

# تأثیر سیکل عملیات حرارتی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ پیستون بهسازی شده

سعید شبستری  
استادیار

محمدعلی بوتراپی  
دانشیار

معصومه فرجی  
کارشناس ارشد

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد ، دانشگاه علم و صنعت ایران

## چکیده

در تحقیق حاضر تأثیر عملیات حرارتی T5 بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ پیستون (AlSi18Mg) اصلاح شده با فسفر مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، نمونه های کششی تهیه شده در قالب دائمی در سه دمای ۱۹۰، ۲۰۰ و ۲۲۵°C به مدت ۸ ساعت تحت عملیات حرارتی بهسازی قرار گرفتند. سپس خواص مکانیکی نمونه ها اندازه گیری شده و تحلیل ریز ساختاری بر روی آنها انجام شد. نتایج خواص مکانیکی، متالوگرافی و آنالیز تصویری حاصل از سیکل های مختلف عملیات حرارتی اعمال شده بر روی نمونه ها با نمونه ریختگی عملیات حرارتی نشده مقایسه شد. مشخص گردید که عملیات حرارتی سبب ریزدانه تر و کروی تر شدن ذرات سیلیسیم اولیه شده و نیز با کوچکتر شدن DAS و سیلیسیم یونکتیک، استحکام آلیاژ افزایش می یابد.

## *Effects of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Modified Piston Alloy*

M.A. Boutorabi  
Associate Professor

S. Shabastari  
Assistant Professor

M. Faraji  
MSc. Graduate

University of Science and Technology

## Abstract

*The effect of T5 treatment on the microstructure and mechanical properties of piston alloy (Al-Si-18Mg) modified with P has been investigated. The tensile test samples produced in permanent mould have been aged at three temperatures of 190, 200 and 225°C for 8 hours. The mechanical properties have been evaluated and the microstructures have been studied. The results of heat treated and as cast samples have been compared. It was shown that the T5 treatment produces finer grains and more spheroidals primary silicon which increase the strength of the material.*

استفاده از آلیاژهای هایپرپروتکتیک آلومینیوم - سیلیسیم در پیستون‌ها و موتورهای احتراق درونی برگرفته از ضریب انبساط حرارتی پایین و مقاومت به سایش بالای این آلیاژها نسبت به دیگر آلیاژهای آلومینیوم می‌باشد. گسترش این آلیاژها سبب توجه به اصلاح ریز ساختاری آنها شده است [۱]. خواص مکانیکی آلیاژهای Al-Si هایپرپروتکتیک به اندازه، شکل و نحوه توزیع فاز سیلیسیم اولیه وابسته می‌باشد و در واقع عمل اصلاح برای بهبود خواص مکانیکی و خواص تغذیه‌ای و مذاب‌رسانی قطعات ریختگی انجام می‌شود [۲].

بهترین جوانه‌زا برای ریزدانه‌ی آلیاژهای هایپرپروتکتیک آلومینیوم - سیلیسیم، فسفر می‌باشد [۳]. فسفر به صورت ترکیباتی نظیر پنتاکلرید فسفر (PCl5)، فسفر - مس ۱۰ یا ۱۵٪ فسفر قرمز و ترکیبات فسفردار دیگر به مذاب افزوده می‌شود [۴]. از طرفی در آلیاژهای Al-Si ریز ساختار سیلیسیم یوتکتیک خواص مکانیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۵]. سدیم بهترین اثر بهسازی را بر سیلیسیم یوتکتیک دارد، ولی خاصیت ریزدانه‌ی فسفر را خنثی می‌کند. لذا جهت ریزدانه‌ی سیلیسیم اولیه و بهسازی یوتکتیک استفاده همزمان از منیزیم و فسفر توصیه شده است [۶].

یکی از مشکلات مهم بهسازی شیمیایی (بهسازی با افزودن عناصر شیمیایی به مذاب) حساس بودن قطعات ریختگی به تشکیل مک و تخلخل (Porosity) می‌باشد. بنابراین با عملیات حرارتی (بهسازی حرارتی) خواص مکانیکی و ریزساختار قطعه بهسازی شیمیایی شده افزایش می‌یابد [۷]. بعد از عملیات حرارتی سیلیسیم اولیه تمایل به تجمع و کروی شدن دارد [۸]. عوامل استحکام‌دهنده بعد از عملیات حرارتی، Cu و Mg می‌باشد. زیرا با افزایش دما، ترکیبات  $Mg_2Si$  و  $Al_2Cu$  رسوب می‌کنند که سبب افزایش سختی و استحکام آلیاژ می‌گردند [۹].

