

مقایسه خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ پس از عملیات حرارتی رسوب‌سختی یک و دومرحله‌ای

فرزاد سلیمانی

کارشناس ارشد مهندسی متالورژی، دانشگاه پیام نور، تهران، ar.kh91@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۱۵

چکیده

در این مقاله اثر عملیات پیرسازی دومرحله‌ای بر خواص مکانیکی (استحکام کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول نسبی و سختی) بررسی و نتایج حاصل از پیرسازی دومرحله‌ای با نتایج حاصل از پیرسازی مصنوعی یک‌مرحله‌ای و پیرسازی طبیعی در زمان‌ها و دماهای مختلف مقایسه شده است. پس از انجام عملیات انحلال در دمای ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت و تندسرمایش آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ در دمای محیط، عملیات پیرسازی طبیعی و مصنوعی یک و دومرحله‌ای انجام و خواص مکانیکی و سختی در زمان‌های مختلف پیرسازی اندازه‌گیری می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زمان پیرسازی، سختی و استحکام افزایش و درصد ازدیاد طول نسبی کاهش می‌یابد. البته میزان افزایش سختی و استحکام در نمونه‌هایی که در دو مرحله پیرسخت شده‌اند بیش از نمونه‌هایی است که در یک مرحله پیرسخت شده‌اند. همچنین در اثر اعمال درصد معینی کارسرد، قبل از عملیات پیرسازی، سختی از مقادیر بیشتری نسبت به نمونه بدون اعمال کارسرد برخوردار می‌باشد.

واژگان کلیدی: پیرسازی، خواص مکانیکی، آلیاژ آلومینیم

۱. مقدمه

استفاده می‌شود. نظر به نقش و تأثیر عوامل متعدد در فرایند، عملیات حرارتی رسوب‌سختی و بهینه‌کردن عملیات حرارتی پیرسختی در این آلیاژها موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران بوده است. مثلاً تأثیر عواملی چون ترکیب شیمیایی، رژیم عملیات حرارتی شامل سرعت و نحوه تندسرمایش، نحوه محلول‌سازی و پیرسازی هنوز مورد بحث و بررسی محققان مختلف است [۱-۵]. آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴، آلیاژی با استحکام متوسط است. عناصر آلیاژی اصلی آن مس و منیزیم است و درصد کمی منگنز و کرم دارد. هدف اصلی افزودن مس و

رسوب‌سختی از جمله روش‌هایی است که به وسیله آن می‌توان استحکام برخی از آلیاژها را افزایش داد. پدیده استحکام‌بخشی به روش عملیات حرارتی رسوب‌سختی نخستین بار به‌طور اتفاقی و از طریق مشاهده و آزمایش بر روی آلیاژ آلومینیم - مس^۱ (دور آلومین) توسط آلفرد ویلم طی سال‌های ۱۹۰۶ تا ۱۹۰۹ م در آلمان شناخته شد. وی دریافت که سختی آلیاژ دور آلومین پس از تندسرمایش در آب به‌مرور افزایش می‌یابد. پس از کشف این پدیده تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شد. امروزه نیز از این پدیده در افزایش و کنترل خواص مکانیکی آلیاژهای مختلف

منیزیم افزایش استحکام آلیاژ است که با رسوب فازهای این عناصر طی فرایند رسوب‌سختی به دست می‌آید. منگنز و کرم اندازه دانه‌ها و تبلور مجدد آلومینیم را در حین عملیات حرارتی هموژن و پیش گرم نمودن کنترل می‌کنند. در این آلیاژ سیلیسیم و آهن به عنوان ناخالصی هستند [۶-۸]. این آلیاژ دارای خواص مطلوبی مانند قابلیت پذیرش عملیات حرارتی، نسبت استحکام به وزن بالا، چقرمگی شکست عالی، مقاومت در برابر رشد ترک‌ها و خستگی، مقاومت در برابر خوردگی تنشی و خوش‌تراش بودن می‌باشد. این خواص سبب افزایش کاربرد این آلیاژ در صنایع دفاعی، نظامی و هوایی به صورت گسترده‌ای شده است [۷]. عموماً عملیات حرارتی پیرسختی روی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ به منظور بهبود خواص مکانیکی (استحکام و چقرمگی) انجام می‌شود، اما متأسفانه با انجام عملیات پیرسختی روی آلیاژ با افزایش استحکام، چقرمگی و انعطاف‌پذیری آن شدیداً کاهش می‌یابد [۸-۱۵]. با توجه به مطالعات انجام شده در منابع مختلف این‌گونه برداشت می‌شود که با به کارگیری عملیات حرارتی پله‌ای امکان دستیابی به سختی بالاتر و خواص مکانیکی مطلوب‌تر نظیر استحکام به همراه چقرمگی و انعطاف‌پذیری بالا و همچنین کوتاه شدن زمان پیرسختی در آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ وجود دارد [۱۶-۱۷].

