

نقش پیرسازی مصنوعی بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیم ۳۱۹

سعید شبستری (دانشیار)

مهرشاد صنمی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

آلیاژهای ریختگی آلومینیم - سیلیسیم به علت برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر: سیالیت بالای مذاب، مقاومت عالی در برابر خوردگی، استحکام خوب، جوش‌پذیری مناسب و ... کاربرد وسیعی در صنایع گوناگون دارند. آلیاژ آلومینیم ۳۱۹ جزو آلیاژهای پرکاربرد خانواده ۳xx است که در ساخت پوسته‌ی پمپ بنزین و موتور خودرو کاربرد فراوانی دارد. این آلیاژ پذیرای عملیات حرارتی است و در این میان دو عملیات حرارتی T_5 و T_6 در بین فرایندهای دیگر رواج بسیاری دارند. عملیات حرارتی T_6 به دلیل ارائه‌ی بالاترین خواص مکانیکی، و عملیات حرارتی T_5 به دلیل نداشتن مرحله‌ی محلول‌سازی و آبدهی که به سهولت در انجام کار می‌انجامد، کاربرد یافته‌اند. از سوی دیگر هر دوی این عملیات شرایط اعمال پیرسازی مصنوعی را دارند.

در این پژوهش شرایط مختلف پیرسازی آلیاژ در هر دو عملیات مورد بررسی قرار گرفته است. برای اعمال شرایط مختلف پیرسازی هر دو عملیات بر آلیاژ اعمال شد. با توجه به پژوهش‌های گذشته در عملیات حرارتی T_6 شرایط محلول‌سازی و آبدهی برای آلیاژ مذکور در دمای 505° درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۲ ساعت، و آبدهی در محیط آب 60° درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. پس از آن پیرسازی در دماهای 150° ، 170° و 200° درجه سانتی‌گراد و در زمان‌های ۲، ۳/۵، ۵، ۷ و ۱۰ ساعت اعمال شد. برای عملیات حرارتی T_5 نیز به اعمال پیرسازی در دماهای 190° ، 205° و 220° درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ ساعت پرداخته شد.

تأثیر شرایط مختلف عملیات حرارتی T_5 و T_6 بر خواص مکانیکی و ریزساختار مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات خواص آلیاژ پس از اعمال عملیات حرارتی از طریق اندازه‌گیری سختی، استحکام و درصد ازدیاد طول نسبی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت، و تغییرات حاصله در فازهای موجود در شرایط مختلف عملیات حرارتی T_5 و T_6 نیز از طریق متالوگرافی نوری و SEM بررسی شد. با توجه به نتایج حاصله، بالاترین مقادیر استحکام کششی آلیاژ، در عملیات حرارتی T_6 به میزان ۳۴۰ MPa، و در عملیات حرارتی T_5 به میزان ۲۱۰ MPa حاصل شده است. همچنین بالاترین سختی آلیاژ در عملیات حرارتی T_6 به میزان ۱۳۵ HB و در عملیات حرارتی T_5 نیز به میزان ۹۵ HB قابل دستیابی است. از سوی دیگر افزایش سختی و استحکام در عملیات حرارتی T_6 بیش از عملیات حرارتی T_5 است.

مقدمه

آلومینیم و آلیاژهای آن به علت برخورداری از ویژگی‌هایی چون چگالی کم، مقاومت زیاد در برابر خوردگی، نسبت استحکام به وزن بالا، هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، غیرمغناطیسی بودن و شکل‌پذیری با روش‌های گوناگون استفاده‌ی گسترده یافته است. [۱-۳] آلیاژ آلومینیم ۳۱۹ دارای عناصری چون مس و منیزیم است که به منظور بالا بردن خواص مکانیکی به آن اضافه می‌شوند. این آلیاژ به علت قابلیت بالای ریخته‌گری و ویژگی‌های مکانیکی خوب، کاربرد فراوان دارد. [۳] استفاده از آلیاژهای آلومینیم نزد تولیدکنندگان موتور خودرو دو دلیل فنی عمده دارد: یکی کاهش وزن موتور که منجر به مصرف کم‌تر سوخت می‌شود و دوم هدایت حرارتی بهتر آلیاژهای آلومینیم که از تمرکز حرارت به‌طور موضعی در موتور جلوگیری می‌کند. در بین آلیاژهای آلومینیم خانواده ۳xx، به‌ویژه آلیاژ ۳۱۹، در ساخت موتور خودرو و پمپ‌های بنزین کاربرد گسترده‌ی یافته‌اند. [۴]

عواملی که خواص مکانیکی آلیاژهای ریختگی Al را تحت تأثیر

قرار می‌دهد عبارتند از: [۵]

۱. ترکیب شیمیایی: تغییرات شیمیایی باید در محدوده‌ی مشخص باشد؛
۲. عیوب متالورژیکی: میزان عیوب ساختاری مانند حفره‌های گازی، حفره‌های انقباضی و آخال‌ها باید به کم‌ترین میزان خود برسد.
۳. سرعت انجماد: ضخامت سطح مقطع، موقعیت تغذیه‌ها و راه‌بارها، جریان مذاب در قالب و جنس دیواره‌ی قالب، همگی بر سرعت انجماد تأثیر دارند.
۴. عملیات حرارتی: زمان و دمای بهینه‌ی محلول‌سازی برای حصول اطمینان از حل شدن کامل اجزای قابل انحلال و زمان و دمای بهینه‌ی پیرسازی از عوامل تأثیرگذار بر عملیات حرارتی‌اند.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۳۱۹.