خواص مکانیکی آلیاژهای Al-Si-Mg حاوی مقادیر کم منیزیم و آهن را می‌توان به وسیله عملیات حرارتی شدیداً افزایش داد. عامل سخت‌کننده در این آلیاژها فاز  $Mg_2Si$  است. سیلیسیم، منیزیم و مس مهم‌ترین و متداول‌ترین عناصر آلیاژی برای استحکام بخشی از طریق رسوب سختی قطعات ریختگی آلومینیوم می‌باشند. سه سیکل عملیات حرارتی مهم جهت رسوب

سختی آلیاژهای ریختگی آلومینیوم T5, T6, T7 و می‌باشند [۱۰].

T5: عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی. در مورد محصولاتی به کار می‌رود که پس از یک فرایند تولیدی درجه حرارت زیاد نظیر ریخته‌گری و اکستروژن به صورت مصنوعی پیر می‌شوند.

T6: عملیات حرارتی محلولی و پیرسازی مصنوعی. برای محصولاتی به کار می‌رود که پس از عملیات حرارتی محلولی کار سرد نشده باشند یا در موارد مصرف عملی از کار سرد برای صاف و مستقیم کردن محصول استفاده نگردیده باشد. این عملیات برای بهبود خواص مکانیکی یا پایداری ابعادی یا هر دو نیز به کار می‌رود.

T7: عملیات حرارتی محلولی و سپس بیش از حد پیر شده یا پایدار شده. در مورد محصولاتی به کار می‌رود که تا نقطه‌ای پس از نقطه حداکثر سختی، پیر می‌گردند تا برخی خواص نظیر مقاوت در برابر خوردگی تنش‌ی یا خوردگی پوسته‌ای را فراهم کنند. معمولاً کاربرد T7 شامل محصولات ریختگی است که برای پایداری ابعادی و استحکام بعد از عملیات محلولی به صورت مصنوعی پیر می‌شوند [۱۱].

### روش تحقیق

جهت انجام آزمایش‌ها از آلیاژ  $AlSi18Mg$  با ترکیب شیمیایی استاندارد ارائه شده در جدول ۱ استفاده گردید. برای تهیه آلیاژ، ابتدا آلومینیوم خالص در کوره شعله‌ای ذوب شده و سپس ذوب حاصل به دو کوره القایی با فرکانس شبکه به ظرفیت‌های هر کدام ۵۰ Kg منتقل شده و سپس سیلیسیم، مس خالص، منیزیم خالص، نیکل خالص، ضایعات و برگشتی‌ها به صورت ذوب شده به مذاب افزوده شد. بعد از انتقال مذاب به کوره‌های نگهدارنده مقاومتی ۲۰ کیلویی، سرباره‌گیری توسط ۲/۰٪ نمک تصفیه انجام شد. قرص‌های اصلاح‌کننده فسفرال با قطر تقریبی ۱۰ Cm به عنوان مواد اصلاح‌کننده مورد استفاده قرار گرفت (فسفرال حاوی ترکیبات کلرور فسفر و نمک‌های قلبایی با قلبایی حاکی کلروری می‌باشند). درجه حرارت افزودن عناصر اصلاح‌کننده  $770-780^{\circ}C$  بود. عملیات گاززدایی توسط دستگاه گاززدای چرخنده با استفاده از گاز آرگون انجام شد. سپس توسط فرایند ریخته‌گری ثقلی،

نمونه های استاندارد کششی مطابق با استاندارد ASTM B557-84 (تصویر ۱) در قالب های فلزی دائمی ریخته گری شدند.

عملیات حرارتی به صورت عملیات پیرسازی مصنوعی (T5) که عمدتاً جهت ایجاد فازهای رسوبی و پایدارسازی قطعات ریختگی انجام می گیرد، در کوره الکتریکی مقاومتی انجام شد. بدین صورت که نمونه ها در سه دمای مختلف ۱۹۰، ۲۰۰ و ۲۲۵°C به مدت ۸ ساعت تحت عملیات پیرسازی قرار گرفتند. همچنین در دمای ۲۰۰°C دو نمونه نیز به مدت ۹ ساعت پیر شدند. بعد از پیرسازی نمونه ها تا دمای اتاق سرد شده و سپس با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال شنگ نمونه ها تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. همچنین از دو سانتی متری انتهای نمونه های کششی، نمونه هایی جهت بررسی های ریزساختاری (متالوگرافی)، آنالیز تصویری و سختی سنجی تهیه شد. بعد از سختی سنجی به روش برنیل (ساچمه نفوذ کننده ۲/۵mm و نیروی نفوذ ۶۲/۵Kg)، از نمونه ها بدون استفاده از محلول اچ در بزرگنمایی ۱۰۰ با میکروسکوپ نوری عکسبرداری شد و در نهایت با استفاده از آنالیز تصویری (Image analysis) متصل به میکروسکوپ نوری "Leica" متالوگرافی کمی جهت اندازه گیری مقداری فازهای ریز ساختاری موجود انجام شد. در متالوگرافی کمی پارامترهایی نظیر تعداد، اندازه ذرات، مساحت، محیط، قطر متوسط سیلیسیم اولیه، فاصله بازوهای دندریتی (DAS) یوتکتیک و همچنین نسبت ۸ طول به عرض ذرات سیلیسیم اولیه (Aspect Ratio) مورد بررسی قرار گرفت.

