



سمینار انجماد پیشرفته

بررسی انجماد الیازهای الومینیوم در فرایند ریخته گری کوبشی

فهرست مطالب

۳	مقدمه
۴	مزایای روش ریخته‌گری کوبشی
۴	عیوب ممکن در روش ریخته‌گری کوبشی
۶	محصولات و موارد استفاده
۷	روش فرایند
۸	دستگاه‌های فرایند ریخته‌گری کوبشی
۹	متغیرهای فرایند
۱۰	روند پیشرفت ریخته‌گری کوبشی
۱۳	بررسی ریز ساختار در فرایند ریخته‌گری کوبشی
۱۶	تاثیر فشار اعمالی بر روی مذاب
۱۸	ضریب انتقال حرارت
۲۴	نمودارهای سرد شدن
۲۷	حفرات گازی و انقباضی
۳۱	تاثیر اعمال فشار بر خواص مکانیکی
۳۳	نتیجه‌گیری
۳۴	منابع

مقدمه

ریخته گری اقتصادی ترین روش برای تبدیل مواد خام به قطعات قابل استفاده است. یکی از بزرگترین مشکلات موجود در فرایند ریخته گری تشکیل تخلخل هاست. بعلاوه عیوبی چون جدایش، پارگی گرم، جدایش های V و A و نواری می توانند محل های رشد ترک به هنگام فرارگیری در سرویس باشند. فرایند های ریخته گری برای کاهش این نوع عیوب پیشرفت کرده اند. در بین تمام فرایند های ریخته گری کوبشی بالاترین پتانسیل را برای کاهش عیوب دارد.

ریخته گری کوبشی^۱ فرایندی است که در آن انجماد تحت فشار بالا در یک قالب چند بار مصرف انجام می شود. این روش یکی از روش های شکل دهی فلزات است که ریخته گری در قالب دائمی و مهرش^۲ را با هم ترکیب می کند که در آن فلز مذاب تحت فشار هیدرواستاتیک منجمد می شود. اگرچه ریخته گری کوبشی به عنوان نامی برای این فرایند انتخاب شده است ولی نام های دیگری مثل *Extrusion Casting*، *Pressure Crystallization*، *Squeeze* و *Liquid Pressing* نیز دارد.

ایده اعمال فشار ابتدا توسط چورینف در سال ۱۸۷۸ با وارد کردن فشار توسط بخار روی فلز مذاب به هنگام انجماد انجام شد [1]. این روش به شکل کنونی برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ در امریکا ابداع شد و هم اکنون از مقبولیت خاصی در صنایع تولیدات غیر آهنی برخوردار است. آلیاژهای Al ، Cu و Mg از بیشترین تولیدات به این روش هستند. برخی قطعات آهنی با اشکال ساده نیز به این روش تولید می شوند. با وجود عمر کوتاهتر قالب، برای قطعات با اشکال پیچیده فلزی که نیاز به گوشه های زیاد و تیز دارند، این فرایند می تواند برای تولید قطعات با خواص بهتر و یا برای صرفه جوی در هزینه ها و نیروی انسانی استفاده شود [2].

^۱ Squeeze casting
^۲ forging

مزایای روش ریخته گری کوبشی

با توجه به اهمیت مصرف کمتر مواد در تولید قطعات نهایی و نیاز به استحکام بالاتر، ظهور فرایند ریخته گری کوبشی به عنوان روشی برای تولید قطعات، روش های سنتی ریخته گری و مهرش را تغییر داده است. با وارد کردن فشار هنگام انجماد مذاب فلزات، می توان شکل نهایی قطعه را با دانسیته تقریباً کامل به دست آورد.

اما قابلیت تولید شکل نهایی یا نزدیک به آن در این روش از مزایای اصلی محسوب می شوند. از دیگر قابلیت های آن بهبود خواص مکانیکی است.

ریخته گری کوبشی روشی ساده، اقتصادی و کارآمد در تولید از مواد خام است و قابلیت بالایی برای خودکار شدن و تولید قطعات با سرعت بالا را دارد. بالا ترین خواص مکانیکی قابل دسترس در بین فرایندهای ریخته گری با این روش به دست می آید. ریز ساختاری و بی عیب بودن قطعات تولید شده به این روش، امکان استفاده از قطعات تولید شده را در کاربردهای خاص می دهد.

عیوب ممکن در روش ریخته گری کوبشی

انهدام قطعات می تواند در اثر یکی از عوامل زیر به وجود آید:

ناخالصی های اکسیدی: در نتیجه عدم دستیابی به مذاب تمیز و یا از طریق سیستم انتقال حرارت در مذاب به وجود می آیند. برای کاهش هرچه تمام تر این نوع اخال ها باید در سیستم انتقال مذاب فیلترهایی قرار داده شود و یا حداقلاً مکان از تلاطم مذاب به هنگام ذوب ریزی جلوگیری شود. جلوگیری از ورود اشیاء خارجی به مذاب هنگامی که قالب باز است نیز می تواند مفید واقع شود.

حفرات: هنگامی که فشار اعمالی بر روی مذاب کافی نباشد، حفرات درون قطعه نهایی به وجود می آیند. تخلخل ها و حفرات با افزایش فشار در حین فرایند و با توجه به بهینه بودن سایر متغیر های فرایند ناپدید می شوند.

جدایش بیرون آمدگی^۳: میکرو جدایشی که در فرایند ریخته گری کوبشی اتفاق می افتد بسیار کمتر از دیگر فرایندهای ریخته گری است. مناطقی که با Back Extrusion پر می شوند مناطق غنی از فاز دوم در محلول هستند زیرا این مناطق آخرین مناطقی هستند که منجمد می شوند. جدایش اکستروژن می تواند منجر به تفاوت موضعی در خواص مکانیکی یا خواص مربوط به خوردگی شود. چنین عیوبی می توانند با طراحی صحیح قالب و یا به وسیله افزایش دمای قالب و یا کاهش تعطل زمانی قبل از بسته شدن قالب کاهش یابند.

تاول زدگی: هوا و یا گازی که در مذاب، زیر سطح قالب در اثر پر شدن متلاطم قالب به دام افتاده است، به محض ازاد شدن فشار و در عملیات حرارتی بعدی، تاول هایی را روی سطح ایجاد می کند.

روش های دوری از این عیب شامل گاز زدایی از مذاب، پیش گرم کردن وسایل انتقال مذاب، افزایش حفرات قالب و یا پانچ اعمال فشار، کاهش دمای بارریزی و اعمال سرعت کمتر در بستن قالب است.

سرد جوشی: هنگامی اتفاق می افتد که فلز مذاب بر روی لایه های منجمد شده قبلی قرار می گیرد بدون اینکه کاملاً به آنها متصل گردد. برای کاهش این عیب ضروری است که دمای بار ریزی و یا دمای قالب را افزایش دهیم. مشخص شده کاهش زمان بستن قالب نیز در این مورد مفید واقع شده است.

چسبیدگی: هنگامی اتفاق می افتد که لایه نازکی از فلز منجمد شده به علت سرعت بالای فرایند و یا عدم روغن کاری کافی و یا سرد شدن قالب یا پانچ به دیواره قالب و یا پانچ می چسبد. برای جلوگیری از این عیب، کاهش دمای قالب و یا بار ریزی پیشنهاد می شود.

جدایش مرکزی: هنگامی که انجماد از دیواره های قالب آغاز می شود فاز مذاب از جزء با نقطه ذوب پایینتر غنی تر می شود. در مراحل پایانی انجماد مذابی غنی از عنصر حل شونده در مرکز قطعات منجمد می شود. به این نوع تفاوت حاصل شده در ترکیب جدایش مرکزی می گویند. چنین عیوبی می توانند با افزایش دمای قالب و یا کاهش دادن زمان بستن قالب کاهش یابند.

پارگی داغ: پارگی داغ در ریخته گری الیاژهایی با برد انجمادی بالا اتفاق می افتد. هنگامی که جامد و مایع همزمان در محدوده وسیعی از دما وجود دارند، انقباض جامد در اطراف سطح قالب صلب می تواند گسیختگی را در مناطقی

^۳ Extrusion segregation

که به طور جزئی منجمد شده اند حاصل کند. روش های دوری از این نوع عیب در فرایند ریخته گری کوبشی می تواند شامل کاهش دمای بارریزی، کاهش دمای قالب و افزایش زمان اعمال فشار باشند.

Case Debonding: در الیازهایی با درصد بالایی از سیلیکون و هنگامی که یک دانه بسیار کوچک با ضخامتی در حدود ۰.۵۱ تا 2 mm در سطح تشکیل می شود و در طی عملیات بعدی مثل ماشینکاری یا تمیز کردن سطح به صورت پوسته بلند می شود. این اتفاق می تواند به دلیل سرد شدن پوسته بیرونی در مقابل پانچ یا قالب باشد. این عیب می تواند به وسیله افزایش دمای ابزار مورد استفاده یا افزایش دمای بارریزی کاهش یابد. کاهش زمان بستن قالب نیز می تواند در از بین بردن این عیب موثر باشد.[2]

محصولات و موارد استفاده

قطعات نشان داده شده در شکل ۱ شامل چرخ دنده های فولادی مخروطی، بدنه راکت ها از جنس چدن داکتیل و کوبه الومینیومی است. دیگر قطعات شامل پره های از جنس فولاد زنگ نزن، دیسک های از جنس سوپر الیاز، پیستون های الومینیومی و چرخ دنده هایی از جنس برنز و برنج است.



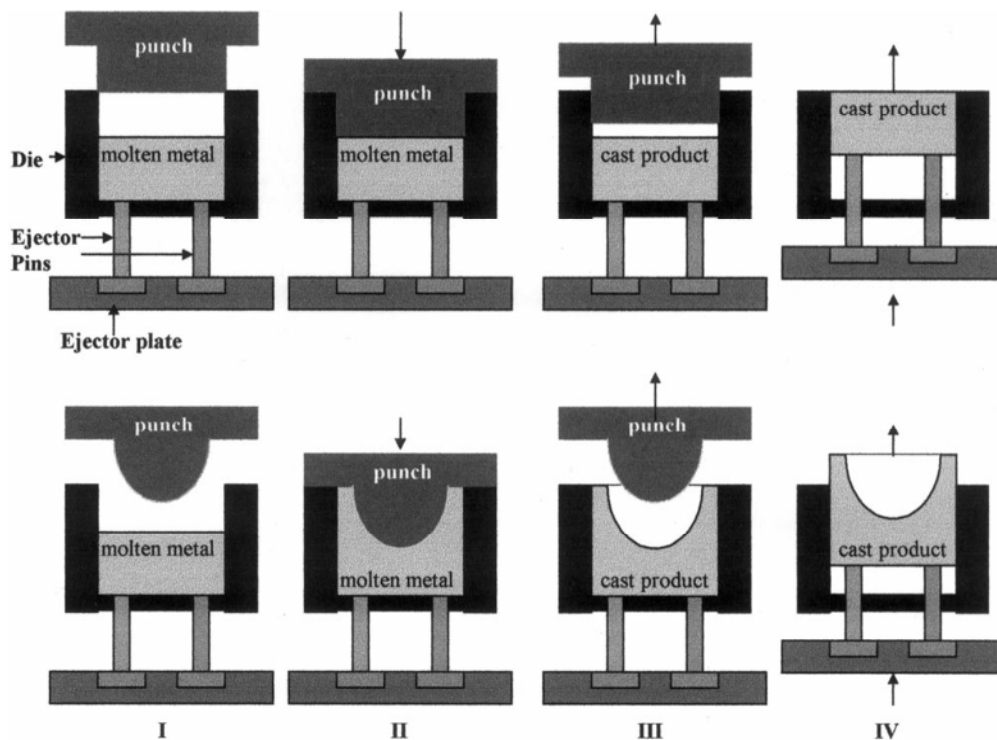
شکل 1- برخی قطعات تولید شده به روش ریخته گری کوبشی

اخیرا این فرایند برای تولید مواد کامپوزیتی با هزینه مناسب نیز استفاده شده است. یک سرامیک متخلخل را در قالب پیش گرم قرار می دهند و سپس مذاب را وارد قالب کرده و فشار را اعمال می کنند. فشار در این مورد کمک می کند که مذاب به درون سرامیک متخلخل نفوذ کند. [2]

روش فرایند

این فرایند شامل مراحل زیر است :

- ۱- مقدار معینی از فلز مذاب به درون قالب پیشگرم شده ریخته می شود که شامل یک پرس هیدرولیک است.
 - ۲- پرس برای بستن محفظه قالب و وارد آوردن فشار بر فلز مایع استفاده می شود.
 - ۳- اعمال فشار تا کامل شدن انجماد ادامه می یابد.
 - ۴- در آخر پانچ کنار کشیده می شود و قطعه بیرون آورده می شود.
- در شکل ۲ میتوان مراحل ای فرایند را به صورت شماتیک مشاهده کرد.

