مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، تابستان 1395، دوره 3، شماره 2، ص‌ص 19-25

فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بهبود خواص مکانیکی آلیاژ AA2024 از طریق ترکیب مناسب عملیات حرارتی و نورد سرد

محسن مهاجر[1]، بهمن میرزاخانی[2*]، مهدی مدبری‌فر[3]، حسین مؤمنی[4]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

2- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه اراک، اراک

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

4- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* اراک، صندوق پستی 38156-8-8349، b-mirzakhani@araku.ac.ir

کلیدواژگان

آلیاژ آلومینیوم 2024

نورد سرد

خواص مکانیکی

چکیده

آلیاژ آلومینیوم 2024 اگر چه استحکام بالایی دارد ولی شکل‌پذیری آن پایین است. به همین علت در طی فرایندهای تولید از طریق شکل‌دهی نظیر نورد، نیاز به اعمال انرژی کاری بالایی است. از این رو دستیابی به خواص مکانیکی بالا همراه با بهبود نوردپذیری مهمترین چالش در تولید این آلیاژ محسوب می‌شود. اغلب برای غلبه بر مشکل شکل‌پذیری این آلیاژ، عملیات نورد سرد در دمای زیر صفر انجام می‌شود که مشکلات اجرایی را به همراه دارد. هدف از این مقاله بهبود خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2024 از طریق انتخاب مناسب عملیات ترکیبی کار سرد در دمای اتاق و رسوب‌سختی می‌باشد. بدین منظور تسمه نورد گرم شده این آلیاژ بعد از عملیات انحلالی در دمای 495°C به مدت یک ساعت، در آب سرد کوئنچ گردید. سپس عملیات نورد سرد در دمای اتاق با 15، 30 و 50 درصد کاهش ضخامت انجام گرفت. نمونه‌ها بعد از پیرسازی طبیعی تحت آزمایش کشش و سختی‌سنجی قرار گرفتند و بررسی‌های ریزساختاری به کمک متالوگرافی صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که نمونه نورد سرد شده به میزان 30 درصد کاهش ضخامت در بین نمونه‌های نورد سرد شده یا T4، بالاترین استحکام و سختی را دارد.

Improvement in mechanical properties of 2024 Al alloy through combination of heat treatment and cold rolling

Mohsen Mohajer[1], Bahman Mirzakhani[1*], Mehdi Modabberifar[1], Hosein Momeni[2]

1- Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

2- Malek-e-Ashtar University, Tehran, Iran

* P.O.B. 38156-8-8349, Arak, Iran, b-mirzakhani@araku.ac.ir

Keywords

2024 Aluminum alloy

Cold roll

Mechanical properties

Abstract

AA2024 alloy has high strength but low formability. Therefore there is a difficulty during forming processes of the alloy such as rolling, because high capacity of rolling machine is required. So, achievements in good mechanical properties in this alloy besides the improvement in ductility during cold rolling are the main challenges for industries. The objective of this paper is to improve mechanical properties of 2024 aluminum alloy by using a combination of cold rolling and precipitation hardening. To do this, the hot rolled strip of the alloy first solutionized at495 ℃ for an hour and immediately quenched in cold water. The samples were then subjected to 15, 30 and 50 percent reduction by rolling at room temperatures. The cold worked samples were then natural aged for a week. The tensile test and Brinell hardness test were conducted and microstructural study was carried out by metallography. The results indicate that, the 30% cold rolled sample has the maximum strength and hardness in comparison to the T4 or T3 samples.

1- مقدمه

فلزات و آلیاژهای آن‌ها در دنیای امروز گستره وسیعی از مصارف صنعتی را به خود اختصاص داده‌اند؛ اما در حال حاضر آلیاژهای آلومینیوم از نظر میزان و تنوع مصارف، از پرمصرف‌ترین مواد فلزی پس از فولاد محسوب می‌گردند. استحکام مخصوص و مقاومت به خوردگی مطلوب آلیاژهای آلومینیوم موجب شده است تا این آلیاژها کاربردهای زیادی را در صنایع مختلف ازجمله صنایع هوافضا، خودروسازی و الکترونیک به خود اختصاص دهند.

آلیاژ آلومینیوم 2024 یکی از این آلیاژهاست که مهمترین عناصر آلیاژی آن مس، منیزیم و منگنز می‌باشد [1]. آلیاژ آلومینیوم 2024 با دارا بودن قابلیت عملیات حرارتی و رسیدن به استحکام بالا از طریق رسوب سختی، انتخاب مناسبی برای

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Mohajer, B. Mirzakhani, M. Modabberifar, H. Momeni, Improvement in mechanical properties of 2024 Al alloy through combination of heat treatment and cold rolling, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 19-25, 2016 (in Persian)

صنایع نظامی محسوب می‌شود [3،2]. از آنجایی که این آلیاژ دارای نسبت استحکام به وزن بالایی است، از آن در صنایع نظامی، هوا-فضا و کشتی‌سازی استفاده‌های فراوانی می‌شود [4]. شکل‌پذیری محدود این آلیاژ برای کاربردهای عملی به یک موضوع مهم تبدیل شده است. بدیهی است که توسعه ظرفیت شکل‌پذیری در این آلیاژ موجب افزایش کاربرد آن در صنعت خواهد شد [5]. به منظور افزایش قابلیت شکل‌پذیری آلیاژ فوق، لازم است پارامترهای مؤثر بر فرایندهای شکل‌دهی به خوبی شناخته و طراحی شوند تا بدین ترتیب ضمن تقویت قابلیت شکل‌پذیری، خواص نهایی آن نیز بهبود یابد.

