

## بررسی اثر ارتعاش قالب بر ریزساختار حالت نیمه‌جامد آلیاژ $A1V^{0}75$

### تولید شده به روش سطح شیب‌دار

علی کریمی‌طاهری (استاد)  
مجتبی موحدی (دانشجوی دکتری)  
هادی نیلشنس (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 زمینه‌ی 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  $A1V^{0}75$  بررسی شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که ارتعاش قالب به‌میزان قابل توجهی اندازه‌ی متوسط گلوله‌های 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 گلوله‌های آلیاژ  $A1V^{0}75$  پس از حرارت‌دهی مجدد منجر می‌شود.

#### ۱. مقدمه

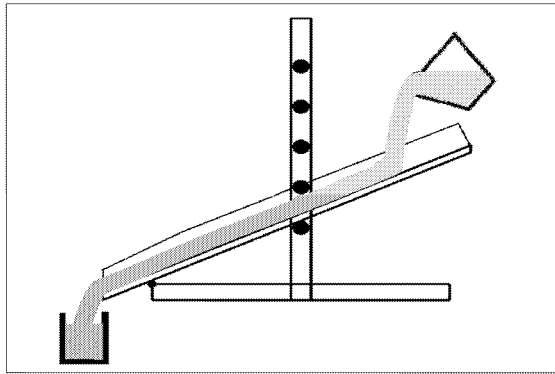
در سال‌های اخیر، ریخته‌گری و شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد، توجه ویژه‌ی سازندگان آلیاژهای فلزی را، هم در مراکز تحقیقاتی و هم در صنایع مختلف، به خود جلب کرده است. ریزساختار مناسب در حالت نیمه‌جامد، شامل ذرات غیردندریتی (ریزساختار دارای ذرات کروی) در زمینه‌ی با نقطه ذوب کم‌تر است.<sup>[۱]</sup> برخورداری از مزایای 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.<sup>[۲-۶]</sup> 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.<sup>[۷-۱۱]</sup>

مجدد جزئی؛ ج) تیکسو فرمینگ.<sup>[۱۲،۱۳]</sup> 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 جزئی، و روش سطح شیب‌دار خنک‌کننده.<sup>[۱۴-۱۶]</sup>

روش سطح شیب‌دار در مقایسه با روش‌های دیگر، ساده و نسبتاً ارزان است.<sup>[۱۷]</sup> این روش، شامل ریخته‌گری آلیاژ در امتداد یک سطح شیب‌دار است که سرد شدن مذاب، جوانه‌زنی فاز جامد در مذاب و به هم خوردن مخلوط مذاب - جامد حاصل، به‌صورت همزمان در حین حرکت مذاب بر روی سطح شیب‌دار صورت می‌گیرد.<sup>[۱۸، ۱۹]</sup> 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.<sup>[۲۰، ۲۱]</sup> 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 - جامد، جنس قالب و زاویه‌ی سطح شیب‌دار اشاره کرد.<sup>[۲۲، ۲۳]</sup>

آلیاژ  $A1V^{0}75$ ، پرکاربردترین آلیاژ دارای استحکام بالای آلومینیوم است که در حال حاضر تحقیقات ویژه‌ی به‌منظور بهبود خواص

به‌طور کلی، فرایند شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد از سه مرحله‌ی اصلی تشکیل شده است: الف) تولید بیلت‌های نیمه‌جامد؛ ب) ذوب



شکل ۱. تصویر شماتیک سطح شیب‌دار.

جدول ۳. ترکیب شیمیایی محلول.

