



بسم الله الرحمن الرحيم

آشنایی با فرآیندهای ساخت

فصل چهارم: ریخته‌گری (۱)

مدرس:

دکتر رضا قنوازی

r_ghanavati@sbu.ac.ir

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

پاییز ۱۴۰۴

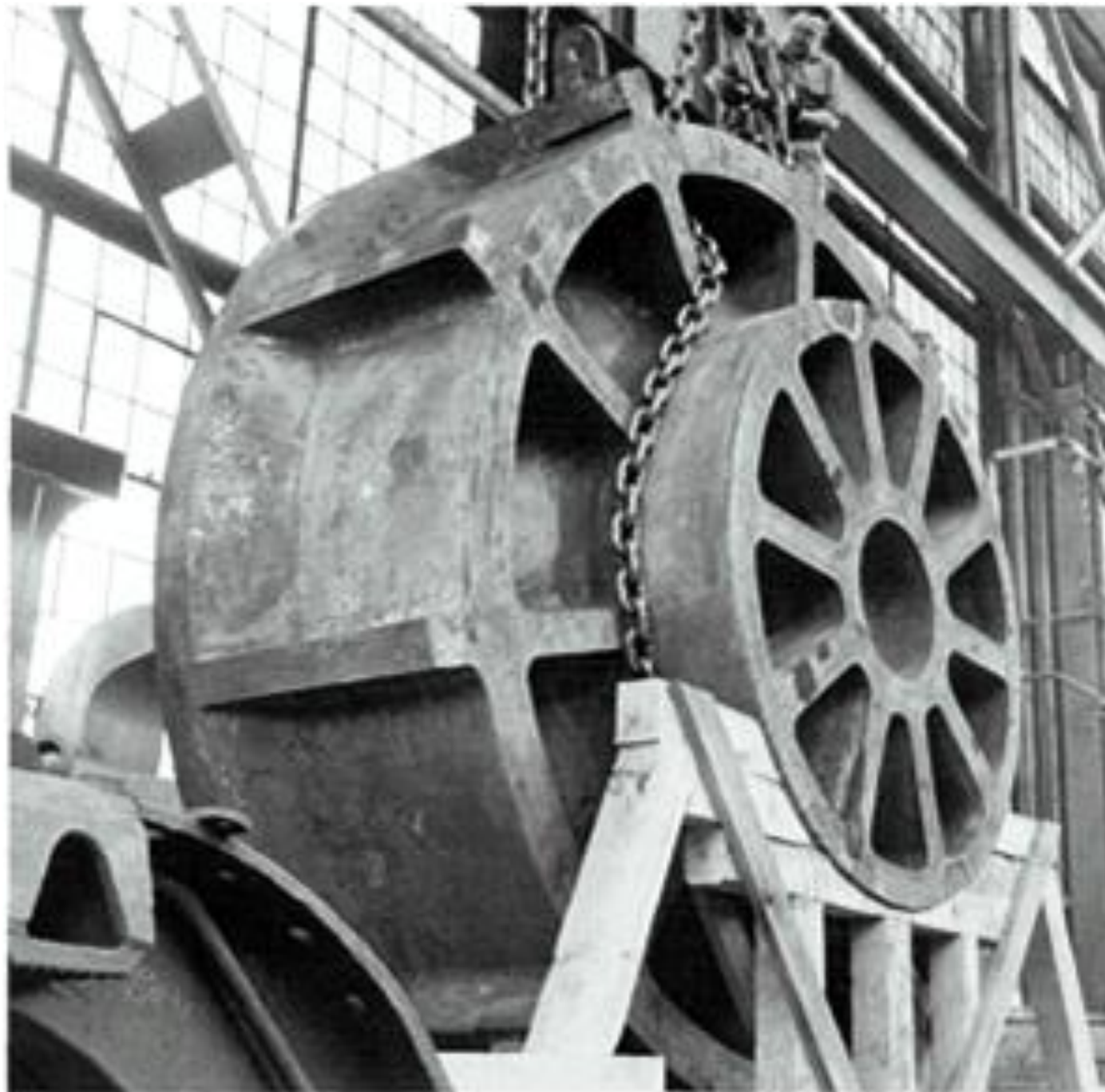
□ فهرست مطالب

- (1) مقدمه
- (2) انجماد فلزات
- (3) ساختار قطعات ریختگی
- (4) جریان سیال و انتقال حرارت
- (5) کوره‌ها و عملیات ذوب
- (6) اتوماسیون و ایمنی
- (7) آلیاژهای ریختگی
- (8) ریخته‌گری شمش و ریخته‌گری پیوسته
- (9) فرآورده‌های ریخته‌گری
- (10) اقتصاد ریخته‌گری

(۱) مقدمه

ریخته‌گری فرآیندی است که در آن مذاب فلز توسط نیروی گرانشی یا غیره به درون قالب جریان می‌یابد و به شکل حفره قالب، منجمد می‌شود.

- مراحل فرآیند: ذوب فلز، ریختن در قالب و سرمایش و انجماد
- تقریباً اکثر فلزات به شکل نهایی مورد نظر قابل ریخته‌گری هستند و اغلب finishing جزئی لازم است.
- دقت ابعادی محصول: net-shape و near-net-shape
- با تکنیک‌های ریخته‌گری قطعات خیلی بزرگ، خیلی کوچک، و توخالی با صرفه اقتصادی قابل تولید است.



✓ عوامل اصلی در عملیات ریخته‌گری

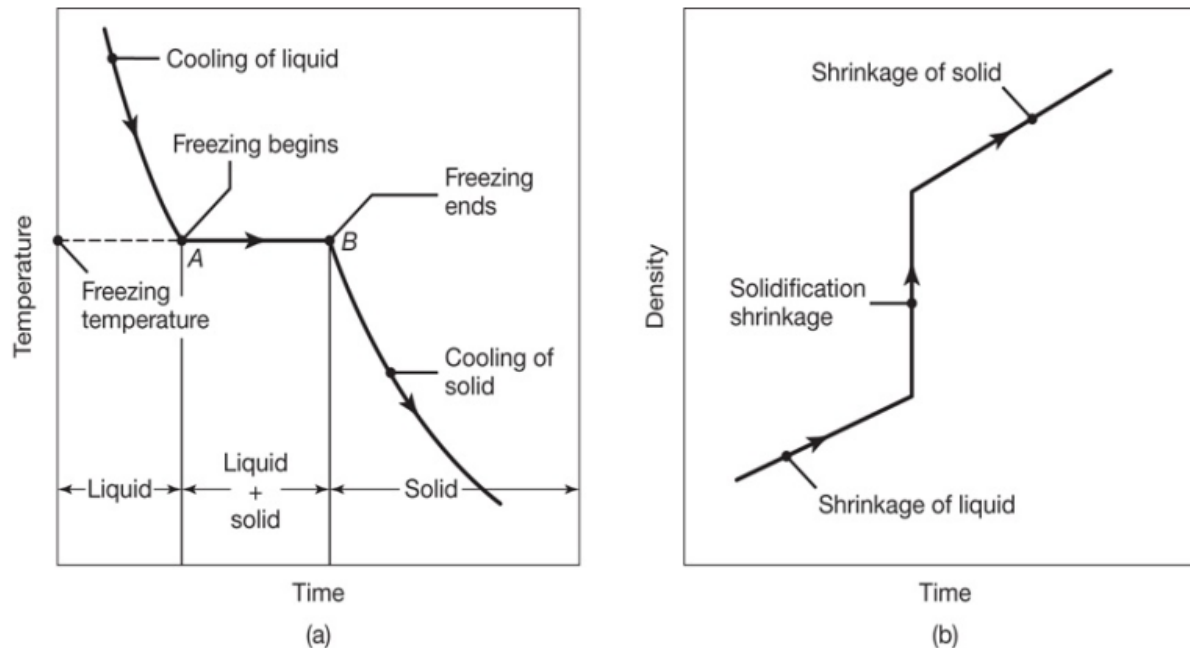
1. انجماد فلز از حالت مذاب و انقباض آن (تغییر حجم)
2. جریان فلز مذاب به درون حفره قالب (سیالیت)
3. دمای ذوب فلز
4. انتقال حرارت حین انجماد و سرد شدن فلز داخل قالب
5. تاثیر نوع ماده قالب بر سرد شدن

قابلیت ریخته‌گری: سهولت ریخته‌گری فلز یا آلیاژ جهت تولید قطعه با کیفیت مناسب

۱- نقطه ذوب ۲- انقباض حین انجماد ۳- سیالیت

۲- انجماد فلزات

انجماد، انتقال فلز مذاب به حالت جامد است و فرآیند انجماد با توجه به خالص یا آلیاژی بودن متفاوت است. **فلزات خالص** نقاط انجماد و ذوب مشخصی دارند و در دمای ثابتی منجمد می‌شوند (شکل الف).



