

اثر عنصر مس و سرعت انجماد بر خواص مکانیکی

آلیاژهای Al-Si-Cu-Mg

محمدعلی صفرخانیان (کارشناس ارشد)

سیده مرتضی سیدریحانی (دانشیار)

ناصر وره‌رام (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی و علم‌مواد، دانشگاه صنعتی شریف

آلیاژهای ریختگی Al-Si-Cu-Mg به دلیل برخورداری از خواص مناسب فیزیکی و مکانیکی، کاربرد وسیعی در صنایع گوناگون مانند صنایع نظامی، خودروسازی و هوافضا دارند. عناصر آلیاژی و سرعت انجماد از جمله پارامترهای کنترل‌کننده‌ی ریزساختار، و نتیجتاً مؤثر بر خواص مکانیکی این آلیاژها هستند. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر عنصر مس در محدوده‌ی ۲/۵-۱۰ درصد وزنی بر خواص مکانیکی آلیاژ $Si-۰/۴Mg-۰/۷Al$ در سرعت‌های مختلف انجماد است. برای دستیابی به هدف فوق یک نمونه طراحی شده با ضخامت‌های مختلف ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ cm از جنس آلیاژ $Si-۰/۴Mg-۰/۷Al$ با درصد‌های مختلف ۰/۷، ۱/۵، ۲/۳، ۳/۱ مس در قالب ماسه‌ی Co_2 ریخته‌گری و سپس خواص مکانیکی و ریزساختار مورد بررسی واقع شدند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزایش مقدار مس در آلیاژ $Si-۰/۴Mg-۰/۷Al$ دو تأثیر متضاد بر خواص مکانیکی دارد. اثر مثبت افزایش مقدار مس در این آلیاژ، مستحکم شدن زمینه بر اثر تشکیل رسوبات حاوی مس، و اثر منفی آن کاهش استحکام آلیاژ در اثر افزایش مک و تخلخل است. این دو اثر سبب می‌شود که استحکام آلیاژ حاوی ۱/۵٪ مس، در سرعت‌های بالای انجماد، بیشینه شود.

مقدمه

آلیاژهای ریختگی Al-Si-Cu-Mg به عنوان مهم‌ترین گروه آلیاژهای ریختگی Al-Si به دلیل خواص ریخته‌گری خوب، جوش‌پذیری مناسب، شست‌ناپذیری و مقاومت مناسب در برابر خوردگی کاربردهای فراوانی در صنایع هوافضا و خودروسازی دارند. خواص مکانیکی این آلیاژها مستقیماً وابسته به ریزساختار است. عوامل مؤثر بر ریز ساختار و یا خواص مکانیکی آلیاژهای ریختگی آلومینیم عبارت‌اند از: [۱-۳] ترکیب شیمیایی و کیفیت مذاب، فرایند ریخته‌گری و کیفیت قطعه‌ی ریختگی، و عملیات حرارتی.

عنصر مس بعد از سیلیسیم مهم‌ترین عنصر آلیاژی در آلیاژهای ریختگی آلومینیم است. افزودن مس به آلومینیم در مقادیر کم، باعث افزایش استحکام در دمای بالا، سختی، استحکام خستگی و بهبود قابلیت ماشین‌کاری می‌شود. اما افزودن مس بالاتر از ۱۲٪ به آلومینیم سبب می‌شود که آلیاژ به دست آمده بسیار شکننده شود. [۴-۷] مهم‌ترین فاز حاوی عنصر مس، در آلیاژهای آلومینیم، فاز Al_2Cu است که یک ساختار شبکه‌ی تتراگونال دارد. با حضور عناصر سیلیسیم و منیزیم در آلیاژهای آلومینیم شامل مس، ترکیبات پیچیده‌ی حاوی عناصر آلومینیم، مس، سیلیسیم و منیزیم تشکیل می‌شود. مثلاً می‌توان از تشکیل فاز $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$ با ساختار هگزاگونال و به صورت یک ترکیب بین

فازی نام برد. [۸] بسته به سرعت انجماد و حضور Sr، فاز Al_2Cu به شکل بلوکه‌ی یا به صورت کلنی‌های یوتکتیک $Al + Al_2Cu$ یا در هر دو شکل، به طور همزمان در ریزساختار مشاهده می‌شود. [۶] توزیع و ریخت‌شناسی فازهای ثانویه و همچنین اندازه، مقدار و توزیع مک‌های گازی بستگی به سرعت انجماد دارد. هر چه سرعت انجماد بالاتر باشد، استحکام نهایی (UTS)، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نسبی افزایش می‌یابد. [۹-۱۲] در این تحقیق سعی شده است همراه با تغییر سرعت انجماد در اثر تغییر مدول ریختگی یک نمونه‌ی طراحی شده، نقش عنصر مس در محدوده‌ی ۲/۵-۱۰٪ مس بر خواص مکانیکی آلیاژ $Si-۰/۴Mg-۰/۷Al$ بررسی شود.

