

# اثرات متقابل فسفر و استرانسیم بر ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم A۳۵۶

سید مهدی میراسماعیلی و اکبر بایرامی

**چکیده:** وجود ناخالصی فسفر در آلیاژهای هیپو یوتکتیک Al-Si و اثرات متقابل این عنصر با استرانسیم و یا سایر عناصر به سبب از بین رفتن و یا تضعیف اثر عملیات به سازی بر ساختار سیلیسیم یوتکتیکی می گردد. افزایش مقدار عنصر به سبب می تواند سبب جبران اثرات منفی فسفر بر ساختار میکروسکوپی گردد. در این پژوهش اثرات متقابل استرانسیم و فسفر بر ساختار میکروسکوپی فاز سیلیسیم یوتکتیکی و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ بطور سیستماتیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می دهد در شرایطی که مقدار ناخالصی فسفر زیاد است، رسیدن به یک ساختار کاملاً به سازی شده بسیار مشکل و یا غیرممکن خواهد بود. همچنین اثرات متقابل فسفر با استرانسیم سبب کاهش و یا حذف اثرات مثبت استرانسیم بر خواص مکانیکی (درصد ازدیاد طول) می گردد. افزایش مقدار استرانسیم به بیش از مقادیر متعارف که عموماً در عملیات به سازی مورد استفاده قرار می گیرد گرچه سبب بهبود ساختار سیلیسیم در یک آلیاژ حاوی فسفر می گردد ولی این افزایش در کل سبب بهبود خواص مکانیکی نخواهد گردید، زیرا این افزایش مقدار استرانسیم با افزایش شدید تخلخل در قطعه توأم می باشد.

**واژه های کلیدی:** آلیاژ A۳۵۶، ساختار میکروسکوپی، اثرات متقابل فسفر و استرانسیم، خواص مکانیکی

## ۱. مقدمه

آلیاژهای ریختگی آلومینیم علاوه بر عناصر آلیاژی اصلی نظیر سیلیسیم، مس و منیزیم، عموماً حاوی مقادیر جزئی از عناصر دیگر نیز می باشند.

بعضی از این عناصر ممکن است بمنظور آلیاژی و بهبود خواص قطعاً ریختگی به مذاب افزوده شوند، ولی بسیاری از آنها به عنوان عناصر مضر از طریق مواد نسوز، ابزار ذوب و یا ناخالصی های موجود در سنگ معدن و یا قراضه های مورد استفاده در آلیاژی سازی وارد مذاب می شوند [1].

افزودن عناصری نظیر استرانسیم و سدیم به منظور به سازی ساختار سیلیسیم هم اکنون به عنوان یک عملیات کیفی اصلی در ذوب آلیاژهای Al-Si مورد استفاده قرار می گیرد.

در شرایط طبیعی فاز سیلیسیم یوتکتیکی به صورت نامحلول و با ساختار درشت و سوزنی شکل (Large Acicular) در زمینه

آلومینیم توزیع می گردد. در حضور عناصر به ساز، ساختار فاز سیلیسیم یوتکتیکی به حالت رشته ای شکل ظریف (Fine Fibrous) تبدیل می گردد [2-4].

اصلاح ساختار سیلیسیم سبب افزایش نسبی خواص مکانیکی بخصوص درصد ازدیاد طول و مقاومت به ضربه می شود [1-2]. از آنجائی که عملیات به سازی ساختار سیلیسیم یوتکتیکی فقط با افزودن مقادیر جزئی از عناصر به ساز (۰/۱۵-۰/۰۵ درصد وزنی) انجام می شود، وجود عناصر ناخالصی در مقادیر بسیار کم نیز می تواند در امر به سازی تأثیرگذار باشد.

برخی از این عناصر ممکن است سبب بهبود شرایط به سازی شوند ولی بسیاری از عناصر ناخالصی سبب کاهش و یا محو اثر عناصر به ساز می گردند [1].

برای مثال آنتیموان خود به تنهایی به عنوان یک عنصر به ساز می تواند سبب ظریف سازی و اصلاح ساختار سیلیسیم گردد، با این وجود حضور مقادیر جزئی آنتیموان در مذاب یک آلیاژ به سازی شده با استرانسیم یا سدیم سبب کاهش و یا حتی محو اثرات عملیات به سازی می گردد [5-7].

بر اساس تحقیقات به عمل آمده تمایل شیمیائی نسبتاً شدید استرانسیم و سدیم به واکنش با آنتیموان و تشکیل ترکیبات بین فلزی چندانگانه با منیزیم نظیر  $Mg_2Sb_2Sr$ ،  $NaMgSb$  سبب

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۸/۲۷ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۱۲/۲۵ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر سید مهدی میراسماعیلی، استادیار گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید رجایی، s.m.miresmaili@srttu.edu  
مهندس اکبر بایرامی، دانش آموخته گروه متالورژی و مواد، دانشگاه شهید رجایی

استرانسیم می توان به یک ساختار بهسازی شده که مورفولوژی سیلیسیم در آن رشته‌ای شکل است رسید.

البته محققین فوق الذکر اثرات متقابل فسفر و استرانسیم را در یک محدوده نسبتاً کم از فسفر مورد ارزیابی قرار داده‌اند. بمنظور ارزیابی این موضوع در یک محدوده نسبتاً وسیع، Heusler و Schneider [9]، اثرات متقابل استرانسیم و فسفر بر ساختار سیلیسیم را در محدوده‌ای حاوی تا ۹۰ ppm فسفر مورد مطالعه قرار داده‌اند و نموداری شبیه به شکل ۱ را ارائه نموده‌اند.

