مذاب که پس از منطقه خمیری قرار دارد. ماهیت منطقه خمیری از نظر وسعت و شکل تأثیر بسیار زیادی در مرغوبیت قطعات ریختگی دارد.
- در شکل ۲۵-۳ 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.



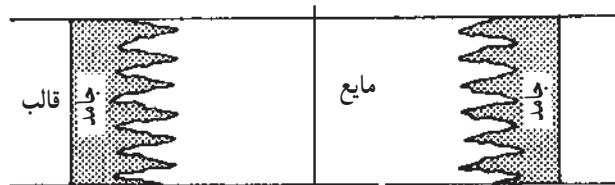
شکل ۲۵-۳- نحوه شماتیکی رشد مذاب روی جداره قالب

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)

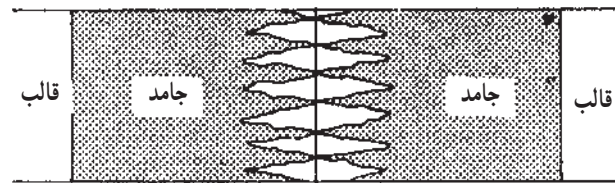
آخرین مذاب باقیمانده در قطعه قرار دارد که در مراحل انتهایی انجماد به جامد تبدیل می‌گردد. در شکل ۲۶-۳ موضوع فوق به طور شماتیکی و به وضوح نشان داده شده است.



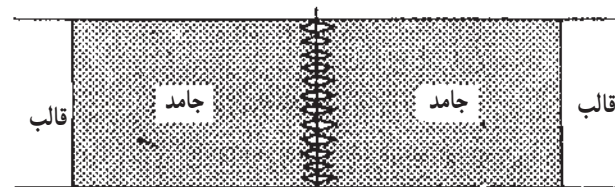
مرحله اولیه انجماد



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.

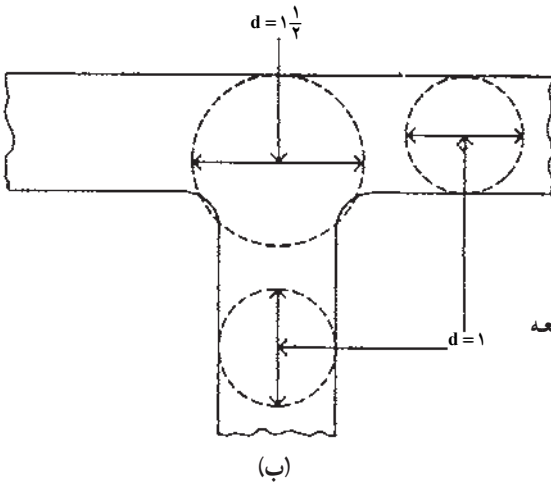
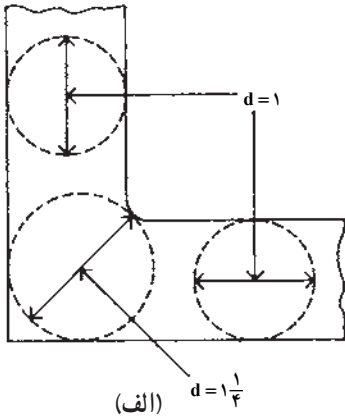
آلیاژی که دارای فاصله محدود لیکوئیدوس و سالییدوس (دامنه‌ی انجماد کم) است دارای منطقه خمیری کوتاهی نیز در جلوی جبهه انجماد می‌باشد. شیب حرارتی در قالب نیز (اختلاف درجه حرارت برای واحد طول) تأثیر مشابه‌ای بر عرض منطقه خمیری دارد. یعنی هر قدر شیب حرارتی قالب تندتر (بیش‌تر) گردد عرض منطقه خمیری نیز کاهش 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.

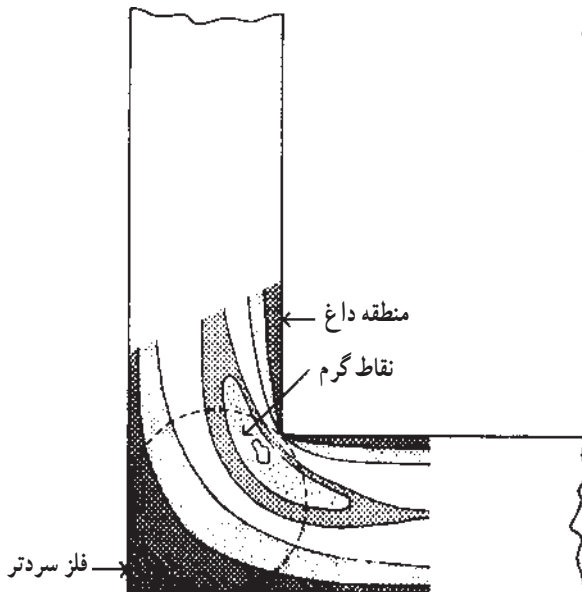
بدیهی است آخرین مذاب باقیمانده در چنین نقاطی بوده و در نتیجه حفره‌های انقباضی نیز در این محل‌های تمرکز حرارتی به وجود می‌آید. در قسمت L شکل ضخیم‌ترین قسمت، محل تماس قسمت‌های افقی و عمودی قطعه خواهد بود. به همین دلیل در چنین قطعاتی امکان وجود حفره‌های

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

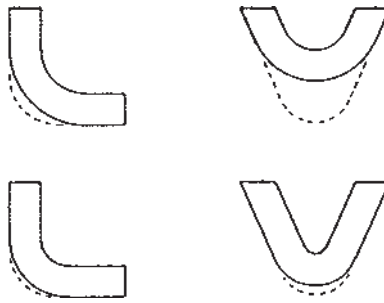
نحوه گسترش و ادامه انجماد یک قطعه L شکل توسط خطوط ایزوترم (هم‌دما) در شکل ۲۸-۳ نشان داده شده است.



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

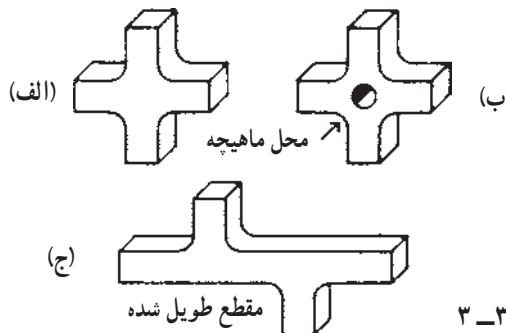
بدیهی است حفره انقباضی در منطقه تمرکز حرارتی نشان داده شده در دایره محیطی در قسمت ضخیم قطعه به وجود خواهد آمد.

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.

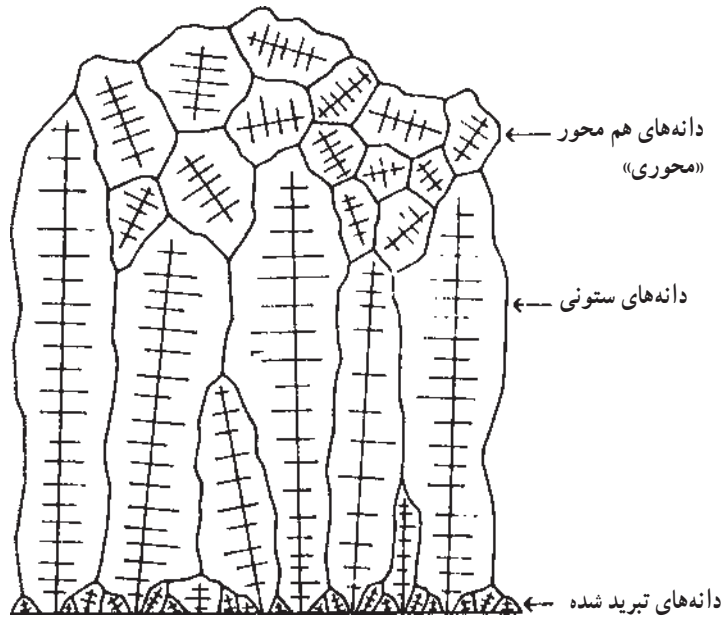
مراحل اولیه انجماد در صورتی که قالب به اندازه کافی سرد باشد با تشکیل سریع پوسته‌ای از فلز جامد همراه می‌باشد. این پوسته دارای ساختمانی با کریستال‌های بسیار ریز بوده که اصطلاحاً دانه‌های تبرید^۱ شده (سریع سرد شده) نامیده می‌شود. پس از تشکیل این لایه، کریستال‌های دندردیتی درشت‌تر از روی این لایه به طرف 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^۲ 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^۳ 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

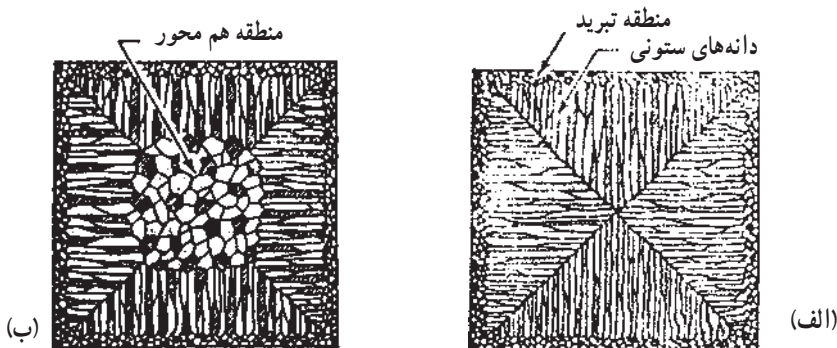
۲-Columnar grains

۳-Equiaxed grains or crystals



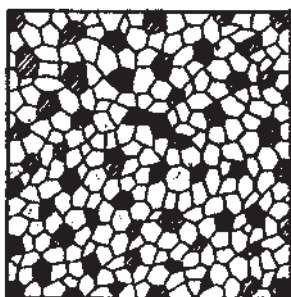
شکل ۳۱-۳- نمای شماتیکی مقطع جنبی یک قطعه ریختگی

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 آلومینیومی یا آلایژهای 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

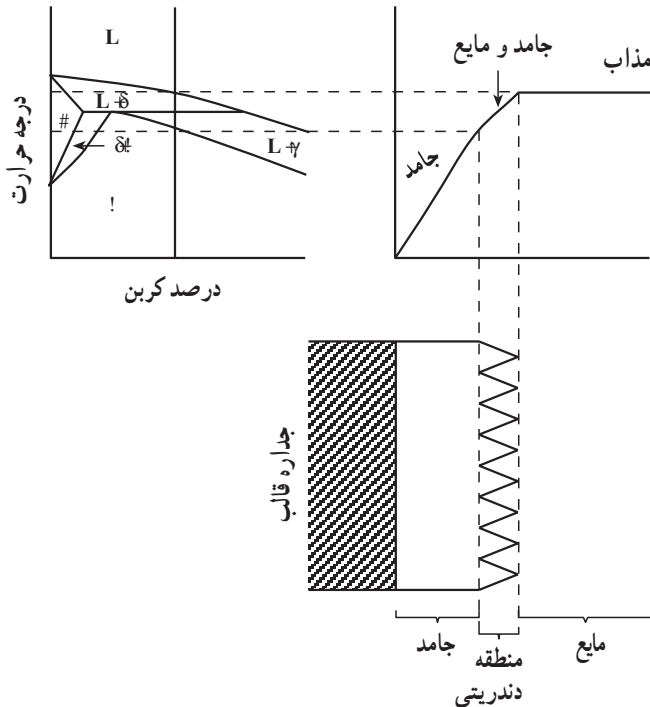
قطعات ریختگی با ساختمان کریستال‌های ستونی شکل ۳۲-۳ ب معمولاً دارای حفره‌های گازی و ناخالصی‌های کمتری در مقایسه با قطعات ریختگی با ساختمان دانه‌های هم محور می‌باشد. ولی از آنجایی که استحکام کریستال‌های ستونی در جهت رشد و عمود بر جهت رشد آن‌ها متفاوت است (در جهت رشد دارای مشخصات مکانیکی بهتری است) بنابراین 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 سرد شدن 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.

اصول تغذیه گذاری در قطعه‌های ریختگی

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

- ۱- انقباض فلزات و لزوم استفاده از تغذیه را شرح دهد.
- ۲- تغذیه در قطعه‌های ریختگی را توضیح دهد.
- ۳- انجماد و اصول تغذیه را شرح دهد.
- ۴- محل تغذیه و انجماد جهت‌دار را شرح دهد.
- ۵- اجزای تغذیه را توضیح دهد.
- ۶- انواع تغذیه‌ها را تقسیم‌بندی کند.
- ۷- روشهای افزایش راندمان تغذیه را تشریح کند.

۴- اصول تغذیه‌گذاری^۱ در ریخته‌گری

تعریف

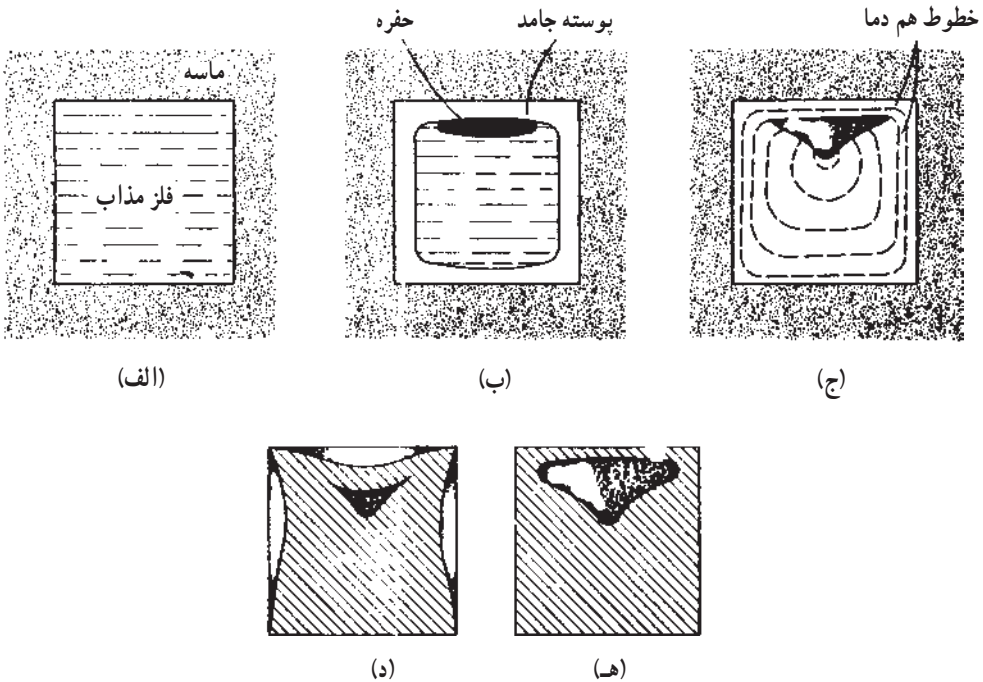
تغذیه‌گذاری در ریخته‌گری عملی است برای جبران تغییرات حجمی فلز در حالت مایع و ضمن انجماد به منظور تولید قطعات ریختگی عاری از عیبه‌های انقباضی.

۱- ۴- انقباض فلزات و لزوم استفاده از تغذیه

همان‌گونه که قبلاً در بحث انجماد گفته شد مذاب پس از آن که درون قالب ریخته می‌شود در خلال سرد شدن در سه حالت مذاب، حین انجماد و جامد منقبض می‌گردد. انقباض در حالت جامد

^۱ - Feeding

در مدل‌سازی جبران می‌گردد و انقباض در دو حالت مذاب و حین انجماد باید به وسیله مذاب اضافی جبران شود. در صورتی که این دو انقباض به وسیله مذاب جبران نشود باعث به وجود آمدن حفره‌هایی در قطعه ریختگی می‌گردد. شکل ۱-۴ چگونگی مراحل انجماد و به وجود آمدن حفره در قطعه ریختگی را نشان می‌دهد.



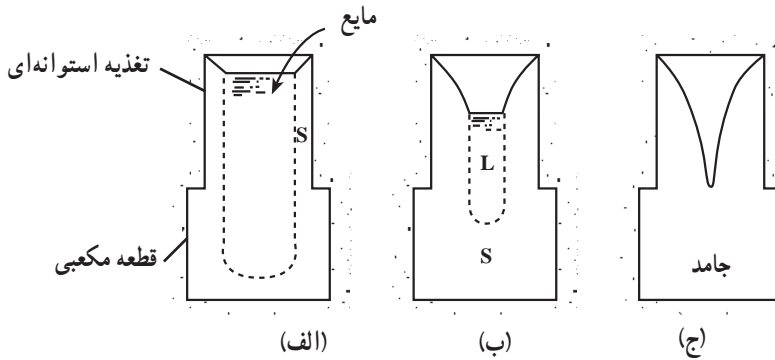
شکل ۱-۴ - شماتیک مراحل انقباض یک نمونه‌ی مکعبی (الف): فلز مذاب اولیه پس از بارریزی (ب): جامد شدن پوسته و شکل‌گیری حفره‌ی انقباضی (ج): انقباض داخلی (د): انقباض داخلی همراه با مقعر شدن (تغییر ابعادی) (هـ): سوراخ شدن سطح و ارتباط حفره با محیط اطراف

عیوب انقباضی ممکن است به صورت عیوب انقباضی داخلی (حفره)، انقباض داخلی (حفره) همراه با مقعر شدن و یا سوراخ شدن سطح در قطعات بوجود آید. بوجود آمدن این عیوب، بستگی به نوع آلیاژ دارد. به عنوان مثال، در آلیاژهای با لایه‌ی پوسته‌ی منجمد شده‌ی ضخیم، عیوب انقباضی (حفره) داخلی بوجود می‌آید و تغییر فرم در سطح وجود ندارد.

۱-۴-۱ تغذیه در قطعه‌های ریختگی

به منظور محدود کردن و رفع عیوب ناشی از انقباض در قطعه‌های ریختگی از تغذیه استفاده

می‌شود. وظیفه‌ی اصلی تغذیه، متمرکز کردن انقباض مذاب و فراهم آوردن امکان مذاب رسانی به قسمت‌های در حال انجماد در داخل قالب (قطعه‌ی ریخته شده) می‌باشد. در شکل ۲-۴ به طور



شکل ۲-۴ - نحوه‌ی انجماد قطعه‌ی مکعبی از فلز خالص (الف):
مراحل اولیه‌ی انجماد (ب): در خلال انجماد (ج): خاتمه‌ی انجماد

ساده، رفتار یک تغذیه‌ی استوانه‌ای که به روی یک قطعه مکعبی قرار گرفته نشان داده شده است. در این مثال تغذیه و قطعه کلاً در درون قالب ماسه‌ای قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که در شکل ۲-۴ ملاحظه می‌گردد، انقباض در تغذیه متمرکز می‌شود و بعداً از قطعه‌ی تمام شده جدا می‌گردد.

۲-۴ - انجماد^۱ و اصول تغذیه

قبل از پرداختن به جزئیات تغذیه، در این قسمت لازم است به منظور آشنایی بیشتر دانش‌آموزان، انواع انجماد فلزات که یقیناً تأثیر مهمی در مذاب‌رسانی تغذیه دارند، مورد بحث و بررسی قرار گیرد. فلزات و آلیاژها دارای انواع مختلف انجماد می‌باشند. اما خوشبختانه از جهت بحث تغذیه می‌توان آنها را به سه گروه اصلی تقسیم نمود که عبارتند از:

- آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد کوتاه (کم‌تر از 5°C) یا انجماد پوسته‌ای
- آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد متوسط (بین 5°C تا 11°C) یا انجماد پوسته‌ای - خمیری (میانی).

– آلیاژهای با دامنه انجماد طولانی (بیشتر از 11°C) یا انجماد خمیری.
 ارزش این نوع تقسیم بندی از آنجا ناشی می شود که روش انجماد در نحوه ی مذاب رسانی به وسیله تغذیه و جبران انقباض مذاب بسیار اهمیت دارد، به گونه ای که عامل اصلی در تعیین محل تغذیه، تعداد منابع تغذیه، اندازه ی تغذیه، نوع تغذیه و غیره محسوب می گردد.
 تقسیم بندی فلزات و آلیاژها برحسب نحوه انجماد در جدول ۴-۱ به طور خلاصه فهرست شده است.

جدول ۴-۱ – تقسیم بندی فلزات و آلیاژها برحسب طریقه ی انجماد

| انجماد پوسته ای ^۱ | انجماد میانی (پوسته ای - خمیری) | انجماد خمیری |
|--|---|----------------------------|
| فلزات خالص | مس – برلیوم | آلیاژهای آلومینیم |
| فولادهای کم کربن | برنز – سیلیسیم | (به جز آلومینیم – سیلیسیم) |
| مس های تجاری | مس – نیکل (5° – 5°) | آلیاژهای منیزیم |
| آلومینیم تجاری | فولادهای کم آلیاژ و کم کربن | برنزهای قلع |
| برنز – آلومینیم | | برنج قرمز |
| آلومینیم – سیلیسیم | | آلیاژهای توپ |
| آلیاژهای نزدیک نقطه یوتکتیک ^۲ | مس – قلع با ۱ تا ۲ درصد | برنزهای سرب دار |
| برنج های زرد (تعدادی) | قلع | نقره نیکل |
| روی تجاری | | برنج های زرد (تعدادی) |
| قلع تجاری | | فولادهای پرکربن |
| برنج سیلیسیم دار | | برخی از فولادهای آلیاژی |
| مس – نیکل | | |
| برنز – منگنز | | |

۱ – Skin Freezing

۲ – یوتکتیک اصطلاحی است که در متالورژی فیزیکی در مورد آن بحث خواهد شد.

۱-۲-۴ - فلزات و آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد کوتاه (انجماد پوسته‌ای)

این گروه که شامل فلزات خالص و برخی آلیاژها هستند،

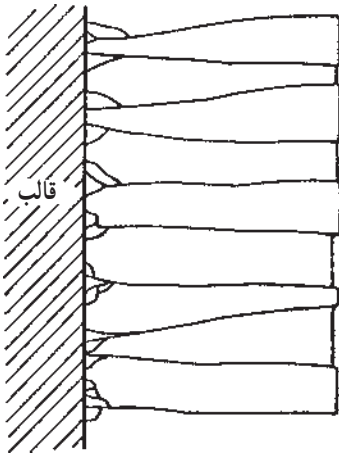
در جدول ۱-۴ به طور خلاصه نشان داده شده‌اند.

در این آلیاژها، بلافاصله پس از رسیدن درجه‌ی حرارت

مذاب به نقطه‌ی انجماد، انجماد در جداری قالب آغاز می‌شود.

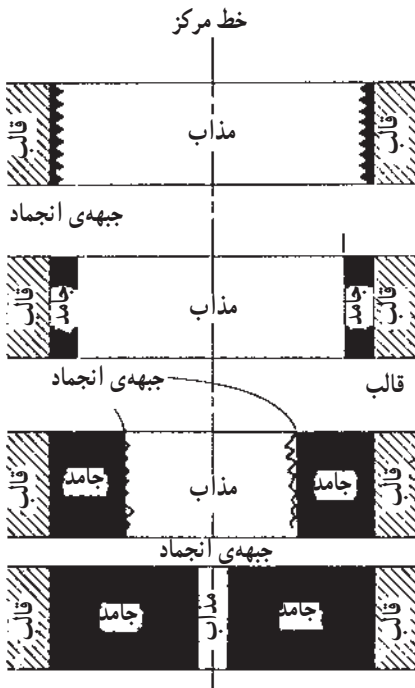
در این حالت، در فصل مشترک قالب و مذاب هسته‌های انجماد

شکل گرفته و به طرف مرکز قالب ادامه می‌یابد (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ - رشد کریستال‌ها در انجماد

یک فلز خالص از دیواره‌ی قالب



شکل ۴-۴ - شماتیک مراحل انجماد یک فلز خالص (با دامنه‌ی

انجماد صفر) انجماد از جداری قالب آغاز شده و به طرف مرکز

ادامه یافته و جبهه‌ی انجماد به شکل صاف و هموار است.