در حین فرایند نورد ممکن است اشکالاتی به وجود آید که عامل بروز آن‌ها می‌تواند موارد مختلفی باشد. ماده اولیه مورد استفاده خود عامل مهمی در این رابطه می‌باشد. شمش مورد استفاده معمولاً دارای ساختار غیریکنواخت بوده و از نوردپذیری کمی برخوردار است. در این ساختارها به دلیل وجود فازهای ثانویه که از شکل‌پذیری کمی برخوردار هستند ترک‌هایی در عمق و سطح قطعه بوجود می آید. ترک‌های به وجود آمده در مرز دانه‌ها رشد کرده و نهایتاً موجب شکست زودرس قطعه در حین نورد می‌شوند. از این‌رو برای انجام عملیات نورد موفقیت‌آمیز بایستی کلیه غیریکنواختی‌های ساختاری موجود در ماده اولیه جهت انجام نورد، حذف گردد. از سویی دیگر درطی فرایند نورد، کنترل ریزساختار به دلیل تأثیر مستقیم آن بر نرمی و تنش سیلان از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. به دلیل اهمیت در شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیوم 2024 در طی نورد و نحوه دستیابی به خواص نهایی مطلوب پژوهش‌های مختلفی انجام گرفته است. وایسو همکاران [6] به بررسی اثر دمای نورد و عملیات رسوب سختی بر خواص مکانیکی و ریزساختاری این آلیاژ پرداختند. آن‌ها نشان دادند که کاهش دمای نورد منجر به افزایش استحکام و کاهش درصد ازدیاد طول نسبی آلیاژ می‌شود. همچنین رسوب سختی قبل از عملیات نورد باعث کاهش قابلیت شکل‌پذیری ماده می‌شود. میرزاخانی و منصوری‌نژاد [7] با اعمال ترکیبی از عملیات حرارتی و کار سرد، استحکام آلیاژ 6061 را به میزان قابل توجهی افزایش دادند. چِنج و همکاران [5] تأثیر عملیات رسوب‌سختی بعد از نورد را بر ریزساختار و خواص مکانیکی این آلیاژ در دماهای مختلف بررسی کردند. بر اساس تحقیق آن‌ها عملیات نورد و رسوب‌سختی به‌طور چشم‌گیری به افزایش هم‌زمان سختی، استحکام تسلیم و شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیوم 2024 در فرایند نورد در دمای نیتروژن مایع کمک می‌کند. ژو و همکاران [8] رفتار رسوب‌سختی بعد از نورد آلیاژ آلومینیوم 2024 با درصدهای مختلف کاهش ضخامت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که در کاهش ضخامت‌های بالاتر از 30 درصد در دمای محیط، به دلیل ایجاد میکرو ترک‌ها در ماده، خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. همچنین با انجام رسوب سختی پس از عملیات نورد، خواص مکانیکی بهبود می‌یابد.

طبق مرور مقالات و منابع علمی مرتبط که در بالا برخی از آنها آورده شده است، اغلب تحقیقات صورت گرفته روی آلیاژ 2024، به نورد در دماهای زیر صفر متمرکز می‌شود. این در حالی است که در صنعت انجام تغییرشکل در دماهای پایین‌تر از دمای محیط مشکلات عملی زیادی را به همراه دارد. به همین جهت تلاش محققان بر این است که با کنترل ساختار آلیاژ بدون نیاز به نورد در دمای زیر صفر، شکل‌پذیری بهبود داده شود. در این مقاله با انجام نورد سرد آلیاژ در دمای محیط و ترکیب آن با عملیات حرارتی رسوب‌سختی، خواص مکانیکی از جمله شکل-پذیری و استحکام مورد بررسی واقع شده است.

2- مواد و روش تحقیق

ماده به کاررفته در این تحقیق، آلیاژ آلومینیوم 2024 به شکل تسمه با ضخامت اولیه 25 میلی‌متر بود. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول 1 نشان داده شده است.

تسمه‌ها بعد از عملیات نورد گرم در دمای 380℃ به میزان 85 درصد کاهش ضخامت، طبق شکل 1 در دمای 495℃ به مدت یک ساعت تحت عملیات انحلالی قرار گرفته و بلافاصله در آب سرد با دمای 25℃ کوئنچ شدند. در ادامه تعدادی از نمونه‌ها تحت عملیات پیرسازی طبیعی در دمای اتاق به مدت یک هفته قرار گرفتند. تعداد دیگری از نمونه‌ها پس از عملیات کوئنچ جهت جلوگیری از پیرسازی طبیعی در دمای اتاق (25℃)، فوراً تحت عملیات نورد سرد قرار گرفتند.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 2024 مورد استفاده در تحقیق

