

ارزیابی نرخ بهسازی سیلیسیم یوتکتیک با تکنیک آنالیز حرارتی در آلیاژ آلومینیم ۳۱۹

سعید شبستری^۱، مهدی ملکان^۲ و سپیده قدرت^۳

چکیده

در آلیاژهای ریختگی آلومینیم-سیلیسیم فازهای سیلیسیم یوتکتیک به صورت تیغه‌های خشن و سوزنی شکل تشکیل می‌شوند که این نوع مورفولوژی موجب افت شدید خواص مکانیکی قطعات می‌گردد. لذا از عملیات بهسازی جهت تبدیل این گونه فازها به حالت رشته ای و کرووی استفاده می‌شود. در این تحقیق جهت بهسازی ساختار آلیاژ ۳۱۹ از آمیزان Al-10Sr استفاده شد و با استفاده از ابزار دقیق و پیشرفته آنالیز حرارتی، منحنی‌های سرد شدن و مشتق اول متناظر آنها برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف استرانسیم ترسیم و از بررسی اطلاعات حاصل از آنها دماهای جوانه‌زنی ($T_{N,Si}$) و رشد ($T_{G,Si}$) سیلیسیم یوتکتیک تعیین شد. نتایج نشان داد که با افزایش عنصر استرانسیم دماهای جوانه‌زنی ($T_{N,Si}$) و رشد ($T_{G,Si}$) یوتکتیک کاهش می‌یابد. تغییرات افت دمای رشد یوتکتیک نسبت به حالت بهسازی نشده که با پارامتر $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ بیان گردید به عنوان بهترین پارامتر برای کنترل بهسازی معرفی شد. $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ با کاهش $T_{G,Si}$ در حالت بهسازی شده، افزایش یافته و پس از محدوده‌ی wtSr (۰/۱۶-۰/۱۲) کاهش می‌یابد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که از آنالیز حرارتی می‌توان به عنوان یک ابزار دقیق و سریع در خط تولید قطعات آلومینیمی برای اندازه گیری بهسازی سیلیسیم یوتکتیک استفاده نمود.

کلمات کلیدی: بهسازی سیلیسیم یوتکتیک، آنالیز حرارتی، آلیاژ آلومینیم ۳۱۹

۱- مقدمه

سیلیسیم از تیغه‌های خشن به ساختار ظریف تر بستگی دارد [۱-۳].

فرایند بهسازی یوتکتیک Al-Si از طریق افزودن بهسازی‌های شیمیایی نظیر استرانسیم، سدیم و آنتیموان یا از طریق انجماد سریع انجام می‌شود. استفاده از استرانسیم در صنعت آلومینیم به خاطر جایجایی و کنترل آسان، سرعت بهسازی خوب، زمان اثرگذاری بیشتر و میرایی کمتر متداول تر است. میزان بهسازی با توجه به مقدار ماده بهسازی و یا سرعت انجماد می‌تواند تغییر کند. بر اساس استاندارد AFS نرخ بهسازی سیلیسیم یوتکتیک از یک تا شش تقسیم‌بندی شده است، عدد یک معادل ریز ساختار بهسازی نشده (شامل سیلیسیم‌های خشن و تیغه‌ای) و عدد شش معادل ریزساختار بهسازی شده کامل (شامل سیلیسیم‌های رشته‌ای بسیار ریز)، تعریف می‌گردد [۲-۶]. معمولاً، نرخ بهسازی توسط متالوگرافی و بررسی ریزساختاری تعیین می‌شود که این روش اشکالات زیادی

آلیاژهای آلومینیم ۳۱۹ به طور گسترده در صنعت خودرو سازی استفاده می‌شود. سیلیسیم یکی از مهم‌ترین عناصر آلیاژی در این آلیاژها می‌باشد. این عنصر قابلیت ریخته‌گری و ماشین کاری آلومینیم را بهبود می‌بخشد. آلیاژهای Al-Si حاوی تیغه‌های خشن و سوزنی کریستال‌های سیلیسیم هستند. این نوع مورفولوژی موجب تردی و افت شدید خواص مکانیکی قطعات ریختگی می‌گردد. بنابراین استفاده مناسب از آلیاژهای آلومینیم ۳۱۹ به اصلاح ساختار

مقاله در تاریخ ۸۷/۴/۱ دریافت و در تاریخ ۸۷/۱۰/۲۳ به تصویب نهایی رسید.

^۱ استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، پست الکترونیکی shabestari@iust.ac.ir
^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران
^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

تعیین دماهای جوانه زنی و رشد یونکتیک سیلیسیم و تأثیر عنصر بهساز (استرانسیم) بر هر یک از این دماها و همچنین تعیین میزان اختلاف دمای رشد یونکتیک بعد عملیات بهسازی با قبل از آن و اطلاعات سودمند دیگر حاصل می‌گردد که از مجموعه نتایج حاصل از مطالعات ریز ساختاری و اطلاعات حاصل از منحنی‌های سرد شدن، محدوده بهینه عنصر استرانسیم جهت بهسازی کامل ریز ساختار آلیاژ ۳۱۹ تعیین و مشخص می‌گردد [۱۰، ۱۱، ۲۲ و ۲۳].