درصد	عنصر
۵٫۸	Si
۳٫۳	Cu
۰٫۳۵	Fe
۰٫۲۳	Mn
۰٫۲۱	Mg
۰٫۲۷	Ti
۰٫۱۳	Sr
۹۰	Al

مرحله‌ی گاززدایی: ابتدا با استفاده از قرص‌های گاززدای جامد و سپس با استفاده از دمش گاز خنثای آرگون در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۵ دقیقه انجام گرفت. عناصر آلیاژی تصحیح، و تحلیل شیمیایی مذاب ۳۱۹ مطابق جدول ۱ تهیه شد. مذاب در دمای حدود ۷۲۵ درجه سانتی‌گراد در قالب‌های ماسه CO₂ مطابق استاندارد ASTM-B۲۶M ریخته‌گری شد. همچنین نمونه‌های کشش طبق استاندارد ASTM B۵۵۷M ماشین‌کاری، و حدود ۱۰۰ نمونه تهیه شد.^[۹]

ب) عملیات حرارتی

نمونه‌های تست کشش، برای انجام عملیات حرارتی T_۴ و T_۵ درون کوره قرار داده شد. کوره‌ها از نوع موفلی با حداکثر دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و تغییرات دمایی ±۵ درجه سانتی‌گراد بود. عملیات حرارتی به صورت زیر اعمال شد:

برای عملیات حرارتی T_۴ مطابق تجارب و آزمایش‌های گذشته شرایط ثابت ۵۰۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۲ ساعت (به عنوان زمان دمای محلول‌سازی)، و آبدهی نیز در محیط آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد.^[۱۰] پیرسازی در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ ساعت انجام شد. همچنین برای عملیات حرارتی T_۵ در دماهای ۱۹۰، ۲۰۵ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ ساعت تحت پیرسازی قرار گرفت. در هر یک از شرایط عملیات حرارتی، سه نمونه تست کشش استفاده شد.

ج) آزمایش‌های مکانیکی

پس از انجام عملیات حرارتی از دو سر نمونه‌ها برای سختی‌سنجی به روش برینل (با بار اعمالی ۶۲٫۵ کیلوگرم و قطر ساچمه ۲٫۵ میلی‌متر) استفاده شد. پس از آن نمونه‌ها تحت آزمایش کشش قرار گرفته و استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نسبی هر نمونه تعیین شد.

فرایندهای عملیات حرارتی که برای آلیاژ ۳۱۹ مورد استفاده قرار گرفته عبارتند از:^[۶]

T_۴: انحلال در ۵۱۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲-۸ ساعت، آبدهی در آب‌گرم و پیرسازی در دمای اتاق.

T_۵: پیرسازی قطعه‌ی ریخته‌گری در دمای ۲۰۵ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۷-۹ ساعت.

T_۶: انحلال در ۵۱۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲-۸ ساعت، آبدهی در آب گرم، پیرسازی در دمای ۱۶۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۲-۵ ساعت و سرد کردن در هوا.

در بین فرایندهای بالا عملیات حرارتی T_۶ به دلیل ارائه‌ی خواص استحکامی بالاتر، از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. علت آن است که پس از اعمال عملیات محلولی و آبدهی بر آلیاژ، با اعمال پیرسازی بر ساختار آبدیده، عناصر آلیاژی حل شده رسوب‌های محبوس در زمینه‌ی محلول جامد فوق اشباع شروع به خروج از آن کرده و طی مراحل، به صورت رسوبات مناطق GP غیرتعادلی و هم‌سیما شروع شده تا نهایتاً به رسوب‌های تعادلی و غیر هم‌سیما با زمینه‌ی چون CuAl_۲ ختم خواهد شد. در این بین بیشترین میزان کرنش کشسانی ایجاد شده در ساختار (ناشی از ایجاد فازهای هم‌سیما و نیمه هم‌سیما در زمینه) متعلق به تشکیل فازهای θ' یعنی فاز CuAl_۲ انتقالی و فاز λ' : Al_۵Cu_۲Mg_۸Si_۵ است.^[۷]

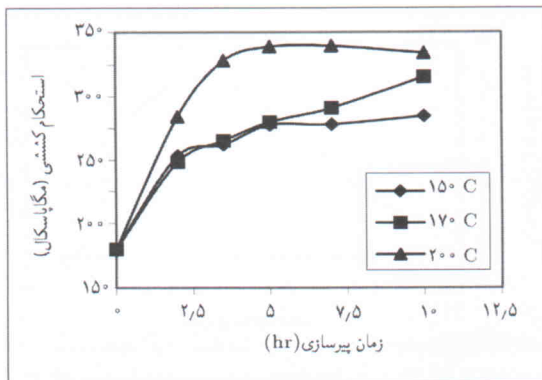
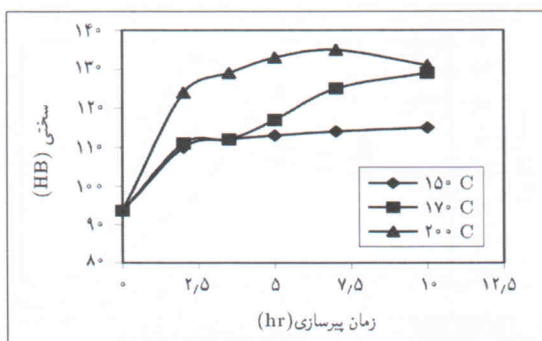
از سوی دیگر طبق تحقیقات به عمل آمده، اعمال عملیات حرارتی T_۵ عموماً باعث افزایش استحکام کششی، استحکام تسلیم، سختی آلیاژ و کاهش درصد ازدیاد طول نسبی آن نسبت به حالت ریخته‌گری خواهد شد.^[۷]