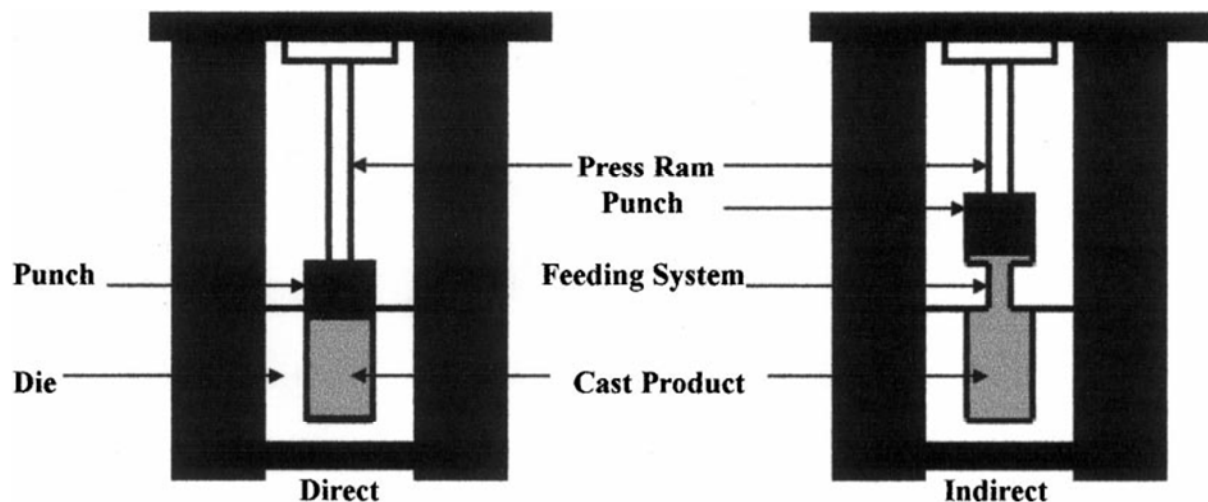


شکل ۲- مراحل فرایند ریخته گری کوبشی

دستگاه های فرایند ریخته گری کوبشی

قالب: یک جنبه بسیار حساس در فرایند های ریخته گری دائمی مثل ریخته گری کوبشی، خود قالب و مهمتر از آن طراحی قالب شامل انتخاب ماده مناسب برای قالب، روش تولید آن و عملیات حرارتی مناسب است. قالب های فرایند ریخته گری کوبشی در معرض بار های سیکلی حرارتی و مکانیکی شدید هستند که می توانند منجر به خستگی گرمایی، ترک، رفتگی، خوردگی و فرورفتگی شوند. طبیعت و مشخصه قالب به طور عمده تحت تاثیر الیاز ریخته گری است. در حال حاضر فولاد ابزار H13 به طور عمده برای تولید قالب ها استفاده می شود. اما به طور کلی قالب های فولادی باید مقاوم در دمای بالا و دارای سختی بالا، چقرمگی کافی و مخصوصا درجه بالایی از یکنواختی در ترکیب را داشته باشند.

ماشین ریخته گری: دو نوع اصلی از فرایند ریخته گری کوبشی وجود دارد. با توجه به اینکه فشار به وسیله پانچ مستقیما روی محصول نهایی در حال انجماد وارد شود و یا اینکه فشار بر روی یک سیستم تغذیه میانی وارد شود. روش اول ریخته گری کوبشی مستقیم و روش دوم ریخته گری کوبشی غیر مستقیم نام دارد. در شکل ۳ می توان این دو روش را در کنار هم دید.



شکل ۳- مقایسه ریخته گری کوبشی مستقیم (چپ) و غیر مستقیم (راست)

حالت مستقیم با توجه به حرکت مذاب در هنگام تماس با پانچ به دو دسته دیگر تقسیم میشود: در نوع اول مذاب در هنگام تماس با پانچ حرکتی ندارد (شکل ۲ قسمت بالا). در نوع دوم تماس پانچ با مذاب باعث حرکت مذاب می شود (شکل ۲ قسمت پایین).

همانطور که در شکل ۲ مشخص است روش اول برای ریخته گری قطعاتی مثل شمش که مذاب حرکتی ندارد و روش دوم که شامل حرکت مذاب است برای ریخته گری اشکال پیچیده تر استفاده می شود.

ماشین های ریخته گری کوبشی مستقیم ساده هستند ولی نوع غیر مستقیم به ۴ دسته تقسیم می شوند :

۱- بسته شدن عمودی قالب و خروج عمودی قطعه

۲- بسته شدن افقی قالب و خروج افقی قطعه

۳- بسته شدن افقی قالب و خروج عمودی قطعه

۴- بسته شدن عمودی قالب و خروج افقی قطعه [1]

همانطور که ذکر شد در فرایند مستقیم مذاب به درون محفظه قالب ریخته می شود و فشار توسط پانچ مستقیماً روی مذاب اعمال می شود. به علت تلاطم مذاب در مرحله بارریزی در ریخته گری کوبشی مستقیم لایه های اکسیدی وارد مذاب شده و به علت تاخیر زمانی بین مرحله بارریزی و اعمال فشار شاهد انجماد زودهنگام هستیم و در نتیجه ریزساختاری ناهمگن در قطعه ریخته گری را خواهیم داشت. این مشکلات با روش ریخته گری غیر مستقیم بر طرف می شوند. همچنین روش غیر مستقیم دارای سرعت بالایی نیز هست. [3]

متغیر های فرایند

حجم مذاب: کنترل دقیق حجم مذاب به هنگام پر کردن محفظه قالب ضروری است.

دمای بارریزی: به نوع الیاژ و هندسه قطعه بستگی دارد ولی معمولاً بین ۶ تا ۵۵ درجه بالا تر از دمای ذوب است.

دمای ابزار: معمولاً دمایی بین ۱۹۰ تا ۳۱۵ درجه سانتی گراد استفاده می شود. دمای پانچ بین ۱۵ تا ۲۰ درجه پایینتر از دمای بدنه پایینی قالب نگه داشته می شود.

تاخیر زمانی: به مدت زمان بین بارریزی و تماس پانچ با حوضچه مذاب و شروع وارد شدن فشار بر روی مذاب می گویند.

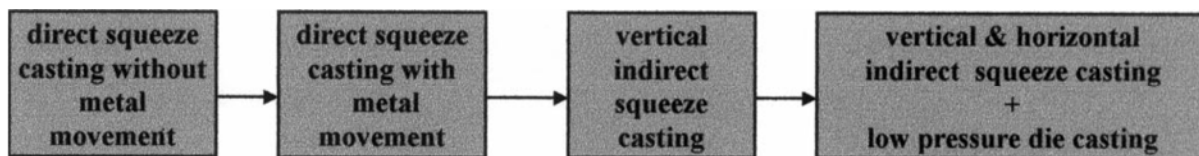
فشار وارده: از فشاری بین ۵۰ تا ۱۴۰ مگاپاسکال استفاده می شود. با توجه به هندسه قطعه و خواص مکانیکی لازم برای هر سیستم فشاری بهینه وجود دارد که در فشار های دیگر برتری در خواص مکانیکی مشاهده نمی شود. مدت زمان اعمال فشار بین ۳۰ تا ۱۲۰ ثانیه برای ریخته گری قطعاتی با وزن ۹ کیلو گرم مناسب است. مدت زمان اعمال فشار نیز به هندسه قالب بستگی دارد.

روغن کاری: برای الومینیوم، منیزیم و الیاز های مس مشخص شده است که استفاده از مقداری روان کننده کلوییدی گرافیتی وقتی که روی قالب های گرم اسپری می شود قبل از ریخته گری مناسب است. برای ریخته گری فلزات، استفاده از پوشش های سرامیکی برای جلوگیری از جوش خوردن بین فلز ریختگی و فلز دیواره قالب ضروری است. [2]

روند پیشرفت ریخته گری کوبشی

شکل ۴ روند پیشرفت فرایند را نشان می دهد. اولین روش مورد استفاده ریخته گری کوبشی مستقیم بود که معمولاً برای تولید قطعات ساده و متقارن مورد استفاده قرار می گرفت. استفاده از ریخته گری کوبشی مستقیم به علت ویژگی های فرایند و طراحی قالب محدود می شد. ماکزیمم وزن قطعات بیشتر از ۱۰ کیلوگرم نبود.

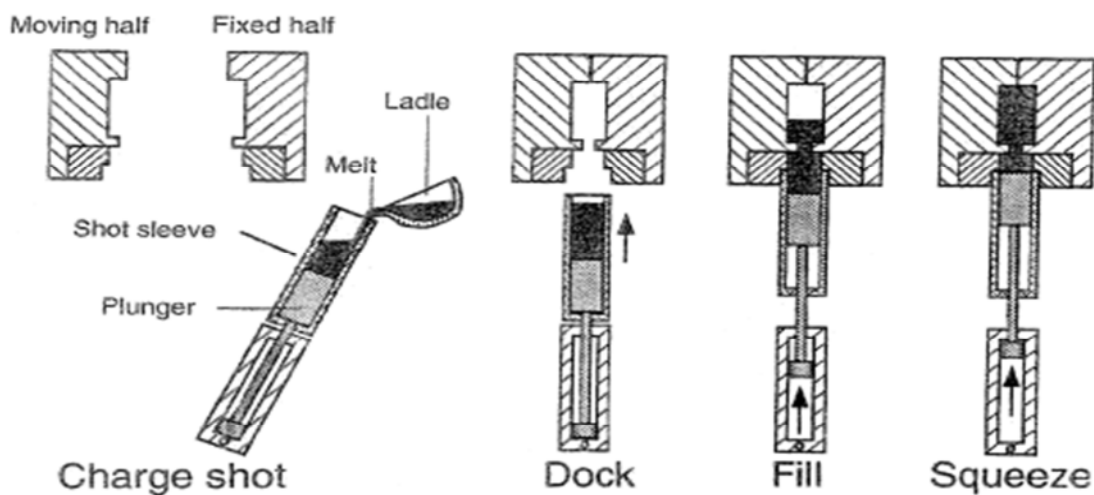
پیشرفت در ماشین های ریخته گری کوبشی عمودی غیر مستقیم کاربردهای این روش ریخته گری را گسترش داد. این روش قادر به تولید قطعات با اشکال پیچیده و بدون عیوب داخلی مثل چرخ اتومبیل ها بود. پوشش قالب در این روش نیاز نیست و فشار اعمالی برای انجماد بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال است. ماکزیمم اندازه قطعات با توجه به ظرفیت ماشین محدود می شود. با این وجود نا کار آمدی ریخته گری کوبشی غیر مستقیم عمودی در عدم توانایی آن در ریخته گری مقاطع نازک با ضخامتی کمتر از ۴ میلیمتر به علت سرعت پرکردن پایین قالب و انجماد زود هنگام الیاز است. به علاوه محدودیت هایی برای پیچیدگی شکل قطعات نیز وجود دارد که می تواند به علت مشکلاتی باشد که ممکن است در بیرون کشیدن قطعات از قالب به وجود آید.



