

# بررسی بهسازی و سرعت سرد شدن آلیاژ آلومینیم $AS_5U_2G$ از طریق اندازه‌گیری هدایت الکتریکی

حسن سعیدی‌نیا (کارشناس)

دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد، دانشگاه شیراز

سعید شستری (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران

سعید سعیدی‌نیا (کارشناس)

دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

قسمت عمده‌ی آلیاژهای ریختگی آلومینیم را آلیاژهای آلومینیم - سیلیسیم تشکیل می‌دهند که کاربرد وسیعی در صنایع مختلف دارند. آلیاژ  $AS_5U_2G$  آلیاژ هیپو یوتکتیک Al-Si است که سیلیسیم و مس عناصر آلیاژی اصلی آن به‌شمار می‌روند. در این آلیاژ، سیلیسیم سبب ایجاد قابلیت ریخته‌گری مناسب و افزایش مقاومت در برابر ترک گرم می‌شود، مس نیز استحکام کششی در دماهای بالا و قابلیت ماشین‌کاری را بهبود می‌بخشد. از این رو، این آلیاژ به‌صورت گسترده در ساخت قطعات خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

انجام عملیات بهسازی توسط عنصر استرانسیم تأثیر چشمگیری بر خواص این آلیاژ دارد. در این تحقیق، قابلیت هدایت الکتریکی برای پیش‌بینی میزان بهسازی و اندازه‌گیری فواصل بازوهای دندریتی (DAS) به‌صورت آزمایش غیر مخرب به‌کار گرفته شده است. تعیین میزان بهسازی، به‌وسیله‌ی اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نمونه‌های دگمه‌یی که توسط مقادیر مختلفی از استرانسیم بهسازی شده و پس از مدت زمان معینی در هوا سرد شده‌اند، انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تکامل بهسازی، هدایت الکتریکی نمونه‌های دگمه‌یی افزایش می‌یابد و در حالت کاملاً بهسازی شده به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بنابراین با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نمونه‌های دگمه‌یی، می‌توان میزان بهسازی را قبل از بارریزی در این آلیاژ پیش‌بینی کرد. به‌وسیله‌ی اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نمونه‌های پله‌یی با ضخامت‌های مختلف، قبل و بعد از عملیات بهسازی مشخص شد که اندازه‌گیری غیر مخرب DAS در آلیاژ  $AS_5U_2G$  بهسازی شده، نسبت به آلیاژ بهسازی نشده از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است.

## مقدمه

خواص مکانیکی آلیاژهای هیپو یوتکتیک Al-Si ریختگی به ریخت‌شناسی فاز سیلیسیم یوتکتیک وابسته است. در سرد کردن با سرعت‌های پایین، فاز سیلیسیم به‌صورت سوزنی و ورقه‌یی وجود دارد که این ورقه‌ها به‌عنوان منشأ ترک عمل می‌کنند و منجر به شکست ترد ماده می‌شوند. در رشدهای با سرعت بالاتر از  $1 \text{ mm/s}$ ، سیلیسیم به شکل رشته‌یی تبدیل می‌شود که چنین شکلی باعث کاهش تمرکز تنش شده و منجر به بهبود خواص مکانیکی به‌ویژه استحکام کششی و ازدیاد طول نسبی می‌شود. [1] تبدیل ساختار سیلیسیم یوتکتیک از حالت سوزنی به رشته‌یی از طریق افزودن عناصری نظیر استرانسیم صورت می‌گیرد. لذا عملیات بهسازی یکی از مهم‌ترین عملیات کنترل کیفی مذاب به‌شمار می‌رود.

روش‌هایی نظیر آنالیز کوانتومتری و متالوگرافی برای کنترل میزان بهسازی به‌کار می‌رود. میزان استرانسیم افزوده شده به مذاب، الزاماً میزان بهسازی را مشخص نمی‌کند، زیرا احتمال دارد مقداری از

استرانسیم موجود در مذاب اکسید شود و مقداری نیز به علت تشکیل ترکیبات بین فلزی، در بهسازی آلیاژ شرکت نکنند. از طرفی ناخالصی‌های موجود در مذاب، نظیر فسفر، از تأثیر استرانسیم جلوگیری می‌کنند. [2] روش کوانتومتری که بعد از بارریزی به‌کار می‌رود، مقدار کل استرانسیم - اعم از عنصری یا ترکیبی - را نشان می‌دهد و مقداری را که در عملیات بهسازی شرکت می‌کند مشخص نمی‌سازد. در روش متالوگرافی برای تعیین میزان بهسازی، از تصاویر نرخ بهسازی که مراحل مختلف بهسازی را از هم تفکیک می‌کنند، استفاده می‌شود. با مقایسه‌ی مقطع متالوگرافی شده با جدول تصاویری که ریزساختار بهسازی شده را بین ۱ تا ۶ طبقه‌بندی می‌کند، می‌توان نرخ بهسازی را به‌صورت عددی تعیین کرد. [3] این روش، اصولاً وقت‌گیر و از نوع آزمایشات مخرب است و قبل از ریخته‌گری نمی‌توان آن را به‌کار برد. روش دیگری که اخیراً برای کنترل کیفیت مذاب، جوانه‌زنی و میزان بهسازی، قبل از بارریزی مورد استفاده قرار می‌گیرد، آنالیز حرارتی است. [4-6]