از دلایل ایجاد این تغییرات در ویژگی‌های مکانیکی، به امکان تشکیل و توزیع نسبی رسوبات بین فلزی در زمینه‌ی آلیاژ، که خود به عنوان موانعی در سر راه حرکت ناب‌جایی‌ها عمل می‌کنند، اشاره شده است. از طرفی چون طی این عملیات آلیاژ تحت محلول‌سازی قرار نمی‌گیرد، محلول جامد فوق اشباع در زمینه تشکیل نشده و رسوبات حاصله کم‌تر از دو عملیات T_۴ و T_۶ است.^[۸]

روش تحقیق

الف) آلیاژسازی و عملیات کیفی

مقدار ۹۰ کیلوگرم مذاب از شمش آلومینیم شرکت ایرالکو همراه با افزودن عناصر آلیاژی لازمه (خالص و آمیزان) در کوره شعله‌ی دارای بوته‌گرافیتی تهیه شد. آنالیز شیمیایی مذاب آلیاژ توسط کوانتومتر کنترل شد. جوانه‌زایی با استفاده از آمیزان (آلیاژساز) Al-۵Ti-۱B، و بهسازی توسط آمیزان Al-۱۰Sr صورت گرفت. فرایند گاززدایی شامل دو

شکل ۱. تأثیر دما و زمان پیرسازی بر استحکام کششی در عملیات حرارتی T_e.شکل ۲. تأثیر دما و زمان پیرسازی بر سختی در عملیات حرارتی T_e.

استحکام مشاهده می‌شود. در این مورد نیز علت، پیشرفت واکنش و تشکیل رسوب‌های نیمه پایدار و هم‌سیما و نیمه هم‌سیما به میزان بیشتر، در اثر گذشت زمان است. [۱۲]

در دماهای بالای پیرسازی (۲۰۰°C) سرعت افزایش سختی و استحکام بیش از دماهای پایین پیرسازی (۱۷۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) است و در نهایت، در دمای ۲۰۰°C و در مدت ۷ ساعت پیرسازی بیشترین مقادیر استحکام (۳۴۰ MPa) و سختی (۱۳۵ HB) حاصل می‌شود. علت این امر احتمالاً تشکیل فازهای θ' (نیمه هم‌سیما) و λ در این شرایط است. چنان که مشاهده می‌شود، در این دما و در مدت زمان‌های بیشتر از ۷ ساعت سختی و استحکام کاهش می‌یابد. عامل اصلی آن در فرای پیرسازی ایجاد شده در ساختار، ناشی از درشت شدن ذرات رسوب و تشکیل فازهای ناهم‌سیما است. [۱۳ و ۱۴]

در منحنی‌های مربوط به شکل‌های ۳ و ۴ نیز روند تغییرات استحکام کششی و سختی آلیاژ در اثر اعمال عملیات حرارتی T_e نشان داده شده است. در شکل ۳ روند تغییرات استحکام کششی در دمای ثابت ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان‌های ۸-۲ ساعت نشان داده شده است. در شکل ۴ نیز روند تغییرات سختی در مدت زمان‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ ساعت و دماهای ۱۹۰، ۲۰۵ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. حداکثر میزان سختی در شرایط ۲۲۰°C و مدت ۶ ساعت

د) محاسبه‌ی شاخص کیفیت

برخی محققین شاخص کیفیت را که نشانگر انرژی جذب شده توسط آلیاژ است، چنین تعریف کرده‌اند: [۱۵]

$$Q = UTS(MPa) + K \log(EI\%)$$

طبق تحقیقات به عمل آمده، میزان ثابت K برای آلیاژ آلومینیم ۳۱۹ برابر است. [۱۵]

$$Q = UTS(MPa) + 116 \log(EI\%)$$

عموماً با مترادف گرفتن این شاخص با میزان چقرمگی آلیاژ، می‌توان به بررسی آن در شرایط گوناگون عملیات حرارتی شده و ریختگی پرداخت و به این ترتیب پس از اندازه‌گیری مقادیر استحکام کششی، سختی و درصد ازدیاد طول نسبی، به محاسبه‌ی شاخص کیفیت آلیاژ پرداخت.

د) بررسی ریزساختار

از انتهای نمونه‌های آزمایش کشش برای انجام بررسی‌های ریزساختاری از طریق متالوگرافی نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌هایی تهیه شد. همچنین از طریق SEM شکست‌نگاری روی سطوح شکست نیز بررسی شد.

