فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
پاییز ۱۳۸۶، شماره‌ی سی و نهم، ص. ۵۳-۵۹

بررسی اثر ارتعاش قالب بر ریزساختار حالت نیمه‌جامد آلیاژ A۱۷۰۷۵ تولید شده به روش سطح شیب‌دار

علی کریمی‌طاهری (استاد)
مجتبی موحدی (دانشجوی دکتری)
هادی نیامنش (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی و علم‌مواد، دانشگاه صنعتی شریف

در سال‌های اخیر، ریخته‌گری و شکل‌دهی آلیاژها در حالت نیمه‌جامد، توجه بسیاری از محققان و صنعتگران را به خود جلب کرده است. ریزساختار مناسب برای فرایندهای نیمه‌جامد، شامل ذرات کروی در زمینه‌یی با نقطه ذوب پایین‌تر است. روش‌های مختلفی برای تولید چنین ریزساختاری وجود دارد، که «سطح شیب‌دار» یکی از این روش‌ها است. در این نوشتار، به‌عنوان یک پژوهش جدید، اثر همزمان زاویه‌ی سطح شیب‌دار و ارتعاش قالب بر ریزساختار حالت نیمه‌جامد آلیاژ A۱۷۰۷۵ بررسی شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که ارتعاش قالب به‌میزان قابل توجهی اندازه‌ی متوسط گلبول‌های این آلیاژ را کاهش می‌دهد. همچنین، با افزایش اندازه کریستال‌های اولیه‌ی ورودی از سطح شیبدار به قالب، اثر ارتعاش قالب افزایش می‌یابد. همچنین، ارتعاش قالب به بهبود فاکتور شکل گلبول‌های آلیاژ A۱۷۰۷۵ پس از حرارت‌دهیِ مجدد منجر می‌شود.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، ریخته‌گری و شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد، توجه ویژه‌ی سازندگان آلیاژهای فلزی را، هم در مراکز تحقیقاتی و هم در صنایع مختلف، به خود جلب کرده است. ریزساختار مناسب در حالت نیمه‌جامد، شامل ذرات غیردندریتی (ریزساختار دارای ذرات کروی) در زمینه‌یی با نقطه ذوب کم‌تر است.[۱] برخورداری از مزایایی همچون بهبود خواص مکانیکی، قابلیت تولید قطعات نزدیک به قطعه‌ی نهایی کاهش نیروی شکل‌دهی، کاهش انقباض، حفره‌ها و جدایش و افزایش عمر قالب‌های مصرفی، افزایش استفاده از این روش را برای تولید قطعات فلزی، به‌ویژه آلیاژهای آلومینیوم که در صنایع هوافضا، نظامی، خودروسازی و رایانه کاربرد دارند سبب شده است.[۱-۶] البته محدودیت‌هایی نیز در استفاده از فرایندهای نیمه‌جامد وجود دارد که از آن جمله می‌توان به هزینه‌ی بالای مواد اولیه و تجهیزات، منابع محدود مواد اولیه، و احتیاج به ریزساختار ویژه (حاوی ذرات کروی) اشاره کرد. انتخاب مواد اولیه در این فرایندها بسیار مهم است. تحقیقات پیشین نشان داده است که مواد اولیه‌ی مورد استفاده در فرایندهای نیمه‌جامد باید از ویژگی‌های خاصی نظیر فاصله‌ی انجمادی مناسب، کسر حجمی جامد مطلوب در دماهای مختلف، و ریزساختار و خواص رئولوژیکی مناسب در حالت نیمه‌جامد برخوردار باشند.[۱-۳، ۷و۸]

به‌طور کلی، فرایند شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد از سه مرحله‌ی اصلی تشکیل شده است: الف) تولید بیلت‌های نیمه‌جامد؛ ب) ذوب مجدد جزیی؛ ج) تیکسو فرمینگ.[۴، ۹، ۱۰] روش‌های مختلفی برای تولید ساختارهای نیمه‌جامد وجود دارد، مانند روش هم‌زدن مکانیکی یا الکترومغناطیسی، روش مذاب فعال شده با کرنش القاء شده (SIMA)، روش ایجاد دانه‌های ریز به‌همراه ذوب مجدد جزیی، و روش سطح شیب‌دار خنک‌کننده.[۱-۳، ۱۱و۱۲]

روش سطح شیب‌دار در مقایسه با روش‌های دیگر، ساده و نسبتاً ارزان است.[۲و۳] این روش، شامل ریخته‌گری آلیاژ در امتداد یک سطح شیب‌دار است که سردشدن مذاب، جوانه‌زنی فاز جامد در مذاب و به هم خوردن مخلوط مذاب ـ جامد حاصل، به‌صورت همزمان در حین حرکت مذاب بر روی سطح شیب‌دار صورت می‌گیرد.[۱۳ و۱۴] نتایج تحقیقات قبلی حاکی از آن است که در ریزساختار بیلت‌های تولید شده به‌وسیله‌ی سطح شیب‌دار، ذرات کروی وجود ندارد. بنابراین برای ایجاد یک ریزساختار با ذرات کروی، بیلت حاصل باید در دمای نیمه‌جامد آلیاژ و برای یک زمان مشخص حرارت داده شود.[۷و۱۱]