شکل ۴- روند پیشرفت ریخته گری کوبشی

شکل ۵ فرایند ریخته گری کوبشی غیر مستقیم عمودی را نشان می دهد. در این نوع فرایند باید توجه داشت:

- ۱- در این مرحله بستن عمودی و ورود عمودی مذاب مانع ورود هوا خواهد شد و دمای بالای مذاب را حفظ می کند.
- ۲- کج کردن و متصل کردن سریع باعث می شود ریختن مذاب و بسته شدن قالب در کمترین زمان اتفاق بیفتد و زمان کلی فرایند کاهش یابد.



شکل ۵- مراحل فرایند ریخته گری کوبشی غیر مستقیم عمودی

دمای پایین تر قالب در ریخته گری کوبشی عمودی نسبت به سایر روش های ریخته گری سرعت سرد شدن بالاتر و دانه بندی ریزتر را حاصل می کند. محصولات تولیدی به این روش از نظر جهت گیری دانه ها از محصولات تولیدی به روش فورجینگ همگن تر هستند.

تحول بعدی در فرایند ریخته گری کوبشی ترکیب آن با فرایند ریخته گری تحت فشار کم است. یک نوع از این ماشین های ساخته شده به این منظور دارای یک پمپ مغناطیسی تزریق مذاب به همراه سیستم مهرش غیر مستقیم مذاب (ریخته گری کوبشی غیر مستقیم) است که امکان تولید قطعات بیشتری را با کاربرد های صنعتی محقق می کند (شکل ۶). این نوع فرایند دارای مشخصات زیر است:

۱- کاهش زمان تولید مذاب و تزریق آن که نتیجه آن تولید قطعات با استحکام بالاست که در آنها غیر یکنواختی ترکیب در مرحله انجماد تقریباً از بین رفته است.

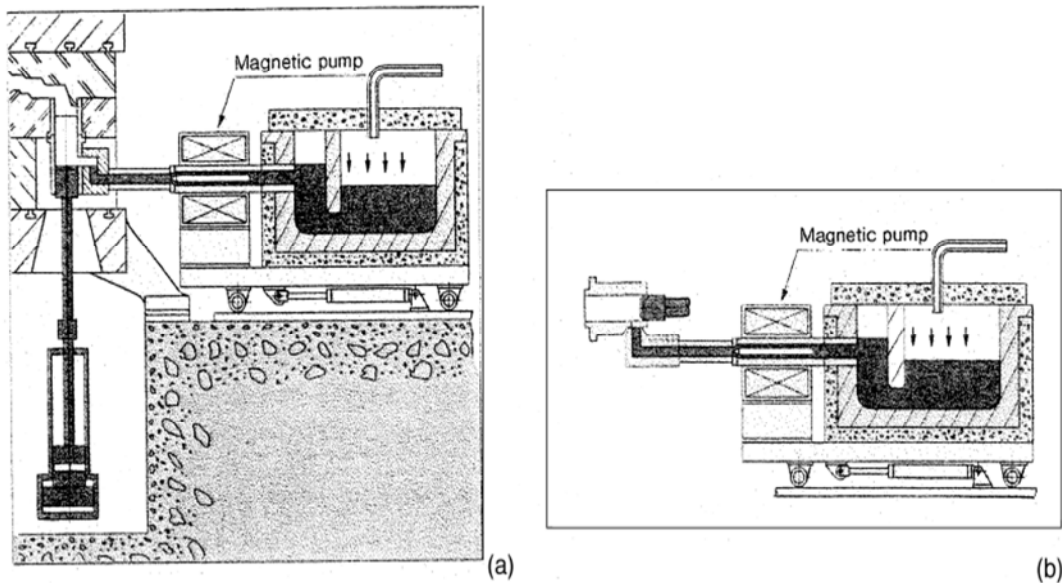
۲- چون مذاب فلز در تماس با هوا قرار نمی گیرد قطعاتی بدون آخال های اکسیدی به آسانی به این روش ریخته گری می شوند.

۳- سرعت های کم پر شدن، قطعاتی با کیفیت بالا و بدون تخلخل و عیوب داخلی را حاصل می شود.

۴- دمای فلز مذاب در پایین ترین میزان فوق گداز نگه داشته می شود چون افت دما به این روش حداقل است.

۵- مواد کامپوزیتی هم می توانند به این روش تولید شوند.

تحول دیگر در ترکیب آن با فرایند رئو کستینگ بوده که در آن هم زدن و تزریق مذاب درون قالب و اعمال فشار در یک واحد انجام میشود. در زمان مناسب که کسر حجمی مناسبی از جامد به دست آمد تزریق مذاب و اعمال فشار آغاز می شود. مهمترن مزیت در استفاده از ماشینی که دو فرایند را ترکیب کرده باشد عمر طولانی تر قالب خواهد بود.



شکل ۶- شکل شماتیک ماشین ترکیبی ریخته گری کوبشی و ریخته گری تحت فشار پایین (a) بسته شدن عمودی قالب تزریق رو به بالا (b) بسته شدن افقی قالب و تزریق افقی

بررسی ریز ساختار در فرایند ریخته گری کوبشی

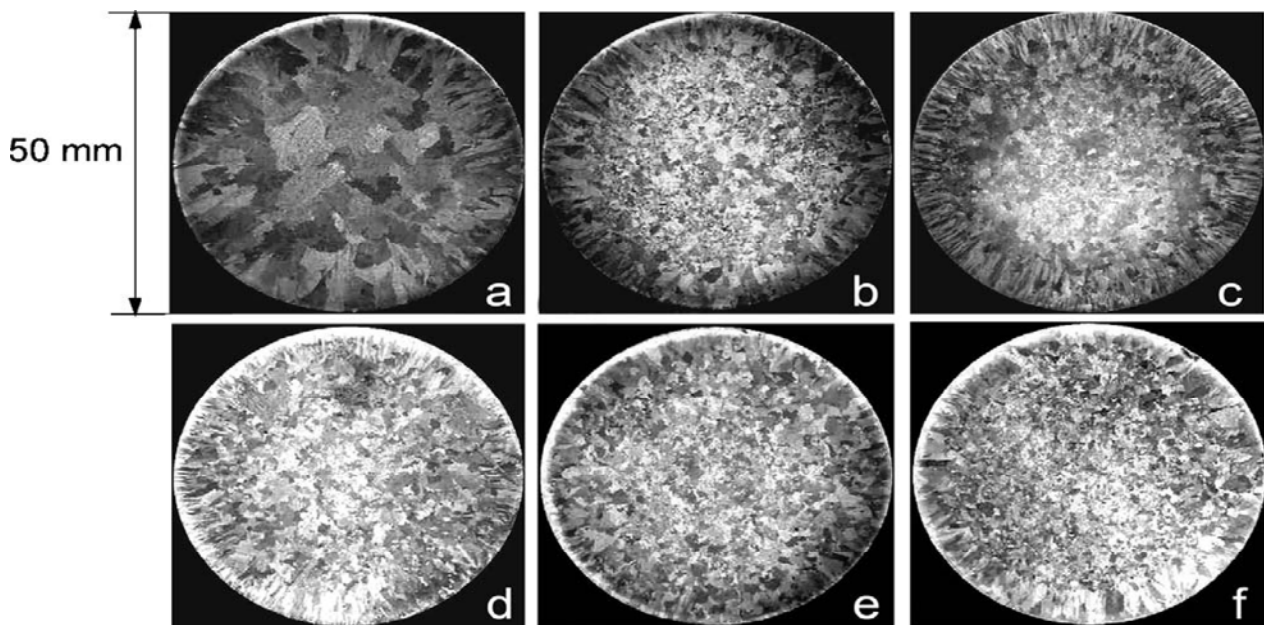
در ساختار ماکروسکوپیک اغلب قطعات ریختگی ۳ منطقه با ساختار قابل تفکیک گوناگون قابل مشاهده است: ۱- منطقه تبریدی: لایه ای مرزی درست در کنار دیواره قالب که دارای کریستال های هم محور بسیار ریز با جهات اتفاقی است. ۲- منطقه ستونی: لایه ای از کریستال های کشیده شده که به موازات جهت انتقال حرارت قرار گرفته اند. ۳- منطقه محوری: ناحیه ای مرکزی که از کریستال های متحدالشکل تشکیل شده است. [4]

در شکل ۷ می توان ساختار قطعه ای از الیاژ LM13 را که توسط فرایند ریخته گری کوبشی و تحت فشار های مختلف با دمای مذاب ۷۳۰ درجه و دمای قالب ۲۰۰ درجه سانتی گراد تولید شده است را دید. شکل 7-a مربوط به ریختگی الیاژ در فشار اتمسفر است. ساختار این الیاژ شامل نواری بسیار باریک از دانه های ستونی است که حول دانه های بزرگ هم محور قرار گرفته است. اعمال فشار خارجی ساختار ستونی و هم محور را ریزتر می کند و محدوده رشد ستونی از دیواره قالب را محدود می کند.

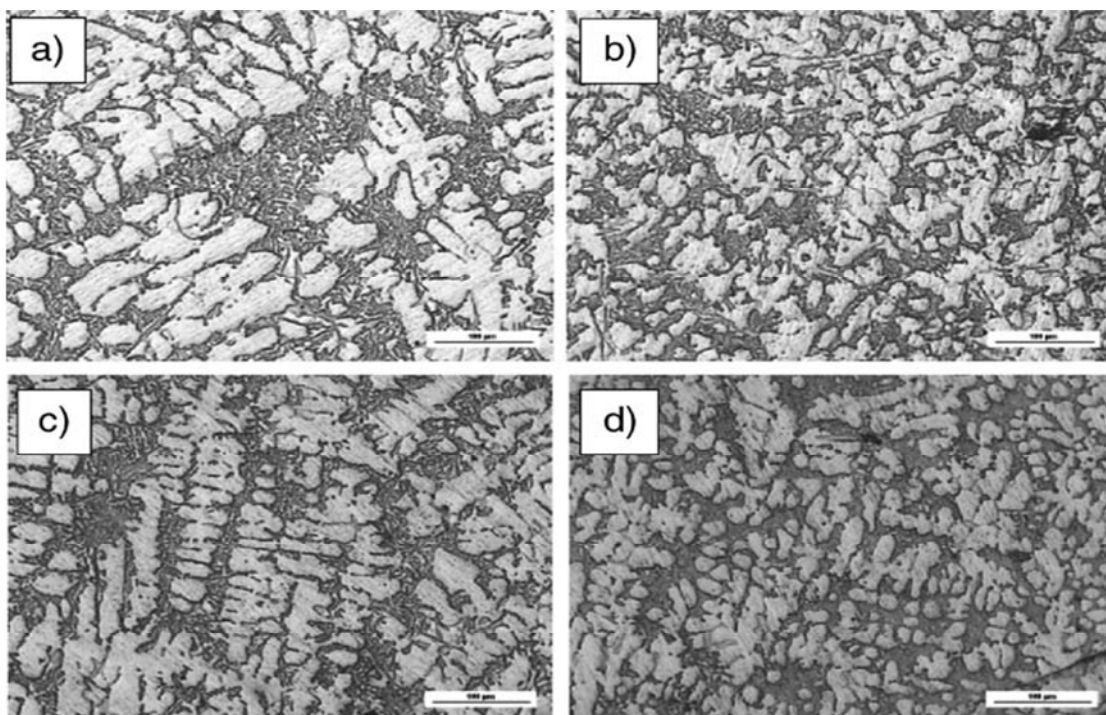
این ریزدانگی به علت تماس بهتر بین فلز و سطح قالب در خلال انجماد است. این تماس بهتر باعث انتقال حرارت بهتر می شود. همانطور که مشاهده می شود با افزایش فشار خارجی تا ۱۰۰ مگاپاسکال ساختار ریز تر شده است.