Table 1 The chemical composition (wt.%) of the 2024 Al alloy used in this study

عنصر	درصد وزنی (%)
Al	پایه
Cu	4/26
Mg	1/48
Mn	0/5
Fe	0/3
Zn	0/25
Si	0/25
Cr	0/03

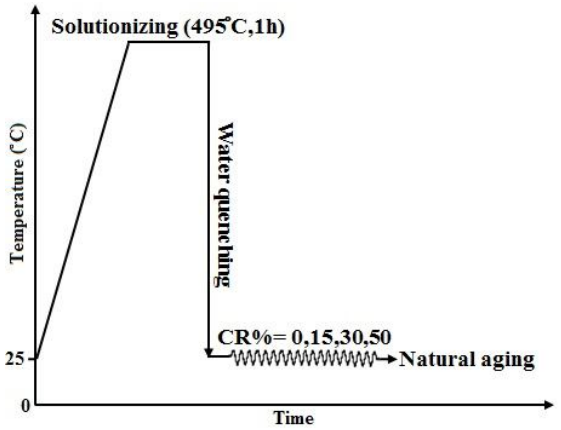


Fig. 1 The thermal mechanical cycle used in this study

شکل 1 سیکل عملیات مکانیکی-حرارتی مورد استفاده در تحقیق

برای انجام عملیات نورد از دستگاه نورد با توان 1000 تن که دارای غلتک‌هایی با قطر 40 سانتی‌متر و سرعت 2/5 دور بر دقیقه بود، استفاده شد. برای کاهش احتمال ترک‌خوردگی، مقدار کاهش ضخامت در هر مرحله 5 درصد در نظر گرفته شد. مقدار کل کاهش ضخامت‌های ایجاد شده به کمک نورد سرد 15، 30 و 50 درصد بود. این نمونه‌ها نیز به مدت یک هفته در دمای محیط پیرسازی طبیعی شدند و همراه با نمونه کار سرد نشده و T4 شده تحت بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری واقع شدند. در عملیات T4، آلیاژ پس از عملیات انحلالی تحت پیرسازی طبیعی واقع می‌شود. آزمایش کشش به کمک یک دستگاه کشش با ظرفیت 20 تن و همچنین برای سختی‌سنجی از دستگاه سختی‌سنج برینل استفاده شد. برای اندازه‌گیری سختی باری معادل 187/5 کیلوگرم نیرو به مدت 15 ثانیه به نمونه‌ها وارد شد.برای اطمینان از صحت میزان سختی، سه نقطه از هر نمونه اندازه گرفته شد و میانگین اندازه‌گیری‌ها گزارش گردید. برای متالوگرافی نمونه‌ها، بعد از سنباده‌زنی و پولیش به وسیله محلول شیمیایی کلر اچ گردیدند و تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی‌های مختلف تهیه شد.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج سختی‌سنجی

سختی نمونه اولیه مورد استفاده در این تحقیق قبل از عملیات حرارتی و نورد سرد 75 برینل بوده است. نمونه‌ها پس از عملیات محلولی و کوئنچ، در دمای اتاق به میزان ۱۵، ۳۰ و 50 درصد کاهش سطح مقطع، نورد شدند. شکل 2، تأثیر میزان کاهش سطح مقطع بر مقدار سختی نمونه‌های با تمپر T3 را نشان می‌دهد. در این نوع تمپر، ابتدا آلیاژ عملیات حرارتی انحلالی شده، سپس تحت کار سرد قرار گرفته و سپس پیرسازی طبیعی می‌شود.

با توجه به نمودار سختی در شکل 2، مشاهده می‌شود که سختی نمونه‌های T3 بیشتر از نمونه بدون کار سرد نشده است. ولی سختی نمونه کار سرد نشده نیز پس از عملیات T4 به 124 برینل می‌رسد که نسبت به نمونه اولیه با سختی 75 برینل افزایش زیاد داشته است. در شکل 3 تصاویر ریزساختار مربوط به نمونه اولیه و نمونه T4 شده آورده شده است. افزایش قابل ملاحظه در سختی نمونه T4 را می‌توان با استناد به ریزساختار شکل 3 توجیه نمود. در این نمونه تشکیل رسوبات ریزتر و پراکنده‌تر و همچنین توزیع بسیار مناسب آنها در زمینه آلیاژ منجر به افزایش سختی شده است.

افزایش شدید سختی نمونه‌ها بعد از نورد سرد، به افزایش سریع چگالی نابجایی‌ها در طی تغییر شکل پلاستیک مربوط می‌شود. در آلیاژهای فلزی نظیر 2024، وجود ذرات پراکنده و رسوبات به عنوان منابع قوی برای قفل کردن نابجایی‌های متحرک و درنتیجه تولید نابجایی‌های ساکن عمل می‌کنند. در نتیجه تولید و انباشت نابجایی‌های ساکن، نرخ کارسختی بالا می‌رود. همان‌طور که در شکل 2 ملاحظه می‌شود، نمونه‌های T3 نسبت به نمونه T4 سختی بالاتری دارند. علت این مساله نقش مکانیزم استحکام‌دهی کارسختی در کنار مکانیزم رسوب‌سختی است. در نمونه‌های محلول جامد، طی عملیات نورد رسوب‌گذاری دینامیکی نیز اتفاق می‌افتد. رسوبات و ذرات ریز به صورت همگن و پراکنده هم در طی نورد و هم در طی عملیات پیرسازی طبیعی بعد از کار سرد، به وجود می‌آیند که می‌تواند سختی نمونه را افزایش دهند.