در این مقاله سعی شده است رفتار آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ در شرایط مختلف عملیات حرارتی (تأثیر کار سرد، دما و زمان پیرسازی) و همچنین تأثیر پیرسازی طبیعی و مصنوعی یک و چندمرحله‌ای بر سرعت رسوب‌سختی، خواص مکانیکی (استحکام کششی، استحکام تسلیم) و ترمودینامیکی این آلیاژ ارزیابی و شرایط بهینه‌سازی برای دستیابی به خواص ارائه شود.

۲. روش انجام آزمایش

برای انجام آزمایش، میلگرد آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ با قطر خارجی ۲۲ میلی‌متر تهیه شد که آنالیز ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. قبل از انجام عملیات حرارتی، نمونه‌ها برای آزمایش‌های مختلف همچون آزمایش کشش، سختی، متالوگرافی و تست ضربه آماده شد. عملیات انحلال در دمای ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت صورت گرفت و تندسرمایش تا دمای محیط روی همه نمونه انجام شد. عملیات پیرسازی در سه بخش انجام شد؛ ابتدا اثر عملیات پیرسازی دومرحله‌ای و مقایسه

آن با پیرسازی تک‌مرحله‌ای و پیری طبیعی صورت گرفت. سپس اثر کار سرد بر فرایند پیری و تأثیر فاکتور دمای پیرسازی بر فرایند پیری بررسی شد. در شکل ۱ انواع عملیات حرارتی مورد بررسی در این مقاله نمایش داده شده است. در تمامی موارد ترانس درجه حرارت کوره ± 10 درجه است. پس از عملیات حرارتی، خواص مکانیکی نمونه‌ها از جمله سختی، استحکام کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول نسبی اندازه‌گیری شد.

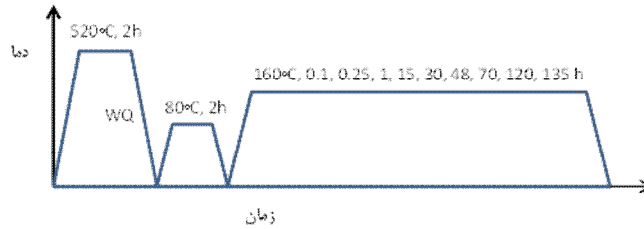
۳. بحث و نتایج

در شکل ۲ تصاویر متالوگرافی نمونه‌های پیرسختی مصنوعی یک و دومرحله‌ای پس از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای ۱۰۰ و ۱۶۰ درجه؛ و در شکل ۳ تغییرات سختی نسبت به زمان برای پیرسختی طبیعی و مصنوعی یک و دومرحله‌ای نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، برای نمونه‌هایی که به صورت طبیعی پیرسخت شده‌اند، در ۲۴ ساعت اولیه تغییرات محسوسی در سختی دیده نمی‌شود و سختی تقریباً ۹۱ برینل است. تغییرات سختی نسبت به زمان پیرسختی یک‌مرحله‌ای (در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) در ۳۰ ساعت اولیه نسبتاً زیاد است و سختی از ۹۲ به ۱۲۸ برینل می‌رسد. در پیرسختی مصنوعی دومرحله‌ای سختی نسبت به زمان پیرسختی در ۳۰ ساعت اولیه از مقادیر بیشتری نسبت به پیرسختی طبیعی و مصنوعی یک‌مرحله‌ای شروع می‌شود و سختی از حدود ۹۶ به ۱۴۳ برینل می‌رسد.

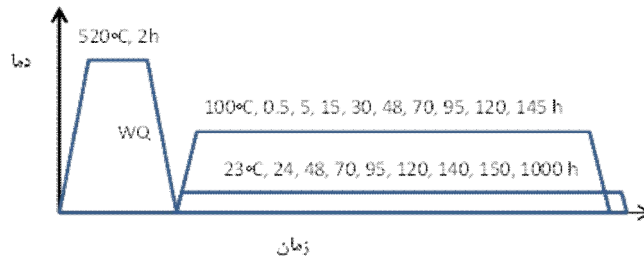
در نمونه‌هایی که به صورت طبیعی پیرسخت شده‌اند با گذشت زمان سختی نمونه‌ها با شیب تندی افزایش می‌یابد و پس از گذشت ۱۰۰ ساعت، در محدوده سختی ۱۲۰ برینل به صورت تقریباً افقی باقی می‌ماند، اما در نمونه‌هایی که به صورت یک و دومرحله‌ای پیرسخت شده‌اند؛ با گذشت زمان سختی تغییرات چندانی ندارد. در سیکل عملیات پیرسختی دومرحله‌ای پس از ۷۰ ساعت ماکزیمم سختی ۱۵۵ برینل و در سیکل عملیات پیرسختی یک‌مرحله‌ای پس از ۹۵ ساعت به ماکزیمم سختی ۱۵۱ برینل می‌رسد. اما در سیکل عملیات پیرسختی طبیعی تا پایان زمان آزمایش ۱۰۰۰ ساعت هم به ماکزیمم واقعی سختی نمی‌رسد؛ برای رسیدن به ماکزیمم سختی در فرایند پیرسختی طبیعی به ماه‌ها یا سال‌ها وقت نیاز است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴

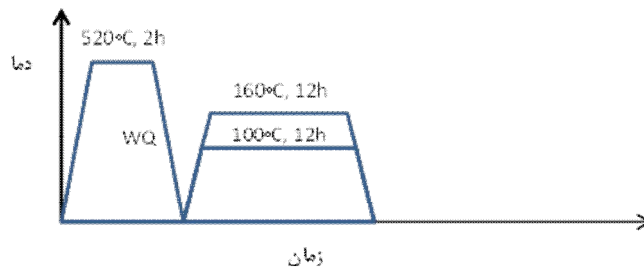
عنصر	مس	منیزیم	منگنز	روی	تیتانیوم	آهن	سیلیسیم	آلومینیم باقیمانده
درصد	۴/۲۰	۰/۵۰	۰/۳۹	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۱۵	



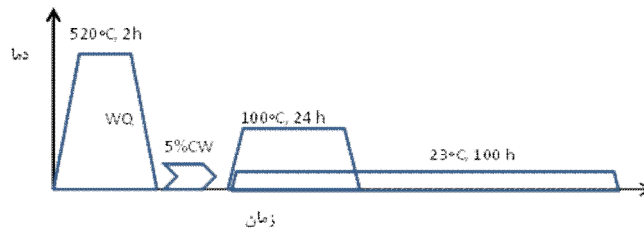
(الف)



(ب)

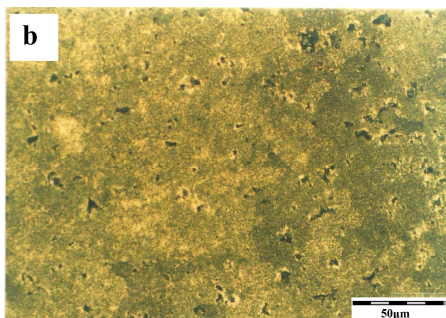


(ج)

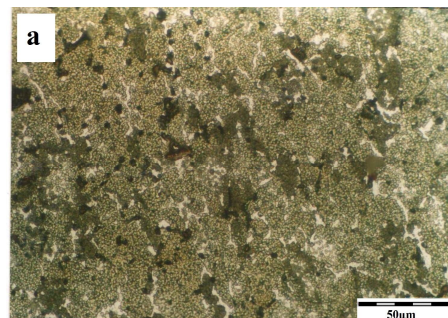


(د)

شکل ۱. انواع عملیات حرارتی؛ الف) پیرسازی دومرحله‌ای، ب) پیرسازی طبیعی و تک‌مرحله‌ای، ج) اثر دما بر پیرسختی، د) اثر کار سرد بر پیرسختی



(ب)

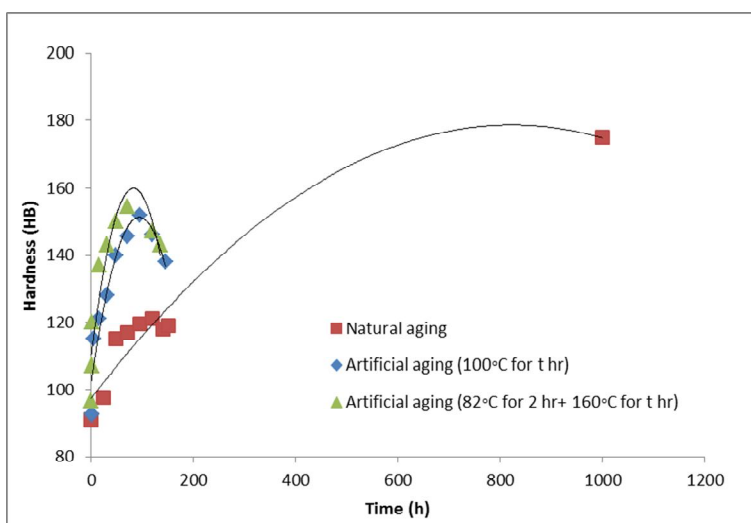


(الف)

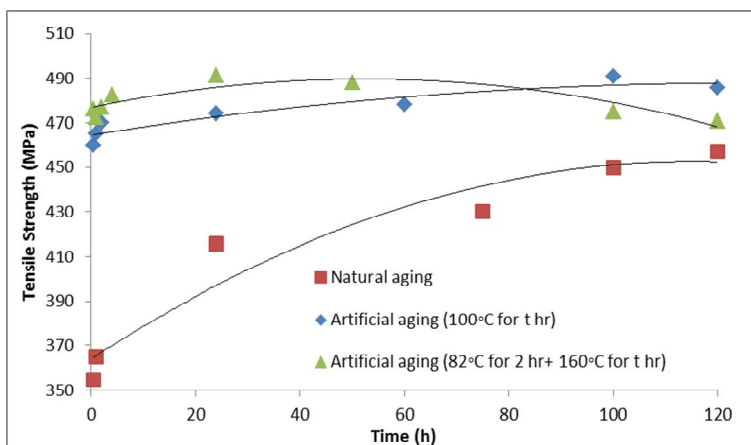
شکل ۲. ساختار میکروسکوپی نمونه پیرسختی مصنوعی؛ الف) یک‌مرحله‌ای، ب) دومرحله‌ای پس از ۲۴ ساعت