روش تحقیق

یک مدل چوبی با ضخامت‌های مختلف در محدوده‌ی ۱-۵ cm به هدف تغییر سرعت سرد شدن طراحی شد. برای تغذیه‌رسانی کامل، کم‌ترین ضخامت در پایین و بیشترین ضخامت همراه با تغذیه در بالای قطعه در نظر گرفته شد. بدین ترتیب پس از پر شدن قالب توسط مذاب، هر یک از ضخامت‌ها توسط ضخامت بزرگ‌تر تغذیه شده و تغذیه‌رسانی بزرگ‌ترین ضخامت به وسیله تغذیه‌ی طراحی شده، انجام

شده‌اند. پس از تهیه‌ی مذاب هر یک از چهار آلیاژ مذکور، ریخته‌گری در قالب‌های ماسه‌یی از قبل تهیه شده انجام گرفت و برای هر یک از نمونه‌ها از ضخامت‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر دو آزمایش کشش از مرکز ضخامت‌ها به صورت افقی و طبق استاندارد ASTM-B557 تهیه شد. تمام ۴۰ نمونه آزمایش کشش، توسط دستگاه آزمون کشش، ساخت شرکت Instron (مدل ۸۵۰۲) تهیه شدند، به طوری که نرخ کرنش ۵mm/min در نظر گرفته شد. پس از آزمایش کشش برای هر یک از نمونه‌ها مقادیر استحکام تسلیم، استحکام نهایی، و درصد انعطاف‌پذیری به دست آمد.

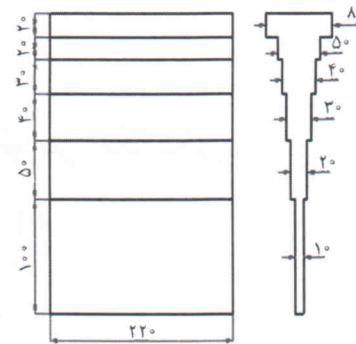
مقطع نمونه‌های آزمایش کشش پس از شکسته شدن توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) ساخت شرکت ISI-ABT مدل SR۵۰ بررسی، و در صورت لزوم عکس‌برداری از سطوح شکست نیز انجام شد.

نتایج

شکل ۲ تغییرات سختی نمونه‌ها را بر اثر افزایش مقدار مس در ضخامت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی نمونه‌ها در تمام ضخامت‌ها، با افزایش مقدار مس، افزوده می‌شود. شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی تغییرات سختی بر اثر تغییر ضخامت است. چنان که در این شکل مشاهده می‌شود سختی نمونه‌ها بر اثر افزایش ضخامت، کاهش جزئی می‌یابد.

شکل ۴ تغییرات استحکام تسلیم نمونه‌ها را بر اثر تغییر مقدار مس در ضخامت‌های مختلف ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، استحکام تسلیم نمونه‌ها در ضخامت ۱ سانتی‌متر بر اثر افزایش مقدار مس افزوده شده و آلیاژی که حاوی ۱/۵٪ مس است در سه ضخامت ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر بیشترین مقدار استحکام تسلیم را دارد. در ضخامت ۵ سانتی‌متر آلیاژی بیشترین مقدار استحکام تسلیم را دارد که حاوی ۰/۷٪ مس است. نکته‌ی دیگری که در این شکل مشاهده می‌شود، بر اثر افزایش ضخامت، کاهش استحکام تسلیم است.

شکل ۵ اثر عنصر مس بر استحکام نهایی آلیاژهای مورد بررسی



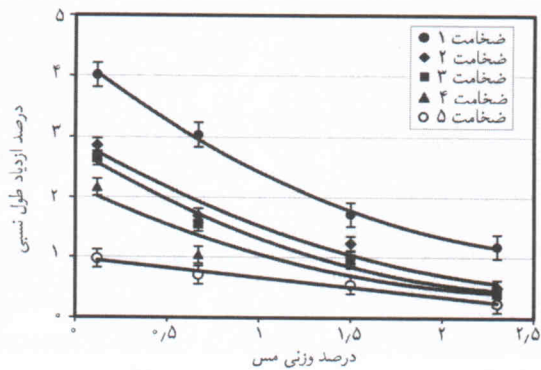
شکل ۱. شمایی از مدل طراحی شده (اعداد بر حسب میلی‌متر است).

شد. در شکل ۱ شمایی از مدل طراحی شده همراه با تغذیه نشان داده شده است. مدل طراحی شده شامل پنج ضخامت ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر است. سیستم راهگامی این مدل نیز مطابق تحقیقات انجام شده توسط کمبل^[۱۳] طراحی شد. با استفاده از مدل تهیه شده، قالب‌گیری توسط ماسه‌ی سیلیسیم‌ی و چسب سیلیکات سدیم، و به روش دمش گاز CO₂ انجام شد.