هنگامی که دمای فلز مذاب تا دمای انجماد کاهش داده می‌شود، گرمای نهان ذوب در دمای ثابتی خارج می‌شود. در انتهای تغییر فاز **همدمای (isothermal)**، انجماد تکمیل و فلز جامد تا دمای اتاق سرد می‌شود.

تغییر چگالی زیادی ناشی از تغییر فاز از مذاب به جامد رخ می‌دهد (شکل ب)

Figure 5.1

(a) Temperature as a function of time for the solidification of pure metals. Note that freezing takes place at a constant temperature. (b) Density as a function of time.

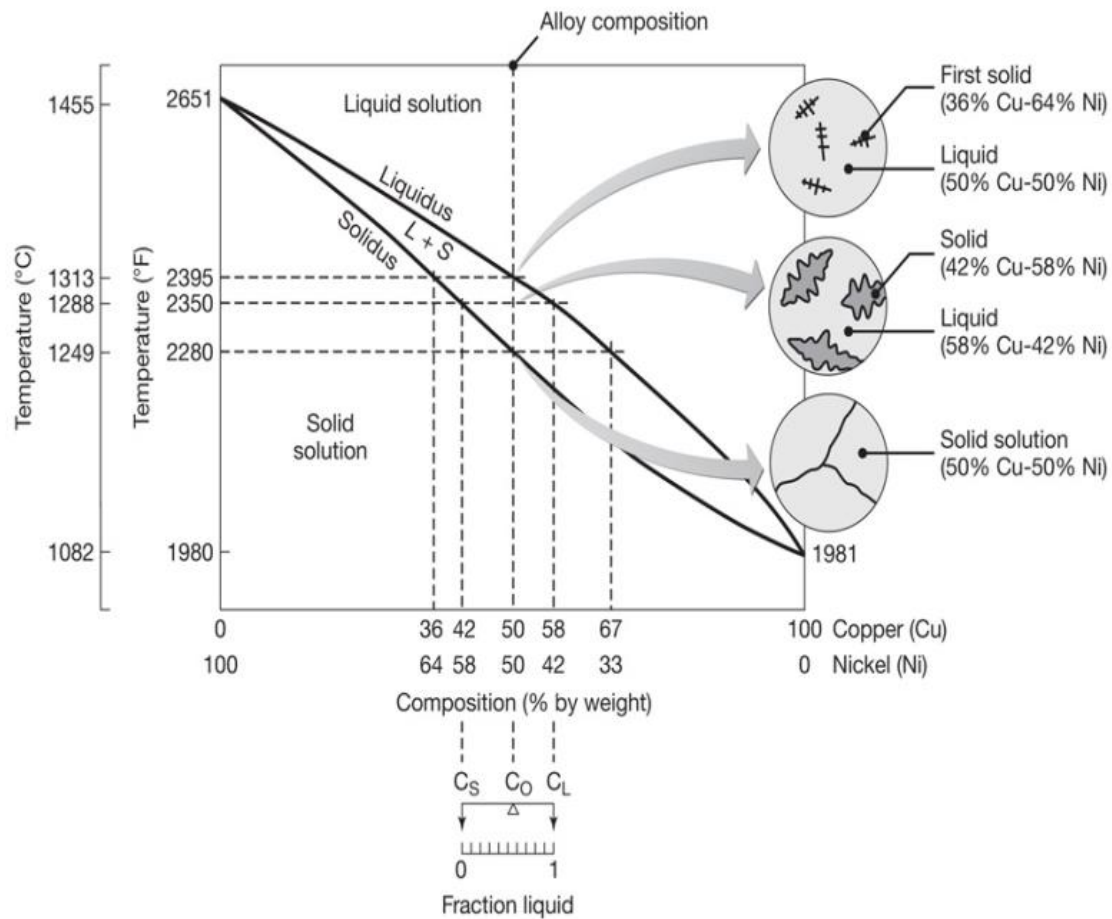


Figure 5.3

Phase diagram for nickel-copper alloy system obtained by a low rate of solidification. Note that pure nickel and pure copper each have one freezing or melting temperature. The top circle on

بر خلاف فلزات خالص، آلیاژها در محدوده‌ای از دماها منجمد می‌شوند. انجماد وقتی که دمای فلز مذاب به دمای لیکوئیدوس (Liquidus) می‌رسد آغاز می‌شود و با رسیدن به دمای سالییدوس (Solidus) تمام می‌شود. در این محدوده دمایی آلیاژ در حالت خمیری است.

قانون اهرم:

بیانگر کسر وزنی جامد متناسب با فاصله C_L و C_0 است:

$$\frac{S}{S + L} = \frac{C_0 - C_L}{C_S - C_L}.$$

$$\frac{L}{S + L} = \frac{C_S - C_0}{C_S - C_L}.$$

۳- ساختار قطعات ریختگی

نوع ساختار ریختگی حین انجماد فلزات و آلیاژها نه تنها به **ترکیب آلیاژ** بستگی دارد بلکه نرخ **انتقال حرارت** و **جریان فلز مذاب** حین فرآیند نیز موثر است.

در دیواره‌های قالب، فلز سریعاً سرد می‌شود چون دیواره‌ها ابتدا، در دمای محیط قرار دارند. در نتیجه سرمایش در دیواره، پوسته منجمد با دانه‌های هم محور ریز تشکیل می‌شود. دانه‌ها در جهت مخالف انتقال حرارت از قالب رشد می‌کنند. دانه‌های که جهت‌گیری خاص دارند دانه‌های ستونی نامیده می‌شوند و رشد ترجیحی دارند. دانه‌هایی که جهت‌گیری مخالفی دارند از رشد بیشتر منع می‌شوند.

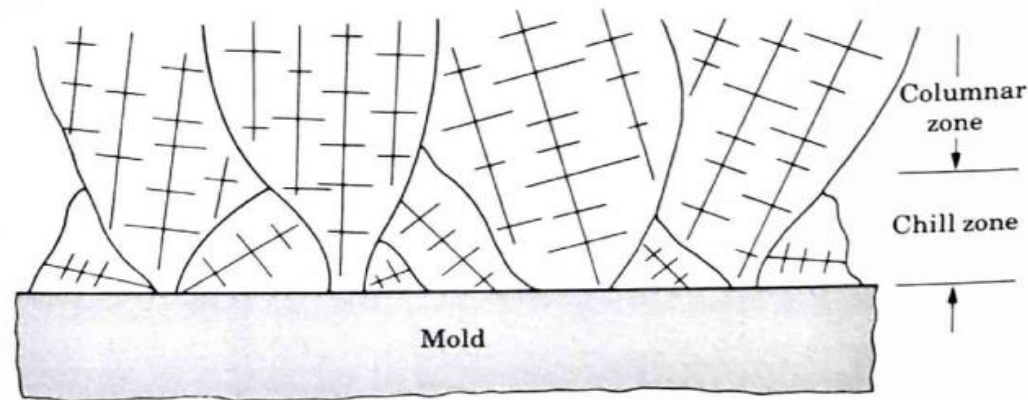


FIGURE 5.9 Development of a preferred texture at a cool mold wall. Note that only favorable oriented grains grow away from the surface of the mold.