Keller

اجزای محلول	HNO <sub>3</sub>	HCl	HF	H <sub>2</sub> O
حجم (cc)	۲٫۵	۱٫۵	۱٫۰	۹۵٫۰

در این AIV<sup>۰۷۵</sup> در این دما حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد حجمی است. [۱۸] در مرحله‌ی بعد، پس از انجام عملیات پرداخت و حکاکی با استفاده از محلول Keller (با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۳) به مدت حدود ۱۵ ثانیه، بررسی‌های ریزساختاری روی نمونه‌های حرارت‌دهی شده‌ی مجدد انجام شد و قطر متوسط گلبول‌ها و فاکتور شکل آنها با استفاده از یک سیستم تجزیه و تحلیل تصویری در پنج میدان تصویری اندازه‌گیری و میانگین آنها ثبت شد. برای محاسبه‌ی فاکتور شکل گلبول‌ها که بیان‌گر میزان کرویت آنها است، از رابطه‌ی ۱ استفاده شد:

$$F = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (1)$$

که در آن A مساحت و p محیط گلبول‌ها در سطح مقطع نمونه است. براساس این رابطه، افزایش فاکتور شکل بیان‌گر کرویت‌تر شدن گلبول‌ها است. [۱۷]

### ۳. نتایج و بحث

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

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 AIV<sup>۰۷۵</sup> مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۲. شرح پژوهش

ترکیب شیمیایی آلیاژ AIV<sup>۰۷۵</sup> 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 لیکویدوس 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 ۱۰ mm و فرکانس تقریبی ۳ Hz، قبل از ورود مخلوط مذاب - جامد به قالب شروع و تا پایان انجام کامل نمونه ادامه می‌یافت. پس از تولید نمونه‌های یاد شده، به‌منظور انجام عملیات حرارت‌دهی مجدد در حالت نیمه‌جامد، نمونه‌ها به مدت 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 AIV<sup>۰۷۵</sup> مورد استفاده در پژوهش.

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

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

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

نزدیک بودن جهات بلوری گلبول‌ها برای وقوع پدیده‌ی اتتلاف، 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.

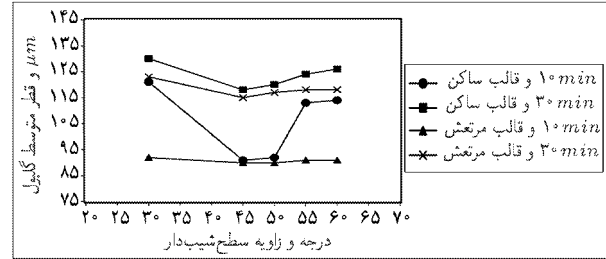
با مقایسه‌ی اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها در نمونه‌های ریخته شده، در قالب ساکن و مرتعش، بعد از هر دو زمان حرارت‌دهی ۱۰ و ۳۰ دقیقه می‌توان دریافت که اثر ارتعاش قالب در کاهش قطر متوسط گلبول‌ها در نمونه‌های ریخته شده از روی سطح شیب‌دار در زوایای ۴۵° و ۵۰° نامحسوس است. این امر می‌تواند مربوط به ریزش بودن کریستال‌های 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 به دلیل 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. به عبارت دیگر، ارتعاش قالب اثر زاویه‌ی سطح شیب‌دار را بر اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها کاهش می‌دهد (شکل ۲).

۲.۳. اثر ارتعاش قالب بر فاکتور شکل ریخت گلبول‌ها

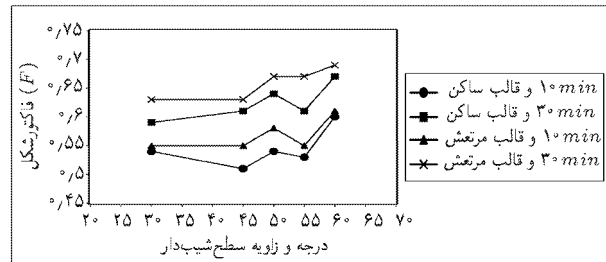
همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تغییر زاویه‌ی سطح شیب‌دار، باعث تغییر فاکتور شکل گلبول‌ها در یک رفتار باقاعده نمی‌شود. تنها می‌توان چنین بیان کرد که زاویه‌ی ۶۰° به ایجاد گلبول‌هایی با بیشترین فاکتور شکل در هر دو نوع قالب ساکن و مرتعش منجر می‌شود. به‌طور کلی، عوامل تأثیرگذار بر اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها، فاکتور شکل آنها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. در حقیقت، برآیند آثار همزمان عوامل یاد شده در بخش ۱.۳ فاکتور شکل گلبول‌ها را در یک زاویه‌ی خاص سطح شیب‌دار تعیین می‌کند.