## نتایج و بحث

### الف: تأثیر عملیات حرارتی بر روی ریز ساختار

۱ - نتایج بررسی های ریز ساختاری از طریق متالوگرافی: ساختار ریختگی آلیاژ پیستون را در بزرگنمایی ۱۰۰ در تصویر ۲ مشاهده می کنید. زمینه آلیاژ از فاز آلومینیوم (Al)  $\alpha$  تشکیل یافته و فازهای سیلیسیم (Si) یوتکتیک در مناطق بین دندریتی مشخص می باشند. همچنین ذرات سیلیسیم اولیه به صورت کاملاً درشت با رنگ خاکستری تیره در تصویر مشاهده می گردد. در اثر انجام عملیات حرارتی T5 در ۱۹۰°C به مدت ۸ ساعت دندریت های آلومینیوم و فاز سیلیسیم یوتکتیک به شدت ریز شده و همچنین سیلیسیم اولیه

بسیار ریز گشته و دارای توزیعی یکنواخت در زمینه آلیاژ می گردد (تصویر ۳). چنانچه عملیات حرارتی فوق در دمای بالا، یعنی ۲۰۰°C به همان زمان پیرسازی ۸ ساعت انجام گیرد، مشاهده می شود که روند ریزتر شدن و نیز کروی شدن (کاهش گوشه های تیز) ذرات سیلیسیم اولیه ادامه می یابد (تصویر ۴). به منظور بررسی سینتیک عملیات پیرسازی در دمای ۲۰۰°C زمان نگهداری آلیاژ پیستون در این دما را از ۸ ساعت به ۹ ساعت افزایش داده و ریز ساختار در تصویر ۵ مورد بررسی قرار گرفت. ملاحظه می شود که پارامتر زمان نقش بسیار تعیین کننده ای در هر چه ریزتر شدن فازهای سیلیسیم اولیه و همچنین دندریت های آلومینیوم و سیلیسیم یوتکتیک داشته است. بهترین ریزساختار که مبین حالت بهینه ریزدانی در این سری آلیاژها می باشد عملیات پیرسازی فوق در تصویر ۵ مشاهده می شود.

به منظور مقایسه تأثیر زمان با دمای پیرسازی، عملیات حرارتی T5 در دمای بالاتر ۲۲۵°C به مدت همان ۸ ساعت صورت گرفت (تصویر ۶). همانطور که در این تصویر مشاهده می شود افزایش درجه حرارت پیرسازی تا حدودی منجر به درشت شدن و آگلومره شده ذرات سیلیسیم اولیه شده است. این امر ناشی از پدیده به هم پیوستن ذرات (Coalescence) سیلیسیم اولیه و رشد آنها در اثر اعمال دمای بالاتر می باشد. برای محاسبه دقیق تأثیر عملیات حرارتی بر چگونگی فازهای ریزساختاری، مقاطع متالوگرافی مورد تجزیه و تحلیل از طریق آنالیز تصویری قرار می گیرند.

۲ - نتایج حاصل از آنالیز تصویری: پارامترهای مورد بررسی در آنالیز تصویری عبارتند از: مساحت، محیط، نسبت مساحت به محیط، تعداد ذرات بر واحد سطح، قطر میانگین و درصد مساحت سیلیسیم اولیه همراه نسبت طول به عرض (Aspect Ratio) و فاصله بازوهای دندریتی فاز آلومینیوم (DAS). این نتایج برای سیکل های مختلف در جدول ۲ آمده است.