بر اساس نتایج گزارش شده توسط این محققین در شرایطی که مقدار استرانسیم مورد نیاز در یک آلیاژ حاوی ۴۰ ppm فسفر برای تغییر مورفولوژی سیلیسیم از سوزنی شکل به لایه‌ای شکل حدود ۱۵۰ ppm، و برای تغییر از لایه‌ای شکل به رشته‌ای شکل حدود ۲۶۰ ppm است، با افزایش مقدار ناخالصی فسفر به ۹۰ ppm افزودن حتی ۴۵۰ ppm استرانسیم نیز نمی‌تواند یک ساختار رشته‌ای شکل را بوجود آورد [9].

بر اساس نظریات موجود [10-18]، فسفر سبب تشکیل ترکیب AIP در مذاب می‌گردد. این ترکیب می‌تواند به عنوان مرکز جوانه‌زنی در تشکیل فاز سیلیسیم یوتکتیکی عمل کرده و جوانه زنی فاز سیلیسیم در مادون تبرید نسبتاً کم در حضور ترکیب AIP، شرایط را برای تشکیل صفحات درشت سیلیسیم یوتکتیکی فراهم می‌کند.

در صورتی که مقدار فسفر مذاب را بتوان به کمتر از ۱ ppm رساند همواره (بدون افزودن عناصر بهسازی)، ساختار سیلیسیم یوتکتیکی دارای درجه بهسازی (Modification Rate) معادل با کلاس ۲ یا همان ساختار لایه‌ای شکل خواهد بود [8].

به بیان دیگر وجود غلظت فسفر در مقادیر بیش از ۱ ppm سبب می‌گردد که در شرایط طبیعی، ساختار سیلیسیم همواره دارای درجه بهسازی ۱ یا ساختار کاملاً بهسازی نشده و سوزنی شکل باشد (بر اساس درجه بندی به عمل آمده توسط Apelian [11]، ساختار کاملاً بهسازی نشده متشکل از سیلیسیم سوزنی شکل درشت دارای درجه بهسازی ۱، ساختار کاملاً بهسازی شده متشکل از سیلیسیم رشته‌ای شکل ظریف دارای درجه بهسازی ۵ و ساختارهای حاوی مخلوطی از سیلیسیم‌های لایه‌ای و رشته‌ای شکل دارای درجات بهسازی ۴-۲ می‌باشند).

تمایل شیمیائی شدیدتر استرانسیم به واکنش با فسفر در تشکیل ترکیب فسفید استرانسیم و یا ترکیبات چند گانه فسفیدی شامل فسفر، استرانسیم و آلومینیم در مذاب در مقایسه با آلومینیم در تشکیل ترکیب AIP، سبب خنثی سازی اثرات مضر فسفر شده و عملاً با کاهش ترکیب AIP در مذاب شرایط را برای تشکیل فاز سیلیسیم یوتکتیکی با مورفولوژی رشته‌ای شکل یا ساختار کاملاً بهسازی شده فراهم می‌نماید.

کاهش مقدار سدیم و استرانسیم در مذاب و بنابراین کاهش راندمان بهسازی می‌گردد.

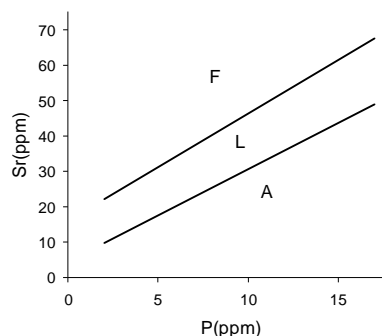
در این ارتباط افزایش غلظت مفید عنصر بهساز در مذاب به عنوان یک راه‌حل جهت غلبه بر این مشکل عنوان شده است [7]. مهمترین عنصری که به عنوان ناخالصی می‌تواند عملیات بهسازی را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار دهد فسفر است. فسفر می‌تواند از طریق مواد نسوز وارد مذاب گردد. از طرفی در آلیاژهای هیپریوتکتیک Al-Si، عموماً فسفر جهت جوانه زنی و ظریف سازی فاز سیلیسیم اولیه (Primary Silicon) به مذاب افزوده می‌شود.

همچنین در آلیاژهای یوتکتیک حاوی تقریباً ۱۲ درصد وزنی سیلیسیم (آلیاژهای پیستون)، که احتمال تشکیل سیلیسیم اولیه کم است، به منظور افزایش مقاومت به سایش، فسفر جهت پایداری و افزایش احتمال تشکیل سیلیسیم اولیه به مذاب افزوده می‌شود.

از اینرو ورود فسفر به آلیاژ مذاب طی عملیات بازیابی قراضه‌ها نیز محتمل است.

بر اساس تحقیقات به عمل آمده [8]، اثرات متقابل فسفر با استرانسیم و سدیم سبب کاهش و یا محو اثرات عملیات بهسازی می‌گردد.

در این ارتباط نیز گزارش شده است که افزایش مقدار مفید عنصر بهساز در مذاب می‌تواند سبب غلبه بر اثرات منفی فسفر گردد. Scalliet و Garat [8]، اثرات متقابل فسفر و استرانسیم بر ساختار سیلیسیم یوتکتیکی را بصورت نمودارهای موجود در شکل ۱ نشان داده‌اند.