ولی افزایش فشار از ۱۰۰ مگاپاسکال به بالاتر تغییر چشمگیری در ساختار را حاصل نشد. عدم تغییر در ریزساختار با افزایش فشار بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال این است که در فشارهای کمتر از این فشار تماس کامل بین فلز و دیواره قالب برقرار نشده است و در فشار ۱۰۰ مگاپاسکال این تماس به حد اکثر خود می رسد. با اعمال فشار بیشتر تغییری در میزان تماس و در نتیجه میزان انتقال حرارت به وجود نمی آید. بنابراین سرعت انجماد نیز تفاوت چشمگیری پیدا نمی کند و در نتیجه ساختار تغییر چشمگیری ندارد. [5]

در شکل ۸ می توان ریزساختار مربوط به الیاژ الومینیوم EN-AB46000 ریختگی به روش ریخته گری کوبشی را مشاهده نمود. تصاویر تهیه شده از لبه های نمونه و قسمت میانی مقطع نمونه می باشند. این تصاویر مربوط به ریخته گری در فشارهای اتمسفر و فشار ۱۰۰ مگاپاسکال هستند. با توجه به تصاویر تهیه شده مشاهده می شود که تغییر ساختار در لبه های نمونه زیاد چشمگیر نیست. این به این علت است که انجماد از دیواره ها شروع می شود و در ابتدای انجماد تماس بین فلز و قالب در سطح مناسبی برقرار است. با پیشرفت انجماد و انقباض ناشی از آن یک فاصله هوایی بین فلز و قالب شکل می گیرد. اعمال فشار روی مذاب باعث می شود این فاصله هوایی حد اقل شود و در نتیجه انتقال حرارت و سرعت انجماد بیشتر می شود. بنابراین شاهد ریز ساختار ریزتری هستیم. علت اختلاف ساختار در نمونه های تهیه شده از میانه مقطع نیز به همین دلیل می باشد.



شکل ۷- تاثیر فشار بر ریخته گری کوبشی الیاژ LM13 (a) 0 Mpa (b) 20 Mpa (c) 53 Mpa (d) 106 Mpa (e) 171 Mpa (f) 211 Mpa

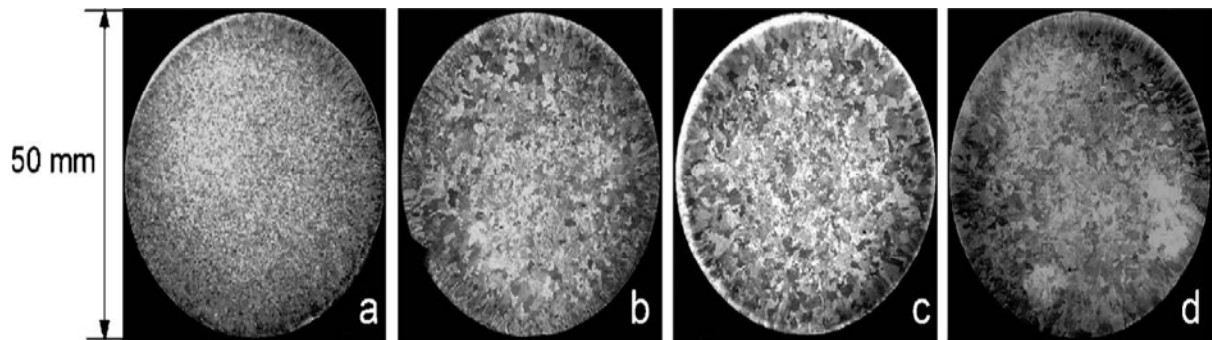


شکل ۸- ریز ساختار نمونه های ریختگی به روش ریخته گری کوبشی (a) 0 Mpa نمونه تهیه شده از میانه قطعه (b) 0 Mpa نمونه تهیه شده از لبه قطعه (c) 100 Mpa نمونه تهیه شده از میانه قطعه (d) 100 Mpa نمونه تهیه شده از لبه قطعه

تاثیر دمای بارریزی بر ساختار الیاژ های ریختگی

برای تولید قطعه ای با خواص همسان باید ساختاری از دانه های محوری ریز تشکیل گردد. بدین منظور باید شرایطی به وجود آورد که تحت ان رشد ستونی متوقف شده و منطقه ای با دانه های محوری به وجود آید. [4]

در شکل ۹ می توان ساختار ریختگی الیاژ LM13 را که از دماهای مختلف و تحت فشار 171 Mpa بارریزی شده است را مشاهده کرد. تمایل برای افزایش اندازه دانه با افزایش دمای بارریزی با توجه به شکل کاملاً مشخص است. این تمایل به سرعت سرد شدن کمتر نمونه ها در خلال انجماد و کمتر شدن قابلیت مکان های جوانه زنی غیر همگن با افزایش دمای بارریزی مربوط می شود. از شکل کاملاً مشخص است که هنگامی که دمای بارریزی از ۷۸۰ به ۷۳۰ و سپس به ۶۸۰ درجه سلسیوس کاهش می یابد، ساختار به تدریج ریز تر می شود. اما با کاهش بیشتر دمای بارریزی به ۶۳۰ درجه تغییر قابل توجهی در ساختار مشاهده می شود. ساختار شامل دانه های یکنواخت محوری بسیار ریز و مقدار بسیار کمی دانه های ستونی می شود. [5]



شکل ۹- تاثیر دمای بارریزی بر ساختار الیاژ LM13 تولید شده به روش ریخته گری کوبشی (a) ۶۳۰° (b) ۶۸۰° (c) ۷۳۰° (d) ۷۸۰°

در یک الیاژ مشخص با افزایش دمای بارریزی طول منطقه ستونی افزایش می یابد. همچنین تشکیل یک منطقه محوری گسترده منوط به فوق گذاز کم و درصد عناصر الیاژی بالاست. با افزایش دمای بارریزی تمایل برای تشکیل دانه های محوری کاهش یافته و اندازه دانه های تشکیل شده بزرگتر می گردد. [4]

تاثیر فشار اعمالی بر روی مذاب

عملکرد فشار بر روی رفتار انجماد مواد بر اساس رابطه کلایوس-کلاپیرون توصیف شده است

بر اساس این رابطه اعمال فشار بر روی فاز چگال باعث افزایش دمای ذوب آن می شود.

$$\frac{\Delta T_f}{\Delta P} = \frac{T_f(V_l - V_s)}{\Delta H_f}$$

در این رابطه T_f دمای ذوب تعادلی فلز، V_l و V_s به ترتیب حجم مذاب و حجم جامد، ΔH_f گرمای نهان ذوب، و ΔT_f و ΔP به ترتیب میزان تغییر دمای ذوب بر اثر اعمال فشار و اختلاف فشار اعمالی با فشار اتمسفر است. با در نظر گرفتن مذاب به عنوان یک گاز ایده ال، تاثیر فشار بر نقطه ذوب می تواند با معادله زیر تقریب زده شود.

$$P = P_0 \exp\left(\frac{-\Delta H_f}{RT_f}\right)$$

در این معادله ، ΔH_f و P_0 و R ثابت هستند. T_f با افزایش فشار افزایش می یابد. به عنوان یک مکانیزم این تغییر در نقطه ذوب با توجه به کاهش فواصل بین اتمی با افزایش فشار، و در نتیجه توقف و یا کاهش تحرکات اتمی قابل پیش بینی است که شرط لازم برای انجماد است. حلالیت بین اجزای تشکیل دهنده نیز و همچنین حلالیت ناخالصی ها با افزایش فشار افزایش می یابد.

فرضیات تئوری بحث شده در بالا هنگامی که دمای لیکویدوس برای الیاژ دو تایی Al/Si با اعمال فشاری در حدود 150 Mpa ، ۹ درجه سانتی گراد افزایش یافت ثابت شده است. به علاوه با اعمال چنین فشاری نقطه یوتکتیک به سمت چپ حرکت کرد یعنی به سمت غلظت بیشتر Si . پیامد های چنین تغییری در دیاگرام فاز، تغییر چشمگیر ریزساختار و ارتقاء خواص مکانیکی قطعات تولیدی به روش ریخته گری کوبشی بود.

همانطور که چدویک و یو و فرانکلین و همکارانشان ذکر کرده اند ریز دانه شدن در ریخته گری کوبشی قابل توجه است. اگرچه تفسیر آنان از این ریز دانگی متفاوت بود. چادویک و یو اشاره کردند فشار تأثیری بر رزدانگی ندارد و ریز دانه شدن ناشی از افزایش ضریب انتقال حرارت در ریخته گری کوبشی است. این به معنی نرخ های بالاتر سرد شدن الیاژ در حال انجماد، به علت از بین رفتن فاصله هوایی بین مذاب و دیواره قالب و افزایش سطح تماس موثر می باشد. فرانکلین و همکارانش نظر دیگری ارائه کردند. بر اساس این نظریه اعمال فشار بر مذاب باعث ایجاد یک فوق تبرید ناگهانی در مذاب دارای فوق گداز می شود و در نتیجه باعث افزایش فرکانس جوانه زنی و ریز شدن بیشتر دانه ها می شود.

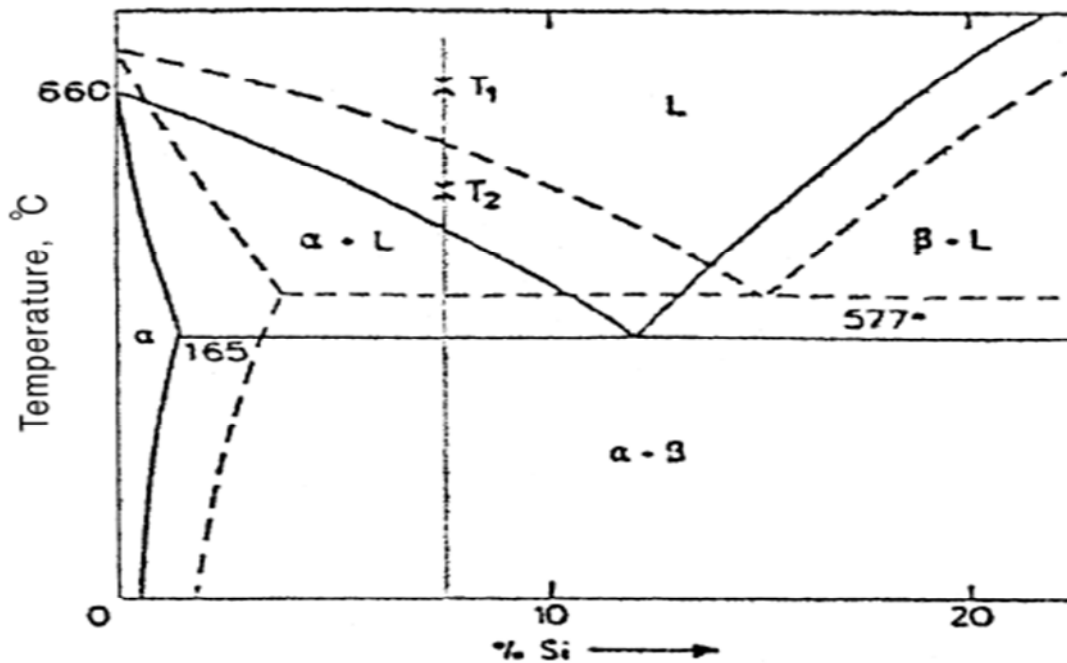
هر دو تفسیر کاملاً درست هستند و به طور همزمان در فرایند انجماد اثر می گزارند اما یکی ممکن است در لحظاتی بر دیگری غلبه کند. اندازه فاصله هوایی بین الیاژ در حال انجماد و دیواره قالب و همچنین میزان فوق تبرید ناگهانی ایجاد شده به واسطه اعمال فشار دو دلیل اصلی برای ریز دانگی هستند ولی این دو عامل خود به پارامترهای درگیر فرایند مثل میزان فشار و مدت زمان اعمال آن و ترکیب شیمیایی الیاژ وابسته هستند.

زمان اعمال فشار نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. برای مثال اگر فشار در دمایی مثل $T > T_m + \Delta T$ اعمال شود در این حالت اثر فوق تبرید قابل چشمپوشی است و به همین دلیل افزایش در ضریب انتقال حرارت مکانیزم غالب برای ریزدانگی است. قابل ذکر است که ΔT میزان پیشبینی شده در اثر افزایش نقطه ذوب در اثر اعمال فشار است. اما اگر فشار در زمانی اعمال شود که $T_m \leq T \leq T_m + \Delta T$ باشد در این حالت فوق تبرید ناگهانی مکانیزم غالب برای

ریزدانگی است. اثر فوق تیرید هنوز هم وقتی اعمال فشار با آغاز بلوری شدن انجام می شود محسوس است یعنی در

دمایی مثل $T < T_m$ [1].