هدف از تعیین A.R، بررسی میزان کروی شدن ذرات Si اولیه بود. به گونه ای که با کاهش این پارامتر میزان کروی بودن ذره افزایش می یابد. تصاویر ۷ الی ۱۲ نشان دهنده نتایج آنالیز تصویری نمونه می باشند. از طرفی جدول ۲ نیز بیانگر تأثیر عملیات حرارتی گوناگون بر پارامترهای ریزساختاری فاز سیلیسیم اولیه و دندریت های آلومینیوم حاصله از آنالیز تصویری می باشد. همچنانکه نتایج نشان می دهند با افزایش دما،

اندازه ذرات ریزتر می شوند، امادر دمای  $225^{\circ}\text{C}$  کمی افزایش مشاهده می شود. با توجه به اینکه در تصویر ۱۱ (منحنی تغییرات تعداد ذرات Si اولیه در واحد سطح با دمای پیرسازی) نیز این امر مشاهده می شود، یعنی با افزایش دما در اثر ریز شدن فاز سیلیسیم اولیه، تعداد ذرات افزایش یافته اند، مگر در دمای  $225^{\circ}\text{C}$ . لذا می توان چنین استنباط نمود که این کاهش تعداد ذرات در دمای  $225^{\circ}\text{C}$  و بزرگتر شدن ذرات Si اولیه در این دما، ناشی از پدیده به هم پیوستگی یا Coalescence ذرات می باشد. در مورد نسبت مساحت به محیط ذرات اشاره به این نکته ضروری است که هر چه ذرات درشت تر باشند، مساحت آنها بیشتر بوده و محیط آنها کمتر می شود. این در حالی است که با ریزتر شدن ذرات، مساحت آنها کاهش یافته و به محیط آنها افزوده می گردد. از این پارامتر می توان برای تعیین درصد بهینه ریزدانه‌گی استفاده نمود، یعنی هر چه این نسبت کمتر شود، ذره ریزدانه تر می گردد (تصویر ۱۲). در مورد رابطه درصد مساحت سیلیسیم اولیه با دمای پیرسازی باید گفت هر چه دمای پیرسازی افزایش یافته است (تصویر ۱۰)، درصد مساحت و تعداد سیلیسیم اولیه نیز افزایش یافته است (تصویر ۱۱). لذا می توان چنین استنباط نمود که با افزایش دمای پیرسازی، سیلیسیم حل شده بیشتری از حالت فوق اشباع خارج شده و رسوب نموده است که در نتیجه آن تعداد ذرات سیلیسیم اولیه افزایش یافته است.

در مورد مکانیزم اصلی تغییر اندازه تعداد ذرات سیلیسیم اولیه در طی عملیات T5 باید گفت: در صورت ریخته گری مذاب در قالب های فلزی، قالب نقش میرد را ایفا می نماید، لذا گویی یک عملیات محلولی در طی عملیات ریخته گری تا مرحله سرد شدن قطعه صورت می گیرد که در نتیجه آن: ذرات نامحلول زمینه نظیر  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  و سیلیسیم اولیه درون فاز زمینه حل می شوند. بعد از ریختن مذاب در قالب فلزی، گویی لایه جامد تشکیل شده در دیواره قالب شوکه می شود. به طوری که این امر سبب می شود تا ترکیبات فوق الذکر به صورت فوق اشباع، داخل محلول باقی بمانند. سپس به مجرد عملیات پیرسازی، این ترکیبات و عناصر فوق اشباع به صورت رسوبات ریز تشکیل می شوند. هر چه زمان عملیات پیرسازی بیشتر باشد، تعداد ذرات رسوبی افزایش می یابد که ذرات سیلیسیم اولیه از آن جمله اند. از طرفی با افزایش دمای پیرسازی

تا یک حد بهینه، به دلیل خروج بیشتر ذرات فوق اشباع از زمینه، تعداد ذرات بیشتر و اندازه آن ریزتر می گردد. بعد از عبور از دمای بهینه مزبور، ذرات راسب شده در اثر پدیده به هم پیوستگی (Coalescence) به هم پیوسته، درشت تر می شوند، لذا تعداد شان کاهش می یابد که این امر سبب افت خواص مکانیکی قطعه می گردد. در واقع این دما، دمای Overaging می باشد.