از ویژگی‌های مهم انجماد فلز خالص، این

است که معمولاً جبهه‌ی انجماد در آنها به صورت

تقریباً هموار و صاف است، همان‌گونه که در شکل

۴-۴ نشان داده شده است.

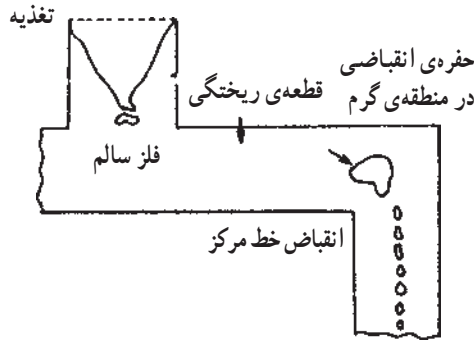
در آلیاژهای با انجماد پوسته‌ای، ناحیه‌ی

خارجی قطعه به طور یکنواخت منجمد می‌گردد.

انقباض در نواحی با ضخامت زیادتر که زمان

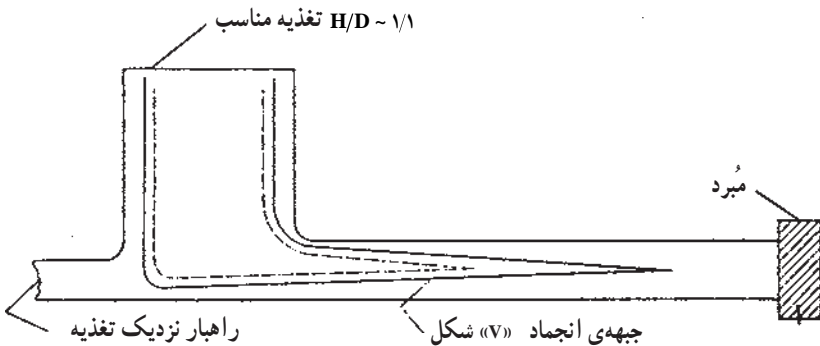
انجماد طولانی‌تری دارد، ظاهر می‌شود.

در منبع تغذیه، کشیدگی حالت کیفی و عمیق دارد. در فلزات خالص (با دامنه‌ی انجماد صفر) سطح حفره‌ی انقباضی صاف است و شکل هندسی دارد. اما در مواد با خلوص کم‌تر (با دامنه‌ی انجماد کوتاه) حفره‌ی انقباضی، کم‌تر شکل منظم هندسی دارد. تصویر حفره‌های انقباضی در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



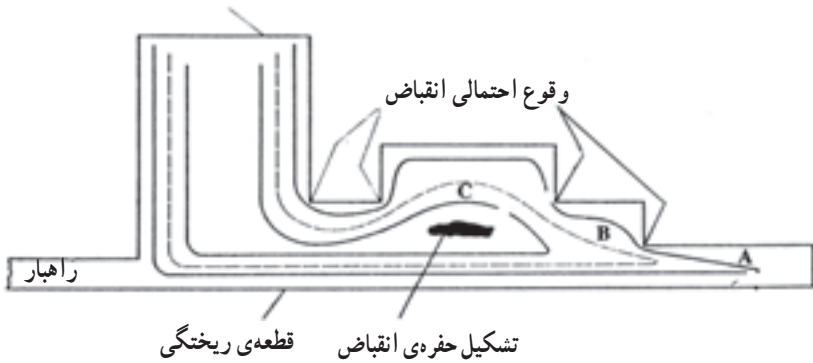
شکل ۴-۵ - شکل‌های مختلف انقباضی در آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد کم

تغذیه‌گذاری در آلیاژهای با انجماد پوسته‌ای بر این اصل استوار است که همواره مقداری مذاب کافی در مراکز نقاط گرم قطعه به عنوان ذخیره وجود داشته باشد. در این آلیاژها در صورت لزوم از موادی برای افزایش سرعت انجماد در نقاط دور از تغذیه استفاده می‌شود که این مواد را مبرد گویند (شکل ۴-۶).

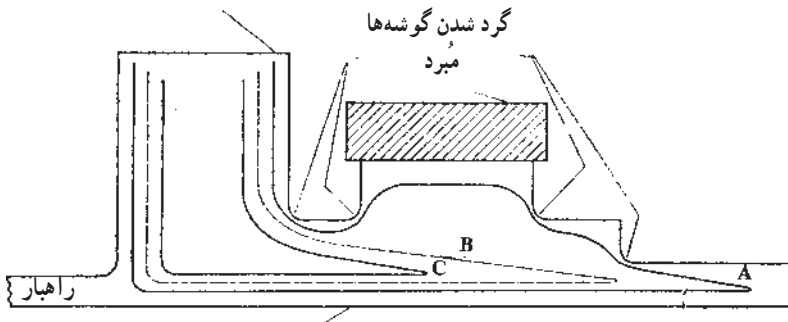


شکل ۴-۶ - انجماد جهت‌دار در آلیاژهای با انجماد پوسته‌ای

در شکل ۴-۷ در قسمت (C) منطقه گرم را داریم که باعث تشکیل حفره انقباضی می‌شود و در شکل ۴-۸ با استفاده از مبرد این عیب برطرف شده است.



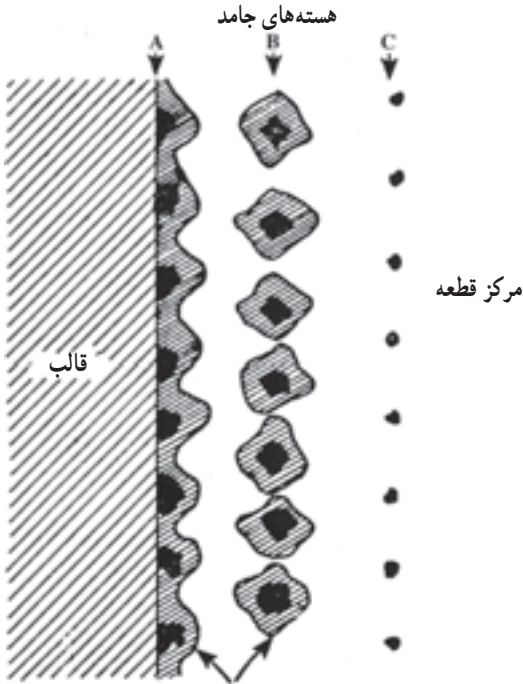
شکل ۴-۷ - اثر مراکز گرمایی منطقه‌ای در انقباض آلیاژهای پوسته‌ای



شکل ۴-۸ - استفاده از مبرد به منظور محدود کردن مراکز گرمایی منطقه‌ای

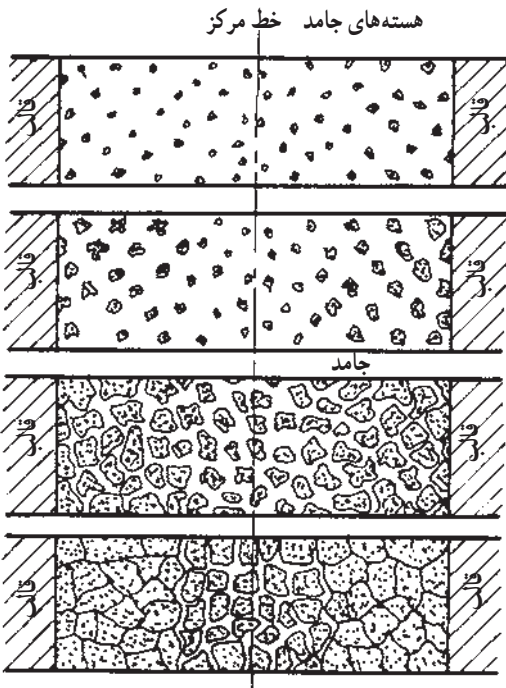
۲-۲-۴ - فلزات و آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد طولانی (انجماد خمیری)

تعداد زیادی از آلیاژهای تجارتي مهم، دارای انجماد خمیری می‌باشند. جدول ۱-۴ نشان می‌دهد که تقریباً بیشتر آلیاژهای سبک و تعدادی از آلیاژهای مس و آهن در این گروه قرار دارند. هنگامی که این آلیاژها تحت شرایط معمول ریخته‌گری می‌شوند، ابتدا (همانند آلیاژهای با انجماد پوسته‌ای) انجماد در اطراف جداره‌ی قالب به محض رسیدن درجه‌ی حرارت مذاب به نقطه‌ی انجماد آغاز می‌گردد. از این مرحله به بعد، نحوه‌ی انجماد آلیاژهای با انجماد خمیری و پوسته‌ای کاملاً متفاوت می‌باشد.



شکل ۹-۴ - تأخیر در رشد کریستالها در آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد طولانی (خمیری)

هنگامی که اولین هسته‌های جامد در مرز مشترک قالب و مذاب بوجود آمد، رشد این هسته‌ها به طرف مرکز قالب متوقف می‌شود در این حالت، انجماد جهت‌دار به طرف مرکز صورت نمی‌گیرد شکل ۹-۴ نشان می‌دهد که در جداره‌ی قالب، یک لایه‌ی نازک منجمد شده به وجود آمده است. اما این انجماد به طرف مرکز قالب ادامه نیافته بلکه هسته‌های دیگر در قسمتهای مختلف قالب شروع به شکل‌گیری نموده است.



با گذشت زمان و سرد شدن مذاب، هسته‌های زیادی در کل محفظه‌ی قالب بوجود می‌آید. (شکل ۱۰-۴). این هسته‌ها به تدریج در جهات مختلف رشد می‌نمایند. زمانی که هسته‌ها به یکدیگر می‌رسند، رشد آنها متوقف می‌گردد.

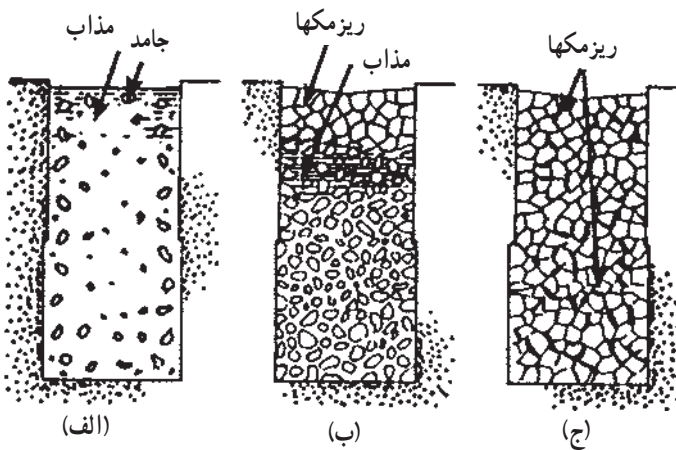
شکل ۱۰-۴ - شماتیک مراحل انجماد آلیاژهای با انجماد خمیری

نکته‌ی مهم و اساسی در آلیاژهای با انجماد خمیری، مذاب رسانی در لابلای دانه‌های منجمد شده می‌باشد. مشکل مذاب رسانی به ویژه با توجه به کاهش درجه‌ی حرارت و در نتیجه کاهش سیالیت مذاب، پیچیده‌تر می‌شود. جبران نشدن انقباض مذاب در بین دانه‌های منجمد شده، سبب ایجاد مکهای انقباضی ریز و پراکنده‌ی زیاد خصوصاً در مناطق گرم‌تر قطعات می‌شود. به طور کلی، مذاب رسانی در آلیاژهای با انجماد خمیری در سه مرحله انجام می‌شود (شکل ۱۱-۴).

مرحله‌ی اول: در این مرحله ذرات جامد شده، در داخل مذاب شناور هستند و در نتیجه انقباض ناشی از انجماد به دلیل حرکت آزاد مذاب براحتی جبران می‌شود.

مرحله‌ی دوم: در این مرحله ذرات جامد شده بزرگ می‌شود و در نتیجه، حرکت آزاد مایع محدود می‌گردد و فقط از کانالهای خاص مذاب رسانی به منظور جبران انقباض انجام می‌شود.

مرحله‌ی سوم: در این مرحله ذرات جامد شده کاملاً به هم رسیده، ارتباط مذاب آزاد با قسمت‌های جامد شده قطع می‌شود که در نتیجه، قسمتهایی از مذاب در بین ذرات جامد شده محصور می‌گردند. مذاب‌های محبوس شده، پس از انجماد، امکان جبران انقباض را (به دلیل قطع ارتباط با تغذیه و مذاب) از دست می‌دهند و بنابراین انقباضات پراکنده، در سراسر قطعه پخش می‌شود.

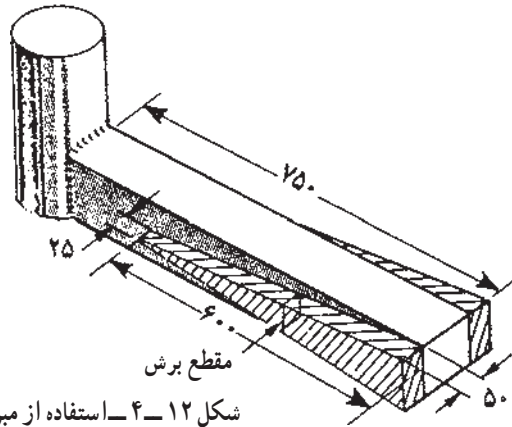


شکل ۱۱-۴ - مراحل انجماد و انقباض در آلیاژهای بادامنه‌ی انجماد طولانی

برای اطمینان از سلامت قطعه در این گونه آلیاژها، فقط انجماد جهت‌دار به طرف تغذیه نمی‌تواند کافی باشد؛ بلکه باید از انجماد جهت‌دار مرحله‌ای استفاده نمود. به عبارت دیگر، هنگامی که دورترین نقطه‌ی قطعه‌ی ریخته‌گی به تغذیه منجمد شود مذاب نزدیک تغذیه باید در اولین مرحله‌ی

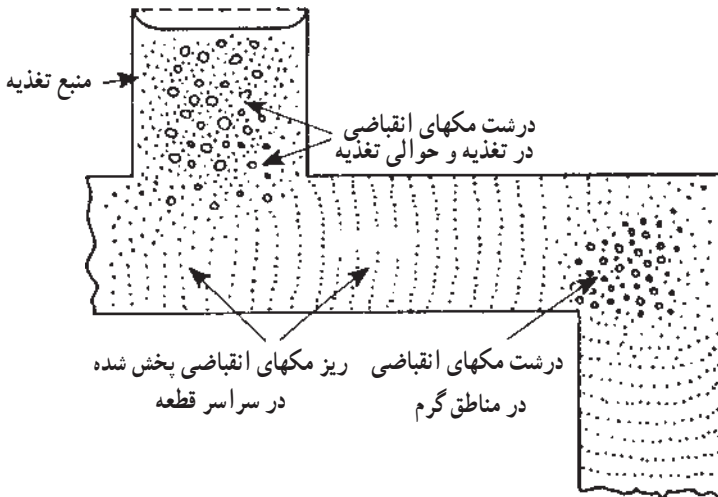
انجمادی باشد.

شکل ۱۲-۴، با استفاده از مبرّد گّوه شکل شیب‌دمایی مناسب را فراهم می‌سازد.



شکل ۱۲-۴- استفاده از مبردهای گوه‌ای در آلیاژهای بادامه‌ی انجماد طولانی

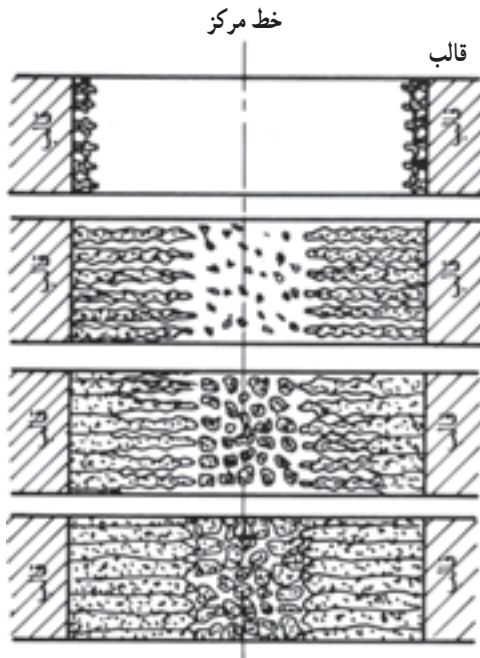
انقباض و مکهای انقباضی در آلیاژهای بادامه‌ی انجماد طولانی، نوعاً مانند شکل ۱۳-۴ می‌باشد. معمولاً مکهای انقباضی درشت‌تر، در گرمترین قسمت قطعه به وجود می‌آیند، در حالی که در مناطق دیگر ریز مکهای انقباضی به صورت پراکنده ملاحظه می‌شود.



شکل ۱۳-۴- شکل‌های مختلف مکهای انقباضی در آلیاژهای بادامه‌ی انجماد طولانی

۳-۲-۴ - فلزات و آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد متوسط (انجماد میانی)

در این آلیاژها، طریقه انجماد ترکیبی از انجماد پوسته‌ای و خمیری می‌باشد. شکل ۱۴-۴- مراحل انجماد در آلیاژهای میانی را نشان می‌دهد.



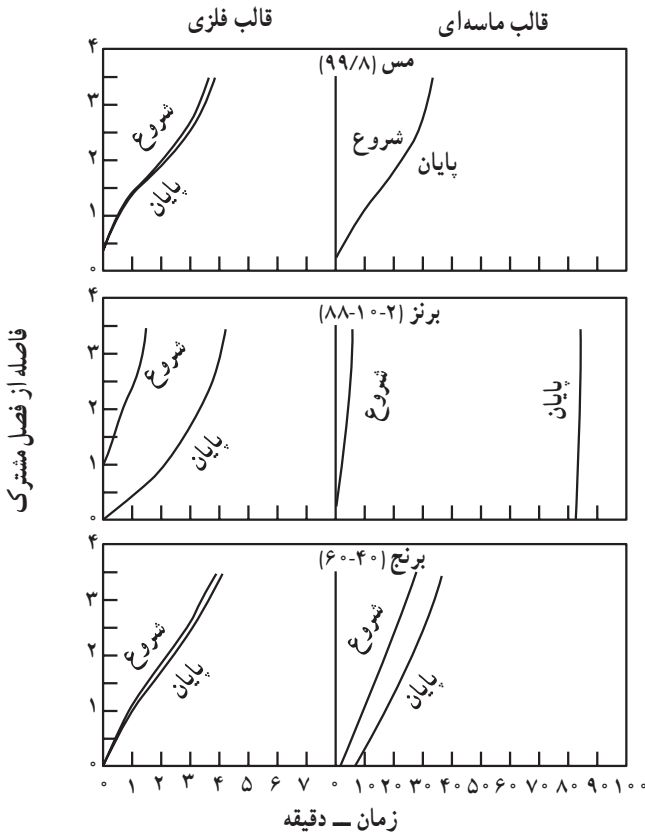
شکل ۱۴-۴ - مراحل انجماد در آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد متوسط

نکته قابل توجه این است که حتی در آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد کوتاه ممکن است در قطعات ضخیم، به این نوع انجماد متمایل شوند و بر عکس، در آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد طولانی در قسمت‌های نازک تمایل به، انجماد میانی وجود دارد. از طرف دیگر، معمولاً در این گونه آلیاژها، انجماد، در جداره‌ی قالب (فصل مشترک قالب و مذاب) به پوسته‌ای شدن متمایل دارد و در مرکز قالب حالت خمیری می‌یابد.

آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد متوسط نسبت به سرعت سرد کردن و انتقال حرارت از قالب حساس می‌باشند. ممکن است آلیاژهایی که در قالب ماسه‌ای رفتاری مطابق آلیاژهای میانی دارند، در قالب‌های فلزی مانند آلیاژهای با انجماد پوسته‌ای رفتار نمایند.

لازم به ذکر است که این سه نوع انجماد، دارای مرز کاملاً جدا شده از یکدیگر نمی‌باشند.

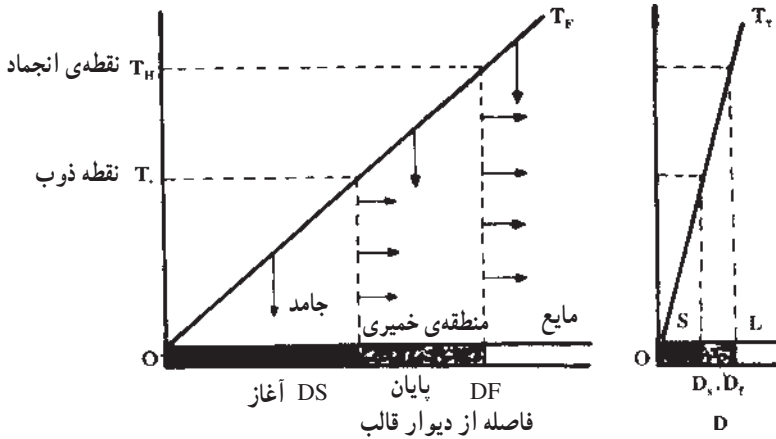
به عبارت ساده‌تر با افزایش دامنه‌ی انجماد از صفر به مقادیر بالاتر، انجماد به تدریج از حالت پوسته‌ای به خمیری تبدیل می‌شود. واسطه این تبدیل از حالت پوسته‌ای به خمیری، حالتی است که به آن انجماد میانی می‌گویند. در نتیجه بین این سه نوع انجماد، مرز خاص و مشخصی وجود ندارد. شکل ۱۵-۴ مثالی برای مقایسه سه نوع انجماد می‌باشد.



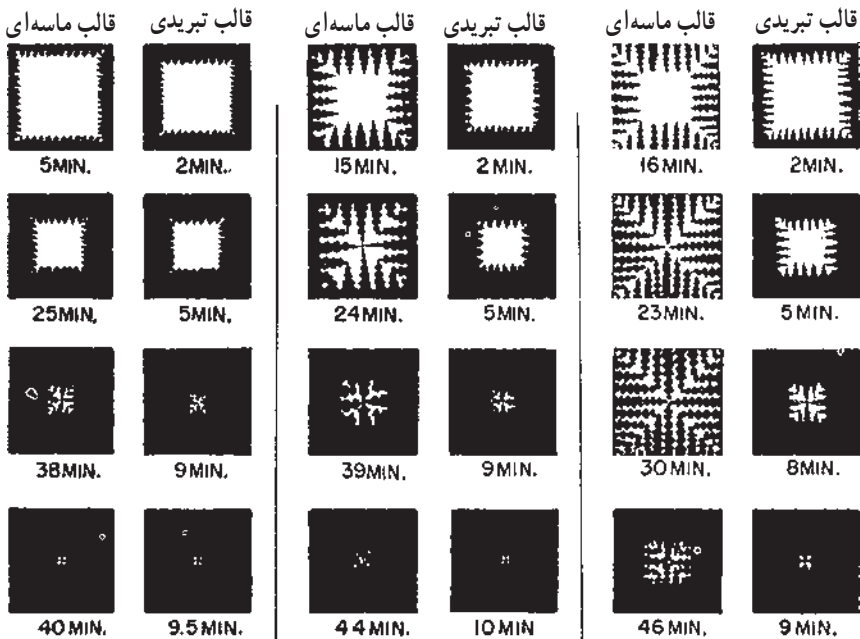
شکل ۱۵-۴ - انجماد چند نوع آلیاژ غیر آهنی

به طور کلی در این شکل، دو نوع منحنی ملاحظه می‌شود، منحنیهای «شروع انجماد» و «پایان انجماد» که در دو حالت ریخته‌گری در قالب ماسه و ریژه مورد بررسی قرار گرفته است. برای فلزات خالص نقطه‌ی شروع و پایان انجماد، بر هم منطبق می‌باشد. در آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد طولانی، نقطه‌ی شروع و پایان انجماد نه تنها بر هم منطبق نیستند بلکه کاملاً از هم مجزاً می‌باشند و هر چه دامنه‌ی انجماد طولانی‌تر باشد، فاصله زمانی بین دو منحنی شروع و پایان انجماد زیادتر می‌شود. در این منحنیها، اثر قالب (سرعت سرد کردن) نشان داده شده است. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد سرعت

سرد کردن یکی از عوامل مؤثر در تبدیل انجماد خمیری به میانی و پوسته‌ای می‌باشد. با افزایش سرعت سرد کردن ضخامت منطقه‌ی خمیری کاهش و منطقه‌ی پوسته‌ای افزایش می‌یابد. شکل ۴-۱۶ این موضوع را به صورت نمودار، به خوبی نشان داده است. شکل ۱۷-۴ نقش سرعت سرد کردن در منطقه خمیری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶-۴ - تأثیر سرعت سرد کردن در ضخامت منطقه‌ی خمیری و پوسته‌ای



شکل ۱۷-۴ - نقش وسعت منطقه‌ی خمیری تحت تأثیر سرعت سرد شدن بر روی ساختار قطعه ریختگی فولادی با ۰/۱۶۰ - ۰/۱۵۵ درصد کربن فولادی با ۰/۳۰ - ۰/۲۵ درصد کربن فولادی با ۰/۱۰ - ۰/۰۵ درصد کربن

۳-۴ - محل تغذیه و انجماد جهت دار

با توجه به وظیفه‌ی تغذیه در رساندن مذاب کافی به نواحی در حال انجماد، محل و موقعیت قرار گرفتن تغذیه، از اهمیت بسزایی برخوردار است. از طرف دیگر، برای تعیین محل صحیح تغذیه، شرط اصلی مشخص کردن جهت انجماد مذاب در قالب است؛ چرا که براساس تعریف، انجماد باید از دورترین قسمت قطعه نسبت به تغذیه آغاز شود و به صورت جهت دار ادامه یابد و در تغذیه ختم گردد. در این صورت، تغذیه می‌تواند وظیفه‌ی خود را به خوبی ایفا کند و انقباض در هر مرحله‌ی انجماد به وسیله‌ی مذاب موجود در تغذیه جبران گردد.