در شکل ۱۰ میتوان تاثیر اعمال فشار را بر روی دیاگرام های Al-Si مشاهده کرد.



شکل ۱۰- تاثیر اعمال فشار و سرد شدن سریع بر دیاگرام فازی آلومینیوم-سیلیسیم

فشار اعمال شده و نقش آن در تغییر ضریب انتقال حرارت

ضریب انتقال حرارت

هنگامی که فرایند انجماد آغاز می شود به علت اختلاف چگالی جامد و مذاب، شاهد انقباض حرارتی خواهیم بود. این انقباض باعث ایجاد یک فاصله هوایی بین فلز منجمد شده و دیواره قالب می شود و این فاصله هوایی با توجه به ادامه فرایند انجماد و انقباض بیشتر ناشی از آن، گسترش می یابد. با تولید این فاصله هوایی انتقال حرارت به علت مقاومت حرارتی بالا در این فاصله هوایی با سرعت کمتری انجام می شود و در واقع ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد. با توجه به گسترش این فاصله هوایی میزان کاهش ضریب انتقال حرارت با توجه به زمان ثابت نبوده و به طور پیوسته انجام می شود.

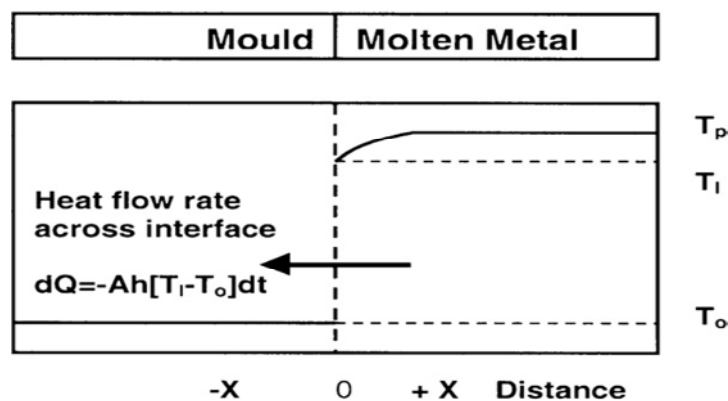
در ریخته‌گری کوبشی اعمال فشار بر مذاب در حال انجماد موجب جلوگیری از رشد این فاصله هوایی و یا حتی در مواردی در صورت اعمال فشار مناسب موجب حذف کامل آن می‌شود. با حذف این لایه ضریب انتقال حرارت افزایش یافته و در نتیجه انتقال حرارت افزایش و زمان کلی انجماد کاهش می‌یابد.

زمان انجماد الیاژ آلومینیوم LM6 با دو نوع فرایند ریخته‌گری ثقیلی و ریخته‌گری کوبشی به دو روش جریان حرارت پایدار و مدل گارسیا تعیین شده است. باید تذکر داده شود هر دو مدل استفاده شده بر اساس انتقال حرارت یک بعدی صورت گرفته‌اند.

مدل پایدار انتقال حرارت

شکل ۱۱ یک دیاگرام شماتیک از انتقال حرارت پایدار میان فلز و قالب را نشان می‌دهد. فرض می‌شود که: (۱) رسانش گرمایی به صورت یک بعدی انجام می‌گیرد. (۲) جریان حرارت پایدار است یعنی در هر فاصله X از دیواره، دما با زمان تغییر نمی‌کند. (۳) مقاومت فصل مشترک با ضرب انتقال حرارت h معین می‌شود. (۴) خواص ماده ثابت هستند. (۵) انتقال حرارت به وسیله جریان همرفت در هوای اطراف نا دیده گرفته می‌شود.

در شکل ۱۱، T_p دمای بار ریزی و T_i دمای نوب فلز و T_0 دمای قالب است. به علت رسانایی گرمایی بالای قالب دمای فلز در فصل مشترک به محز بارریزی فوراً به T_i کاهش می‌یابد و تا پایان انجماد ثابت باقی می‌ماند. واضح است که با این مدل افت دما در قالب به صورت ناپیوسته صورت می‌گیرد. جریان حرارت در قالب بسیار سریع است که به علت رسانایی گرمایی قالب و فلز در مقایسه با انتقال آرام در فصل مشترک است. بنابراین نرخ خروج حرارت توسط ضریب انتقال حرارت در فصل مشترک بین فلز مذاب و قالب توسط معادله ۷ تعیین می‌شود.



شکل ۱۱- دیاگرام شماتیک شرایط انتقال حرارت پایدار

معادله ۱ معادله دیفرانسیلی انتقال حرارت را نشان می دهد. گرمای کلی منتقل شده در زمان t توسط معادله ۲ و با انتگرال گیری از معادله ۱ ارائه شده است. زمان لازم برای انجماد با دانستن Q_s می تواند از معادله ۳ به دست بیاید. گرمای آزاد شده قبل از انجماد، جمع گرمای نهان و گرمای فوق گداز است. این گرمای آزاد شده توسط معادله ۴ ارائه شده است. زمانی که لازم است جریان حرارت از فصل مشترک عبور کند مطابق با t_s است که می تواند از معادله ۵ یا به وسیله معادله ۶ و با تاثیر دادن نسبت V/A به دست آید. باید توجه شود در معادله ۶، A مساحت دیواره قالب و

$$dQ = -Ah[T_1 - T_0]dt \quad (1) \quad \rho \text{ چگالی فلز مذاب و } C \text{ گرمای ویژه است.}$$

$$Q = -Ah[T_1 - T_0]t \quad (2)$$

$$Q_s = -Ah[T_1 - T_0]t_s \quad (3)$$

$$Q_s = \rho V[H + c(T_p - T_1)] \quad (4)$$

$$t_s = \frac{\rho V[H + c(T_p - T_1)]}{Ah[T_1 - T_0]} \quad (5)$$

$$t_s = \frac{\rho[H + c(T_p - T_1)]}{h[T_1 - T_0]} \left[\frac{V}{A} \right] \quad (6)$$

$$h = \left\{ \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_m}{k_m} \right\}^{-1} \quad (7)$$

مدل گارسیا

در یک سیستم واقعی مذاب/ قالب، دما به طور ناپیوسته در فصل مشترک قالب فلز افت پیدا میکند (شکل 12 a). برای غلبه بر این مشکل در آنالیز های ریاضی گارسیا و همکارانش مدل ارائه شده در شکل 12 b را ارائه دادند. این مدل از دو جنبه با مدل پایدار تفاوت دارد. اولاً مقاومت فصل مشترک بین فلز و قالب تقسیم شده است و به عنوان یک جامد فرضی از قبل وجود داشته در نظر گرفته می شود. فلز و قالب به وسیله یک صفحه فرضی با دمای ثابت T_i از یکدیگر جدا شده اند و با یک شار حرارتی برابر با یکدیگر مرتبط هستند. دوماً معادله رسانایی گرمایی ناپایدار فوریه در اینجا استفاده می شود. اما بقیه فرض ها همچنان بر قرارند.

برای مدل گارسیا ϕ و میزان فوق گداز می تواند به وسیله معادله ۸ و با تکرار به دست آید. در این رابطه m یک ثابت بدون بعد برای فلز و برابر با $(k_l \rho_l C_{pl} / k_s \rho_s C_{ps})^{1/2}$ می باشد. n در رابطه ۸ برابر است با $(a_s / a_l)^{1/2}$ و M نیز یک ثابت بدون بعد مربوط به سیستم فلز / قالب است و برابر است با $(k_l \rho_l C_{pl} / k_s \rho_s C_{ps})^{1/2}$. H گرمای نهان ذوب C_s گرمای ویژه جامد، T_f دمای انجماد، T_0 دمای اولیه قالب، T_p دمای بارریزی، T_i دمای مذاب و T_m دمای قالب است.

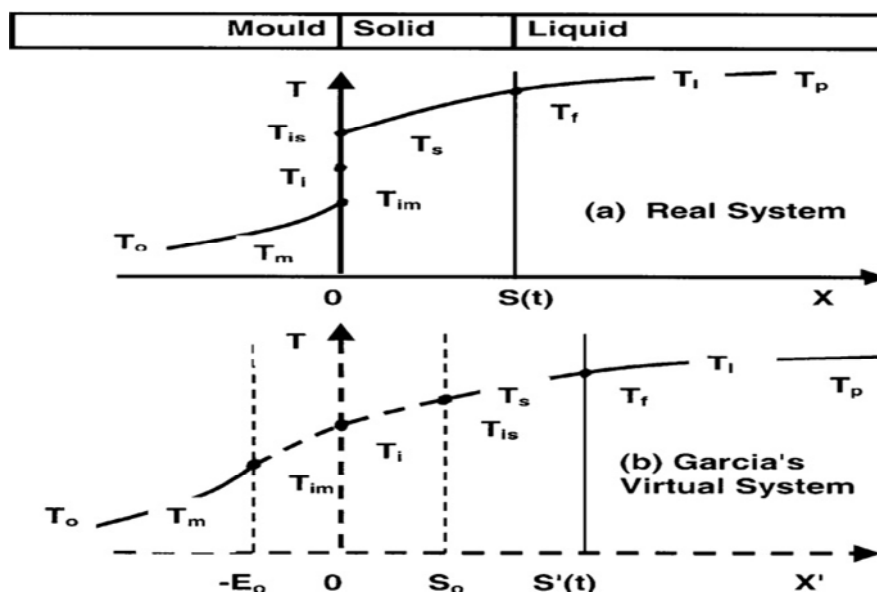
با پیدا شدن ϕ از معادله ۸، ضریب انتقال حرارت جامد از معادله ۹ قابل تعیین است (h_s). باید توجه داشت h می تواند از معادله ۷ به دست آید. ضخامت جامد فرضی S_0 می تواند از معادله ۱۰ به دست آید. با داشتن h_s و S_0 زمان انجماد از رابطه ۱۱ به دست می آید.

$$\frac{\exp(-\phi^2)}{M + \operatorname{erf}(\phi)} - \frac{m(T_p - T_m) \exp(-n^2 \phi^2)}{(T_m - T_0) \operatorname{erfc}(n\phi)} - \frac{\sqrt{\pi} H \phi}{c_s(T_f - T_0)} = 0 \quad (8)$$

$$h_s = \left[1 + \frac{M}{\operatorname{erf}(\phi)} \right] h \quad (9)$$

$$S_0 = \frac{2\phi k_s}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\phi) \exp(\phi^2) h_s} \quad (10)$$

$$t = \frac{S^2}{4a_s \phi^2} + \frac{S_0 S}{2a_s \phi^2} \quad (11)$$



شکل ۱۲- (a) دمای واقعی بر حسب فاصله (b) مدل گارسیا

در این آزمایش برای ریخته گری کوبشی قالب از جنس فولاد ابزار H13 انتخاب شد و برای ریخته گری ثقی از فولاد AISI 1020 استفاده شد. زمان انجماد برای LM6 در هر فرایند و با انتخاب دماهای بارریزی یکسان به وسیله معادلات ۵ و ۱۱ تخمین زده شد. نتایج در جدول ۱ مشاهده می شوند. در این جدول زمان انجماد برای قسمت های بالایی و پایینی قالب در روش ریخته گری کوبشی و همچنین میانگین زمان انجمادی بین زمان به دست آمده از هر دو روش به دست آمده است. همانطور که مشاهده می شود در دماهای بارریزی یکسان زمان انجماد برای ریخته گری کوبشی کمتر از ریخته گری ثقی بود. این کاهش زمان در اثر اعمال فشار و تاثیر آن بر تغییر در ضریب انتقال حرارت اتفاق می افتد. [6]