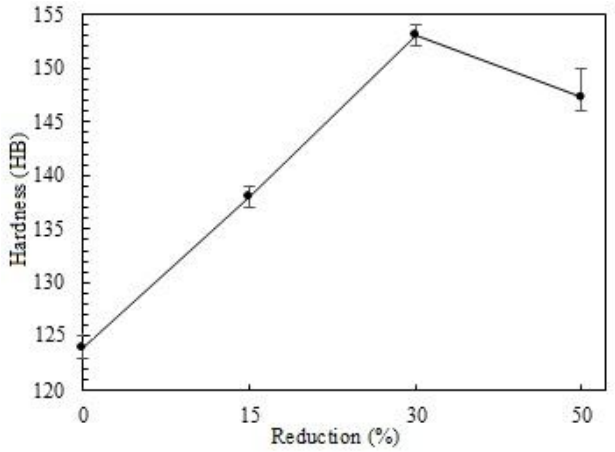
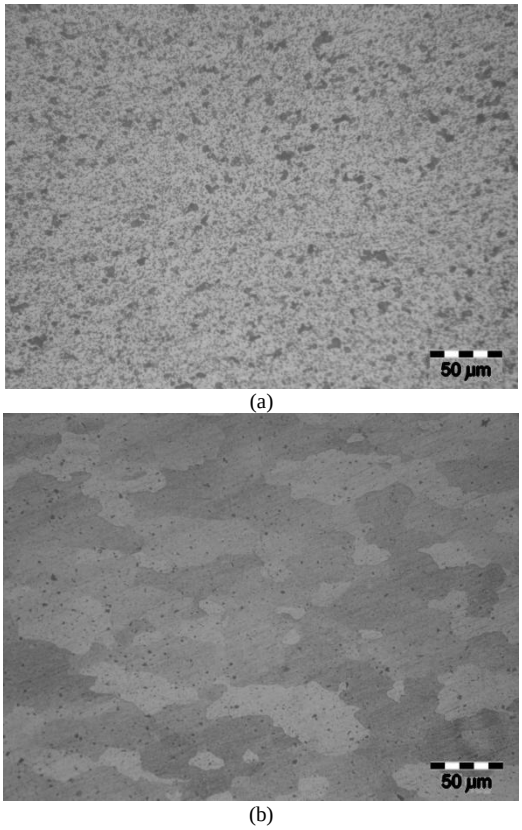


Fig. 2 The influence of amount of reduction in area on the hardness of T3 samples.

شکل 2 تغییراتسختی نمونه‌های T3 شده در درصدهای مختلف کاهش سطح مقطع



(a)

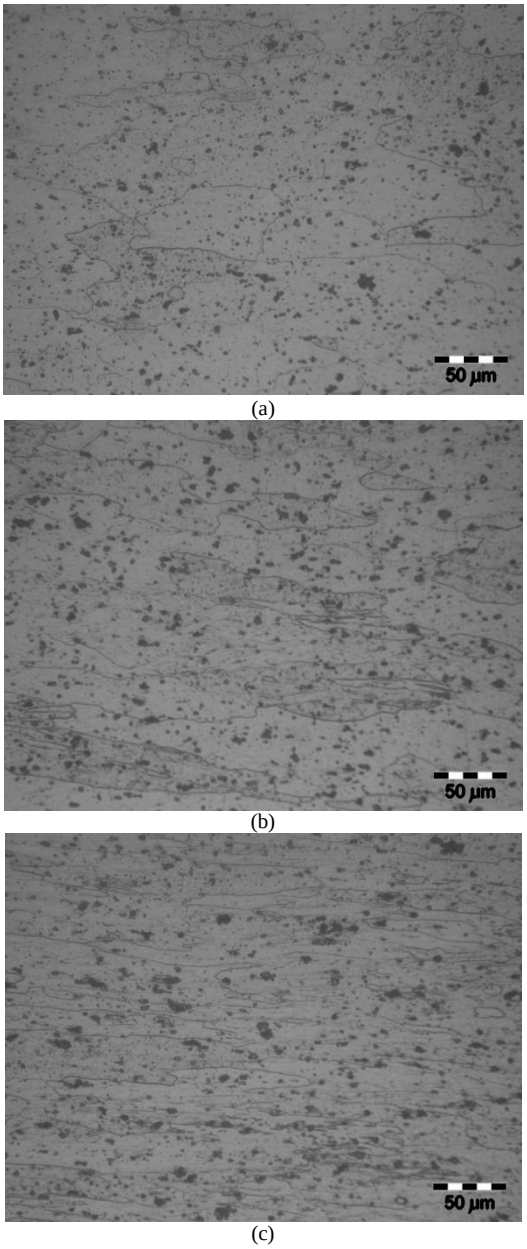
(b)

Fig. 3 Optical microscopic images of; a) raw material, b) T4 sample

شکل 3 تصویر میکروسکوپ نوری؛a) نمونه اولیه و b) نمونهT4

بنابراین با تلفیق عملیات مکانیکی و حرارتی، سختی این نمونه‌ها تا 105% افزایش داشته‌اند. در عملیات T4، ریزساختار فوق اشباع شده ازاتم‌ها و جای خالی‌های حاصل از کوئنچ، باعث تشکیل سریع مناطق GP شده و استحکام به‌سرعت افزایش می‌یابد.