۲- روش تحقیق

برای انجام هر آزمایش حدود ۲Kg شمش اولیه آلیاژ آلومینیم ۳۱۹ شرکت ایرالکو، در کوره مقاومت الکتریکی، شارژ و ذوب گردید. برای به دست آوردن مذابی با ترکیب شیمیایی آلیاژ ۳۱۹ و ویژگی‌های مورد نظر، بعد از ذوب کامل، آمیزان Al-75Mn و Al-50Mg به آن اضافه شد. برای بهسازی از آمیزان Al-10Sr استفاده شد که در مقادیر مختلف از صفر تا ۰/۰۸٪ استرانسیم و ۲۰ دقیقه قبل از نمونه گیری به مذاب اضافه گردید. در هر مرحله پس از اضافه کردن آمیزانها، مذاب هم زده می‌شد تا حل شدن عناصر به طور یکنواخت در کل مذاب صورت گیرد. مذاب در داخل کوره در دمای $720 \pm 5^\circ\text{C}$ ثابت نگه داشته شد. آنالیز ترکیب شیمیایی شمش اولیه آلیاژ ۳۱۹ و مذاب آلیاژ ۳۱۹ در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱ آنالیز ترکیب شیمیایی شمش اولیه آلیاژ ۳۱۹

و مذاب آلیاژ ۳۱۹

آلیاژ	درصد وزنی عناصر						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
شمش ۳۱۹	۵/۴۴	۰/۱۳	۳/۲۵	-	۰/۱	۰/۱	Bal- ance
نمونه ذوب ۳۱۹	۵/۷۶	۰/۱۵	۳/۳۸	۰/۲۳	۰/۱	۰/۱	Bal- ance
استاندارد ۳۱۹	۵/۵-۶	۰/۸	۳-۴	۰/۵	۰/۱	۰/۱	Bal- ance

دارد، از آن جمله می‌توان به خطای اپراتور، محدودیت در تعداد نمونه‌های مورد آزمایش، صرف زمان زیاد و مخرب بودن آن اشاره کرد. تعیین نرخ بهسازی سیلیسیم به همراه خط تولید (On-Line) برای کنترل کیفیت قطعات ریختگی آلیاژ آلومینیم بسیار پر اهمیت است. یکی از روش‌های رسیدن به این هدف مهم، بررسی انجماد یک نمونه کوچک از مذاب و تعمیم نتیجه آن به قطعه اصلی است که برای این کار از تحلیل و بررسی منحنی سرد شدن نمونه با استفاده از روش آنالیز حرارتی استفاده می‌شود [۲، ۴، ۷، ۱۰].

منحنی سرد شدن هر آلیاژ، تعیین کننده رفتار انجمادی و تغییرات فازی آن است. در روش‌های آنالیز حرارتی، یک ترموکوپل، درون قالب قرار گرفته و در هر لحظه تغییرات درجه حرارت مذاب به یک دستگاه ثبت کننده فرستاده می‌شود. با رسم منحنی دما- زمان برای انجماد مذاب و تحلیل آن با روش‌های ریاضی (و به کمک کامپیوتر) می‌توان به نتایج کیفی و کمی مفیدی دست یافت. مذاب هر آلیاژ در هنگام انجماد و تحت شرایط ترمودینامیکی مشخص و یکسان، همواره رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهد. بنابراین منحنی سرد شدن آن همانند اثر انگشت انسان، مشخص کننده هویت و ویژگی‌های آن است. با توجه به مسایل فوق، بسیاری از محققان اظهار داشته‌اند که آنالیز حرارتی یک روش ساده، سریع، قابل اطمینان و با دقت مناسب است که می‌تواند جایگزین یا تکمیل کننده‌ای برای روش‌های کوانتومتری و متالوگرافی و همچنین ابزار منحصر به فرد برای کنترل کیفی و پیش‌بینی عملیات اصلاح ساختار باشد. معمولاً در کارخانجات برای بررسی ساختار قطعه از تخریب و متالوگرافی قطعه اصلی استفاده می‌شود که حداقل ۱۵ دقیقه به طول می‌انجامد، در صورتی که آنالیز حرارتی قادر است در زمانی حدود ۳ دقیقه این اطلاعات را با دقت مناسب ارایه دهد [۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵]. از این ابزار تاکنون برای تخمین ترکیب شیمیایی آلیاژ، بررسی قابلیت آن در تولید یک قطعه سالم (توسط تخمین اندازه دانه‌ها، میزان اصلاح ساختار، نوع حفره انقباضی و...)، محاسبه گرمای نهان انجماد و کسر جامد شده، بررسی انواع فازهای به وجود آمده در حین انجماد، تعیین فاصله بازوهای دندریتی و سرعت سرد شدن، پیش بینی نوع گرفتیت و ندول کانت چدنهای نشکن استفاده شده است [۲، ۸، ۲۱].

با بررسی و تحلیل منحنی سرد شدن آلیاژ و به کمک مشتق اول متناظر آن قبل از ریخته‌گری قطعه اصلی، امکان



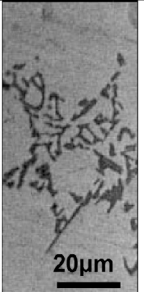





۳- نتایج و بحث

۳-۱ مطالعات ریز ساختاری

تصاویر میکروسکوپ نوری از آلیاژ آلومینیم ۳۱۹ با مقادیر مختلف استرانسیم در جدول ۲ آرایه و در هر مورد نیز نرخ بهسازی و مشاهدات میکروسکوپی بیان شده است.