۱-۳-۴ - جهت انجماد

با توجه به اهمیت انجماد جهت دار، یکی از موارد مهم در طراحی تغذیه، مشخص کردن جهت انجماد به وسیله‌ی طراح به عنوان اولین گام در انتخاب سیستم تغذیه‌گذاری مناسب می‌باشد. امروزه کمک گرفتن از نرم افزارهای مناسب و عمل شبیه‌سازی انجماد مذاب داخل قالب، امری ضروری به نظر می‌رسد.

عوامل زیادی در جهت انجماد تأثیر می‌گذارند که مهمترین آنها عبارتند از:

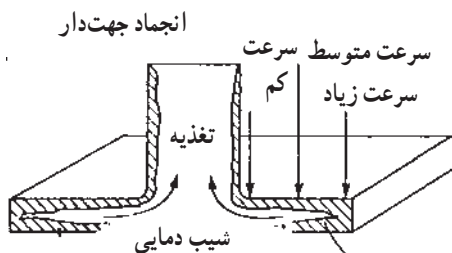
— نوع آلیاژ و مدل انجماد آن: انجماد در آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد کوتاه (پوسته‌ای) نسبت به آلیاژهای با دامنه‌ی انجماد طولانی (خمیری) جهت دارتر است.

— ابعاد محفظه‌ی قالب: ابعاد و اندازه‌ی محفظه‌ی قالب نیز عامل مهمی در تعیین جهت انجماد قطعات می‌باشد. اصولاً قطعات با ضخامت غیریکنواخت، دارای جهت‌های انجماد مختلفی هستند و پیدا کردن یک جهت انجماد در آنها مشکل است.

— طراحی قطعه‌ی ریختگی: در همین فصل، مشاهده خواهد شد که طراحی غلط مدل قطعه ریختگی در افزایش عیوب قطعات، به دلیل عدم دستیابی به انجماد جهت دار و تغذیه رسانی صحیح تا چه حد مؤثر است.

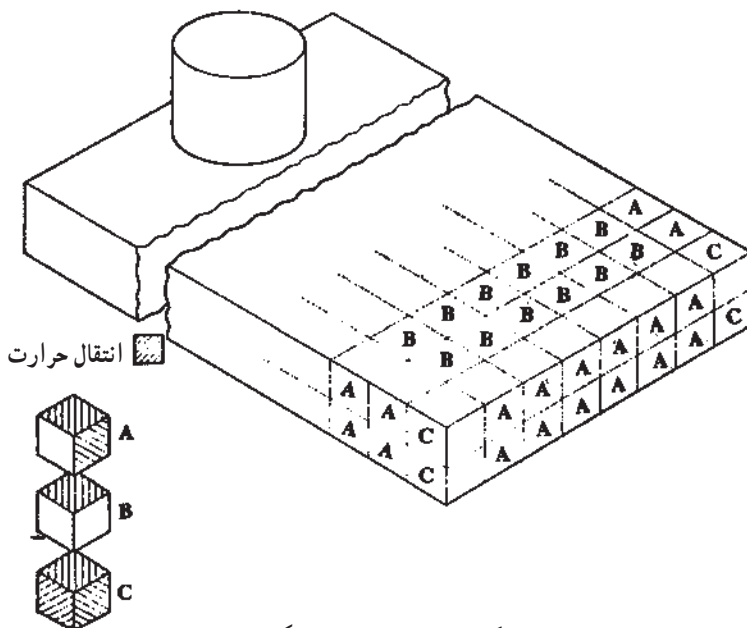
شکل ۱۸ - ۴ به طور شماتیک یک انجماد پیش‌رونده و جهت دار را به نمایش گذارده است. هنگامی که قالب از مذاب پر شد، انجماد با تشکیل یک پوسته‌ی منجمد شده در فصل مشترک قالب و مذاب آغاز می‌شود. بتدریج که حرارت از قالب به خارج هدایت می‌شود، پوسته‌ی منجمد شده به طرف داخل پیش می‌رود. در دو ناحیه، سرعت رشد لایه‌ی منجمد شده تغییر می‌کند: اول در لبه‌ی کناری قطعه که سطح تماس بیشتری وجود دارد و سرعت انجماد سریع‌تر است. دوم در نزدیک منبع تغذیه که تمرکز حرارت وجود دارد و سطح کم‌تری برای خارج شدن حرارت از قالب موجود است،

سرعت انجماد کند می‌باشد. در بین این دو ناحیه، سرعت متوسطی وجود دارد. این مجموعه، انجماد جهت‌دار را بوجود می‌آورد.



شکل ۱۸-۴ - انجماد پیش‌رونده و جهت‌دار در یک قطعه همراه با منبع تغذیه

لازم به ذکر است که انجماد در لبه‌ها و گوشه‌ها نسبت به سطوح تخت، بیشتر است. این موضوع را می‌توان با کمک شکل ۱۹-۴ مورد بررسی قرار داد. در این شکل، تصور شده که قطعه به مکعب‌های کوچک تقسیم شده است. مکعب‌هایی که با علامت A نشان داده شده در لبه‌ی قطعه قرار دارند که انتقال حرارت در آنها از دو صفحه انجام می‌شود. بنابراین، مکعبهای A زود منجمد می‌شوند.



شکل ۱۹-۴ - انجماد در گوشه‌ها و لبه‌ها

به طور مشابه مکعب‌های C که در گوشه‌ها واقع شده‌اند، انتقال حرارت از سه صفحه انجام می‌شود. لذا نسبت به مکعب‌های A سریعتر منجمد می‌گردند. در حالی که مکعب‌های B فقط از یک سطح، انتقال حرارت دارند و نتیجه این که نسبت به مکعب‌های A و C دیرتر منجمد می‌شوند. قسمت‌های گوشه و لبه که نسبت به تغذیه دورتر هستند، سریعتر منجمد می‌شوند و لذا جهت انجماد را بوجود می‌آورند.

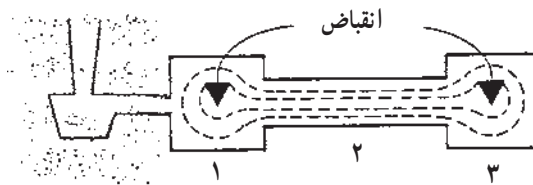
۲-۳-۴- محل تغذیه در قطعات ریخته‌گی با سطوح مقطع غیریکنواخت

اگرچه تصمیم‌گیری در این مورد که تغذیه در چه نقطه‌ای از قطعه ریخته‌گی قرار می‌گیرد مشکل است اما راهنمایی ساده آن است که تغذیه را در مجاورت نقاطی از قطعه ریخته‌گی قرار دهید که از نقاط دیگر گرم‌تر باشد. نقاط گرم محل‌هایی هستند که در مراحل سرد شدن مذاب و انجماد فلز از نقاط دیگر قطعه گرم‌تر بوده و مذاب در این نقاط دیرتر از قسمت‌های دیگر قطعه جامد می‌شود. در عمل می‌توان ضخیم‌ترین قسمت یک قطعه ریخته‌گی را به عنوان گرم‌ترین نقطه قطعه در نظر گرفت. در بیشتر مواقع می‌توان نقاط گرم قطعه ریخته‌گی را با مطالعه طرح و شکل آن پیش‌بینی کرد. این شناخت براساس مسایلی نظیر چگونگی انتقال حرارت و انجماد قطعه که در قسمت‌های پیشین به آن‌ها اشاره شد، صورت می‌پذیرد.

نقاط گرم در یک قطعه ریخته‌گی به دو دلیل به وجود می‌آیند:

- ۱- در این نقاط حجم مذاب از نقاط دیگر قطعه بیش‌تر است.
- ۲- گوشه‌هایی که در مجاورت این نقاط هستند از نوع گوشه‌های داخلی بوده و انتقال حرارت در این نوع گوشه‌ها به‌کندی انجام می‌شود.

در قطعه ریخته‌گی مطابق شکل ۲-۴ محل‌های گرم نقاط (۱) و (۳) هستند. در شرایط معمولی، قطعه در قسمت (۲) زودتر از قسمت‌های دیگر جامد می‌گردد، در حالی که قسمت (۱) که در مجاورت راه‌گاه ورود مذاب قرار دارد از قسمت‌های دیگر دیرتر جامد می‌شود.

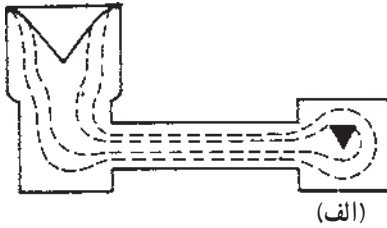


شکل ۲-۴

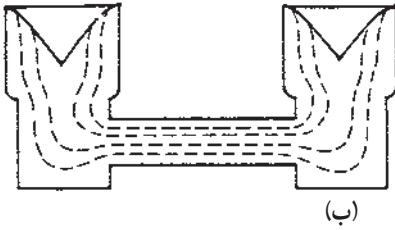
در شکل ۲-۴ قسمت‌های (۱) و (۳) به‌عنوان تغذیه برای قسمت (۲) عمل کرده یعنی حفره‌های انقباضی قسمت (۲) را پر می‌کنند. در چنین حالتی حفره‌های انقباضی در قسمت‌های (۱) و (۳) به‌وجود می‌آیند. برای آن که از ایجاد این حفره‌ها در قسمت‌های (۱) و (۳) جلوگیری شود لازم است ابتدا قسمت (۳) و سپس قسمت (۲) و در آخرین مرحله قسمت (۱) جامد گردد. در این حالت حفره‌های انقباض ایجاد شده در قسمت (۱) از طریق مذاب موجود در راهگاه جبران می‌شود. یعنی برای تهیه این قطعه به روش صحیح بایستی جامد شدن مذاب تحت یک انجماد جهت‌دار انجام گیرد. همچنین ممکن است با قرار دادن دو تغذیه در قسمت‌های (۱) و (۳) حفره‌های انقباضی به‌وجود آمده در این دو قسمت را پر کرده به‌رحال این روش به‌جز در موارد اجباری توصیه نمی‌شود زیرا به علت مصرف بیش از حد تغذیه بهره‌دهی قطعه ریختگی کاهش می‌یابد.

به‌رحال لازم به یادآوری است که در قطعه نشان داده شده در شکل ۲-۴ در صورتی که ابتدا قسمت (۲) قطعه جامد شود راه رساندن مذاب از قسمت (۱) به (۳) قطعه شده که در آن صورت ایجاد حفره‌های انقباضی در قسمت (۳) حتمی است.

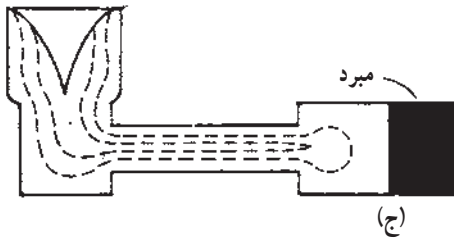
در شکل ۲۱-۴ روش‌های مختلفی را که می‌توان جهت تغذیه‌گذاری قطعه فوق به‌کار برد نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل الف - ۲۱-۴ دیده می‌شود حفره انقباضی در قسمت ضخیم قطعه به‌وجود آمده و در بیشتر موارد بزرگ‌تر نمودن تغذیه نیز نمی‌تواند برای از بین بردن این‌گونه حفره‌های انقباضی مؤثر باشد. در شکل ب - ۲۱-۴ از دو تغذیه که در قسمت‌های ضخیم قطعه قرار گرفته‌اند استفاده شده است. در چنین حالتی انجماد جهت‌دار از قسمت مرکزی قطعه به‌طرف این دو تغذیه انجام می‌گیرد. بدیهی است این روش تغذیه‌گذاری به‌دلیل بهره‌دهی پایین قطعه نمی‌تواند مورد استقبال ریخته‌گران قرار گیرد. بهترین راه برای جلوگیری از ایجاد حفره انقباضی در قسمت‌های ضخیم قطعه حذف منطقه‌های گرم و حرارتی در قطعات از طریق به‌کار بردن مبرد می‌باشد که در شکل ج - ۲۱-۴ نشان داده شده است. در این حالت انجماد به‌طور جهت‌دار از طرف قطعه ریختگی در تماس با مبرد به‌طرف تغذیه انجام می‌شود. هم‌چنین این امکان وجود دارد که توسط عایق کردن جداره‌های نازک در قطعات ریختگی به ایجاد انجماد جهت‌دار کمک کرد (شکل ۲۱-۴).



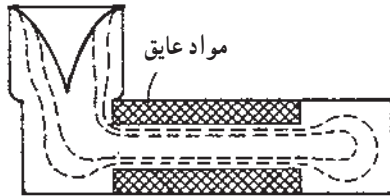
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲۱- ۴- عمل تغذیه‌گذاری در یک قطعه با

سطح مقطع غیریکنواخت

(الف) تغذیه به یک قسمت قطعه اضافه شده است.

(ب) تغذیه در دو قسمت قطعه اضافه شده است.

(ج) از مبرد برای یک قسمت قطعه و از تغذیه برای

قسمت دیگر استفاده شده است.

(د) از تغذیه در یک قسمت قطعه استفاده شده و از

مواد عایق برای مقاطع نازک قطعه

۴- ۴- اجزای تغذیه

به طور کلی، همان گونه که قبلاً نیز اشاره شد، تغذیه از دو قسمت اصلی تشکیل می‌شود، این

دو قسمت عبارتند از: منبع تغذیه و گلوئی تغذیه.

۱- ۴- ۴- منبع تغذیه

تعریف: منبع تغذیه به محلی اطلاق می‌شود که مذاب لازم را برای جبران انقباضات حجمی

مذاب و ضمن انجماد، فراهم آورد.

با توجه به تعریف فوق، مهمترین وظیفه‌ی منبع تغذیه آن است که فلز را تا زمانی که قطعه‌ی ریختگی کاملاً منجمد نشده، در خود به صورت مذاب گرم نگهداری نماید. منبع تغذیه مناسب باید سه شرط اصلی داشته باشد:

الف - به مقدار مناسب باشد.

ب - در محل مناسب قرار گیرد.

ج - در زمان مناسب منجمد شود.

علاوه بر موارد فوق، به چند نکته‌ی دیگر باید اشاره نمود:

- تعداد و اندازه منابع تغذیه باید حداقل باشد تا بازده ریختگی افزایش و قیمت تمام شده کاهش

یابد.

- محل منبع تغذیه باید به گونه‌ای انتخاب گردد تا باعث بوجود آمدن عیوب دیگر در قطعه‌ی

ریختگی نشود.

- اتصال منبع تغذیه به قطعه‌ی ریختگی باید به گونه‌ای باشد که پس از ریخته‌گری به راحتی از

قطعه جدا شود و هزینه‌ی تمام کاری را افزایش ندهد.

۲-۴-۴- گلوبی تغذیه^۱

تعریف: به محل اتصال قطعه به تغذیه، گلوبی تغذیه گفته می‌شود. مذاب رسانی صحیح و

انجماد جهت دار از قطعه به تغذیه، هنگامی امکان پذیر می‌شود که زمان انجماد گلوبی بین زمان انجماد

قطعه و تغذیه قرار گیرد. یعنی:

$$t_r > t_n > t_c$$

چنانچه گلوبی زودتر از زمان لازم منجمد شود، بدون توجه به حجم تغذیه، رابطه‌ی تغذیه و

قطعه قطع می‌شود. بنابراین اندازه‌ی گلوبی تغذیه باید به گونه‌ای باشد که مدول گلوبی (M_n) بین

مدول قطعه (M_c) و مدول تغذیه (M_r) قرار گیرد. به عبارتی:

$$M_r > M_n > M_c$$

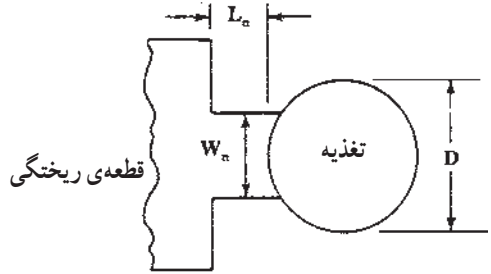
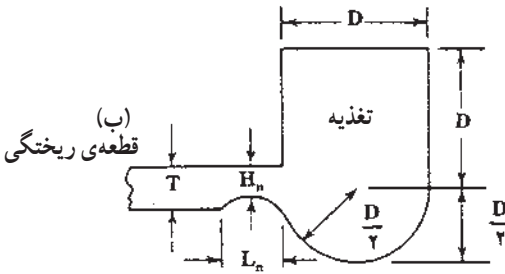
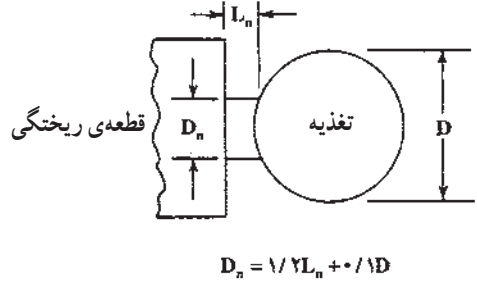
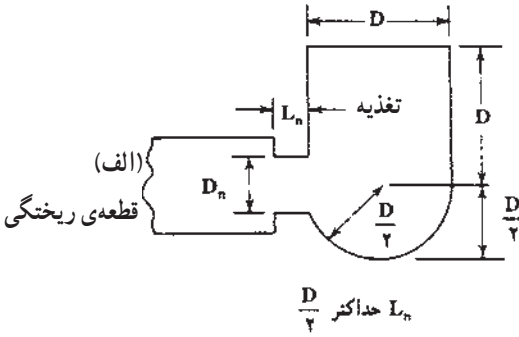
رابطه‌ی عمومی که معمولاً برای مدول گلوبی ارائه می‌گردد، عبارت است از:

$$M_n = 1/2 M_c \quad (1-4)$$

در مورد آلیاژهای با انجماد پوسته‌ای، رابطه‌ی ۱-۴ می‌تواند به حداقل خود، یعنی به

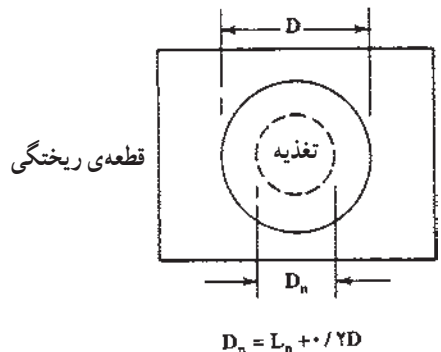
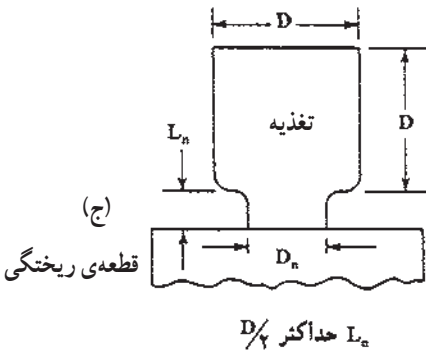
صورت ۲-۴ $M_n = 1/1 M_c$ باشد.

شکل ۲۲-۴ روابط کلی در طراحی گلوبی را برای آلیاژهای آهنی نشان می‌دهد.



L_n حداکثر $\frac{D}{\gamma}$ ، H_n از $0/6$ تا $0/8$ متغیر است.

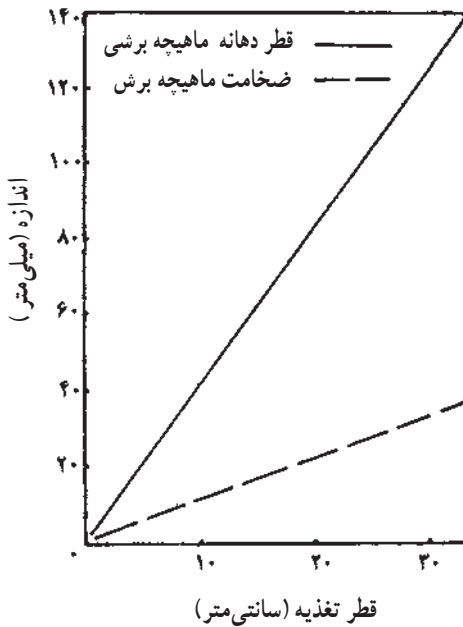
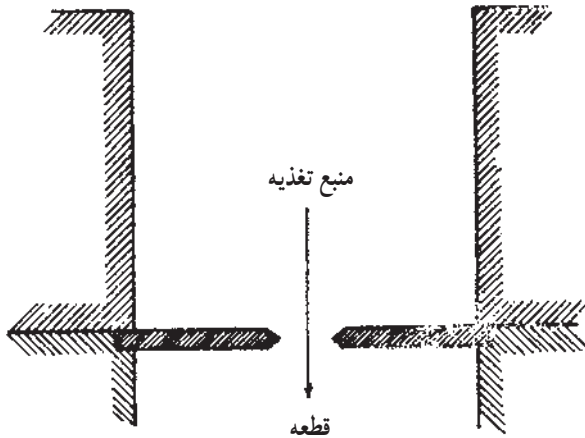
$$W_n = 2/5 L_n + 0/18 D$$



شکل ۲۲-۴-رابطه عمومی گلوبی - تغذیه مورد استفاده در آلیاژهای آهنی (نمای روبرو و بالا)

الف- نوع تغذیه‌ی جانبی ب- تغذیه‌ی جانبی برای صفحه ج- تغذیه از بالا

ماهیچه‌ی برشی: به منظور کاهش هزینه‌ی جدا کردن تغذیه از قطعه، از ماهیچه‌های برشی استفاده می‌شود. این ماهیچه‌ها همان گونه که در شکل ۲۳ - ۴ نشان داده شده، بین تغذیه و قطعه قرار می‌گیرد. ماهیچه‌های برشی، معمولاً از ماسه ماهیچه و یا مواد سرامیکی ساخته می‌شوند.