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ AS<sub>5</sub>U<sub>2</sub>G

درصد	عنصر
Si	۵/۸۱
Cu	۳/۳۲
Fe	۰/۳۶
Mn	۰/۱۵
Mg	۰/۲۸
Ti	۰/۰۱۶
Al	۹۰/۱۲

گاززدایی به وسیله‌ی دمش‌گاز خنثی (آرگون) به مذاب صورت گرفت. عملیات گاززدایی در دمای ۷۳۰°C و تارسیدن گاز هیدروژن مذاب به میزان ۰/۱ میلی‌لیتر در ۱۰۰ گرم مذاب ادامه یافت. برای تعیین میزان گاز هیدروژن حل شده در مذاب از دستگاه HYSCAN استفاده شد. ترکیب شیمیایی مذاب‌ها، از طریق آنالیز کوانتومتری کنترل شد.

#### اندازه‌گیری هدایت الکتریکی

اندازه‌گیری هدایت الکتریکی به وسیله‌ی دستگاه SIGMASCOPE-SMP۱ با دقت اندازه‌گیری ۵/۰±٪ در درجه حرارت اتاق و براساس سازوکار جریان سرگردان انجام شد. این دستگاه برای سنجش هدایت الکتریکی آلیاژهای غیر آهنی طراحی شده و با فرکانس ۵۰-۶۰ HZ کار می‌کند و هدایت الکتریکی را توسط واحد IACS<sup>۱</sup>، MS/m<sup>۱</sup> نشان می‌دهد. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی از سطوح نمونه‌های ماشین‌کاری شده و مطابق با استاندارد ASTM-E۱۰۰۴-۸۴ انجام شد.<sup>[۱۸]</sup>

آزمایش‌های تعیین میزان بهسازی به وسیله‌ی هدایت الکتریکی تعیین میزان بهسازی با ریخته‌گری نمونه‌های دگمه‌یی به ضخامت ۱۰ mm و قطر ۶۴ mm، با مقادیر مختلف استرانسیم (به‌عنوان عنصر بهساز) انجام شد. مذاب آلیاژ AS<sub>5</sub>U<sub>2</sub>G با استفاده از آمیزان Al-۱۰Sr حداکثر تا ۰/۴۴ درصد استرانسیم مورد بهسازی قرار گرفت. نمونه‌های دگمه‌یی در قالب فولادی پیش‌گرم شده، ریخته‌گری شدند. قالب مورد استفاده، قالب استاندارد آنالیز کوانتومتری آلیاژهای آلومینیم و مطابق با استاندارد ASTM-EV۱۶-۸۵ بود.<sup>[۱۹]</sup> به منظور یکسان بودن سرعت سرد شدن نمونه‌های دگمه‌یی، دمای قالب در ۲۲۵°C ثابت نگه داشته شد. تمام نمونه‌های دگمه‌یی در دمای ۷۱۰°C ریخته‌گری شدند و پس از مدت

چون هدایت الکتریکی در آلیاژهای Al-Si ریختگی تابعی از ریخت‌شناسی فاز سیلیسیم یوتکتیک است، از این‌رو این تکنیک، برای پیش‌بینی میزان بهسازی مذاب قبل از بارریزی و به‌عنوان یک روش ساده و غیر مخرب به‌کار برده شده است.<sup>[۹-۱۲]</sup> مزیت روش هدایت الکتریکی نسبت به آنالیز حرارتی، وابسته نبودن به تغییرات ترکیب شیمیایی مذاب و سهولت آن است، که این نکته در نمونه‌هایی که از مذاب یکسان، قبل و بعد از فرایند بهسازی گرفته شده‌اند، مورد تأیید قرار گرفته است.

مقاومت الکتریکی که عکس هدایت الکتریکی می‌باشد، نیز برای تعیین میزان بهسازی استفاده شده است.<sup>[۱۳-۱۵]</sup> یکی از محققان استفاده از مقاومت الکتریکی را در تعیین اندازه‌ی دانه در حین فرایند بازپخت گزارش کرده است.<sup>[۱۶]</sup> همچنین از این روش برای مطالعه‌ی تغییرات ریز ساختاری در آلیاژ Al-Cu در حین عملیات حرارتی استفاده شده است.<sup>[۱۷]</sup>