مصنوعی دومرحله‌ای با شیب کمتری به پیرسختی یک‌مرحله‌ای اتفاق می‌افتد. منحنی‌های تغییرات استحکام کششی نسبت به زمان برای پیرسختی طبیعی و مصنوعی یک و دومرحله‌ای در شکل ۴ رسم شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، استحکام کششی نسبت به زمان پیرسختی طبیعی در ۲۴ ساعت اولیه تغییرات زیادی نسبت به زمان دارد و از ۳۵۵ به ۴۱۵ مگاپاسکال افزایش می‌یابد، اما در پیرسختی مصنوعی یک و دومرحله‌ای تغییرات استحکام کششی نسبت به زمان تغییر چندانی نکرده و به ترتیب در ۲۴ ساعت اولیه از ۴۶۰ به ۴۴ مگاپاسکال (پیرسختی مصنوعی یک‌مرحله‌ای) و از ۴۷۶ به ۴۹۱ مگاپاسکال

در سیکل عملیات پیرسختی طبیعی در مدت زمان‌های بسیار طولانی به ماکزیمم سختی می‌رسیم و ماکزیمم سختی واقعی نیز در مقایسه با ماکزیمم حاصل از سیکل عملیات پیرسختی یک و دومرحله‌ای بالاتر خواهد بود. همچنین منحنی تغییرات سختی نسبت به زمان برای پیرسختی طبیعی با گذشت زمان طولانی همچنان روند صعودی دارد، اما در سیکل عملیات حرارتی پیرسختی مصنوعی یک‌مرحله‌ای تغییرات نسبت به زمان بعد از ۹۵ ساعت و در سیکل پیرسختی مصنوعی دومرحله‌ای تغییرات سختی نسبت به زمان بعد از ۷۰ ساعت سیر نزولی نشان می‌دهد. کاهش سختی نسبت به زمان در پیرسختی



شکل ۳. مقایسه منحنی تغییرات سختی نسبت به زمان



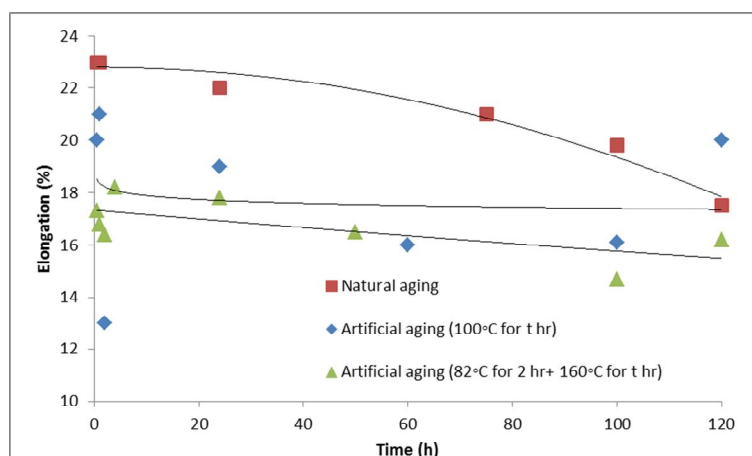
شکل ۴. مقایسه منحنی تغییرات استحکام کششی نسبت به زمان

یک‌مرحله‌ای به ازای ۱۰۰ ساعت ماکزیمم استحکام کششی ۴۹۱ مگاپاسکال می‌باشد، اما در سیکل عملیات پیرسختی طبیعی بعد از ۱۲۰ ساعت استحکام کششی ۴۵۷ مگاپاسکال می‌باشد که

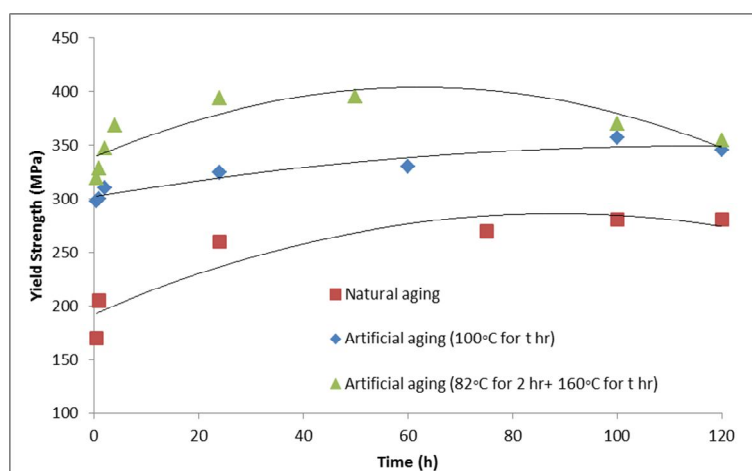
(پیرسختی دومرحله‌ای) تغییر می‌کند. در سیکل عملیات پیرسختی دومرحله‌ای به ازای ۲۴ ساعت ماکزیمم استحکام کششی ۴۹۱ مگاپاسکال و در سیکل عملیات پیرسختی