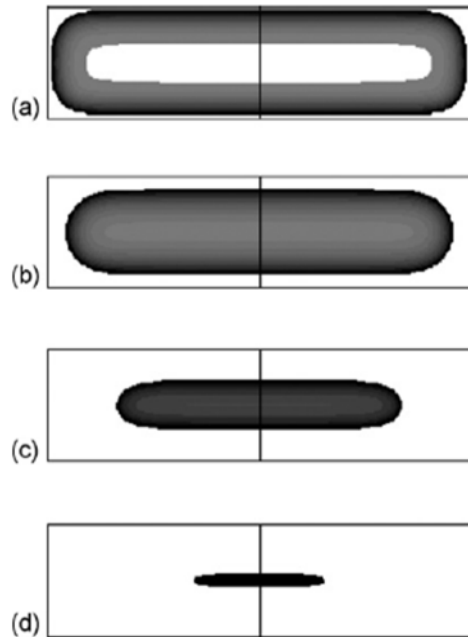
جدول ۱- زمان انجماد برای الیاژ LM6

T_p (°C)	Solidification time (s)			Dev. (%)
	Eq. (5)	Eq. (11)	Average	
Gravity casting				
660	15.64	18.44	17.0	-17.9
690	16.66	23.08	19.9	-38.5
720	17.70	29.88	23.8	-68.8
		Av	20.2	41.7
Squeeze casting (upper)				
660	16.76	11.87	14.3	29.2
690	17.86	14.80	16.3	17.1
720	18.96	19.07	19.0	-0.6
		Av	16.5	15.6
Squeeze casting (lower)				
660	9.25	9.90	9.6	-7.0
690	9.86	11.99	10.9	-21.6
720	10.47	14.86	12.7	-41.9
		Av	11.1	23.5

شکل ۱۳ پیشرفت انجماد را برای ریخته گری کوبشی یک قطعه استوانه ای شکل با قطر و ارتفاع 100 mm از جنس الیاژ A356 با ضریب انتقال حرارت برابر با ۲۰ را نشان می دهد. پیشرفت انجماد می تواند به وسیله چنین نمودارهایی دنبال شود. مناطق سیاه مناطق خمیری هستند. جبهه انجماد از بیرون به سمت هسته و درون استوانه پیش می رود در حالیکه گرما از طریق نقاط بیرونی (نقاطی که از هسته فاصله دارند) به دیواره قالب منتقل می شود. در زمان ۴ ثانیه تمام ۳ منطقه یعنی مناطق خمیری منجمد شده و مذاب با هم حضور دارند. به علت انجماد سریع فقط

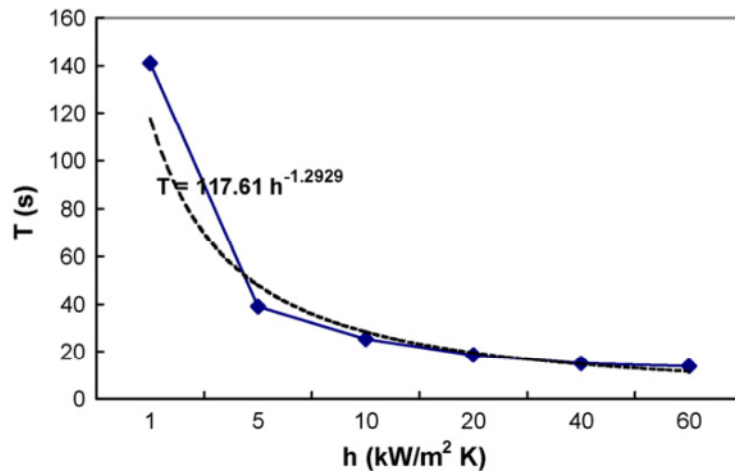
منطقه خمیری در ۸ ثانیه قابل مشاهده است. در ۱۶ ثانیه منطقه کوچک خمیری و منطقه جامد را داریم و در ۲۷ ثانیه انجماد پایان می یابد.

شکل ۱۴ نمودار زمان انجماد برحسب ضریب انتقال حرارت را نشان می دهد. همانطور که در نمودار مشخص است با افزایش h زمان انجماد کاهش می یابد که به علت افزایش نرخ انتقال حرارت می باشد. با افزایش بیشتر h زمان انجماد به یک مقدار حدی میرسد. باید توجه شود که برای فرایند ریخته گری کوبشی با توجه به نوع الیاز، هندسه قطعه و دیگر پارامترهای موجود یک فشار بهینه وجود دارد که در آن بازده فرایند حداکثر است. افزایش بیشتر فشار ممکن است باعث افزایش h شود ولی با توجه به سایر پارامترها می تواند از سودمندی فرایند بکاهد. رسیدن زمان انجماد به یک مقدار حدی با افزایش ضریب انتقال حرارت نیز به همین دلیل است. [7]



شکل ۱۳- پیشروی جبهه انجماد بعد از (a) 4 s, (b) 8 s, (c) 12 s and (d) 16 s

$$(h=20kW/m^2)$$



شکل ۱۴- زمان انجماد تخمین زده شده برای مقادیر مختلف h

نمودارهای سرد شدن

در شکل ۱۵ دو قطعه تولید شده به روش ریخته گری ثقلی و ریخته گری کوبشی مشاهده می شود. تاثیر اعمال فشار در رفتار سرد شدن برای این دو نمونه قطعه در شکل ۱۶ مشخص است. شکل ۱۶ نمودار های آنالیز حرارتی به دست آمده از قسمت های مختلف قطعات را نشان می دهد. در این شکل خطوط خط چین مقادیر محاسبه شده دما در زمان های مختلف بر اساس مدل های عددی هستند و خطوط ممتد مقادیر اندازه گیری شده توسط ترموکوپل های قرار داده شده در قالب می باشند.

شکل های 16 a-b نمودارهای سرد شدن را برای فرایند ریخته گری ثقلی نشان می دهد. کاهش دمای مذاب از دمایی بالاتر از دمای لیکوییدوس در شکل مشاهده می شود که با آزاد شدن گرمای نهان انجماد شیب نمودار بسیار کم شده و نمودار تقریباً به صورت افقی در می آید. با اتمام فرایند از آمدن گرمای نهان ذوب، شاهد افزایش دوباره شیب هستیم.

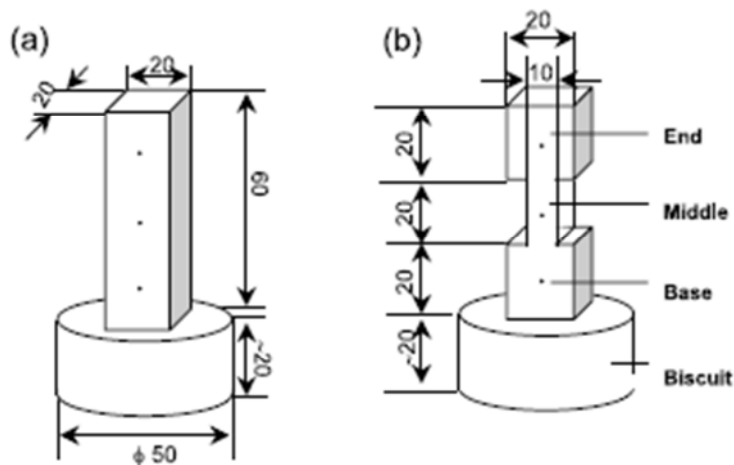
شکل های 16 c-d منحنی های سرد شدن را برای فرایند ریخته گری کوبشی نشان می دهد. این نمودار ها دارای جنبه های مشابهی با نمودار های حاصل از ریخته گری ثقلی هستند ولی در سرعت های سرد شدن با یکدیگر تفاوت دارند.

در مورد مقطع میانی با ضخامت ۲۰ میلیمتر زمان انجماد پس از تزریق مذاب در ریخته گری ثقلی ۱۲ ثانیه بود که این زمان برای ریخته گری کوبشی به حدود ۵ ثانیه کاهش یافت.

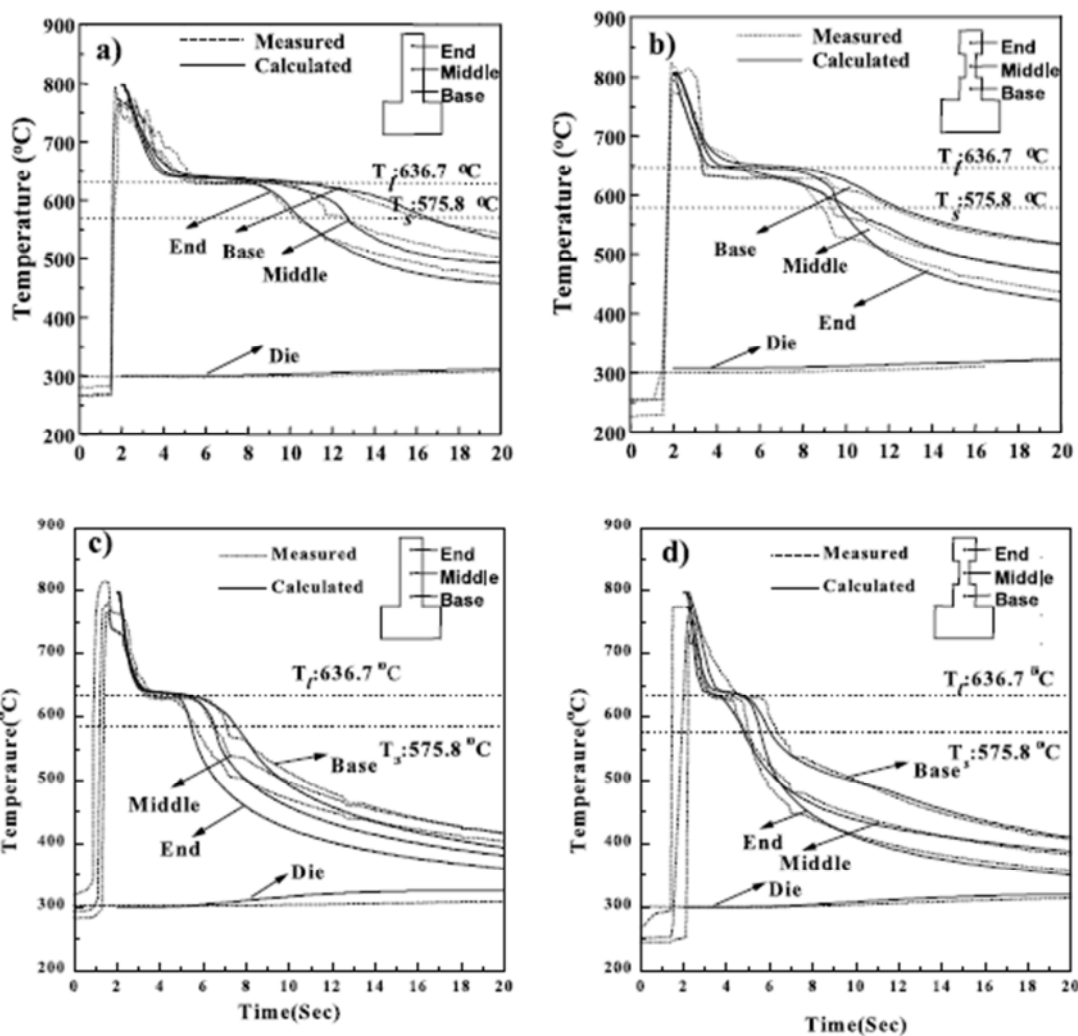
با مقایسه قسمتی از نمودار که مربوط به ازاد شدن گرمای نهان ذوب است می توان دریافت مدت زمان لازم برای ازاد شدن گرمای نهان ذوب در ریخته گری کوبشی کمتر است و در واقع انتقال این گرما به بیرون با سرعت بیشتری انجام می شود که به علت کاهش فاصله هوایی بین فلز و دیواره قالب است. همچنین شیب نمودارها در ریخته گری کوبشی از ریخته گری ثقلی بیشتر است. مشخص است که سرعت سرد شدن برای نمونه های تولید شده به روش ریخته گری کوبشی بیشتر است.