با اندازه‌گیری DAS می‌توان مستقیماً سرعت سرد کردن آلیاژ را تعیین کرد.<sup>[۲]</sup> بنابراین می‌توان از DAS به منظور استاندارد برای کنترل کیفی قطعات ریختگی بهره گرفت. با افزایش مقدار هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد، لذا می‌توان از هدایت الکتریکی برای پیش‌بینی مقادیر DAS به صورت غیر مخرب استفاده کرد.<sup>[۱۰]</sup> استفاده از روش‌های مخرب و بررسی فرایند بهسازی و تعیین فاصله‌ی بازوهای دندریتی از طریق متالوگرافی نیازمند به زمان طولانی و صرف وقت است، در صورتی‌که ارزیابی موارد فوق از طریق اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، که روشی غیرمخرب است و قابلیت اجرایی سریع دارد از سهولت بیشتری برخوردار است. در این تحقیق قابلیت هدایت الکتریکی برای پیش‌بینی میزان بهسازی مذاب در آلیاژ AS<sub>5</sub>U<sub>2</sub>G قبل از بارریزی و اندازه‌گیری DAS به‌عنوان یک روش ساده و غیر مخرب به منظور کنترل کیفیت قطعات مورد بررسی قرار می‌گیرد. ارتباط بین هدایت الکتریکی و مقدار عنصر استرانسیم، و نیز میزان نرخ بهسازی بر هدایت الکتریکی به‌طور دقیق تعیین می‌شود. از طرفی نقش مهم‌ترین پارامتر فرایند انجماد یعنی DAS بر هدایت الکتریکی در دو حالت بهسازی شده و بهسازی نشده تبیین می‌شود.

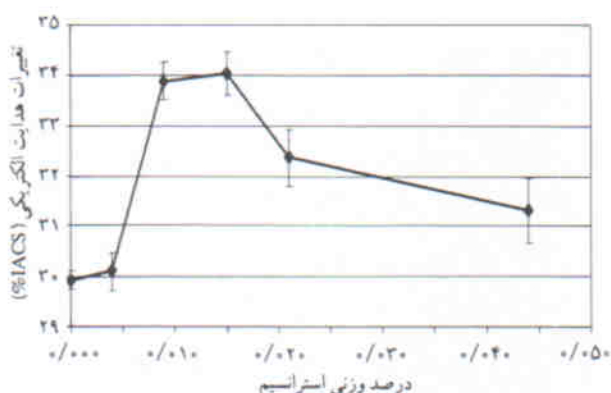
#### روش تحقیق

##### آماده‌سازی مذاب

مذاب آلیاژ AS<sub>5</sub>U<sub>2</sub>G با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۱ تهیه شد. عملیات جوانه‌زنی به وسیله‌ی آمیزان Al-۵Ti-۱B و پس از آن

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های تعیین بهسازی از طریق هدایت الکتریکی و بررسی متالوگرافی.

نرخ بهسازی	میانگین هدایت الکتریکی (%IACS)	درصد وزنی استرانسیم
۱	۲۹/۹۲	۰/۰۰
۳	۳۰/۰۹	۰/۰۰۴
۴	۳۳/۸۷	۰/۰۰۹
۵	۳۴/۰۳	۰/۰۱۵
۴	۳۲/۳۶	۰/۰۲۱
۳/۵	۳۱/۲۹	۰/۰۴۴



شکل ۱. نمودار تغییرات هدایت الکتریکی براساس افزایش درصد استرانسیم در آلیاژ AS<sub>۵</sub>U<sub>۰</sub>G.

۰/۰۴۴ درصد وزنی، هدایت الکتریکی با ۸/۱ درصد کاهش از IACS ۳۴/۰۳ به IACS ۳۱/۲۹ می‌رسد. این امر به علت ایجاد فرایند فرابهایزی در مقادیر زیاد استرانسیم است که باعث درشت‌تر شدن فاز سیلیسیم یوتکتیک و تبدیل ساختار رشته‌یی به شکل صفحه‌یی بهم پیوسته می‌شود. (شکل ۵۲) از طرفی ایجاد فرابهایزی به دلیل تغییر سیستیک حل شدن گاز هیدروژن باعث ایجاد حفره‌های گازی، و در نتیجه افت هدایت الکتریکی می‌شود. [۱۰]

شکل ۲ ریزساختار نمونه‌های دگمه‌یی با بزرگنمایی ۵۰× با مقادیر مختلف استرانسیم را نشان می‌دهد. شکل ۳ نیز نمودار نرخ بهسازی برحسب درصد وزنی استرانسیم را نشان می‌دهد.

این روش به تغییر جزئی در ترکیب شیمیایی مذاب‌های مختلف حساس نیست. زیرا با مقایسه بین هدایت الکتریکی نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده که از یک مذاب یکسان گرفته می‌شوند انجام می‌شود، میزان افزایش هدایت الکتریکی بین این نمونه‌ها ثابت و برابر ۱۳/۷ درصد است. بنابراین با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی

زمان معینی از قالب خارج و به‌طور مشابهی در هوا سرد شدند. سپس مقدار هدایت الکتریکی هر نمونه‌ی دگمه‌یی اندازه‌گیری و به‌منظور تعیین نرخ بهسازی متالوگرافی شدند. برای اطمینان از یکسان بودن سرعت سرد شدن نمونه‌های دگمه‌یی، مقدار DAS آنها به‌روش «برخورده‌گاه خطی» اندازه‌گیری شد.