تاکنون مشخص شده است که عوامل مختلفی بر ریزساختار بیلت‌های تولید شده به روش سطح شیب‌دار تأثیرگذارند که از جمله‌ی این عوامل می‌توان به دمای بارریزی، طول تماس بین سطح شیب‌دار و مخلوط مذاب ـ جامد، جنس قالب و زاویه‌ی سطح شیب‌دار اشاره کرد.[۲، ۱۱ و۱۵]

آلیاژ A۱۷۰۷۵، پرکاربردترین آلیاژ دارای استحکام بالای آلومینیوم است که در حال حاضر تحقیقات ویژه‌یی به‌منظور بهبود خواص

مکانیکی و فیزیکی آن انجام می‌گیرد.[۱۶] تا آنجا که اطلاع نگارندگان اجازه می‌دهد، تاکنون پژوهشی به‌منظور بررسی ترکیب اثر زاویه‌ی سطح شیب‌دار و ارتعاش قالب بر خواص فیزیکی و مکانیکی این آلیاژ انجام نشده است. بنابراین در این تحقیق برای اولین بار، تأثیر عوامل مذکور بر ریزساختار آلیاژ Al۷۰۷۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. شرح پژوهش

ترکیب شیمیایی آلیاژ Al۷۰۷۵ مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

برای ریخته‌گری نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق از یک سطح شیب‌دار مسی استفاده شد. شکل ۱ تصویر شماتیک این سطح شیب‌دار را نشان می‌دهد. در جدول ۲ نیز مشخصات سطح شیب‌دار و قالب مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است. دمای بارریزی برای تمامی نمونه‌ها ۶۵۵ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. این دما حدوداً ۲۰ درجه‌ی سانتیگراد از دمای لیکوییدوس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بیشتر است.[۱۷]

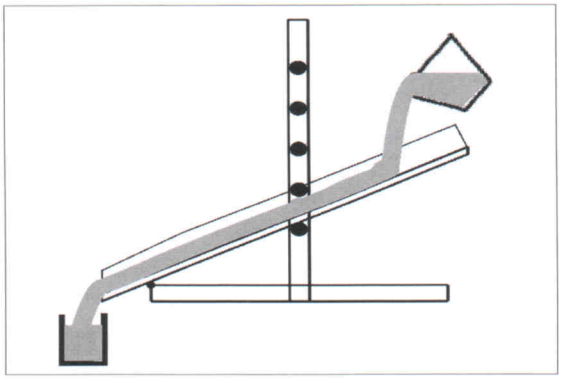
در این پژوهش ۱۰ نمونه بارریزی شد. در تولید پنج نمونه، مذاب از سطح شیب‌دار دارای زوایای ۳۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درجه عبور و وارد قالب ساکن شد؛ و در پنج نمونه‌ی دیگر مذاب پس از عبور از سطح شیبدار وارد قالب مرتعش شد. در بارریزی‌هایی که در قالب مرتعش انجام شد، ارتعاش قالب فلزی با دامنه‌ی $۱۰mm$ و فرکانس تقریبی $۳Hz$، قبل از ورود مخلوط مذاب - جامد به قالب شروع و تا پایان انجماد کامل نمونه ادامه می‌یافت. پس از تولید نمونه‌های یاد شده، به‌منظور انجام عملیات حرارت‌دهی مجدد در حالت نیمه‌جامد، نمونه‌ها به‌مدت ۱۰ و ۳۰ دقیقه در دمای ۶۱۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند و پس از آن در آب با دمای اتاق سرد شدند. مقدار مذاب

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ Al۷۰۷۵ مورد استفاده در پژوهش.

عنصر	Zn	Mg	Cu	Fe	Mn	Cr	Al
Wt.٪±۰٫۰۱	۵٫۰۰	۲٫۰۰	۱٫۵۰	۰٫۲۶	۰٫۱۸	۰٫۱۲	bal

جدول ۲. مشخصات سطح شیب‌دار و قالب مورد استفاده در پژوهش.

سطح شیب‌دار	
ماده	مس
طول	$۳۰۰mm$
زاویه	۳۰° و ۴۵° و ۵۰° و ۵۵° و ۶۰°
قالب	ساکن یا مرتعش
ماده	Mild steel
قطر	$۴۰mm$
ارتفاع	$۵۰mm$
ضخامت	$۳mm$



شکل ۱. تصویر شماتیک سطح شیب‌دار.

