Journal of Industry Parts Manufacturers
https://ghs.science-journals.ir
E ISSN: 2717-2767

مجله قطعه سازان صنعت
http://science-journals.ir
شاپا الکترونیکی: ۲۷۶۷-۲۷۱۷

مروری بر ریخته گری کوبشی و بررسی تاثیر این فرآیند و پارامترهای آن بر آلیاژهای پایه آلومینیوم

سورن کشکولی

چکیده

این مقاله به بررسی ریخته گری کوبشی و ابعاد مختلف آن از جمله : منشاء و پیشرفت های آن، انواع روش های این فرآیند و دستگاه های آن ها، برخی پارامترهای کلیدی، ویژگی های متالورژیکی نظیر تخلخل، تبلور مجدد، بهسازی، خواص مکانیکی قطعات تولید شده، مکانیزم فرآیندهای مختلف و در نهایت مزیات و نقاط ضعف این فرآیند می پردازد.

کلمات کلیدی: ریخته گری کوبشی، آلیاژ، آلومینیوم

سال ۳، شماره ۱، (پیاپی: ۹)، بهار ۱۴۰۱، صفحه از ۱ تا ۱۵

Journal of Industry Parts Manufacturers
https://ghs.science-journals.ir
E ISSN: 2717-2767
مجله قطعه سازان صنعت
http://science-journals.ir
شاپا الکترونیکی: ۲۷۶۷-۲۷۱۷

مقدمه

ریخته گری اقتصادی ترین و مقرون به صرفه ترین روش برای تبدیل مواد خام به قطعات و اجزاء قابل استفاده است. با این حال یکی از مشکلات بزرگ و اساسی در روشهای مرسوم سنتی یا حتی روشهای پیشرفته ریخته گری مانند ریخته گری تحت فشار بالا، بوجود آمدن و تشکیل عیوبی مانند تخلخل می باشد.به علاوه عیوب جدایش و پارگی گرم و بسیاری عیوب دیگر ، می تواند عامل ایجاد کننده ترک در طول سرویس دهی ثطعه باشند. به همین دلیل روشهای جدید ریخته گری برای از میان برداشتن این عیوب بوجود آمده و توسعه یافته اند که از این میان ریخته گری کوبشی (Squeeze Casting که از این پس به صورت S.C معرفی می شود) امتیاز و برتری بیشتری جهت تولید قطعات با عیوب کمتر دارد.[1]

ریخته گری کوبشی اصطلاحی عمومی جهت مشخص کردن نوعی تکنیک ریخته گری است که در آنانجماد تحت فشار بالا و در یک قالب چند بار مصرف انجام می شود. یک فرآیند شکل دهی فلزات است که ریخته گری در قالب دائمی را با فورجینگ در قالب ترکیب کرده است و به یک روش واحد تبدیل کرده است. که در آن فلز مذاب تحت فشار هیدرو استاتیک منجمد می شود. اگر چه این روش با این نام پذیرفته شده است، اما گاهی آن را Extrusion Casting (ریخته گری اکستروژنی) ، Liquid Pressing (فشارش حالیت مایع) ، Pressure Crystallization (تبلور تحت فشار) ، Squeeze Forming (شکل دهی کوبشی) هم نامیده می شود. این ایده اولین بار توسط چرنف (chernov) در سال ۱۸۷۸ مطرح شد ، که اعمال فشار بخار بر روی مذاب در حال انجماد را مطرح کرد. اما بر خلاف اینکه این روش مدت ها قبل ابداء شد، تنها در سالهای اخیر و آن هم در اروپا و ژاپن به صورت گسترده و صنعتی مورد استفاده قرار گرفت. این روش بیشتر برای تولید قطعات مهندسی با یکپارچگی بالا و یا بدون تقویت استفاده می شده است. هارتلی روشی را ابداء کرد که در آن یک سری قالب رو میز دستگاه پرس قرارمی گیرد و پیش گرم می شود و سپس مقدار دقیق مذاب مورد نیاز درون نیمه پایینی قالب ریخته می شود. سپس دستگاه پرس بسته می شود و آلیاژ تمامی حفرات قالب را پر می کند و تا انجماد کامل فشار حفظ می شود (فشاری معادل ۳۱ الی ۱۰۸ مگا پاسکال) . از آنجایی که این قطعات تولید شده، آماده برای استفاده در کار هستند، و با یک کار جزئی پس از ساخت آماده برای استفاده می شوند، ریخته گری کوبشی همچنین یک روش برای تولید قطعات خالص یا تقریبا خالص و کامل استفاده می شود.[۱]

هم زمان با تجاری شدن این روش، موسسات و تحقیقات فراوانی در سراسر جهان به صورت فعالانه روی پیشرفتهای این روش به عنوان یک روش تولید، کار می کنند. که این امر بواسطه مقالات علمی بسیاری که در رابطه با این روش در ژورنالهای مختلف به چاپ رسیده است اثبات می شود. این مقالات بشتر در ارتباط با آلیاژهای پایه آلومینیوم و منیزیم ، با تاکید بر کامپوزیت های زمینه فلزی (MMC) می باشند. بر اساس اطلاعات موجود(طبق منابع در دسترس مقالات رفرنس و تا سال ۲۰۰۸) این روش مورد توجه ترین روش برای تولید کامپوزیت های زمینه فلزی می باشد. نرخ رشد سالانه ۱۵٪ این کامپوزیتها در صنایع هوا فضا، خودرو، ورزش، گردشگری و ... نشان روشنی از استفاده بهتر از این روشهای پیشرفته ساخت مانند S.C است.[۱]

به طور کلی قطعات مهندسی تولید شده به روش S.C، ریزدانه، با تمام کاری سطحی عالی بوده و تقریبا هیچ گونه تخلخلی در آنها موجود نیست. این قطعات دارای شکل و اندازه های متفاوتی هستند. خواص مکانیکی این قطعات نسبت به قطعات تولید شده از روشهای دیگر به طور قابل توجهی بهبود یافته است.با توجه به منابع در دسترس، بررسی ها نشان از بهبود ۱۵–۱۰ ٪ استحکام تسلیم، افزایش طول و استحکام خستگی تا حدود ۸۰–۵۰ ٪ دارد. دقت ابعادی آنها مشابه نمونه های دیگر بوده (تغییر محسوس و قابل توجهی نشان نمی دهد)، همچنین عنوان می شود که قطعات تولید شده به روش S.C قابلیت جوشکاری و عملیات حرارتی بهتری دارند. به علاوه، از آنجایی که S.C ممکن است بدون سیستم تغذیه، راهگاه و یا واحدهای جبران انقباض اعمال شود، راندمان کاری نسبت به

روشهای دیگر بالاست و تقریبا قراضه ای برای بازیافت ندارد. و در نهایت بر خلاف فورجینگ، قطعات تولید شده به روش S.C در یک عملیات تک مرحله ای و با انرژی مصرفی کمتری تولید می شوند[۱]

۲. طرح کلی فرآیند

فرآیند S.C شامل مراحل زیر است :

۱. مقدار مشخص و از پیش تعیین شده فلز مذاب درون محفظه خالی قالب پیش گرم شده که در کف دستگاه پرس هیدرولیک قرار گرفته است ریخته می شود.
۲. دستگاه پرس جهت بستن فضای بالای قالب و اعمال فشار بر روی فلز مذاب فعال می شود.
۳. فشار تا انجماد کامل بر روی فلز حفظ می شود. این امر نه تنها نرخ شار حرارتی را افزایش می دهد، بلکه مهم تر اینکه ممکن است تخلخل های ماکروسکوپی و میکروسکوپی را از بین ببرد. به علاوه ار آنجا که هسته گذاری و تولید تخلخل های گازی وابسته به فشار است، تشکیل تخلخل بواسطه انحلال گازها در فلز مذاب محدود می شود[۱].
۴. در نهایت پرس عقب کشیده می شود و قطعه خارج می شود.