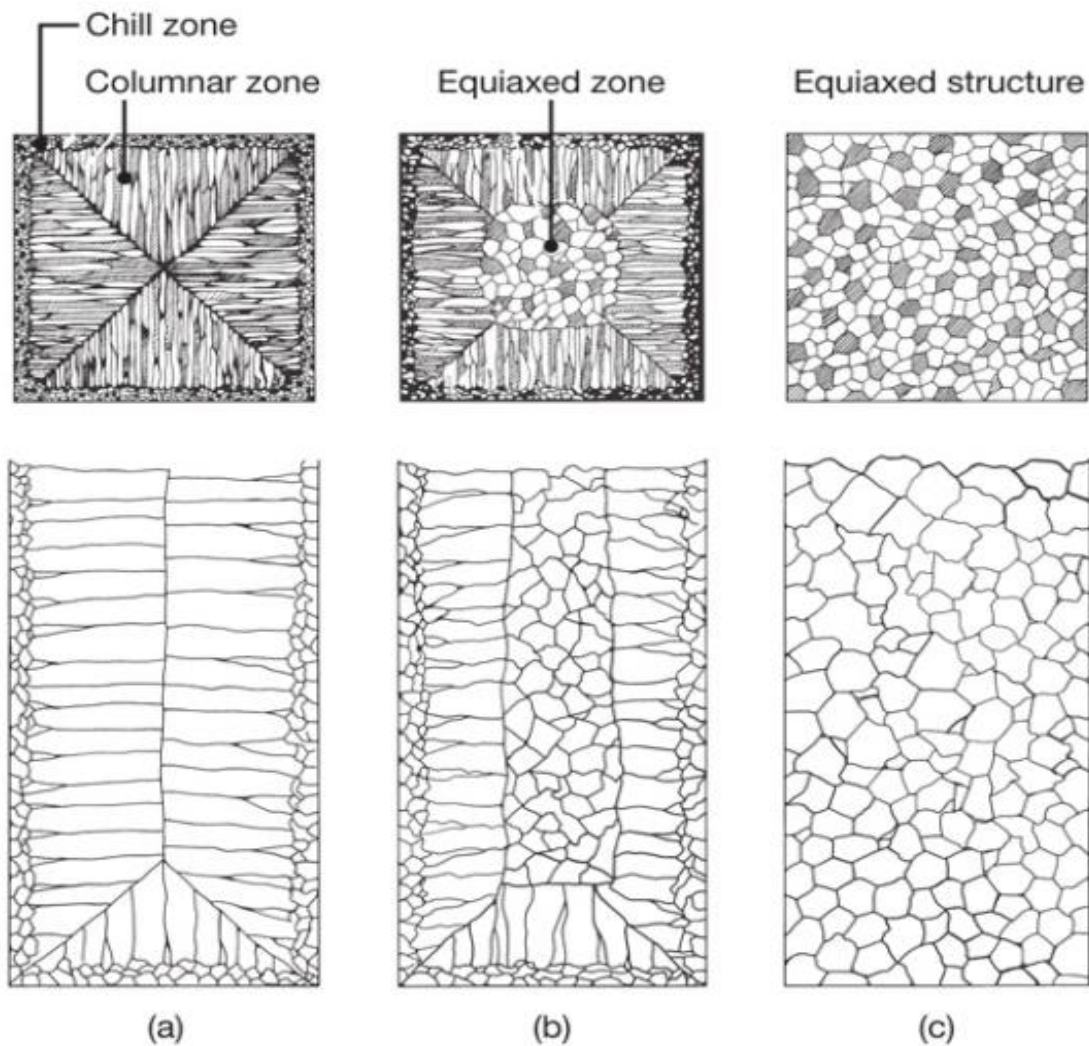


Figure 5.5

Schematic illustration of three cast structures of metals solidified in a square mold: (a) pure metals, with preferred texture at the cool mold wall. Note in the middle of the figure that only favorable oriented grains grow away from the mold surface; (b) solid-solution alloys; and (c) structure obtained by heterogeneous nucleation of grains.

ساختار ریختگی عمومی آلیاژ محلول جامد با منطقه داخلی با دانه‌های هم محور در شکل (ب) نشان داده شده است.

ناحیه داخلی می تواند در سراسر ریختگی، مانند شکل (ج) با افزودن جوانه‌زا (عامل تلقیح و جوانه‌زایی) گسترش یابد.

جوانه‌زا، هسته‌هایی از دانه‌ها را در سرتاسر مذاب ایجاد می‌کند (جوانه‌زایی غیرهمگن).

یک مثال TiB_2 در آلیاژهای $AlSi$ است.

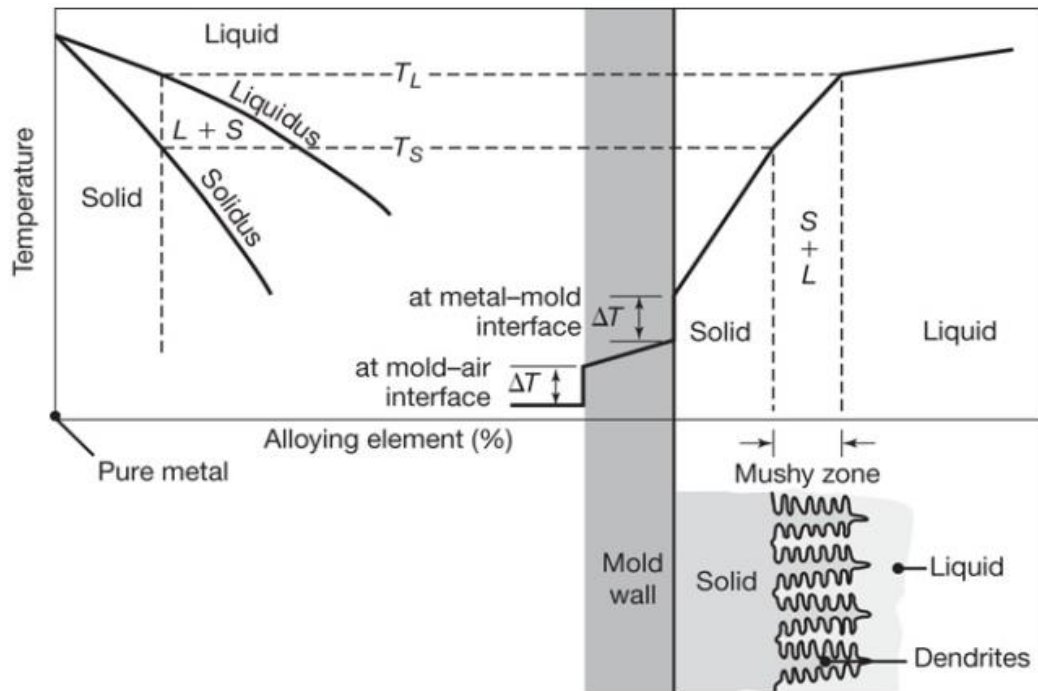


Figure 5.6

Schematic illustration of alloy solidification and temperature distribution in the solidifying metal. Note the formation of dendrites in the semi-solid (mushy) zone.

انجماد آلیاژها با کاهش دما در زیر دمای لیکوئیدوس آغاز می شود و با رسیدن به دمای سالییدوس کامل می شود. در این گستره دمایی، آلیاژ خمیری و حاوی دندریتهای ستونی است. توجه شود که مذاب فلز در بین بازوهای دندريت حضور دارد.

- دندریتهای دارای بازوهای سه بعدی و شاخههایی (بازوهای ثانویه) هستند که در نهایت در هم قفل می شوند. محدوده ناحیه خمیری، عامل مهمی حین انجماد است. این ناحیه با اختلاف دماها توصیف می شود و محدوده انجمادی نام دارد:

$$\text{Freezing range} = T_L - T_S$$

در **فلزات خالص** محدوده انجمادی عملاً صفر است و جبهه انجماد مانند جبهه مسطح حرکت می‌کند و ناحیه خمیری تشکیل نمی‌شود. **یوتکتیک‌ها** به روش مشابهی منجمد می‌شوند و تقریباً جبهه مسطحی دارند. نوع ساختار انجماد متشکله به ترکیب یوتکتیک بستگی دارد. برای آلیاژهای با نمودار فاز متقارن، ساختار عموماً لایه‌ای با دو یا چند فاز جامد است و به سیستم آلیاژی بستگی دارد. وقتی که کسر حجمی فازی کمتر از ۲۵ درصد کمتر باشد ساختار عموماً رشته‌ای می‌شود. این شرایط به طور ویژه‌ای برای چدن‌ها مهم هستند.

برای **سایر آلیاژها** محدوده انجمادی وجود دارد. محدوده انجمادی کوتاه عموماً اختلاف دما **کمتر از 50°C** است و برای اختلاف **بالای 110°C** این محدوده انجمادی وسیع است. در نتیجه، این آلیاژها عموماً در سرتاسر فرآیند انجماد، **نیمه جامد** هستند.

- اثر سرعت سرمایش

نرخ‌های سرمایش کند- تا حد 100 K/s یا زمان‌های انجماد موضعی طولانی باعث ساختارهای دندریتی درشتی با فاصله بین بازوهای دندریتی بزرگ می‌شود.

نرخ‌های سرمایش بیشتر، در محدوده 10000 K/s ، یا زمان‌های انجماد موضعی کوتاه باعث ساختار ریزتر و فاصله بین بازوهای دندریتی کوتاه‌تر می‌شود.

برای نرخ‌های سرمایش سریعتر در محدوده $10^6\text{-}10^8 \text{ K/s}$ ، ساختارهای ایجاد شده **آمورف** هستند (بدون هرگونه نظم بلوری در ساختار).

ساختارهای ایجاد شده و اندازه دانه به دست آمده بر خواص ریختگی‌ها موثرند.