نتایج و بحث

تأثیر دما و زمان پیرسازی بر خواص مکانیکی

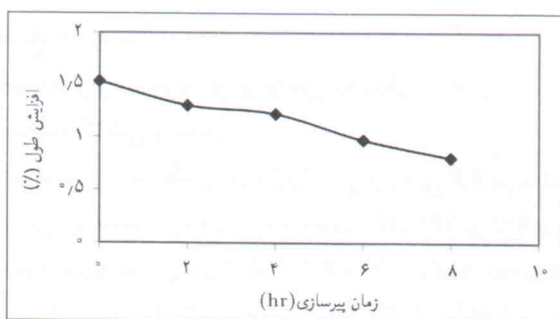
استحکام کششی و سختی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری استحکام کششی و سختی آلیاژ در عملیات حرارتی T_e ضمن پیرسازی در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان‌های ۲، ۳/۵، ۵، ۷ و ۱۰ ساعت، در منحنی‌های شکل ۱ و شکل ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، بر اثر افزایش زمان پیرسازی، استحکام و سختی آلیاژ افزایش می‌یابد. همچنین این روند افزایش در مدت زمان‌های ثابت ۲، ۳/۵، ۵، ۷ و ۱۰ با افزایش دمای پیرسازی از ۱۵۰ به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز قابل مشاهده است. علت این امر در تشکیل فازهای GP، هم‌سیما و نیمه هم‌سیما اشاره شده در اثر گذشت زمان و در دماهای ثابت پیرسازی است. دما در تشکیل فازها و رسوبات نقش نیروی محرکه را ایفا می‌کند. در نتیجه در اثر بالا رفتن دما، نیروی محرکه برای انجام واکنش‌های رسوب‌دهی بالا می‌رود و سرعت و میزان تشکیل رسوبات افزایش می‌یابد. این امر منجر به افزایش موانع ایجاد شده بر سر راه حرکت ناب‌جایی‌ها می‌شود و در نهایت به افزایش سختی و استحکام آلیاژ خواهد انجامید. از سوی دیگر، می‌توان ملاحظه کرد که در اثر گذشت زمان نیز افزایش سختی و

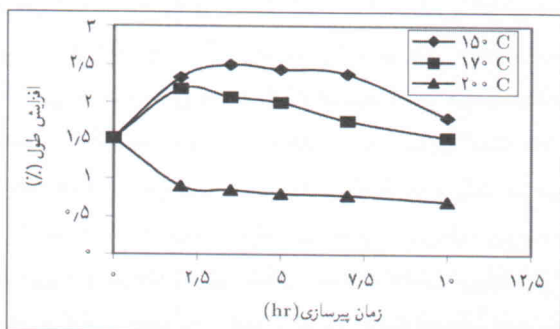
است. این تغییرات در دماهای ۱۵°، ۱۷° و ۲۰° درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۲، ۳/۵، ۵، ۷ و ۱۰ برای عملیات T_۶ و ۲ تا ۸ ساعت برای عملیات حرارتی T_۵ و در دمای ۲۲۰°C ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در تمامی دماهای پیرسازی، افزایش زمان به کاهش درصد ازدیاد طول نسبی در ساختار می‌انجامد (به جز دماهای ۱۷° و ۲۰° درجه سانتی‌گراد و مدت زمان‌های دو ساعت). از سوی دیگر در عملیات T_۵ نیز با کاهش یکنواخت درصد ازدیاد طول نسبی در ساختار، بر اثر گذشت زمان پیرسازی مواجه هستیم، به طوری که میزان درصد ازدیاد طول نسبی آلیاژ از میزان ۱/۵٪ تا مقادیر ۰/۷٪ به ازای ۸ ساعت پیرسازی کاهش می‌یابد.

این مسئله احتمالاً به خاطر پدید آمدن فازهای نیمه هم‌سیما و نیمه تعادلی در زمینه است که در اثر پدید آمدن چنین فازهایی، قابلیت سیلان زمینه کم شده و در نتیجه آلیاژ با کاهش درصد ازدیاد طول نسبی مواجه خواهد شد.

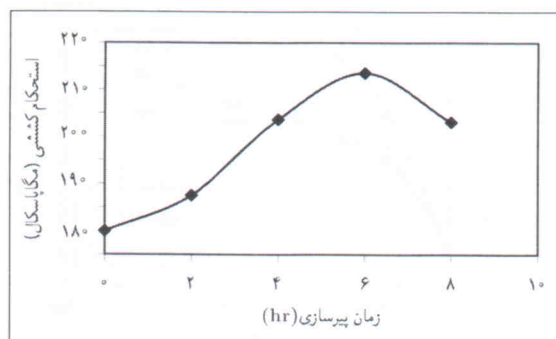
از سوی دیگر در دمای پیرسازی ۱۵° و ۱۷° درجه سانتی‌گراد ابتدا افزایش درصد ازدیاد طول نسبی آلیاژ در عملیات حرارتی T_۶ مشاهده شده که با گذشت زمان دچار کاهش می‌شود. علت این پدیده وجود عامل تأثیرگذار دیگری بر درصد ازدیاد طول نسبی است و آن وجود



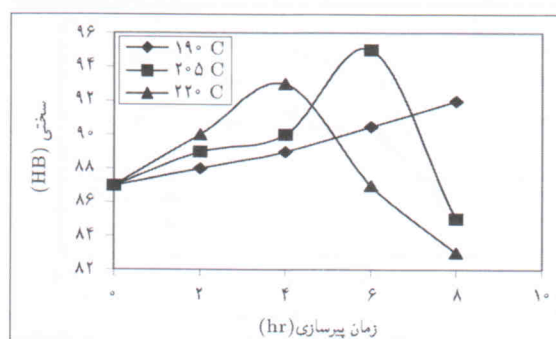
شکل ۵. تأثیر زمان پیرسازی (در دمای ۲۲۰°C) بر درصد افزایش طول نسبی در عملیات حرارتی T_۵.