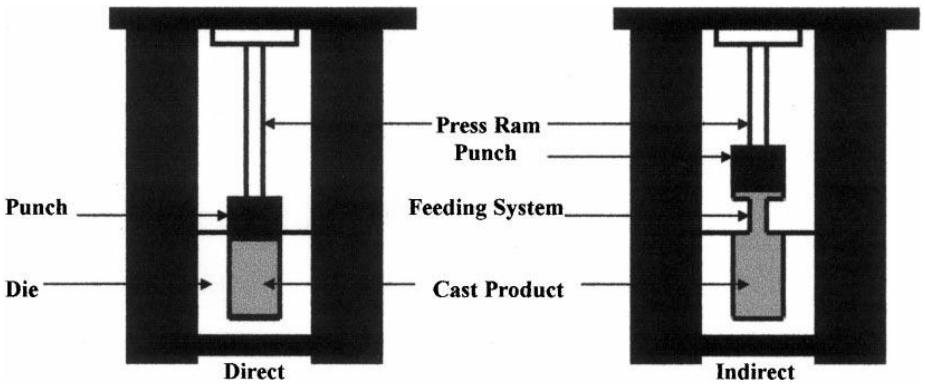
۳. مکانیک فرآیند S.C

3.1 قالب

سخت ترین جنبه کاری در ریخته گری با قالب های دائمی، خود قالب است و از همه مهم تر طراحی قالب شامل انتخاب ماده مناسب برای جنس قالب، فرآیند ساخت، عملیات حرارتی مناسب، و عملیات تعمیر و نگهداری است. قالب های S.C در معرض بار گذاری های سیکلی شدید حرارتی و مکانیکی هستند، که ممکن است باعث ایجاد خستگی حرارتی، ترک، سایش، خوردگی و تضریس شوند. طبیعت و ویژگیهای یک قالب به مقدار زیادی تحت تاثیر همان آلیاژی است که می خواهد ریخته شود. در حال حاضر، فولاد ابزار H13 ماده بسیار پر مصرفی در ساخت این قالب ها است، اما به طور کلی قالب های فلزی باید سختی گرم خوب، مقاومت حرارتی بالا، چقرمگی مناسب، و خصوصا بسیار تمیز و دارای میکروساختار یک شکل باشند[۱].

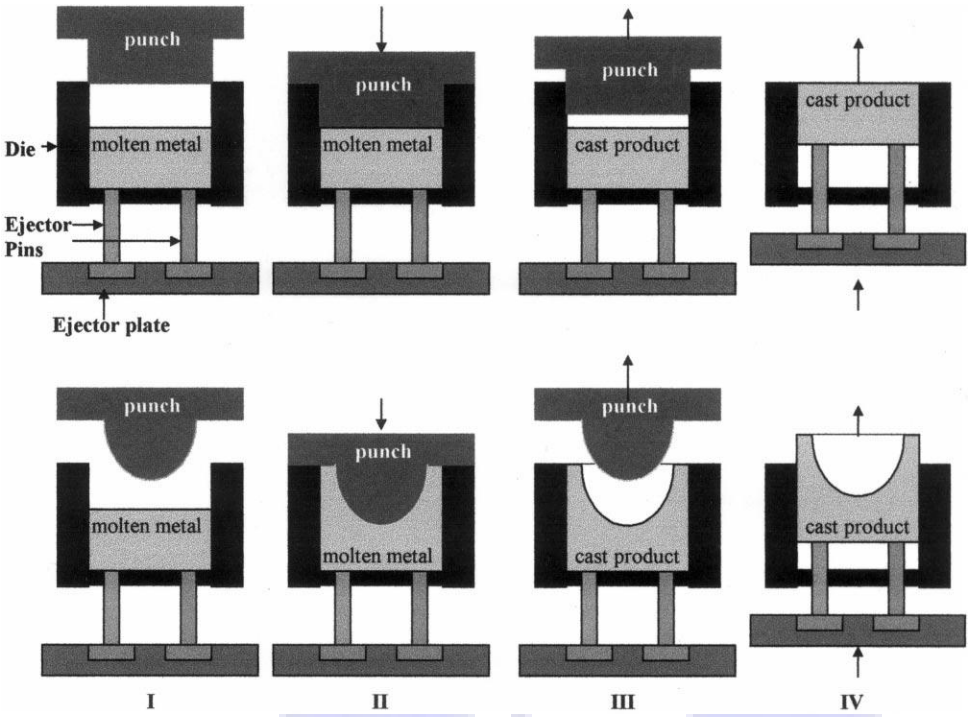
۳,۲ فرآیند ریخته گری : ویژگیهای کلیدی

دو شکل و حالت اصلی فرآیند را می توان بر حسب اینکه فشار به صورت مستقیم به محضول ریخته گری در حال انجماد و از طریق پرس وارد می شود، و یا اینکه فشار از طریق واسطه ای مانند سیستم تغذیه به آن وارد می شود، به دو دسته (i) حالت ریخته گری کوبشی مستقیم (ii) حالت ریخته گری کوبشی غیر مستقیم ، تقسیم می شود که در شکل (۱) هم دیده می شود[۱].