جدول ۳. ترکیب شیمیایی محلول.

Keller

اجزای محلول	HNO۳	HCl	HF	H۲O
حجم (cc)	۲٫۵	۱٫۵	۱٫۰	۹۵٫۰

Al۷۰۷۵ در این دما حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد حجمی است.[۷و۱۸]

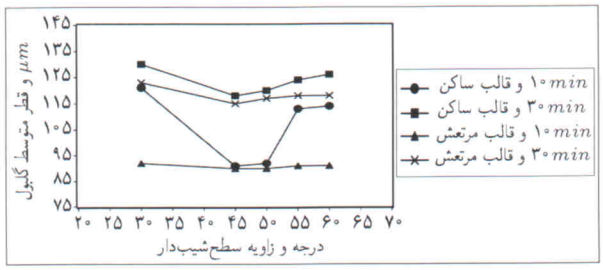
در مرحله‌ی بعد، پس از انجام عملیات پرداخت و حکاکی با استفاده از محلول Keller (با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۳) به‌مدت حدود ۱۵ ثانیه، بررسی‌های ریزساختاری روی نمونه‌های حرارت‌دهی شده‌ی مجدد انجام شد و قطر متوسط گلبول‌ها و فاکتورشکل آنها با استفاده از یک سیستم تجزیه و تحلیل تصویری در پنج میدان تصویری اندازه‌گیری و میانگین آنها ثبت شد. برای محاسبه‌ی فاکتورشکل گلبول‌ها که بیانگر میزان کرویت آنها است، از رابطه‌ی ۱ استفاده شد:

$$F = \frac{۴\pi A}{p^۲} \qquad (۱)$$

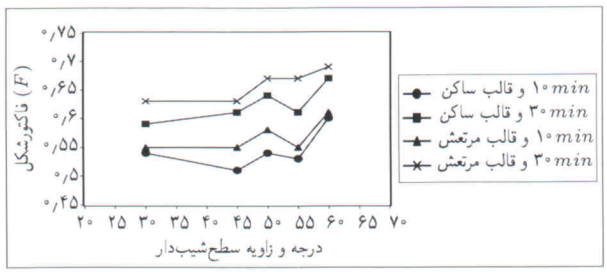
که در آن A مساحت و p محیط گلبول‌ها در سطح مقطع نمونه است. براساس این رابطه، افزایش فاکتورشکل بیانگر کروی‌تر شدن گلبول‌ها است.[۷]

۳. نتایج و بحث

شکل‌های ۲ و ۳ تأثیر زاویه‌ی سطح شیب‌دار و ارتعاش قالب را بر اندازه‌ی متوسط و فاکتورشکل گلبول‌ها در دو زمان حرارت دهی ۱۰ و ۳۰ دقیقه نشان می‌دهند. همچنین، ریزساختار نمونه‌های ریخته‌شده از سطح شیب‌دار در قالب‌های ساکن و مرتعش پس از عملیات حرارت دهی در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. با مراجعه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که ریزساختار تعدادی از نمونه‌ها دارای ذرات رزی‌شکل، و نه ذرات کروی، است. عبارت رزی‌شکل، بیانگر شکل ظاهری ذراتی است که نه حالت دندریتی دارند و نه به‌طور کامل کروی‌اند.



شکل ۲. قطر متوسط گلبول‌ها در زوایای مختلف سطح شیب‌دار و زمان حرارت‌دهی ۱۰ و ۳۰ دقیقه.



شکل ۳. فاکتورشکل گلبول‌ها در زوایای مختلف سطح شیب‌دار و زمان حرارت‌دهی ۱۰ و ۳۰ دقیقه.

۱.۳. اثر زاویه‌ی سطح شیب‌دار و ارتعاش قالب بر اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها

با توجه به شکل ۲، اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها در قالب ساکن با تغییر زاویه‌ی سطح شیب‌دار از؛ 60° به 45° کاهش و از 45° به 30° افزایش می‌یابد. بنابراین زاویه‌ی سطح شیب‌دار 45°، باعث ایجاد کم‌ترین اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها در ریزساختار بیلت می‌شود. مشابه روش هم‌زدن مکانیکی، پارامترهایی وجود دارند که با تغییر زاویه‌ی سطح شیبدار بر اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها تأثیر می‌گذارند.[۱۹] بعضی از این پارامترها عبارت‌اند از: الف) مقدار تنش برشی اعمال شده به مخلوط مذاب ـ جامد در هنگام حرکت آن بر روی سطح شیب‌دار؛ ب) زمان اعمال تنش برشی به مخلوط مذاب جامد؛ ج) کسر حجمی فاز جامد شکل گرفته بر روی سطح شیبدار. به نظر می‌رسد که در این پژوهش، تأثیر متقابل عوامل فوق در زاویه‌ی 45° باعث شده است که حداقل اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها در این زاویه‌ی بهینه حاصل شود.