شکل ۲۳-۴- شکل ماهیچه برشی و نسبت اندازه‌های آن به قطر تغذیه

تعیین ابعاد گلوبوی تغذیه: در محاسبه‌ی اندازه‌ی گلوبوی تغذیه، رعایت نکات زیر ضروری می‌باشد.
الف: جریان انجماد باید از قطعه به طرف تغذیه باشد.

ب: رابطه $M_r > M_n > M_c$ همواره باید برقرار باشد.

ج: در محاسبات تعیین مدول گلوبوی تغذیه، از دو سطح متصل به قطعه و تغذیه باید صرف نظر شود. در محاسبات، معمولاً مدول عملی را (پس از حذف سطوح مشترک) که با M_n نمایش می‌دهند، حدود $1/4$ تا $1/7$ برابر مدول هندسی M'_n (گلوبوی تغذیه بدون حذف سطوح مشترک) منظور می‌کنند. در محاسبات دقیق‌تر، باید به حذف سطوح مشترک اقدام گردد. بنابراین:

$$M_n/M'_n = 1/4 - 1/7$$

$$M'_n/M_n = 0/6 - 0/7$$

۵-۴- انواع تغذیه

تغذیه‌ها را براساس محل قرار گرفتن آنها و ارتباط با سیستم راهگاهی، به سه دسته‌ی بزرگ تقسیم می‌کنند. این سه گروه عبارتند از:

– تقسیم بندی تغذیه براساس قرار گرفتن تغذیه قبل یا بعد از محفظه‌ی قالب

– تقسیم بندی تغذیه براساس موقعیت قرار گرفتن تغذیه نسبت به قطعه‌ی ریختگی

– تقسیم بندی تغذیه براساس ارتباط تغذیه با اتمسفر محیط

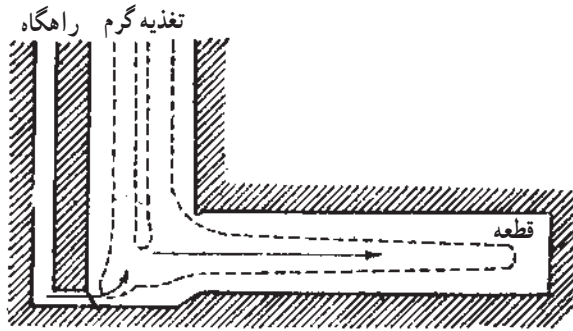
۱-۵-۴- انواع تغذیه براساس محل قرار گرفتن تغذیه، قبل یا بعد از محفظه قالب

در این نوع تقسیم بندی، معمولاً تغذیه را به دو نوع گرم و سرد تقسیم می‌کنند. شکل ۲۴-۴ این دو نوع تغذیه را نشان می‌دهد. در شکل الف، یک نوع تغذیه‌ی گرم مشاهده می‌شود، بدین مفهوم که گرمترین مذاب در آخرین مرحله بارریزی، در تغذیه قرار دارد. شکل ب تغذیه‌ی سرد را نشان می‌دهد. در این نوع تغذیه، مذاب پس از قطعه وارد تغذیه می‌شود. در این حالت مذاب داخل تغذیه نسبت به قطعه سردتر است. در هر دو نوع تغذیه شیب دمایی باید از قطعه به تغذیه باشد.

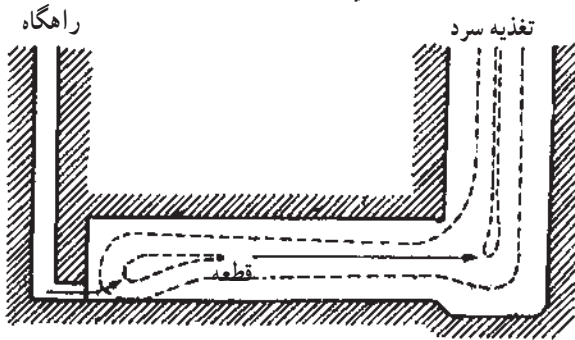
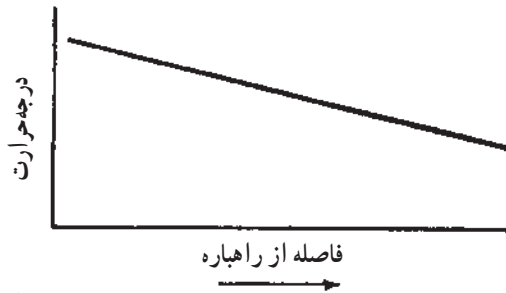
مطالب فوق‌الذکر را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

راهباره ← تغذیه ← قطعه تغذیه‌ی گرم

راهباره ← قطعه ← تغذیه تغذیه‌ی سرد



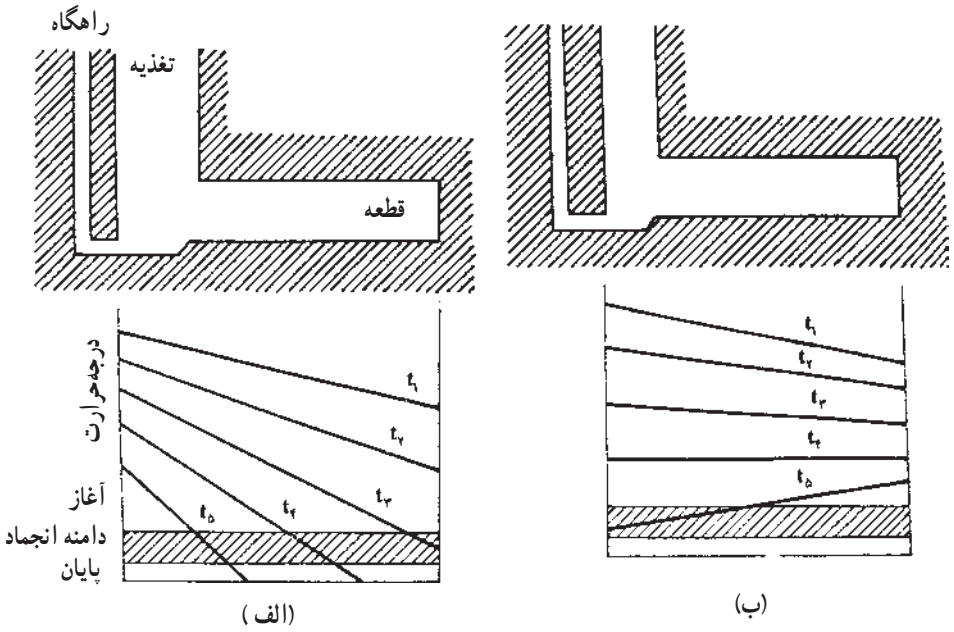
(الف)



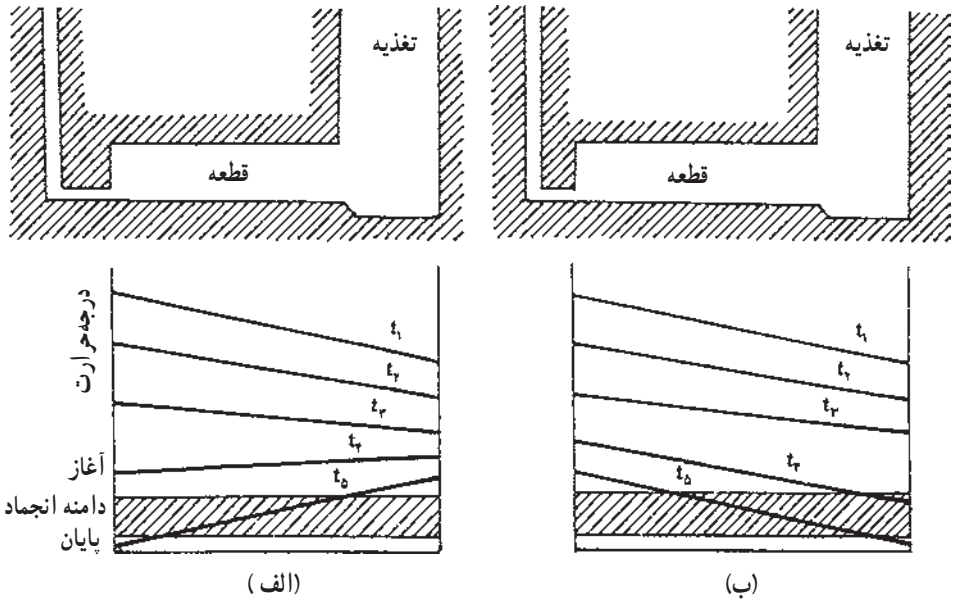
(ب)

شکل ۲۴-۴- تغذیه گرم و سرد و شیب دمایی نسبت به محل راهبارة

منبع تغذیه در تغذیه گرم نسبت به تغذیه سرد معمولاً کوچکتر است. چرا که تغذیه سرد باید بتواند تغییر شیب دمایی لازم را در زمان معین و در حد مطلوب ایجاد نماید. شکل های ۲۵ - ۴ و ۲۶-۴ توزیع دمایی اولیه و تغییر شیب دمایی را برای دو حالت تغذیه ی گرم و سرد نشان می دهد.



شکل ۲۵-۴- چگونگی تغییرات شیب دمایی در تغذیه‌ی گرم الف) تغذیه‌ی مناسب ب) تغذیه‌ی خیلی کوچک



شکل ۲۶-۴- چگونگی تغییرات شیب دمایی در تغذیه‌ی سرد الف) تغذیه‌ی مناسب (بزرگتر از حالت الف شکل

۴-۲۵) ب) تغذیه‌ی کوچک (برابر حالت الف شکل ۴-۲۵)

توضیح: در شکل ۲۵-۴ الف تغذیه‌ی مناسب انتخاب شده است. مشاهده می‌گردد که در زمان‌های t_1 تا t_5 ، شیب دمایی از تغذیه به طرف محفظه‌ی قالب می‌باشد و در دامنه‌ی انجماد نیز این شیب صحیح است. بنابراین، تغذیه‌ی انتخاب شده برای این قطعه مناسب و عملکرد آن درست است. در حالت ب، تغذیه کوچک‌تر از حد لازم است و تا زمان t_4 شیب دمایی از تغذیه به قطعه است، اما از این زمان به بعد، به دلیل نامناسب بودن تغذیه، شیب دمایی معکوس می‌شود به گونه‌ای که در زمان‌های t_5 به بعد و بخصوص در درجه‌ی حرارت دامنه‌ی انجماد، شیب از محفظه‌ی قالب به تغذیه می‌باشد. لذا منبع تغذیه زودتر از خود قطعه شروع به انجماد می‌کند و تغذیه نمی‌تواند وظیفه‌اش را به خوبی انجام دهد.

در شکل ۲۶-۴ از تغذیه سرد استفاده شده است. در حالت الف ملاحظه می‌شود که تا زمان t_3 شیب دمایی از طرف قطعه به تغذیه است (به دلیل این که محفظه‌ی قالب پس از منبع تغذیه از مذاب پر شده است لذا در ابتدا مذاب داخل محفظه‌ی قالب گرم‌تر است) و از زمان t_4 شیب دمایی از منبع تغذیه به قطعه تغییر می‌کند. لذا منبع تغذیه می‌تواند به خوبی عمل نماید. باید توجه داشت برای این که تغذیه بتواند وظیفه‌ی خودش را انجام دهد، همواره لازم است که قبل از شروع انجماد (دامنه‌ی انجماد) شیب دمایی تغییر نماید. در حالت ۲۶-۴-ب اگر چه منبع تغذیه معادل ۲۵-۴-الف انتخاب شده ولی با توجه به این که نتوانسته قبل از رسیدن به دامنه‌ی انجماد، شیب دمایی را در جهت تغذیه به قطعه تغییر دهد، لذا تغذیه به درستی عمل نکرده است. به طور کلی با توجه به موارد ذکر شده، می‌توان گفت که تغذیه‌ی گرم نسبت به سرد مناسب‌تر است؛ اما در بسیاری از موارد به دلیل مشکلات تکنولوژیکی و طراحی، امکان استفاده از تغذیه‌ی گرم وجود ندارد و به ناچار باید از تغذیه‌ی سرد استفاده شود که در این حالت، نکات ذکر شده در بحث فوق را باید همیشه در نظر گرفت.

۲-۵-۴- انواع تغذیه براساس موقعیت قرار گرفتن تغذیه نسبت به قطعه

در این نوع تقسیم‌بندی، انواع تغذیه‌ها براساس موقعیت منبع تغذیه با قطعه مشخص می‌شوند، که عبارتند از:

الف - تغذیه‌ی بالایی

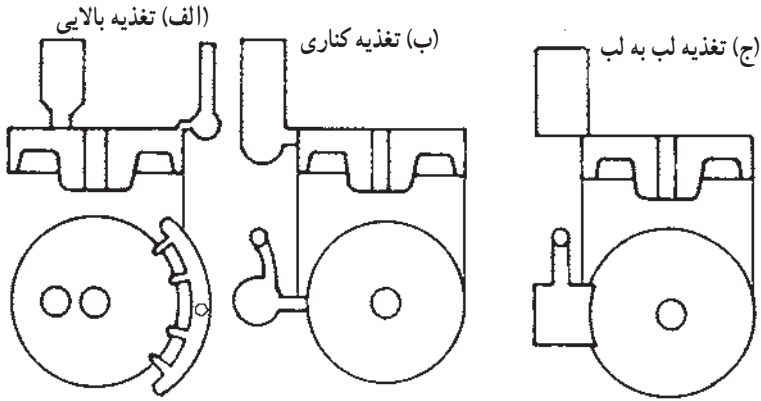
ب - تغذیه‌ی کناری

ج - تغذیه‌ی لب به لب (گوشه بالا)

د - تغذیه از بالا که وظیفه‌ی راهگاه بار ریز را نیز به عهده دارد.

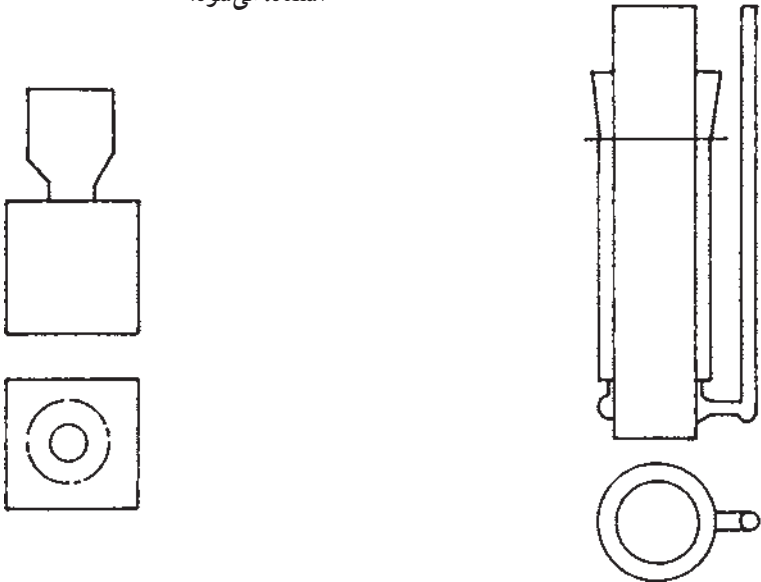
ه - تغذیه از بالا که جزیی از قسمت بالایی قطعه به شمار می‌رود.

شکل ۲۷ - ۴ به ترتیب انواع این تغذیه‌ها را نشان می‌دهد. انتخاب این تغذیه‌ها براساس عواملی مانند فرایند قالب‌گیری، تعداد قطعات و ... می‌باشد.



(د) تغذیه‌ی بالایی که از آن به عنوان راهگاه بارریز استفاده می‌شود.

(ه) تمام سطح بالایی قطعه به عنوان تغذیه



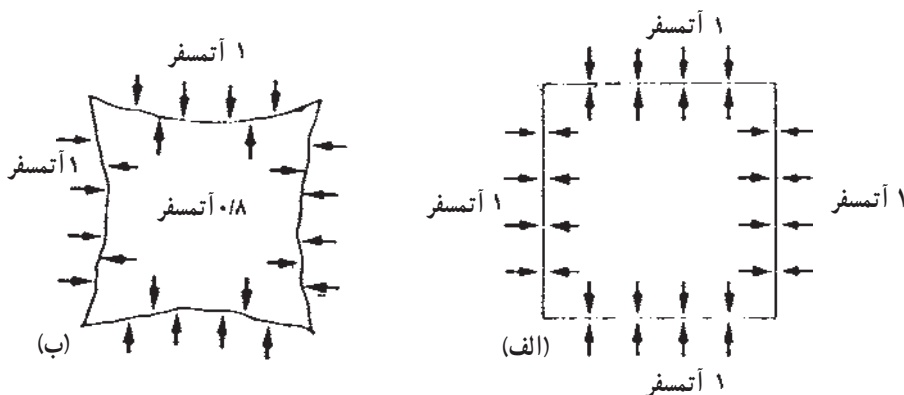
شکل ۲۷ - ۴ - انواع تغذیه‌ها براساس موقعیت قرار گرفتن نسبت به قطعه

۳-۵-۴ - انواع تغذیه براساس ارتباط تغذیه با اتمسفر محیط

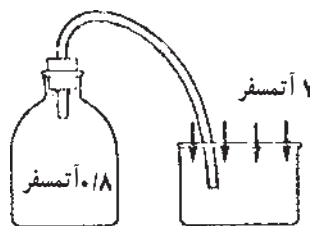
براساس این روش تقسیم‌بندی، تغذیه‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند که عبارتند از: تغذیه‌ی باز و تغذیه‌ی کور.

الف - تغذیه‌ی باز: در بیشتر تغذیه‌ها، قسمت بالایی منبع تغذیه با هوای محیط در تماس است. در این صورت، فشار هوا به کمک وزن فلز می‌تواند مذاب را از داخل تغذیه به طرف قطعه‌ی ریختگی هدایت کند.

لازم به یادآوری است که فشار هوا در کنار دریا یک اتمسفر می‌باشد. یعنی فشاری برابر یک اتمسفر همواره بر اجسام وارد می‌شود. اجسام با توجه به فشار داخلی، در برابر این فشار مقاومت می‌کنند. به عنوان مثال اگر یک قوطی آهنی خالی را در نظر بگیریم. بر جداره بیرون آن یک اتمسفر فشار وارد می‌شود. به دلیل ارتباط داخل با بیرون و این که فشار داخل قوطی نیز یک اتمسفر است، لذا قوطی سالم می‌ماند و در اثر فشار له نمی‌شود (شکل ۲۸ - ۴ - الف). حال اگر به وسیله یک پمپ، خلأ هوای داخل قوطی تخلیه گردد، و فشار آن به زیر یک اتمسفر رسانده شود، در این حالت مانند شکل ۲۸ - ۴ - ب قوطی تغییر شکل می‌دهد.



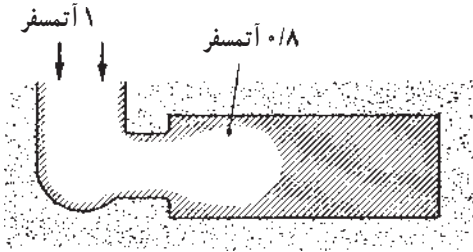
شکل ۲۸ - ۴ - آزمایش اثر فشار اتمسفر بر قوطی آهنی



شکل ۲۹ - ۴ - چگونگی حرکت مایع از طرف ظرف به بطری در اثر تغییر فشار

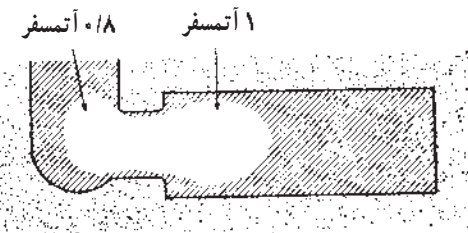
همچنین اگر هوای داخل یک بطری، مطابق شکل ۲۹ - ۴، تخلیه گردد و فشار داخل آن به $0/8$ اتمسفر برسد، سپس بطری با لوله‌ای به طرف مایع وصل شود، مایع موجود در ظرف، به طرف بطری جریان خواهد یافت. علت این پدیده کم‌تر بودن فشار داخل بطری نسبت به ظرف مایع است.

در شرایط عملی ریخته‌گری، هنگامی که در یک قطعه‌ی ریختگی ضمن انجماد، حفره‌ای بوجود آید، فشار هوا در این حفره می‌تواند کم‌تر از یک اتمسفر باشد؛ لذا فشار اعمال شده روی مذاب موجود در تغذیه موجب می‌شود که مذاب به طرف قطعه ریختگی حرکت نموده، آن را پر کند (شکل ۳۰ - ۴).



شکل ۳۰ - ۴ - چگونگی عمل مذاب رسانی یک تغذیه‌ی باز با استفاده از فشار اتمسفر

در تغذیه‌ی باز چنانچه قسمت باز تغذیه که با محیط در ارتباط است، منجمد شود، فشار وارد بر مذاب داخل تغذیه از یک اتمسفر کم‌تر می‌شود. حال اگر هوا به نحوی وارد حفره‌ی انقباضی داخل قطعه شود، در این صورت مانند شکل ۳۱ - ۴ فشار اعمال شده بر حفره‌ی انقباضی داخل قطعه بیشتر از فشار تغذیه می‌شود. در این حال، جریان مذاب رسانی معکوس می‌شود و مذاب از قطعه به تغذیه جریان می‌یابد. به همین دلیل باید همواره از منجمد شدن سطح باز تغذیه جلوگیری نمود تا فشار اتمسفر، همیشه روی مذاب موجود در تغذیه اعمال شود. یک روش ساده برای این موضوع، استفاده از مواد عایق و گرمازا در سطح تغذیه می‌باشد.

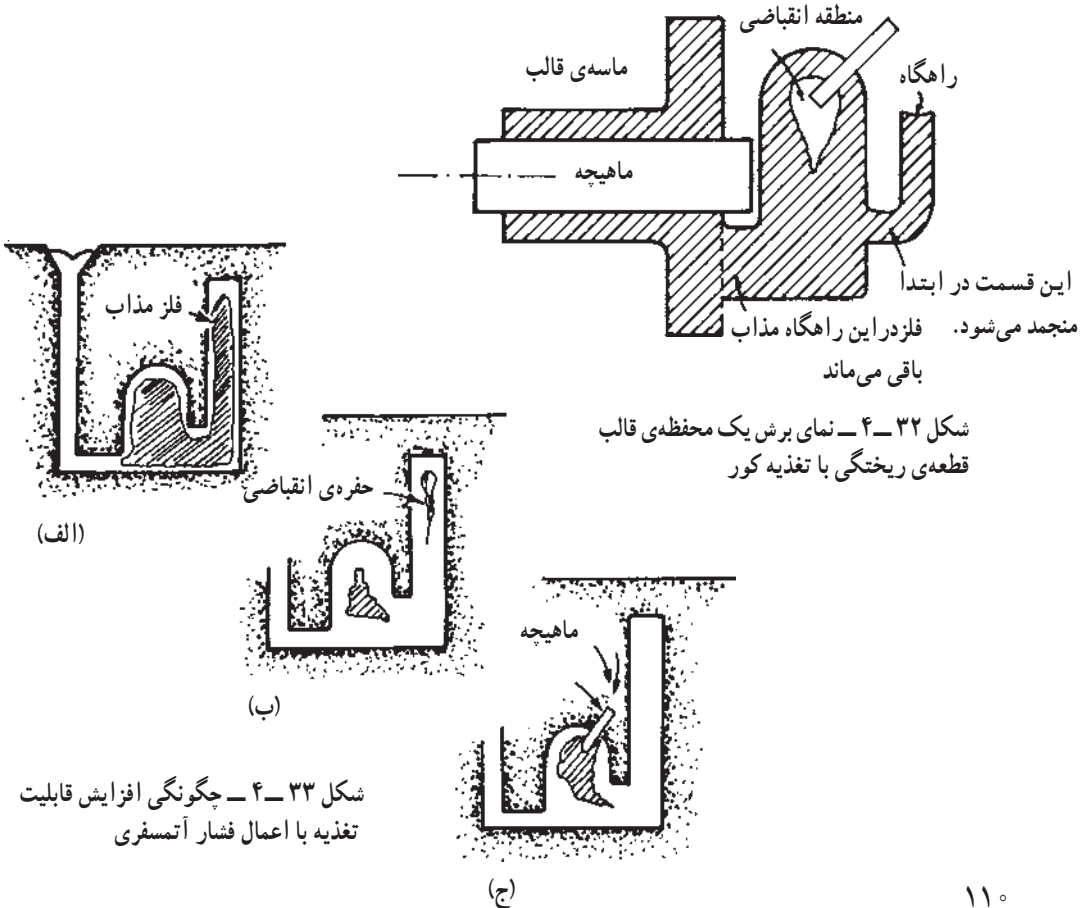


شکل ۳۱ - ۴ - چگونگی کاهش فشار بر سطح تغذیه و جریان مذاب از قطعه به تغذیه

ب - تغذیه‌ی کور^۱

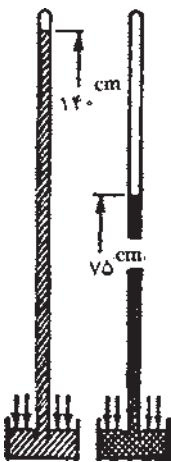
سطح بالایی این نوع تغذیه، برخلاف تغذیه باز با ماسه‌ی قالب‌گیری پوشش شده است (شکل ۳۲ - ۴). به عبارت دیگر، در این نوع تغذیه تمام اطراف تغذیه به جز محل اتصال با قطعه‌ی ریختگی، با ماسه احاطه شده است.