شکل ۱. تصویر شماتیک نشان دهنده ریخته گری کوبشی مستقیم و غیر مستقیم[۱]

برای حالت مستقیم ، دو حالت دیگر می تواند تقسیم بندی شود، بر اساس جابجایی فلز مذاب در اثر حرکت دستگاه پرس[۱] : (i) بدون جابجایی فلز (ii) با جابجایی فلز



شکل ۲. تصویر شماتیک نشان دهنده ۲ نوع مختلف ریخته گری کوبشی مستقیم[۱]

همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، حالت اول برای قطعات و اجزاء شمش مانند مناسب است که در آن جابجایی فلز وجود ندارد، در حالی که حالت دوم شامل حرکت فلز است که به نام فرآیند رو به عقب، وارونه یا Backward Process **هم شناخته می شود، وسیع تر است و می تواند برای ریخته گری محدوده وسیعی از قطعات شکل دار استفاده شود.[۱]**

علاوه بر حالتهای جابجایی مذاب، فرآیند S.C **ممکن است بر اساس ویژگیهای زیر هم طبقه بندی شود[۱]:**

۳,۲,۱ نوع تجهیزات:

ماشین آلات S.C **متفاوتی در نقاط مختلف جهان ساخته شده اند و در حال استفاده هستند. این دستگاهها یا توسط خود محققین ساخته شده اند که به آنها "خانگی" گفته می شود و یا توسط کارخانه های ماشین سازی و بر پایه تولید انبوه ساخته شده اند. ماشین های** S.C **مستقیم ساده هستند، اما ماشین های تولید غیر مستقیم به صورت کلی شامل دسته های زیر می شوند[۱]:**

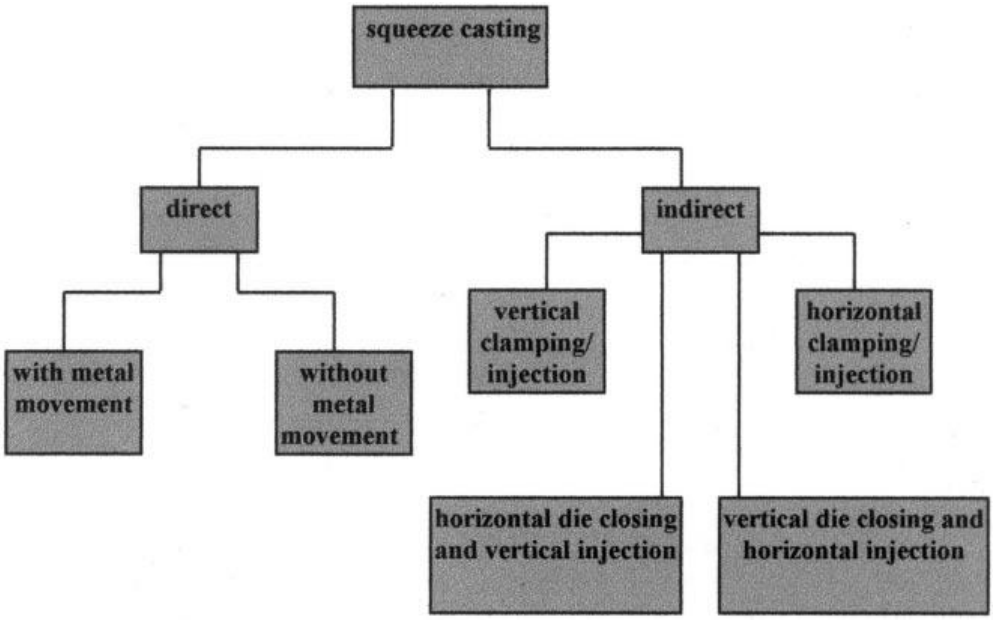
(i) **پرس و تخلیه قطعه به صورت عمودی**
(ii) **پرس و تخلیه قطعه به صورت افقی**
(iii) **پرس افقی و تخلیه عمودی**
(iv) **پرس عمودی و تخلیه افقی**

۳,۲,۲ کاربرد زمان اعمال فشار:

اگرچه S.C **به عنوان اعمال کننده فشار روی آلیاژهای مذاب در نظر گرفته می شود، ممکن است برای شکل دهی به نیمه جامدات هم از آن استفاده شود، لذا یک دسته بندی دیگری به شکل زیر در نظر گرفته می شود [۱]:**

(i) قبل از شروع تبلور

(ii) بعد از شروع تبلور (که ممکن است به عنوان فشارش نیمه جامد هم در نظر گرفته شود، که شکل ۳ حالتهای مختلف S.C را نشان می دهد)



شکل ۳. نمودار دسته بندی انواع مختلف ریخته گری کوبشی[۱]

۳,۳ پارامترهای فرآیند

مهم ترین پارامترهای فرآیند، خود آلیاژ است. ترکیب و مشخصات فیزیکی آلیاژ، به دلیل تاثیر مستقیم آنها بر عمر قالب از اهمیت قابل توجهی برخوردار هستند. این خواص شامل دمای ذوب، هدایت حرارتی آلیاژ به همراه اثر ترکیبی ضریب انتقال حرارت و جوش خوردن به جنس خود قالب است. به علاوه، آلیاژ برخی پارامترهای ریخته گری را مانند دمای قالب را به فرآیند تحمیل می کند، که، آثار مستقیمی روی عمر قالب دارد. بنابراین، S.C برای آلیاژهای با دمای ذوب پایین آلومینیوم و منیزیم انجام می شود.[۱]

علاوه بر ترکیب آلیاژ ریختگی، که محدوده انجماد را تعیین می کند و کیفیت اجزاء نهایی را تعیین می کند، پارامترهای ریخته گری جهت دستیابی به یک ریخته گری بدون عیب باید شدیدا و دقیق کنترل شوند. غالب ترین پارامترهای فرآیند عبارتند از: دمای غالب، دمای ریختن مذاب و فوق گداز، همچنین میزان فشار اعمالی هم مهم می باشد. از آنجایی که فلز تحت فشار ریخته گری می شود، قابلیت ریخته گری ذاتی خود آلیاژ، خیلی کم و یا اصلا مورد توجه نیست. دیگر پارامترهای مهم عبارتند از تمیزی مذاب و عاری بودن از ناخالصی، حرکت مذاب درون قالب که ممکن است منجر به آشفتگی در مذاب شود، غشاء و پوشش قالب، و فاصله زمانی که فشار اعمال می شود که به عنوان "زمان مرده" هم نامیده می شود. دمای قالب معمولا برای آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم بین ۳۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد نگهداری می شیود، در حالی که فشار اعمالی بین ۱۵۰ تا ۵۰ مگا پاسکال تغییر می کند. ماده روانکار اعمال شده روی سطح قالب معمولا از پایه گرافیت است. ضرایب انتقال حرارت، بدلیل اینکه فلز در حال ریخته گری به دیواره های قالب فشار داده می شود، بسیار بالا هستند.[۱]

۴ . پیشینه تئوری : اثر فشار بر روی رفتار انجمادی آلیاژها

کاربرد فشار در حین انجماد، انتظار می رود که ارتباط بین فازها در سیستم آلیاژی را تحت تاثیر قرار دهد، که با محاسبات ترمودینامیکی پیشرفته، تقریبا می توان اثر فشار بر انجماد را به صورت زیر محاسبه کرد :