شکل ۲ نشان می‌دهد که در مقایسه با قالب ساکن، قالب مرتعش باعث کاهش اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها می‌شود. این پدیده مورد انتظار است، چرا که در تحقیقات قبلی[۲۰ و ۲۱] گزارش شده است که هم‌زدن مکانیکی مخلوط مذاب ـ جامد مانند ارتعاش باعث «ریز شدن دینامیکی دانه‌ها» از طریق ذوب مجدد شاخه‌ها و تغییرشکل مکانیکی یا شکست آنها می‌شود. اگرچه ارتعاش قالب، احتمال برخورد گلبول‌ها به یکدیگر را در مذاب افزایش می‌دهد و در نتیجه این احتمال وجود دارد که پدیده‌ی «ائتلاف گلبول‌ها» باعث افزایش اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها شود اما لزوم نزدیک بودن جهات بلوری گلبول‌ها برای وقوع پدیده‌ی ائتلاف، باعث عدم کارایی این پدیده در افزایش قطر متوسط گلبول‌ها می‌شود.[۲۲] نتایج این تحقیق نیز بر کاهش اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها در قالب مرتعش دلالت دارد.

با مقایسه‌ی اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها در نمونه‌های ریخته شده، در قالب ساکن و مرتعش، بعد از هر دو زمان حرارت‌دهی ۱۰ و ۳۰ دقیقه می‌توان دریافت که اثر ارتعاش قالب در کاهش قطر متوسط گلبول‌ها در نمونه‌های ریخته شده از روی سطح شیب‌دار در زوایای 45° و 50° نامحسوس است. این امر می‌تواند مربوط به ریزتر بودن کریستال‌های اولیه‌ی وارد شده به قالب مرتعش از سطح شیب‌دار در این دو زاویه باشد. بنابراین با توجه به نتایج این مطالعه، اثر ارتعاش قالب در کاهش اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها، تابعی از اندازه‌ی کریستال‌های اولیه‌ی وارد شده به قالب مرتعش است. در واقع به‌دلیل آن که توانایی ارتعاش قالب در شکستن کریستال‌های با ابعاد بزرگ‌تر، بیشتر است، استفاده از قالب مرتعش باعث کاهش اختلاف اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها در بیلت‌های ریخته شده در زوایای مختلف سطح شیب‌دار می‌شود. به‌عبارت دیگر، ارتعاش قالب اثر زاویه‌ی سطح شیب‌دار را بر اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها کاهش می‌دهد (شکل ۲).

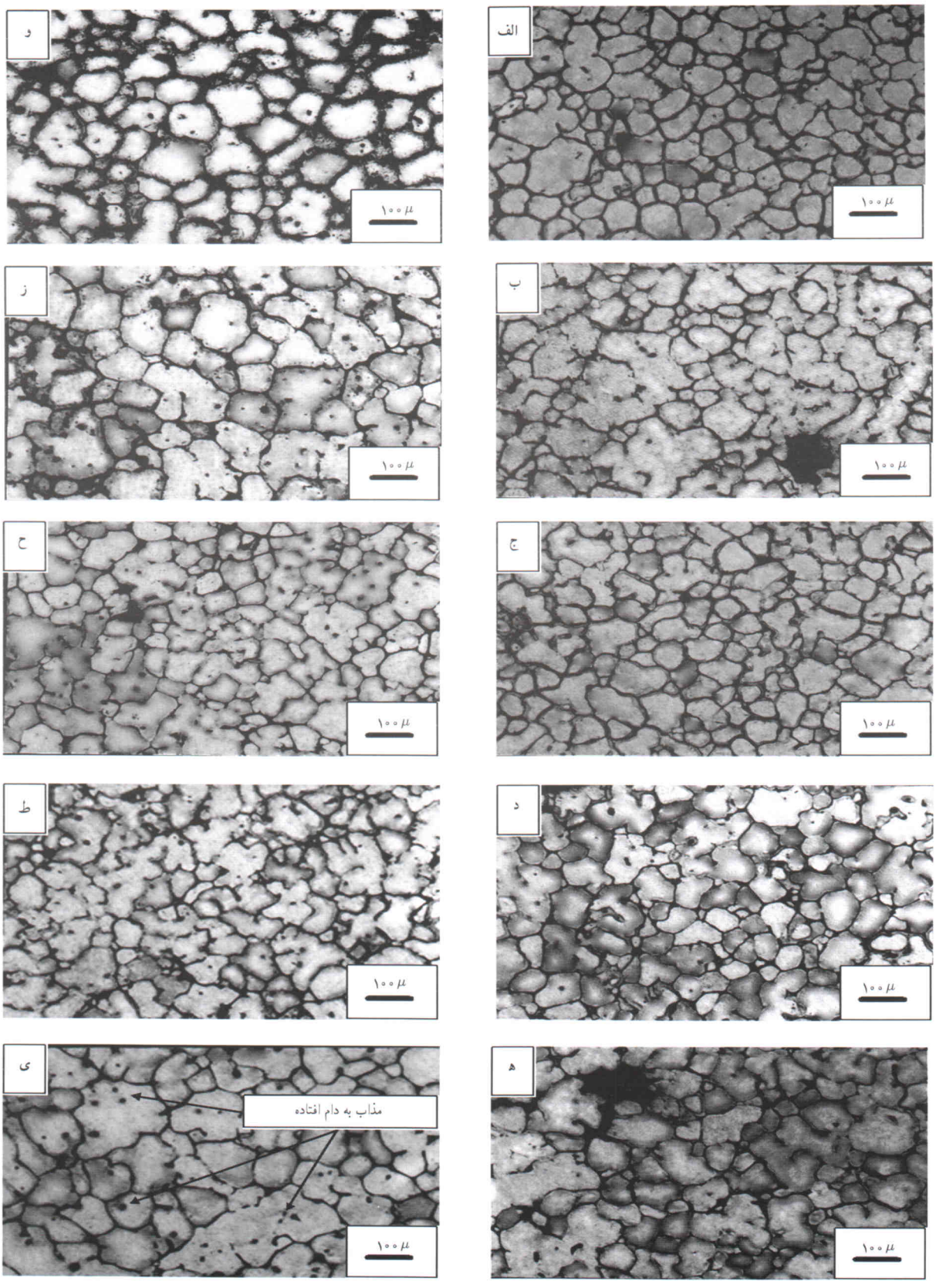
۲.۳. اثر ارتعاش قالب بر فاکتورشکل ریخت گلبول‌ها

