

Research Paper

Fatigue Strength of Aluminum 2024 after Sub Zero Treatment

Hadi Nazarian¹, *Seyed Ebrahim Vahdat²

1- Department of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

Citation: Nazarian H, Vahdat S. E. Fatigue Strength of Aluminum 2024 after Sub Zero Treatment. Metallurgical Engineering 2018; 20(4): 311-321 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.70410.1150>

doi : <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.70410.1150>

ABSTRACT

Challenge of change of alloy properties during service life of extra safety parts was always considered by industrialists and consequently researchers. Fuselage and wings of airplane repeatedly in ascent and descent is affected respectively by cooling to -55 °C and heating to environment temperature. Hence, the effect of above temperature changes on tensile and fatigue properties is unknown. In this study in laboratory, the situation of airplane body working is simulated and then the changes of microstructure and consequently the changes of tensile properties and hardness after holding for 10 and 4 hours were studied respectively in temperature -60 and -196 °C. Results showed that by using of sub-zero treatment, hardness is without change but tensile properties are increased to control sample and when the cooling rate was low (less than 1 degree per minute), more improvement will be achieved in tensile properties. While results showed that by using of sub-zero treatment, fatigue strength is decreased at least 20% to control sample

Keywords: Population density of particles; Liquid nitrogen; Sub-Zero treatment; Fatigue limit.

■.....■

*** Corresponding Author:**

Seyed Ebrahim Vahdat, MSc

Address: Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran

Tel: +98 (11) 43217129

E-mail: e.vahdat@iauamol.ac.ir

استحکام خستگی آلومینیم ۲۰۲۴ بعد از عملیات زیر صفر

هادی نظریان^۱، سید ابراهیم وحدت^۲

۱- دانشکده مهندسی، واحد جنوب تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

چکیده

چالش تغییر خواص آلیاژ در حین استفاده از قطعات فوق ایمنی همواره مدنظر صنعتگران و به تبع آن، پژوهشگران بوده است. بدنه هواپیمای مسافربری (از جنس آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴) به کرات در صعود و فرود به ترتیب تحت تأثیر سرمایش تا دمای ۵۵- درجه سانتی گراد و گرمایش تا دمای محیط قرار می گیرد. منتهی تأثیر تغییرات دمایی فوق روی خواص کششی و مقاومت خستگی نامعلوم است. در این پژوهش در آزمایشگاه، شرایط کار آلیاژ بدنه هواپیما شبیه سازی شده و سپس تغییرات ریزساختار و به تبع آن، تغییرات مقاومت کششی و سختی پس از نگهداری به مدت ۱۰ و ۴ ساعت به ترتیب در دماهای ۶۰- و ۱۹۶- درجه سانتی گراد مطالعه شده است. نتایج نشان داده است که با انجام عملیات زیرصفر، سختی تقریباً بدون تغییر است اما خواص کششی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته و زمانی که سرعت سرد کردن آهسته (کمتر از ۱ درجه در دقیقه) بوده است بهبودی بیشتری در خواص کششی حاصل شده است. در حالی که، با انجام عملیات زیرصفر، مقاومت خستگی نمونه های زیرصفر شده نسبت به نمونه شاهد، حداقل ۲۰ درصد کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: چگالی تعداد ذرات؛ نیتروژن مایع؛ عملیات زیرصفر؛ حد خستگی

۱. مقدمه

چالش تغییر خواص آلیاژ در حین استفاده از قطعات فوق ایمنی گران همواره مدنظر صنعتگران و به تبع آن، پژوهشگران بوده است. زیرا، پس از کنترل کیفیت قطعات فوق ایمنی چنانچه تغییر خواص آلیاژ با افت همراه باشد منجر به شکست یا انهدام زودرس و بعضاً نابهنگام می شود (۱).

بدنه هواپیماهای مسافربری از جنس آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ و یا آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ است. هر دو آلیاژ، قابل پیرسختی بوده و پس از پیرسختی، استحکام تسلیم آن ها تا ۴ برابر افزایش می یابد. در این شرایط، چگالی بسیار کم آلیاژهای نامبرده موجب می شود که استحکام ویژه این آلیاژها از مستحکم ترین فولادها فرونی یافته و لذا این آلیاژهای نسبتاً ارزان را برای کاربردهای عمومی در هوا-فضا بی رقیب می سازد (۲).

مطالعات روی آلیاژهای آلومینیم نشان داده است که نگهداری در سرمایش و سپس گرمایش موجب تغییر ریزساختار و در نهایت تغییر خواص خواهد شد. به طور مثال، نایان و همکاران (۳، ۴) بهبود خواص کششی آلیاژ آلومینیم ۲۱۹۵ را پس از قرارگیری در دماهای بسیار پایین (تا ۲۵۳-)

درجه سانتی گراد) گزارش کرده اند. همچنین، لی و همکاران (۵) بهبود استحکام و ریزدانه شدن آلیاژ آلومینیم گروه ۵۰۰۰ را پس از نگهداری در دمای ۱۹۶- درجه سانتی گراد گزارش کرده اند.