هنگامی که اندازه دانه کاهش می یابد:

- (۱) استحکام و داکتیلیته آلیاژ ریختگی افزایش می یابد (معادله هال-پچ).
 - (۲) میکروتخلخل (حفرات انقباضی بین دندریتی) در ریختگی ها کاهش می یابد.
 - (۳) تمایل به ترک خوردن ریختگی (ترک خوردن گرم) حین انجماد کاهش می یابد.
- عدم یکنواختی در اندازه دانه و توزیع دانه ها باعث خواص ناهمسانگردی در ریختگی ها می شود.

- جدایش

ترکیب دندریت‌ها و فلز مذاب بوسیله نمودار فاز آلیاژ خاص قابل تعیین هستند. وقتی آلیاژ بسیار آرام سرد می‌شود هر دندریت، ترکیب یکنواختی را ایجاد می‌کند. با این حال تحت سرمایش نرمال در عمل، دندریت‌های مغزه‌دار تشکیل می‌شوند و ترکیب شیمیایی سطح با مرکز متفاوت است (**گرادیان غلظتی**).

سطح دندریت دارای غلظت بیشتری از عناصر آلیاژی نسبت به مرکز بوده چون حل شونده حین انجماد از سمت مرکز به سطح پس زده می‌شود. این پدیده **میکروجدایش** نامیده می‌شود. بخش تیره‌تر، **مذاب بین دندریتی در نزدیک ریشه دندریت**، بیانگر غلظت بالاتر حل شونده است.

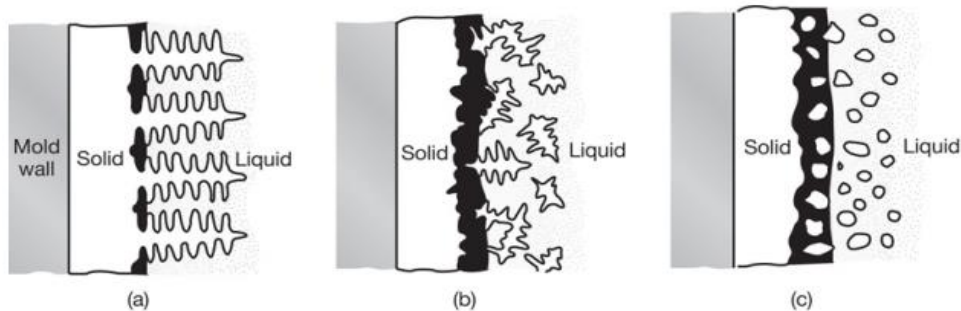


Figure 5.8

Schematic illustration of three basic types of cast structures: (a) columnar dendritic; (b) equiaxed dendritic; and (c) equiaxed nondendritic.

برخلاف ریزجدایش، **درشت جدایش** شامل ترکیب متفاوت در سرتاسر ریختگی است. در شرایطی که جبهه انجماد در جهت دور شدن از سطح ریختگی به صورت مسطح است، اجزاء با نقطه ذوب پایین‌تر در آلیاژ در حال انجماد، به سمت مرکز پس زده می‌شوند (**جدایش نرمال**). در نتیجه این ریختگی‌ها دارای غلظت بالایی از عناصر آلیاژی در مرکز هستند.

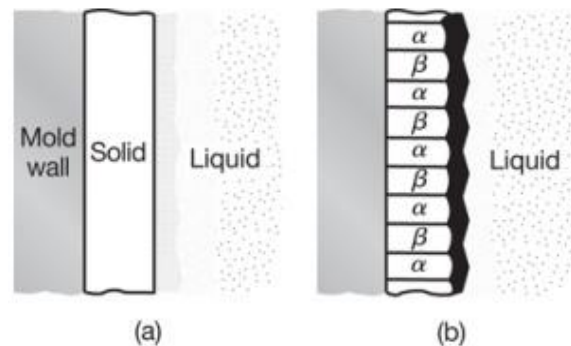


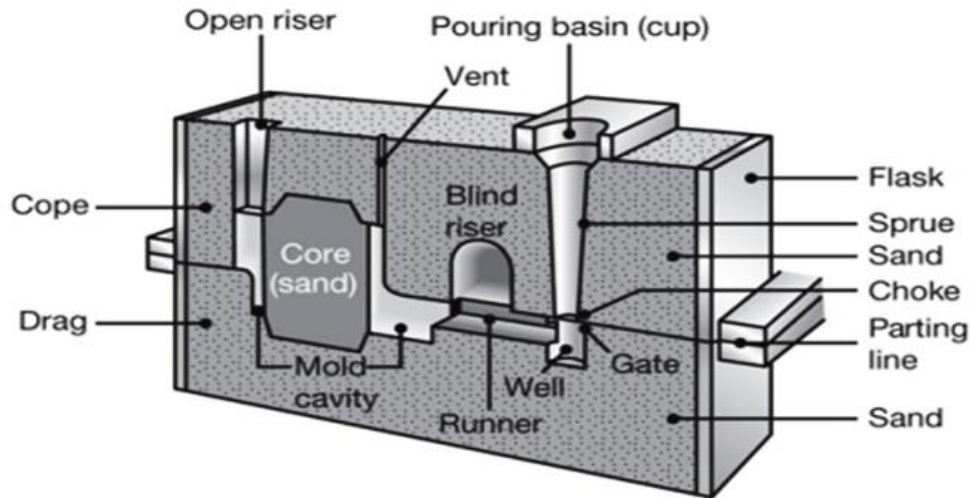
Figure 5.9

Schematic illustration of cast structures in (a) plane front, single phase; and (b) plane front, two phase.

در ساختارهای دندریتی مانند آلیاژهای محلول جامد حالت معکوس رخ می‌دهد: یعنی در مرکز ریختگی‌ها، غلظت عناصر آلیاژی کمتر است (جدایش معکوس). این امر به خاطر این است که فلز مذاب (دارای غلظت بیشتری از عناصر آلیاژی) درون حفرات ایجاد شده از انقباض انجمادی در بازوهای دندریتی که زودتر منجمد شده است، وارد و حبس می‌شود.

۴- جریان سیال و انتقال حرارت

- جریان سیال



برای تأکید بر اهمیت جریان مذاب، ریخته‌گری ثقلی را در نظر بگیرید. فلز مذاب از طریق **حوضچه بارریز** ریخته می‌شود. از طریق راهگاه قائم و راهگاه افقی به داخل حفره قالب می‌رود. اگر چه چنین سیستم راهگاهی به نظر می‌رسد نسبتاً ساده باشد، ریخته‌گری موفقیت‌آمیز نیاز به طراحی دقیق برای اطمینان از جریان مذاب مناسب حین ریخته‌گری دارد.

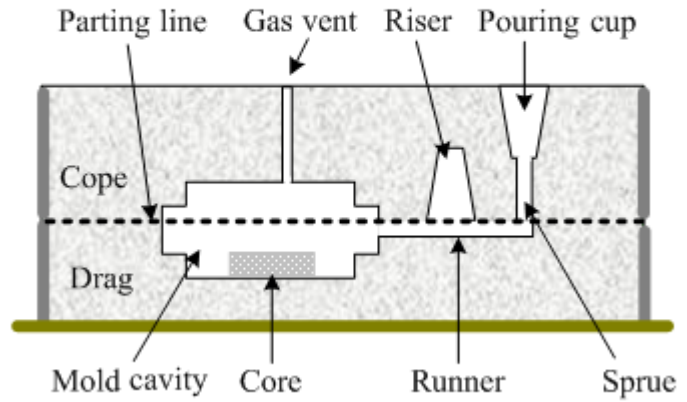
سیستم راهگاهی: مجموعه حوضچه بارریز، راهگاه قائم و راهگاه افقی و راهگاههای فرعی را سیستم راهگاهی گویند که نقش آن رساندن مذاب با کیفیت مناسب از بوته به محفظه قالب است.

پس مهمترین نقش‌های **سیستم راهگاهی** این است که آلاینده‌ها (مانند اکسید و غیره) در فلز مذاب را از طریق فیلتر یا چسبیدن آنها به دیواره‌های سیستم راهگاهی حذف کند و از این طریق مانع رسیدن آنها به حفره قالب شود.

علاوه بر این، طراحی مناسب **سیستم راهگاهی** مشکلاتی مانند سرمایش زودرس، توربولانس و گیرکردن گاز را حذف یا به حداقل می‌رساند.

حتی هنگام انتقال مذاب از کوره به قالب، فلز مذاب باید با دقت محافظت شود تا از تشکیل اکسید روی سطوح فلز مذاب از طریق قرار گرفتن در معرض محیط و یا ورود ناخالصی‌ها به فلز مذاب جلوگیری شود.