شمس آلیاژ ۴Mg/۰/۴ - Al-۰/۷Si به مقدار ۸ کیلوگرم در کوره‌ی مقاومتی قرار گرفت. کوره برای رسیدن به دمای ۵۰ ± ۷۲°C تنظیم شد. قبل از رسیدن به این دما و شروع ذوب برای کنترل اتمسفر کوره و جلوگیری از واکنش‌های مضر، محیط کوره تحت گاز آرگون قرار گرفت. سپس مقدار مس مورد نیاز برای تهیه‌ی آلیاژ مورد نظر به مذاب افزوده و برای انحلال کامل مس در مذاب، شرایط کوره به مدت ۱۵ دقیقه حفظ شد. پس از آن عملیات گاززدایی به صورت دمش‌گاز آرگون به داخل مذاب، با دبی ۱ Lit/min، و به مدت ۱۰ دقیقه، انجام شد. پس از اتمام گاززدایی، ریخته‌گری در قالب ماسه‌یی انجام شد. مراحل فوق، چهار مرتبه و به هدف تهیه‌ی چهار آلیاژ مورد نظر تکرار شد. آنالیز شیمیایی چهار آلیاژ تهیه شده در جدول ۱ آمده است. قابل ذکر است که منظور از چهار آلیاژ مورد بررسی، آلیاژهای x/Cu - ۴Mg/۰/۴ - Al - ۰/۷Si بوده که در آن‌ها X می‌تواند یکی از مقادیر ۱/۷، ۲/۳، ۵/۱، ۷/۱ باشد. در این تحقیق، این چهار آلیاژ به ترتیب با علائم ۱Cu/۰/۷، ۲Cu/۰/۷، ۳Cu/۰/۷، و ۴Cu/۰/۷ نشان داده

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژهای تهیه شده.

ترکیب شیمیایی (%Wt)										
Base	Ti	Sn	Zn	Ni	Mn	Fe	Mg	Cu	Si	نوع آلیاژ
۹۱/۶۳۳	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰	۰/۰۳۳	۰/۰۰۳	۰/۰۶۷	۰/۳۷۱	۰/۳۹۰	۰/۱	۷/۳۹۰	۱Cu/۰/۷
۹۱/۴۶۹	۰/۰۲۰	۰/۰۰۴	۰/۰۳۲	۰/۰۰۴	۰/۰۶۲	۰/۳۵۵	۰/۳۳۸	۰/۷	۷/۳۰۳	۲Cu/۰/۷
۹۰/۵۰۸	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۵۶	۰/۳۳۳	۰/۳۵۶	۱/۵	۷/۲۷۷	۳Cu/۰/۷
۸۹/۵۴۶	۰/۰۱۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۵۴	۰/۳۲۱	۰/۳۰۱	۲/۳	۷/۳۷۴	۴Cu/۰/۷



شکل ۱. تغییرات درصد افزایش طول نسبی، بر اثر افزایش مقدار مس.

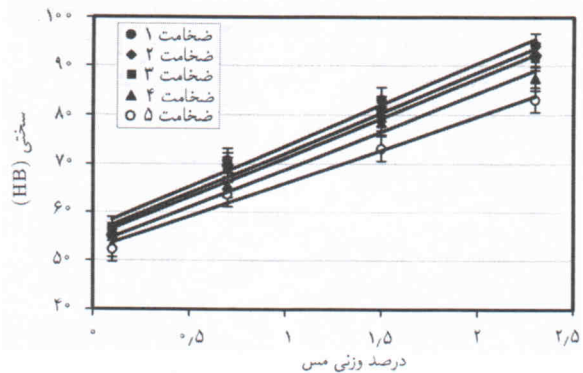
را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشاهده می‌شود استحکام نهایی آلیاژ حاوی ۱/۵٪ مس در ضخامت‌های ۱، ۲، ۳، و ۴ سانتی‌متر بیشینه شده است اما با افزایش مقدار مس، استحکام نهایی در ضخامت ۵ سانتی‌متر روند نزولی دارد. همچنین مشاهده می‌شود که استحکام نهایی در هر یک از آلیاژها بر اثر افزایش ضخامت کاهش می‌یابد.

شکل ۲ نشان‌دهنده تغییرات درصد ازدیاد طول نسبی، بر اثر افزایش مس است. چنان که مشاهده می‌شود، درصد افزایش طول نسبی در تمام ضخامت‌ها بر اثر افزایش مقدار مس کاهش یافته است. همین شکل نشان‌دهنده کاهش درصد ازدیاد طول نسبی چهار آلیاژ، بر اثر افزایش ضخامت است.

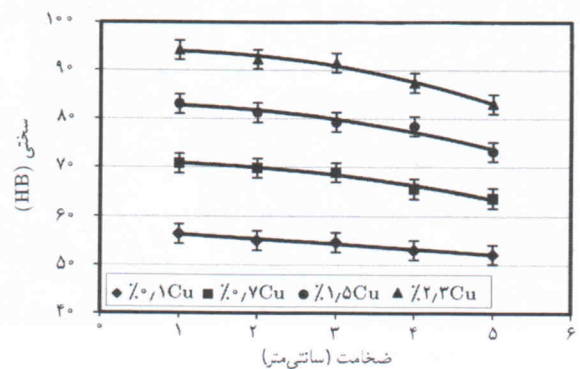
در شکل ۳ سطوح شکست نمونه‌های ریخته‌گاری دو آلیاژ حاوی ۱٪ و ۱/۵٪ مس مربوط به دو ضخامت ۱ و ۵ سانتی‌متر که توسط میکروسکوپ الکترونی به دست آمده رسم شده است. در دو تصویر الف و ب، مسیر انتشار ترک در دو آلیاژ مذکور و در ضخامت ۱ سانتی‌متر مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکست از نوع رشته‌ای است، که مشخصه‌ی شکست نرم است. دو تصویر ج و د، مربوط به سطح شکست دو آلیاژ مذکور در ضخامت ۵ سانتی‌متر است. در این تصاویر دو نکته مشاهده می‌شود: اول حضور صفوف کشیده، مربوط به شکست فاز سیلیسیم و عدم حضور دیمپل‌ها؛ دوم حضور یک سری مناطق تخت که به وسیله‌ی بردار مشخص شده‌اند و مربوط به شکست فازهای حاوی آهن، هستند. براساس تحلیل (EDX) یکی از این مناطق که در شکل ۸ آمده است، حضور فاز آهن در این مناطق قطعی است.