### ب) تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی

نتایج آزمایش های کشش و سختی سنجی در جدول ۳ و تصاویر ۱۲ و ۱۴ آورده شده است. لازم به ذکر است این نتایج، میانگین ۲ آزمایش در هر مورد می باشد. همچنانکه از جدول و تصاویر ملاحظه می شود عملیات حرارتی T5 باعث افزایش سختی و استحکام آلیاژ پیستون گردیده است. زیرا در اثر عملیات حرارتی ذرات Si اولیه ریزدانه تر و توزیعی یکنواخت تر در زمینه آلیاژ داشته اند. همچنین فازهای سیلیسیم یوتکتیک که در اثر واکنش های ثانویه ایجاد می گردند، بسیار ریز بوده و نیز توزیعی یکنواخت در مناطق بین دندریتی دارند. از طرفی عملیات حرارتی موجب کوچکتر شدن DAS یوتکتیک فاز آلومینیوم شده است که در مجموع ریز شدن و توزیع بهتر کلیه عوامل ریزساختاری، افزایش خواص مکانیکی آلیاژ را دربر داشته است. از طرفی با افزایش زمان پیرسازی در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  به عناصر آلیاژی حل شده نظیر Mg و Cu امکان ایجاد رسوبات ریز  $\text{Mg}_2\text{Si}$  و  $\text{Al}_2\text{Cu}$  داده می شود که حضور و پراکندگی یکنواخت چنین فازهایی در زمینه منجر به افزایش استحکام و سختی قابل ملاحظه ای گردیده است.

### نتیجه گیری

- ۱ - عملیات حرارتی، خواص مکانیکی آلیاژهای هایپر یوتکتیک Al-Si اصلاح شده را افزایش می دهد. زیرا همانند نوعی بهسازی عمل کرده، مورفولوژی، اندازه و توزیع فازهای اولیه و ثانویه را تغییر می دهد.
- ۲ - عملیات حرارتی، ساختار ریختگی آلیاژهای هایپر یوتکتیک Al-Si اصلاح شده را ریز دانه تر و ذرات سیلیسیم اولیه را، کروی تر می سازد و منجر به افزایش استحکام و سختی آلیاژ پیستون می گردد.
- ۳ - عملیات حرارتی علاوه بر تغییر مورفولوژی فاز سیلیسیم اولیه، موجب کاهش DAS و ریزتر و

خواص مکانیکی مطلوب تر گردید، به عنوان مناسب ترین سیکل عملیات حرارتی آلیاژهای پیستون توصیه می گردد.

یکنواخت تر شدن توزیع فاز سیلیسیم یوتکتیک نیز می گردد که در کل می تواند باعث بهبود خواص مکانیکی آلیاژ گردد.

### تشکر و قدردانی

بدینوسیله از شرکت پیستون سازی ایران به ویژه آقای مهندس شهروز نفیسی، آقای مهندس فرزاد شهری و همچنین کادر فنی دانشکده مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه علم و صنعت ایران که امکانات و همکاری لازم جهت اجرای تحقیق حاضر را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی می شود.

۴- در عملیات حرارتی پیرسازی، با افزایش زمان پیرسازی، به علت رسوب بیشتر ذرات حل شده و در نتیجه ایجاد موانع بیشتر در برابر حرکت نابجایی ها و همچنین توزیع فازهای سخت به صورت ریز خواص مکانیکی افزایش می یابد.

۵- در بین عملیات پیرسازی مورد تحقیق قرار گرفته در دماهای ۱۹۰، ۲۰۰، و ۲۲۵°C، با توجه به اینکه دمای ۲۰۰°C سبب دستیابی به ساختاری با تعداد سیلیسیم بیشتر، ریزدانه تر و کرووی تر و همچنین

جدول (۱) ترکیب شیمیایی استاندارد آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق (%).

Si	Mg	Ni	Fe	Cu	سایر عناصر	Al
۱۷-۱۹	۰/۸-۱/۳	۰/۸-۱/۳	حداکثر ۰/۷	۰/۸-۱/۵	کمتر از یک	بقیه

جدول (۲) نتایج متالوگرافی کمی فازهای سیلیسیم اولیه از طریق آنالیز تصویری.

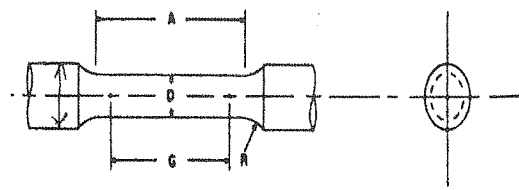
تعداد ذرات Si (mm <sup>2</sup> )	قطر میانگین (μm) Si	درصد مساحت Si	DAS (μm)	Aspect Ratio	نسبت مساحت به محیط	مساحت (μm <sup>2</sup> )	مساحت (μm)	پارامتر نمونه
۱۸۹۷۸	۳/۰۴	۲۰/۷	۱۳	۲/۲	۰/۹۷	۱۳/۲۶	۱۲/۹	As Cast
۴۸۵۲۷	۱/۷	۲۶/۳۶	۱۱/۹	۱/۸۴	۰/۶۵	۸/۴	۵/۴۳	۱۹۰°C-۸hr
۳۶۸۶۲	۱/۶۸	۳۰/۰۷	۱۱/۴	۱/۷۷	۰/۶۴	۹/۴۵	۸/۱۵	۲۰۰°C-۸hr
۷۲۳۰۱	۱/۶۵	۲۸/۵۸	۱۱/۳	۱/۷۵	۰/۶۳	۶/۳	۳/۹۵	۲۰۰°C-۹hr
۴۰۳۷۸	۱/۹۳	۳۰/۶۷	۱۱/۷	۱/۸۱	۰/۷	۱/۸۸	۷/۵۹	۲۲۵°C-۸hr

جدول (۳) نتایج آزمایش های خواص مکانیکی.