شکل ۱. اثرات متقابل فسفر - استرانسیم بر ساختار سیلیسیم در آلیاژ A۳۵۶ [۸]

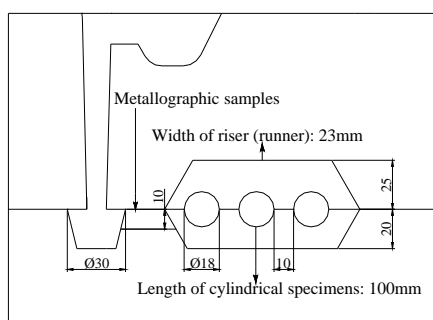
F=fibrous; L=Lamellar; A=acicular

همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش مقدار فسفر محدوده پایداری سیلیسیم با مورفولوژی سوزنی شکل و لایه‌ای شکل (Lamellar) افزایش می‌یابد.

نکته قابل توجه بر اساس شکل ۱ اینکه به هر حال هر چقدر که غلظت ناخالصی فسفر در آلیاژ افزایش یابد باز هم با افزایش غلظت

در هر مرحله، پس از ذوب ۲kg از شمش مذکور و رسیدن دمای مذاب به  $760^{\circ}\text{C}$ ، حدود  $0.003$  درصد وزنی (۳۰ppm) فسفر از طریق قرص‌های جوانه‌زای فسفردار شرکت فارس ایران (Nucleant-11M) به مذاب افزوده شد و پس از آرام شدن مذاب و اتمام عملیات افزایش فسفر، مقدار مورد نظر از استرانسیم ( $0.003$ ،  $0.006$ ،  $0.009$ ،  $0.012$ ،  $0.015$ ،  $0.02$ ،  $0.03$ ،  $0.04$  و  $0.06$  درصد وزنی) از طریق آمیزان  $10\% \text{Al-Sr}$  به مذاب افزوده شد. ۲۰ دقیقه زمان جهت انحلال کامل استرانسیم در نظر گرفته شد و پس از آن مذاب درون قالب نمونه‌های گرد کشش ریخته‌گری شد.

نمونه‌های گرد کشش همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است با استفاده از ماسه سیلیسی، چسب سیلیکات سدیم و روش خودگیری  $\text{CO}_2$  قالب‌گیری شدند. به منظور بررسی ساختار میکروسکوپی آلیاژهای مختلف، نمونه مورد نظر از ابتدای راهبار تهیه شد. از میکروسکوپ نوری Nikon FX-35DX مجهز به نرم افزار Snazzi در تهیه تصاویر متالوگرافی استفاده شد. با توجه به اثرات نسبی عملیات حرارتی بر ساختار میکروسکوپی و به منظور بررسی اثر مقادیر مختلف استرانسیم بر ساختار میکروسکوپی، نمونه‌های مورد نظر در شرایط ریختگی مورد مطالعه قرار گرفتند. از طرفی از آنجائی که قطعات ریختگی از آلیاژهای بهسازی شده عمدتاً پس از عملیات حرارتی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند، جهت بررسی خواص مکانیکی، نمونه‌های کشش قبل از ماشینکاری تحت عملیات حرارتی محلولی و رسوب سختی قرار گرفتند. پس از آن نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM-B557M ماشینکاری شدند. آزمایش کشش با استفاده از دستگاه MTS مدل 20/M و با سرعت ثابت  $2/5 \text{ mm/min}$  انجام شد.



شکل ۲. نمایش نموداری مدل و روش قالب‌گیری در ریخته‌گری نمونه‌های گرد کشش

### ۳. نتایج

مقدار ناخالصی فسفر در نمونه‌های ریختگی پس از افزایش فسفر به طور متوسط حدود ۴۰ppm بدست آمد. این نشاندهنده آنست که مقدار این عنصر در شمش اولیه در حدود ۱۰ppm بوده است، از اینرو جهت سهولت در نگارش متن

با توجه به شرکت استرانسیم در تشکیل ترکیبات فسفیدی، مقدار کلی استرانسیم باید در حدی باشد که همواره پسماند کافی از استرانسیم آزاد محلول در مذاب برای ایفاء نقش بهسازی وجود داشته باشد [1,8].

مرور بر منابع نشاندهنده این است که بیشتر محققین اثرات متقابل ناخالصی فسفر و عناصر بهساز را فقط بر ساختار میکروسکوپی سیلیسیم مورد بررسی قرار داده‌اند و عموماً ضمن تأیید اثرات مضر فسفر، افزایش مقدار عنصر بهساز را جهت خنثی سازی اثرات مضر آن توصیه نموده‌اند.

از طرفی بر اساس تحقیقات به عمل آمده [2-4]، [۱۲-۱۴] عملیات بهسازی با استرانسیم سبب تشکیل و یا افزایش تخلخل‌های ریز و پراکنده در قطعات ریختگی می‌گردد و هر چه مقدار استرانسیم افزوده شده بیشتر باشد تعداد و ابعاد تخلخل‌های مذکور بیشتر خواهد شد.

از اینرو قابل پیش بینی است که عملیات بهسازی دارای دو اثر متضاد بر خواص مکانیکی قطعات ریختگی باشد. این عملیات از یک سو با اصلاح ساختار سیلیسیم شرایط را برای بهبود خواص مکانیکی فراهم می‌کند، از طرفی با افزایش تخلخل‌های ریز و پراکنده سبب کاهش خواص مکانیکی می‌گردد [11].

در این پژوهش دو موضوع مورد بررسی قرار خواهد گرفت. اول اینکه در حضور مقدار نسبتاً زیاد از ناخالصی فسفر آیا می‌توان با افزایش مقدار استرانسیم به یک ساختار کاملاً بهسازی شده رسید. دوم اینکه این افزایش استرانسیم و بهبود احتمالی ساختار چه تأثیری بر خواص مکانیکی خواهد داشت.