همان طورکه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تغییر زاویه‌ی سطح شیب‌دار، باعث تغییر فاکتورشکل گلبول‌ها در یک رفتار باقاعده نمی‌شود. تنها می‌توان چنین بیان کرد که زاویه‌ی 60° به ایجاد گلبول‌هایی با بیشترین فاکتورشکل در هر دو نوع قالب ساکن و مرتعش منجر می‌شود. به‌طور کلی، عوامل تأثیرگذار بر اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها، فاکتورشکل آنها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. در حقیقت، برآیند آثار همزمان عوامل یاد شده در بخش ۱.۳ فاکتورشکل گلبول‌ها را در یک زاویه‌ی خاص سطح شیب‌دار تعیین می‌کند.

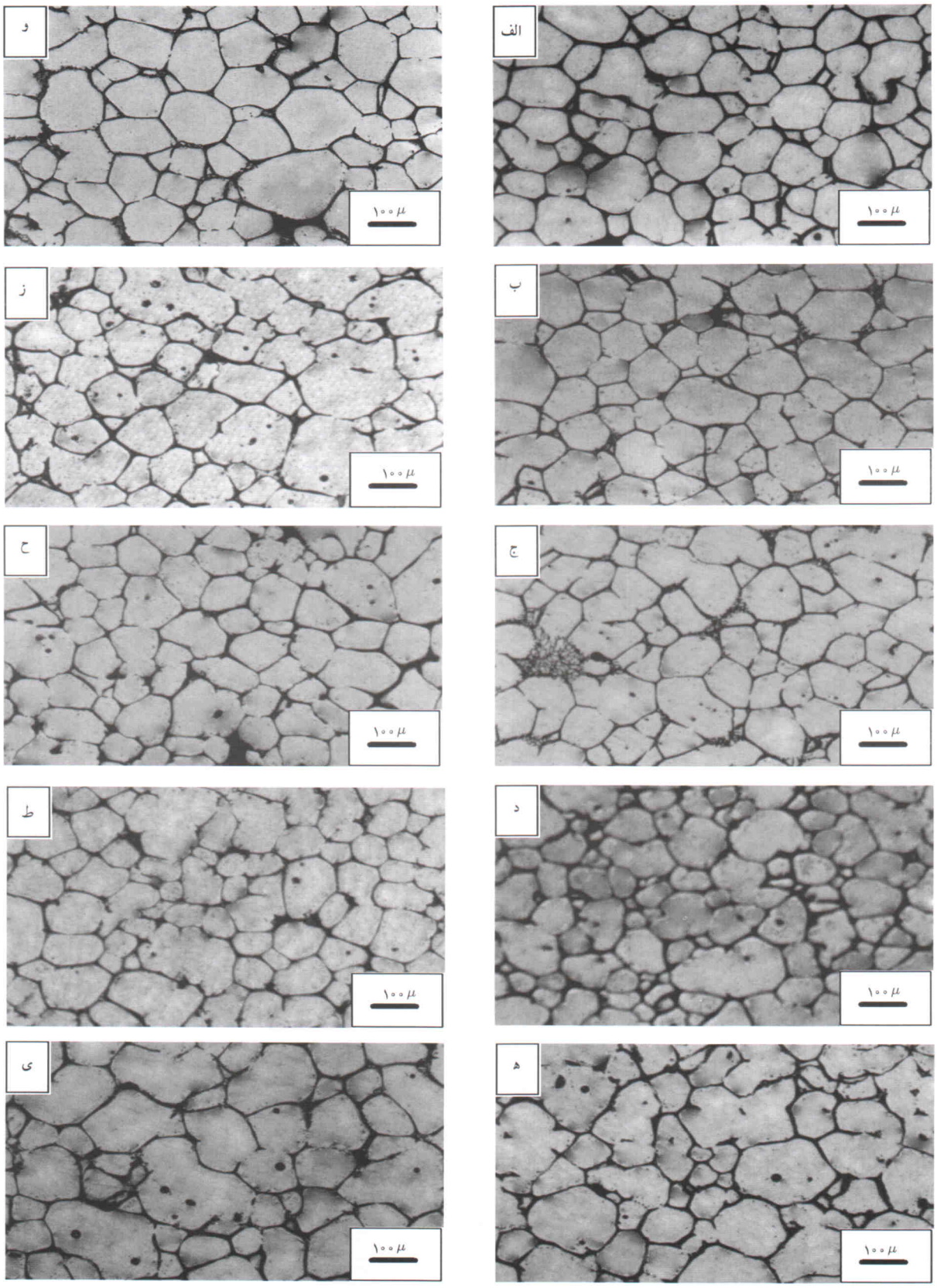
نتایج ارائه شده در شکل ۳ نشان می‌دهد که ارتعاش قالب، میزان کروی‌بودن گلبول‌ها را بعد از هر دو زمان حرارت‌دهی ۱۰ و ۳۰ دقیقه افزایش می‌دهد. اثر ارتعاش بر کروی‌بودن گلبول‌ها می‌تواند به پدیده‌های زیر مربوط باشد:

۱) براثر ارتعاش، بلورهای اولیه می‌شکنند و ذرات غیرکروی (با گوشه‌های تیز) ایجاد می‌شود، و درنتیجه فاکتورشکل متوسط گلبول‌ها کاهش می‌یابد.

۲) براثر ارتعاش، بلورهای اولیه‌ی بزرگ و یا الگومره شده با اشکال نامشخص می‌شکنند. این پدیده می‌تواند فرایند کروی شدن گلبول‌ها را در حین حرارت‌دهی مجدد شتاب دهد، زیرا با کوچک‌شدن ذرات، فواصل نفوذ در حین کروی‌شدن کاهش می‌یابد و لذا فاکتورشکل گلبول‌ها سریع‌تر افزایش می‌یابد.



شکل ۴. ریزساختار نمونه‌های ریخته شده در قالب مرتعش (الف-ه) و قالب ساکن (و-ی) بعد از زمان حرارت‌دهی ۱۰ دقیقه در دمای ۶۱۵ درجه سانتی‌گراد و زوایای سطح°۳۰ (ه و ی)، °۴۵ (د و ط)، °۵۰ (ج و ح)، °۵۵ (ب و ز)، °۶۰ (الف و و).



شکل ۵. ریزساختار نمونه‌های ریخته شده در قالب مرتعش (الف-ه) و قالب ساکن (و-ی) بعد از زمان حرارت‌دهی ۳۰ دقیقه در دمای ۶۱۵ درجه سانتی‌گراد و زوایای سطح°۳۰ (ه و ی)، °۴۵ (د و ط)، °۵۰ (ج و ح)، °۵۵ (ب و ز)، °۶۰ (الف و و).

مجموع اثر دو عامل فوق، فاکتورشکل گلبول‌ها را تعیین می‌کند. به نظر می‌رسد که در شرایط انجام این تحقیق، اثر عامل دوم بر عامل اول غلبه کرده و لذا ارتعاش قالب، فاکتورشکل گلبول‌ها را بهبود می‌بخشد. این نتیجه، با نتایج گزارش شده‌ی قبلی[۲۲و۲۳] تطبیق دارد. این محققین گزارش کرده‌اند که کاهش اندازه‌ی بلورهای اولیه‌ی آلیاژ Mg۷AlSi باعث افزایش بیشتر فاکتورشکل آنها در حین عملیات حرارت‌دهی در حالت نیمه‌جامد می‌شود. نتایج این پژوهش نیز نشان می‌دهد که اثر عامل یاد شده به‌همراه کاهش اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها در قالب مرتعش، باعث کروی‌تر شدن گلبول‌ها با استفاده از قالب مرتعش می‌شود.