برای رسیدن به ماکزیمم استحکام کششی در فرایند پیرسختی طبیعی به زمان‌های بیشتری نیاز است. در سیکل عملیات پیرسختی طبیعی در مدت زمان اولیه تغییرات استحکام کششی نسبت به زمان زیاد است، اما با گذشت زمان تغییرات استحکام کششی نسبت به زمان کمتر شده و بعد از ۱۲۰ ساعت نیز به ماکزیمم مقدار خود نمی‌رسد، اما در سیکل عملیات حرارتی پیرسختی مصنوعی یک و دومرحله‌ای به ترتیب پس از ۱۰۰ و ۲۴ ساعت به ماکزیمم مقدار استحکام کششی نسبت به زمان می‌رسد که بعد از این زمان استحکام کششی نسبتاً به زمان بسترسازی برای پیرسختی یک و دومرحله‌ای سیر نزولی با

شتاب بیشتری برای پیرسختی مصنوعی یک‌مرحله‌ای مشاهده می‌شود. در شکل ۵ منحنی‌های تغییرات درصد ازدیاد طول نسبی نسبت به زمان برای پیرسختی طبیعی و مصنوعی یک و دومرحله‌ای رسم شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود منحنی درصد ازدیاد طول نسبی برای نمونه‌هایی که پیرسختی طبیعی شده‌اند بالاتر (۲۳ درصد) از منحنی نمونه‌های است که پیرسختی مصنوعی یک و دومرحله‌ای (۱۷/۵ درصد) شده‌اند. با گذشت زمان تغییرات محسوسی در منحنی درصد ازدیاد طول نسبی برای نمونه‌های پیرسخت‌شده طبیعی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۵. مقایسه منحنی تغییرات درصد ازدیاد طول نسبت به زمان



شکل ۶. مقایسه منحنی تغییرات استحکام تسلیم نسبت به زمان

به‌طور یکنواخت منحنی درصد ازدیاد طول نسبی نسبت به زمان کاهش می‌یابد. اما برای نمونه‌های پیرسخت‌شده مصنوعی یک و دومرحله‌ای در همان ساعت‌های اولیه منحنی درصد ازدیاد طول نسبی، نسبت به زمان سیر نزولی دارد. پس از

گذشت زمان حدوداً ۱۰۰ ساعت، مقدار درصد ازدیاد طول نسبی برای نمونه‌های پیرسختی طبیعی شده‌اند حدوداً ۱۹/۸ درصد و برای نمونه‌هایی که پیرسختی مصنوعی یک و دومرحله‌ای شده‌اند به ترتیب ۱۶/۱ و ۱۴/۷ درصد می‌باشد. در سیکل عملیات

پیرسختی طبیعی در مدت زمان‌های بسیار طولانی مقدار درصد ازدیاد طول نسبی کاهش می‌یابد و در مقایسه با مقدار درصد ازدیاد طول نسبی ناشی از پیرسختی مصنوعی یک و دومرحله‌ای بسیار کمتر می‌باشد. منحنی‌های تغییرات استحکام تسلیم نسبت به زمان برای پیرسختی طبیعی و مصنوعی یک و دومرحله‌ای در شکل ۶ رسم شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود استحکام تسلیم نسبت به زمان پیرسختی مصنوعی دومرحله‌ای از مقایره بالاتری (۳۲۰ مگاپاسکال) نسبت به نمونه‌هایی که به صورت مصنوعی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پیرسخت شده‌اند استحکام تسلیم نسبت به زمان برای پیرسختی طبیعی و مصنوعی (یک و دومرحله‌ای) به‌طور یکنواخت با گذشت زمان در زمان‌های اولیه سیر صعودی دارد. در سیکل عملیات پیرسختی دومرحله‌ای به ازای ۵۰ ساعت ماکزیمم استحکام تسلیم ۳۹۵ مگاپاسکال و در سیکل عملیات پیرسختی یک‌مرحله‌ای به ازای ۱۰۰ ساعت ماکزیمم استحکام تسلیم ۳۵۷ مگاپاسکال به دست می‌آید. اما در سیکل عملیات پیرسختی طبیعی تا پایان زمان آزمایش (۱۲۰ ساعت) به ماکزیمم واقعی استحکام تسلیم نمی‌رسیم. در سیکل عملیات پیرسختی طبیعی در مدت زمان‌های طولانی به ماکزیمم استحکام تسلیم می‌رسیم که ماکزیمم تسلیم واقعی در مقایسه با ماکزیمم استحکام تسلیم حاصل از سیکل عملیات پیرسختی یک و دومرحله‌ای بالاتر خواهد بود. می‌توان گفت که در سیکل عملیات پیرسختی طبیعی تغییرات استحکام تسلیم نسبت به زمان تا پایان زمان آزمایش (۱۲۰ ساعت) همچنان روند صعودی دارد، اما در سیکل عملیات پیرسختی یک‌مرحله‌ای بعد از ۱۰۰ ساعت و در سیکل عملیات حرارتی دومرحله‌ای بعد از ۵۰ ساعت تغییرات استحکام تسلیم نسبت به زمان روند نزولی دارد. در برخی از آلیاژها می‌توان با اعمال مقدار مشخص و کنترل شده از کار سرد روی نمونه بعد از عملیات تندسرمایش خواص مکانیکی از جمله استحکام را افزایش داد. مقداری از افزایش خواص مکانیکی مربوط به کار سختی است. اما وقتی عملیات رسوب‌دهی انجام می‌شود، تأثیر آن بر خواص مکانیکی ایجاد شده اهمیت بیشتری می‌یابد.