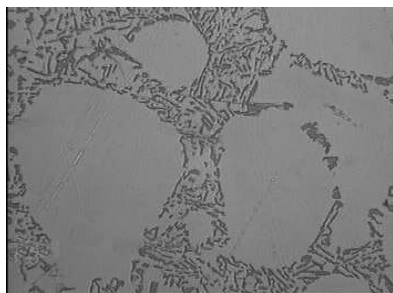
## ۲. آزمایشات تجربی

آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ بود. بدین منظور شمش ۳۵۶ ایرالکو با ترکیب شیمیائی ارائه شده در جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفت. مقدار ناخالصی فسفر در شمش مورد استفاده در حدی نبود که بروش آنالیز اسپکترومتری قابل تشخیص و اندازه‌گیری باشد (حداقل مقدار فسفر برای چنین آنالیزی باید حدود ۲۰ppm باشد).

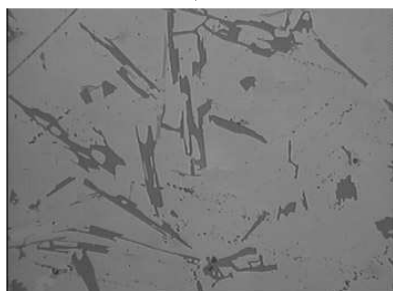
جدول ۱. ترکیب شیمیائی شمش A۳۵۶ مورد استفاده در پژوهش

Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Al
۷/۴۵	۰/۱۱	۰/۰۳	۰/۴۵	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۱	قیمانده

عملیات ذوب در کوره مقاومتی با بوتۀ کاربید سیلیسیم انجام شد. به منظور بررسی اثرات فسفر بر ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ A۳۵۶ بهسازی شده با استرانسیم، آلیاژهای بدون افزودن فسفر و پس از افزایش فسفر حاوی مقادیر مختلف استرانسیم تهیه و ریخته‌گری شدند.



الف) کم فسفر



ب) پر فسفر

شکل ۴. ساختار میکروسکوپی آلیاژ A۳۵۶ بهسازی شده با ۰/۰۰۹ درصد وزنی استرانسیم (بزرگنمایی ۴۰۰×)

با افزایش مقدار استرانسیم به ۰/۰۱۲ درصد وزنی، ساختار سیلیسیم در آلیاژ کم فسفر تقریباً به حالت رشته‌ای ظریف و کاملاً بهسازی شده رسید.

همانطور که شکل ۵ نشان می‌دهد در این شرایط مقدار ساختار لایه‌ای شکل در زمینه بسیار ناچیز است و درجه بهسازی را می‌توان در محدوده ۴-۵ استاندارددهی نمود.

این در حالی است که در آلیاژ پر فسفر حتی افزودن ۰/۰۱۲ درصد وزنی استرانسیم نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مورفولوژی سیلیسیم نداشته است و باز هم فقط بطور نسبی این فاز را ظریف تر کرده است.

با افزایش مقادیر بیشتری از استرانسیم، ساختار فاز سیلیسیم در آلیاژ پرفسفر به طور نسبی اصلاح گردید. بهسازی نسبی ساختار سیلیسیم با افزایش ۰/۰۱۵ درصد وزنی استرانسیم در شکل ۶ نشان داده شده است.

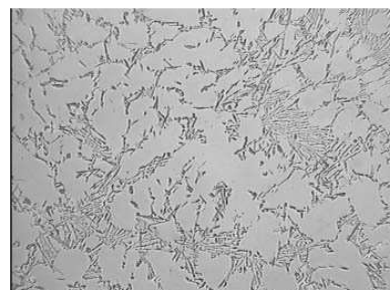
در این شرایط مورفولوژی سیلیسیم از حالت سوزنی شکل به حالت لایه‌ای شکل (درجه بهسازی ۲) تبدیل شد. افزایش مقدار استرانسیم به ۰/۰۳ درصد وزنی شکل ۷ باعث بهسازی بیشتر سیلیسیم و مشاهده ساختار رشته‌ای شکل در کنار ساختار لایه‌ای شکل گردید (درجه بهسازی ۳). گرچه افزایش مقدار استرانسیم به آلیاژ پر فسفر سبب اصلاح بیشتر ساختار سیلیسیم گردید ولی حتی افزایش ۰/۰۶ درصد وزنی استرانسیم نیز نتوانست شرایط را برای احراز یک ساختار کاملاً بهسازی شده فراهم نماید.

در ادامه چنین آلیاژهائی به عنوان آلیاژهای کم فسفر در نظر گرفته می‌شوند.

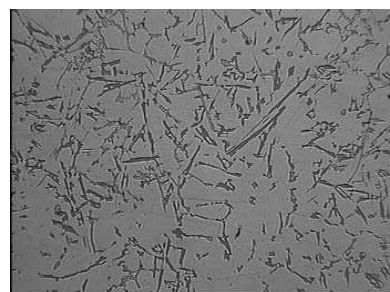
از طرفی آندسته از نمونه‌هائی که به مذاب آنها قبل از ریخته‌گری مقدار ۳۰ ppm فسفر اضافه شده است به عنوان آلیاژهای پر فسفر در نظر گرفته می‌شوند.

ساختار سیلیسیم یوتکتیکی در آلیاژ A۳۵۶ در شرایط بهسازی نشده در هر دو آلیاژ پر فسفر و کم فسفر همانطور که انتظار می‌رفت به صورت سوزنی شکل بود.

افزودن استرانسیم به مقدار ۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۶ درصد وزنی (۳۰ ppm و ۶۰ ppm) سبب اصلاح نسبی مورفولوژی فاز سیلیسیم در آلیاژ کم فسفر گردید، ولی این مقادیر از استرانسیم تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مورفولوژی سیلیسیم در آلیاژهای پر فسفر نداشت. این موضوع به خوبی در شکل ۳ نشان داده شده است.