جدول ۲ نقش عنصر استرانسیم در ریز ساختار و نرخ

بهسازی

مشاهدات	نرخ بهسازی	تصویر میکروسکوپی	
ریز ساختار نمونه بدون استرانسیم: در این ریز ساختار، سیلیسیم‌های یوتکتیک به صورت ورقه‌های خشن و سوزنی شکل دیده می‌شود و این ریز ساختار اصلاح نشده یا به اصطلاح بهسازی نشده می‌باشد.	۱		
ریز ساختار نمونه حاوی ۰/۰۰۸٪ Sr: در این ریز ساختار سیلیسیم‌های لایه‌ای شروع به شکستن به ذرات کوچکتر می‌کند و ورقه‌های خشن و تیغه‌ای نیز از بین می‌روند. این نوع بهسازی، بهسازی جزئی نام دارد.	۳		
ریز ساختار نمونه حاوی ۰/۱۴۰٪ Sr: سوزنی شکل و خشن به طور کلی ناپدید شده و در کل ریز ساختار سیلیسیم‌های یوتکتیک رشته‌ای و ظریف مشاهده می‌گردد. این نوع ریز ساختار دارای بالاترین نرخ بهسازی می‌باشد و این بهسازی، بهسازی کامل نامیده می‌شود.	۵/۵		
ریز ساختار نمونه حاوی ۰/۰۲٪ Sr: تعداد سیلیسیم‌های لایه‌ای بیشتر شده‌وز تعداد سیلیسیم‌های رشته‌ای و ریز کاسته می‌شود.	۳/۵		

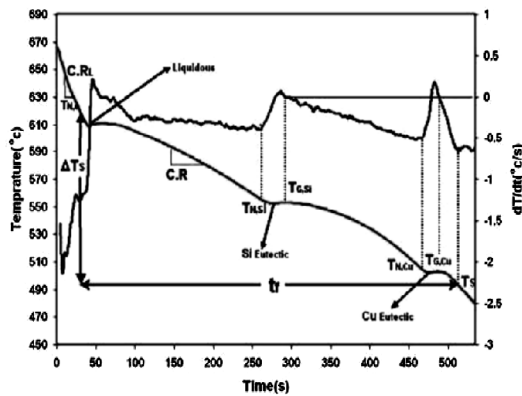
در هر مورد بهسازی، آزمایش آنالیز حرارتی با یک ترموکوپل، حداقل در سه مرتبه انجام شد و منحنی‌های سرد شدن مربوط به آنها با دقت 0.1°C ثبت و ترسیم گردید. شکل ۱ نمایی از تجهیزات آنالیز حرارتی را نشان می‌دهد. در تمام آزمایشات از قالب فولادی جداره نازک (ضخامت $1/5$ ، قطر 30 و ارتفاع 40 میلی‌متر) استفاده گردید که حدود $300-400^{\circ}\text{C}$ پیش گرم شد. جنس ترموکوپل مورد استفاده از نوع Ni-Ni-Cr بوده که توسط آلومینیم با درجه خلوص بالا (99.99% درصد) کالیبره شد و در مرکز و به فاصله 25 میلی‌متر از کف قالب ثابت گردید.



شکل ۱ تجهیزات آنالیز حرارتی مورد استفاده در آزمایشات

برش عرضی هر کدام از نمونه‌ها در مقطع نوک ترموکوپل، تهیه شد که پس از آماده سازی تحت بررسی ریزساختاری قرار گرفتند و تصاویری در بزرگی‌های $200\times$ و $500\times$ توسط میکروسکوپ نوری تهیه گردید که از مقایسه آنها با تصاویر استاندارد میزان یا نرخ بهسازی در درصد‌های مختلف استرانسیم تعیین شد. تعیین نرخ بهسازی در آلیاژهای هیپو یوتکتیک Al-Si بر مبنای نمودار استاندارد AFS می‌باشد. بر این اساس محدوده بهسازی به 6 دسته تقسیم می‌شود که ساختارهای کاملاً بهسازی شده دارای رده‌های 5 و 6 ، بهسازی شده به صورت جزئی، دارای رده‌های 2 تا 4 و ساختار بهسازی نشده دارای رده 1 می‌باشند.

- ۱- جوانه‌زنی و رشد فاز دندریتی $\alpha - Al$ (محدوده دمایی منحنی ذوب)
- ۲- جوانه‌زنی و رشد فاز یوتکتیک سیلیسیم (محدوده یوتکتیک سیلیسیم)
- ۳- جوانه‌زنی و رشد فاز حاوی مس (محدوده یوتکتیک مس)

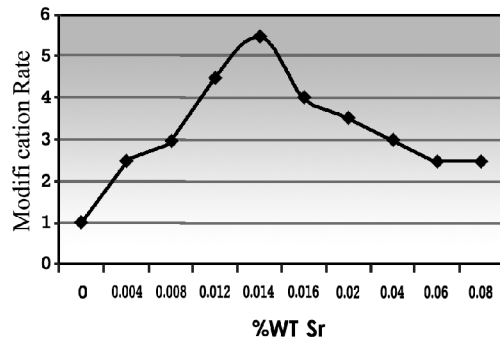


شکل ۳ نمونه منحنی سرد شدن و مشتق آن برای آلیاژ ۳۱۹ با سرعت سرد شدن $0.13 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