دلیل افزایش سختی در آلیاژهای گروه 2000 از جمله آلیاژ 2024 پس از انجام عملیات پیرسازی طبیعی می‌تواند وابسته به تشکیل و رشد فازهای رسوبی در زمینه آلیاژ باشد که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به Al_2Cu و Al_2CuMg اشاره کرد. این رسوبات، فازهای سختی بوده که طی مدت‌زمان پیرسازی طبیعی تدریجاً تشکیل‌شده و باعث افزایش سختی، استحکام‌های تسلیم و کششی آلیاژ می‌شوند. روند تغییرات سختی به این صورت است که با افزایش کار سرد از 15% به 30%، سختی افزایش و در ادامه کار سرد (50%)، سختی کاهش می‌یابد. علت این تغییرات این است که با افزایش میزان کرنش پلاستیک، به دلیل افزایش چگالی نابجایی‌ها مکانیزم کارسختی نیز در کنار مکانیزم رسوب‌سختی بر سختی و استحکام نمونه‌ها تأثیرمی‌گذارد؛ اما بایستی یادآور شد که انباشت نابجایی‌ها بر تشکیل رسوبات نیز اثر دارند. به این صورت که با افزایش چگالی نابجایی‌ها به دلیل تسهیل نفوذ اتم‌ها، رسوبات سریع‌تر تشکیل می‌شود. ضمناً مکان‌های پر تنش، مکان‌های مناسبی برای تشکیل رسوبات هستند؛ بنابراین وقتی میزان کار سرد از 30% به 50% افزایش می‌یابد، به دلیل توزیع غیریکنواخت جنگل نابجایی‌ها، رسوبات نیز توزیع غیرهمگنی خواهند داشت. به همین جهت سختی نمونه T3 شده به میزان 50% در مقایسه با نمونه 30%، کمتر است. شکل 4، تصاویر ریزساختار نمونه‌های T3 شده تحت مقادیر مختلف کار سرد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر شکل 4 مشاهده می‌شود، نابجایی‌های ایجاد شده در اثر تغییرشکل پلاستیک، مکان‌های متعدد جوانه‌زنی را ایجاد می‌کنند.



(a)

(b)

(c)

Fig. 4 Metallography imagesof T3 samplesby; a) 15, b) 30 and c) 50 percent reduction in area

شکل 4 تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های T3 با a) 15، b) 30 و c) 50 درصد نورد سرد

نتیجه آن توزیع یکنواخت رسوبات در نمونه‌های 15% و 30% است. در نمونه 50% کار سرد شده طبق شکل (4-c) همان‌طور که توضیح داده شد، رسوبات از پراکندگی مناسبی برخوردار نیستند؛ بنابراین افت سختی بعد از 30% کار سرد مشاهده می‌شود.

3-2- نتایج آزمایش کشش

نتایج حاصل از آزمایش کشش برای نمونه‌های T3 با درصدهای مختلف نورد و T4 در شکل 5 نشان داده شده است. با توجه به شکل 5 مشاهده می‌شود که میزان استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه‌های T3 نسبت به نمونه T4 بیشتر و درصد ازدیاد طول آن‌ها کمتر است. علت این امر را می‌توان به کار سرد و تغییرشکل پلاستیک نمونه‌ها با درصدهای نورد دانست که با تشکیل نابجایی‌ها و همچنین موانع نابجایی ایجاد شده در طی رسوب‌سختی طبیعی، افزایش استحکام در این نمونه‌ها اتفاق افتاده است.

در بیشتر آلیاژهای رسوب‌سخت شونده، مراحل پیچیده وابسته به زمان و دما حاکم می‌باشد. افزایش اولیه در استحکام کششی، استحکام تسلیم، سختی به‌وسیله مکانیزم‌های نفوذی و همچنین به وسیله جلوگیری از حرکت نابجایی‌ها توسط اتم‌های ناخالصی مثل ذرات فاز ثانویه زمانی که طی عملیات حرارتی محلول‌سازی غلظت جاهای خالی افزایش می‌یابد، تشریح می‌شوند.

باافزایش زمان و دمای پیرسازی، چگالی رسوبات GP نیز افزایش می‌یابد. به‌طورکلی مکانیزم رسوب‌گذاری دینامیکی موجب تشکیل رسوبات ریز در طول انجام عملیات نورد سرد می‌شود، ازاین‌رو غلظت اتم‌های محلول در زمینه کاهش می‌یابد. درنتیجه با افزایش میزان نورد، رسوبات قابل توجهی به صورت دینامیکی تشکیل می‌گردد. به همین دلیل اعمال درصدهای بیشتر نورد تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی دارد که باعث خرد شدن و پراکنده شدن رسوبات می‌شود.