آزمایش‌های تعیین مقادیر DAS در سرعت‌های سرد شدن مختلف

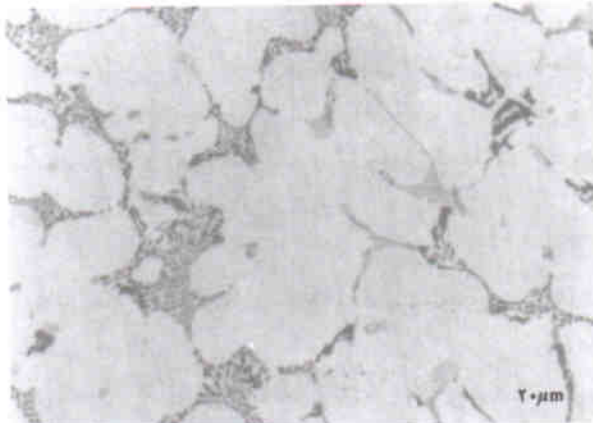
برای انجام این آزمایش‌ها قطعات ریخته‌گی پله‌یی از مذاب آلیاژ AS<sub>۵</sub>U<sub>۰</sub>G قبل از عملیات بهسازی و پس از آن (Sr = ۰/۰۱۲%) در قالب ماسه‌یی و در دمای ۷۲۵°C ریخته‌گری شدند. پس از برش قطعات ریخته‌گی پله‌یی، نمونه‌ها ماشین‌کاری و هدایت الکتریکی آنها اندازه‌گیری شد. به‌منظور اندازه‌گیری DAS و تعیین نرخ بهسازی در سرعت‌های سرد شدن مختلف، نمونه‌هایی از ضخامت‌های گوناگون قطعه‌ی ریخته‌گی پله‌یی، تهیه و متالوگرافی شد. هدایت الکتریکی هر نمونه از قسمت بالای آن (پس از جداکردن پله‌ها) اندازه‌گیری شد.

## نتایج و بحث

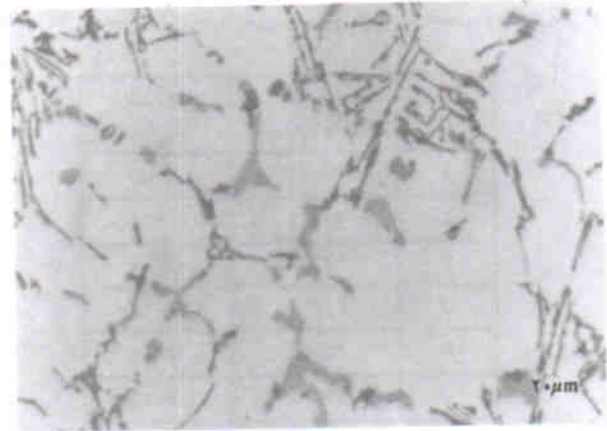
### تعیین میزان بهسازی به‌وسیله هدایت الکتریکی

جدول ۲ نتایج آزمایش‌های تعیین بهسازی به‌وسیله هدایت الکتریکی را نشان می‌دهد. مقادیر هدایت الکتریکی میانگین ۱۰ بار اندازه‌گیری در هر نمونه دگمه‌یی است. چنان‌که مشاهده می‌شود با افزایش میزان استرانسیم تا ۰/۰۱۵ درصد هدایت الکتریکی با ۱۳/۷ درصد افزایش از IACS ۲۹/۹۲ به IACS ۳۴/۰۳ می‌رسد. شکل ۱ نمودار هدایت الکتریکی (%IACS) را برحسب درصد وزنی استرانسیم نشان می‌دهد. متالوگرافی نمونه‌های دگمه‌یی (شکل ۲-ج) نشان می‌دهد که در ۰/۰۱۵ درصد استرانسیم نمونه کاملاً بهسازی شده است. دلیل این امر تغییر ریخت‌شناسی فاز سیلیسیم یوتکتیک از حالت سوزنی به رشته‌یی است. سیلیسیم یک فاز نارسا است و وقتی به‌صورت صفحه‌یی و خشن (بهسازی نشده) باشد، به‌عنوان مانع بزرگی در مقابل جریان الکترون‌ها عمل می‌کند. اما هنگامی که تحت عملیات بهسازی قرار می‌گیرد و به‌شکل رشته‌یی و ریز تبدیل می‌شود، این وضعیت باعث سهولت برقراری جریان الکتریکی می‌شود، و در نتیجه هدایت الکتریکی به‌طور کلی افزایش می‌یابد. بنابراین با تکامل بهسازی، هدایت افزایش یافته و در حالت کاملاً بهسازی شده به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همان‌طور که شکل ۱ و جدول ۲ نشان می‌دهد با افزایش میزان استرانسیم از ۰/۰۱۵ درصد به