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

که در آن P_0 و ΔH_f و R مقادیر ثابت هستند، لذا با افزایش فشار ، دما T_f باید افزایش پیدا کند. در یک رویکرد مکانیکی، بدلیل کاهش فاصله بین اتمی، با افزایش فشار و در نتیجه آن محدودیت حرکت اتمها، چنین تغییری در دمای انجماد، که پیش نیاز انجماد/ ذوب است، قابل پیش بینی است. به صورت تجربی برای مذاب خالص دوتایی Al/Si ثابت شده که با فشار ۱۵۰ مگا پاسکال دمای مایع حدود ۹ درجه سانتیگراد افزایش یافته است. به علاوه نقطه یوتکتیک هم به سمت چپ یعنی درصد Si بیشتر حرکت می کند. آثار این تغییرات در دیاگرام فازی، سبب بهبود چشمگیری در میکروساختار و خواص مکانیکی قطعات تولید شده بوسیله روش S.C می شود. طبق تحقیقات انجام شده، بهسازی دانه ها در قطعات S.C کاملا مشهود است. چادویک و یو مطرح کردند که فشار هیچ گونه اثری بر بهسازی دانه ها ندارد و ساختار ریزدانه مشاهده شده در S.C صرفا به دلیل افزایش ضرایب انتقال حرارت است. به عبارت دیگر، نرخ سرمایش بیشتر برای آلیاژهای در حال انجماد که دلیل آن کاهش air gap بین آلیاژ و دیواره قالب است، که نتیجه آن سطح تماس موثر بیشتر خواهد بود. فرانکلین و همکارانش خلاف این مطلب را گزارش کردند، به صورتی که کاربرد فشار موجب ایجاد یک دمای مادون تبرید در آلیاژ فوق گداز می شود مه نتیجه آن افزایش فرکانس هسته زایی و در نتیجه آن ایجاد اندازه دانه ریزتر است.

اما در واقع (و چیزی که اکنون بیشتر مورد قبول است) هر دو نظریه درست است و به طور همزمان وجود دارد، اما در هر لحظه از انجماد ممکن است یکی بر دیگری قالب شود. اندازه air gap بوجود آمده بین آلیاژ در حال انجماد و دیواره قالب، میزان مادون تبرید، دو مساله اصلی برای ساختار ریزدانه، به پارامترهای فرآیندی نظیر، فشار، زمان اعمال فشار، و خواص و ترکیب خود آلیاژ درحال انجماد وابسته می باشند. به طور حتم، اعمال فشار air gap بین دو فلز منجمد شده و قالب فلزی را کاهش داده و سبب افزایش سطح موثر شده و باعث بهبود ضرایب انتقال حرارت می شود، انا این مساله نمی تواند مکانیزم غالب شدن این مطلب باشد.این مطالب در تحقیقات کتین و همکارانش مطرح شده، که در یک مدل سازی عددی برای شبیه سازی جریان و ویژگی های انتقال حرارت فلز مذاب را در طی فرآیند S.C بررسی کرده است. آنها تغییرات کوچکی در خواص ترمو – فیزیکی فلز مذاب را گزارش دادند.[۱]

زمان اعمال فشار بسیار حیاتی و مهم است، چرا که اگر در دمای $T > T_m + \Delta T$ اعمال شود که ΔT در آن میزان افزایش دمای قابل انتظار نسبت به T_m به دلیل اعمال فشار باشد، اثر مادون تبرید ناچیز است و لذا افزایش ضریب انتقال حرارت، مکانیزم غالب باشد. اما اگر فشار در دمای $T_m < T < T_m + \Delta T$ اعمال شود، مادون تبرید مکانیزم غالب خواهد بود. اثر مادون تبرید، حتی اگر فشار در ابتدای تبلور هم اعمال شود، قابل ملاحظه است. یعنی همان $T<T_m$. ترکیب آلیاژ منجمد شونده هم به همین اندازه اهمیت دارد. برای مثال، در مورد آلیاژهای آلومینیوم، حضور عناصری مانند Sr ، P ، Na و یا حتی Ti و B ، می تواند آثار شگرفی در مقیاس میکروساختاری داشته باشد.[۱]

به طور کلی ساختار و ریزدانه و خواص مکانیکی برتر قطعات S.C ، بدلیل فاکتورهای زیر می باشد[۱] :

(i) تغییرات در مادون تبرید آلیاژ ذوب شده

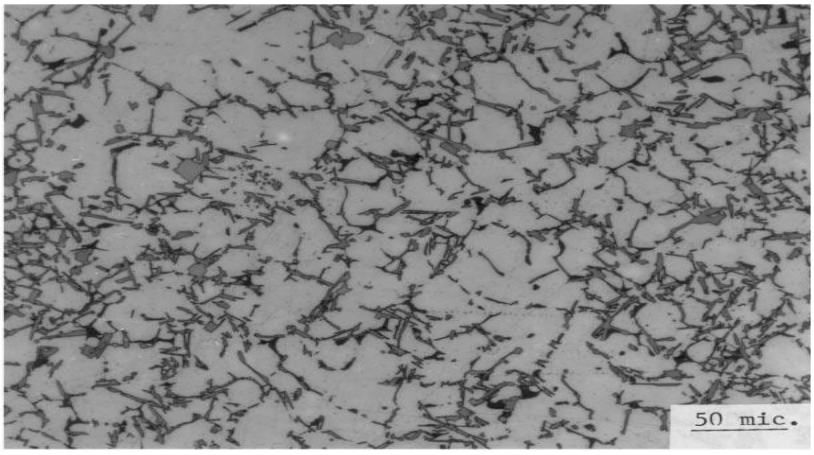
(ii) تغییر در ترکیب و درصد فازهای در حال تشکیل از آلیاژ در حال انجماد

(iii) تغییر در ضریب انتقال حرارت بین قالب فلزی و آلیاژ در حال انحماد

(iv) تغییر در چگالی آلیاژ بدلیل کاهش تخلخل

۱. آلیاژهای S.C : میکروساختار و خواص

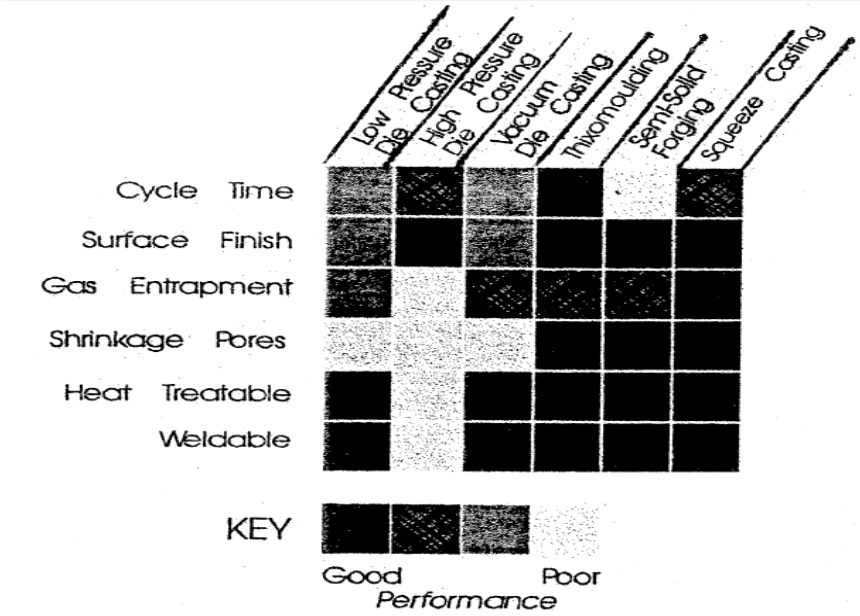
همانگونه که قبلا مطرح شد، قطعات تولید شده به روش S.C در مقایسه با قطعات تولیدی به روش مرسوم و سنتی، خواص مکانیکی برتری دارند مه این امر بدلیل چگالی بیشتر، اندازه دانه کوچک تر و میکرو ساختار همگن می باشد. به علاوه، محدودیت های حرارتی قالب، روش S.C را بیشتر به آلیاژهای سبک و با نقطه ذوب پایین آلومینیوم و منیزیم محدود می کند، اگرچه گزارشاتی مبتنی بر ریخته گری کوبشی آلیاژهای مس، چدن و فولاد هم موجود می باشد[۱]. اعمال فشار تاثیر چشم گیری روی مورفولوژی فازها در آلیاژ S.C دارد. برای مثال با افزایش فشار، گرافیت های ورقه ای، تمایل به فشرده شدن از خود نشان می دهند. یک نمونه از ریز ساختار آلیاژ LM24 در شکل ۶ آورده شده است