UTS (MPa)	سختی (HB)	پارامتر نمونه
۱۸۸/۵	۹۹/۴۵	As Cast
۲۱۰/۵	۱۰۹/۷	۱۹۰°C-۸hr
۱۸۶/۵	۱۱۰/۵	۲۰۰°C-۸hr
۲۴۸/۶	۱۲۱	۲۰۰°C-۹hr
۱۸۴/۵	۱۰۳	۲۲۵°C-۸hr



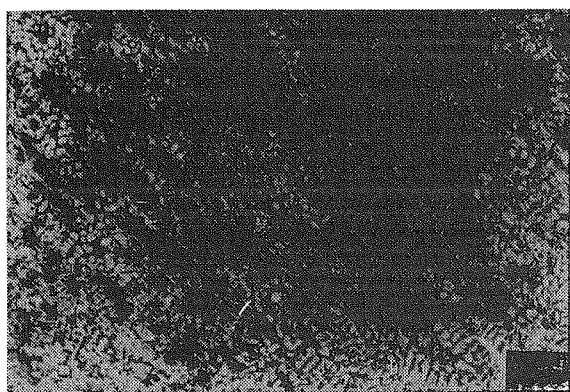
تصویر (۵) مقطع متالوگرافی نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به مدت ۹ ساعت.



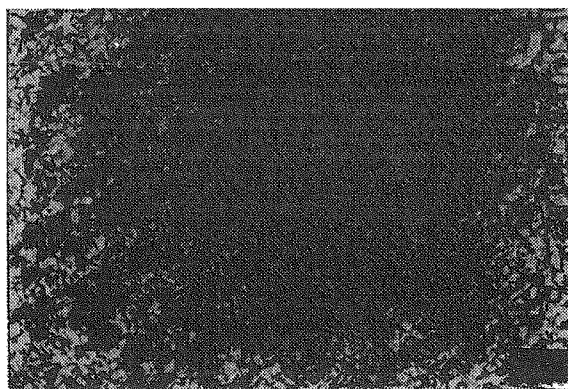
تصویر (۱) نمونه استاندارد کششی مطابق با ASTM B557-84.  
 $(G = 62/5 \pm 0/10 \text{ mm}, D = 12/5 \pm 0/25 \text{ mm}, R = 9 \text{ mm}, A = 75 \text{ mm})$



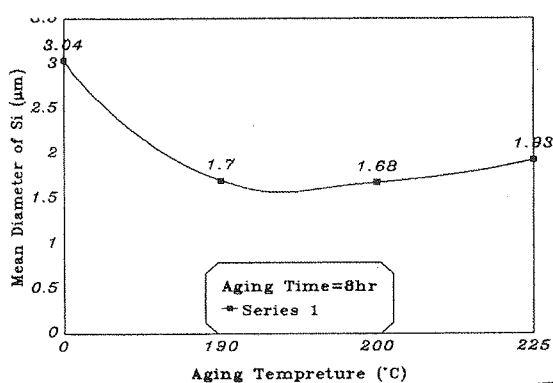
تصویر (۲) مقطع متالوگرافی نمونه As Cast.



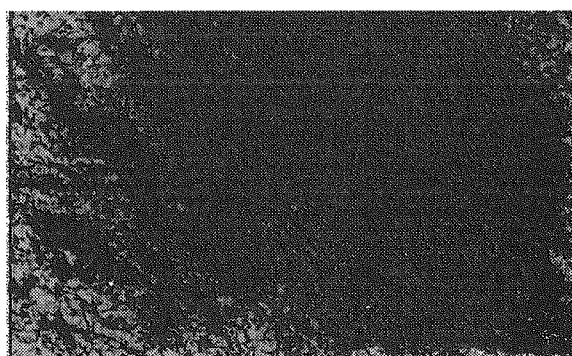
تصویر (۶) مقطع متالوگرافی نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $225^{\circ}\text{C}$  به مدت ۸ ساعت.