الف) کم فسفر (Sr=۳ ppm)



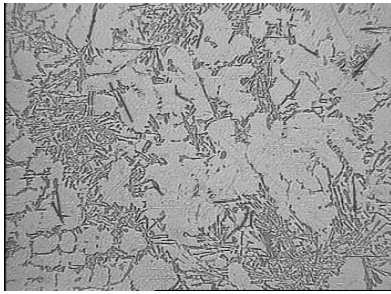
ب) پر فسفر (Sr=۶۰ ppm)

شکل ۳. ساختار میکروسکوپی آلیاژ ۳۵۶ بهسازی شده با استرانسیم (بزرگنمایی ۱۰۰×)

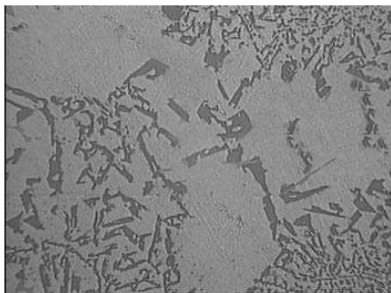
در شکل ۴ ساختار میکروسکوپی دو آلیاژ در شرایط بهسازی شده با ۰/۰۰۹ درصد وزنی استرانسیم نشان داده شده است.

همانطور که ملاحظه می‌گردد افزودن این مقدار استرانسیم به آلیاژ کم فسفر سبب اصلاح و ظریف سازی قابل توجه فاز سیلیسیم گردیده است. درجه بهسازی حاصله در این شرایط را می‌توان در حد درجات ۳-۴ ارزیابی نمود.

از طرفی در آلیاژ پر فسفر، افزایش ۰/۰۰۹ درصد وزنی استرانسیم تأثیری بر اصلاح مورفولوژی سیلیسیم نداشته است و فقط تا حدی سبب ظریف تر شدن فاز سیلیسیم سوزنی شکل در ساختار گردیده است.

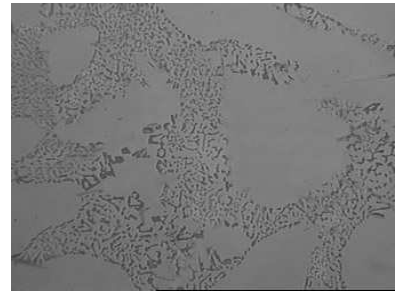


الف) بزرگنمایی ۱۰۰×

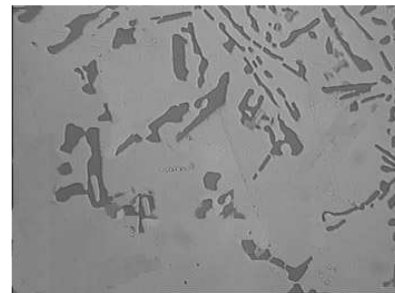


ب) بزرگنمایی ۴۰۰×

شکل ۷. ساختار میکروسکوپی آلیاژ A۳۵۶ حاوی ناخالصی فسفر بهسازی شده با ۰/۰۳ درصد وزنی استرانسیم

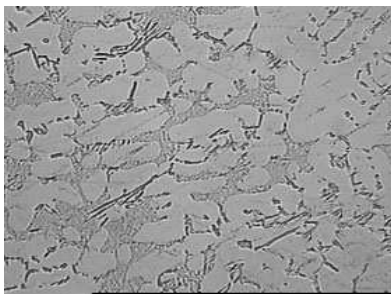


الف) کم فسفر

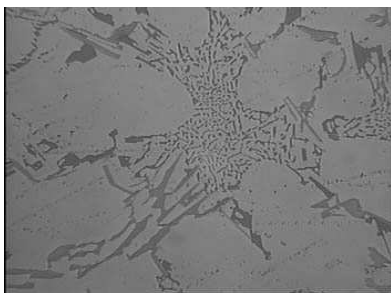


ب) پر فسفر

شکل ۵. ساختار میکروسکوپی آلیاژ A۳۵۶ بهسازی شده با ۰/۰۱۲ درصد وزنی استرانسیم (بزرگنمایی ۴۰۰×)

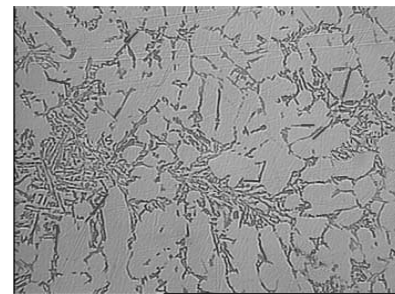


الف) بزرگنمایی ۱۰۰×

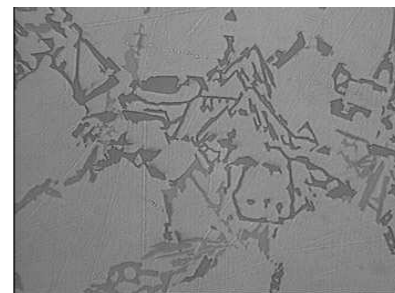


ب) بزرگنمایی ۴۰۰×

شکل ۸. ساختار میکروسکوپی آلیاژ A۳۵۶ حاوی ناخالصی فسفر بهسازی شده با ۰/۰۶ درصد وزنی استرانسیم



الف) بزرگنمایی ۱۰۰×



ب) بزرگنمایی ۴۰۰×

شکل ۶. ساختار میکروسکوپی آلیاژ A۳۵۶ حاوی ناخالصی فسفر بهسازی شده با ۰/۰۱۵ درصد وزنی استرانسیم