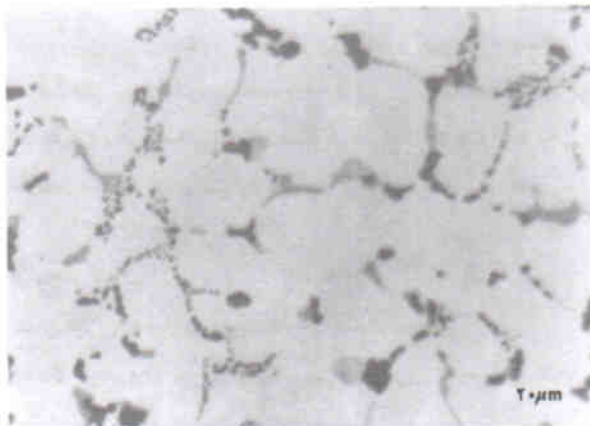




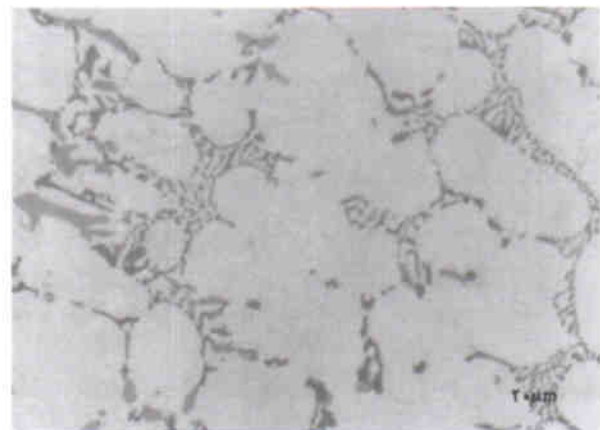
(ج) در حالت کاملاً بهسازی شده (نرخ بهسازی #۵)،  $Sr = 0.15\%$ ، بزرگنمایی  $500\times$



(الف) در حالت بهسازی نشده، بزرگنمایی  $500\times$



(د) در حالت فرابهبازی شده  $Sr = 0.21\%$ ، بزرگنمایی  $500\times$

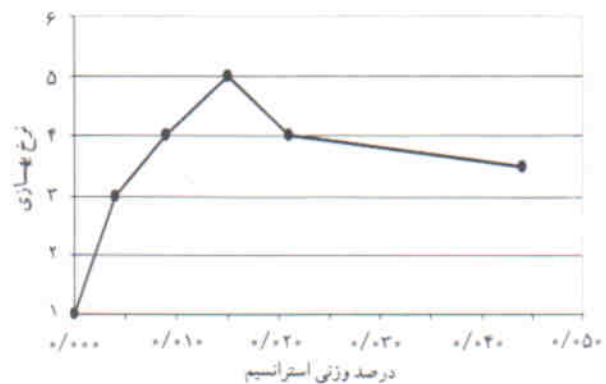


(ب) در حالت بهسازی شده جزئی (نرخ بهسازی #۳)،  $Sr = 0.04\%$ ، بزرگنمایی  $500\times$

شکل ۲. ریز ساختار نمونه‌های دگم‌ی.

هدایت الکتریکی به شدت به میزان عناصر آلیاژی باقی مانده در محلول جامد حساس است. بنابراین نحوه‌ی سرد کردن نمونه‌های دگم‌ی پس از انجماد تا دمای اتاق بر مقادیر هدایت الکتریکی مؤثر است. برای اطمینان از نمودارهای به دست آمده (شکل ۳ و ۱) می‌بایست مقادیر DAS نمونه‌های دگم‌ی که تابعی از سرعت سرد شدن آنهاست یکسان باشد. نتایج نشان می‌دهد که در DAS نمونه‌های دگم‌ی  $23/8 \pm 1/6 \mu m$  است.

نتایج تعیین مقادیر DAS در سرعت‌های سرد شدن مختلف جدول ۳ نتایج مربوط به قطعه‌ی پله‌ی بهسازی شده ( $0.12\%$  درصد  $Sr =$ ) و جدول ۴ نتایج مربوط به قطعه‌ی پله‌ی بهسازی نشده را نشان می‌دهند. مقادیر هدایت و DAS ارائه شده میانگین  $10$  بار اندازه‌گیری بر روی هر نمونه و در هر پله است. شکل ۴ نمودار هدایت



شکل ۳. نمودار نرخ بهسازی بر حسب افزایش درصد وزنی استرانسیم در آلیاژ  $AS_{50}U_{49}G$ .

نمونه‌های دگم‌ی قبل و بعد از عملیات بهسازی می‌توان میزان بهسازی مذاب را قبل از بارریزی و بدون استفاده از متالوگرافی پیش‌بینی کرد.



الف) ضخامت ۴/۳ میلی متر، بزرگنمایی ۵۰۰x



ب) ضخامت ۳ میلی متر بزرگنمایی ۵۰۰x  
شکل ۵. تأثیر سرد کردن (تغییر ضخامت نمونه های پله ای) بر ریزساختار نمونه های پله ای بهسازی نشده.