به‌طورکلی استحکام بالای نمونه‌ها را می‌توانبه صورت زیر بیان کرد:

1) تشکیل رسوبات ریز و پراکنده در اثر اعمال درصدهای مختلف نورد
2) کاهش اندازه دانه و ایجاد پالایش دانه‌ای در اثر عملیات نورد سرد
3) کارسختی ایجاد شده در ماده ناشی از چگالی بالای نابجایی‌های ساکن

در آلیاژ 2024 در طول عملیات نورد سرد، رسوب‌گذاری دینامیکی رخ می‌دهد؛ بنابراین با افزایش کرنش نورد و درنتیجه افزایش چگالی نابجایی‌ها، محل‌های بیشتری برای رسوب‌گذاری رسوبات مهیا می‌شود. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود رسوبات در نمونه T3 شده به‌اندازه 30%، توزیع بهتری نسبت به دیگر نمونه‌های T3 دارد. با افزایش کرنش نورد از 30 به 50 درصد، استحکام تسلیم دچار افت شده است ولی استحکام کششی تغییر قابل توجهی ندارد.

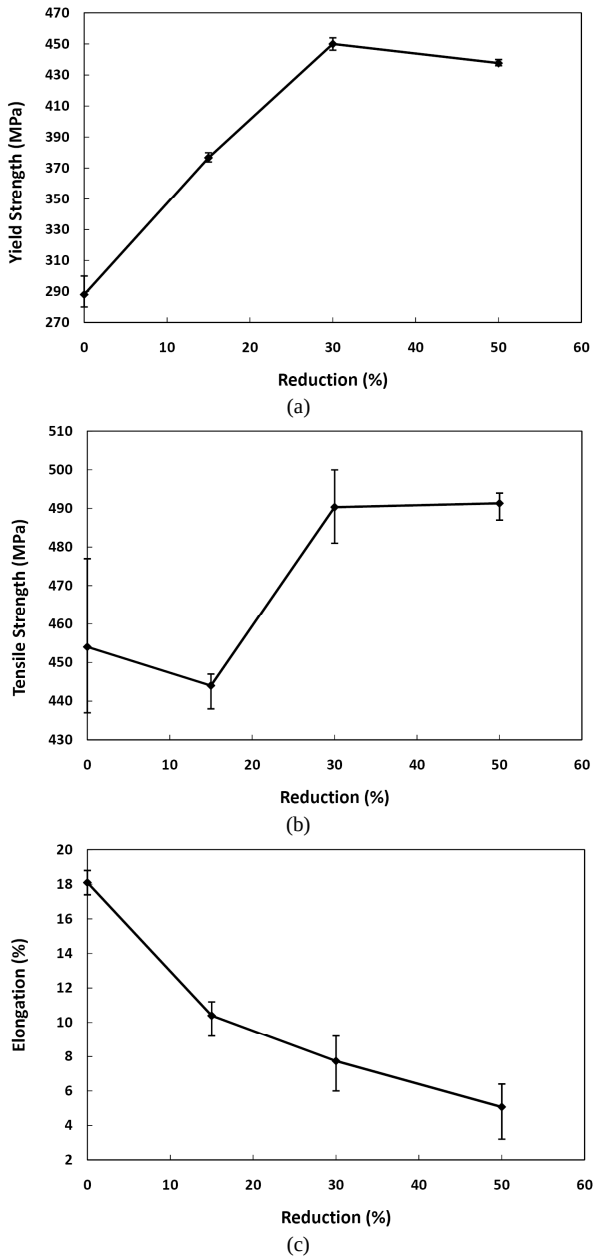


Fig. 5 Tensile properties of T3 by various cold work and T4: a) Yield strength, b) Tensile strength and c) Elongation

شکل 5 خواص کششی نمونه‌های T3 با درصد های مختلف کار سرد و T4؛ a) استحکام تسلیم b) استحکام کششی و c) درصد ازدیاد طول

با توجه به شکل 5 این کاهش استحکام را می‌توان به توزیع نامناسب نابجایی‌ها و درهم‌پیچیدگی‌هاآن‌ها و درنتیجه تجمع رسوبات دربرخی نواحی که منجر به توزیع نامناسب رسوبات شده است، نسبت داد. کاهش مقدار سختی نمونه 50% نورد در نمودار شکل 2 می‌تواند مؤید این مطلب باشد.

شکل 5- c ازدیاد طول نسبی نمونه‌های T4 و T3 شده با درصدهای مختلف نورد را نشان می‌دهد. در نمونه‌های نورد سرد با افزایش کرنش نورد نه تنها هیچ‌گونه افزایش ازدیاد طول مشاهده نمی‌شود، بلکه کاهش می‌یابد. کاهش درصد ازدیاد طول در نمونه‌های T3 نسبت به نمونه T4 به افزایش چگالی نابجایی‌ها در اثر کارسختی مربوط می‌شود. علاوه بر آن رسوبات ایجاد شده در رسوب‌سختی نیز منجر به کاهش نرمی ماده و افت درصد ازدیاد طول نمونه‌ها می‌شود.