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

- ۱) براثر ارتعاش، بلورهای اولیه می‌شکنند و ذرات غیرکروی (با گوشه‌های تیز) ایجاد می‌شود، و در نتیجه فاکتور شکل متوسط گلبول‌ها کاهش می‌یابد.
- ۲) براثر ارتعاش، بلورهای اولیه 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 کوچک شدن ذرات، فواصل نفوذ در حین کروی شدن کاهش می‌یابد و لذا فاکتور شکل گلبول‌ها سریع‌تر افزایش می‌یابد.



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

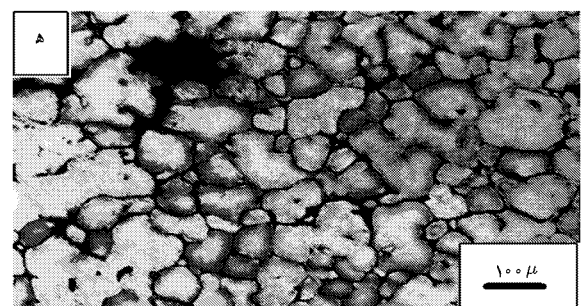
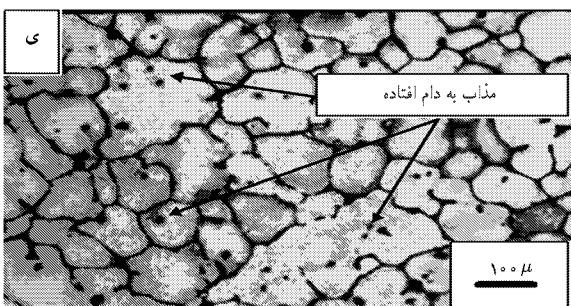
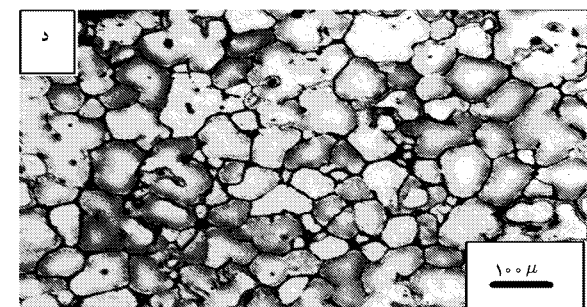
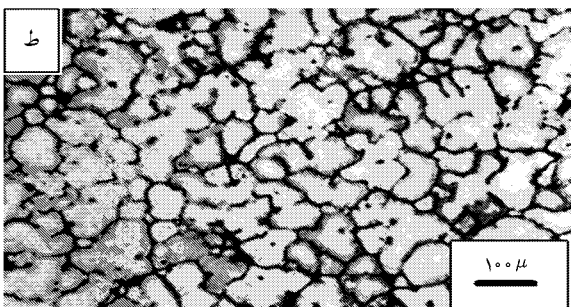
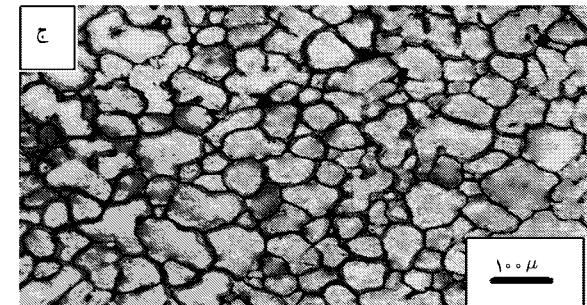
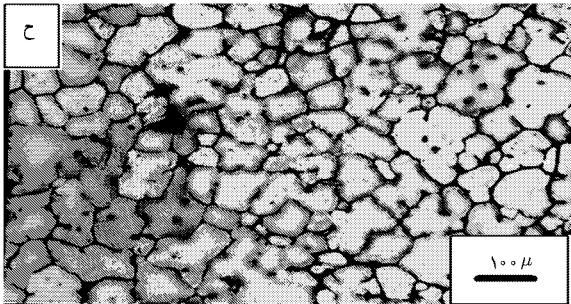
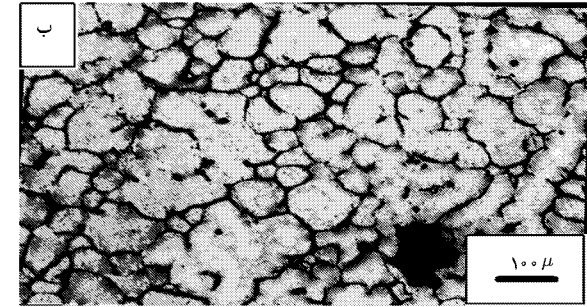
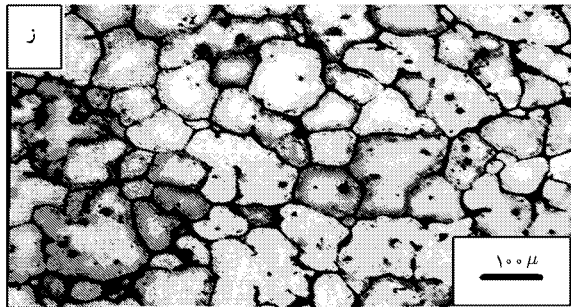
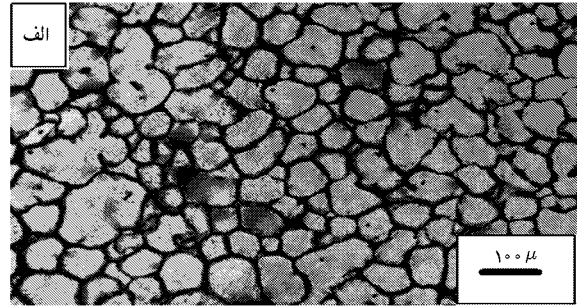
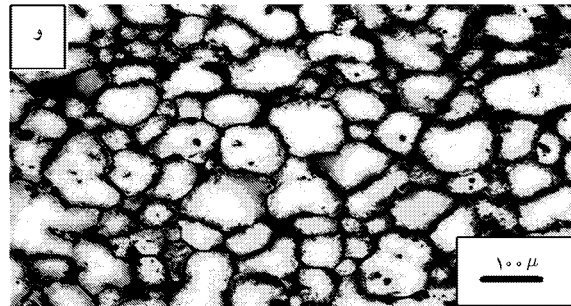


شکل ۳. فاکتور شکل گلبول‌ها در زوایای مختلف سطح شیب‌دار و زمان حرارت‌دهی ۱۰ و ۳۰ دقیقه.