عمده اثر بهسازی روی محدوده یوتکتیک سیلیسیم می‌باشد. مطابق شکل ۳ مشخصات دمایی این منطقه عبارتند از: درجه حرارت شروع جوانه‌زنی یوتکتیک سیلیسیم ($T_{N, Si}$) و درجه حرارت رشد یوتکتیک سیلیسیم ($T_{G, Si}$). بررسی تأثیر درصد‌های مختلف استرانسیم بر تغییرات هر یک از این پارامترها و یا اختلاف آنها با یکدیگر مورد تحقیق قرار گرفته و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. جدول ۳ تغییرات پارامترهای مهم انجمادی در محدوده یوتکتیک سیلیسیم را نشان می‌دهد. همان طور که در جدول ۳ ملاحظه می‌گردد، با تغییر درصد استرانسیم از صفر تا 0.14 wt ، دمای شروع جوانه‌زنی یوتکتیک سیلیسیم از $554.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ تا $547.8 \text{ } ^\circ\text{C}$ کاهش می‌یابد و پس از آن با افزودن مقادیر بیشتر استرانسیم، افزایش یافته و نهایتاً بعد از مقدار 0.18 wt روند ثابتی مشاهده می‌شود. شکل ۴ تغییرات دمایی جوانه‌زنی یوتکتیک سیلیسیم ($T_{N, Si}$) را برحسب مقادیر مختلف استرانسیم نشان می‌دهد.

ریزساختار آلیاژ شامل فاز آلومینیم اولیه، یوتکتیک سیلیسیم و ترکیبات بین فلزی مختلف می‌باشد. با افزایش درصد استرانسیم از صفر تا 0.14 wt مورفولوژی سیلیسیم یوتکتیک از شکل تیغ‌ای و خشن به شکل رشته‌ای و ظریف تغییر می‌کند. با افزایش بیشتر استرانسیم افزودنی به مذاب ساختار بهسازی شده مجدداً به شکل قبل از اصلاح ریز ساختار متمایل می‌گردد.

از مقایسه‌ی تصاویر میکروسکوپی تهیه شده در این تحقیق در درصد‌های مختلف استرانسیم با تصاویر استاندارد AFS در بزرگ‌نمایی مشابه، نرخ بهسازی برای هر تصویر تعیین شد که تغییرات این نرخ برحسب درصد وزنی استرانسیم در شکل ۲ ترسیم شده است.



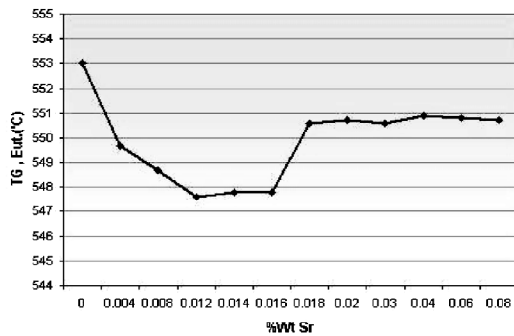
شکل ۲ تغییرات نرخ بهسازی برحسب درصد وزنی استرانسیم

همان طور که ملاحظه شد نمونه‌هایی با 0.12 و 0.14 درصد استرانسیم به ترتیب دارای بیشترین مقادیر نرخ بهسازی یعنی $4/5$ و $5/5$ هستند که براین اساس طبق تصاویر میکروسکوپی تهیه شده، محدوده‌ی بهینه‌ی استرانسیم جهت بهسازی ریزساختار آلیاژ ۳۱۹، محدوده‌ی $0.12 - 0.14 \text{ wt}$ پیشنهاد می‌گردد که در این مقدار استرانسیم، ریزساختار شامل سیلیسیم‌های رشته‌ای ریز و پراکنده می‌باشد.

۳-۲ آنالیز حرارتی

شکل ۳، یک نمونه منحنی سرد شدن و مشتق اول مربوط به آن را برای آلیاژ ۳۱۹ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی سرد شدن دارای سه توقف دمایی می‌باشد که نشان دهنده سه تحول عمده در آلیاژ ۳۱۹ است که به ترتیب از بالا به پایین عبارتند از:

می‌کند و پس از مقدار 0.18 wt Sr ، نرخ ثابتی را نشان می‌دهد. شکل ۵ تغییرات دمای رشد یوتکتیک دوتایی سیلیسیم ($T_{G,Si}$) را برحسب مقادیر مختلف استرانسیم نشان می‌دهد.



شکل ۵ تغییرات دمای رشد یوتکتیک سیلیسیم برحسب مقادیر مختلف استرانسیم

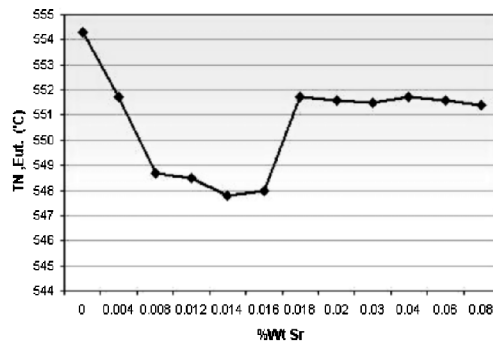
همچنین از اطلاعات جدول ۳ می‌توان تغییرات افت دمای رشد یوتکتیک سیلیسیم نسبت به حالت بهسازی نشده (یعنی $\Delta T_{E,G}^{Al-Si} = T_{E,G,Unmodified} - T_{E,G,modified}$) اختلاف دمای رشد ($T_{G,Si}$) بدون افزودن استرانسیم با دمای رشد در درصدهای مختلف استرانسیم را تعیین و بررسی نمود. همان طور که ملاحظه می‌شود اضافه نمودن استرانسیم تا 0.12 wt باعث افزایش $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ از صفر تا $5/4^\circ\text{C}$ می‌گردد. در مقادیر بیشتر استرانسیم، خصوصاً از مقدار 0.16 wt به بعد، $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ کاهش چشم‌گیری نشان داده و پس از این مقدار روند ثابتی (حدود 2°C) را نشان می‌دهد. تغییرات افت دمای رشد یوتکتیک برحسب مقادیر مختلف استرانسیم در شکل ۶ مشاهده می‌گردد.