شکل ۶. تأثیر دما و زمان پیرسازی بر درصد ازدیاد طول نسبی در عملیات حرارتی T_۶.



شکل ۳. تأثیر زمان پیرسازی در دمای ۲۲۰°C بر استحکام کششی در عملیات حرارتی T_۵.



شکل ۴. تأثیر دما و زمان پیرسازی بر سختی در عملیات حرارتی T_۵.

(۹۵HB) و استحکام کششی در شرایط ۲۰۵°C و مدت ۶ ساعت (۲۱۰ MPa) به دست آمده است. همانگونه که در شکل‌ها مشخص است، روند تغییرات ارائه شده در عملیات حرارتی T_۵، مطابق عملیات حرارتی T_۶ است اما میزان استحکام و سختی حاصله در این عملیات کم‌تر از عملیات حرارتی T_۶ است. علت این امر آن است که در عملیات حرارتی T_۶ به دلیل وجود مرحله‌ی محلول‌سازی و آبدهی حجم بالایی از رسوبات به شکل محلول جامد فوق اشباع در زمینه باقی‌مانده اما در عملیات حرارتی T_۵، این مراحل موجود نیست و رسوبات پس از پیرسازی با حجم و میزان کم‌تری تشکیل می‌شوند. منشاء وجود این رسوبات احتمالاً ناشی از افزایش حضور عناصر آلیاژی در محلول جامد زمینه بوده که در حالت سرعت‌های سرد شدن ریخته‌گری در قالب ماسه‌یی که غیر تعادلی است و از سرد شدن در حالت تعادلی سریع‌تر است، پدید آمده‌اند. در این مورد نیز در اثر انجام عملیات حرارتی در دمای بالا و زمان طولانی در اثر پدیده‌ی فراپیرسازی سختی و استحکام کاهش می‌یابد. [۱۲]

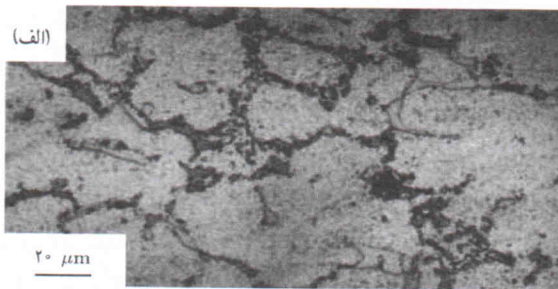
تأثیر دما و زمان پیرسازی بر درصد ازدیاد طول نسبی شکل‌های ۵ و ۶ تغییرات درصد ازدیاد طول نسبی را تحت تأثیر پیرسازی در عملیات حرارتی T_۵ و T_۶ در قالب منحنی‌هایی ارائه داده

کیفیت افزایش خواهد یافت. میزان تغییرات از 20° تا 325° است اما در دماهای بالا و زمان‌های طولانی این شاخص کاهش می‌یابد. دلیل این مسئله نیز مطابق فرمول ذکر شده برای شاخص کیفیت از یک سوی کاهش درصد ازدیاد طول نسبی (به دلیل تشکیل رسوبات)، و از سوی دیگر کاهش استحکام کششی آلیاژ (به دلیل پدیده‌ی فرا پیرسازی) است. در عملیات حرارتی T_6 بیشترین میزان شاخص کیفیت آلیاژ در دمای 170°C و مدت زمان 1° ساعت قابل دستیابی است. در عملیات حرارتی T_5 نیز بیشترین میزان شاخص کیفیت آلیاژ در دمای 220°C و مدت زمان تقریبی 6 ساعت حاصل شده است. از سوی دیگر درصد ازدیاد طول نسبی آلیاژ نیز بالاتر از میزان قابل قبول قطعات صنعتی (حدود یک درصد) است^[۱۰] (در این شرایط میزان درصد ازدیاد طول نسبی آلیاژ از $1/5$ درصد بیشتر است).

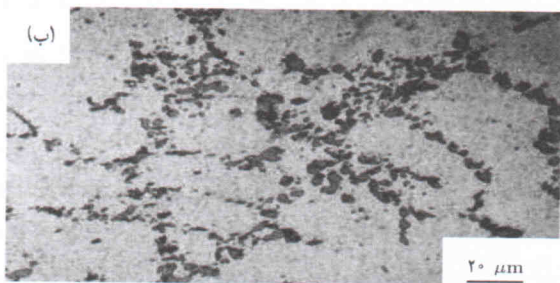
با توجه به نتایج به دست آمده چنین برداشت می‌شود که در عملیات حرارتی T_6 شرایط پیرسازی بهینه عبارت است از دمای 170°C و زمان 1° ساعت که در این شرایط پیرسازی، شاخص کیفیت حداکثر است، و استحکام کششی و سختی آلیاژ نیز به طور تقریبی نزدیک به حداکثر میزان خود هستند.