برای مقایسه خواص مکانیکی ماده اولیه با نمونه‌هایی که تحت عملیات‌های مکانیکی-حرارتی مختلف قرار گرفته‌اند، نمودارهای مختلف سختی، استحکام تسلیم و نهایی و همچنین درصد ازدیاد طول، در شکل 6 ارائه شده است. در این شکل خواص مکانیکی نمونه اولیه، نمونه T4 شده و همچنین نمونهT3با 30 درصد کاهش سطح مقطع که نسبت به دیگر نمونه‌های T3، از خواص مکانیکی بهتری برخوردار است، مقایسه گردیده است.

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود نمونه T3 از سختی و استحکام بالاتری نسبت به نمونه T4 و ماده اولیه برخوردار است. در طول عملیات محلولی، ذرات فاز ثانویه به‌طور کامل در زمینه آلیاژ حل می‌شوند و در ادامه، کوئنچ کردن نمونه‌ها منجر به ایجاد محلول جامد فوق اشباع در نمونه می‌شود. که پس از عملیات پیرسازی طبیعی در دمای اتاق، منجر به تشکیل رسوبات بسیار ریز با توزیع بسیار مناسب در ریزساختار آلیاژمی‌شود. در نتیجه مقدار سختی در نمونه T4 افزایش می‌یابد (شکل 6- a). از طرفی دیگر ترکیب عملیات حرارتی و مکانیکی منجر به تشکیل رسوبات ریزتر با توزیع بهتری در ریزساختار آلیاژ نسبت به نمونه‌های T4 می‌شود. از آنجا که رسوب‌گذاری دینامیکی در طول نورد سرد اتفاق می‌افتد، اعمال کرنش منجر به خرد شدن رسوبات و تشکیل آنها با اندازه بسیار ریز می‌شود. همچنین انجام 30% کار سرد باعث استحکام‌دهی از طریق کارسختی نیز می‌شود. که این عوامل باعث افزایش قابل توجهی در سختی نمونه T3 می‌شود. با توجه به شکل 3- a، رسوبات تشکیل شده در ریزساختار نمونه اولیه به دلیل درشت بودن، موانع خوبی جهت جلوگیری از حرکت نابجایی‌ها نیستند. در مقابل، رسوبات ریز با توزیع مناسب در ریزساختار نمونه T4 مانع حرکت نابجایی‌ها شده و منجر به افزایش استحکام تسلیم و نهایی می‌شود.

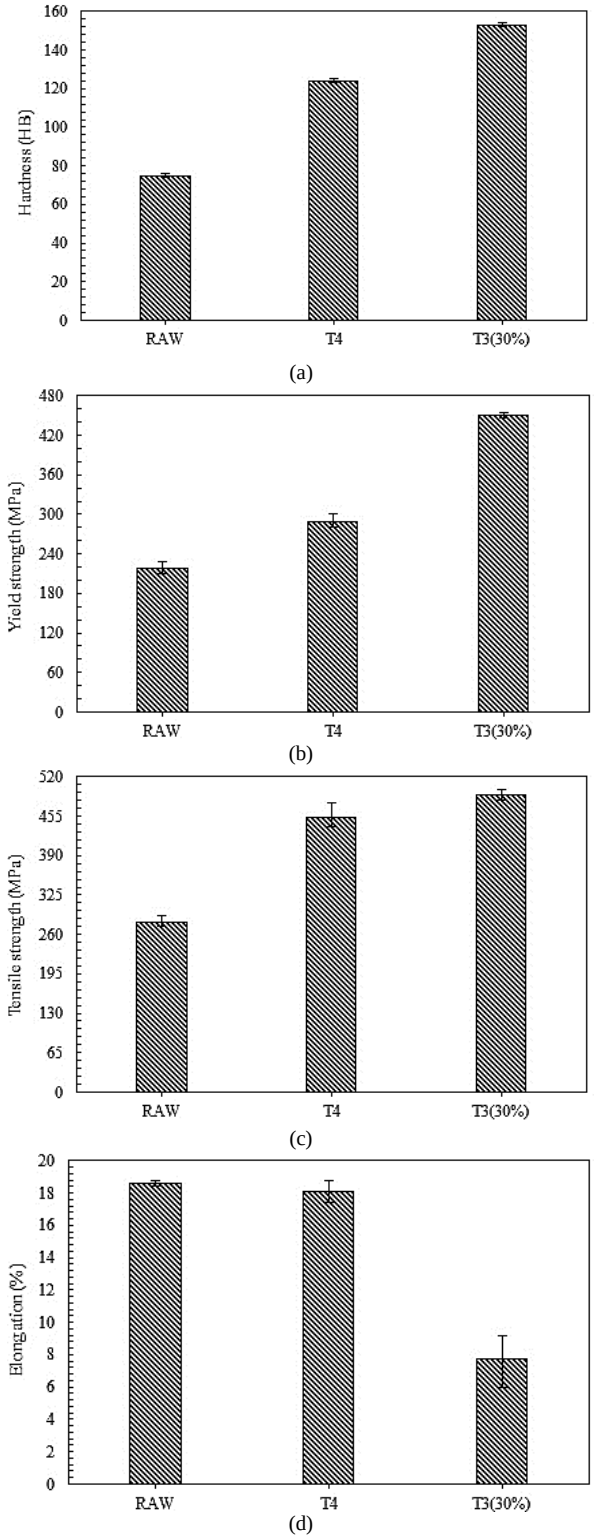


Fig. 6 Mechanical properties of raw material, T4and T3 samples;a) Hardness, b) Yield strength, c) Tensile strength and d) Elongation.