همان گونه که ملاحظه می‌شود بهسازی توسط استرانسیم نه تنها بر مورفولوژی سیلیسیم یوتکتیک اثر دارد بلکه بر منحنی‌های سرد شدن نمونه‌های مورد آزمایش نیز مؤثر می‌باشد و این تأثیر از طریق بررسی تغییرات محدوددهی دمایی یوتکتیک تعیین می‌شود. نتایج حاصل مطابق شکل‌های ۴، ۵ و جدول ۳ نشان می‌دهند که با افزایش عنصر استرانسیم دماهای جوانه‌زنی ($T_{N,Si}$) و رشد ($T_{G,Si}$) یوتکتیک کاهش می‌یابند. این کاهش دمایی در شکل ۷ به طور مثال برای دو منحنی سرد شدن نمونه‌ی

جدول ۳ پارامترهای انجمادی در محدوده یوتکتیک

سیلیسیم در مقادیر مختلف Sr

$\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$	$T_{G,Si} (^{\circ}\text{C})$	$T_{N,Si} (^{\circ}\text{C})$	$C.R(^{\circ}\text{C}/\text{S})$	Sr%	ردیف
۰	۵۵۳	۵۵۴/۳	-۰/۳	۰	۱
۳/۳	۵۴۹/۷	۵۵۱/۷	-۰/۳	۰/۰۰۴	۲
۴/۳	۵۴۸/۷	۵۴۸/۷	-۰/۳	۰/۰۰۸	۳
۵/۴	۵۴۷/۶	۵۴۸/۵	-۰/۳	۰/۰۱۲	۴
۵/۲	۵۴۷/۸	۵۴۷/۸	-۰/۳	۰/۰۱۴	۵
۵/۲	۵۴۷/۸	۵۴۸	-۰/۳	۰/۰۱۶	۶
۲/۳	۵۵۰/۷	۵۵۱/۶	-۰/۳	۰/۰۲	۷
۲/۴	۵۵۰/۶	۵۵۱/۵	-۰/۳	۰/۰۳	۸
۲/۱	۵۵۰/۹	۵۵۱/۷	-۰/۳	۰/۰۴	۹
۲/۲	۵۵۰/۸	۵۵۱/۶	-۰/۳	۰/۰۶	۱۰
۲/۳	۵۵۰/۷	۵۵۱/۷	-۰/۳	۰/۰۸	۱۱



شکل ۴ تغییرات دمای جوانه زنی یوتکتیک سیلیسیم برحسب مقادیر مختلف استرانسیم

مشخصه مهم دیگر منطقه یوتکتیک سیلیسیم، درجه حرارت رشد یوتکتیک دوتایی سیلیسیم می‌باشد که تغییرات این درجه حرارت برحسب مقادیر مختلف استرانسیم بسیار پر اهمیت است. با بررسی اطلاعات حاصل از جدول ۳ به خوبی مشخص است که با افزایش درصد استرانسیم از صفر تا 0.12 wt ، $T_{G,Si}$ از 553°C تا $547/6^\circ\text{C}$ کاهش می‌یابد و پس از آن با افزایش بیشتر استرانسیم مقدار آن تا حدود $550/6^\circ\text{C}$ افزایش پیدا

می‌شود. علاوه بر اینها استرانسیم با کاهش تنش سطحی آلومینیم، موجب تغییر در انرژی سطحی فصل مشترک بین آلومینیم و سیلیسیم می‌گردد که این مسئله نیز هم بر فرایند جوانه‌زنی و هم بر فرایند رشد سیلیسیم‌ها اثر می‌گذارد [۸].

در نمونه‌هایی با مقدار بالای استرانسیم (پس از محدوده‌ی بهینه)، ترکیبات بین‌فلزی Al_2Si_2Sr تشکیل می‌شوند که تشکیل این ترکیبات از مقدار استرانسیم مؤثر در مذاب کم کرده و در نتیجه باعث کاهش اثر بهسازی ریزساختار می‌گردد و بنابراین مجدداً دمای یوتکتیک افزایش می‌یابد. روش اصلی جهت اندازه‌گیری مقدار واقعی استرانسیم آلیاژ آنالیز OES می‌باشد اما این روش نمی‌تواند اکتیویته‌ی استرانسیم را در مذاب آلومینیم تعیین کند به عبارت دیگر تعیین کند که چه مقدار استرانسیم می‌تواند سیلیسیم‌های سوزنی را به ریزساختار رشته‌ای تبدیل کند [۱۲].