تأثیر عملیات حرارتی T_5 و T_6 بر ریزساختار بررسی متالوگرافی

در اشکال ۹ و ۱۰ ریزساختار آلیاژ در حالت ریختگی و پس از عملیات حرارتی T_6 برای دو حالت بهسازی شده و نشده ذکر شده



نمونه ریختگی



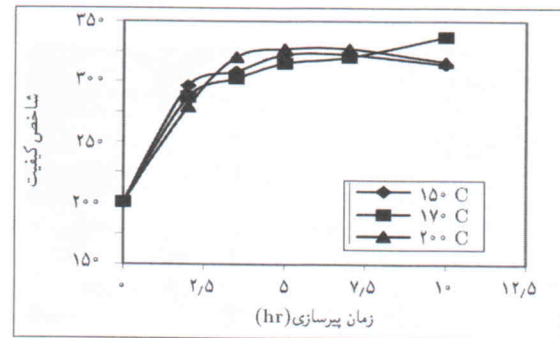
نمونه عملیات حرارتی شده

شکل ۹. تأثیر عملیات حرارتی T_6 بر ریزساختار آلیاژ بهسازی شده.

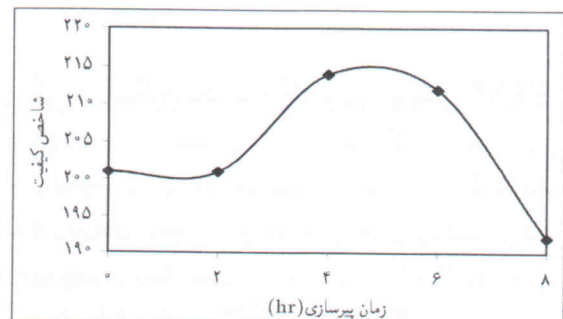
بهسازی ابتدایی در ساختار است که از مرحله‌ی محلول‌سازی ناشی می‌شود (این مسئله در مطالعات ریزساختاری نیز مشاهده می‌شود) که ابتدا بر درصد ازدیاد طول نسبی تأثیر مثبت داشته، و در ادامه با اعمال پیرسازی و تشکیل رسوبات مذکور (نیمه‌تعادلی) ازدیاد طول نسبی آلیاژ کاهش می‌یابد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بالاترین مقادیر درصد ازدیاد طول نسبی برای دوگونه عملیات حرارتی T_5 و T_6 در شرایط قبل از انجام عملیات پیرسازی بر روی آلیاژ حاصل شده است.^[۱۲]

تأثیر دما و زمان پیرسازی بر شاخص کیفیت

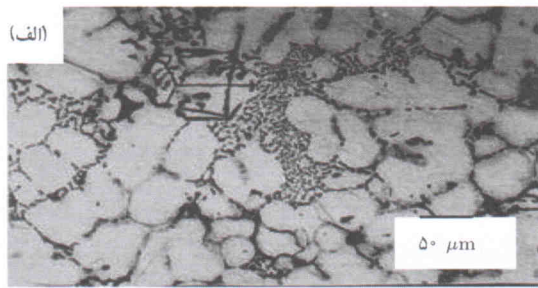
همان‌گونه که اشاره شد، شاخص کیفیت یک ویژگی است که به‌عنوان شاخصی برای چقرمگی آلیاژهای آلومینیم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب تأثیر شرایط پیرسازی مختلف در عملیات حرارتی T_6 و T_5 بر شاخص کیفیت ارائه شده است. در شکل ۷ تأثیر شرایط پیرسازی مختلف در دماهای 150° ، 170° و 200° درجه سانتی‌گراد و مدت زمان‌های 2 ، $3/5$ ، 5 ، 7 و 10 ساعت بر شاخص کیفیت رسم شده است. از سوی دیگر در شکل ۸ نقش زمان پیرسازی در دمای 220°C بر تغییرات شاخص کیفیت آلیاژ ترسیم شده است. روند تغییرات شاخص کیفیت در این سه دما مشابه تغییرات استحکام کششی و سختی است. یعنی با افزایش دما و زمان پیرسازی، شاخص



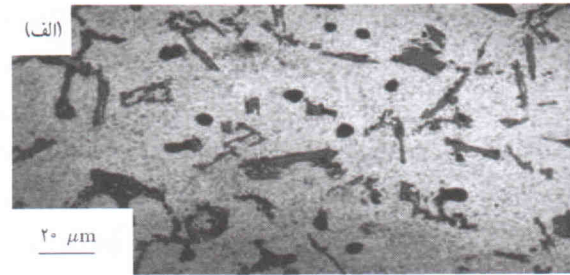
شکل ۷. تأثیر دما و زمان پیرسازی بر شاخص کیفیت در عملیات حرارتی T_6 .