بحث و بررسی

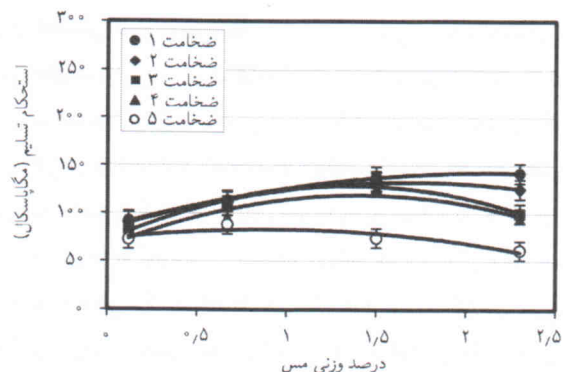
نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که سختی نمونه‌ها در تمام ضخامت‌های مورد بررسی بر اثر افزایش مقدار مس در آلیاژ اولیه، روند افزایشی دارد، و آلیاژ حاوی ۱/۵٪ مس در سرعت‌های بالای



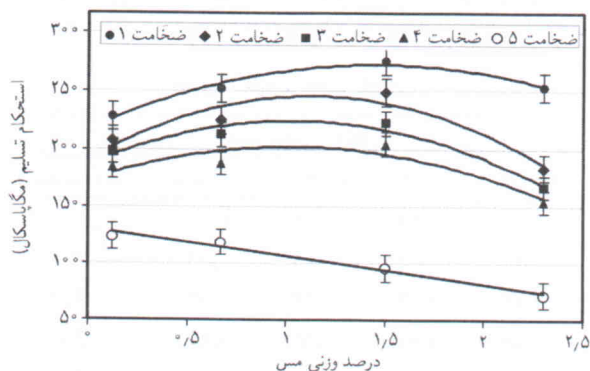
شکل ۲. تغییرات سختی نمونه‌ها بر اثر افزایش مقدار مس.



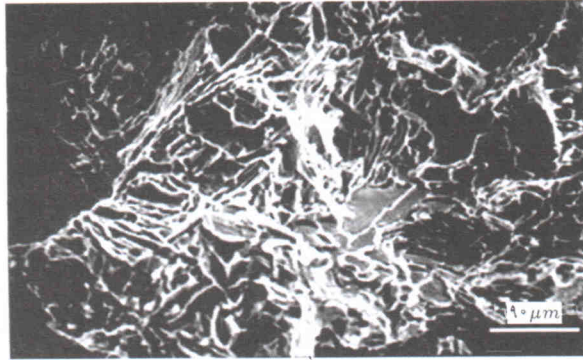
شکل ۳. تغییرات سختی بر اثر تغییر ضخامت.



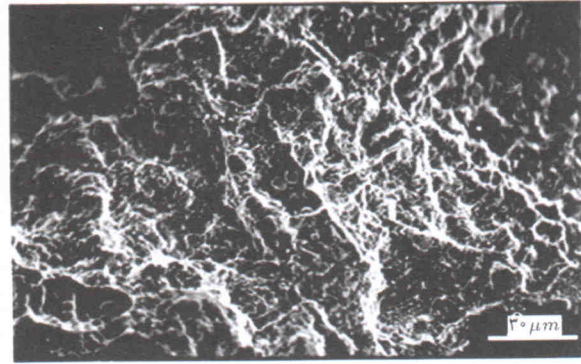
شکل ۴. تغییرات استحکام تسلیم، بر اثر افزایش مقدار مس.



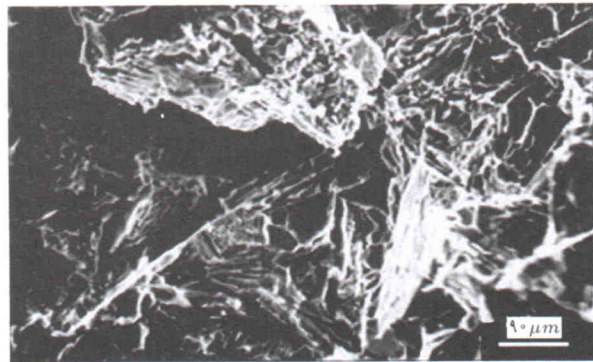
شکل ۵. تغییرات استحکام نهایی، بر اثر افزایش مقدار مس.