شکل ۴. تصویر ساختار آلیاژ ریخته گری شده : (a) ریخته گری کوبشی ، (b) ریخته گری سنتی[۱]

و در نهایت می توان در یک دید کلی، فرآیند S.C و پر مصرف ترین روش های ریخته گری را در یک جمع بندی کلی مورد مقایسه قرار داد، که این نقاط قوت فرآیند S.C در شکل ۵ آمده است. هم چنین با توجه به منابع مطالعه شده می توان این برتری ها را برای این فرآیند قائل شد : خواص مکانیکی برتر، ساختار ریزدانه، کمترین تخلخل، قابلیت عملیات حرارتی، قابلیت جوشکاری، تمام کاری سطحی خوب، بازده تولید بالا، مناسب و کاربردی برای تولیدکامپوزیت، و توانایی تولید آلیاژهای خاص. در میان

کاستی ها و نقاط صعف این روش، نکات زیر بیش از سایرین مشهود اند: سرمایه بالا، کاهش عمر قالب ها، محدودیت در پیچیدگی شکل، محدودیت و سختی در تولید مقاطع باریک، محدودیت در ظرفیت حجمی و وزنی تولید[۱].



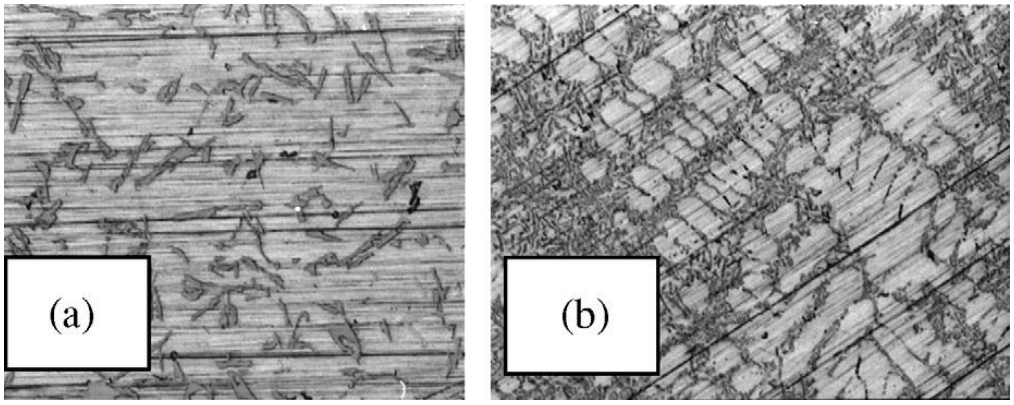
شکل۵. مقایسه فرآیند ریخته گری کوبشی و سایر فرآیندها[۱]

۱. بررسی موضوعی ریخته گری کوبشی و تاثیر برخی پارامترهای آن بر آلیاژهای پایه آلومینیوم

۱,۱ اثر زمان انجماد (Solidification Time)

به صورت کلی (طبق یافته ها) نمونه هایی که از انتهای قالب S.C گرفته شده اند، استحکام کششی بالاتر، مقاومت به ضربه بهتر، و هم چنین چگالی بیشتری داشته اند.

در شکل ۶، ریز ساختار ۲ نمونه ریخته گری شده به روش سنتی و S.C آورده شده است. در مقام مقایسه، ساختار دندریتی ریزتری در محصولات ریخته گری کوبشی مشاهده می شود که این امر مربوط بواسطه نرخ انجماد سریع تر آنها می باشد. لذا، خواص مکانیکی بهتری هم که در قسمت های پایین تر قالب S.C بدست می آیند، می تواند به این دلیل باشد.[۲]



شکل ۶. ریزساختار آلیاژ LM6 ریخته گری شده در دمای ۶۶۰°c : (a) ریخته گری سنتی، (b) ریخته گری کوبشی[۲]

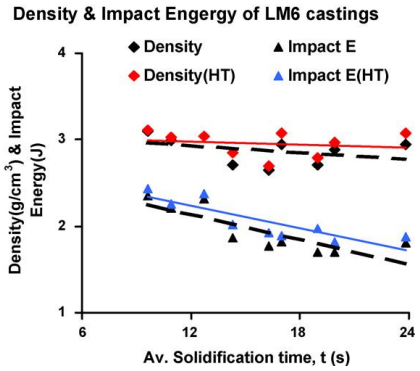
نتایج بدست آمده از شرایط مختلف ریخته گری آلیاژLM6 در جدول شماره ۱. آورده شده است، برای هر نمونه ۳ دمای مختلف و نمونه برداری از بالا و پایین قالب انجام شده است که به تفصیل آن خواهیم پرداخت.

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

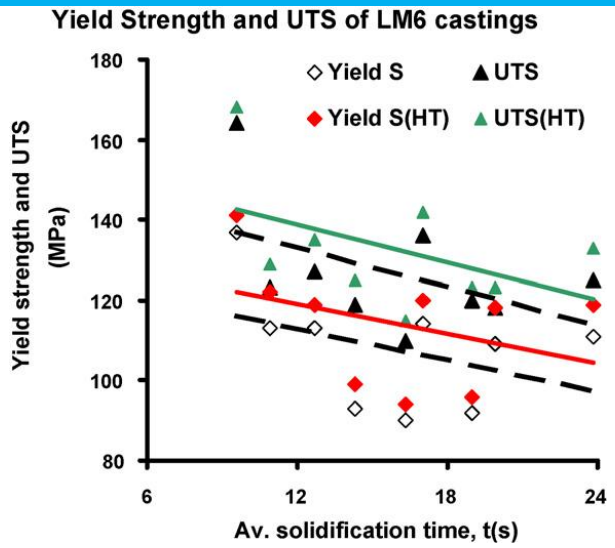
جدول شماره۱. شرایط و زمان انجماد آلیاژ LM6 .[۲]

همانگونه که در جدول شماره۱. مشاهده می شود، زمان انجماد دربخش پایینی نمونه های S.C بسیار کمتر از بخش بالایی قالب و و ریخته گری سنتی می باشد، که همان گونه که پیش تر بررسی شد، این امر به دلیل کاهش air gap و تغییر ضرایب انتقال حرارت می باشد.[۲]

در شکل های ۷و۸ به ترتیب چگالی، انرژی ضربه و استحکام تسلیم و UTS آلیاژ LM6 را بر اساس زمان انجمادهای مختلف می بینیم.