شکل ۱۷ گرادیان دمایی محاسبه شده برای فرایند ریخته گری کوبشی و ریخته گری ثقلی به عنوان تابعی از زمان پس از شروع انجماد در مقطع میانی با ضخامت های ۱۰ و ۲۰ میلیمتر نشان می دهد. منظور از این گرادیان دمایی اختلاف بین دمای مرکز و لبه نمونه می باشد. گرادیان دمایی برای هر دو نوع فرایند ابتدا به شدت افزایش می یابد و سپس به سرعت کاهش می یابد. سرعت سرد شدن با ازاد شدن گرمای نهان ذوب کاهش می یابد. کاهش گرادیان دمایی نیز به علت ازاد شدن گرمای نهان ذوب است. وقتی ازاد شدن گرمای نهان ذوب پایان یافت گرادیان دمایی دوباره افزایش می یابد. افزایش گرادیان دمایی به معنای افزایش یافتن جریان حرارت به بیرون است. با توجه به شکل ۱۷ مشخص است در فرایند ریخته گری کوبشی ماکزیمم گرادیان دمایی بیشتر از ریخته گری ثقلی است و همچنین مدت زمان لازم برای رسیدن به این گرادیان دمایی نیز کمتر است.

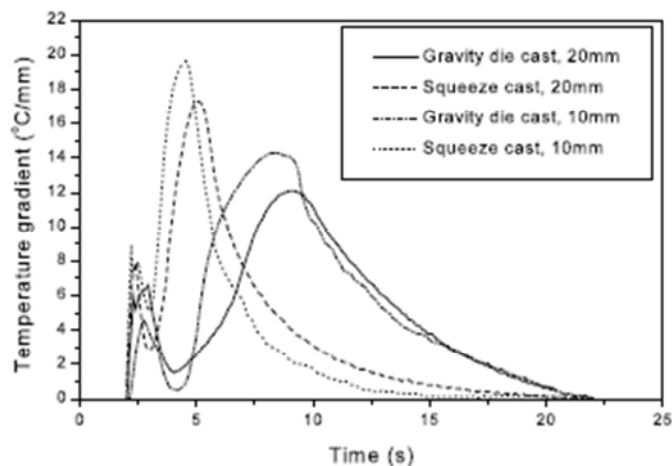
در مورد ریخته گری ثقلی با ضخامت ۲۰ میلیمتر در مقطع میانی گرادیان دمایی در طول انجماد نسبتاً کم بود و به ماکزیمم 12 C/mm و بعد از آن به 0.5 C/mm در ۲۰ ثانیه رسید. در مورد قطعه با مقطع میانی 10 mm گرادیان دمایی کمی افزایش یافت و به ماکزیمم $14/3 \text{ C/mm}$ رسید و پس از آن به 0.2 C/mm کاهش یافت. در مورد ریخته گری کوبشی و برای قطعه با مقطع میانی 20 mm گرادیان دمایی به ماکزیمم $17/2 \text{ C/mm}$ رسید که در مقایسه با ماکزیمم گرادین دمایی در ریخته گری ثقلی افزایش قابل توجهی است. در مورد قطعه ریخته گری با مقطع میانی 10 mm گرادیان دمایی به ماکزیمم $19/6 \text{ C/mm}$ رسید. [3]



شکل ۱۵- شماتیک قطعات تولید شده. نقطه های محل های قرار گیری ترموکوپل ها هستند



شکل ۱۶- نمودارهای سرد شدن محاسبه شده و اندازه گیری شده برای الیاز ۵۰۸۳. a و b مربوط به ریخته گری ثقیلی. c و d مربوط به ریخته گری کوبشی



شکل ۱۷- گرادیان دمایی محاسبه شده در مقطع پایانی برای ریخته گری کوبشی و ثقلی

حفرات گازی و انقباضی

رسوب گاز یکی از مهمترین مسائل ایجاد شده در حین فرایند ریخته گری است. از این رو بررسی مکانیزمی که می تواند به وجود آمدن تخلخل را به وسیله آن کنترل کرد ضروری است. در طول فرایند های ریخته گری فلز به مدت طولانی با اتمسفر در ارتباط است که معمولاً اتمسفر هواست. اکسیژن و نیتروژن ممکن است در بعضی موارد در مذاب حل شوند. چون هوا دارای بخار آب هم هست باید نیتروژن را نیز به حساب آورد. دیگر منابع تولید گاز می توانند واکنش های شیمیایی بین مذاب و ماده قالب و یا رطوبت ناشی از قالب باشند.

حلالیت گاز در مایع بسیار بیشتر از فاز جامد است. دما، فشار، و ترکیب مذاب می توانند بر روی این حلالیت تاثیر بگذارند. وقتی مذاب شروع به انجماد می کند گاز شروع به تغلیظ شدن در مذاب می کند. وقتی حلالیت به میزان اشباع مذاب رسد یکی از این دو حالت اتفاق می افتد. در غیاب جوانه های چگال شده مناسب اگر فرایند انجماد سریعتر از زمان لازم برای رسیدن به تعادل بین گاز حل شده و گاز جدا شده از مذاب انجام شود یک محلول فوق اشباع حاصل می شود و رسوب گاز انجام نمی شود. در شرایط مخالف تخلخل های گازی درون مذاب جوانه زنی کرده و رشد می کنند.

فشار درون تخلخل از معادله ۱۲ تعیین می شود

$$P_{gas} = P_{atm} + P_h + 2 \frac{\sigma}{r} \quad (12)$$

در این رابطه P_{atm} فشار اعمالی از طرف خارج، P_h فشار هیدرواستاتیک، r شعاع تخلخل و σ انرژی سطحی می باشد. فشار هیدرواستاتیک فشاری است که از طرف وزن مذاب به گاز وارد می شود و به محل قرارگیری تخلخل از سطح بستگی دارد. این فشار با توجه به شکل ۱۸ از رابطه ۱۳ به دست می آید.

$$P = \rho gh \quad (13)$$

معادله ۱۲ شرایط ضروری و نه کافی را برای رسوب گاز بیان می کند. رسوب گاز یک فرایند پیچیده است که به فاکتور های زیادی مثل غلظت گازهای حل شده در مذاب، غلظت اشباع گاز در الیاز، ترکیب الیاز، سرعت واکنش شیمیایی، سرعت نفوذ گاز در فاز مایع و جامد، تنش سطحی مذاب و ... بستگی دارد.

تفاوت در حلالیت گاز در فاز مایع و جامد دلیل اصلی رسوب گاز در حین انجماد است. حلالیت گاز در یک مذاب فلزی وابسته به فشار جزئی آن در محیط احاطه شده است. بیشتر گاز ها در دمای اتاق به صورت دو اتمی هستند. در دماهای بالا (دمای مذاب فلز) تجزیه گاز G_2 در سطح فلز با حضور اتم های فلزی M اتفاق می افتد.

$$M + G_2 = M + 2G$$

یک تعادل شیمیایی بین گاز های اتمی حل شده در مذاب یا جامد و گاز های راسب شده برقرار است. بر اساس قانون تعادل می توان نوشت:

$$[G]^2 / P_{G_2} = \text{Const} \quad (14)$$

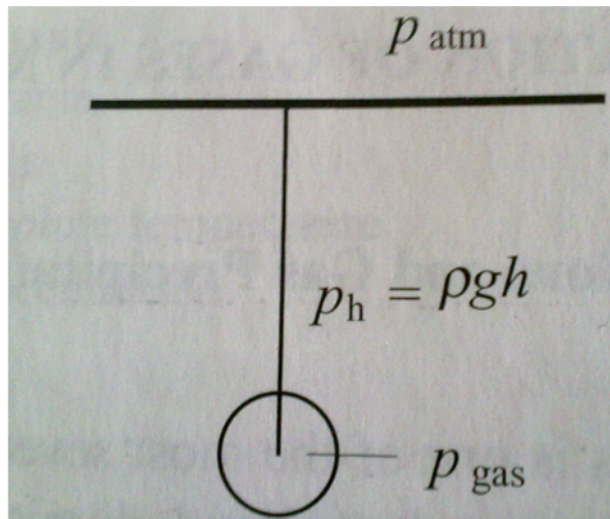
اتم گازی سپس در مذاب یا جامد نفوذ کرده و به شکل محلول در آن باقی می ماند. غلظت گاز در محلول با $[G]$ مشخص شده است. خط کشیده شده نشان می دهد که گاز به صورت اتمی است نه به صورت ملکولی. با توجه به رابطه ۱۴ می توان گفت در تعادل غلظت گاز های حل شده در جامد و مذاب متناسب است با جذر فشار جزئی گاز های ملکولی راسب شده. رابطه ۱۴ را می توان به شکل زیر نوشت:

$$[G]^2 = \text{Const} \times (p_{G_2})^{1/2} \quad (15)$$

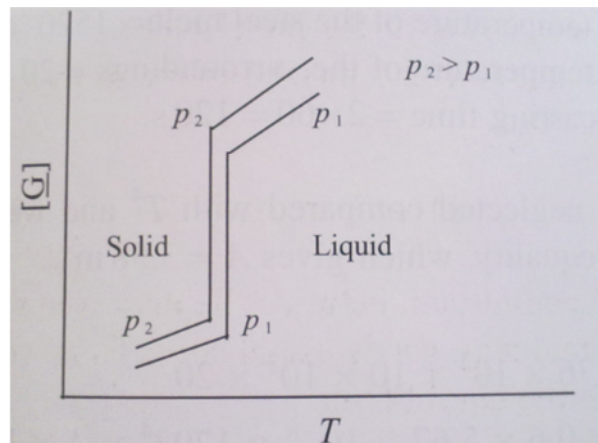
رابطه بالا به قانون سیورت معروف است. قانون سیورت برای محاسبه حلالیت گازها در شرایطی که فشار یک اتمسفر نباشد بسیار مناسب است. با فرض اینکه گاز درون حفره از یک نوع باشد در تعادل با گاز حل شده در جامد

یا مایع P_{gas} فشار گازی است که می توان در معادله سیورت قرار داد. با توجه به این رابطه مشخص است که هرچه فشار گاز درون تخلخل بیشتر باشد، میزان حل شدن گاز در مذاب یا جامد بیشتر می شود. فشار گاز درون تخلخل بر اساس رابطه ۱۲ به فشار بیرونی وابسته است. با افزایش فشار بیرونی، فشار گاز درون تخلخل افزایش می یابد و در نتیجه حلالیت گاز در مذاب و جامد بیشتر می شود. بنابراین افزایش فشار باعث کاهش میزان گازهای راسب شده و در نتیجه باعث کاهش خلخل های گازی می شود.

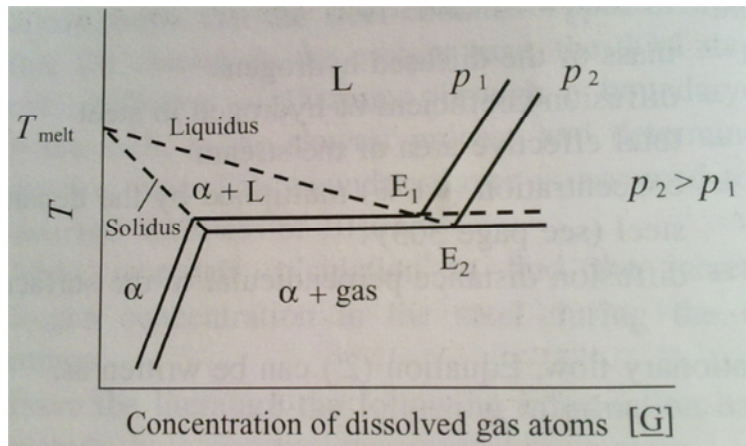
شکل ۱۹ یک شکل کلی از حلالیت گاز در یک ماده خالص بر حسب دما را نشان می دهد. مشخص است که حلالیت گاز در فاز مذاب بسیار بیشتر از فاز جامد است. همچنین حلالیت گاز با افزایش دما در جامد و مذاب افزایش می یابد. در شکل ۲۰ دیاگرام فازی فلز گاز را مشاهده می کنیم که در آن تاثیر فشار بر حلالیت گاز در فلز مشهود است. [8]