همان گونه که ذکر شد، چنانچه هنگام بارریزی به همراه مذاب، هوا وارد محفظه‌ی قالب شود، این هوا می‌تواند فشار موجود در حفره‌ی انقباضی را بالا ببرد و از عمل مذاب رسانی تغذیه جلوگیری کند. برعکس، ورود هوا به داخل منبع تغذیه نه تنها مضر نیست بلکه می‌تواند فشار موجود در منبع تغذیه را افزایش دهد. ساده‌ترین راه برای وارد کردن هوای خارج قالب به داخل منبع تغذیه، آن است که ماهیچه‌ای میله‌ای شکل از ماسه (مانند شکل ۳۲-۴) را در داخل تغذیه قرار دهیم تا چنانچه اطراف تغذیه نیز جامد شد، فشار هوای خارج، از راه منافذ موجود در این ماهیچه وارد مذاب شود و در نتیجه، فشار اتمسفر روی مذاب اعمال گردد. نکته جالب در مورد این گونه تغذیه‌ها این است که تغذیه‌ها لزوماً نباید در ارتفاع بالاتری از سطح مذاب موجود در قطعه‌ی ریختگی قرار گیرند. چنانچه فشار اتمسفر بر روی مذاب موجود در تغذیه اعمال شود، می‌توان تغذیه‌ها را در سطحی پایین‌تر از سطح فوقانی قطعه‌ی ریختگی قرار داد. این موضوع در شکل‌های ۳۲-۴ و ۳۳-۴ نشان داده شده است.



توضیح در مورد شکل ۳۳-۴: شکل الف، نشان دهنده‌ی آن است که پوسته‌ی جامد اولیه در قطعه و تغذیه ایجاد شده است. شکل ب، قطعه و تغذیه را پس از انجماد کامل نشان می‌دهد بطوریکه حفره‌های انقباضی، هم در قطعه و هم در تغذیه بوجود آمده است.

در شکل ج، در تغذیه به منظور استفاده از فشار اتمسفری از ماهیچه‌ی ماسه‌ای استفاده شده است. این ماهیچه تا مرکز تغذیه امتداد یافته است. ملاحظه می‌شود که حفره‌ی انقباضی کاملاً به تغذیه منتقل شده و در قطعه، حفره‌ی انقباضی از بین رفته است. در این حالت، مذاب از تغذیه به طرف بالا یعنی قطعه‌ی ریختگی جریان یافته و انقباضات قطعه را جبران نموده است.



جیوه فولاد مذاب

شکل ۳۴-۴ - تأثیر فشار اتمسفر روی جیوه و فولاد مذاب

به منظور درک بهتر تأثیر فشار اتمسفری در پر کردن حفره‌های انقباضی نظر دانش‌آموزان را به شکل ۳۴-۴ که یک نمایش شماتیکی از فشارسنج ساده است، جلب می‌کنیم. در شرایط خلأ کامل، فشار هوا می‌تواند جیوه را تا ارتفاع ۷۵/۰ متر و فولاد مذاب را تا ارتفاع ۱/۳ متر، آلومینیم مذاب را تا ارتفاع ۳/۳۴ متر و مس مذاب را تا ارتفاع ۱/۱۵ متر به طرف بالا ببرد.

نکته مهم در استفاده از تغذیه‌های کور، این است که این نوع تغذیه را فقط برای فلزات و آلیاژهایی که پوسته‌ی جامد اولیه آنها نظیر فولادها و چدن‌ها استحکام کافی دارد، می‌توان به کار برد. زیرا در غیر این صورت پوسته‌ی اولیه در قطعه می‌شکند و عمل مذاب‌رسانی از تغذیه به خوبی انجام نمی‌شود.

۴-۶ - روشهای افزایش راندمان تغذیه (کمک تغذیه)

افزایش راندمان تغذیه، به منظور استفاده‌ی بهتر از تغذیه و کاهش عیوب، همیشه مورد توجه صنعتگران بوده است.

تعریف: کمک تغذیه اصطلاحاً به روشی گفته می‌شود که به منظور بهبود کیفیت قطعه ریختگی و بالا بردن راندمان ریخته‌گری و در نتیجه، کاهش قیمت تمام شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. کمک تغذیه‌ها، شیب دمایی از تغذیه به قطعه را افزایش می‌دهند.

مهمترین روشهای کمک تغذیه، عبارتند از:

– استفاده از مواد عایق و گرمازا

– استفاده از مبرد

– تغییر در طراحی سیستم راهگامی و بارریزی

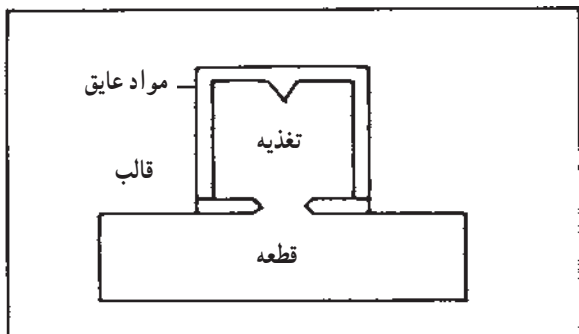
– تغییر در طراحی قطعات و مدل

– کنترل درجه‌ی حرارت بارریزی

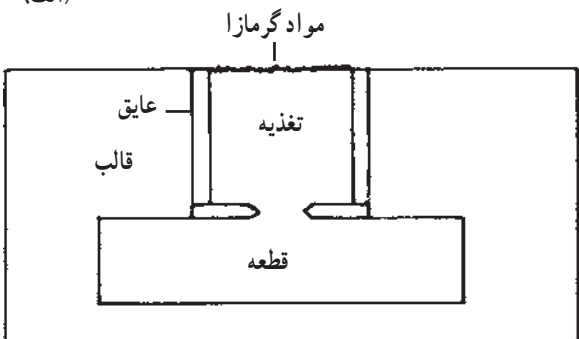
۱ – ۶ – ۴ – استفاده از مواد عایق و گرمازا

با استفاده از مواد عایق و گرمازا در تغذیه و بعضی قسمت‌های قطعه، می‌توان ضمن ایجاد شیب دمایی مناسب از تغذیه به قطعه، حجم تغذیه را به طور قابل توجهی کاهش داد. استفاده از مواد عایق در قطعات ریختگی (محفظه‌ی قالب) به دلیل مشکلات تکنولوژیکی و عملی، کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد اما در تغذیه امری معمول می‌باشد.

(شکل ۲۱ – ۴ چگونگی استفاده از مواد عایق را در قالب نشان می‌دهد.)



(الف)



(ب)

شکل ۳۵ – ۴ – نمایش شماتیکی از کاربرد کمک تغذیه برای (الف) تغذیه کور (ب) تغذیه روباز همراه با مواد گرمازا

در طراحی تغذیه سه نوع کمک تغذیه به کار می‌رود که عبارتند از:

۱ – تغذیه‌ی کانالی، استفاده از تغذیه‌های پیش‌ساخته از مواد عایق و گرمازا به منظور جدا کردن تغذیه از قالب.

۲ – استفاده از مواد عایق و گرمازا در قسمت بالایی تغذیه‌های روباز، به منظور جلوگیری از انتقال حرارت از طریق تشعشع.

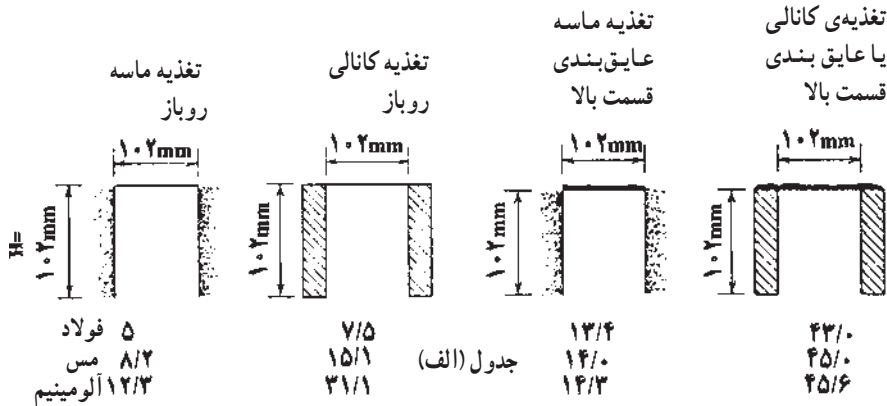
۳ – استفاده از سیستم‌های حرارتی نظیر، شعله، میله‌ی داغ، مقاومت الکتریکی و قوس الکتریکی در تغذیه. شکل ۳۵ – ۴ به طور شماتیکی، کاربرد کمک تغذیه را نشان می‌دهد.

تأثیر کمک تغذیه‌ها در به تأخیر انداختن انجاماد تغذیه، در جدول ۲ – ۴ الف نشان داده

شده است. در این جدول، زمان انجاماد یک تغذیه به قطر ۱۰۲mm و ارتفاع ۱۰۲mm برای سه آلیاژ

مختلف در حالت‌های متفاوت محاسبه شده و درصد تلفات حرارت به وسیله‌ی تشعشع از سطح تغذیه در جدول ۲-۴ ب نشان داده شده است.

زمان انجماد - دقیقه

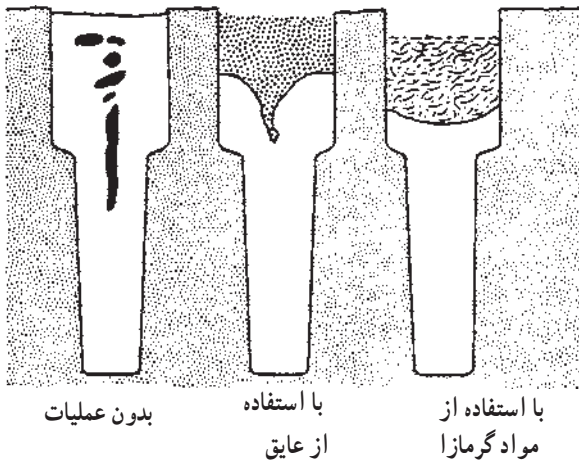


| | |
|---|----|
| درصد تلفات حرارت به وسیله تشعشع از سطح تغذیه جدول ب | |
| فولاد | ۴۲ |
| مس | ۲۶ |
| آلومینیم | ۸ |

جدول (ب)

جدول ۲-۴ الف - اثر کمک تغذیه‌ها در زمان انجماد آلیاژهای مختلف

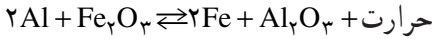
ب - درصد تلفات حرارت به وسیله تشعشع از سطح تغذیه



استفاده از مواد عایق و گرمزا در افزایش راندمان تغذیه بسیار مؤثر است. شکل ۳۶ - ۴ به صورت شماتیک اثر مواد عایق و گرمزا را در تغذیه نشان می‌دهد.

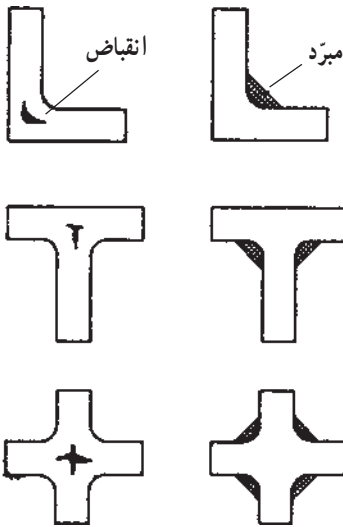
شکل ۳۶ - ۴ - استفاده از مواد عایق و گرمزا در تغذیه

مواد گرمازا، معمولاً مخلوطی از یک ماده مشتعل شونده سریع نظیر پودر آلومینیم، پودر کک یا زغال چوب و یک اکسید فلزی به عنوان عامل اکسیژن دهنده می باشد. چنین مخلوطهایی در تماس با فلز مذاب محترق شده، حرارت بسیار زیادی را آزاد می کنند. نمونه ای از این فعل و انفعالات حرارت زا چنین است :



۲-۶-۴- استفاده از مبرد^۱

مبردها موادی هستند که هدایت حرارتی بالایی دارند و به منظور افزایش شیب دمایی از تغذیه به قالب، مورد استفاده قرار می گیرند. مهم ترین آن ها عبارتند از مس، آلومینیم، چدن، گرافیت و ... لازم به ذکر است که براساس تعریف، مبرد به منظور افزایش موضعی سرعت انجماد یک قسمت قطعه در حال انجماد نسبت به سایر قسمت های آن به کار می رود بنابراین قالب ریژه به عنوان مبرد محسوب نمی گردد. البته در این گونه قالب ها (ریژه) می توان از مواد با هدایت حرارتی بالاتر (نظیر مس) و یا عبور موضعی آب (آبگرد) و ضخیم کردن قسمتی از قالب نسبت به سایر قسمت ها، به عنوان نوعی مبرد استفاده کرد.



شکل ۳۷-۴- مبردهای خارجی با اندازه های مناسب به منظور حذف مکهای انقباضی

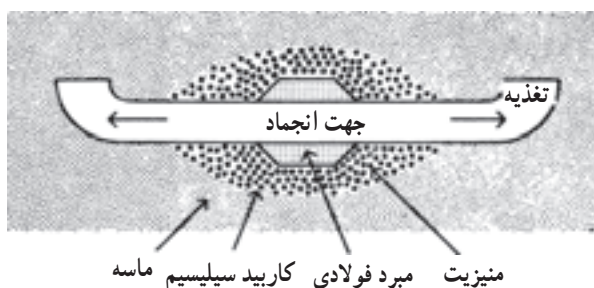
به طور کلی دو نوع مبرد وجود دارد که عبارتند از :

۱- مبردهای خارجی ۲- مبردهای داخلی
مبردهای خارجی، در دیواره قالب در فصل مشترک قالب - فلز قرار می گیرند. در حالی که مبردهای داخلی در داخل محفظه قالب جاگذاری می شوند.

مبردهای خارجی: مبردهای خارجی، معمولاً قطعات فلزی از جنس فولاد، چدن یا مس می باشند که در قسمت های مورد نظر در قالب قرار می گیرند تا سرعت انجماد مذاب را در آن نقطه ها افزایش دهند. این نوع مبردها شکل های استاندارد دارند و

یا در حالت‌های خاص ممکن است متناسب با قطعه تعبیه شوند. ابعاد مبرد، براساس سرعت سرد شدن مورد نیاز، تعیین می‌گردد.

شکل ۳۷-۴ چند مثال ساده‌ی استفاده از مبردهای خارجی را نشان می‌دهد. در برخی موارد، به منظور تقویت اثر مبرد، ممکن است از مواد مختلفی همراه مبرد استفاده شود. مثال ساده در این مورد، در شکل ۳۸-۴ نشان داده شده است. در این مثال، برای هر چه بهتر شدن انجماد، از مبرد همراه با ذرات خرد شده منیزیت و کاربید سیلیسیم استفاده شده است.



شکل ۳۸-۴- انجماد جهت‌دار با استفاده از مواد مختلف به همراه مبرد

اثر مبردهای خارجی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود :

- ۱- شیب دمایی را اصلاح می‌کنند.
- ۲- باعث ایجاد انجماد جهت‌دار می‌شوند.
- ۳- مک‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی را کاهش می‌دهند.
- ۴- حجم و تعداد تغذیه را کاهش می‌دهند.
- ۵- میزان عیوب و دورریز قطعات را کاهش می‌دهند.
- ۶- قیمت تمام شده قطعه را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهند.

نکاتی در مورد چگونگی استفاده از مبرد

۱- مبردها باید کاملاً خشک شده باشند. در غیر این صورت، رطوبت باعث ایجاد مک‌های زیادی می‌شود.

۲- مبردها معمولاً با یک ماده نسوز مانند سیلیسیم یا دیگر مواد پوشش داده می‌شوند. این

لایه‌ی نسوز باید قبل از استفاده مبرد کاملاً خشک شده باشد.

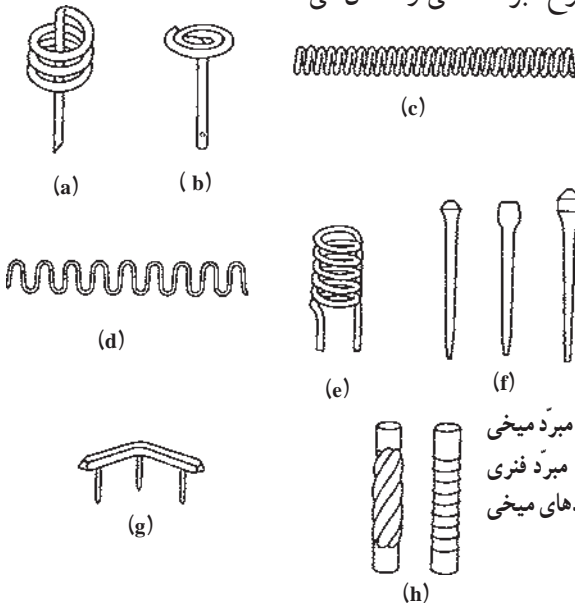
۳- در هنگامی که از مبرد در قالب‌های ماسه‌ی تر استفاده می‌شود، اگر فاصله زمانی بین قالب‌گیری و بارریزی طولانی باشد، رطوبت موجود در ماسه جذب سطح مبرد می‌شود. برای جلوگیری از این مسأله، باید مبرد را قبل از جاگذاری در قالب، پیشگرم نمود و یا فاصله زمانی بین ساخت قالب و بارریزی را کوتاه کرد. همچنین می‌توان در مبردها قبل از جای‌گذاری چندین سوراخ ایجاد نمود.

۴- از مصرف مبردهایی که دارای ترک مویی در سطح هستند باید خودداری شود.

۵- در صورتی که ضخامت مبرد خیلی کم باشد اثر تبریدی کافی نخواهد داشت. از طرف دیگر، استفاده از مبردهای ضخیم نیز مشکلاتی را در قالب‌گیری ایجاد می‌کند و برای آلیاژها مانند چدن‌های خاکستری و نشکن، باعث می‌شود ساختمان قطعه به صورت موضعی، سخت و خشن شود. به طور تجربی ضخامت مبرد باید بین $\frac{1}{3}$ تا $\frac{2}{3}$ ضخامت قطعه‌ی ریختگی باشد.

مبردهای داخلی: مبردهای داخلی در داخل محفظه‌ی قالب، (در داخل قطعه‌ی ریختگی) در مکانی که امکان استفاده از مبردهای خارجی نباشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همچنین، این گونه مبردها بیشتر در قسمت‌هایی که بعداً ماشین‌کاری یا سوراخ می‌شوند، به کار می‌روند. جنس این مبردها معمولاً از جنس خود قطعه‌ی ریختگی انتخاب می‌گردند تا اولاً؛ یکنواختی ترکیب در قطعه ریختگی حفظ شود. ثانیاً؛ با ذوب مقداری از سطح مبرد اتصال خوبی بین مبرد و قطعه به وجود آید. شکل ۳۹-۴ چند نوع مبرد داخلی را نشان می‌دهد.



شکل ۳۹-۴- مثالهایی از مبردهای داخلی (a) مبرد میخی مارپیچ (b) مبرد میخی مارپیچ سرتخت (c) مبرد فنری (d) مبرد شبکه‌ای (e) مبرد تویی (f) مبردهای میخی (g) مبرد چندشاخه‌ای (h) مبرد میله‌ای

استفاده از مبردهای داخلی نسبت به مبردهای خارجی، بحرانی تر می باشد؛ بنابراین علاوه بر نکاتی که در مورد مبردهای خارجی گفته شد باید به موارد زیر نیز توجه کرد.

۱- مبردها در داخل قطعه نباید ذوب شوند زیرا باعث ایجاد نقاط ضعف و کاهش خواص قطعه می شوند.

۲- مبردها در داخل قطعه باید به گونه ای جاسازی شوند که جریان مذاب نتواند آنها را جابجا نماید.

۳- تمیزی مبرد بسیار مهم است، چون کاملاً با فلز مذاب احاطه می شود و کم ترین گاز تولید شده، نمی تواند به بیرون راه یابد. لذا مبرد باید کاملاً زنگ زدایی شده و اکسیدها تمیز شده باشند. پیشگرم کردن مبرد، در این مورد بسیار مؤثر است. در این صورت سطح مبرد کاملاً خشک شده و از آلودگیهایی نظیر روغن مبرا می گردد.

۴- مبرد، ممکن است خواص مکانیکی قسمتی از قطعه را که در آن نقطه جاگذاری شده، تغییر دهد.

۵- ترکیب شیمیایی مبرد باید تقریباً معادل قطعه ریختگی باشد. مثلاً برای ریخته گری فولاد یا فلزات غیر آهنی نمی توان از مبردهای داخلی چدنی استفاده کرد.

۶- در مورد فلزات با نقطه ذوب پایین، استفاده از مبردهای داخلی محدود می باشد زیرا این گونه فلزات قادر به ذوب سطحی مبردها نیستند و در نتیجه، پس از انجماد مذاب و سرد شدن قطعه، اتصال مناسب و محکمی بین مبرد و قطعه ریختگی، به وجود نمی آید.

۳-۶-۴- طراحی سیستم راهگامی و بارریزی

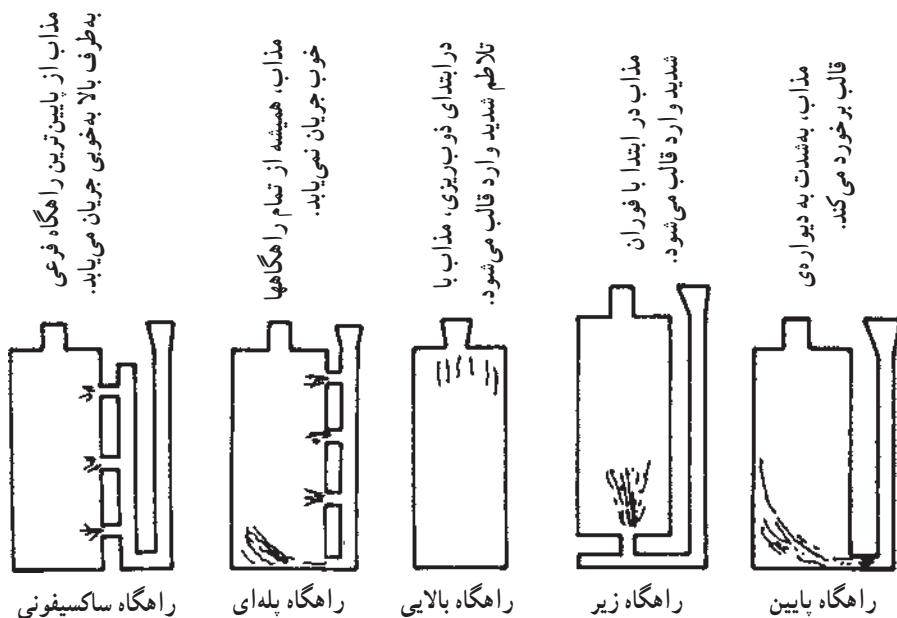
اصلاح سیستم راهگامی و بارریزی می تواند در کاهش مکهای انقباضی و بهبود کیفیت قطعه ریختگی مؤثر واقع گردد. مهم ترین روشهای اصلاح سیستم راهگامی عبارتند از:

۱- استفاده از راهگامهای پله ای و یا ارتباط تغذیه به راهگام. از آن جا که مذاب باید از طریق تغذیه وارد محفظه قالب شود، لذا گرم ترین مذاب در تغذیه قرار می گیرد.