شکل۷. نمودار چگالی و انرژی ضربه بر حسب زمان انجماد آلیاژ LM6 .[۲]



شکل ۸. نمودار استحکام تسلیم و UTS آلیاژ LM6 بر حسب زمان انجماد[۲]

همانگونه که در شکل ۷. مشاهده می شود، طبق اطلاعات بدست آمده از آزمایشات انجام شده روی این آلیاژ، به صورت کلی، می توان مشاهده کرد که خواص بهتر، در زمان های کمتر انجماد بدست آمده اند. خط چین ها، نشان دهنده اطلاعات بدست آمده از نمونه هایی هستند که بعد از ریخته گری مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته اند، و خطوط ممتد، نشان دهنده اطلاعات بدست آمده از نمونه های عملیات حرارتی محلولی و رسوب سختی شده می باشد.[۲]

طبق شکل۸. همچنین مشاهده می شود که با کاهش زمان انجماد، استحکام تسلیم و UTS نمونه ها افزایش یافته، که این امر، در نمونه های عملیات حرارتی شده هم به وضوح قابل مشاهده است.[۲]

نتیجه گیری :

زمان انجماد بدست آمده در قسمت های پایین تر قالب در فرآیند S.C، بسیار کمتر بوده و در حدود ۳۴٪ کمتر از سایر زمانها می باشد. به علاوه اطلاعات بدست آمده حاکی از آن است که چگالی، انرژی شکست، انرژی ضربه، استحکام تسلیم، UTS نمونه های انجمادی، با زمان انجماد آلیاژها نسبت مستقیم دارد. به صورتی که هر چه زمان انجماد کمتر باشد، خواص بهتری برای آلیاژ بدست می آید.

۱,۲ اثر دمای ریخته گری (Casting Temperature)

در این آزمایش از آلیاژ پایه آلومینیوم با ۱۳,۵٪ Si استفاده شده است. جدول ۲. پارامترهای بررسی شده در این آزمایشات را نشان می دهد.

Material type	% above melting temperature	Casting temperature (°C)	Die-preheat temperature (°C)	Pressure (MPa)	Holding time (min)
Al-alloy	+15	660	200–220	62	1
Al-alloy	+20	690	200–220	62	1
Al-alloy	+25	720	200–220	62	1

جدول۲. پارامترهای مربوط به آزمایشات انجام شده[۳]

همانگونه که در جدول ۲. مشاهده می شود، تنها پارامتری که تغییر آن در طول آزمایش بررسی شده دمای ریخته گری می باشد، تا اثر آن بر UTS، انرژی ضربه، چگالی نمونه های تولید شده بوسیله فرآیند S.C بررسی شود.

در جدول ۳. نتایج حاصل از تست های انجام شده بر روی نمونه های تولید شده، اعم از چگالی، خواص مکانیکی و... آورده شده است.

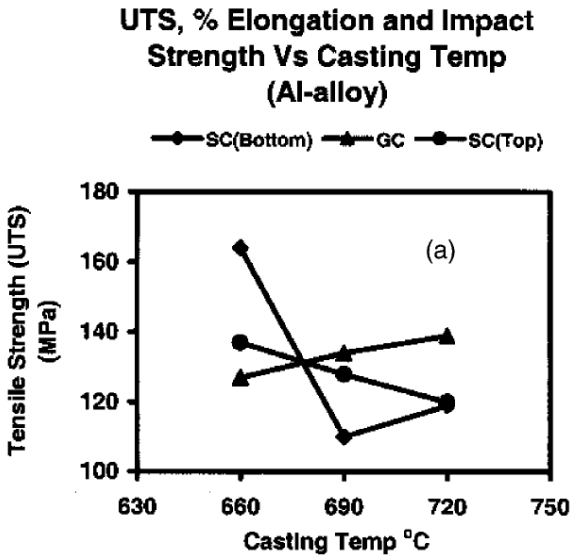
Density, mechanical properties and overall ratings of gravity cast and squeeze cast specimens

Material	Specimen type	Density (g/cm^3)	Yield stress (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	Fracture energy (J)	Impact energy (J)	Overall rating
Al-alloy	Gravity cast 660 °C	2.899	109 (1)	127 (3)	2.3 (2)	1.04 (1)	1.15 (3)	10
	Gravity cast 690 °C	2.830	109 (1)	134 (2)	2.1 (3)	1.04 (1)	1.20 (2)	9
	Gravity cast 720 °C	2.958	122 (2)	139 (1)	3.2 (1)	1.20 (2)	1.30 (1)	7 (best)
	Squeeze cast 660 °C (top)	2.720	93 (3)	137 (1)	3.4 (1)	1.25 (3)	1.32 (3)	11
	Squeeze cast 690 °C (top)	2.609	101 (1)	128 (2)	2.9 (2)	1.52 (1)	1.87 (1)	7 (best)
	Squeeze cast 720 °C (top)	2.691	92 (2)	120 (3)	2.9 (2)	1.43 (2)	1.70 (2)	11
	Squeeze cast 660 °C (bottom)	2.949	122 (1)	164 (1)	3.8 (1)	2.11 (1)	2.35 (1)	5 (best)
	Squeeze cast 690 °C (bottom)	2.875	93 (3)	110 (3)	2.3 (2)	2.01 (2)	2.21 (3)	13
	Squeeze cast 720 °C (bottom)	2.897	109 (2)	119 (2)	1.9 (3)	1.68 (3)	2.32 (3)	12

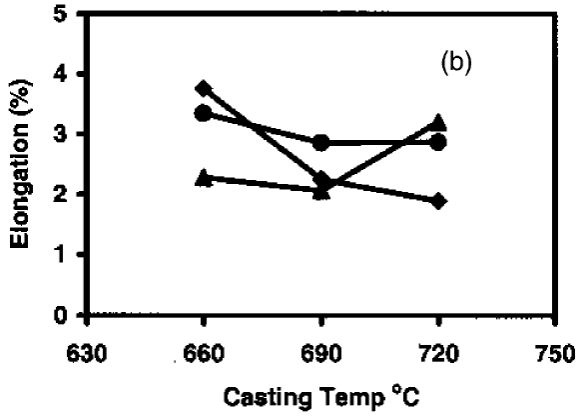
جدول ۳. نتایج تست های انجام شده روی نمونه های تولید شده[۳]