از طرف دیگر، در صورتی که تا دمای زیرصفر، سرعت خنک کاری بسیار آهسته (کمتر از ۱ درجه سانتی گراد در دقیقه) باشد نتایج از بهبود مقاومت خستگی و افزایش مقاومت کششی فولادها حکایت می کند (۶، ۷) در حالی که در سرعت های خنک کاری بالا (بیش از ۳ درجه سانتی گراد در دقیقه) نتایج از کاهش مقاومت کششی و افت مقاومت خستگی حکایت می کند (۸). دلیل بهبود خواص فوق به رسوب ذرات کاربید جدید بسیار ریز و پراکنده در زمینه فولاد و همچنین، کاهش تنش های پسماند در ریزساختار فولاد (در سرعت های خنک کاری پایین) نسبت داده شده است. در حالی که کاهش خواص فوق به تشکیل ترکه های زیر میکروسکوپی (در سرعت های خنک کاری بالا) نسبت داده شده است.

به این ترتیب، پس از اوج گیری هواپیما، دمای بسیار پایین (حدود ۵۵- درجه سانتی گراد) در مدت زمان پرواز و

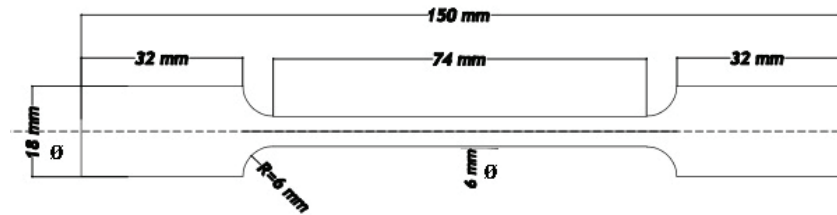
* نویسنده مسئول:

مهندس سید ابراهیم وحدت

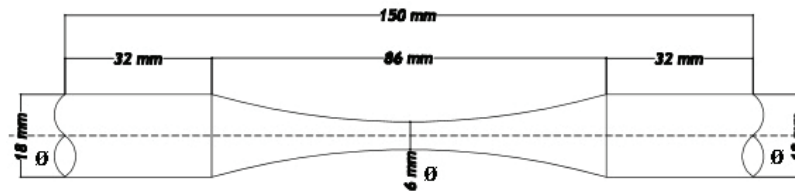
نشانی: آمل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت الله آملی، دانشکده مهندسی.

تلفن: ۴۳۲۱۷۱۲۹ (۱۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: e.vahdat@iaumol.ac.ir



الف-شکل و ابعاد نمونه کشش



ب-شکل و ابعاد نمونه خستگی

شکل ۱. شکل و ابعاد نمونه آزمون الف-کشش، ب-خستگی

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ مورد استفاده در پژوهش

نام عنصر	آلومینیم	سیلیسیم	مس	سرب	وانادیم	بور	منیزیم	آهن	روی	منگنز
درصد وزنی	بقیه	۰/۱۴	۴/۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۱/۴	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۴۳

۲. مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، از سه عدد نمونه به قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر برای مطالعه ریزساختار و سختی و از دوازده عدد نمونه آزمون کشش به ابعاد نمایش داده شده در شکل ۱ الف استفاده شد. برای انجام آزمون خستگی برای هر دسته از ۱۲ عدد نمونه مطابق شکل ۱ ب استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ مورد استفاده در پژوهش، مطابق جدول ۱ آورده شده است. چهار عدد نمونه کشش و یک عدد نمونه ریزساختار به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد.

برای مطالعه ریزساختار از میکروسکوپ الکترونی روبشی با تفنگ میدان نوری (Field Emission gun Scanning Electron Microscopy= FESEM) با نام تجاری TESCAN MIRA3 و همچنین میکروسکوپ الکترونی روبشی عبوری (Scanning Transmission Electron Microscopy= STEM) با نام تجاری TITAN^۱ با قدرت ۳۰۰ کیلوولت (هر دو مجهز به طیف سنج تفکیک انرژی (Energy Dispersive Spectroscopy= EDS) استفاده شد. برای اندازه‌گیری مقاومت کششی از دستگاه GOTECH 7100L و برای سختی سنجی از فرورونده هرم الماسه با نیروی ۱۰ کیلوگرم و زمان ۱۰ ثانیه استفاده شد. آزمون خستگی با دستگاه خستگی SFT-850 شرکت سنتام انجام شد. برای تأمین صحت و دقت نتایج از مراکز آزمایشگاهی معتبر (مورد تأیید موسسه استاندارد ایران) استفاده شد.