۴. تأثیر کار سرد بر فرایند پیرسختی

نتیجه حاصل از آزمایش سختی بر نمونه‌ای که ۵ درصد کار سرد روی آن اعمال شده بود و سپس در دمای محیط به مدت ۱۰۰

ساعت پیرسخت شده، برابر با ۱۲۳ برینل است که در مقایسه با نمونه‌ای که به صورت طبیعی (بدون اعمال کار سرد) بعد از ۱۰۰ ساعت پیرسخت شده است، سختی بالاتر است. نتیجه حاصل از آزمایش سختی بر نمونه با ۵ درصد کار سرد و سپس پیرسختی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت برابر با ۱۲۸ برینل است که در مقایسه با نمونه‌ای که به صورت مصنوعی در یک مرحله (بدون اعمال کار سرد) بعد از ۲۴ ساعت پیرسخت شده است (۱۲۵ برینل) بالاتر است، اما در مقایسه با نمونه‌ای که به صورت مصنوعی در دو مرحله پیرسخت شده، بعد از همین زمان به دست آمده (۱۴۰ برینل) کمتر می‌باشد.

۵. تأثیر فاکتور دما بر فرایند پیرسختی

تأثیر دما بر فرایند رسوب‌سختی مصنوعی، در دو دمای متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و پس از اتمام عملیات رسوب‌سختی، با روش برینل سختی نمونه‌ها در چند نقطه اندازه‌گیری شد. نتیجه آزمایش سختی در فرایند پیرسختی مصنوعی در دمای ۱۰۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت به ترتیب برابر با ۱۱۸ و ۱۲۴ برینل می‌باشد. در توجیه منحنی تغییرات سختی نسبت به زمان پیری مصنوعی یک‌مرحله در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان گفت که با گذشت زمان بعد از تشکیل G.P. رسوبات میانی با ترکیبات بین‌فلزی (AlCuMg) روی نابجایی‌ها یا مرزدانه‌ها به صورت غیرهمگن جوانه زده، که این امر موجب آزادشدن انرژی $\Delta\delta G$ می‌شود که در نتیجه آغاز هسته‌گذاری ساده‌تر می‌شود و سد انرژی فعال‌سازی ΔG را کاهش می‌دهد؛ به بیان دیگر شعاع بحرانی برای جوانه‌زنی "r" کاهش می‌یابد و این امر سبب می‌شود که تعداد جوانه بیشتری در زمان کوتاه‌تری تشکیل شود. با توجه به دمای پیرسختی مصنوعی، بعد از تشکیل فاز میانی، فازهای غیرهمگن روی مرزدانه جوانه می‌زند و چون با زمینه پیوسته است، اثر استحکام بخشی کمتری دارد در بیان منحنی تغییرات سختی نسبت به زمان پیرسختی مصنوعی دومرحله‌ای نمونه باید گفت که در مرحله اولیه پیرسختی مصنوعی چون دمای پیرسختی (۸۰ درجه سانتی‌گراد) پایین است، رفتاری مانند نمونه پیرسخت شده طبیعی دارد؛ یعنی در زمان‌های اولیه سختی نمونه به دلیل خارج‌نشدن عناصری آلیاژی (منیزیم و مس) از محلول فوق اشباع پایین‌تر می‌باشد، اما چون دما بالاتر از نمونه پیرسخت شده طبیعی است، سختی از

مقادیر بالاتری شروع می‌شود و با گذشت زمان جوانه‌هایی که شعاع آنها بیشتر از شعاع r می‌باشد، انرژی لازم را جهت عبور از سد انرژی به دست آورده‌اند و پایدار می‌مانند و تعداد هسته‌های زیادی تشکیل می‌دهند، اما چون زمان پیرسختی مصنوعی در مرحله اولیه کم (۲ ساعت) است، فرصت رشد را پیدا نمی‌کنند.