Mold for a sand casting



www.substech.com

Pouring basin حوضچه بارریز

Sprue راهگاه قائم یا راهگاه بارریز

Runner راهگاه افقی یا راهبار

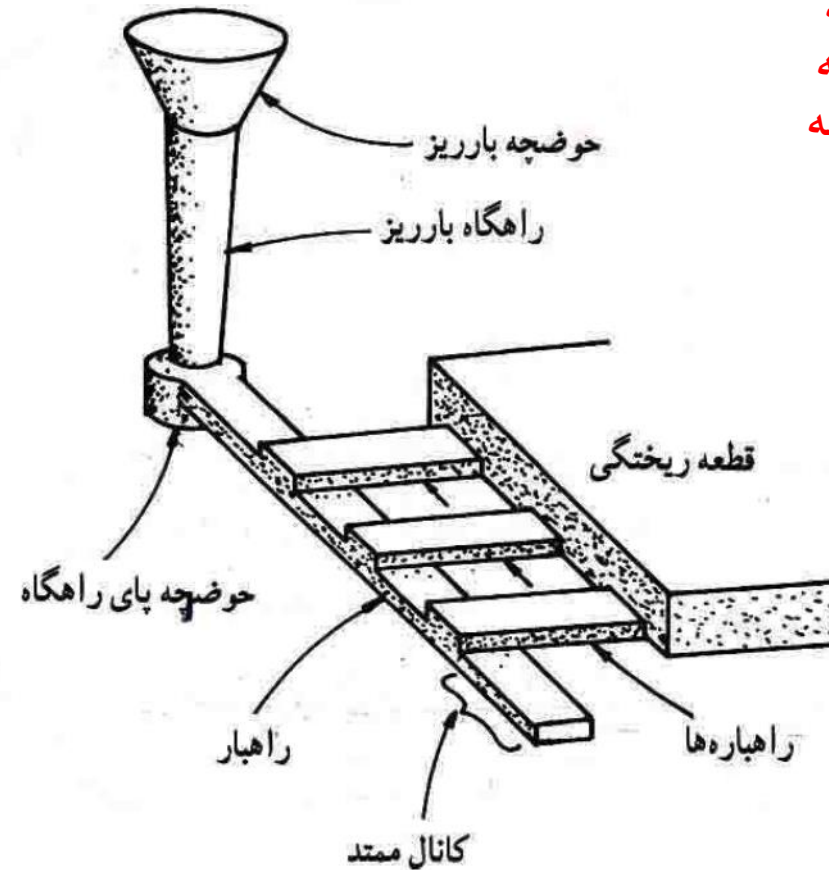
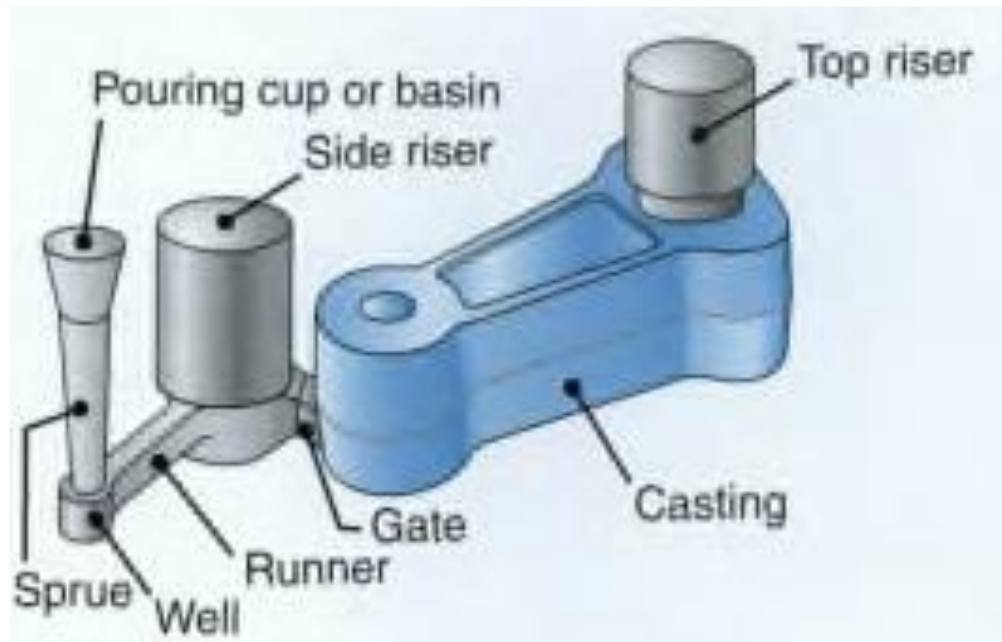
Gate راهگاه‌های فرعی یا راهبارها (محل ورود ذوب به قالب)

Vent هواکش

Riser تغذیه

Flask درجه

Core ماهیچه



قالب با flask (درجه) تقویت می شود.

قالب دو جزئی شامل cope در بالا و drag در پایین است.

حوضچه بارریز (Pouring basin or Pouring cup) که مذاب داخلش ریخته می شود.

راهگاه قائم (Sprue)، که مذاب از طریق آن به سمت پایین جریان می یابد.

سیستم راهگاهی شامل بخشی به نام Runner یا راهبار (راهگاه افقی) هست.

راهگاه فرعی (Gate) = راهباره که مذاب را به محفظه قالب می رساند.

منبع تغذیه (Riser) که مذاب اضافی برای انقباض حین انجماد را تهیه می کند. دو نوع متفاوت riser: منبع تغذیه باز و بسته.

ماهیچه ها (Cores) که از ماسه هستند و در قالب قرار می گیرند تا سطح داخلی قطعه ریختگی را ایجاد کنند.

Vents هواکش ها، که در قالب قرار می گیرند تا گازهای تولیدی را به هنگام ورود مذاب و تماس آن با قالب را خارج کنند.

انواع سیستم راهگاهی از نظر توزیع فشار: ۱- فشاری ۲- غیرفشاری

معیار: Gating Ratio نسبت راهگاهی $a:b:c$

a سطح مقطع راهگاه قائم b سطح مقطع راهبار c سطح مقطع راهباره‌ها

اگر از a به c این نسبت کاهش باشد، به دلیل کاهش سطح، فشار روی مذاب رفته رفته افزایش می‌یابد و سیستم فشاری است و گرنه سیستم غیرفشاری است. سیستم راهگاهی فشاری برای فلزات آهنی، به ویژه چدن‌ها مناسب است در حالی که برای فلزات غیرآهنی مانند آلومینیوم و منیزیم از سیستم راهگاهی غیر فشاری استفاده می‌شود.

Choke تنگه: سطح مقطعی در سیستم راهگاهی است که زمان پرشدن قالب را مشخص می‌کند.

در سیستم راهگاهی فشاری: تنگه سطح مقطع کل راهگاههای فرعی (راهباره‌ها) است.
در سیستم راهگاهی غیر فشاری: تنگه، محل اتصال راهگاه قائم به راهبار (راهگاه افقی) است.

جریان سیال: قضیه برنولی

دو اصل اساسی جریان سیال مربوط به طراحی راهگاهی: قضیه برنولی و قانون پیوستگی جرم است.

قضیه برنولی: قضیه برنولی بر اساس اصل بقای انرژی است و فشار، سرعت، ارتفاع سیال در هر مکان را مرتبط می‌سازد:

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{constant}$$

که h ارتفاع از یک صفحه ای مرجع ، p فشار در ارتفاع، v سرعت مذاب در ارتفاع، ρ چگالی سیال (با فرض اینکه تراکم ناپذیر است) و g ثابت گرانشی است. بقای انرژی نیازمند این است که در یک مکان خاص در سیستم، رابطه زیر برقرار باشد:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + f$$

اندیس های ۱ و ۲ بیانگر دو ارتفاع مختلف هستند و f بیانگر اتلاف اصطکاکی در مذابی که به سمت پایین در سیستم حرکت می‌کند، است. اتلاف اصطکاکی وابسته به عواملی مانند اتلاف انرژی در دیوار مذاب-قالب و توربولانس در مذاب است.