۲- بارریزی و انجماد مذاب در قالبهایی که به صورت شیبدار نسبت به خط افق قرار می گیرند.

۳- بارریزی مذاب به داخل قالب از بالا و یا در مواردی که چنین روشی منجر به ایجاد حرکت اغتشاشی در محفظه قالب گردد می توان در مراحل اولیه مذاب را از سیستم راهگامی پایین به داخل قالب هدایت نمود و پس از آن که محفظه قالب به اندازه ی کافی از مذاب پر شد بقیه فلز مذاب

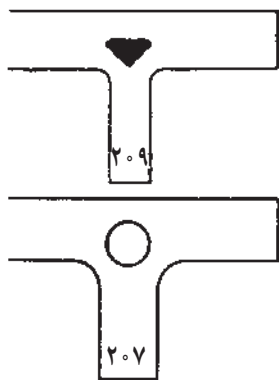
از بالا به داخل محفظه‌ی قالب ریخته شود (شکل ۴۰-۴).



شکل ۴۰-۴- چند نوع سیستم راهگاهی در ارتباط با تغذیه

۴- تغییر در طراحی قطعات و مدل: با تغییر در طراحی قطعه، بدون این‌که در کاربرد آن مشکلی ایجاد شود، می‌توان تا حدودی به مذاب رسانی کمک کرد تا در نتیجه، قطعات سالم تولید گردد. شکل ۴۱-۴ مثالی برای تغییر در طراحی قطعه می‌باشد.

باید توجه کرد که تغییرات در طراحی، همیشه قادر به حذف کامل انقباضات نیست و حذف کامل آنها مستلزم استفاده از میرد است.



شکل ۴۱-۴- تأثیر طراحی صحیح در سلامت قطعه

۵- درجه حرارت بارریزی، اگر درجه حرارت بارریزی مذاب پایین باشد، اثر تغذیه کاهش پیدا خواهد کرد. برعکس، چنانچه درجه حرارت خیلی بالا باشد، حفره‌های انقباضی بروز خواهد کرد، لذا انتخاب درجه حرارت مناسب در بهبود کیفیت قطعه بسیار مؤثر است.

پرسش

- ۱- تغذیه‌گذاری را تعریف نمایید.
- ۲- مراحل انقباض اجسام را تشریح کنید.
- ۳- وظیفه‌ی اصلی تغذیه در ریخته‌گری را تعریف نمایید.
- ۴- انواع آلیاژها را با توجه به مدل انجماد نام ببرید.
- ۵- مکانیزم انجماد در آلیاژهای پوسته‌ای را تشریح کنید.
- ۶- اصول تغذیه در آلیاژهای پوسته‌ای را توضیح دهید.
- ۷- چگونگی انجماد در آلیاژهای خمیری را تشریح کنید.
- ۸- مراحل مذاب رسانی در آلیاژهای خمیری را توضیح دهید.
- ۹- تأثیر سرعت سرد کردن در ضخامت منطقه‌ی خمیری و پوسته‌ای را توضیح دهید.
- ۱۰- جهت انجماد چیست و عوامل مؤثر در آن را نام ببرید.
- ۱۱- محل تغذیه در قطعات ریختگی باسطوح مقطع غیریکنواخت چگونه تعیین می‌گردد؟
- ۱۲- اجزای تغذیه را نام برده، وظایف آنها را توضیح دهید.
- ۱۳- تغذیه‌ی گرم و سرد را توضیح دهید.
- ۱۴- در تغذیه‌ی سرد، چگونگی تغییر شیب‌دمایی را تشریح کنید و شرط خوب عمل کردن تغذیه را بررسی نمایید.
- ۱۵- انواع تغذیه را براساس موقعیت قرار گرفتن نسبت به قطعه، با رسم شکل توضیح دهید.
- ۱۶- تغذیه‌ی کور چیست و چه کاربردی دارد؟
- ۱۷- مواد عایق و گرمازا در تغذیه‌ها به چه منظوری استفاده می‌شود؟
- ۱۸- مبرد چیست و چه نقشی در تغذیه دارد؟
- ۱۹- انواع مبرد را نام ببرید.
- ۲۰- مبردهای خارجی چه مشخصاتی دارند؟ اثر آنها را توضیح دهید.

- ۲۱ - نکات مهم در استفاده مبردهای خارجی چیست؟
- ۲۲ - مبردهای داخلی چیست و به چه منظوری به کار می‌روند؟
- ۲۳ - نکات مهم در استفاده‌ی مبردهای داخلی چیست؟
- ۲۴ - درجه‌ی حرارت، چه تأثیری در راندمان تغذیه دارد؟
- ۲۵ - طراحی سیستم راهگاهی چه تأثیری در راندمان تغذیه دارد؟
- ۲۶ - طراحی قطعات و مدل چه تأثیری در راندمان تغذیه دارد؟

سیستم راهگاهی

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

- ۱- اهمیت سیستم راهگاهی را توضیح دهد.
- ۲- اجزای سیستم راهگاهی را شرح دهد.
- ۳- انواع سیستم‌های راهگاهی (فشاری و غیرفشاری) را شرح دهد.
- ۴- روش‌های راهگاه‌گذاری را توضیح دهد.
- ۵- روش‌های آخال‌گیری در سیستم‌های راهگاهی را توضیح دهد.

۵- سیستم راهگاهی

واکنش‌پذیری شیمیایی و فیزیکی فلز مذاب با محیط اطراف و قالب، کاهش سیالیت آن در اثر تبادل حرارتی با سطوح قالب و شستن جداره‌ی قالب به هنگام جریان آن در قالب، همگی بر این واقعیت مهم و اساسی تأکید دارند که دستیابی به یک قطعه‌ی ریختگی سالم، مستلزم کنترل و هدایت مناسب جریان مذاب در قالب تا تکمیل شدن انجماد آن می‌باشد. از این رو، چگونگی ورود مذاب به محفظه‌ی قالب و جریان آن در مجراهایی که به محفظه‌ی قالب منتهی می‌شوند، در ریخته‌گری، از اهمیت زیادی برخوردار هستند.

به‌طور کلی، مجموعه‌ی راه‌هایی که مذاب برای ورود به محفظه‌ی قالب، از آن‌ها عبور می‌کند به سیستم راهگاهی^۱ موسومند. با توجه به نکات یاد شده، وظایف یک سیستم راهگاهی صحیح را به‌طور کلی، می‌توان بدین شرح ذکر نمود:

^۱- Gating System

۱- تنظیم سرعت و جهت جریان مذاب به گونه‌ای که پُرشدن کامل قالب قبل از انجماد تضمین گردد.

۲- ایجاد جریانی آرام و یکنواخت با حداقل آشفستگی و تلاطم در قالب، به منظور جلوگیری از جذب هوا، اکسید شدن فلز مذاب و شستن جداره‌ی قالب.

۳- ایجاد شیب دمایی مناسب از قطعه به تغذیه و در مواردی که از تغذیه استفاده نمی‌شود، از قطعه به طرف مجرای ورود مذاب به قالب.

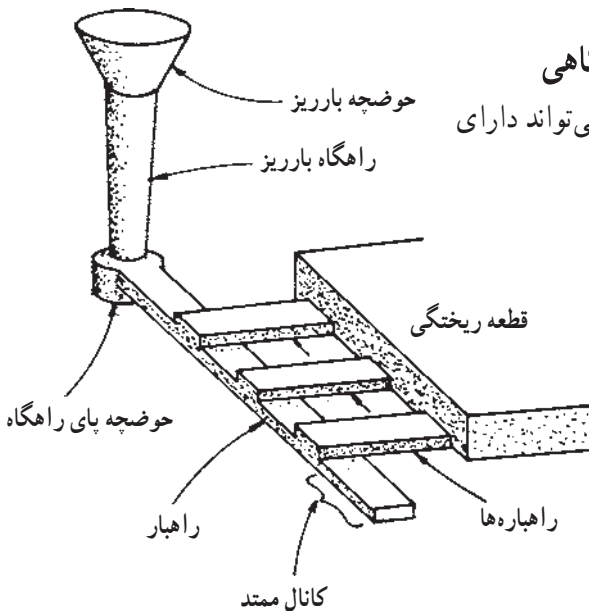
۴- جلوگیری از ورود آخال‌ها، اکسیدهای سرباره‌ای، ذرات و مواد قالب از طریق کنترل تلاطم و آشفستگی مذاب و یا با استفاده از مواد و روش‌های تکنیکی از قبیل استفاده از صافی‌ها، سرباره‌گیری، فشارگیرها و

۵- اقتصادی بودن از نظر راندمان ریختگی و نیز هزینه‌های تمیزکاری.

در این فصل، با توجه به نقش مؤثر سیستم راهگاهی در تولید قطعاتی با کیفیت بالا و درعین حال اقتصادی، ابتدا اجزای سیستم راهگاهی انواع و روش‌های مختلف در تعبیه آن به اختصار تشریح می‌گردد. سپس اصول و مبانی کلی در طراحی و محاسبات این سیستم‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۵-۱- اجزای یک سیستم راهگاهی

یک سیستم راهگاهی به طور کلی می‌تواند دارای اجزایی مطابق شکل ۵-۱ باشد.



شکل ۵-۱- اجزای اصلی یک سیستم راهگاهی

۱-۱-۵- حوضچه^۱ بالای راهگاه بارریز

حوضچه بارریز به صورت یک کاسه‌ی باریک‌شونده است که در بالای لوله‌ی راهگاه بارریز، روی سطح درجه بالایی تعبیه می‌گردد. نقش اساسی حوضچه، سهولت ریختن مذاب از وسایل انتقال مذاب مانند بوتّه و یا پاتیل، به داخل راهگاه بارریز می‌باشد. در شکل ۲-۵ نمونه‌هایی از حوضچه‌های قیفی شکل پیش‌ساخته که بیشتر برای ریخته‌گری قطعات چدنی و فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرند، نشان داده شده‌اند.



شکل ۲-۵- نمونه‌هایی از حوضچه (قیف)های پیش‌ساخته‌ی بالای راهگاه بارریز

از نکات اساسی در ارتباط با حوضچه‌های بالای راهگاه بارریز آن است که این حوضچه‌ها باید در طول عمل بارریزی، همواره پُر نگه داشته شوند؛ زیرا این امر موجب می‌شود تا اولاً، شلاکه و مواد ناخالصی که معمولاً سبک‌تر از مذاب هستند بر روی سطح مذاب موجود در حوضچه جمع شوند و در نتیجه به داخل محفظه‌ی قالب راه پیدا نکنند. ثانیاً، پُر نگه داشتن حوضچه از مذاب، ضمن ایجاد جریان مناسبی از مذاب با فشار استاتیکی^۲ معین در داخل سیستم راهگاهی، از جذب شدن هوا و ورود آن به قالب نیز جلوگیری می‌کند. در بعضی موارد، به‌ویژه در مورد فلزات و آلیاژهای غیر آهنی از حوضچه‌های موسوم به حوضچه‌ی گلابی یا لگنی استفاده می‌شود مزایای این نوع حوضچه به قرار زیر است.

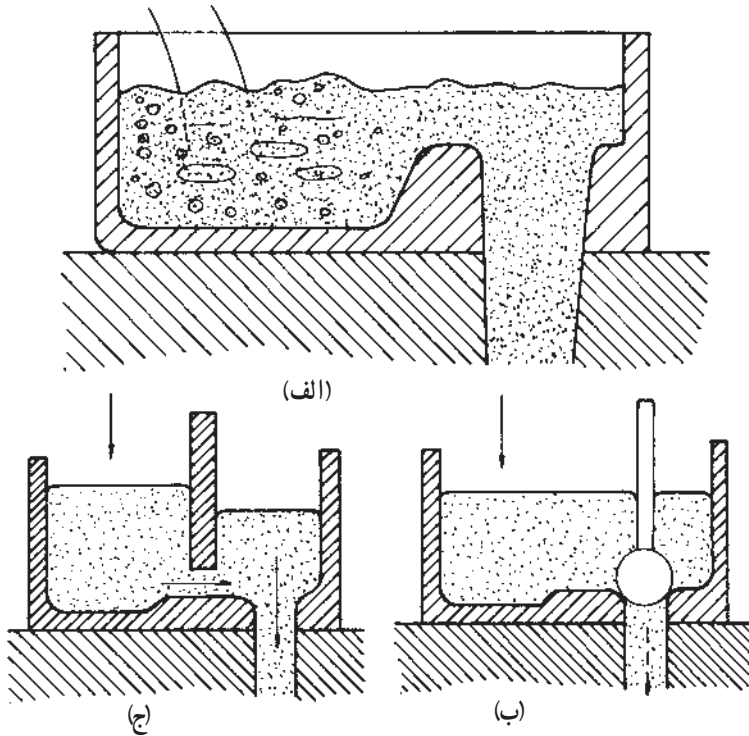
- تنظیم سرعت جریان مذاب
 - جلوگیری از ورود شلاکه^۳ و مواد ناخواسته به داخل قالب
 - ایجاد جریان آرام با حداقل تلاطم به منظور جلوگیری از ورود هوا به داخل قالب
 - حفظ نمودن قالب از آسیب ریزش مستقیم مذاب
- نمونه‌هایی از این حوضچه‌ها در شکل ۳-۵ نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ب دیده می‌شود، در بعضی مواقع برای پرشدن آرام و یکنواخت قالب، دهانه‌ی راهگاه بارریز در داخل حوضچه با گلوله‌ای بسته می‌شود. این گلوله پس از پُر شدن حوضچه

۱- Pouring Basin

۲- Metalostatic Pressure

۳-Slag



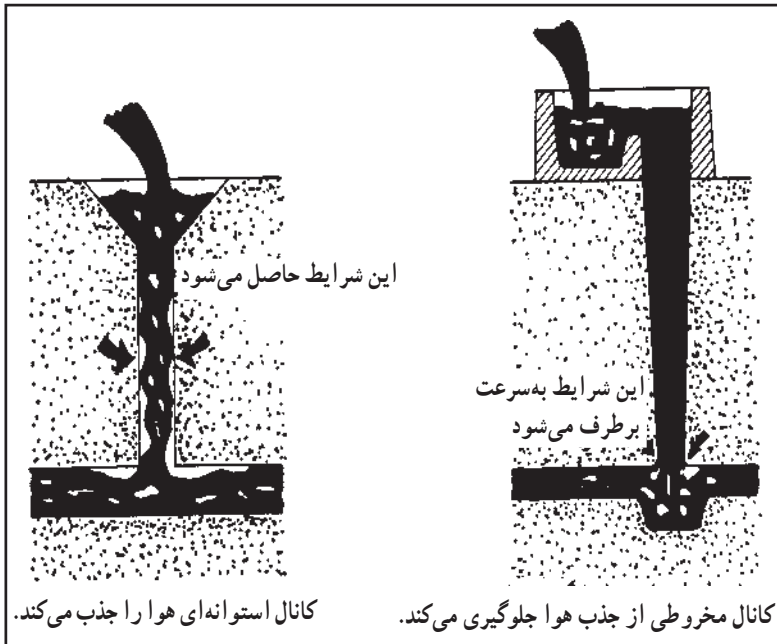
شکل ۳-۵ - نمونه‌هایی از حوضچه‌های گلابی (گنی)

از مذاب برداشته می‌شود و مذاب، راهی راهگاه بارریز می‌گردد. همچنین در بعضی موارد، حوضچه مطابق شکل ج با یک تیغه‌ی سد مانند به دو قسمت تقسیم می‌شود که این امر به شخص بارریز این اجازه را می‌دهد که بتواند مذاب را با سرعتی مناسب به داخل حوضچه بریزد به گونه‌ای که فلز مذاب با حالتی آرام و یکنواخت و بدون سرباره و ناخالصی وارد راهگاه بارریز شود. طبیعی است که در دو حالت ذکر شده، به‌علت ایجاد جریان یکنواخت و مداوم از مذاب در راهگاه بارریز، تلاطم و آشفتگی مذاب، به‌هنگام حرکت، به حداقل می‌رسد و در نتیجه از محبوس شدن هوا در مذاب جلوگیری به عمل می‌آید.

قابل ذکر است که در صورت استفاده از حوضچه‌های بزرگ، به‌علت صعود بهتر و آسان‌تر مواد ناخواسته و سرباره به سطح مذاب داخل حوضچه، عمل جلوگیری از ورود آن‌ها به داخل سیستم راهگاهی و محفظه قالب به‌طور مطلوب‌تری صورت می‌گیرد. علاوه بر این، سرعت بارریزی در این نوع حوضچه‌ها می‌تواند بدون سرریز کردن مذاب افزایش پیدا کند. طبیعی است که یک حوضچه‌ی بزرگ پس از اتمام بارریزی می‌تواند به‌عنوان تغذیه نیز عمل کند.

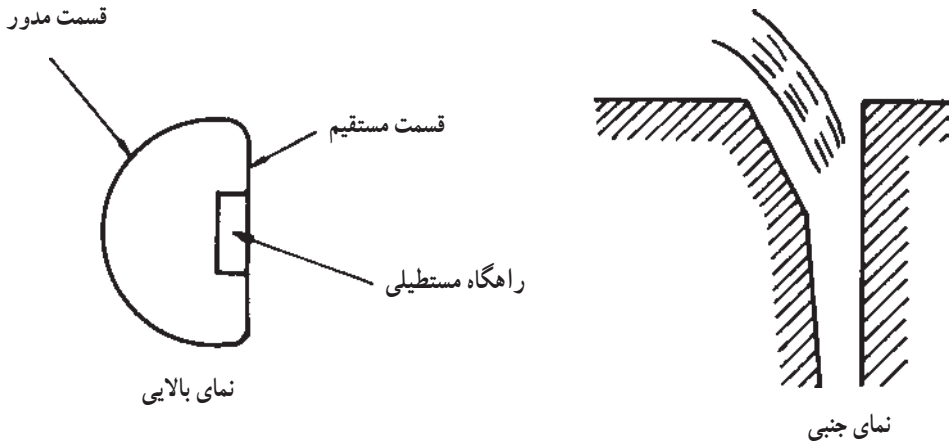
۲-۱-۵- راهگاه بارریز (لوله‌ی راهگاه)

راهگاه بارریز مجرای عمودی است که سطح مقطع آن از بالا به طرف پایین کاهش می‌یابد. این راهگاه از طرف سطح بزرگ‌تر به حوضچه‌ی بالای راهگاه بارریز و از طرف سطح کوچک‌تر از طریق حوضچه دیگری به نام حوضچه پای راهگاه بارریز به کانال اصلی یا راهبار متصل می‌شود. دلیل مخروطی شکل بودن کانال راهگاه با مشاهده‌ی جریان آب از یک شیر باز، به خوبی روشن می‌گردد. بدین ترتیب که با دور شدن آب از محل اتصال به شیر، به دلیل افزایش سرعت جریان، سطح مقطع آب نیز کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، با توجه به اینکه مذاب در داخل راهگاه بارریز نیز با چنین حالتی جریان دارد، از این رو به منظور پُرنگه‌داشتن این راهگاه و در نتیجه جلوگیری از ورود هوا به داخل آن، لازم است تا راهگاه بارریز به صورت مخروطی شکل در نظر گرفته شود. بدیهی است در صورت انتخاب اشکال استوانه‌ای برای راهگاه بارریز، حباب‌های هوا می‌تواند در طول راهگاه حبس شود و باعث ایجاد آسفنگی در مذاب و جذب هوا در آن گردد. این موضوع در شکل ۴-۵ به خوبی مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۵ - نحوه‌ی جریان مذاب در انواع راهگاه‌های استوانه‌ای و مخروطی

توصیه شده است سطح مقطع راهگاہ بارریز حتماً باید تا قطر 20° میلیمتر به شکل دایره باشد. برای راهگاہ‌های بزرگ‌تر، از سطح مقطع مستطیلی نیز استفاده می‌شود. هنگام استفاده از راهگاہ بارریز با سطح مقطع مستطیل شکل، برای جلوگیری از ایجاد تلاطم و آشفتگی در گوشه‌های تیز، این راهگاہ باید به گونه‌ای مناسب طراحی شود تا از ورود هوا به داخل راهگاہ بارریز جلوگیری به عمل آید. نمونه‌ای از این طراحی در شکل ۵-۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۵ - نوعی حوضچه ایده‌آل بر روی راهگاہ بارریز

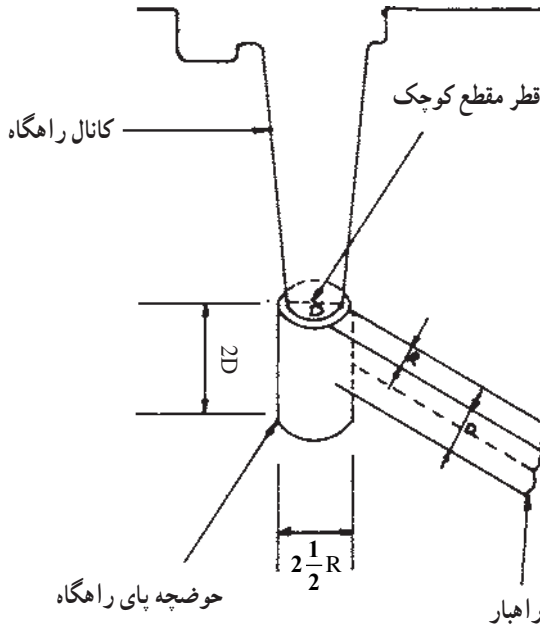
قابل ذکر است که راهگاہ بارریز با سطح مقطع دایره‌ای شکل، به دلیل اینکه دیرتر از نوع مستطیلی شکل سرد می‌گردد، عمل مذاب‌رسانی به قطعه‌ی ریخته شده را به هنگام سرد شدن، به طور مطلوب‌تری انجام می‌دهد. این درحالی است که از نظر کاهش تلاطم جریان مذاب و در نتیجه جلوگیری از ایجاد هوای حبس شده در مذاب، راهگاہ بارریز مستطیلی بهتر از نوع دایره‌ای عمل می‌کند.

۳-۱-۵ - حوضچه پای راهگاہ بارریز^۱

از آن‌جا که سرعت مذاب در قسمت پایین راهگاہ بارریز به بیشترین مقدار خود می‌رسد و این امر ممکن است تلاطم و آشفتگی جریان مذاب را در راهبار و در نتیجه‌ی آن، تخریب قالب و جذب هوا به دنبال داشته باشد، از این‌رو، برای جلوگیری از این امر، حوضچه‌ای در انتهای راهگاہ بارریز تعبیه می‌گردد که به آن حوضچه پای راهگاہ گفته می‌شود. بنابراین، با ایجاد حوضچه‌ی پای راهگاہ، از

۱ - Sprue Base

تلاطم مذاب جلوگیری می‌شود و مذاب با سرعتی مناسب و از طریق راهبار وارد قالب می‌گردد. در شکل ۵-۶ ابعاد مناسب برای حوضچه پای راهگاه نشان داده شده است.