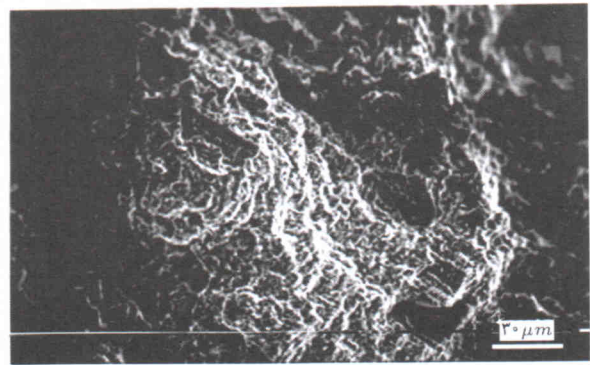
ج) آلیاژ حاوی ۱٪ مس در ضخامت ۵ سانتی‌متر؛



الف) آلیاژ حاوی ۱٪ مس در ضخامت ۱ سانتی‌متر؛



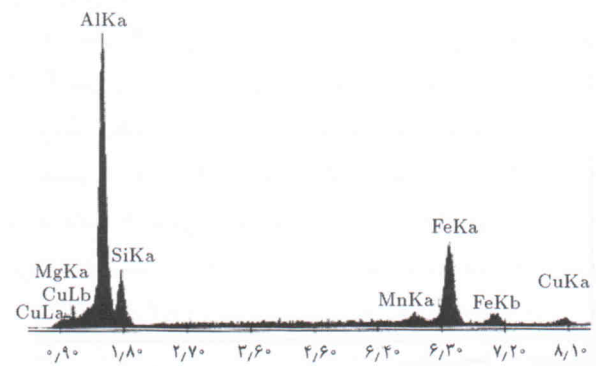
د) آلیاژ حاوی ۱٫۵٪ مس در ضخامت ۵ سانتی‌متر.



ب) آلیاژ حاوی ۱٫۵٪ مس در ضخامت ۱ سانتی‌متر؛

شکل ۷. تصویرهای SEM از سطوح شکست در شرایط مختلف .

برای اطمینان کامل از این مطلب درصد حجمی مک و تخلخل تمام نمونه‌های مورد بررسی با استفاده از قانون ارشمیدس اندازه‌گیری شد. در جدول ۲ نتایج حاصل از اندازه‌گیری درصد حجمی مک و تخلخل در نمونه‌ها ارائه شده است. شکل ۱۰ نشان‌دهنده تغییرات درصد حجمی مک بر اثر افزایش مس در پنج ضخامت مورد بررسی است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار مس، درصد حجمی مک و تخلخل در تمام ضخامت‌ها افزایش می‌یابد. افزایش درصد حجمی مک و تخلخل در اثر افزایش مقدار مس در آلیاژهای Al-Si-Mg توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است. [۱۴ و ۱۵] با توجه به تحقیقات محققین مختلف در رابطه با چگونگی افزایش مقدار



شکل ۸. تحلیل مربوط به مناطق مشخص شده در شکل ۷ ج.

جدول ۲. درصد حجمی تخلخل.

درصد حجمی تخلخل				ضخامت (cm)
%۲٫۳Cu	%۱٫۵Cu	%۰٫۷Cu	%۰٫۱Cu	
۱٫۳۴	۰٫۹۶	۰٫۷۹	۰٫۶۰	۱
۱٫۴۱	۱٫۰۶	۰٫۸۱	۰٫۷۷	۲
۱٫۶۳	۱٫۲۲	۱٫۱۴	۰٫۸۴	۳
۱٫۸۶	۱٫۶۶	۱٫۵۴	۱٫۳۳	۴
۳٫۰۴	۲٫۹۳	۱٫۸۴	۲٫۵۸	۵

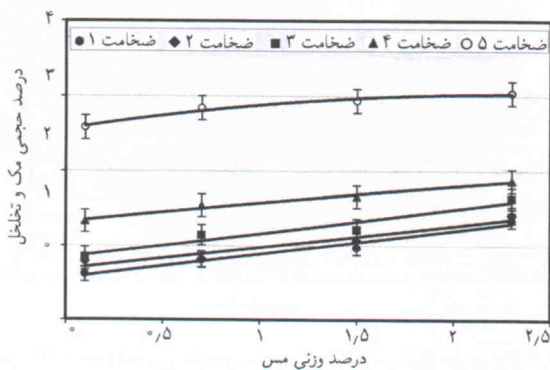
انجماد دارای بیشترین استحکام تسلیم و نهایی است. علت این پدیده را باید در بررسی ریزساختار نمونه‌ها جست و جو کرد. به همین دلیل از هر پنج ضخامت مربوط به چهار آلیاژ مورد بررسی نمونه‌های متالوگرافی تهیه شد و ریزساختار نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۹ افزایش مقدار و اندازه‌ی فازهای حاوی مس (کلنی‌ها و بلوکه‌های تیره) بر اثر افزایش مقدار مس از ۰٫۷٪ به ۱٫۵٪، مشاهده می‌شود. نکته‌ی دیگری که در بررسی ریزساختار نمونه‌ها مشاهده شد این بود که با افزایش مقدار مس در آلیاژ اولیه، مقدار مک و تخلخل افزایش می‌یابد.