جریان سیال: قانون پیوستگی

قانون پیوستگی بیان می‌کند که برای یک مایع تراکم ناپذیر و در یک سیستم با دیواره‌های نفوذ ناپذیر، نرخ جریان ثابت است؛ بدین ترتیب،

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

که Q نرخ حجمی جریان مانند m^3/s است، A مساحت مقطع عرضی جریان مایع است و v سرعت مایع در آن مکان سطح مقطع خاص است. اندیس‌های ۱ و ۲ در معادله مربوط به دو مکان مختلف در سیستم هستند. نفوذ ناپذیری دیواره‌های سیستم مهم است، زیرا در غیر این صورت، برخی از مایع‌ها در قالب‌های ماسه‌ای نفوذ می‌کنند و سرعت جریان هنگامی که از طریق سیستم عبور می‌کند، کاهش می‌یابد. پوشش‌ها اغلب برای مهار چنین رفتارهایی در قالب‌های ماسه‌ای استفاده می‌شوند.

کاربرد قضایای برنولی و پیوستگی

یک کاربرد، طراحی مرسوم حلقه راهگاه قائم است، که در آن، شکل حلقه را می‌توان با استفاده از معادلات قبل تعیین کرد. فرض بر این است که فشار در بالای حلقه برابر با فشار در پایین آن است و هیچ اتلاف اصطکاکی در سیستم وجود ندارد، رابطه بین ارتفاع و

سطح مقطعی در هر نقطه در حلقه توسط رابطه پارابولیک معین می‌شود:

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

به عنوان مثال، برای مثال، اندیس ۱ بیانگر بالای حلقه و اندیس ۲ پایین آن است. با حرکت از بالا به پایین، **مساحت سطح مقطع**

حلقه، باید کاهش یابد. توجه داشته باشید که در یک مایع آزاد در حال سقوط، مانند آب از یک شیر، سطح مقطع جریان هنگامی که

سرعت به سمت پایین می‌گیرد، کاهش می‌یابد. بنابراین، اگر یک حلقه با سطح مقطع ثابت طراحی شود و مذاب فلز در آن ریخته

شود، ممکن است مناطقی که فلز مذاب از تماس با دیواره‌های خارج می‌شوند، توسعه یابند و در نتیجه **هوا به داخل مایع**

کشیده شود.

جریان سیال: مشخصات جریان

یک ملاحظه مهم در جریان سیال در سیستم های راهگاهی، وجود توربولانس در مقایسه با جریان آرام مایعات است. عدد Reynolds، Re ، برای توصیف این جنبه جریان سیال استفاده می شود؛ Re نشان دهنده نسبت اینرسی به نیروهای ویسکوز در جریان سیال است و به صورت بیان شده است:

$$Re = \frac{vD\rho}{\eta}$$

که v سرعت مایع، D قطر کانال، ρ و η به ترتیب چگالی و ویسکوزیته مایع است.

عدد رینولدز بزرگتر، نشانه گرایش به جریان آشفته است.

در سیستم‌های معمولی راهگاهی از ۲۰۰۰ تا ۲۰،۰۰۰ است.

مقادیر تا ۲۰۰۰ نشان دهنده جریان آرام یا لایه‌ای است.

بین ۲۰۰۰ تا ۲۰،۰۰۰ جریان مخلوطی از آرام و آشفته است و به طور کلی در سیستم‌های راهگاهی برای ریخته‌گری بی ضرر است.

Re بیش از ۲۰،۰۰۰ نشان دهنده آشفتگی شدید بوده و منجر به افزایش حبس هوا و تشکیل سرباره می‌شود. در نتیجه واکنش فلز مایع با هوا و گازهای دیگر روی سطح فلز مذاب شکل می‌گیرد.

تکنیک‌های به حداقل رساندن آشفتگی: اجتناب از تغییرات ناگهانی در جهت جریان و هندسه مقاطع در سیستم

راهگاهی

سیالیت مذاب فلز

سیالیت: توانایی فلز مذاب در پرکردن حفره‌های قالب است. سیالیت تابع دو دسته عامل است:

الف) مشخصات فلز مذاب (متالورژیکی)، ب) متغیرهای ریخته‌گری (تکنولوژیکی)

الف) مشخصات فلز مذاب (متالورژیکی)

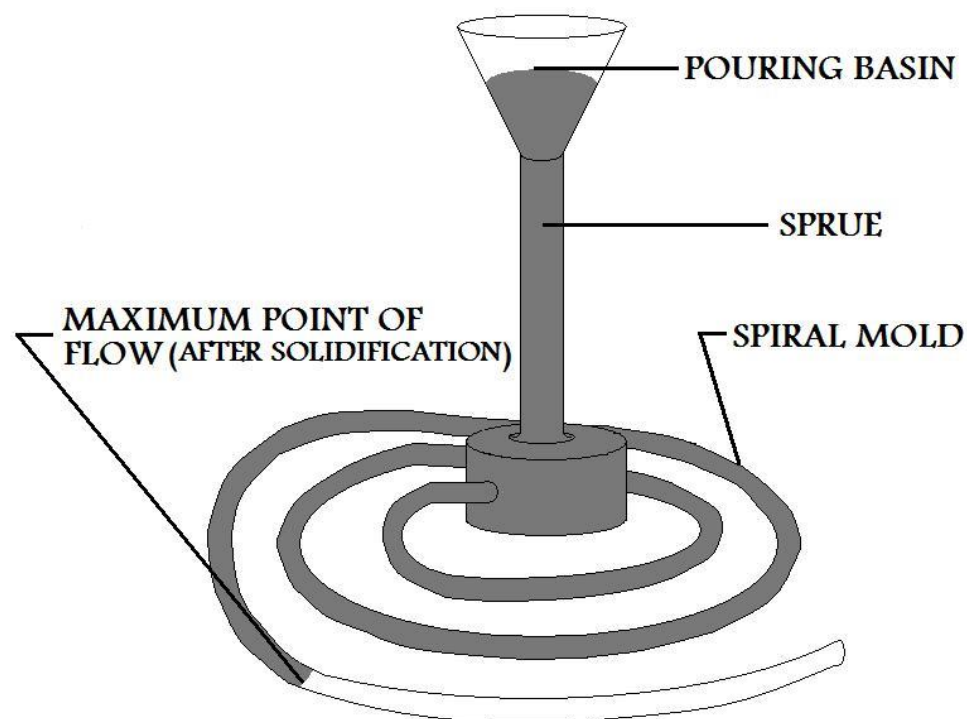
- ۱- ویسکوزیته. هرچه ویسکوزیته و حساسیت آن به دما افزایش یابد، سیالیت کاهش می‌یابد.
- ۲- تنش سطحی. تنش سطحی بالای فلز مذاب، باعث کاهش سیالیت می‌شود. فیلم‌های اکسیدی تشکیل شده در سطح فلز مذاب تاثیر معکوسی بر سیالیت دارند. برای مثال، فیلم اکسیدی در سطح آلومینیوم مذاب خالص، تنش سطحی آن را سه برابر می‌کند.
- ۳- ناخالصی‌ها (آخال‌ها). ذرات غیر قابل حل در مذاب هستند. آخال‌ها می‌توانند اثر معکوس شدیدی بر سیالیت داشته باشند. این اثر با مشاهده سیالیت روغن با و بدون ذرات ماسه در آن قابل تایید است که با ماسه، سیالیت کمتر است.
- ۴- الگوی انجماد آلیاژ. سیالیت تناسب معکوسی با محدوده انجماد دارد. محدوده انجمادی کوتاهتر (در فلزات خالص و یوتکتیکها) باعث سیالیت بیشتر است. برعکس در آلیاژهای بامحدوده انجمادی گسترده (مانند آلیاژهای محلول جامد) سیالیت کمتر است.

(ب) متغیرهای ریخته‌گری (تکنولوژیکی)

- ۱- **طراحی قالب.** طرح و ابعاد اجزاء مانند راهگاه قائم، راهگاه افقی و منبع تغذیه بر سیالیت موثرند (سیستم فشاری یا غیرفشاری).
- ۲- **جنس قالب و مشخصات سطحی آن.** هدایت حرارتی بالاتر قالب و سطوح خشن‌تر، سیالیت فلز مذاب را می‌کاهد. حرارت‌دهی قالب، سیالیت را بهبود می‌دهد ولی انجماد کند می‌شود و دانه‌ها درشت شده و استحکام، کم می‌شود.
- ۳- **درجه فوق ذوب Superheat** افزایش دما (در حد معقول) به بالای نقطه ذوب آلیاژ تعریف می‌شود و سیالیت را بهبود می‌دهد و انجماد را به تاخیر می‌اندازد. افزایش بیش از حد دما--- اکسایش مذاب--- افت سیالیت.
- ۴- **سرعت ریختن مذاب.** سرعت کم ریختن مذاب به داخل قالب باعث سیالیت کمتر و سرمایش بیشتر می‌شود، البته تا حدی، وگرنه ایجاد اغتشاش در جریان مذاب می‌کند.
- ۵- **انتقال حرارت.** این عامل به طور مستقیم بر ویسکوزیته مذاب اثر می‌گذارد.