شکل ۵-۶ - ابعاد مناسب برای یک حوضچه پای راهگاه

۴-۱-۵ - کانال‌های اصلی^۱ (راهبار) و فرعی^۲ (راهباره)

همان‌طور که قبلاً بیان گردید، مذاب در انتهای راهگاه بارریز دارای سرعت زیادی است که انتقال مستقیم چنین مذابی به درون قالب، تلاطم و آشفتگی جریان و در نتیجه جذب هوا و تخریب سطوح قالب را به دنبال خواهد داشت، به همین دلیل برای جلوگیری از ایجاد چنین شرایط نامطلوبی، مذاب، قبل از ورود به قالب از یک کانال اصلی جریان داده می‌شود. این کانال مستقیم که از حوضچه پای راهگاه بارریز جدا می‌شود، راهبار نام دارد. عموماً مذاب، پس از جاری شدن در راهبار از طریق کانال‌هایی که از آن منشعب می‌شوند وارد محفظه قالب می‌گردد. این کانال‌های انشعابی به کانال‌های فرعی یا راهباره موسومند. قابل ذکر است که معمولاً، راهبار، بعد از آخرین

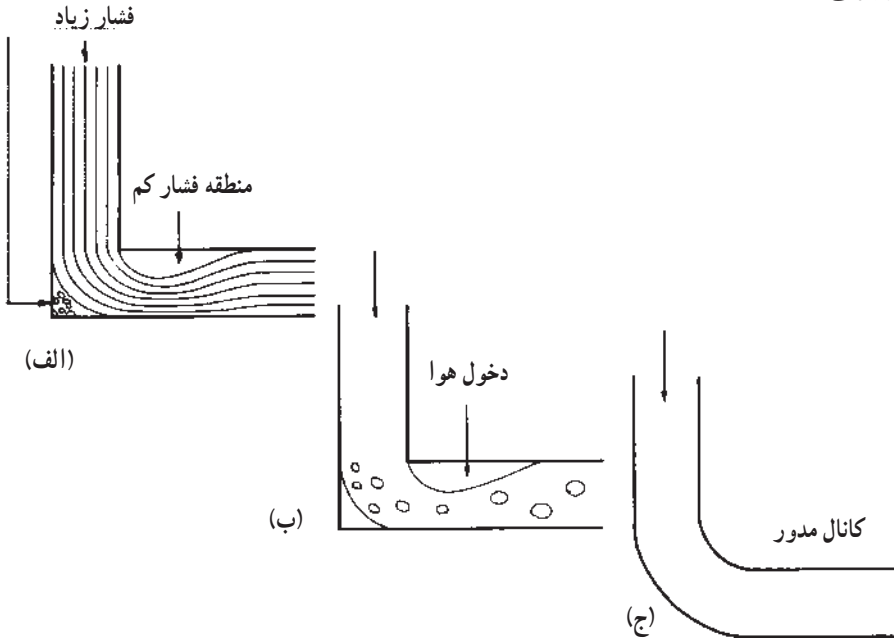
۱- Runner

۲- Ingate

راهبارهای انشعابی از آن، کمی امتداد پیدا می‌کند تا بدین وسیله مواد ناخواسته‌ی موجود در مذاب و سایر آشفته‌گی‌ها، به این قسمت انتهایی کشیده شود و از ورود آن‌ها به داخل محفظه‌ی قالب جلوگیری گردد. این قسمت انتهایی راهبار، کانال ممتد نامیده می‌شود.

۵-۱-۵ - طرح مناسب برای اتصال اجزای سیستم راهگاهی

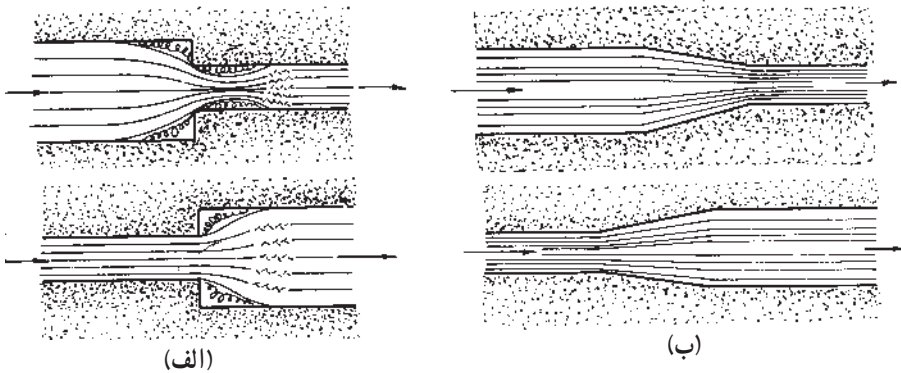
بنابر مطالب گذشته، یکی از وظایف مهم یک سیستم راهگاهی، ایجاد جریانی آرام و یکنواخت و با حداقل تلاطم و آشفته‌گی می‌باشد. با توجه به این موضوع، بدیهی است در صورتی که اجزای مختلف سیستم راهگاهی با گوشه‌هایی تیز به یکدیگر مرتبط گردند، به دلیل ایجاد تلاطم و آشفته‌گی در جریان مذاب در اثر تغییر مسیر ناگهانی در محل گوشه‌ها، جذب هوا و سایر گازهای ایجاد شده در قالب تسهیل می‌گردد. در شکل ۵-۷ این شرایط، برای محل اتصال راهگاه بارریز و راهبار نشان داده شده است.



شکل ۵-۷ - تأثیر گوشه‌های تیز در تلاطم مذاب

همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود تغییر مسیر جریان در محل گوشه‌ها منجر به ایجاد مناطقی با فشار کم‌تر از فشار اتمسفر می‌گردد (الف). که در نتیجه‌ی این امر، هوا و گازهای موجود در قالب وارد مذاب می‌شوند (ب). برای رفع این مشکل باید محل اتصال، مطابق شکل (ج) به صورت مدور

در نظر گرفته شود. همچنین محل اتصال راهبار به راهبارها نیز باید به گونه‌ای طراحی گردد که از تغییر ناگهانی سرعت مذاب و در نتیجه جذب هوا و ایجاد جریانی متلاطم جلوگیری به عمل آید. در شکل ۸-۵ این موضوع نشان داده شده است.



شکل ۸-۵ - طراحی محل اتصال اجزای سیستم راهگاهی (الف) طراحی نادرست (ب) طراحی درست

۵-۲ - انواع سیستم‌های راهگاهی

یکی از شرایط لازم برای عملکرد درست یک سیستم راهگاهی، این است که سطوح مقاطع مربوط به راهگاه بارریز، راهبار و راهبارها، دارای نسبت مناسبی باشند. این نسبت که نسبت راهگاهی نام دارد، در حقیقت نشان‌دهنده‌ی نسبت سطح مقطع راهگاه بارریز به سطح مقطع راهبار به مجموع سطوح مقاطع راهبارها می‌باشد و به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$A_S : A_R : A_G$$

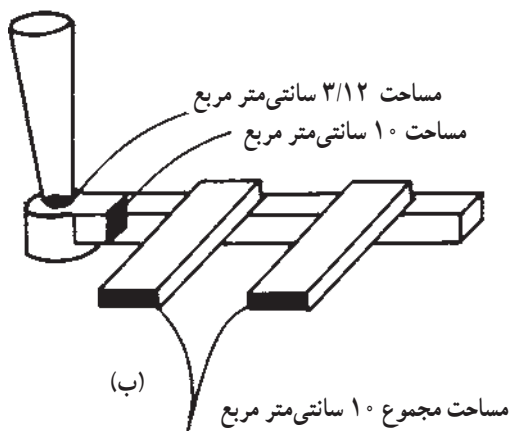
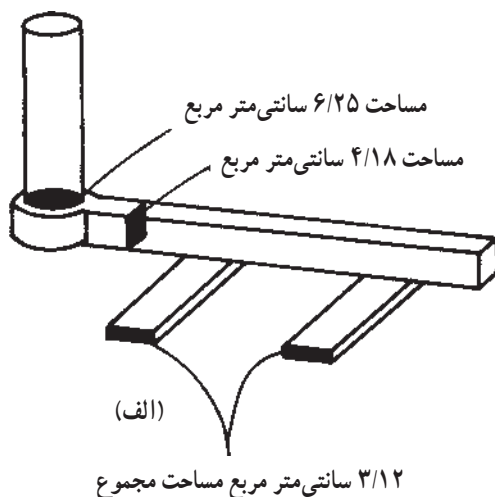
که در آن: A_S سطح مقطع راهگاه بارریز، A_R سطح مقطع راهبار و A_G مجموع سطوح مقاطع راهبارها می‌باشند.

هرچند در ریخته‌گری فلزات و آلیاژها، نسبت‌های راهگاهی مختلفی ممکن است مورد استفاده قرار گیرند ولی از جهت نوع رابطه‌ی میان سطوح مقاطع اجزای سیستم راهگاهی، این نسبت‌ها به دو گروه اصلی فشاری^۱ و غیرفشاری^۲ تقسیم می‌گردند. هرگاه در یک سیستم راهگاهی، مجموع سطوح

۱- Pressurized System

۲- Unpressurized System

مقاطع راهباره‌ها از سطح مقطع راهگاه بارریز کم‌تر باشد، سیستم از نوع فشاری و چنان‌چه عکس حالت یاد شده وجود داشته باشد، سیستم از نوع غیرفشاری است. با توجه به این تعریف، بدیهی است که در سیستم راهگاهی فشاری، همواره، فشاری در پشت مذاب وجود دارد. و حال آنکه در نوع غیرفشاری، فشار مذاب در راهگاه بارریز گرفته می‌شود و فشار قابل توجهی بر روی مذاب موجود در سیستم راهگاهی اعمال نمی‌گردد. در شکل ۹-۵ این دو نوع سیستم راهگاهی به‌طور شماتیک نشان داده شده‌اند.



شکل ۹-۵ - انواع سیستم‌های راهگاهی. (الف) سیستم فشاری (ب) سیستم غیرفشاری

در جدول ۱-۵ مزیت‌ها و محدودیت‌های سیستم‌های راهگای فشاری و غیرفشاری درج شده است. با توجه به موارد مندرج در جدول مذکور می‌توان چنین گفت که سیستم‌های راهگای فشاری برای فلزات آهنی، به‌ویژه چدن‌ها، مناسب می‌باشد، درحالی‌که در ریخته‌گری فلزات و آلیاژهای غیرآهنی مانند آلومینیم و منیزیم که تمایل زیاد به واکنش با هوا و گازها دارند، استفاده از سیستم‌های راهگای غیرفشاری مناسب می‌باشد. در مورد برنج‌ها و برنزها، براساس روش ریخته‌گری، نوع قطعه و تجربه‌ی ریخته‌گر، می‌توان از هر دو نوع سیستم‌های راهگای فشاری و غیرفشاری استفاده نمود.

جدول ۱-۵- مزیت‌ها و محدودیت‌های سیستم‌های راهگای فشاری و غیرفشاری

| سیستم راهگای غیرفشاری | | سیستم راهگای فشاری | |
|---|--|--|---|
| محدودیت‌ها | مزیت‌ها | محدودیت‌ها | مزیت‌ها |
| ۱- پرنبودن سیستم راهگای و در نتیجه امکان ورود هوا | ۱- ایجاد جریان آرام و با حداقل آشفستگی و تلاطم و در نتیجه کاهش عیب‌هایی هم‌چون جذب گاز و هوا و شسته شدن قالب | ۱- ایجاد تلاطم و آشفستگی در مذاب به دلیل افزایش سرعت خطی مذاب و در نتیجه امکان شسته شدن قالب و جذب گاز | ۱- پرشدن سریع سیستم از مذاب و در نتیجه کاهش زمان تماس مذاب با هوای داخل سیستم |
| ۲- یکسان نبودن مقدار جریان مذاب از راهباره‌ها به داخل محفظه قالب | ۲- فرصت کافی برای جدا شدن (بالا آمدن) آخال و مواد ناخواسته | ۲- عدم فرصت جدا شدن (بالا آمدن) آخال و مواد ناخواسته موجود در مذاب | ۲- جریان مذاب به یک اندازه از راهباره‌ها وارد محفظه قالب می‌شود. |
| ۳- کاهش راندمان ریختگی به دلیل مصرف حجم زیاد مذاب در سیستم راهگای | | | ۳- سهولت در جداسازی اجزای سیستم راهگای از قطعه |
| | | | ۴- افزایش راندمان تولید به دلیل حجم کم مذاب مصرفی در سیستم راهگای |

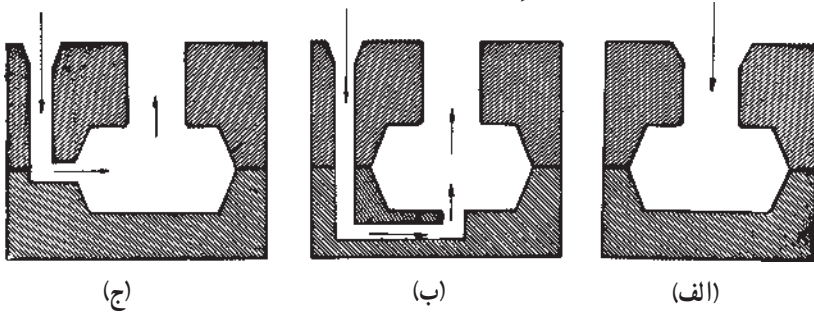
در جدول ۲-۵ نسبت‌های راهگاهی مربوط به برخی از فلزات و آلیاژهای صنعتی درج شده است.

جدول ۲-۵- نسبت‌های راهگاهی مربوط به فلزات و آلیاژهای صنعتی

| نسبت راهگاهی متداول $A_s : A_r : A_G$ | نوع سیستم | فلز یا آلیاژ |
|---|--|---|
| ۱ : ۲ : ۱/۵ ۱ : ۳ : ۳ ۱ : ۱ : ۰/۷ ۱ : ۲ : ۲ ۱ : ۱ : ۱ | غیرفشاری غیرفشاری فشاری غیرفشاری - | فولاد |
| ۱ : ۴ : ۴ ۱ : ۱/۳ : ۱/۱ | غیرفشاری فشاری | چدن خاکستری |
| ۱۰ : ۹ : ۸ ۱ : ۲ : ۲ ۴ : ۸ : ۳ ۱/۲ : ۱ : ۲ | فشاری غیرفشاری فشاری غیرفشاری | (ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای خشک) چدن نشکن (ریخته‌گری در قالب پوسته‌ای به‌طور عمودی) |
| ۱ : ۲ : ۴ ۱ : ۲ : ۱ ۱ : ۳ : ۳ | غیرفشاری فشاری غیرفشاری | آلومینیم |
| ۱ : ۱ : ۱ ۱ : ۱ : ۳ | - غیرفشاری | برنج (آلیاژ مس - روی) |

۵-۳-۵- روش‌های راهگاه‌گذاری (روش‌های تعبیه سیستم‌های راهگاهی)

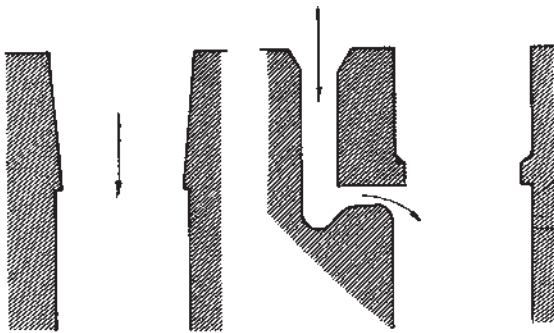
براساس نوع فلز یا آلیاژ، شکل، ابعاد و وزن قطعه‌ی ریختگی و نیز مواد قالب، تعبیه سیستم راهگاهی ممکن است به سه طریق کلی نشان داده شده در شکل ۵-۱۰ صورت گیرد.



شکل ۵-۱۰- روش‌های راهگاه‌گذاری

۵-۳-۱- روش راهگاه‌گذاری از بالا

در این روش که انواع مختلف آن به‌طور شماتیک در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است، مذاب از قسمت فوقانی، مستقیماً وارد محفظه قالب می‌شود.



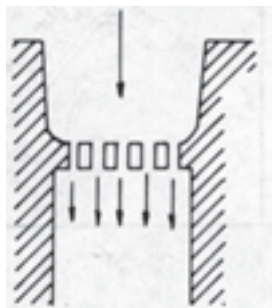
شکل ۵-۱۱- روش راهگاه‌گذاری از بالا

با توجه به نحوه‌ی انتقال مذاب به داخل قالب، هنگام استفاده از چنین روشی، همواره باید به دو نکته‌ی اساسی توجه شود:

الف- به دلیل ریزش مستقیم مذاب و امکان تخریب قالب (کف)، قالب باید از استحکام کافی برخوردار باشد.

ب- به دلیل ایجاد جریانی آشفته و متلاطم، عیوبی همچون جذب هوا و گاز و نیز اکسید شدن فلز تشدید می‌گردد.

قابل ذکر است که به منظور محافظت از سطوح قالب (شسته شدن ماسه) و نیز جلوگیری از ورود



شکل ۱۲-۵ - راهباری مدادی

شلاکه‌ی مذاب به داخل آن، از طرح اصلاحی نشان داده شده در شکل ۱۲-۵ استفاده می‌شود. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با قراردادن یک ماهیچه‌ی صافی (راهباری مدادی) هم عمل شلاکه‌گیری صورت می‌گیرد و هم جداره‌های قالب به مقدار قابل توجهی از تخریب و شسته شدن حفظ می‌شوند. به هر حال برخلاف نکات مثبت یاد شده، به این نکته نیز باید توجه کرد که تحت چنین شرایطی، به دلیل تعدد جریان مذاب، جذب گاز و اکسایش مذاب نیز، تشدید می‌گردد.

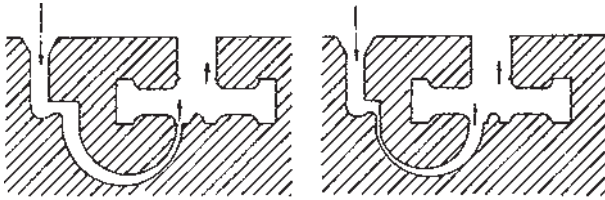
با توجه به مطالب یاد شده، مزیت‌ها و محدودیت‌ها و نیز کاربرد روش راهگاه از بالا را می‌توان به صورت جدول ۳-۵ خلاصه نمود:

جدول ۳-۵ - مزیت‌ها و محدودیت‌های روش راهگاه از بالا

| مزیت‌ها | محدودیت‌ها | کاربرد |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - سادگی سیستم راهگاهی - راندمان ریختگی بالا - ایجاد انجماد جهت دار از قطعه به سوی راهگاه و در نتیجه‌ی آن، تجمع حفره‌های انقباضی و آخال‌ها در راهگاه | <ul style="list-style-type: none"> - تخریب کف قالب در اثر ریزش مستقیم مذاب (مناسب نبودن برای ریخته‌گری آلیاژهای سنگین مانند چدن، فولاد و مس) - ایجاد ذرات اکسیدی در اثر برخورد مذاب با کف قالب و پرتاب شدن آن (نامناسب بودن برای ریخته‌گری فلزات و آلیاژهایی که تمایل زیادی به اکسایش دارند) | <ul style="list-style-type: none"> - ریخته‌گری در قالب‌های کوچک با ارتفاع کم ریزش مذاب - ریخته‌گری در قالب‌های با استحکام بالا مانند قالب‌های فلزی و قالب‌های ماسه‌ای سخت (قالب‌های تهیه شده با چسب‌های سیلیکات سدیم، سیمان و ...) - ریخته‌گری قطعات چدنی با شکل ساده - ریخته‌گری استوانه‌های توخالی به طریق عمودی به صورت راهباری مدادی |
| <ul style="list-style-type: none"> - جذب گاز و هوا در اثر تلاطم زیاد مذاب | <ul style="list-style-type: none"> - ریخته‌گری قطعاتی که دارای قسمت بزرگ و سنگینی در وسط خود هستند (مانند چرخ واگن‌های راه‌آهن) | |

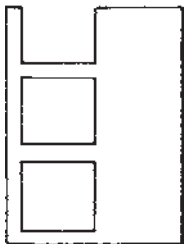
۲-۳-۵- روش راهگاه گذاری از پایین^۱

در این روش، مذاب از پایین ترین نقطه‌ی قالب وارد آن می‌شود. به همین دلیل، مهم‌ترین ویژگی آن، ایجاد جریانی آرام و با حداقل تلاطم و آشفته‌گی از مذاب می‌باشد. در شکل ۵-۱۳ انواع مختلف روش راهگاه از پایین به صورت ساده‌ای نشان داده شده است. برخلاف ویژگی یاد شده در این روش، به دلیل قرارگرفتن اولین مذاب (مذاب سردتر) در قسمت فوقانی (محل استقرار تغذیه)، انجماد مذاب، در شیب دمایی مناسب صورت نمی‌گیرد. از این رو تشکیل حفره‌های انقباضی در قطعات ریخته شده، اجتناب‌ناپذیر است. برای رفع این مشکل از راهگاه پله‌ای مطابق شکل ۵-۱۴ استفاده می‌گردد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود با ایجاد اتصالات بیشتر از راهگاه به

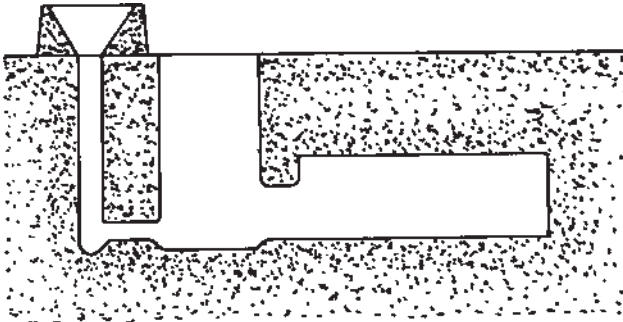


شکل ۵-۱۳- دو نمونه از روش راهگاه‌گذاری از پایین (راهگاه شاخی)

قطعه، گرم‌ترین مذاب وارد تغذیه می‌شود و در نتیجه، انجماد قطعه به صورت جهت‌دار صورت می‌گیرد. قابل ذکر است که هنگام استفاده از تغذیه‌ی جانبی، کاربرد راهگاه از پایین، نتایج بسیار مطلوبی را به همراه خواهد داشت (شکل ۵-۱۵).



شکل ۵-۱۴- راهگاه پله‌ای



شکل ۵-۱۵- راهگاه زیرین در اتصال به تغذیه جانبی

به طوری که در این شکل مشاهده می شود، به دلیل عبور مداوم مذاب از تغذیه، این قسمت در پایان بارریزی، گرم ترین قسمت قالب خواهد بود. بدیهی است در چنین شرایطی به دلیل ایجاد شیب دمایی مطلوب، انجماد قطعه به صورت جهت دار صورت می گیرد.

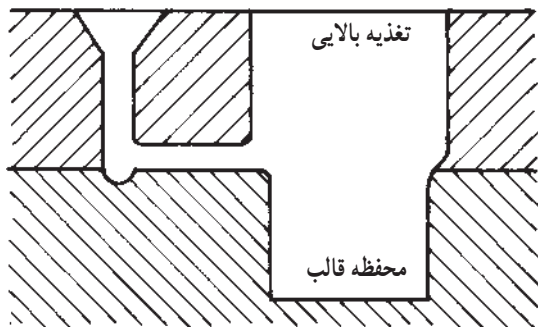
با توجه به نکات یاد شده، مزیت ها و محدودیت های روش راهگاه از پایین را می توان به صورت جدول ۴-۵ خلاصه نمود.