بهبود خواص مکانیکی می‌شود، و دیگری اثر منفی که باعث تضعیف خواص مکانیکی می‌شود؛ این دو اثر به طور کامل در زیر توضیح داده شده است:

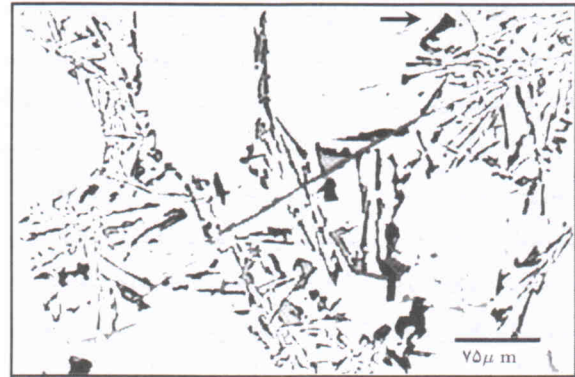
الف) در اثر افزایش مس در آلیاژ Al-Si-Cu-Mg (شکل ۹) فازهای حاوی مس در فضای بین دندریت‌ها تشکیل می‌شوند. این فازها به‌عنوان موانعی در برابر حرکت ناب‌جایی‌ها هستند و موجب افزایش استحکام آلیاژ می‌شوند. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که سختی، بر اثر افزایش مس روندی افزایشی دارد. از آنجا که حد حلالیت مس در آلیاژهای آلومینیوم در دمای محیط ۱/۰٪ است، آنچه موجب افزایش سختی آلیاژها شده است، استحکام‌دهی فازهای بین دندریتی حاوی مس است. از آنجا که در آزمایش سختی سنجی، تغییر فرم خمیری در منطقه‌ی محدودی رخ می‌دهد، عیوب ریختگی از قبیل مک و تخلخل در آزمایش سختی سنجی بدون تأثیرند.

ب) با افزایش مس در آلیاژ Al-Si-Cu-Mg، مقدار مک و تخلخل در آلیاژ افزایش می‌یابد. در شکل ۱۰ چگونگی این افزایش نشان داده شد است. حضور مک باعث ایجاد تمرکز تنش می‌شود، بنابراین در اثر افزودن مس به آلیاژ مذکور، مناطق تمرکز تنش افزایش می‌یابد، به طوری که خواص مکانیکی در آزمایش کشش تضعیف می‌شود.

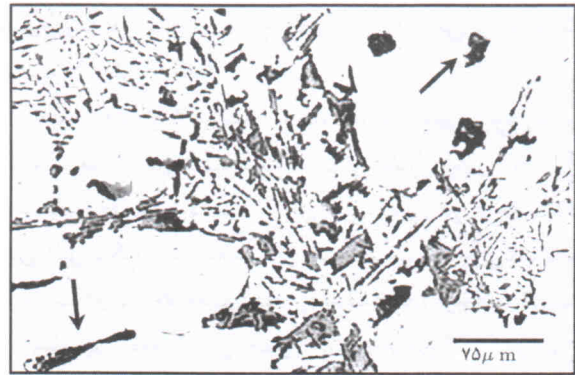
در شکل ۴ نشان داده شد که به دلیل اثر مثبت مس، ناشی از حضور فازهای حاوی مس، استحکام تسلیم نمونه‌های ریختگی در ضخامت ۱ سانتی‌متر بر اثر افزایش مقدار مس افزایش یافته است، اما در سه ضخامت ۳، ۲ و ۴ سانتی‌متر، آلیاژ حاوی ۱/۵٪ مس بیشترین استحکام تسلیم را دارد که علت این تغییرات، غلبه‌ی اثر منفی حضور مس بر اثر مثبت آن در آلیاژ حاوی ۲/۳٪ مس و کاهش استحکام تسلیم، آن است. در ضخامت ۵ سانتی‌متر اثر منفی حضور مس سریع‌تر بر اثر مثبت آن غلبه کرده است، به طوری که آلیاژ حاوی ۰/۷٪ مس



شکل ۱۰. تغییرات درصد حجمی تخلخل بر اثر افزایش مقدار مس.



الف) ۰/۷Cu٪



ب) ۱/۵Cu٪

شکل ۹. فازهای حاوی مس در ضخامت ۴ سانتی‌متر برای دو آلیاژ ۰/۷Cu٪ و ۱/۵Cu٪.

مک و تخلخل در اثر افزودن مس به آلیاژهای Al-Si، سازوکارهایی که توجیه‌کننده این پدیده هستند عبارت‌اند از: سازوکار واکنش سه‌تایی؛ سازوکار فشار گاز هیدروژن.