آزمون سیالیت. آزمون های متعددی برای کمی کردن سیالیت توسعه داده شده اند هر چند به طور کلی هیچ کدام مورد پذیرش عمومی قرار نگرفته است.

فاصله جریان فلز قبل از انجماد و توقف، **معیار سیالیت** است.



انتقال حرارت و تغذیه مذاب

یک ملاحظه مهم در ریخته‌گری، انتقال حرارت در طول چرخه کامل دمایی از ریختن تا انجماد و سرد شدن تا دمای اتاق است.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \qquad \alpha = \frac{k}{\rho c}$$

جریان گرما در مکان‌های مختلف سیستم، بستگی به عوامل بسیاری دارد که مربوط به مواد ریخته‌گری و متغیرهای قالب و فرآیند است.

به عنوان مثال، در ریخته‌گری مقاطع نازک، سرعت جریان فلز باید به اندازه کافی بالا باشد تا از سرد شدن و انجماد زودرس جلوگیری شود. از سوی دیگر، سرعت جریان نباید تا حد زیادی باعث ایجاد آشفته‌گی بیش از حد شود، تا باعث تأثیرات مضر بر خواص ریخته‌گری شود.

زمان انجماد

در مراحل اولیه انجماد، یک پوسته نازک انجمادی روی دیوارهای سرد قالب، شروع به تشکیل می‌شود؛ با گذشت زمان، پوسته ضخیم می‌شود. برای قالب با دیوارهای تخت، ضخامت متناسب با ریشه مربع زمان است. بنابراین، دو برابر شدن زمان، ضخامت پوسته منجمد را ۱.۴۱ برابر می‌سازد، یعنی ۴۱٪، ضخیم تر. **زمان انجماد** تابعی از حجم قطعه ریختگی و مساحت سطحی است (قانون چورنیف):

$$t_f = C \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

که C ثابتی که تابع جنس قالب و فلز و هندسه قطعه است. یک کره بزرگ، کندتر از یک کره کوچک منجمد و تا دمای محیط سرد می‌شود. به طور مشابه، می‌توان نشان داد که فلز مذاب در قالب مکعبی شکل، سریع تر از قالب کروی با همان حجم منجمد می‌شود.

تأثیر زمان بر ضخامت پوسته انجمادی

نکته: مذاب منجمد نشده در بازه‌های زمانی مختلف در محدوده ۵ ثانیه تا ۶ دقیقه بیرون ریخته می‌شود. قابل مشاهده است که ضخامت پوسته با زمان سپری شده افزایش می‌یابد.

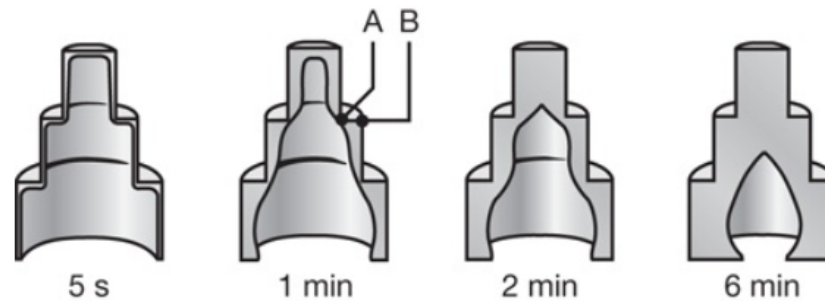


Figure 5.11

Solidified skin on a steel casting; the remaining molten metal is poured out at the times indicated in the figure. Hollow ornamental and decorative objects are made by a process called slush casting, which is based on this principle.

مثال زمان انجماد برای اشکال مختلف

سه قطعه با حجم یکسان (۱ متر مکعب) و شکل متفاوت ریخته‌گری می‌شوند (کروی، مکعبی و استوانه‌ای با ارتفاع برابر با قطر). کدام قطعه سریعتر منجمد می‌شود؟

$$\text{Solidification time} \propto \frac{1}{(\text{surface area})^2}.$$

The respective surface areas are

$$\text{Sphere: } V = \left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3, \quad r = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/3}, \quad \text{and } A = 4\pi r^2 = 4\pi\left(\frac{3}{4\pi}\right)^{2/3} = 4.84$$

$$\text{Cube: } V = a^3, \quad a = 1, \quad \text{and } A = 6a^2 = 6.$$

$$\text{Cylinder: } V = \pi r^2 h = 2\pi r^3, \quad r = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{1/3}, \quad \text{and}$$

$$A = 2\pi r^2 + 2\pi r h = 6\pi r^2 = 6\pi\left(\frac{1}{2\pi}\right)^{2/3} = 5.54.$$

Thus the respective solidification times t are

$$t_{\text{sphere}} = 0.043C, \quad t_{\text{cube}} = 0.028C, \quad \text{and } t_{\text{cylinder}} = 0.033C.$$

فلزات به طور کلی طی انجماد و خنک شدن تا دمای اتاق منقبض می‌شوند. انقباض در ریخته‌گری باعث تغییرات ابعادی و گاهی اوقات ترک خوردگی می‌شود و ناشی از پدیده‌های زیر است:

۱. انقباض فلز مذاب قبل از زمانی که منجمد شود.

۲. انقباض فلز در هنگام تغییر فاز از مایع به جامد (آزاد شدن گرمای نهان)

۳. انقباض فلز منجمد (حالت جامد) وقتی که درجه حرارت آن به درجه حرارت محیط می‌رسد.

بزرگترین مقدار انقباض طی تغییر فاز ماده از مایع به جامد رخ می‌دهد؛ توجه داشته باشید که برخی از فلزات مانند چدن خاکستری انبساط می‌یابند. دلیل آن این است که گرافیت دارای حجم ویژه نسبتاً بالایی است و وقتی به عنوان دانه‌های گرافیت رسوب می‌کند، باعث انبساط خالص فلز می‌شود. سیلسیم نقش مشابهی در آلیاژهای آلومینیوم دارد.

Solidification contraction for various cast metals

Metal or Alloy	Volumetric solidification contraction (%)	Metal or Alloy	Volumetric solidification contraction (%)
Aluminum	6.6	70% Cu-30% Zn	4.5
Al-4.5% Cu	6.3	90% Cu-10% Al	4
Al-12% Si	3.8	Gray iron	Expansion to 2.5
Carbon steel	2.5-3	Magnesium	4.2
1% Carbon steel	4	White iron	4-5.5
Copper	4.9	Zinc	6.5

تعریف تغذیه و طراحی تغذیه

- تعریف: محفظه مذابی است علاوه بر محفظه قالب و سیستم راهگاهی که برای جبران انقباض ناشی از انجماد به کار می‌رود.
- شکل تغذیه --- کره و استوانه --- علت (علمی-تکنولوژیکی)
- ابعاد تغذیه --- استوانه چاق
- تعداد تغذیه‌ها --- برد تغذیه
- محل تغذیه --- نزدیک به نقاطی که دیرتر سرد می‌شوند.

مدول یک قطعه ریختگی: عبارت است از نسبت حجم به سطح قطعه

$$M_c = \frac{V_c}{A_c}$$

$$M_r = 1.2M_c$$

مدول تغذیه باید بیش تر از قطعه باشد

در واقع، مدول تغذیه طراحی شده از مدول قطعه ریختگی به دست می آید.

عیوب

تخلخل می‌تواند ناشی از انقباض یا از به دام افتادن گازها و یا هر دو ایجاد شود.

تخلخل بر **داکتیلیته** مضر است و سطح را **نفوذپذیر** کرده و بر قابلیت **حفظ فشار** مخازن تحت فشار ریخته‌شده، موثر است.