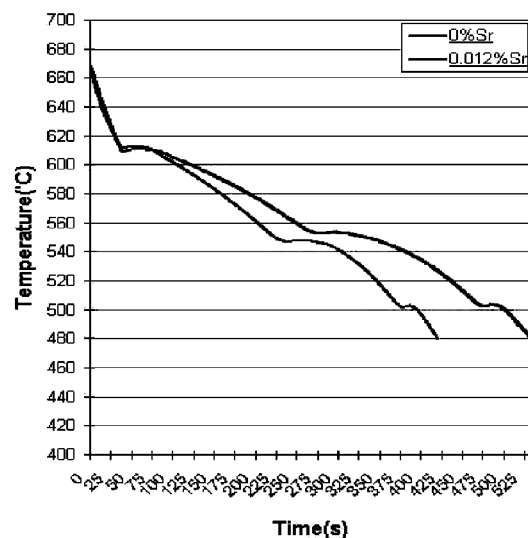
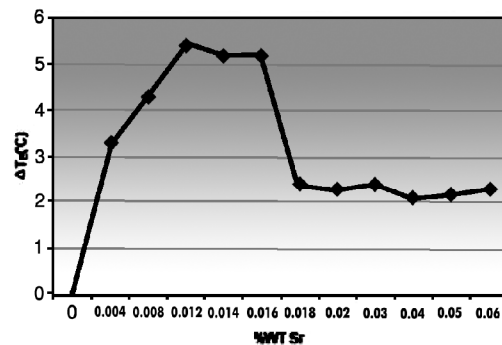
با گذشت زمان، استرانسیم، با سایر عناصر در مذاب واکنش می‌دهد بنابراین از تأثیرش در عملیات بهسازی ریزساختار کاسته می‌شود و به عبارتی غیرفعال و بدون تأثیر می‌شود که این موضوع به دلایل زیر مربوط می‌باشد:

- ۱- استرانسیم به دلیل فشار بخار بالا در دمای ذوب، تا حدودی تبخیر می‌گردد.
- ۲- استرانسیم به دلیل تمایل بالا در اکسید شدن و ترکیب با اکسیژن، تشکیل اکسید استرانسیم می‌دهد.
- ۳- استرانسیم به دلیل تمایل بالا به تشکیل ترکیب، با سایر عناصر موجود در مذاب واکنش می‌دهد. (ترکیباتی نظیر $SrFeMgAl$, $SrMgAl$, $SrAlO$ و...).

مطابق یافته‌های محققین دیگر نیز با افزودن استرانسیم به مذاب نقطه یوتکتیک به درجه حرارت‌های پایین‌تر از منحنی تعادلی جابجا می‌شود و با افزایش بیشتر این عنصر به مذاب، تأثیر آن در اصلاح ریزساختاری از بین می‌رود و درجه حرارت یوتکتیک مجدداً افزایش می‌یابد [۸ و ۱۰]. تغییرات افت دمای رشد یوتکتیک نسبت به حالت بهسازی نشده که با پارامتر $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ بیان گردید با کاهش $T_{G,Si}$ در حالت بهسازی شده، افزایش یافته و پس از محدوده‌ی $wtSr$ (۰/۰۱۶-۰/۰۱۲)٪ کاهش می‌یابد. هر چه این پارامتر بزرگتر باشد نرخ بهسازی سیلیسیم یوتکتیک بیشتر می‌شود و به عبارت دیگر مقدار استرانسیم مؤثر و فعال در مذاب نیز بالاتر می‌رود. در شکل ۶ تغییرات $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ برحسب مقادیر مختلف استرانسیم نشان داده شده است که

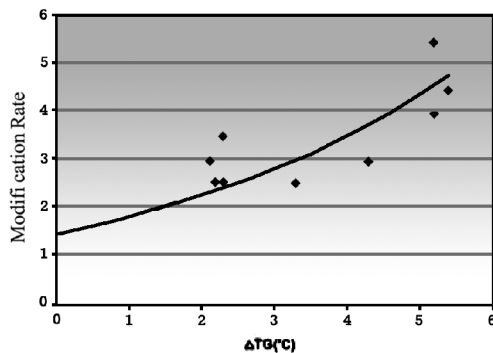
بدون استرانسیم و نمونه حاوی $wtSr$ ۰/۰۱۲٪ به وضوح نشان داده شده است.

شکل ۶ تغییرات افت دمای رشد یوتکتیک سیلیسیم نسبت به حالت بهسازی نشده برحسب مقادیر مختلف استرانسیم



شکل ۷ منحنی‌های سرد شدن نمونه‌های بدون استرانسیم و حاوی $wtSr$ ۰/۰۱۲٪

علت این کاهش دمایی را با افزودن عنصر بهساز می‌توان بدین صورت بیان کرد که عنصر بهساز در فصل مشترک سیلیسیم مذاب جذب می‌شود و با قفل کردن حرکت پله‌های رشد، اثر سمی و مخربی بر رشد سیلیسیم می‌گذارد، که این مسئله دو نتیجه را در بر دارد: نتیجه‌ی نخست این که دما در یک نرخ رشد معادل کاهش می‌یابد و به موجب آن سیلیسیم یوتکتیک در جبهه انجماد دوتایی عقب‌نشینی می‌کند. نتیجه‌ی دوم آن که در اثر پدیده‌ی دوقلویی شدن زنجیره‌ای از جهات رشد حاصل



شکل ۸ تغییرات نرخ بهسازی ریزساختار با تغییرات مادون انجماد رشد یوتکتیک سیلیسیم ($\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$)

به طور خلاصه بهسازی کامل یوتکتیک باعث تغییرات عمده بر محدوده‌ی یوتکتیک آلومینیم- سیلیسیم در منحنی سرد شدن می‌شود که به کمک این تغییرات می‌توان مقدار مؤثر و بهینه‌ی استرانسیم را در مذاب جهت حصول بهسازی کامل تعیین نمود. این تغییرات کاهش دمای رشد یوتکتیک ($T_{G,Si}$) و یا افزایش افت دمای رشد یوتکتیک نسبت به حالت بهسازی نشده ($\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$) می‌باشند. بنابراین آنالیز حرارتی به عنوان یک ابزار مکمل، سریع و همراه خط تولید (OnLine) برای اندازه‌گیری بهسازی سیلیسیم یوتکتیک استفاده می‌شود.