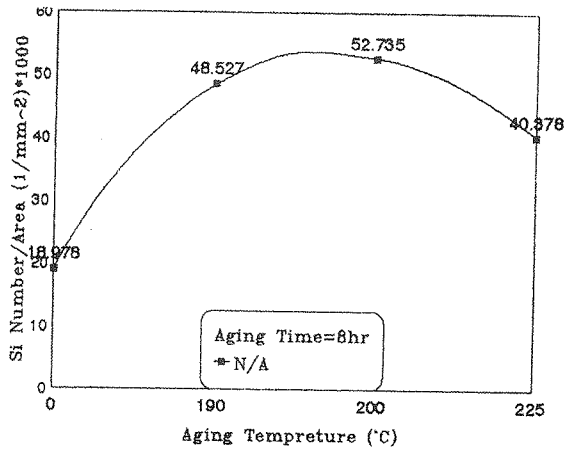
تصویر (۳) مقطع متالوگرافی نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $190^{\circ}\text{C}$  به مدت ۸ ساعت.



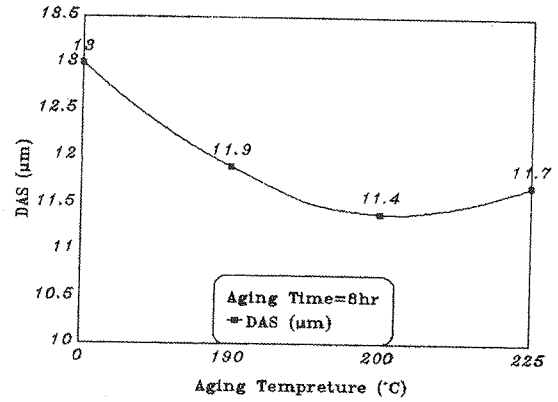
تصویر (۷) رابطه قطر میانگین (Size) با دمای پیرسازی.



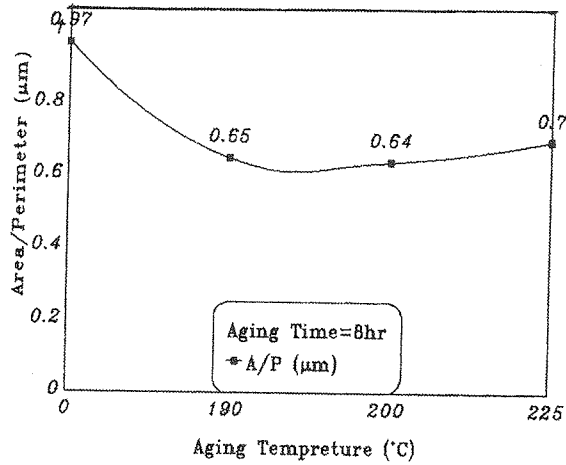
تصویر (۴) مقطع متالوگرافی نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به مدت ۸ ساعت.



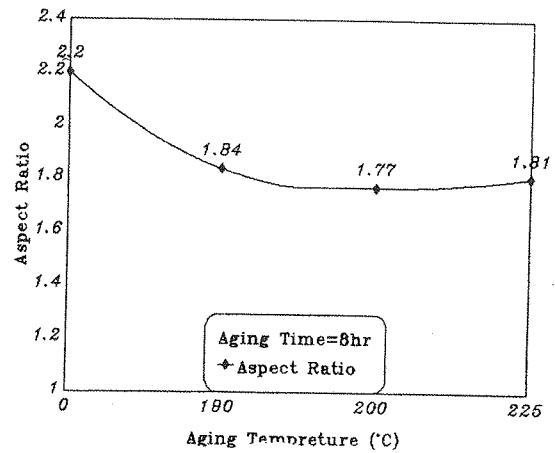
شکل (۱۱) رابطه تعداد ذرات Si اولیه بر مساحت با دمای پیرسازی.



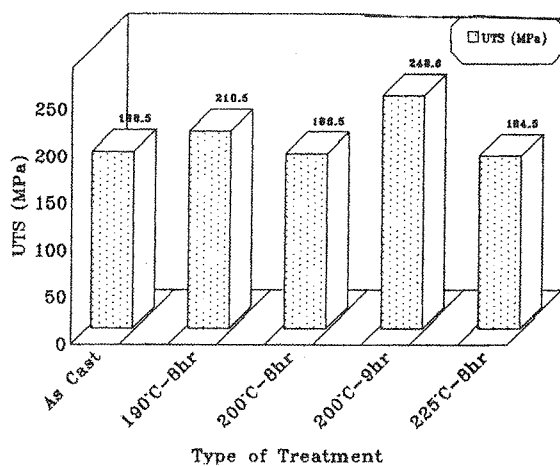
تصویر (۸) رابطه DAS با دمای پیرسازی.