هدایت الکتریکی تأثیر می گذارد و امکان اندازه گیری DAS را به صورت غیرمخرب فراهم می کند. در مورد قطعه ای پله ای بهسازی شده، با افزایش ضخامت پله ها از ۴/۳ به ۳ میلی متر، هدایت با ۸/۲ درصد کاهش از ۳۲/۹۱٪ IACS به ۳۰/۲٪ IACS می رسد و اندازه ی DAS از ۴۵/۰۶  $\mu\text{m}$  به ۸۴/۰۴  $\mu\text{m}$  افزایش می یابد. در مورد قطعه ای پله ای بهسازی نشده با افزایش ضخامت پله ها از ۴/۳ به ۳ میلی متر هدایت، با ۴/۶ درصد کاهش از ۳۱/۰۷٪ IACS به ۲۹/۶۴٪ IACS می رسد و اندازه ی DAS از ۴۷/۱۵  $\mu\text{m}$  به ۱۰۴/۷۶  $\mu\text{m}$  افزایش می یابد.

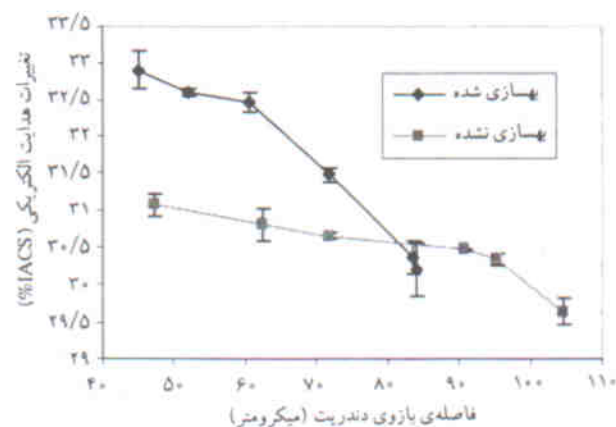
در مقادیر زیاد DAS هدایت الکتریکی قطعه های پله ای بهسازی شده و بهسازی نشده به هم می رسند (همگرا می شوند) که ناشی از کاهش تأثیر بهسازی در نمونه های ضخیم تر است. شیب نمودار هدایت بر حسب DAS در مورد قطعه ای پله ای بهسازی شده بیشتر از قطعه ای پله ای بهسازی نشده است. بنابراین

جدول ۳. تعیین مقادیر DAS به وسیله ی اندازه گیری هدایت الکتریکی در قطعه پله ای بهسازی شده (۱۲/۰٪ Sr).

ضخامت نمونه (mm)	میانگین هدایت الکتریکی (%IACS)	میانگین اندازه DAS ( $\mu\text{m}$ )	نرخ بهسازی
۴/۳	۳۲/۹۱ ± ۰/۲۵	۴۵/۰۶	۵
۸/۰	۳۲/۶۰ ± ۰/۰۶	۵۲/۰۲	۴/۵
۱۱/۳	۳۲/۴۶ ± ۰/۱۳	۶۰/۵۱	۳/۵
۱۸/۰	۳۱/۴۷ ± ۰/۰۹	۷۱/۶۷	۳
۲۳/۵	۳۰/۳۶ ± ۰/۲۱	۸۳/۵۳	۲/۵
۳۰/۰	۳۰/۲۰ ± ۰/۳۵	۸۴/۰۴	۲

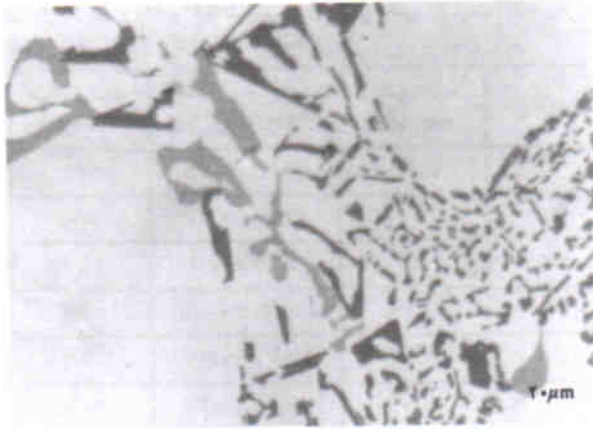
جدول ۴. تعیین مقادیر DAS به وسیله ی اندازه گیری هدایت الکتریکی در قطعه ای پله ای بهسازی نشده.

ضخامت نمونه (mm)	میانگین هدایت الکتریکی (%IACS)	میانگین اندازه DAS ( $\mu\text{m}$ )
۴/۳	۳۱/۰۷ ± ۰/۱۵	۴۷/۱۵
۸/۰	۳۰/۸۰ ± ۰/۲۳	۶۲/۳۵
۱۱/۳	۳۰/۶۵ ± ۰/۰۵	۷۱/۶۷
۱۸/۰	۳۰/۴۶ ± ۰/۰۱	۹۰/۶۳
۲۳/۵	۳۰/۳۴ ± ۰/۰۸	۹۵/۳۹
۳۰/۰	۲۹/۶۴ ± ۰/۱۷	۱۰۴/۷۶