شکل 6 خواص مکانیکی نمونه اولیه، نمونه T4 شده و نمونه T3؛ a) سختی، b) استحکام تسلیم، c) استحکام کششی و d) درصد ازدیاد طول.

پالایش دانه‌ای ایجاد شده در اثر نورد سرد منجر به کاهش مسیر حرکت نابجایی‌ها می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، وجود رسوبات بسیار ریز در نمونه‌های T3 و پدیده کارسختی مانع حرکت نابجایی‌ها می‌شوند که در نتیجه همان‌طور که در شکل 6- b و شکل 6- c مشاهده می‌شود منجر به افزایش چشمگیری در استحکام تسلیم و نهایی شده است.

در نمونه اولیه به دلیل ماهیت عملیات نورد گرم و همچنین عدم برهم‌کنش رسوبات درشت با نابجایی‌ها، درصد ازدیاد طول نسبتاً بالا است. در نمونه T4 به دلیل برهم‌کنش رسوبات ریز با نابجایی‌ها، رسوبات منجر به قفل شدن نابجایی‌ها می‌شوند. اما از طرفی دیگر به دلیل انجام عملیات محلولی در دمای بالا (495°C)، چگالی نابجایی‌ها کاهش یافته و درنتیجه نقش رسوبات در قفل شدن نابجایی‌ها کم رنگ‌تر می‌شود و فقط منجر به کاهش درصد ازدیاد طول نمونه به میزان 0/5 درصد می‌شود. در مقابل، در طول عملیات نورد سرد به دلیل پایین بودن دمای عملیات (25°C)، در نتیجه‌ی کارسختی چگالی نابجایی‌ها به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین رسوبات بسیار ریز نقش مهمی در قفل شدن نابجایی‌ها دارند. از این‌رو درصد ازدیاد طول در نمونه T3، همان‌طور که در شکل 6- d مشاهده می‌شود به شدت کاهش یافته است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر عملیات حرارتی و مکانیکی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم قابل پیرسختی 2024 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج کلی زیر حاصل گردید:

- نمونه‌های T3 شده در تمامی درصدهای کاهش سطح مقطع، سختی و استحکام بالاتری نسبت به نمونه T4 شده و ماده اولیه نشان می‌دهند.

- در بین نمونه‌های T3 شده، بالاترین استحکام و سختی به نمونه‌های 30% نورد سرد شده اختصاص دارد.

- با افزایش بیشتر میزان کار سرد به دلیل توزیع نامناسب رسوبات و همچنین افزایش چگالی نابجایی‌ها و جنگل نابجایی‌ها سختی،استحکام و درصد ازدیاد طول کاهش می‌یابند.

5- تقدیر و تشکر

در انجام این پژوهش از معاونت پژوهشی دانشگاه اراک به دلیل حمایت مالی طبق قرارداد شماره 94/7676، مورخ 1394/11/11 کمال قدردانی و تشکر می‌شود.

6- مراجع

[1] B. Verlinden, P. Wouters, H. J. Mcqueen, E. Aernoudt, L. Delaey, S. Cauwenberg, Effect of Different Homogenization Treatments on the Hot Workability of Aluminium Alloy AA2024 *Materials Science & Engineering*, Vol. A 123, pp. 229-237, 1990 .

[2] A. Naimi ,H. Yousfi, M. Trari, Influence of cold rolling degree and ageing treatments on the precipitation hardening of 2024 and 7075 alloys, *Mech Time-Depend Mater*, Vol. 17, pp. 285-296, 2013 .

[3] X. Xu, Y. Zhao, B. Ma, J. Zhang, M. Zhang, Rapid grain refinement of 2024 Al alloy through recrystallization induced by electropulsing, *Materials Science & Engineering*, Vol. A 216, pp. 223-226, 2014 .

[4] M. Gavgali, B. Aksakal, Effects of various homogenisation treatments on the hot workability of ingot aluminium alloy AA2014, *Materials Science & Engineering*, Vol. 254 A, No. 1, pp. 189-199, 1998 .

[5] S. Cheng, Y. H. Zhao, Y. T. Zho, T. Ma, Optimizing the strength and ductility of fine structured 2024 Al alloy by nano-precipitation, *Acta Materialia*, Vol. 55, No. 17, pp. 5822-5832, 2007 .

[6] M. Weiss, A. S. Taylor, P. Hodgson, N. Stanford, Strength and biaxial formability of cryo-rolled 2024 aluminium subject to concurrent recovery and precipitation, *Acta Materialia*, Vol. 61, No. 14, pp. 5278-5289, 2013 .

[7] M. Mansourinejad, B. Mirzakhani, Influence of sequence of cold working and aging treatment on mechanical behaviour of 6061 aluminum alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 9, pp. 2072-2079, 2012 .

[8] Y. L. Zhao, Z. Q. Yang, Z. Zhang, G. Y. Su, X. L. Ma, Double-peak age strengthening of cold-worked 2024 aluminum alloy, *Acta Materialia*, Vol. 61, No. 5, pp. 1624-1638, 2013 .