حضور مس در آلیاژ Al-Si، باعث تشکیل یوتکتیک سه‌تایی $L \rightarrow Al + Al_2Cu + Si$ در دمای $525^\circ C$ می‌شود. این در حالی است که تشکیل شبکه‌ی دندریتی در دمای $610^\circ C$ و واکنش یوتکتیک دو تایی در دمای $570^\circ C$ اتفاق می‌افتد. بنابراین واکنش یوتکتیک سه‌تایی فوق احتمالاً زمانی اتفاق می‌افتد که حجم زیادی از مذاب اولیه، منجمد شده است. [۱۴]

در طی مراحل اولیه‌ی انجماد آلیاژ Al-Si-Cu زمانی که دندریت‌های Al تشکیل می‌شوند، عنصر مس در مذاب باقی مانده، پس زده می‌شود. این روند تا پس از تشکیل یوتکتیک دو تایی Al-Si ادامه می‌یابد، به طوری که مقدار مس در مذاب باقی مانده تا حدود ۲۷٪ افزایش می‌یابد. در اثر افزایش مس در مذاب آلومینیم با یک مقدار مشخص گاز حل شده، فشار گاز هیدروژن افزایش می‌یابد. [۱۵]

بنابراین می‌توان گفت که افزایش مقدار مس در آلیاژ Al-Si دو اثر متضاد بر خواص مکانیکی این آلیاژ دارد: یکی اثر مثبت که سبب

به دلیل کاهش سرعت انجماد و نزدیکی به تغذیه شدیداً افزایش یافته است، استحکام نهایی در این ضخامت بر اثر افزایش مس روند کاهشی دارد؛ به عبارت دیگر اثر مثبت حضور مس در این ضخامت ناچیز است.

با افزایش ضخامت نمونه‌های ریختگی دو پدیده مشاهده می‌شود: اول آن که طول صفحات فاز آهن بزرگ شده و تیغه‌های ریز سیلیسیم تبدیل به تیغه‌های درشت شده‌اند (شکل ۱۱)؛ و دوم آن که درصد حجمی مک افزایش یافته است. هر دو پدیده در کاهش خواص مکانیکی مؤثرند زیرا هر دو باعث افزایش مناطق تمرکز تنش می‌شوند، به طوری که سختی، استحکام تسلیم، استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول نسبی همان‌طور که در شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت کاهش یافته‌اند.

با توجه به شکل ۷ شکست در ضخامت‌های پائین از نوع رشته‌یی است، که مشخصه‌ی شکست نرم است، و حضور دیمپل‌ها در سطح شکست و بالا بودن درصد افزایش طول نسبی در ضخامت‌های پائین دلیل دیگری برای شکست نرم در ضخامت‌های پائین است. در ضخامت‌های بالا اولاً به دلیل حضور صفوف کشیده مربوط به شکست فاز سیلیسیم و دوماً به دلیل حضور یکسری مناطق تخت، مربوط به شکست فازهای حاوی آهن، شکست ترد در ضخامت‌های بالا تأیید می‌شود. نکته‌ی دیگری که در شکل ۷ مشاهده می‌شود آن است که با افزایش مقدار مس، دیمپل‌ها ریزتر می‌شوند که نشان‌دهنده‌ی افزایش تردی است و دلیل آن افزایش مقدار مک و تخلخل و فازهای حاوی مس است که هر دو سبب تمرکز تنش می‌شوند.

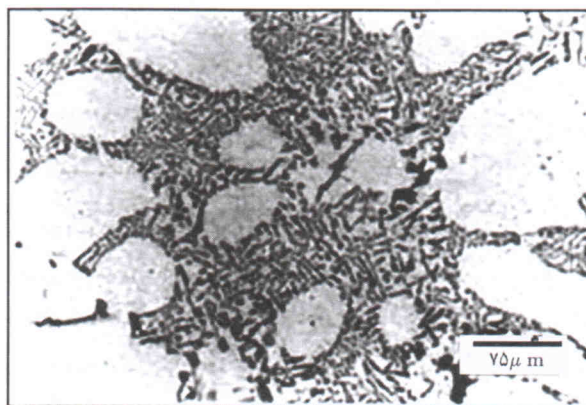
نتیجه‌گیری

نتایجی که از این تحقیق به دست آمد عبارت‌اند از:

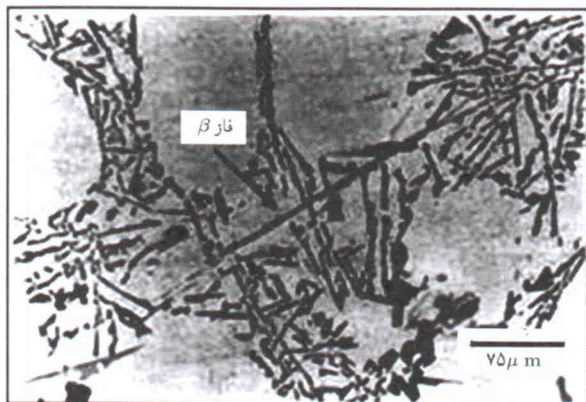
۱. با افزایش مقدار مس در آلیاژهای Al-Si-Cu-Mg اندازه و مقدار مک‌های گازی و انقباضی افزایش می‌یابد.
۲. افزایش مقدار عنصر مس در آلیاژهای Al-Si-Cu-Mg دو اثر متضاد بر خواص استحکامی دارد: کاهش استحکام به دلیل افزایش درصد مک و تخلخل؛ افزایش استحکام به دلیل افزایش فازهای حاوی مس در ریزساختار.
۳. استحکام آلیاژ حاوی ۱/۵٪ مس در سرعت‌های بالای انجماد بیشینه است.
۴. با افزایش مقدار مس در آلیاژهای Al-Si-Cu-Mg درصد افزایش طول نسبی شکست کاهش می‌یابد.
۵. با افزایش سرعت انجماد، اندازه و مقدار مک‌ها کاهش می‌یابد و شکست از حالت ترد به شکست نرم تبدیل می‌شود.