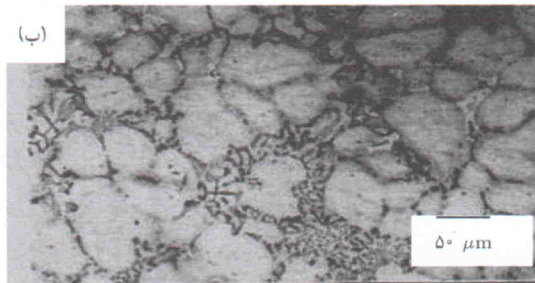
شکل ۸. تأثیر دما و زمان پیرسازی بر شاخص کیفیت در عملیات حرارتی T_5 .



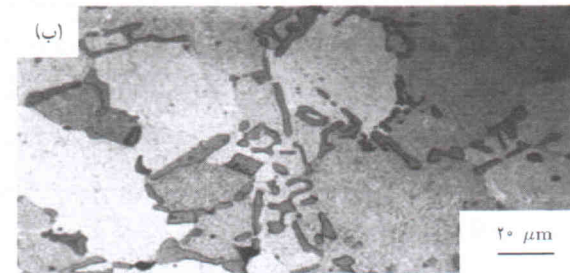
۲ ساعت



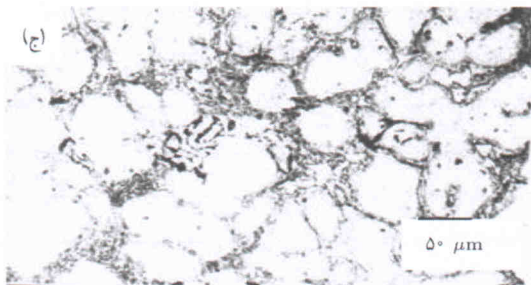
نمونه ریختگی



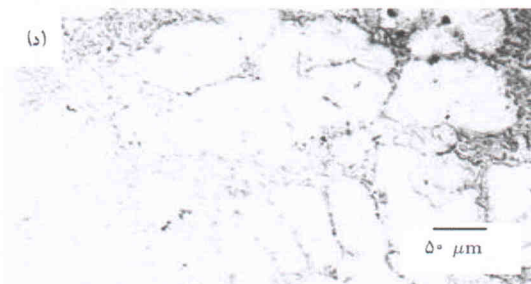
۴ ساعت



نمونه عملیات حرارتی شده



۶ ساعت



۸ ساعت

شکل ۱۰. تأثیر عملیات حرارتی T_۶ بر ریزساختار آلیاژ بهسازی نشده.

مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با اعمال عملیات حرارتی T_۶ در ریزساختار، تغییر شکل فازهای سیلیسیم یوتکتیک (یعنی ریزشدن و کروی شدن این فازها) پدید خواهد آمد. ایجاد بهسازی ناشی از عملیات حرارتی در ساختاری که ابتدا تحت عملیات بهسازی شیمیایی قرار نگرفته بسیار مشهودتر از حالت دیگر است. به عبارت دیگر در شکل ۱۰، اختلاف بین فازهای یوتکتیک، پیش و پس از عملیات حرارتی، بسیار مشهودتر از شکل ۹ است. از سوی دیگر در شکل ۱۱ تأثیر عملیات حرارتی T_۵ بر روی ریزساختار آلیاژ ۳۱۹ در دمای ۲۰۵°C نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، بر اثر اعمال عملیات حرارتی T_۵ تغییرات چندانی در ساختار مشاهده نمی‌شود و در بزرگ‌نمایی با میکروسکوپ نوری ساختار دست نخورده باقی‌مانده است.^[۱۲]

از سوی دیگر با توجه به این مشاهدات می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که عملیات محلول‌سازی عامل تغییرات پدیدآمده در ریزساختار در این دما است که در عملیات حرارتی T_۶ وجود داشته و در عملیات حرارتی T_۵ این شرایط فراهم نبوده است. تغییرات ناشی از پیرسازی در دماها و زمان‌های ارائه شده در ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM قابل ردیابی است. وجود چنین تغییرات ساختاری، عامل اصلی افزایش ابتدایی درصد ازدیاد طول نسبی آلیاژ در زمان‌های اولیه پیرسازی نسبت به آلیاژ ریختگی است که می‌تواند با نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص مکانیکی مطابقت داشته باشد.

شکل ۱۱. ریزساختار پس از اعمال عملیات حرارتی T_۵ در دمای ۲۰۵°C.

بررسی با میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM
در شکل ۱۲ و ۱۳، مقایسه‌ی بین ریزساختار آلیاژ در حالت پیش و پس از عملیات حرارتی T_۶ ارائه شده است. با استفاده از آنالیز نقطه‌ی EDS و فازهای موجود در این دو تصویر چنین برداشت می‌شود که فازهای روشن‌تر بیشتر حاوی ترکیبات مس (CuAl_۲) بوده، همچنین مناطق با روشنایی کم‌تر حاوی مقادیر زیادی آلومینیم (زمینه α) و مناطق تیره‌تر حاوی فازهای سیلیسیم یوتکتیک است.^[۸] این مسئله

ساتی‌گراد و مدت زمان ۱۲ ساعت، آبدهی در آب 60°C و پیرسازی در دمای 200°C و مدت ۷ ساعت و به میزان 340MPa در عملیات حرارتی T_6 به دست می‌آید. از سوی دیگر در عملیات حرارتی T_5 نیز بالاترین استحکام در 205°C و ۶ ساعت و به میزان 210Mpa حاصل شده است.