جدول ۴-۵- مزیت ها، محدودیت ها و کاربرد روش راهگاه از پایین

| مزیت ها | محدودیت ها | کاربرد |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - کاهش اکسایش فلز و تخریب قالب - کاهش جذب هوا و گاز هنگام بارریزی به دلیل ایجاد جریانی آرام و با حداقل تلاطم از مذاب - صافی سطوح قطعات ریختگی - ایجاد انجماد جهت دار در صورت استفاده از راهگاه پله ای و یا استفاده از مواد عایق در تغذیه | <ul style="list-style-type: none"> - احتمال قطع شدن جریان و ناقص ماندن قسمت های فوقانی در صورت وقوع انجماد از پایین به طرف بالا. - ایجاد شیب دمایی نامناسب و فراهم نشدن شرایط برای ایجاد یک انجماد جهت دار (تشکیل حفره های انقباضی در قطعه) | <ul style="list-style-type: none"> - عموماً در ریخته گری قطعات فولادی - غالباً در ریخته گری قطعات بزرگ - در ریخته گری قطعات با استفاده از تغذیه ی جانبی |

۳-۳-۵- روش راهگاه گذاری در سطح جدایش^۱

در این روش، مذاب مطابق شکل



۱۶-۵ از ارتفاع کم تری (از سطح جدایش قالب) وارد محفظه ی قالب می شود و بنابراین، مشکلات مربوط به روش راهگاه گذاری از بالا کاهش می یابد.

شکل ۱۶-۵- روش راهگاه گذاری در سطح جدایش

۱- Side Gating

مزیت‌ها و محدودیت‌های این روش از راهگاه‌گذاری را می‌توان به صورت جدول ۵-۵ خلاصه نمود :

جدول ۵-۵- مزیت‌ها، محدودیت‌ها و کاربرد روش راهگاه‌گذاری در سطح جدایش

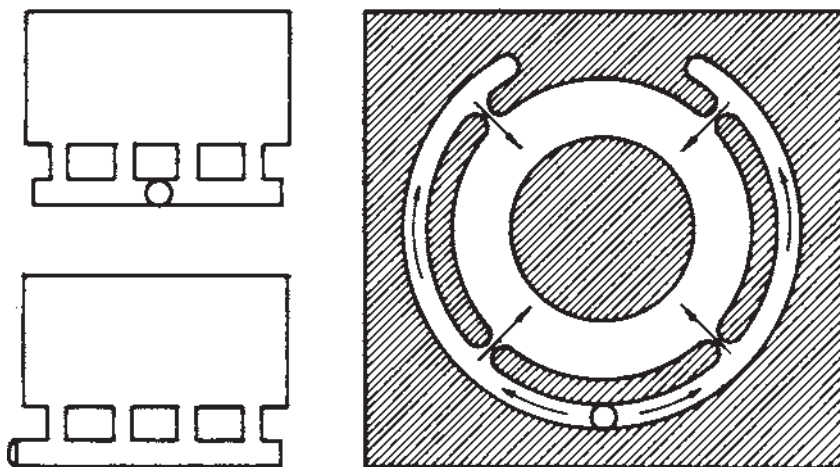
| مزیت‌ها | محدودیت‌ها | کاربرد |
|--|---|--|
| <p>– سهولت تعبیه‌ی سیستم راهگاهی به دلیل فرارگرفتن آن در سطح جدایش</p> <p>– مفید بودن این روش، به هنگامی که ارتفاع قسمت‌زیری قالب زیاد نباشد</p> <p>– سهولت اتصال راهگاه به تغذیه و در نتیجه انجام دایره‌دار و تهیه قطعه‌ای با کیفیت مطلوب</p> <p>– صرفه‌جویی در فلز مصرفی در سیستم راهگاهی در اثر اتصال راهگاه به قطعه توسط تغذیه</p> | <p>– ایجاد جریان مذابی با تلاطم و آشفستگی زیاد در صورتی که ارتفاع قسمت‌زیری قالب زیاد باشد.</p> <p>(تخریب قالب و جذب هوا و گاز)</p> | <p>– به دلیل ایجاد تلاطم در قسمت‌زیری قالب و در نتیجه باقی ماندن ذرات اکسیدی و ناخالصی‌های دیگر در مذاب، این روش برای ریخته‌گری آلیاژهای غیرآهنی مناسب نیست.</p> <p>– در ریخته‌گری قطعات چدنی و به‌ویژه در مواردی که ارتفاع قسمت‌زیری قالب کم باشد، این روش مناسب است.</p> |

۴-۳-۵ – سیستم‌های راهگاهی مرکب^۱ (چندتایی)

هرچند استفاده از روش‌های راهگاه‌گذاری بیان شده در قسمت‌های گذشته (استفاده از یک مجرا برای انتقال مذاب به داخل قالب) در ریخته‌گری قطعات کوچک بسیار متداول است ولی در تهیه قطعات ریختگی بزرگ، استفاده از این روش‌ها مشکلاتی را به دنبال دارد که تولید قطعات سالم و با کیفیت مطلوب را محدود می‌سازد. علت این موضوع را می‌توان چنین بیان کرد که اولاً، حرارت زیاد جداره‌ی راهباره در محل اتصال آن به قطعه، موجب تخریب قالب در این محل گردیده، در نتیجه مسأله مذاب‌رسانی قطعه مختل می‌شود. ثانیاً، به دلیل طولانی بودن مسیر جریان مذاب در محفظه‌ی قالب، پُر شدن آن به‌طور مطلوبی صورت نمی‌گیرد. مشکلات یاد شده با استفاده از یک سیستم راهگاهی پیچیده‌تر که در آن، مذاب از طریق چند راهباره‌ی مجزاً به قسمت‌های مختلف قالب هدایت

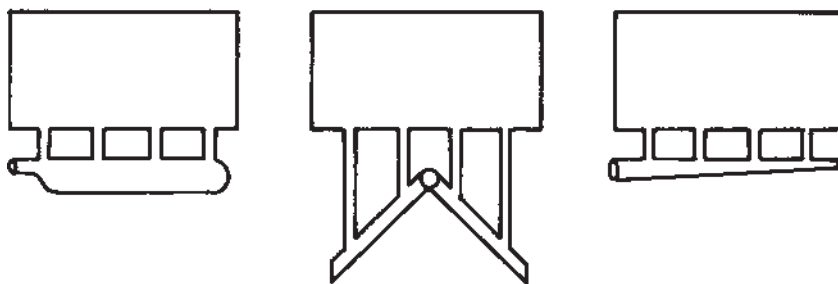
۱- Multiple gating Systems

می‌شود، به‌خوبی حل می‌گردد. این راهگاه‌ها که در ساخت و ایجاد آن‌ها ممکن است یکی از انواع راهگاه‌های ساده (راهگاه از بالا، راهگاه از پایین و راهگاه در سطح جدایش) مورد استفاده قرار گیرد، راهگاه‌های مرکب نامیده می‌شوند و به دو صورت به‌کار می‌روند. در شکل ۱۷-۵ انواع مختلف از راهگاه‌های مرکب افقی، به‌طور شماتیک نشان داده شده است.



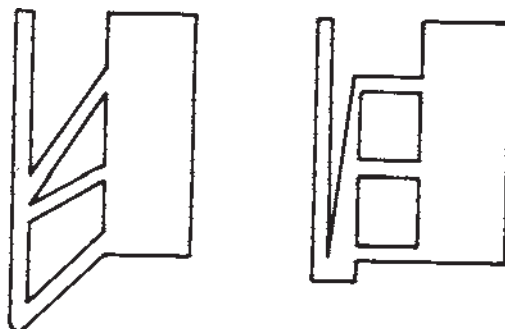
شکل ۱۷-۵- انواع راهگاه‌های مرکب

از مسائل مهم در طراحی این راهگاه‌ها، آگاهی از مقدار مذاب ورودی از هریک از راهباره‌ها به‌داخل محفظه‌ی قالب است. با توجه به اهمیت ورود یکنواخت مذاب از راهباره‌ها به‌داخل محفظه‌ی قالب، طراحی این سیستم‌ها باید مطابق شکل ۱۸-۵ اصلاح گردد.



شکل ۱۸-۵- طرح‌های اصلاحی برای ورود یکنواخت مذاب به محفظه‌ی قالب در راهگاه‌های مرکب

همان‌گونه که اشاره گردید نوع دیگر راهگاه‌های مرکب، نوع عمودی آن است که به سیستم راهگاهی پله‌ای^۱ موسوم می‌باشد. در شکل‌های ۵-۱۴ و ۵-۱۹ انواع مختلف این نوع از سیستم راهگاهی نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۹- انواع دیگر سیستم راهگاهی پله‌ای

مزیت‌ها و محدودیت‌های این نوع سیستم در قسمت‌های گذشته توضیح داده شد. به‌طور کلی مشخصات سیستم‌های راهگاهی مرکب را می‌توان به‌صورت جدول ۵-۶ خلاصه نمود.

جدول ۵-۶- مزیت‌ها، محدودیت‌ها و کاربرد سیستم‌های راهگاهی مرکب

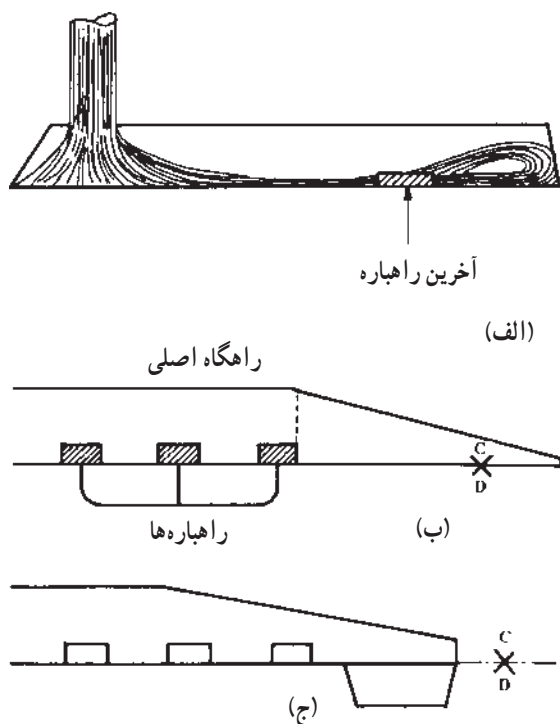
| مزیت‌ها | محدودیت‌ها | کاربرد |
|---|--|--|
| <p>- با توجه به این‌که در یک سیستم راهگاهی مرکب، از کدام یک از انواع راهگاه‌های فرعی (راهگاه از بالا، راهگاه از پایین و راهگاه در سطح جدایش) استفاده شده باشد، از مزیت‌های مربوط به آن راهگاه برخوردار خواهد بود.</p> <p>- سیستم‌های مرکب با طرح‌های مختلف می‌توانند کلیه محدودیت‌ها و نارسایی‌های سیستم ساده را نیز برطرف نمایند.</p> <p>- امکان ایجاد انجمادی یکنواخت</p> | <p>- مشکل بودن ساخت و ایجاد این سیستم‌ها (مشکل تکنولوژیکی)</p> | <p>- برای ریخته‌گری قطعات بزرگ و پیچیده</p> <p>- با توجه به شکل و اندازه قطعه می‌توان از سیستم راهگاهی پله‌ای یا افقی استفاده کرد.</p> |

۴-۵- روش‌های آخالگیری در سیستم‌های راهگاهی

همان‌طور که قبلاً بیان شد، یکی از وظایف و نقش‌های بسیار مهم سیستم‌های راهگاهی، قابلیت آخالگیری آن‌هاست. با وجود این، حتی با انتخاب بهترین سیستم‌های راهگاهی، ورود شلاکه و مواد ناخواسته‌ی دیگر به محفظه‌ی قالب اجتناب‌ناپذیر است. همان‌طور که در فصول گذشته به تفصیل شرح داده شد، این مواد ناخواسته ممکن است از کوره‌های ذوب، پاتیل‌ها، درآثر ریخته‌گری نادرست و نیز طراح‌ی نامناسب سیستم راهگاهی ناشی گردند. اصولاً جداسازی مواد ناخواسته از مذاب، یا براساس اختلاف وزن مخصوص میان این مواد و فلز مذاب صورت می‌گیرد و یا این‌که برای این کار از صافی (فیلتر) استفاده به عمل می‌آید.

۱- ۴-۵- روش‌های جداسازی مواد ناخواسته براساس اختلاف در وزن مخصوص

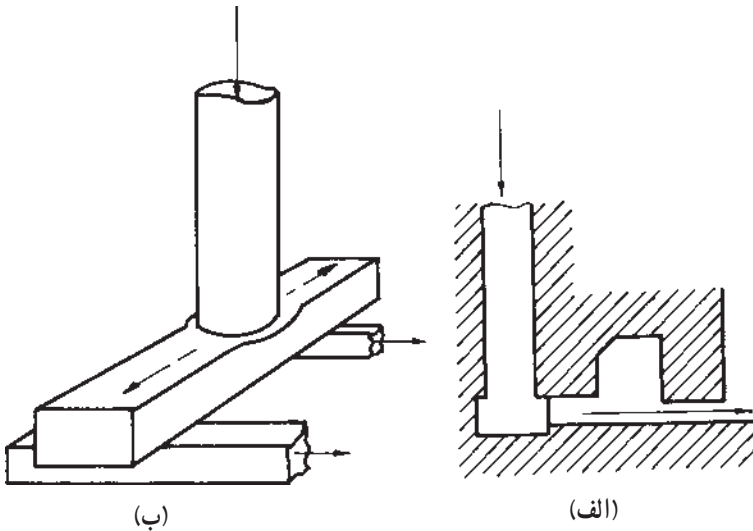
الف- استفاده از کانال ممتد: به طوری که اشاره گردید، راهگاه اصلی (راهبار) معمولاً بعد



شکل ۲۰-۵- الف) برگشت جریان مذاب در برخورد به قسمت انتهایی راهبار در اولین مراحل ریختن مذاب
ب) جلوگیری از برگشت جریان مذاب با ایجاد شیب در قسمت انتهایی راهبار

ج) ایجاد چاهک در انتهای راهبار برای تجمع مواد ناخواسته

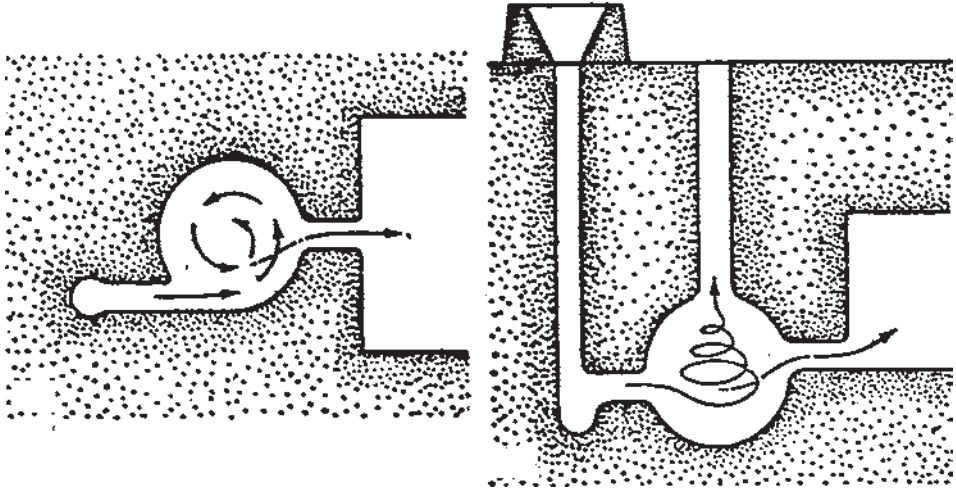
ب - استفاده از موانع و گلولی در سیستم راهگاهی: همان گونه که در شکل ۲۱-۵ مشاهده می شود با اعمال روش هایی مانند ایجاد محفظه هایی به نام تله^۱ در راهبار (الف)، تعبیه ی راهبار در قسمت بالای قالب و راهباره ها در قسمت پایین آن (ب) و نیز قراردادن مانع یا سد و تویی در حوضچه مطابق شکل های ۳-۵ ب و ج، می توان شرایط مناسبی برای صعود و جداسازی مواد ناخواسته ی موجود در مذاب فراهم نمود و بدین ترتیب با جمع آوری این مواد در قسمت های مختلف سیستم راهگاهی، از ورود آن ها به داخل محفظه ی قالب جلوگیری کرد. در این جا یادآوری این نکته ضروری است که استفاده از حالت (ب) هنگامی مفید است که مواد ناخواسته، نسبت به مذاب سبک تر بوده، درعین حال، سیستم راهگاهی نیز از نوع فشاری باشد. به همین دلیل، این روش ها را می توان تنها برای فلزات آهنی و بعضی از آلیاژهای مس که دارای شرایط یاد شده هستند، به خوبی بکار برد.



شکل ۲۱-۵- روش های دیگر برای جلوگیری از ورود آخال ها و مواد ناخواسته به داخل محفظه قالب

ج - استفاده از راهگاه های گردابی: با استفاده از این نوع راهگاه ها که نمونه ای از آن به طور شماتیک در شکل ۲۲-۵ نشان داده شده است، می توان به طور مؤثری مواد ناخواسته ی موجود در مذاب را از آن جدا نمود. در این روش، مواد ناخواسته، در اثر ایجاد نیروی جانبی به مرکز در سطح مذاب جمع شده، به داخل کانالی که در بالای محفظه ی گردابی تعبیه شده است رانده می شوند.

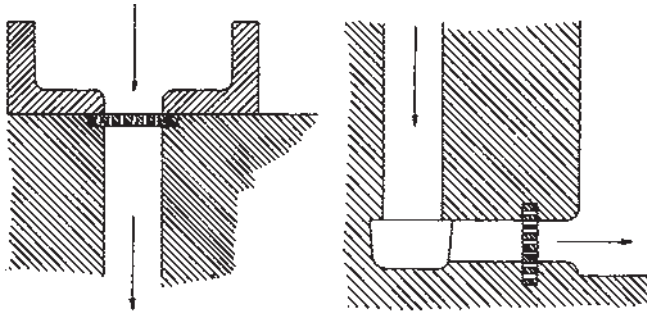
۱ - Trap



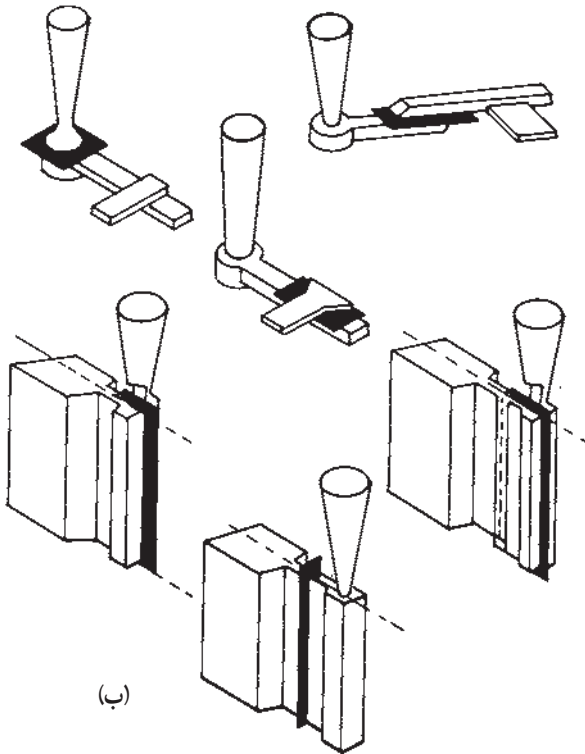
شکل ۲۲-۵- راهگاه گردابی

۲-۴-۵- استفاده از صافی (فیلتر)

جداسازی مواد ناخواسته با استفاده از روش‌هایی که تاکنون بیان گردید، مستلزم سبک‌تر بودن این مواد در مقایسه با مذاب و در نتیجه، قابلیت شناور شدن آن‌ها در مذاب بوده است. بنابراین، طبیعی است که این‌گونه روش‌ها در ریخته‌گری آلیاژهای سبک که در آن‌ها مواد ناخواسته معمولاً دارای شرایط یاد شده نیستند، از کارآیی مطلوبی برخوردار نخواهند بود. از این‌رو در ریخته‌گری این آلیاژها، علاوه بر رعایت اصول کلی بیان شده، از فیلترهای تصفیه و توری‌های سیمی در قسمت‌های مختلف سیستم راهگاهی استفاده می‌شود. در شکل ۲۳-۵ نمونه‌هایی از کاربرد ماهیچه صافی (الف) و توری‌های سیمی (ب) در قسمت‌های مختلف سیستم راهگاهی نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲۳-۵ - استفاده از صافی (فیلتر) در قسمت‌های مختلف از سیستم راهگامی

(الف) استفاده از ماهیچدی صافی

(ب) استفاده از توری‌های سیمی

- ۱- وظایف اصلی یک سیستم راهگاهی کدامند؟
- ۲- اجزای یک سیستم راهگاهی را نام برده، با رسم یک شکل آن‌ها را نشان دهید.
- ۳- وظایف اساسی حوضچه بالای راهگاه بارریز را توضیح دهید.
- ۴- دلیل مخروطی شکل بودن راهگاه بارریز چیست؟ توضیح دهید.
- ۵- طرح اتصال اجزای سیستم راهگاهی چه نقشی در سلامت قطعه‌ی ریختگی دارد؟
- ۶- نسبت راهگاهی چیست؟
- ۷- مزیت‌ها و محدودیت‌های سیستم‌های راهگاهی فشاری و غیرفشاری کدامند؟
- ۸- انواع روش‌های راهگاه‌گذاری را با رسم شکل نشان داده، مزیت‌ها و محدودیت‌های هر یک را توضیح دهید.
- ۹- سیستم‌های راهگاهی مرکب چه نوع سیستمی هستند و در چه مواردی بکار می‌روند؟
- ۱۰- روش‌های جداسازی مواد ناخواسته را از مذاب نام برده، موارد استفاده هر یک را ذکر کنید.

فهرست منابع اصلی

الف - منابع فارسی

- ۱- حجازی جلال - اصول متالورژیکی ریخته‌گری - دانشگاه علم و صنعت ایران ۱۳۷۳
- ۲- دوامی پرویز، حجازی جلال، نظم‌دار سیاوش، عسگرزاده علی‌اکبر - درس فنی سال سوم ریخته‌گری آموزش و پرورش ۱۳۷۲
- ۳- دوامی پرویز، حجازی جلال، نظم‌دار سیاوش، عسگرزاده علی‌اکبر - حساب فنی سال چهارم ریخته‌گری آموزش و پرورش ۱۳۷۲
- ۴- دوامی پرویز - مبانی سیستم‌های راهگاهی و تغذیه‌گذاری در چدن‌ها - جامعه ریخته‌گران ایران

- ۵- پرورش رئوف - سیستم راهگاهی در ریخته‌گری چدن - جامعه ریخته‌گران ایران
- ۶- خسروی رحمان - اصول سیستم راهگاهی و تغذیه‌گذاری در چدن‌ها - جامعه ریخته‌گران ایران

ب - منابع خارجی

1. Foundry Technology/ P.R.Beeley / Butter Worth, London/ 1972.
2. Principles of Metal Casting /Heine Loper Rosental/ Mc Graw - Hill, U.S.A/ 1967.
3. Metals Handbook, 8th Edition, Vol 5 / ASM / 1970.
4. Metals Handbook, 9th Edition, Vol 15 / ASM / 1988.
5. Solidification and Casting / G.j. Davice / Applied Science pub / 1973.
6. Solidification Processing / M.C.Flemings / Mc Graw - Hill / 1974.
7. Applied science in the Casting of Metals / Ed.K. Strauss / Pergamon /

1970.

8. Phase Transformation in Metals and Alloys / D.A. Porter / Van Nostrand Reinhold (UK) / 1981.

9. Physical Metallurgy Principles / R.E.Reed Hill / Van Nostrand Reinhold (U.K) / 1970.

10 . Foundryman's Handbook, 9th Edition / Foseco / Pergamon / 1986.

11. Introduction to physical Metallurgy / Avner / Mc Graw - Hill / 1974.