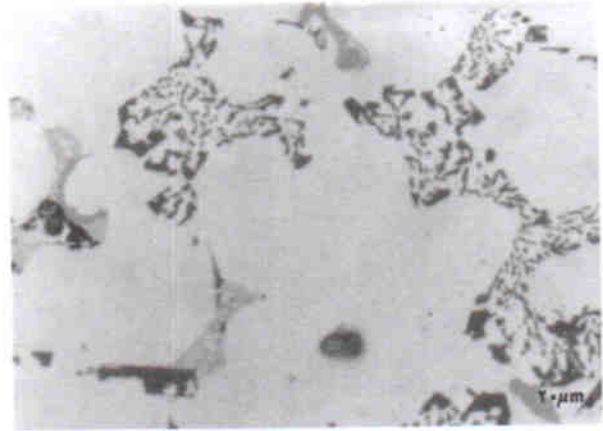


شکل ۴. نمودار تغییرات هدایت الکتریکی بر حسب تغییرات اندازه ی DAS در آلیاژ AS<sub>2</sub>U<sub>3</sub>G بهسازی شده و نشده به ترتیب با ضخامت های ۲۳/۵، ۳۰، ۱۱/۳، ۱۸/۰، ۴/۳ میلی متر.

الکتریکی را بر حسب DAS در نمونه های پله ای بهسازی شده و بهسازی نشده نشان می دهد. چنان که در شکل ۴ دیده می شود، مقادیر هدایت با افزایش DAS کاهش می یابد (نسبت معکوس دارند). علت این امر آن است که با تغییر فاصله ی بازوهای دندردیتی، اندازه فاز سیلیسیم یوتکتیک که بین دندردیت ها واقع است، تغییر کرده و بر



ب) ضخامت ۱۸mm بزرگنمایی ۵۰۰x



الف) ضخامت ۴/۳mm بزرگنمایی ۵۰۰x

شکل ۶. تأثیر سرد کردن (تغییر ضخامت نمونه‌های پله‌یی) بر ریزساختار نمونه‌های پله‌یی بهسازی شده.

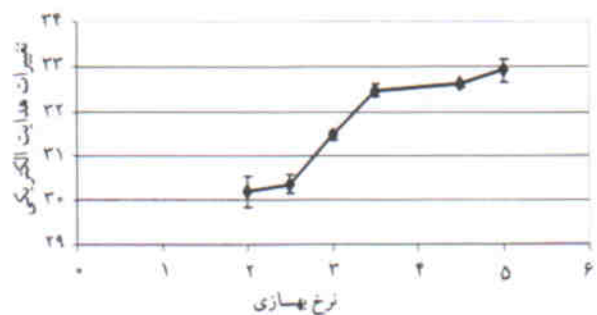
می‌شود و نرخ بهسازی از ۲ به ۵ می‌رسد و هدایت الکتریکی با ۹ درصد افزایش، از  $30/2$  به  $32/91$  IACS می‌رسد (جدول ۳). شکل ۶ ریزساختار نمونه‌های پله‌یی بهسازی شده را نشان می‌دهد، و شکل ۷ نیز نشانگر نمودار هدایت الکتریکی برحسب نرخ بهسازی در نمونه‌های پله‌یی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نرخ بهسازی، هدایت الکتریکی در آلیاژ افزایش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

۱. با استفاده از هدایت الکتریکی می‌توان میزان بهسازی مذاب را قبل از بارریزی و به‌صورت غیرمخرب در آلیاژ  $AS_5U_2G$  تعیین کرد. و این روش را می‌توان به‌عنوان ابزار کنترل کیفیت و به‌منظور تولید قطعات با کیفیت بالا مورد استفاده قرار داد.
۲. بیشترین مقدار هدایت الکتریکی (IACS  $34/03$ ) در نمونه‌ی کاملاً بهسازی شده (نرخ بهسازی ۵) با  $0/15$  درصد وزنی استرانسیم حاصل شد.
۳. ایجاد بهسازی در آلیاژ  $AS_5U_2G$  باعث افزایش هدایت الکتریکی به میزان  $13/7$  درصد می‌شود.
۴. مقادیر هدایت الکتریکی با افزایش اندازه‌ی DAS کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در نمونه‌های بهسازی شده در اثر افزایش اندازه‌ی DAS، هدایت الکتریکی از  $32/91$  به  $30/20$  IACS (یعنی به مقدار  $8/24$  درصد) کاهش یافته است و این امر امکان اندازه‌گیری DAS را به‌صورت غیرمخرب در آلیاژ  $AS_5U_2G$  بهسازی شده و بهسازی نشده فراهم می‌کند.
۵. تعیین مقادیر DAS به‌وسیله‌ی هدایت الکتریکی در آلیاژ  $AS_5U_2G$  بهسازی شده نسبت به آلیاژ بهسازی نشده از دقت و قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است.