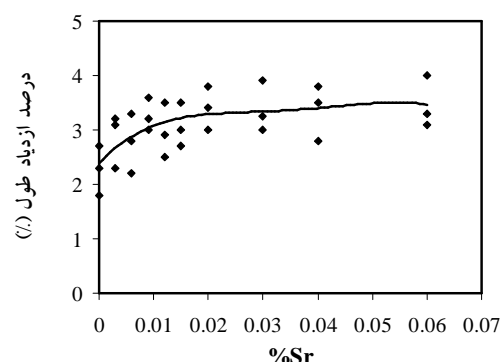
در تصاویر ۹ و ۱۰ تغییرات خواص مکانیکی آلیاژ A۳۵۶ پر فسفر با تغییرات غلظت استرانسیم در شرایط عملیات حرارتی شده، مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده در شکل ۹، عملیات بهسازی با استرانسیم سبب افزایش نسبی درصد

در واقع در این شرایط با وجود تشکیل ساختار رشته‌ای شکل سیلیسیم در بیشتر مناطق، باز هم در برخی از قسمت‌ها سیلیسیم به شکل لایه‌ای و یا حتی سوزنی شکل مشاهده شد. این موضوع به خوبی در شکل ۸ نشان داده شده است.

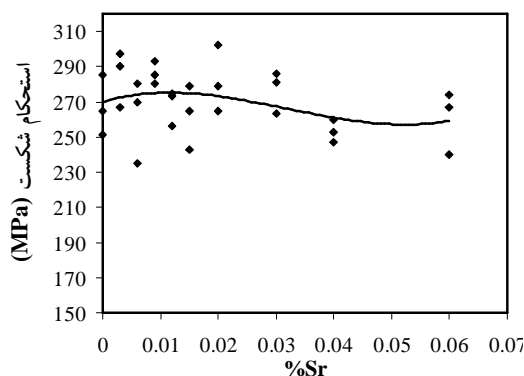
استرانسیم نیز نمی تواند یک ساختار کاملاً بهسازی شده را بوجود آورد. در این شرایط ساختار سیلیسیم ناهمگن است و انواع مورفولوژی های، رشته ای شکل ظریف، لایه ای شکل و حتی سوزنی شکل درشت نیز در زمینه یافت می شوند. ناهمگنی ساختار سیلیسیم در آلیاژ بهسازی شده با ۰/۰۳ درصد وزنی استرانسیم نیز مشاهده می گردد (شکل ۷). این در حالی است که در آلیاژ کم فسفر ساختار سیلیسیم بهسازی شده و تا حد زیادی همگن است (تصاویر ۴-۵). همانطور که ذکر شد استرانسیم با تشکیل ترکیبات فسفیدی و در واقع با فسفر زدائی که سبب کاهش مقدار ترکیب AIP در مذاب می شود، سبب خنثی سازی اثرات منفی فسفر شده و مقدار استرانسیم باقی مانده در مذاب سبب بهسازی ساختار سیلیسیم می گردد. با این وجود همانند بسیاری از واکنش های شیمیائی قابل پیش بینی است که وقتی در دمای عملیات کیفی مذاب واکنش تشکیل ترکیبات فسفیدی استرانسیم به تعادل می رسند، باز هم مقداری فسفر محلول در مذاب وجود دارد. این مقدار البته در حدی نیست که سبب تشکیل مقادیر قابل توجهی از ترکیب مضر AIP گردد. با شروع انجماد یوتکتیکی و تبلور سیلیسیم، استرانسیم آزاد و محلول در مذاب توسط فاز سیلیسیم جذب می شود که این خود سبب بهسازی فاز سیلیسیم می گردد [1].

همچنین با کاهش دما و افزایش سیلیسیم و استرانسیم پس زده شده توسط جبهه انجماد، تمایل شیمیائی برای تشکیل ترکیبات بین فلزی غنی از استرانسیم و سیلیسیم افزایش می یابد [3-4]. بدیهی است که در اواخر انجماد یوتکتیکی مقدار استرانسیم آزاد در مذاب قابل توجه نباشد. این در حالیست که فسفر باقی مانده در مذاب توسط جبهه انجماد پس زده می شود، بنابر این در اواخر انجماد غلظت فسفر در مذاب بین سلولهای یوتکتیکی قابل توجه می گردد. در این شرایط ممکن است مقدار یا اکتیویته استرانسیم باقی مانده در حدی نباشد که واکنش تشکیل ترکیبات فسفیدی استرانسیم دار را به واکنش تشکیل AIP مرجع گرداند. تشکیل احتمالی ترکیب AIP در برخی از مناطق بین سلولی و جوانه زنی سیلیسیم توسط این ترکیب سبب تشکیل سیلیسیم لایه ای و یا سوزنی شکل در این مناطق می گردد که این پدیده خود می تواند سبب ناهمگنی در ساختار سیلیسیم شود (شکل ۸). به هر حال نکته مهمی که در این مرحله باید مورد توجه قرار گیرد این است که در صورتی که مقدار ناخالصی فسفر در آلیاژهای Al-Si از یک حد مشخص فراتر رود، دیگر امکان رسیدن به یک ساختار کاملاً بهسازی شده وجود نخواهد داشت. در چنین شرایطی مقدار ناخالصی فسفر در مذاب در حدی است که حتی افزایش مقادیر نسبتاً زیاد استرانسیم نیز نمی تواند سبب خنثی سازی کامل اثرات آن گردد. در واقع وجود احتمالی ترکیب AIP و یا وجود مقادیر نسبتاً زیاد از ترکیبات چندگانه فسفیدی حاوی استرانسیم و