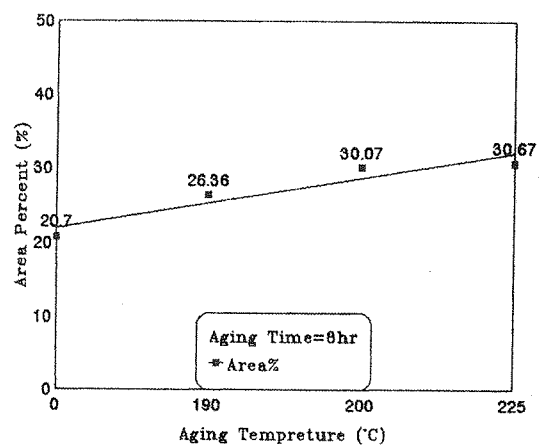
شکل (۱۲) رابطه نسبت مساحت به محیط با دمای پیرسازی.



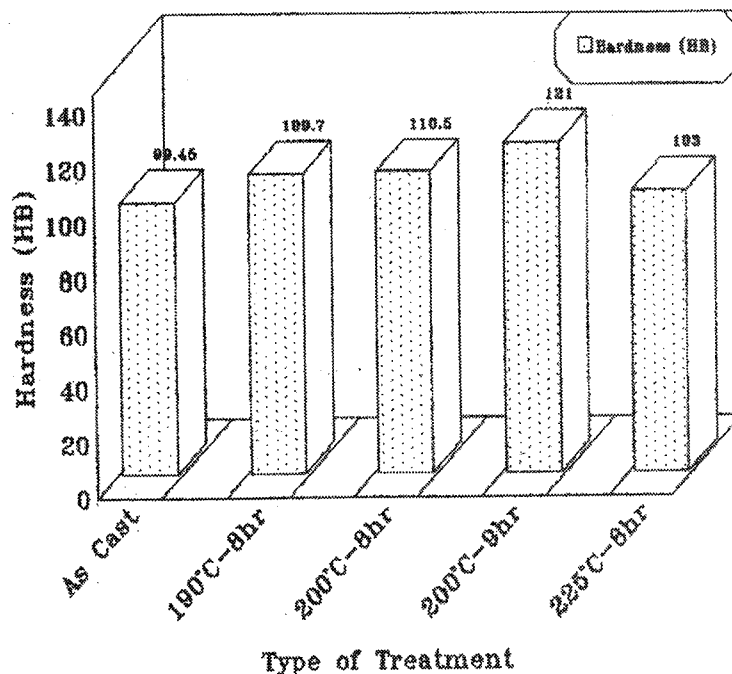
تصویر (۹) رابطه Aspect Ratio با دمای پیرسازی.



شکل (۱۳) تغییرات استحکام کششی بر اساس نوع عملیات T5.



تصویر (۱۰) رابطه درصد مساحت Si اولیه با دمای پیرسازی.



شکل (۱۲) تغییرات سختی بر اساس نوع عملیات T5.

## مراجع

- [1] Bates, A. P., Calvert, D.S., The British Foundryman, Mar. 1966, pp. 119-133.
- [2] Radhakrishna, K., Joy, V. A. Seshan, S., Indian Foundry Journal, Sep. 1983, pp. 115-122.
- [3] Tenekedjiev, N. , Argo, D. Gruzleski, J.I., AFS Transactions 18, 1989, pp. 127-136.
- [4] Strus, K., "Applied Science in the casting of metals", Pergamon Press, 1970, P. 278.
- [5] Singworth, G. K., AFS Transactions, Vol. 91, pp. 7-16, 1983.
- [6] Gowrishankar, N., Prabhakar, O., Trans. Indian Inst. Met., Vol. 47, No 4, Aug 1994, pp. 229-237.
- [7] Shivkumar, S. wang. L., Apelian, P., JOM, Jan 1991, pp 26-32.
- [8] Mondolfo, L. E., "Aluminum Alloys: Structure and Properties", Butterworths, Lonson, 1976, PP. 759-774.
- [9] AFS, " Aluminum Casting Technology. " 1986, pp 238-239.
- [۱۰] طهماسبی، اردشیر، «آلومینیوم» انتشارات جامعه ریخته گران ایران، ۱۳۶۴ صفحات ۲۴۴-۲۲۹ و ۲۶۰.
- [11] ASM Handbook, Vol. 2, "Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special - Purpose Materials". Tenth Edition, 1990, pp. 26-27.