شکل ۱۸- تخلخل درون مذاب با فاصله h از سطح



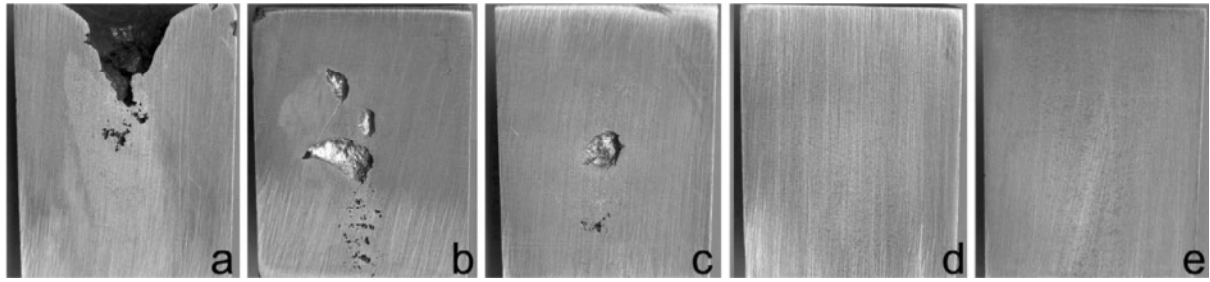
شکل ۱۹- حلالیت گاز در یک فلز بر حسب دما برای وقتی که حل شدن گرماگیر است



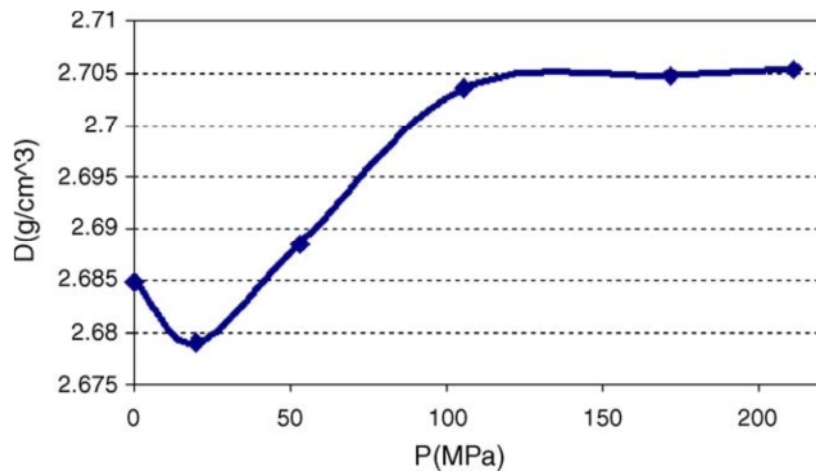
شکل ۲۰- دیاگرام فازی سیستم فلز - گاز

با شروع انجماد به علت تفاوت در چگالی جامد و مایع در جامد شاهد انقباض خواهیم بود. با رشد دندریت های جامد و پیوستن مذاب به جامد و انقباض ناشی از آن مناطق بین دندریتی از مذاب خالی می شوند و در صورتی که مذاب باقیمانده نتواند فضای خالی ناشی از انقباض را پر کند در قطعه نهایی شاهد حفرات انقباضی خواهیم بود. مذاب باقی مانده برای اینکه بتواند این فضای خالی را پر کند باید از سیالیت کافی برخوردار باشد. در فرایند ریخته گری کوبشی سیالیت مذاب اهمیت چندانی ندارد و فضاهای خالی ناشی از انقباض در حین انجماد به واسطه فشار اعمالی بر روی مذاب که باعث می شود مذاب وارد تمام نقاط خالی شود، پر می شوند. به همین علت در ساختار قطعات ریخته شده به روش ریخته گری کوبشی شاهد حضور کمترین میزان تخلخل هستیم.

شکل ۲۱ تاثیر فشار اعمالی را بر میزان حفرات انقباضی در ریخته گری کوبشی برای الیاژ LM13 نشان می دهد. شکل ۲۲ تاثیر فشار اعمالی بر دانسیته نمونه های ریخته گری همین الیاژ را نشان می دهد. انتظار می رود با افزایش فشار باعث افزایش پیوسته دانسیته شود ولی با این وجود یک افت در چگالی در فشار حدود 20 Mpa مشاهده می شود. شکل a ۲۱ شکل کلی انقباض را برای نمونه ای که در فشار اتمسفر ریخته گری شده است را نشان می دهد که در آن انقباض در سطح بالایی قطعه متمرکز شده است و جزیی از حفرات داخلی قطعه در نظر گرفته نمی شود. از شکل های b و c ۲۱ مشخص است که با اعمال فشار خارجی چنین حفرات انقباضی متمرکزی به داخل قطعه وارد می شوند. اگر فشار اعمالی به اندازه ای بزرگ باشد که نتواند چنین حفراتی را حذف کند دانسیته های کمتری را برای قطعات شاهد هستیم. با افزایش فشار اعمالی میزان حفرات گازی و انقباضی کاهش می یابد و به سمت صفر می رود (شکل های e و d ۳) و دانسیته به سمت مقدار تئوری خود میل میکند. [5]



شکل ۲۱- تاثیر فشار خارجی بر اندازه و موقعیت حفرات انقباضی در ریخته گری کوبشی الیاز LM13 . (a) 0 Mpa (b) 20 Mpa (c) 53 Mpa (d) 106 Mpa (e) 171 Mpa



شکل ۲۲- تاثیر فشار بر دانسیته قطعات تولیدی به روش ریخته گری کوبشی الیاز LM13

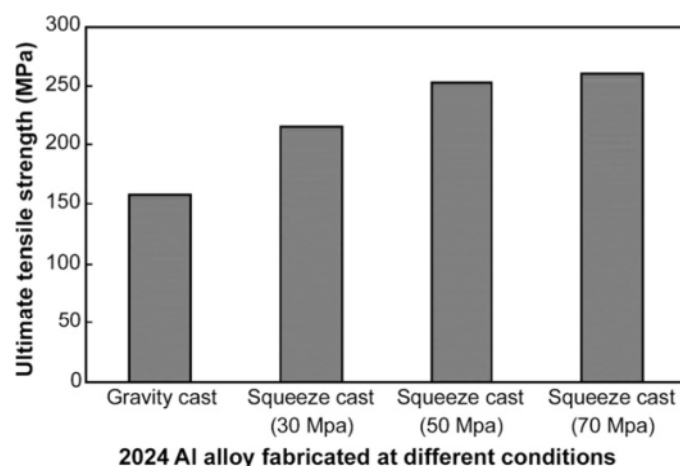
تاثیر اعمال فشار بر خواص مکانیکی

اعمال فشار در ریخته گری کوبشی به دو طریق می تواند باعث بهبود خواص مکانیکی قطعات شود. اولاً باعث افزایش سرعت سرد شدن و در نتیجه ریز دانگی می شود و ثانیاً از به وجود آمدن حفرات گازی و انقباضی در قطعات جلوگیری می کند.

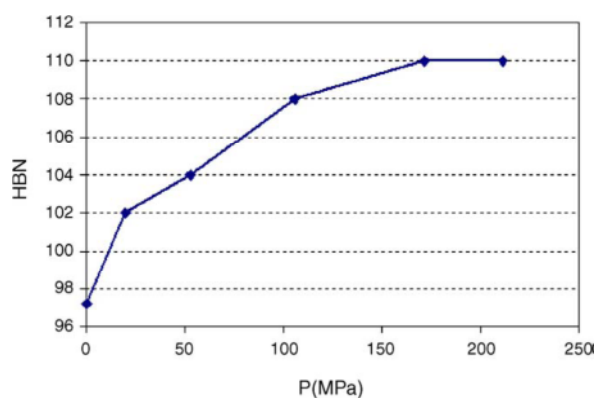
شکل ۲۳ یک نمودار میله ای که نشان دهنده UTS برای قطعات ریخته گری به روش ریخته گری ثقی و ریخته گری کوبشی برای الیاز ۲۰۲۴ آلومینیوم است را نشان می دهد. با توجه به شکل نمونه ثقی کمترین UTS را بین نمونه ها دارد. نتایج اندازه گیری چگالی نشان می دهد که این نمونه دارای ۷٪ تخلخل است. استحکام کم نمونه ریخته گری ثقی می تواند ناشی از کسر حجمی بالای تخلخل ها ناشی از برد بلند انجماد و سیالیت پایین مذاب بین دندریتی باشد.

افزایش استحکام با افزایش فشار تا ۵۰ MPa می تواند به علت حذف میکرو تخلخل ها باشد. استحکام کششی بالاتر با افزایش فشار تا ۷۰ MPa می تواند مربوط به اندازه دانه کوچکتر و فاصله کمتر بازوهای بین دندریتی، به علت افزایش نرخ سرد شدن باشد.

شکل ۲۴ نمودار سختی بر حسب فشار اعمالی را برای یک الیاژ LM13 نشان می دهد. سختی نمونه ها با افزایش فشار از ۹۷HBN در فشار صفر تا ۱۱۰HBN در فشار ۱۷۱ MPa به طور پیوسته افزایش می یابد و با اعمال فشار بیشتر ثابت می ماند. شیب نمودار در فشار های کم، تند تر و با اعمال فشاری بیش از ۱۰۰ MPa شیب کمتر می شود. این امر به علت افزایش ناگهانی سرعت سرد شدن به علت بهتر شدن تماس بین فلز منجمد شده و دیواره قالب است. از این شکل می توان این نتیجه را نیز گرفت که در فشار ۱۰۰ MPa تماس کامل بین فلز و دیواره قالب برقرار است. [9]



شکل ۲۳- UTS برای نمونه های آلومینیوم ۲۰۲۴ در شرایط مختلف تولید



شکل ۲۴- تاثیر فشار اعمالی بر سختی الیاژ LM13 تولید شده به روش ریخته گری کوبشی

نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر اعمال فشار بر رفتار انجمادی و خواص الیاز های الومینیوم ریخته‌گری تولید شده به روش ریخته‌گری کوبشی مورد بررسی قرار گرفت.

سرعت سرد شدن در فرایند ریخته‌گری کوبشی بالاتر از فرایند های معمول ریخته‌گری است. با اعمال فشار از گسترش فاصله هوایی بین فلز و دیواره قالب جلوگیری می‌شود و در مواردی نیز این فاصله حذف می‌شود. حذف این فاصله باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود.

خواص مکانیکی قطعات تولید شده به روش ریخته‌گری کوبشی بهتر از خواص قطعات تولید شده به روش های معمول ریخته‌گری بود. ارتقاء خواص مکانیکی ناشی از ساختار ریزتر قطعات ریخته‌گری کوبشی به دلیل افزایش سرعت سرد شدن و همچنین حذف تخلخل ها از ساختار نهایی بود.

قطعات تولیدی به روش ریخته‌گری کوبشی عاری از حفرات گازی مشاهده شدند که به دلیل افزایش حلالیت گاز در فلز و مذاب با افزایش فشار بود. همچنین حفرات انقباضی در قطعات مشاهده نشد که به علت جاری شدن سیال باقیمانده در فضاهای خالی بین دندریتی در اثر اعمال فشار بالا بود. به این روش می‌توان قطعاتی با چگالی نزدیک به مقدار نظری تولید کرد.

- [1] M.R. Ghomashchi, A. Vikhrov, " Squeeze casting: an overview ", Journal of Materials Processing Technology, 101, (2000), 1-9
- [2] ASM HandBook, Vol 15, Casting
- [3] J.H. Lee , H.S. Kim , C.W. Wona, B. Cantor, " Effect of the gap distance on the cooling behavior and the microstructure of indirect squeeze cast and gravity die cast 5083 wrought Al alloy ", Materials Science and Engineering, A338, (2002), 182-190
- [4] G.J.davis, Solidification and Casting
- [5] A. Maleki, B. Niroumand , A. Shafyei , Effects of squeeze casting parameters on density macrostructure and hardness of LM13 alloy, Materials Science and Engineering A 428 (2006) 135–140
- [6] L.J. Yang , "The effect of solidification time in squeeze casting of aluminium and zinc alloys", Journal of Materials Processing Technology, 192–193 , (2007) , 114–120
- [7] Himadri Chattopadhyay, "Simulation of transport processes in squeeze casting", Journal of Materials Processing Technology, 186, (2007), 174–178
- [8] H.Fredrikson and U.Akerlind, Materials Processing During Casting
- [9] E. Hajjari , M. Divandari , "An investigation on the microstructure and tensile properties of direct squeeze cast and gravity die cast 2024 wrought Al alloy ", Materials and Design, 29, (2008), 1685–1689