در مرحله دوم پیرسختی مصنوعی جوانه‌زنی رسوبات میانی با سرعت بالایی علاوه بر نابعایی و مزدانه‌ها بر روی G.P. نیز صورت می‌گیرد. از طرفی دمای بالای پیرسختی در مرحله دوم پیرسختی سبب تجزیه شدن مناطق G.P. تشکیل شده در مرحله اول پیرسختی می‌شود که این عامل سبب افزایش مناطق G.P. می‌شود و به سختی در زمان کوتاه‌تری نسبت به پیرسختی مصنوعی یک مرحله‌ای شروع به کاهش می‌کند و به عبارت دیگر در پیرسختی مصنوعی دوم مرحله‌ای شروع به کاهش می‌کند و در پیرسختی مصنوعی دوم مرحله‌ای پدیده فرتوت‌سازی کمتر مشاهده می‌شود. علت این امر افزایش نیروی محرکه جوانه‌زنی در پیرسختی دوم مرحله‌ای می‌باشد. در پیرسختی طبیعی در زمان‌های طولانی به ماکزیم مقدار خود می‌رسد، در حالی که در پیرسختی مصنوعی یک و دوم مرحله‌ای سختی در زمان‌های بسیار کوتاه‌تری به ماکزیم مقدار خود می‌رسد. همچنین در پیرسختی طبیعی با گذشت زمان سختی کاهش نمی‌یابد، اما در پیرسختی مصنوعی یک و دوم مرحله‌ای، سختی بعد از رسیدن به ماکزیم مقدار خود به شدت کاهش می‌یابد. در پیرسختی مصنوعی دوم مرحله‌ای به خواص مکانیکی مطلوب‌تری در زمان‌های کوتاه‌تر می‌رسیم و شیب کاهش پیرسختی دوم مرحله‌ای کمتر از شیب کاهش پیرسختی یک مرحله‌ای می‌باشد.

به‌طور کلی در ارتباط با تغییرات سختی، در حین پیرکردن طبیعی و اثر کار سرد بعد از تندسرمایش می‌توان چنین گفت که با اعمال کار سرد به علت کارسختی ایجاد شده مقادیر سختی از اعداد بالاتری آغاز می‌شود. اما با افزایش کار سرد تعداد نابعایی‌ها بیشتر شده و جاهای خالی بیشتری حذف می‌شوند. بنابراین فرایند پیرسختی طبیعی که با تشکیل مناطق G.P. (با استفاده از نفوذ از طریق جاهای خالی) همراه است با سرعت کمتری رخ داده و اثر سخت شدن آن کمتر می‌شود. در ارتباط با سخت شدن در دمای پیری مصنوعی می‌توان گفت که چون پیرسختی مصنوعی همراه با جوانه‌زنی غیرهمگن فاز میانی و سپس نهایی است، لذا اعمال کار سرد باعث می‌شود که چگالی

نابعایی‌ها و مزدانه‌های فرعی محلول فوق اشباع اولیه افزایش یافته و در نتیجه جوانه‌زنی غیرهمگن فازهای میانی و نهایی تشدید شود که همین امر سخت شدن و استحکام بخشی ناشی از پیرسختی مصنوعی را افزایش می‌دهد و به دنبال آن کاهش سختی نیز سریع‌تر به وقوع می‌پیوندد؛ زیرا به مرحله ایجاد فاز نهایی رسیده‌ایم.

۶. نتیجه‌گیری

سرعت تغییرات خواص مکانیکی از قبیل سختی، استحکام کششی، استحکام تسلیم در پیرسختی دوم مرحله‌ای بیشتر از پیرسختی مصنوعی یک مرحله‌ای و سرعت تغییرات خواص مکانیکی بر پیرسختی مصنوعی یک مرحله‌ای بسیار بیشتر از سرعت تغییرات در پیرسختی طبیعی می‌باشد. در پیرسختی طبیعی به علت پایین بودن دمای پیرسختی نفوذ اتم‌های محلول آهسته‌تر است، اما نیروی محرکه برای جوانه‌زنی رسوبات فاز ثانویه بیشتر می‌باشد؛ پس تعداد جوانه‌های بیشتری تشکیل می‌گردد و سختی بالاتر از طریق توزیع رسوبات هم‌سیمی ظریف و تعداد زیاد، در زمان‌های طولانی ایجاد می‌شود، اما چون دما پایین است برای رسیدن به تعادل ترمودینامیکی به زمان‌های بسیار طولانی احتیاج است. در پیرسختی مصنوعی یک مرحله‌ای به علت بالا بودن دمای پیرسختی تعداد جوانه‌های کمتری تشکیل شده، اما چون دما بالاست، نفوذ اتم‌ها با سرعت بالاتری انجام می‌شود، بنابراین سرعت رشد جوانه‌ها زیاد است. در زمان‌های بسیار کمتری به تعادل ترمودینامیکی می‌رسیم؛ یعنی فاز هم‌سیمی θ و فاز نهایی و تعادلی غیرهم‌سیمی θ زودتر به تعادل می‌رسد. در پیرسختی مصنوعی دوم مرحله‌ای چون دمای پیرسختی مرحله اولیه پایین است، می‌توان گفت در مرحله اولیه رفتار رسوب سختی مشابه رفتار پیرسختی طبیعی است؛ یعنی نیروی محرکه برای جوانه‌زنی مناطق G.P. زیاد می‌باشد. اما سرعت رشد کم است که این امر سبب شده تعداد جوانه‌های زیادی تشکیل شود. در مرحله دوم پیرسختی که در دمای بالاتر و برای مدت زمان بیشتری انجام می‌شود، مقداری از مناطق G.P. تشکیل شده از مرحله اول پیرسختی تجزیه شده که همین امر سبب می‌شود تعداد مناطق G.P. افزایش یابد و شروع به رشد کند، اما چون تعداد جوانه‌ها زیاد است، زیاد نمی‌تواند رشد کند؛ پس خواص مکانیکی مطلوبی حاصل می‌شود.