ازدیاد طول شکست شده است. البته افزایش قابل توجه درصد ازدیاد طول در همان مقادیر کمتر استرانسیم (کمتر از ۰/۰۲ درصد وزنی که عمدتاً در عملیات بهسازی مورد استفاده قرار می گیرد) مشاهده می شود و افزایش غلظت استرانسیم در مقادیر بیش از ۰/۰۲ درصد وزنی با وجود اصلاح نسبی ساختار سیلیسیم نتوانسته است سبب بهبود انعطاف پذیری (Ductility) گردد. از طرفی عملیات بهسازی با مقادیر مختلف استرانسیم تأثیر مشخصی بر استحکام شکست این آلیاژ در شرایط عملیات حرارتی شده نداشته است. این موضوع به خوبی در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۹. تغییرات درصد ازدیاد طول با غلظت استرانسیم در آلیاژ A۳۵۶ حاوی ۴۰ppm ناخالصی فسفر



شکل ۱۰: تغییرات استحکام شکست با غلظت استرانسیم در آلیاژ A۳۵۶ حاوی ۴۰ppm ناخالصی فسفر

#### ۴. سگالش

نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می دهد که وجود مقدار زیاد از ناخالصی فسفر در آلیاژ A۳۵۶ سبب کاهش و یا حذف اثرات استرانسیم در اصلاح ساختار سیلیسیم یوتکتیکی می گردد (تصاویر ۳-۷). همانطور که مشاهده می گردد (شکل ۸)، در حضور ۰/۰۰۴ درصد وزنی فسفر حتی افزایش ۰/۰۶ درصد وزنی

نخواهد شد بلکه بر اساس بررسی‌های به عمل آمده [۱۲]، این تخلخل‌ها خود سبب افزایش نشستی پذیری خواهند گردید. با توجه به اینکه در حال حاضر حجم زیادی از آلیاژهای ریختگی آلومینیم از طریق بازیابی قراضه‌ها تهیه می‌شوند لذا شناسائی و دسته‌بندی ضایعات مورد استفاده و همچنین انجام عملیات فسفر زدائی مذاب جهت پیشگیری از مشکلات فوق ضروری بنظر می‌رسد.

### ۵. نتیجه گیری

۱. وجود ناخالصی فسفر در یک آلیاژ Al-Si و اثرات متقابل آن با استرانسیم که طی عملیات بهسازی به مذاب افزوده شده است سبب کاهش و یا حذف اثرات استرانسیم در اصلاح ساختار سیلیسیم یوتکتیکی می‌گردد.
۲. افزایش مقدار استرانسیم می‌تواند سبب جبران اثرات منفی فسفر بر ساختار میکروسکوپی گردد، گرچه در شرایطی که مقدار ناخالصی فسفر زیاد است، رسیدن به یک ساختار کاملاً بهسازی شده بسیار مشکل و یا غیر ممکن خواهد بود.
۳. وجود ناخالصی فسفر در یک آلیاژ Al-Si و اثرات متقابل آن با استرانسیم سبب کاهش و یا حذف اثرات مثبت استرانسیم بر خواص مکانیکی (درصد ازدیاد طول) می‌گردد. نتایج بدست آمده نشان داد در آلیاژ A۳۵۶ حاوی ۴۰ppm فسفر، استفاده از مقادیر مرسوم استرانسیم (۰/۰۲-۰/۰۱ درصد وزنی) سبب رسیدن به ساختار بهسازی شده نمی‌گردد. افزایش مقدار استرانسیم به مقادیری بیش از مقادیر مرسوم (۰/۰۶-۰/۰۲ درصد وزنی) گرچه سبب بهبود ساختار سیلیسیم می‌گردد ولی از سوی دیگر با افزایش تخلخل در قطعه ریختگی، در کل سبب بهبود خواص مکانیکی نخواهد گردید.

### ۶. تشکر و قدردانی

از پرسنل محترم کارگاهها و آزمایشگاههای گروه مهندسی متالورژی و مواد در دانشگاه شهید رجائی بخاطر مساعدت‌های صمیمانه در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

### منابع

- [1] Gruzleski J.E., Closset, B. M., "The treatment of liquid Aluminium-Silicon alloy"s, AFS, Des Olaines, IL, 1990.
- [2] Miresmaeili S. M., Shabestari, S. G., Boutorabi, S. M. A., "The Effect of Sr-modification Treatment on Porosity Formation of Reduced Pressure 319 Al-alloy Castings", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol.42, 2003, No. 2, 245-252.
- [3] Miresmaeili S. M., Shabestari, S. G., Boutorabi, S. M. A., "Effect of Melt Filtration on Porosity Formation in Sr-modified A356 Aluminium Alloy", International Journal of Cast Metals Res., Vol. 16, 2003, No. 6, 541-548.