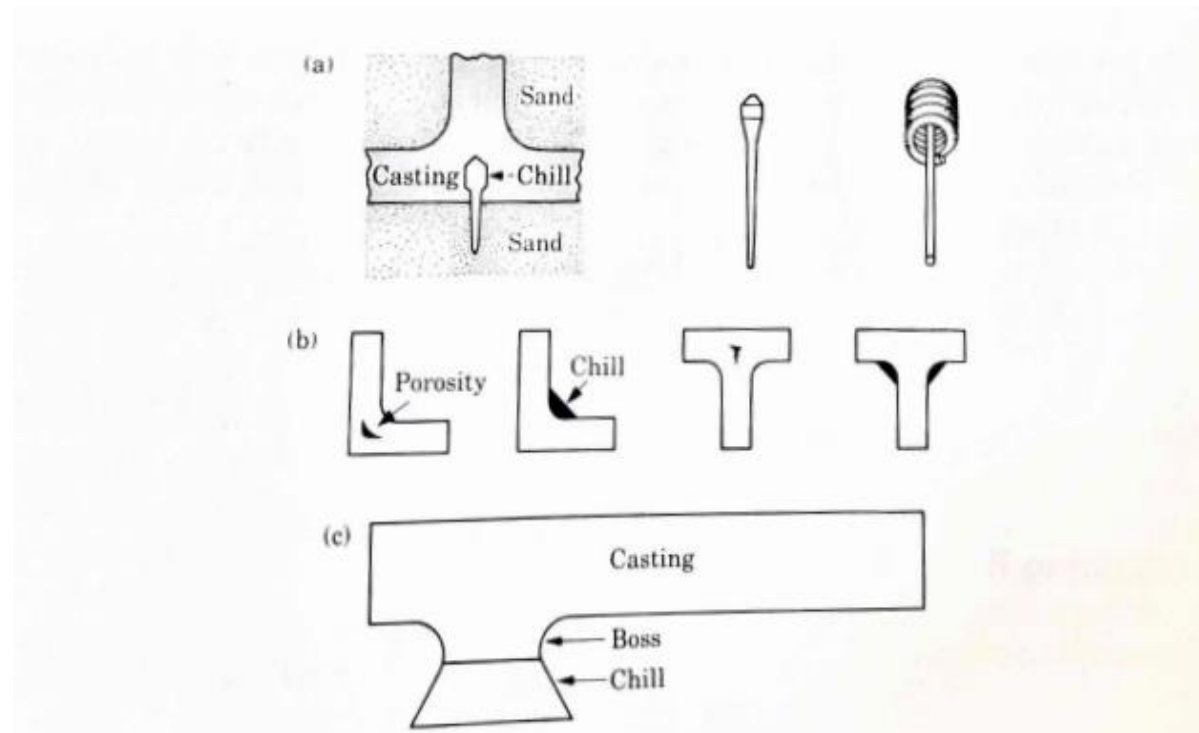
نواحی متخلخل می‌توانند ناشی از انقباض فلز منجمد شده باشند. مقاطع نازک سریعتر از مقاطع ضخیم منجمد می‌شوند. در نتیجه، فلز مذاب نمی‌تواند به درون نواحی ضخیم‌تر که هنوز منجمد نشده‌اند، تغذیه شود (سیستم راهگاهی غلط).

ریزتخلخل می‌تواند بین **دندریتها و شاخه‌های آنها** حین انقباض فلز مذاب و انجماد آن رخ دهد.

تخلخل ناشی از انقباض به روش‌های مختلفی **قابل حذف یا کاهش** است:

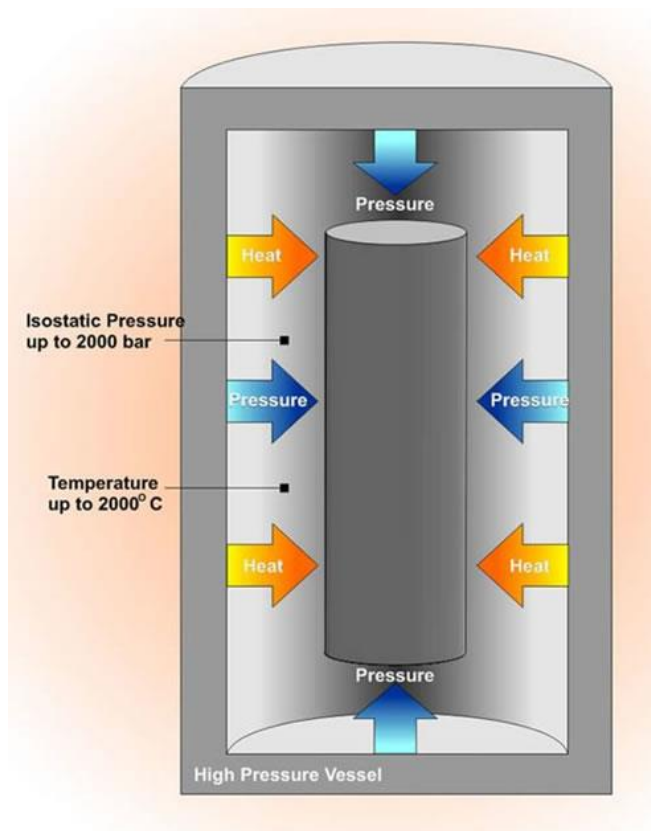
۱- عموماً با استفاده از **تغذیه**، باید فلز مذاب کافی برای همه اجزاء تهیه شود تا از تخلخل جلوگیری شود.

۲- روش دیگر مقابله با مک انقباضی، استفاده از **مبرد (chill)** است. مبردها نرخ انجماد در نواحی بحرانی را افزایش می‌دهند و در کاهش تخلخل انقباضی موثرند. **مبردها داخلی یا خارجی** هستند (شکل زیر). مبردهای داخلی عموماً از جنس مشابه ریختگی هستند. **مبردهای خارجی** می‌توانند از ماده مشابه یا آهنی، مسی و یا گرافیتی باشند.



۳- در آلیاژها تخلخل با ایجاد پله **گرادیان دمایی** قابل حذف و کاهش است. برای مثال مواد قالب با هدایت حرارتی مختلف در بخش‌های متفاوت .

۴- قراردادن قطعه در معرض **فشار ایزواستاتیک** یک روش دیگر برای کاهش تخلخل است با این حال این روش هزینه **براست** و فقط برای قطعات مهم (**پره توربین**) بکار برده می شود (HIP).



تخلخل گازی

فلزات مذاب، **حلالیت گاز بالاتری** نسبت به جامدات دارند (شکل زیر). وقتی یک فلز شروع به انجماد می‌کند، گازهای حل شده از محلول پس زده می‌شوند.

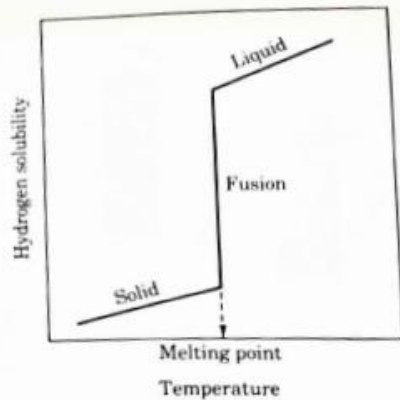


FIGURE 5.18 Solubility of hydrogen in aluminum. Note the sharp decrease in solubility as the molten metal begins to solidify.

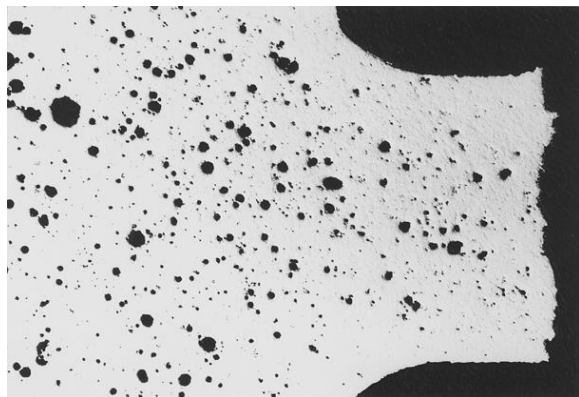
گازها می‌توانند ناشی از واکنش فلز مذاب با دیواره قالب نیز باشند.

گازها هم در مناطق دارای تخلخل **مانند نواحی بین دندریتی** تجمع می‌کنند یا باعث تشکیل ریزتخلخل در ریختگی می‌شوند، به ویژه در آهن، **آلومینیوم** و مس.

روش حذف: گازهای حل شده را می‌توان با وارد کردن **گاز خنثی** در مذاب یا ریختن فلز مذاب **در خلاء** حذف نمود.

اگر گاز حل شده **اکسیژن** باشد، فلز مذاب را می‌توان اکسیژن زدایی نمود. **فولاد** معمولاً با آلومینیوم و سیلیسیم اکسیژن زدایی می‌شوند و آلیاژهای پایه مس با **آلیاژ مس** حاوی ۱۵ درصد فسفر.

تشخیص ریزتخلخل ناشی از انقباض یا گاز



اگر تخلخل کروی و دارای دیواره صاف باشد، ناشی از به دام افتادن گاز است.

اگر سطح تخلخل ناصاف و تیز باشد ناشی از انقباض بین دندیت‌هاست.

تخلخل درشت ناشی از انقباض تجمعی است و حفره انقباضی نامیده می‌شود.