۳.۳. تأثیر ارتعاش قالب بر مقدار مذاب به دام افتاده

اغلب در حین ذوب جزیی ساختارهای دندریتی و رزی‌شکل، مقداری از حجم مذاب به‌دلیل ائتلاف بازوهای ثانویه‌ی دندریت‌ها و برآمدگی‌های نزدیک به هم در ذرات رزی‌شکل، در بین فازهای جامد محبوس می‌شود.[۴،۱۳و۲۴] پدیده‌ی ذکر شده، کسر حجمی مذاب مؤثر در شارش آلیاژ در حالت نیمه‌جامد را کاهش داده و در نتیجه گران‌رویِ مخلوط مذاب ـ جامد در حین فرایندهای نیمه‌جامد افزایش می‌یابد.[۱۳و۲۴]

مقایسه‌ی ریزساختار نمونه‌های ریخته‌شده در داخل قالب ساکن و مرتعش (شکل‌های ۴ و ۵) نشان می‌دهد که کسر حجمی مذاب به دام افتاده در نمونه‌های ریخته شده در قالب مرتعش کم‌تر از نمونه‌های ریخته شده در قالب ساکن است. این نتیجه می‌تواند ناشی از به هم خوردن مخلوط مذاب-جامد در حین ارتعاش قالب، و در نتیجه افزایش احتمال جهت‌گیری متفاوت گلبول‌های مجاور یکدیگر در مذاب باشد؛ و لذا ائتلاف گلبول‌ها با یکدیگر را (که منجر به شکل‌گیری مذاب به دام افتاده می‌شود) در حین فرایند حرارت‌دهی مجدد مشکل‌تر می‌سازد.[۲۲]

۴.۳. اثر زمان حرارت دهی مجدد بر اندازه‌ی متوسط و فاکتور شکل گلبول‌ها

تحقیقات گذشته نشان داده است که افزایش زمان حرارت‌دهی موجب افزایش اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها و بهبود کروی‌بودن آنها می‌شود. نتایج ارائه شده در شکل‌های ۲ و ۳ نیز مؤید این پدیده است.

رشد گلبول‌ها و افزایش اندازه‌ی متوسط آنها را می‌توان به‌وسیله‌ی دو سازوکار «ائتلاف» و Ostwald Ripening در حین فرایند حرارت‌دهی مجدد شرح داد.[۲۲] این دو سازوکار با افزایش زمان حرارت‌دهی باعث افزایش بیشتر اندازه‌ی گلبول‌ها می‌شوند (شکل ۲). همچنین نیروی محرکه‌ی کروی شدن گلبول‌ها در حین فرایند حرارت مجدد، از کاهش فصل مشترک مذاب ـ جامد و در واقع کاهش انرژی سیستم حاصل می‌شود.[۱۲] بنابراین افزایش زمان نگه‌داری در حالت نیمه‌جامد از ۱۰ دقیقه به ۳۰ دقیقه باعث کاهش فصل مشترک مذاب ـ جامد و در نتیجه افزایش کروی‌بودن گلبول‌ها می‌شود (شکل۳). همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود، ریزساختار نمونه‌های حرارت داده شده به‌مدت ۱۰ دقیقه، عموماً شامل ذرات رزی‌شکل است و دلیل آن عدم کفایت زمان ۱۰ دقیقه برای کروی شدن کریستال‌های اولیه است. این درحالی است که در نمونه‌هایی که به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شده‌اند، تعداد ذرات کروی و گلبول‌ها زیاد است. در واقع افزایش حرارت‌دهی از ۱۰ دقیقه به ۳۰ دقیقه، زمان کافی برای حرکت مرزدانه‌ها و کاهش فصل مشترک مذاب ـ جامد را فراهم ساخته است.[۱۲]

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر همزمان زاویه‌ی سطح شیب‌دار و ارتعاش قالب بر ریزساختار حالت نیمه‌جامد آلیاژ Al۷۰۷۵ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱. با تغییر زاویه‌ی سطح شیب‌دار از °۶۰ به °۴۵، اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها در قالب ساکن کاهش و از °۴۵ به °۳۰ افزایش می‌یابد. اما در قالب مرتعش، تغییر زاویه‌ی سطح شیب‌دار در محدوده‌ی °۳۰ تا °۶۰ تأثیر قابل توجهی در اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها ندارد. علت این است که اثر ارتعاش قالب در کاهش اندازه‌ی گلبول‌ها، تابعی از اندازه‌ی کریستال‌های اولیه‌ی وارد شده به قالب مرتعش است، به‌طوری که ذرات بزرگ‌تر براثر ارتعاش، آسان‌تر شکسته می‌شوند. در واقع ارتعاش قالب اثر زاویه سطح شیب‌دار را بر اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها کاهش می‌دهد.

۲. ارتعاش قالب، موجب افزایش کرویت دانه‌ها بعد از هر دو زمان حرارت‌دهی ۱۰ و ۳۰ دقیقه در دمای ۶۱۵ درجه سانتی‌گراد می‌شود.