آلومینیم در مذاب، از تشکیل فاز سیلیسیم یوتکتیکی با ساختار کاملاً بهسازی شده جلوگیری می‌کنند. از طرفی عملیات بهسازی آلیاژهای Al-Si عمدتاً به منظور افزایش انعطاف پذیری و مقاومت به ضربه قطعات ریختگی انجام می‌شود و هر چه درجه بهسازی ساختار سیلیسیم بالاتر باشد، این افزایش در انعطاف پذیری بیشتر خواهد بود [1]. نتایج بدست آمده در این پژوهش (شکل ۹) نیز نشان می‌دهد که در یک آلیاژ A۳۵۶ حاوی ناخالصی فسفر، با افزایش مقدار استرانسیم افزوده شده در ابتدا با ظریف‌تر شدن ساختار سیلیسیم درصد ازدیاد طول به طور نسبی افزایش یافته است ولی پس از آن افزایش بیشتر استرانسیم گرچه سبب تغییر ساختار سیلیسیم از سوزنی شکل به لایه ای و در ادامه تا حدی رشته‌ای شکل ظریف شده است ولی این تغییر در ساختار اثر قابل ملاحظه‌ای بر درصد ازدیاد طول نداشته است. در واقع افزایش مقدار استرانسیم از حدود ۰/۰۲ درصد وزنی تا ۰/۰۶ درصد وزنی گرچه سبب بهبود ساختار شده است ولی بر خواص مکانیکی تأثیری نداشته است. همچنین با توجه به شکل ۱۰ عملیات بهسازی با مقادیر مختلف استرانسیم تأثیر مشخصی بر استحکام نمونه‌ها نداشته است. در توجیه این نتایج می‌توان به پدیده افزایش تخلخل در آلیاژهای بهسازی شده با استرانسیم اشاره کرد. همانطور که در قسمت مقدمه ذکر شد عملیات بهسازی دارای دو اثر متضاد بر خواص مکانیکی قطعات ریختگی است. این عملیات از یک سو با اصلاح ساختار سیلیسیم شرایط را برای بهبود خواص مکانیکی فراهم می‌کند، از سوی دیگر با افزایش تخلخل‌های ریز و پراکنده در قطعه سبب کاهش خواص مکانیکی می‌گردد. اینکه بر این دو اثر متضاد سبب افزایش و یا کاهش خواص مکانیکی می‌گردد به درجه بهسازی حاصله و مقدار تخلخل افزایش یافته بستگی دارد. در توجیه نمودار بدست آمده در شکل ۹ می‌توان اینطور توضیح داد که در ابتدا افزایش تخلخل در اثر افزایش استرانسیم قابل توجه نبوده، از اینرو ظریف شدن و اصلاح نسبی ساختار سیلیسیم سبب افزایش نسبی درصد ازدیاد طول گردیده است. با افزایش مقدار استرانسیم، گرچه ساختار تا حد بیشتری اصلاح شده است ولی اثرات منفی افزایش مقدار تخلخل بر خواص مکانیکی در حدی بوده که اثرات مثبت اصلاح ساختار را از بین برده است.

در یک ارزیابی کلی نتایج این تحقیق بیانگر لزوم توجه جدی به جلوگیری از ورود ناخالصی فسفر به آلیاژهایی است که قرار است در مراحل بعدی پس از عملیات بهسازی مورد استفاده قرار گیرند زیرا در صورت آلوده شدن مذاب چنین آلیاژهایی به مقادیر نسبتاً زیاد فسفر، رسیدن به ساختار بهسازی شده مشکل خواهد بود. همچنین افزایش مقدار استرانسیم گرچه ممکن است تا حدی اثرات منفی فسفر بر ساختار میکروسکوپی را بهبود بخشد ولی با افزایش تخلخل در قطعات، نه تنها خواص مکانیکی مطلوب حاصل

- [11] Apelian D., Sigworth G. K., Whaler K. R., "Assessment of grain refining and modification of Al-Si foundry alloys by thermal analysis", AFS Trans, Vol. 92, 1984, 297-307
- [۱۲] میراسماعیلی، سیدمهدی، شبستری، سعید، "بررسی نقش تخلخل در آلیاژهای Al-Si بهسازی شده جهت تولید قطعات آلومینیومی با کیفیت بالا"، مجله ریخته‌گری، سال بیست و چهارم، شماره ۷۵، صفحات ۳۲-۴۲، ۱۳۸۲.
- [۱۳] میراسماعیلی، سید مهدی، شبستری، سعید، بوتراپی، محمد علی، "اثرات متقابل هیدروژن محلول در مذاب و عملیات بهسازی با استرانسیم بر تخلخل در آلیاژ آلومینیوم ۳۱۹"، مجله ریخته‌گری، سال بیست و پنجم، شماره ۷۶، صفحات ۱۱-۲، ۱۳۸۳.
- [۱۴] میراسماعیلی، سید مهدی، شبستری، سعید، بوتراپی، محمد علی، "اثرات متقابل عملیات بهسازی با استرانسیم، سرعت انجماد و قرار دادن فیلتر در سیستم راهگامی بر تخلخل در آلیاژ آلومینیوم ۳۵۶"، شانزدهمین سمینار سالانه جامعه ریخته‌گران ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۳.
- [4] Miresmaeili S. M., Campbell, J., Shabestari, S. G., Boutorabi, S. M. A., "Precipitation of Sr-rich Intermetallic Particles and their Effect on Pore Formation in A356 Alloy", Journal of Metallurgical and Materials Transaction. A., Vol. 53, 2005, 342-351.
- [5] Nagel G., Portulier R., "Structural modification of Al-Si alloys by antimony treatment", AFS Trans Cast Metals Journal, Vol. 5, 1980, 2-6.
- [6] Handiak N., Gruzleski J. E., Argo D., "Sodium, strontium and antimony interactions during modification of AS7G03 (A356) alloys", AFS Trans, Vol. 95, 1989, 31-38.
- [7] Wang W., Gruzleski J. E., "Sodium and strontium modification in the presence of antimony", Material Science and Technology, Vol. 5, 1989, 471-475.
- [8] Garat M., Scalliet R., "A review of recent French casting alloy development", AFS Trans, Vol. 87, 1987, 549-562.
- [9] Heusler L., Schneider W., "Recent investigations of influence of P on Na and Sr modification of Al-Si alloys", AFS Trans, Vol. 105, 1997, 915-921.
- [10] Shabestari S. G., Gruzleski J. E., "Modification of iron intermetallics by strontium in 413 aluminium alloys", AFS Trans, Vol. 103, 1995, 285-293.