حساسیت هدایت الکتریکی نسبت به تغییر DAS در مورد نمونه‌های بهسازی شده بیشتر است. همچنین اندازه‌گیری DAS با استفاده از هدایت الکتریکی در مورد نمونه‌های بهسازی شده از دقت بیشتری برخوردار است. شیب کمتر نمودار در نمونه‌های بهسازی نشده سبب تغییرات اندک در هدایت الکتریکی منجر به تفاوت‌های زیاد در مقادیر DAS شده و دقت در اندازه‌گیری DAS کاهش می‌یابد. از طرفی، اندازه‌گیری DAS در نمونه‌های بهسازی نشده بسیار مشکل‌تر از نمونه‌های بهسازی شده است و با خطای بیشتری همراه است، زیرا ساختار صفحه‌یی سیلیسیم بهسازی نشده، باعث می‌شود تا شناسایی دقیق بازوهای دندردیتی در ریزساختار قطعه به‌سختی انجام شود. در نمونه‌های پله‌یی بهسازی نشده، با کاهش اندازه‌ی DAS و افزایش سرد کردن، شکل سیلیسیم یوتکتیک از حالت درشت‌ساختار به ریزساختار تبدیل می‌شود و در نتیجه هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد (شکل ۵).

در نمونه‌های پله‌یی بهسازی شده، افزایش سرعت سرد کردن باعث تبدیل شکل سیلیسیم یوتکتیک از حالت لایه‌یی به رشته‌یی



شکل ۷. نمودار تغییرات هدایت الکتریکی برحسب نرخ بهسازی در نمونه‌های پله‌یی بهسازی شده آلیاژ  $AS_5U_2G$ .



### پانوشته

1. International Annealed Copper Standard
2. Mega Siemens/meter ( $\% \rightarrow \text{IACS} = \Delta \text{AMS/m}$ )
3. Linear intercept method

### منابع

1. Gruzleski, J.E. and Closser, B.M. "The treatment of liquid aluminum-silicon alloys", AFS Inc., Des Plaines, Illinois, (1990).
2. Shivkumar, S. Wang, L. and Apelian, D. "Molten metal processing of advanced cast aluminum alloys", JOM, pp 26-32, (Jan 1991).
3. Gruzleski, J.E. "The art and science of modification: 25 years of progress", AFS Transaction, **100**, pp 673-83, (1992).
4. Loper, C.R. and Cho, J.I. "Influence of trace amounts of phosphors in Al casting alloys. a review of the literature", AFS Transaction, **108**, pp 667-72, (2000).
5. Apelian, D. Sigworth, G.K. and Whaler, K. "Assessment of grain refinement and modification of Al-Si- foundry alloys by thermal analysis", AFS Transaction **92**, pp 297-307, (1984).
6. *Proceeding of the Conference on Thermal Analysis of Molten Aluminum*, American Foundrymen's Society, Des Plaines, Illinois, (1985).
7. Charbonnier, J. Morice, J. and Portalier, R. "Thermal analysis of aluminum alloys to determine their stability for casting", Int. Cast Metal Journal, pp 39-44, (Sep 1970).
8. Charbonnier, J. "Microprocessor assisted thermal analysis testing of aluminum alloy structure", AFS Transactions, **92**, (1984).
9. Mulazimoglu, M.H. Drew, R.A.L. and Gruzleski, J.E. "The electrical conductivity of cast Al-Si alloys In the range 2 to 12.6 wt pct silicon", Metallurgical Transactions, **20A**, pp 383-89, (March 1989).
10. Argo, D. Drew R.A.L. and Gruzleski, J.E. "A simple electrical conductivity technique for measurement of modification and dendrite arm spacing in Al-Si Alloys", AFS Transactions, **95**, pp 455-64, (1987).
11. Jacob S. and Remy, A. "Electrical conductivity and morphology of silicon in A-SB and A-S 76", Foundrie Fondeur, **22**, pp 33-51, (1983).
12. Hurlry, T.J. "Using electrical conductivity and ultrasonic to determine modification in Al-Si alloys", AFS Transaction, **194**, pp 159-172, (1986).
13. Orger, H. Closset, B.M. and Gruzleski, J.E. "Characterization of the eutectic microstructure in Al-Si foundry alloys by electrical resistivity", AFS Transactions, **91**, pp 17-20, (1983).
14. Closset, K. B. Pirie, and Guzleski, J.E. "Comparison of thermal analysis and electrical resistivity in microstructure evaluation of Al-Si foundry alloys", AFS Transactions, **92**, pp 23-23, (1984).
15. Closset, B. Drew, R.A.L. Gruzleski, J.E. and Pirie, K.: Mem.Sci. Rev. Metall., pp 167-79, (1985).
16. Drew, R.A.L. Muir, W.B. and W.M. Williams, "Differential resistively measurement for monitoring annealing", Metal. Trans., **1414**, pp 175-82, (1983).
17. Alp, T. Brough, I. Sanderson, S.J. and Entwistle, K.M. "A study of the stability of intermediate precipitates in an Al-4.07 wt.%Cu alloys using electrical resistivity measurement", Metal Science, **9**, pp 353-59, (1975).
18. ASTM Standards: Non Destructive Teting, E 1004-84, **03.03**, pp. 425-28, (1989).
19. ASTM Standards: Die-Cast Metals, Aluminum and Magnesium Alloys, E 716-85, **02.02**, pp. 720-27, (1989).