اعداد ۱و۲و۳ نشان دهنده رتبه بندی در خواص بدست آمده است که در این میان ۱ نشان دهنده بهترین، و ۳ نشان دهنده ضعیف ترین نتایج می باشد. بهترین دمای ریخته گری برای فرآیند Gravity Casting $^{\circ}C$ ۷۲۰ و برای فرآیند S.C هم $^{\circ}C$ ۶۹۰ می باشد. که این دما برای بدست آوردن خواص مطلوب مکانیکی در بخش پایینی قالب به $^{\circ}C$ ۶۶۰ کاهش می یابد.[۳]

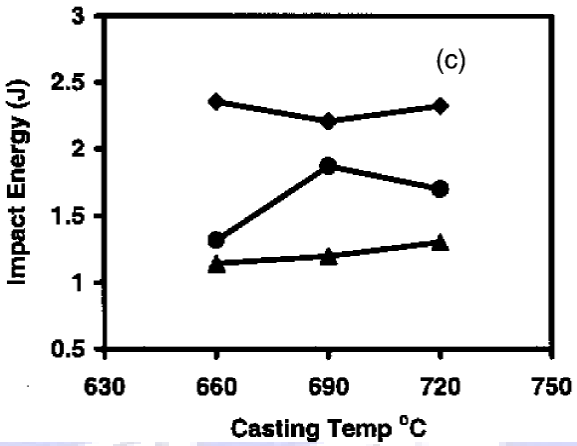
در شکل های ۹، ۱۰و ۱۱ به ترتیب UTS، درصد افزایش طول (Elongation٪) و انرژی ضربه بر حسب دمای ریخته گری رسم شده است.



شکل۹. UTS بر حسب دمای ریخته گری[۳]



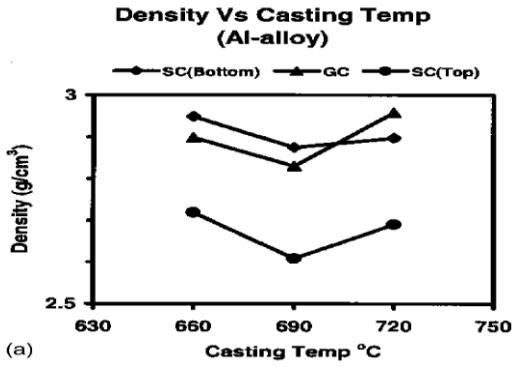
شکل ۱۰. درصد افزایش طول بر حسب دمای ریخته گری[۳]



شکل ۱۱. استحکام ضربه بر حسب دمای ریخته گری[۳]

همانگونه که در شکل های ۹، ۱۰، ۱۱ مشاهده می شود، در دمای ریخته گری ۶۶۰ درجه سانتیگراد، آلیاژ آلومینیوم تحت فرآیند S.C **دارای** UTS **بالاتر، درصد افزایش طول بیشتر و استحکام ضربه بهتری نسبت به نمونه های تولید شده با فرآیند** Gravity Casting **دارد. این در حالی است که، نمونه های تولید شده به روش** Gravity Casting**، در دمای ۷۲۰ درجه سانتیگراد، خواص مطلوب تری نسبت به نمونه های تولید شده در فرآیند** S.C **دارند.[۳]**

در شکل ۱۲. اطلاعات بدست آمده از چگالی نمونه های تولید شده بر حسب دمای ریخته گری نشان داده شده است.



شکل ۱۲. چگالی بر حسب دمای ریخته گری[۳]

بر اساس شکل ۱۲ می توان بیان کرد که، دماهای ۶۶۰ و ۶۹۰ درجه سانتیگراد در چگالی، اختلاف بسیاری با دمای ۷۲۰ درجه سانتیگراد دارند. هم چنین در این دماها، نمونه های تولید شده به روش S.C **و در بخش پایینی قالب، شرایط بهتری نسبت به نمونه های روش** Gravity Casting **و بخش بالایی قالب روش** S.C **دارند[۳].**

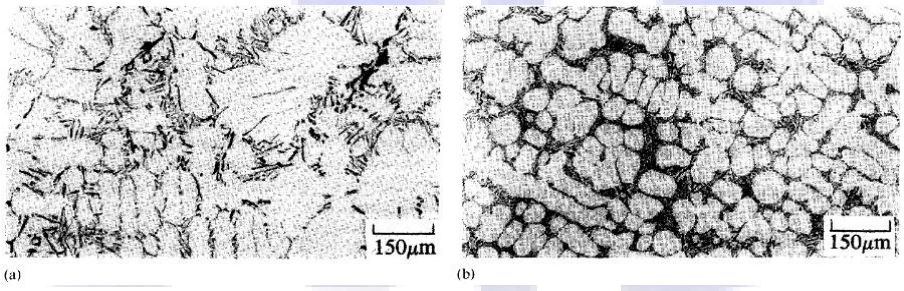
نتیجه گیری:

(i) **دمای ریخته گری، بر خواص مکانیکی هر دو نمونه تولید شده به روش** S.C **و روش** Gravity Casting **آلیاژهای پایه آلومینیوم تاثیر دارد.[۳]**

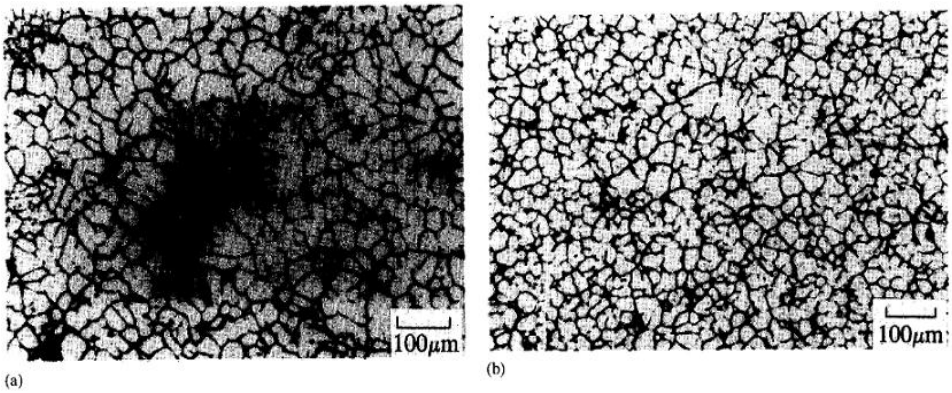
(ii) **بهترین دمای برای ریخته گری آلیاژهای پایه آلومینیوم به روش** Gravity Casting**، ۷۲۰ درجه سانتیگراد و برای روش** S.C **۶۶۰ یا ۶۹۰ درجه سانتیگراد می باشد. که دمای ۶۹۰ برای حصول خواص مطلوب در بخش بالایی قالب و دمای ۶۶۰ برای بدست آوردن خواص مطلوب در قسمت پایینی قالب می باشد.[۳]**

۱,۳ اثر ریخته گری کوبشی بر آلیاژها سبک و کامپوزیت های آنها

ترکیب فشار بالا و قالب فلزی، منجر به ضرایب انتقال حرارت بالا می شود، که این مساله باعث تغییر در میکرو ساختار ماده می شود، که بارزترین شاخصه این تغییر در ضریب انتقال حرارت، ریز شدن ساختار دانه های ماده می شود. شکل های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب میکروساختار آلیاژهای AL-Si7% **و** Al-7010 **را ریخته گری شده تحت فشارهای مختلف را نشان می دهد. هر دو شکل نشان می دهند که در توزیع فاز تغییری ایجاد نشده، بلکه تنها تغییر در ریز شدن دانه ها می باشد.[۴].**