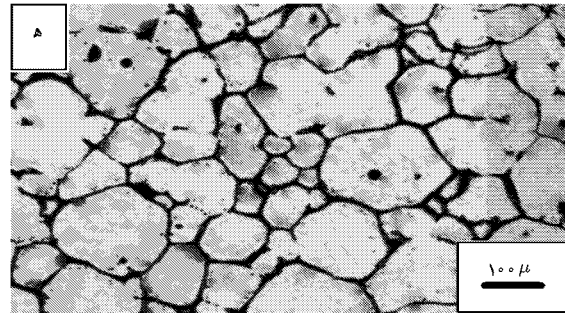
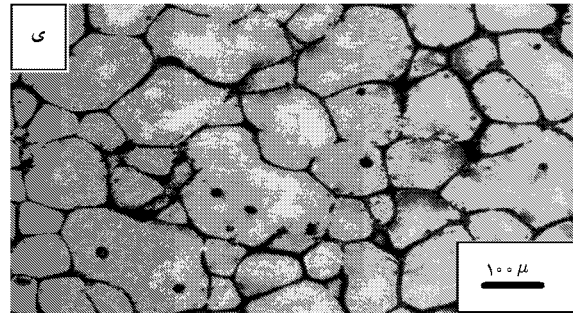
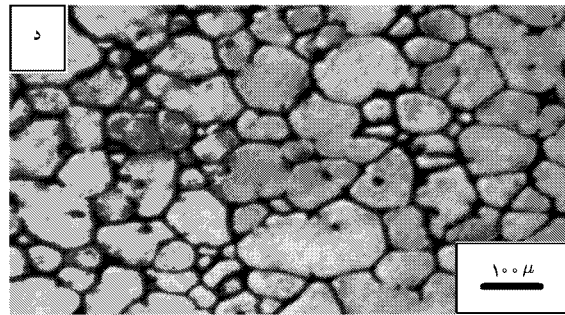
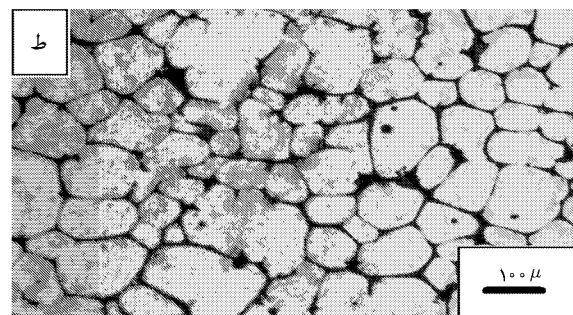
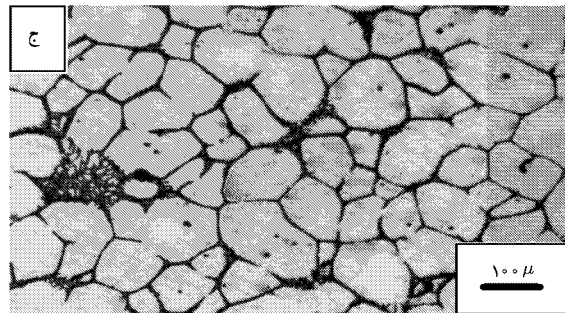
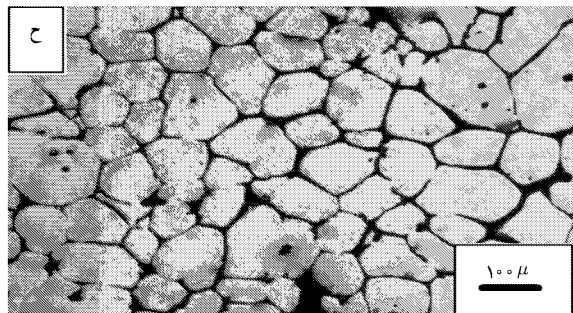