۴- نتیجه گیری

- در بررسی بهسازی ریز ساختار یوتکتیک آلومینیم- سیلیسیم مشخصات دمایی این منطقه که عبارتند از: درجه حرارت شروع جوانه‌زنی یوتکتیک و درجه حرارت رشد یوتکتیک بسیار حائز اهمیت هستند.
- دمای جوانه‌زنی یوتکتیک سیلیسیم ($T_{N,Si}$) با تغییر درصد استرانسیم از صفر الی wt ۰/۱۴٪ از مقدار ۵۵۴/۳ تا ۵۴۷/۸ °C کاهش می‌یابد و پس از آن با افزودن مقادیر بیشتر استرانسیم، افزایش و نهایتاً از مقدار wt ۰/۱۸٪ به بعد روند ثابتی پیدا می‌کند.
- دمای رشد یوتکتیک سیلیسیم ($T_{G,Si}$) با افزایش درصد استرانسیم از صفر تا wt ۰/۱۲٪، از ۵۵۳ °C تا ۵۴۷/۶ °C کاهش می‌یابد و پس از آن با افزایش بیشتر استرانسیم مقدار آن تا حدود ۵۵۰/۶ °C افزایش پیدا کرده و از مقدار wt ۰/۱۸٪، نرخ ثابتی را نشان می‌دهد.

علت این تغییرات در منحنی معادل با دمای رشد یوتکتیک است هر چه $T_{E,G}^{Al-Si}$ با افزودن استرانسیم کاهش یابد پارامتر $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ افزایش می‌یابد و سپس با افزودن بیشتر استرانسیم، افت در مقدار $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ ملاحظه می‌گردد که این امر احتمالاً از تصادم و بهم پیوستن ذرات حاوی استرانسیم می‌باشد.

همان طور که به آن اشاره گردید، آنالیز شیمیایی از طریق کوانتومتری در خط تولید تنها می‌تواند مقدار استرانسیم کلی در مذاب را که شامل استرانسیم مؤثر و غیر مؤثر می‌باشد، اندازه‌گیری کند، اما جهت کنترل مقدار استرانسیم مؤثر در عمل بهسازی ریزساختار، آنالیز حرارتی با استفاده از تغییرات $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ برحسب مقادیر مختلف استرانسیم این امر را ممکن می‌سازد با توجه به این مطالب، $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ به عنوان پارامتری که می‌تواند میزان اصلاح فازهای سیلیسیم یوتکتیک را تعیین کند، معرفی می‌شود که تطابق بسیار خوبی با نتایج متالوگرافی دارد اما با این تفاوت که نسبت به متالوگرافی زمان و انرژی کمتری می‌طلبد.

بنابراین رابطه‌ای مستقیم بین نرخ بهسازی حاصل از مشاهدات ریزساختاری و پارامتر آنالیز حرارتی $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ حاصل از منحنی‌های سرد شدن برقرار است که از بررسی هر این دو پارامتر، محدوده‌ی بهینه‌ی استرانسیم تعیین می‌گردد. شکل ۸ تغییرات نرخ بهسازی را به عنوان پارامتر ریزساختاری با تغییرات مادون انجماد رشد یوتکتیک سیلیسیم $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ نشان می‌دهد.

مطابق شکل فوق مشخص است که در ماکزیمم نرخ بهسازی، مقدار $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ نیز به بیشترین مقدار خود می‌رسد و در نهایت با در نظر گرفتن هردوی این عوامل محدوده‌ی بهینه‌ی استرانسیم همان محدوده‌ی ۰/۱۴-۰/۱۲ wt٪ می‌باشد که مجدداً تأیید و تثبیت می‌گردد.

[۴] قدرت سپیده ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۲.

[5] Gruzleski J.E. and Closset B.M., *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*, AFS, Inc., Des Plaines, Illinois, USA, 1990.

[6] Sigworth G. K., "Theoretical Aspects of the Modification of Al-Si Alloys", AFS Transactions, Vol. 91, 1983, pp. 7-16.

[۷] ملکان مهدی ، قدرت سپیده ، شبستری سعید و سعیدی نیا سعید ، "مدلسازی فیزیکی سرعت انجماد قطعات آلومینیمی آلیاژ AS5U3G از طریق آنالیز حرارتی"، ریخته گری، سال بیست و چهارم، شماره ۴، ۱۳۸۲، صفحه های ۱۷ الی ۲۳.

[8] Backuerud L., Chai G. and Tamminen J., "Solidification Characteristics of Aluminum Alloys", Vol. 2, Foundry Alloys, AFS/Skanaluminium, Stockholm, Sweden, 1990.

[9] Tamminen J., "Thermal Analysis for Investigation of Solidification Mechanisms in Metals and Alloys", Ph. D. Thesis Published in Chemical Communications, University of Stockholm, Sweden, No. 2, 1988.

[10] Jiang H., Sokolowski J. H., Djurdjevic M. B. and Evans W. J., "Recent Advances in Automated Evaluation and on-line Prediction of Al-Si Eutectic Modification Level" AFS Transaction, Vol. 108, No. 24, 2000, pp. 505-510.