دارای بیشترین مقدار استحکام تسلیم است، که دلیل آن تأثیر سرعت انجماد بر اثرگذاری عنصر مس است؛ بدین معنی که اثر منفی مس بر اثر کاهش سرعت انجماد شدیدتر می‌شود، زیرا که دندریت‌ها درشت‌تر شده و حجم حوضچه‌های مذاب به دام افتاده افزایش می‌یابد.

از آنجا که در آزمایش کشش، استحکام نهایی نسبت به استحکام تسلیم در تنش‌های بالاتر اتفاق می‌افتد، اثر منفی حضور مس در آلیاژ (ناشی از افزایش مک و تخلخل به عنوان مناطق تمرکز تنش در آلیاژ) بر استحکام نهایی شدیدتر خواهد شد. علاوه بر این مک می‌تواند به عنوان ترک عمل کرده و شکست آلیاژ را آسان سازد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که استحکام نهایی آلیاژ حاوی ۲/۳٪ مس نسبت به آلیاژ حاوی ۱/۵٪ مس در ضخامت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر کاهش یافته است، و این نشان‌دهنده‌ی غلبه‌ی اثر منفی حضور مس ناشی از افزایش مک، بر اثر مثبت آن ناشی از حضور فازهای حاوی مس، است. این امر قبل از نقطه‌ی ۱/۵٪ مس اتفاق نیفتاده است. از آنجا که مقدار مک در هر چهار آلیاژ در ضخامت ۵ سانتی‌متر



الف) ۱ سانتی‌متر؛



ب) ۴ سانتی‌متر.

شکل ۱۱. ریخت‌شناسی فازهای سیلیسیم و آهن در آلیاژ حاوی ۰/۷Cu٪ برای دو ضخامت ۱ و ۴ سانتی‌متر.

منابع

1. Barresi, J., Kerr, M.J., Wang, H., Couper, M.J., "Effect of Magnesium, iron and Cooling Rate on Mechanical Properties of Al - 7Si -Mg Foundry Alloys", *AFS Trans.* **117**, pp. 563-570 (2000).
2. Paray, F., Gruzleski, J.E., "Microstructure – Mechanical Property Relationships in a 356 Alloy. Part I: Microstructure", *Cast Metals*, **7**, (1), pp.29-40 (1994).
3. Paray, F., Gruzleski, J.E., "Microstructure – Mechanical Property Relationships in a 356 Alloy. Part II: Mechanical Properties", *Cast Metals*, **7**, (3) pp.153-163 (1994).
4. ASM. Hand Book of Aluminum, 1988.
5. Shivkumar, S., Wang, L., Apelian D., Molten Metal Processing of Advanced Cast Aluminum alloys, *JOM.*, pp. 27-32 (1991).
6. Roy, N., Samuel, A.M., Samuel, F.H., "Porosity Formation in Al - 9 Wt Pct Si - Wt Pct Cu Alloy Systems: observation", *Metallu. and Mat. Trans.*, **27A**, pp.415-429 (1996).
7. Gowri, S., Samuel, S.F., "Effect of Alloying Elements on the Solidification and Microstructure of Al-Si-Cu-Mg-Fe 380 Alloy" *Metallu. and Mat. Trans.*, **25A**, pp.437-448 (1994).
8. Backerud, L., Chai, G., Tamminen, J., "Solidification Characteristics of Aluminum alloys", **2**, Foundry Alloys Desplains AFS (1990).
9. Hetke, A., Gundlach, R.B., "Aluminum Casting Quality in Alloy 356 Engine Components", *AFS. Trans.*, **137**, pp. 367-380 (1994).
10. Gandlach, R.B., Rose, B., Hetke, A., Valtierra, S., Mojica, J.F., "Thermal Fatigue Resistance of Hypoeutectic Aluminum-Silicon Alloys", *AFS. Trans.*, **141**, pp. 205-211 (1994).
11. Parabhu, K.N., Kumar, S.A., Vencatman, N., "Effect of Coating /Mold Wall/ Casting Thickness on Heat Transfer and Solidification of Al-Cu-Si Alloy (LM-21) in Cast iron molds", *AFS. Trans.*, **109**, pp. 827-832 (1994).
12. Bian, X., Zhang, Z., Liu, X., "Effects of Strontium Modification on Hydrogen Content and Porosity Shape Al- Si", *Mater. Scien. Forum*, Alloys **331-337**, pp. 361-366 (2000).
13. Campbell, J., "Casting", Butter Worth-Heinman Ltd (1993).
14. Edwards, G.A., Sigworth, G.K., Caceres, C.H., John, D.H.St., Barresi, J., "Microporosity Formation in Al-Cu-Si-Mg Casting Alloys", *AFS. Trans.*, **59**, pp. 809-818 (1997).
15. Caceres, C.H., Djurdjevic, M.B., T.J. Stockwell, T.J., Sokolowski, J.H., "Teh Effect of Cu Content on the Level of Microporosity in Al- Si-Cu-Mg Casting Alloys", *Scripta Materialia*. **40** (5), pp.631-637 (1999).