- [1] Roósz, A., and H. E. Exner. "Ternary restricted-equilibrium phase diagrams-II. Practical application: Aluminium-rich corner of the Al-Cu-Mg system." *Acta Metallurgica et Materialia* 38, no. 10 (1990): 2009-2016.
- [2] Neuhäuser, Hartmut, and Christoph Schwink. "Solid Solution Strengthening." *Materials Science and Technology* (2006).
- [3] Polmear, Ian, and David St John. *Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals*. Butterworth-Heinemann, 2005.
- [4] Beffort, O., C. Solenthaler, and M. O. Speidel. "Improvement of strength and fracture toughness of a spray-deposited Al-Cu-Mg-Ag-Mn-Ti-Zr alloy by optimized heat treatments and thermomechanical treatments." *Materials Science and Engineering: A* 191, no. 1 (1995): 113-120.
- [5] Nakai, Manabu, and Takehiko Eto. "New aspect of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications." *Materials Science and Engineering: A* 285, no. 1 (2000): 62-68.
- [6] Engdahl, T., V. Hansen, P. J. Warren, and K. Stiller. "Investigation of fine scale precipitates in Al-Zn-Mg alloys after various heat treatments." *Materials Science and Engineering: A* 327, no. 1 (2002): 59-64.
- [7] Hernández-Rivera, J. L., JJ Cruz Rivera, C. T. Koch, V. B. Özöl, and R. Martínez-Sánchez. "Study of coherence strain of GP II zones in an aged aluminum composite." *Journal of Alloys and Compounds* 536 (2012): S159-S164.
- [8] Reis, Danieli AP, Antonio Augusto Couto, N. I. Domingues Jr, Ana Cláudia Hirschmann, S. Zepka, and Carlos de Moura Neto. "Effect of artificial aging on the mechanical properties of an aerospace aluminum alloy 2024." In *Defect and Diffusion Forum*, vol. 326, pp. 193-198. Trans Tech Publications, 2012.
- [9] Huda, Zainul, Nur Iskandar Taib, and Tuan Zaharinie. "Characterization of 2024-T3: an aerospace aluminum alloy." *Materials Chemistry and Physics* 113, no. 2 (2009): 515-517.
- [10] Abbass, Muna Khethier. "Effect of aging time on the mechanical properties of friction stir spot welding of Al-alloy (AA2024)." *Int. J. Eng. Res. Appl* 2 (2012): 1366-1374.
- [11] Wang, S. C., and M. J. Starink. "Two types of S phase precipitates in Al-Cu-Mg alloys." *Acta Materialia* 55, no. 3 (2007): 933-941.
- [12] Wang, S. C., M. J. Starink, and N. Gao, "Precipitation hardening in Al-Cu-Mg alloys", *Scr. Mater.*, 54, (2006): 287-291.
- [13] Feng, Zongqiang, Yanqing Yang, Bin Huang, Ming Han, Xian Luo, and Jigang Ru. "Precipitation process along dislocations in Al-Cu-Mg alloy during artificial aging." *Materials Science and Engineering: A* 528, no. 2 (2010): 706-714.
- [14] Wang, S. C., and M. J. Starink. "Precipitates and intermetallic phases in precipitation hardening Al-Cu-Mg-(Li) based alloys." *International Materials Reviews* (2013).
- [15] Afzal, Naveed, Tariq Shah, and R. Ahmad. "Microstructural Features and Mechanical Properties of Artificially Aged AA2024." *Strength of Materials* 45, no. 6 (2013): 684-692.
- [16] Alexopoulos, Nikolaos D., Aggeliki Proiou, Theano Examilioti, Nikolai Kashaev, Stefan Riekehr, and Stavros K. Kourkoulis. "Effect of artificial aging on the mechanical performance of (Al-Cu) 2024 and (Al-Cu-Li) 2198 aluminum alloys." *Procedia Structural Integrity* 2 (2016): 3782-3783.