[11] Mackay R. J., Djurdjevic M. B., Jiang H., Sokolowski J. H. and Evans W. J., "Determination of Eutectic Si Particle Modification Via a New Thermal Analysis Interpretive Method in 319 Alloy", AFS Transaction, Vol. 108, No. 24, 2000, pp. 511-520.

[12] Djurdjevic M. B., Gallo P., Jiang H. and Sokolowski J. H., "Evaluation of Strontium Fading in 319 Al Alloy Using Thermal Analysis", AFS Transaction, Vol. 108, No. 20, 2000, pp. 485-489.

[13] Yen C.M., Evans W.J., Nowicki R.M. and G. S. Cole, "Measuring the Quality of Aluminum Casting Alloys With Microprocessor-Aided Thermal Analysis", AFS Transactions, Vol. 93, No. 26, 1985, pp. 199-204.

[14] Charbonnier J., "Microprocessor Assisted Thermal Analysis Testing of Aluminum Alloy Structures", AFS Transactions, Vol. 92, No. 133, 1984, pp. 907-922.

[15] Apelian D., Sigworth G. K. and Whaler K. R., "Assessment of Grain Refinement and Modification of Al-Si foundry Alloys by Thermal Analysis", AFS Transactions, Vol. 92, No. 161, 1984, pp. 297-307.

۴- با افزودن استرانسیم از صفر تا wt ۰/۰۱۲٪، تغییرات افت دمای رشد یوتکتیک سیلیسیم نسبت به حالت بهسازی نشده ($\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$) از صفر تا °C ۵/۴ که ماکزیمم مقدار آن است، تغییر می‌کند. در مقادیر استرانسیم بیشتر از wt ۰/۰۱۶٪، $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ کاهش چشم گیری می‌یابد و پس از این مقدار روند ثابتی (حدود °C ۲) را نشان می‌دهد. مقدار بزرگتر $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ نشاندهنده میزان اصلاح ساختار بهتر می‌باشد. بنابراین $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ می‌تواند به عنوان بهترین پارامتر برای کنترل بهسازی معرفی شود.

۵- با افزودن wt ۰/۰۱۴٪ استرانسیم به مذاب آلیاژ آلومینیم ۳۱۹، نرخ بهسازی سیلیسیم یوتکتیک از عدد یک که مربوط به ساختار بهسازی نشده می‌باشد و در آن ورقه‌های خشن و تیغه‌ای سیلیسیم مشاهده می‌شوند تا ۵/۵ که مربوط به نمونه کاملاً بهسازی شده است، تغییر می‌کند.

۶- با کمک نتایج مطالعات ریزساختاری و نرخ بهسازی و همچنین نتایج آنالیز حرارتی منحنی‌های سرد شدن در منطقه یوتکتیک سیلیسیم ($\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$) محدوده بهینه استرانسیم جهت بهسازی کامل (wt ۰/۰۱۲-۰/۰۱۴) تعیین می‌گردد.

۷- آنالیز حرارتی به عنوان یک ابزار مکمل، سریع و همراه خط تولید (OnLine) برای اندازه گیری بهسازی سیلیسیم یوتکتیک استفاده می‌شود.

۵- پی نوشت

¹ equivalent

² Optical Emission Spectroscopy

مراجع

[۱] ملکان مهدی ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۲.

[۲] ملکان مهدی ، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۱.

[3] Jorstad J.L. and Rasmussen W.M., *Aluminum Casting Technology*, 2th Edition, AFS, 1993 .

- [16] Djurdjevic M. B., Kierkus W. T., Liliac R. E. and Sokolowski J. H., "Extended Analysis of Cooling Curves", 41th Annual Conference of Metallurgists of CIM, Proceedings of the International Symposium on Light Metals, **2002**, pp. 351-365.
- [17] Mackay R.I., Djurdjevic M.B. and Sokolowski J.H., "Effect of Cooling Rate on Fraction Solid of Metallurgical Reactions in 319 Alloy", AFS Transactions, Vol. 108, No. 25, **2000**, pp. 521-530.
- [18] Barlow J. O. and Stefanescu D. M., "Computer-Aided Cooling Curve Analysis Revisited", AFS Transactions, Vol. 105, No. 04, **1997**, pp. 349-354.
- [19] Shabestari S.G. and Malekan M., "Thermal Analysis Study of the Effect of Cooling Rate on the Microstructure and Solidification Parameters of 319 Aluminum Alloy", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 44, No. 3, **2005**, pp. 305-312.
- [20] Shabestari S.G. and Ghodrat S., "Thermal Analysis and Microstructural Evaluation of Intermetallic Compounds Formed During Pre- and Post-Eutectic Reactions in 319 Aluminum Alloy", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 45, No.2, **2005**, pp. 207-214.
- [21] Emadi D. and Whiting L. V., "Determination of Solidification Characteristics of Al-Si Alloys by Thermal Analysis", AFS Transactions, Vol. 200, No. 033, **2002**.
- [22] Djurdjevic M., Jiang H. and Sokolowski J., "On-line prediction of aluminum-silicon eutectic modification level using thermal analysis", *Materials Characterization*, Vol. 46, **2001**, pp. 31-38.
- [23] Chen X., Geng H. and Li Y., "Study on the eutectic modification level of Al-7Si Alloy by computer aided recognition of thermal analysis cooling curves", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 419, **2006**, pp. 283-289.