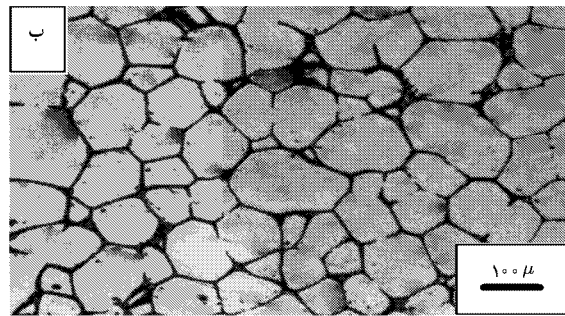
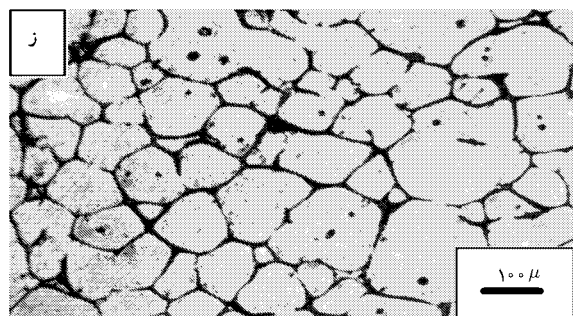
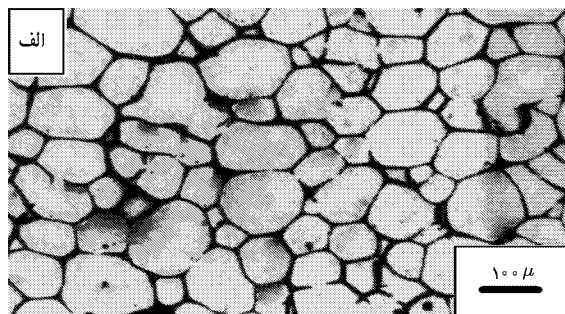
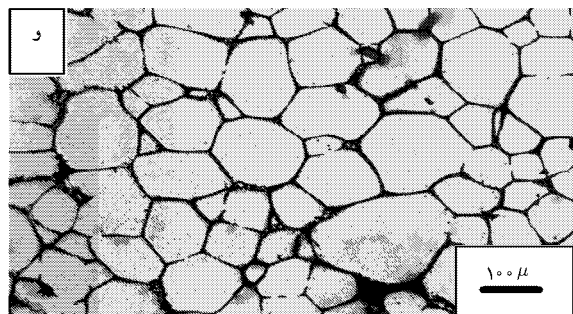
### ۱.۳. اثر زاویه‌ی سطح شیب‌دار و ارتعاش قالب بر اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها

با توجه به شکل ۲، اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها در قالب ساکن با تغییر زاویه‌ی سطح شیب‌دار از ۶۰° به ۴۵° کاهش و از ۴۵° به ۳۰° افزایش می‌یابد. بنابراین زاویه‌ی سطح شیب‌دار ۴۵° 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 - 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 ۴۵° 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 [۲۱ و ۲۲] گزارش شده است که هم‌زدن مکانیکی مخلوط مذاب - جامد مانند ارتعاش باعث «ریزشدن دینامیکی دانه‌ها» از طریق ذوب مجدد شاخه‌ها و تغییر شکل 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 «اتتلاف گلبول‌ها» باعث افزایش اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها شود اما لزوم



شکل ۴. ریزساختار نمونه‌های ریخته شده در قالب مرتعش (الف-ه) و قالب ساکن (و-ی) بعد از زمان حرارت‌دهی ۱۰ دقیقه در دمایی 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).

شکل‌های ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود، ریزساختار نمونه‌های حرارت داده شده به مدت ۱۰ دقیقه، عموماً شامل ذرات رزی شکل 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 مرزخانه‌ها و کاهش فصل مشترک مذاب - جامد را فراهم ساخته است.<sup>[۱۷]</sup>

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر همزمان زاویه‌ی سطح شیب‌دار و ارتعاش قالب بر ریزساختار حالت نیمه‌جامد آلیاژ  $AlV^{75}O^{25}$  مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱. با تغییر زاویه‌ی سطح شیب‌دار از  $60^\circ$  به  $45^\circ$ ، اندازه‌ی متوسط گلبول‌ها در قالب ساکن کاهش و از  $45^\circ$  به  $30^\circ$  افزایش می‌یابد. اما در قالب مرتعش، تغییر زاویه‌ی سطح شیب‌دار در محدوده‌ی  $30^\circ$  تا  $60^\circ$  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، به طوری که ذرات بزرگ‌تر بر اثر ارتعاش، آسان‌تر شکسته می‌شوند. در واقع ارتعاش قالب اثر زاویه‌ی 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  $615^\circ$  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 رزی شکل است که علت آن عدم کافی بودن زمان ۱۰ دقیقه برای کروی شدن ذرات است. اما در نمونه‌هایی که به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شده‌اند، تعداد ذرات کروی شکل زیاد است. در واقع حین حرارت‌دهی از ۱۰ دقیقه به ۳۰ دقیقه، زمان کافی برای حرکت مرزخانه‌ها و کاهش فصل مشترک مذاب - جامد وجود دارد.

#### قدردانی

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

مجموع اثر دو عامل فوق، فاکتور شکل 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، فاکتور شکل گلبول‌ها را بهبود می‌بخشد. این نتیجه، با نتایج گزارش شده‌ی قبلی<sup>[۲۲ و ۲۳]</sup> تطبیق دارد. این محققین گزارش کرده‌اند که کاهش اندازه‌ی بلورهای اولیه‌ی آلیاژ  $MgVAlSi$  باعث افزایش بیشتر فاکتور شکل آنها در حین عملیات حرارت‌دهی در حالت نیمه‌جامد می‌شود. نتایج این پژوهش نیز نشان می‌دهد که اثر عامل یاد شده به همراه 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 جزئی ساختارهای دندریتی و رزی شکل، مقداری از حجم مذاب به دلیل اتلاف بازوهای ثانویه دندریتی‌ها و برآمدگی‌های نزدیک به هم در ذرات رزی شکل، در بین فازهای جامد محبوس می‌شود.<sup>[۲۴ و ۲۵]</sup> پدیده‌ی ذکر شده، کسر حجمی مذاب مؤثر در شارش آلیاژ در حالت نیمه‌جامد را کاهش داده و در نتیجه گرانروی مخلوط مذاب - جامد در حین فرآیندهای نیمه‌جامد افزایش می‌یابد.<sup>[۲۶ و ۲۷]</sup>

مقایسه‌ی ریزساختار نمونه‌های ریخته شده 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 اتلاف گلبول‌ها با یکدیگر را (که منجر به شکل‌گیری مذاب به دام افتاده می‌شود) در حین فرآیند حرارت‌دهی مجدد مشکل‌تر می‌سازد.<sup>[۲۸]</sup>

#### ۴.۳. اثر زمان حرارت‌دهی 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 به وسیله‌ی دو سازوکار «اتلاف» و Ostwald Ripening در حین فرآیند حرارت‌دهی مجدد شرح داد.<sup>[۲۹]</sup> این دو سازوکار با افزایش زمان حرارت‌دهی باعث افزایش بیشتر اندازه‌ی گلبول‌ها می‌شوند (شکل ۲). همچنین نیروی محرکه‌ی کروی شدن گلبول‌ها در حین فرآیند حرارت مجدد، از کاهش فصل مشترک مذاب - جامد و در واقع کاهش انرژی سیستم حاصل می‌شود.<sup>[۱۷]</sup> بنابراین افزایش زمان نگهداری در حالت نیمه‌جامد از ۱۰ دقیقه به ۳۰ دقیقه باعث کاهش فصل مشترک مذاب - جامد و در نتیجه افزایش کروی‌بودن گلبول‌ها می‌شود (شکل ۳). همان‌طور که در

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. Jiratiticharoean 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<sup>th</sup> 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<sup>th</sup> Int. Conf. on "The processing of semi-solid alloys and composites", Limassol, Cyprus, September pp. 21-23 (2004).
14. T. Haga, K. Tkahashi, M. Ikawa 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<sup>th</sup> Int. Conf. on "The processing of semi-solid alloys and composites", Limassol, Cyprus, pp. 21-23 (September 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).