شکل ۱۲. میکروساختار Al-7%Si **: (a)** Gravity Cast**، (b) روش** S.C **مستقیم ، ۱۵۰ مگا پاسکال[۴]**



شکل ۱۳. میکروساختار آلیاژ AL-7010 **: (a)** Gravity Cast **، (b) روش** S.C **مستقیم، ۳۰۰ مگاپاسکال[۴]**

بهبود چشمگیری می توان در اثر تولید با فرآیند S.C **بدست آورد، به ویژه در مورد آلیاژ ارزان** LM24 **که عموما یک آلیاژ غیر قابل عملیات حرارتی در نظر گرفته می شود، هنگامی که با فرآیند** S.C **تولید شوند و کاملا عملیات حرارتی شوند، می توانند خواص مکانیکی بهتری نسبت به آلیاژهای گرانتر** LM25 **و** A357 **بدست آورند.هم چنین با استفاده از روش** S.C**، کریستالهای مضر آلومیناید**

آهن به صورت توده های عظیم ورقی شکل رشد نخواهند کرد و کوچک باقی خواهند ماند و به صورت یک شکل و متناسب در سراسر زمینه پخش خواهند شد. در جدول ۴. برخی خواص مکانیکی آلیاژهای مرسوم تجاری آلومینیوم تولید شده به روشهای مختلف ریخته گری آورده شده است. [۴]

Typical mechanical properties of some commercial Al–Si alloys cast by different techniques

Material		0.2% proof stress (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
LM24	Typical chill cast (as cast)	110	200	2
	Squeeze cast (as cast)	126	233	2.7
	Squeeze cast (T6)[a]	330	368	2
LM25	Typical chill cast (T6)	240	310	3
	Squeeze cast (T6)	274	331	7
A357	Typical chill cast (T6)	248	313	7
	Squeeze cast (T6)	283	347	9

[a]T6 peak-aged condition.

جدول ۴. برخی خواص مکانیکی آلیاژهای Al-Si تجاری تولید شده به روشهای مختلف ریخته گری[۴]

نتیجه گیری :

طی ۱۰ سال گذشته روش S.C ثابت کرده که روش کارآمدی در تولید قطعات با کیفیت بالاست، نظیر قطعات مهندسی، به خصوص در صنعت خودرو .این قطعات برای استفاده در کارهای پر تنش بسیار مناسب می باشند. هم چنین می توان با عملیات حرارتی مناسب، قطعات تولیدی این روش را جایگزین قطعات تولید شده از روشهای دیگر با آلیاژهای گرانقیمت کرد.

۱,۴ اثر فرآیند S.C بر آلیاژهای دوتایی با محدوده انجماد عریض

ریخته گری آلیاژهای با محدوده انجماد عریض، همواره به دلیل تخلخل های ریز بین دندریتی، علاوه بر انقباض معمولی و تخلخل گازی با دشواری همراه بوده است.[۵] در جدول ۵. خلاصه ای از تاثیر فرآیند S.C بر آلیاژهای با محدوده انجماد عریضی را که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته اند، می بینید.

TABLE 1. A brief summary of the effects of squeeze casting on the wide freezing range alloys examined in this study

Alloy (wt.%)	$T_L - T_S$ (°C)	Method	Density (g cm^{-3})	*HB*	σ_{TS} (MPa)	ε_f (%)
Al–20%Si	85	Not squeezed	2.44	69	90	2.5
		Squeezed	2.63	80	113	4.5
Al–7%Si	35	Not squeezed	2.24	35.5	73	3.5
		Squeezed	2.55	42.7	96	7

جدول ۵. خلاصه تاثیر S.C بر خواص آلیاژهای دوتایی با محدوده انجماد عریض[۵]

با مقایسه این دو آلیاژ، در می یابیم کـه اگر چه آلیاژ Al-20% Si محدوده انجمادی عریض تری نسبت به آلیاژ Al-7%Si دارد، اما دارای چگالی بیشتری و هم چنین مقدار کمتری تخلخل در هر دو نمونه معمولی و ریخته گری کوبشی از خود نشان می دهد. به علاوه، فرآیند S.C بهبود قابل توجهی را در ماده به خصوص در زمینه خواص کششی آن بوجود می آورد. که این امر بواسطه کاهش تخلخل

و ریز کردن ساختار فاز قانویه بدست آمده است (این دو آلیاژ دارای ترکیب یوتکتیک بوده، لذا میکروساختار آنها علاوه بر ریز تخلخل ها، حاوی فاز ثانویه هم می باشد). طبق آزمایشات اثبات شده است که میزان تخلخل می تواندبرای تمام آلیاژها تحت فشار ۱۵۰ مگاپاسکال به کمتر از ۱٪ کاهش پیدا کند. البته برای چدن این فشار ۳۰۰ مگاپاسکال است. بهبود خواص در آلیاژ Al-20%Si چندان زیاد نیست، اگر چه، همانگونه که در جدول شماره۵. مشاهده می شود، فشارهای بالای ۱۰۰مگاپاسکال، باعث ایجاد ترک در اطراف محدوده های غنی از Si می شود. به طور کلی، با اعمال فشار، استحکام کششی افزایش یافته و میزان تخلخل نیز کاهش یافته است.[۵]

نتیجه گیری:

آلیاژهای با محدوده انجماد عریض، گزینه های مناسبی برای ریخته گری کوبشی می باشند. این روش در کاهش و از بین بردن تقریبی تخلخل در این دسته از آلیاژها موثر واقع شد. این تغییر در کیفیت ریخته گری سبب بهبود چشم گیری در خواص مکانیکی این آلیاژها شد، در حالی که این بهبود در خواص ماشین کاری این آلیاژها صادق نبود.[۵]

منابع :

[1] M.R. Ghomashchi, A. Vikhrov, Squeeze casting: an overview, Journal of Materials Processing Technology 101 (2000) 1-9
[2] 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
[3] L.J. Yang, The effect of casting temperature on the properties of Squeeze cast aluminum and zinc alloys, Journal of Materials Processing Technology 140 (2003) 391–396
[4] T.m. Yue, G.A. Chadwick, Squeeze casting of light alloys and their composites, Journal of Materials Processing Technology 58 (1996) 302-307
[5] M.a . SAvas, A. altinas, Effects of squeeze casting on the wide freezing range binary alloys, Material Science and Engineering A173 (1993) 227-231

منابع

حسینی علی آباد، سید محمدرضا؛ جعفری پور، فرزاد؛ محمودی، رضا؛ بررسی سیستم های ایمنی و رفاهی خودرو، موسسه آموزشی تالیفی ارشدان، چاپ اول ۱۳۹۹، تهران.