۳. کسر حجمی مذاب به دام افتاده در نمونه‌های ریخته شده در قالب مرتعش کم‌تر از نمونه‌های ریخته شده در قالب ساکن است.

۴. نمونه‌های حرارت داده شده در زمان ۱۰ دقیقه، عموماً شامل ذرات رزی‌شکل است که علت آن عدم کافی بودن زمان ۱۰ دقیقه برای کروی‌شدن ذرات است. اما در نمونه‌هایی که به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شده‌اند، تعداد ذرات کروی‌شکل زیاد است. در واقع حین حرارت‌دهی از ۱۰ دقیقه به ۳۰ دقیقه، زمان کافی برای حرکت مرزدانه‌ها و کاهش فصل مشترک مذاب ـ جامد وجود دارد.

قدردانی

نویسندگان نوشتار از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف به‌دلیل فراهم آوردن امکانات انجام آزمایشات و از مسئولان محترم مرکز تحقیقات و توسعه ریخته‌گری ایران خودرو به‌دلیل کمک‌های مالی برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

1. "Semisolid metals casting and forging", *Metals Handbook*, ASM, **15**, pp. 327-338 (1998).
2. T. Haga, and P. Kapranos: *J. Mater, Process. Technol.*, **130,** pp. 581-586 (2002).
3. T. Haga, and P. Kapranos: *J. Mater. Process. Technol.*, **130,** pp. 594-598 (2002).
4. Y. Zhang, K. Zhang, G. Liu, J. Xu, L. Shi, D. Cui, X. Wu and B. Cui: *J. Mater. Process. Technol.*, **137,** pp. 195-20 (2003).
5. D. N. Li, J. R. Lou, S. S. Wu, Z. H. Xiao, Y. W. Mao, X. J. Song and J. Z. Wu: *J. Mater. Process. Technol.*, **129,** pp. 431-434 (2002).
6. W. G. Cho and C. G. Kang: *J. Mater. Process. Technol.*, **105,** pp. 269-277 (2000).
7. D. Liu, H. V. Atkinson, P. Kapranos, W. Jirattiticharoean and H. Jones: *Mater. Sci. Eng. A*, **361,** pp. 213-224 (2003).
8. A. M. Camacho, H. V. Atkinson, P. Kapranos and B. B. Argent: *Acta Materialia*, **51,** pp. 2319-2330 (2003).
9. J. L. Jorstad: Proc. 8^{th} Int. Conf. on "The processing of semi-solid alloys and composites", Limassol, Cyprus, September pp. 21-23 (2004).
10. J. Aguilar, M. Fehlbier, A. Ludwig, A. Buhrig-Polaczek and P. R. Sahm: Mater. Sci. Eng. A, **375-377,** pp. 651-655 (2004).
11. T. Haga and S. Suzuki: *J. Mater. Process. Technol.*, **118,** pp. 169-172 (2001).
12. J. Dong, J. Z. Cui, Q. C. Le and G. M. Lu: *Mater. Sci. Eng. A*, **345,** pp. 234-242 (2003).
13. M. Suery: Proc. 8^{th} Int. Conf. on "The processing of semi-solid alloys and composites", Limassol, Cyprus, September pp. 21-23 (2004).
14. T. Haga, K. Tkahashi, M. Ikawaand and H. Watari: *J. Mater. Process. Technol.*, **153-154,** pp. 42-47 (2004).
15. T. Haga: *J. Mater. Process. Technol.*, **111,** pp. 64-68 (2001).
16. S. G. Lim, Y. S. Yung and S. S. Kim: *Scripta Mater.*, **43,** pp. 1077-1081 (2000).
17. "Aluminum and Aluminum Alloys", ASM Speciality Handbook, (1998).
18. S. Chayong, H. V. Atkinson and P. Kapranos: *Mater. Sci. Eng. A*, **390,** pp. 3-12 (2005).
19. F. Pahlevani, S. Salarfar and M. Nili-Ahmadabadi: Proc. 8^{th} Int. Conf. on 'The processing of semi-solid alloys and composites', Limassol, Cyprus, pp. 21-23 (Septmber 2004).
20. G. J. Davies: 'Solidification and Casting', 30-70; London, Applied Science Publishers LTD. (1973).
21. M. C. Flemings: *Metall. Trans. A*, **22,** pp. 957-981 (1991).
22. W. R. Lou and M. Suery: *Mater. Sci. Eng. A*, **203,** pp. 1-13 (1995).
23. H. Wang, C. J. Davidson and D. H. StJohn: *Mater. Sci. Eng. A*, **368,** pp. 159-167 (2004).
24. H. Aashuri: *Mater. Sci. Eng. A*, **391,** pp. 77-85 (2005).