۲. با بررسی تأثیر زمان و دمای پیرسازی بر سختی، چنین نتیجه می‌شود که بالاترین سختی آلیاژ، با محلول‌سازی در دمای 505°C درجه ساتی‌گراد و زمان ۱۲ ساعت، آبدهی در آب 60°C و پیرسازی در دمای 200°C و ۷ ساعت و به میزان 135HB در عملیات حرارتی T_6 به دست می‌آید. از سوی دیگر در عملیات حرارتی T_5 نیز بالاترین سختی با پیرسازی در دمای 220°C و زمان ۶ ساعت و به میزان 95HB قابل دستیابی است.

۳. افزایش سختی و استحکام در عملیات حرارتی T_6 بیش از عملیات حرارتی T_5 است که علت آن وجود مرحله‌ی محلول‌سازی و در نتیجه افزایش عناصر آلیاژی محلول در زمینه است که باعث افزایش میزان رسوبات پس از پیرسازی می‌شود.

۴. بررسی تأثیر زمان و دمای پیرسازی بر درصد ازدیاد طول نسبی، دلالت بر آن دارد که بالاترین درصد ازدیاد طول نسبی آلیاژ، در شرایط بدون پیرسازی حاصل می‌شود.

۵. بررسی تأثیر زمان و دمای پیرسازی نشانگر افزایش ابتدایی بر درصد ازدیاد طول نسبی آلیاژ عملیات حرارتی T_6 شده در دماهای پایین پیرسازی نسبت به آلیاژ عملیات حرارتی نشده است که علت آن بهسازی ناشی از عملیات محلول‌سازی ابتدایی در ساختار است.

۶. با مطالعه‌ی تأثیر زمان و دمای پیرسازی بر شاخص کیفیت، مشخص شد که بالاترین مقادیر شاخص کیفیت به میزان 34° ، در شرایط 170°C و ۱ ساعت برای T_6 ، و همچنین بیشترین میزان شاخص کیفیت در عملیات T_5 به میزان 35° ، در دمای 220°C و ۶ ساعت قابل دستیابی است.



شکل ۱۲. تصویر BE حاصل از سطح مقطع شکست نمونه ریختگی.



شکل ۱۳. تصویر BE حاصل از سطح مقطع شکست نمونه عملیات حرارتی شده T_6 .

نشانگر الگوی رفتاری یکسان شکست برای آلیاژ عملیات حرارتی شده و حرارتی نشده است. یعنی در ضمن آن شکست از درون فازهای سیلیسیم یونکتیک، فازهای بین فلزی و مرزهای بین آنها آغاز می‌شود.

نتیجه‌گیری

۱. با بررسی تأثیر زمان و دمای پیرسازی بر استحکام کششی، بالاترین مقادیر استحکام کششی آلیاژ، با محلول‌سازی در دمای 505°C درجه

منابع

1. A.N. Lakshmanan, Ph.D. Thesis, University of McGill (1994).
2. Casting ASM Hand Book , 15 (1998).
3. R. Das Gupta, The Effect of Increased Magnesium Content on the Mechanical Properties of Sand-Cast 319 Aluminum Alloy, AFS Trans., 97, PP. 245-254 (1989).
4. J.Gauthier, P.R. Louchez and F.H. Samuel, Cast Metals, 8 (2), P.91 (1994).
5. J.D. Gruner, AFS Conf. , USA, P. 118 (1998).
6. Metals Handbook, 9 th Edition, 2, ASM.

۷. شبستری، سعید. و سعیدی نیا، سعید. «مجموعه مقاله‌های سیزدهمین سمینار سالانه جامعه ریخت‌گران ایران»، دانشگاه علم و صنعت ایران، ص ۱۸۳، ۲۸ تا ۳۰ خرداد ۱۳۸۰.
۸. صنمی، مهرشاد. «پایان نامه کارشناسی ارشد»، دانشکده‌ی مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۸۱).
9. ASTM Standard, 0202, (1998).
10. H. de la Sablonniere and F.H. Samuel, Cast Metals Res., 9, P. 195 (1996).
11. A. Pennors and A.M. Samuel, precipitation of Al₅FeSi Iron Intermetallic in Al-6%Si-3.5%Cu(319) Type Alloys: Role of Sr and P, AFS Trans., 105, pp. 251-264 (1998).
12. L.A. Narayanan & F.H. Samuel, Crystallization Behavior of Iron-Containing Intermetallic Compounds in 319 Aluminium Alloy, Metallurgical and Materials Transactions A ,25A, pp. 1761-1773 (1996).
13. G. Boudreault , A.M. Samuel and F.H. Samuel, Microstructural Observations of Porosity in A319.2 Alloy: Effect of Mold Type/Cooling Rate, AFS Transactions, 75, pp. 207-216 (1999).
14. Ouellet, F.H. Samuel, D. Gloriat and S. Valtierat , Effect of Mg Content on the Dimensional Stability and Tensile Properties of Heat Treated Al-Si-Cu (319) type Alloys, Cast Metals Res., 10, pp. 67-78 (1997).