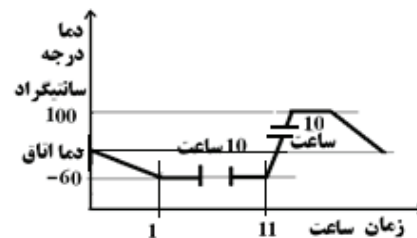
سپس، دمای محیط در فرود موجب تغییر ریزساختار آلیاژ بدنه هواپیما می‌شود که تغییر خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ را به همراه دارد. بنابراین، در این پژوهش، هدف اصلی، پاسخ به این سؤال است که اثر سرمایش و گرمایش به ترتیب به‌هنگام اوج‌گیری در طول پرواز و به‌هنگام توقف در آشیانه، روی مقاومت خستگی و مقاومت کششی و سختی جنس آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ مورد استفاده در بدنه هواپیماهای مسافربری چگونه است؟

مطالعات زیادی روی استفاده از دماهای پایین به‌منظور بهبود فرآیند شکل‌دهی آلیاژهای آلومینیم گروه ۱۰۰۰ (۹) و ۲۰۰۰ (۱۰) و ۵۰۰۰ (۱۱، ۱۲) و ۶۰۰۰ (۱۳) و ۷۰۰۰ (۱۴) انجام شده است. در حالی که، بدنه هواپیما به‌کرات در صعود و فرود به ترتیب تحت تأثیر سرمایش تا دمای ۵۵- درجه سانتی‌گراد و گرمایش تا دمای محیط قرار می‌گیرد. منتهی تأثیر تغییرات دمایی فوق‌روی سختی، مقاومت کششی و مقاومت خستگی نامعلوم است. در این پژوهش در آزمایشگاه، شرایط کار آلیاژ بدنه هواپیما از جنس آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ شبیه‌سازی شده و سپس تغییرات ریزساختار و به‌تبع آن، تغییرات مقاومت خستگی و مقاومت کششی و سختی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ که با نرخ‌های متفاوت سرد شده است پس از نگهداری به مدت ۱۰ و ۴ ساعت به ترتیب در دماهای زیرصفر ۶۰- و ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد مطالعه می‌شود.

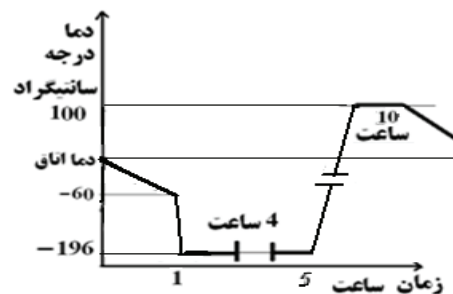
1. Material Science and Biomaterials Department, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland



شکل ۲. دستگاه عملیات زیرصفر ساخت دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت الله املی



الف-عملیات زیرصفر در دمای -۶۰- درجه سانتی گراد برای گروه ۱



ب-عملیات زیرصفر در دمای -۱۹۶- درجه سانتی گراد (نیتروزن مایع) برای گروه ۲
شکل ۳. چرخه عملیات حرارتی الف-عملیات زیرصفر در دمای -۶۰- درجه سانتی گراد برای گروه ۱
ب-عملیات زیرصفر در دمای -۱۹۶- درجه سانتی گراد برای گروه ۲

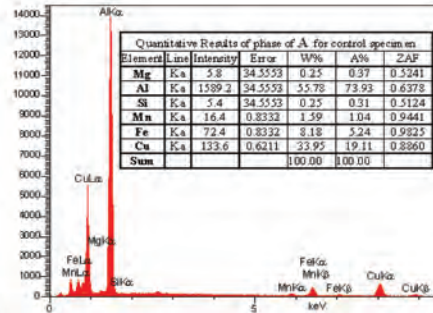
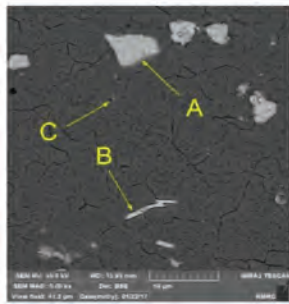
شکل ۴. نمودار گردش کار روش تحقیق

۱۹۶- درجه سانتی گراد، به مدت ۴ ساعت غوطه‌ور شد (گروه ۲). باقیمانده نمونه‌ها (گروه ۱) در مخزن فوقانی شامل ۱۲ نمونه خستگی، ۴ نمونه کشش و ۱ نمونه ریزساختار، به مدت ۱۰ ساعت در همین دما (-۶۰- درجه سانتی گراد) نگهداری شد. پس از اتمام عملیات، نمونه‌ها از مخزن خارج شده و در هوا به دمای اتاق رسیدند.

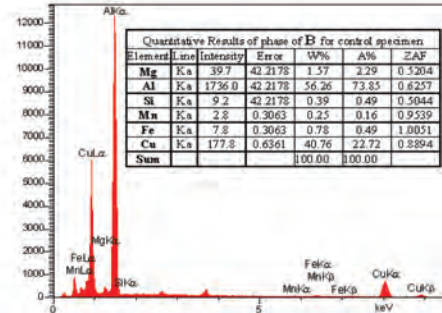
آلیاژ آلومینیم، آلیاژی است که در طولانی مدت حتی در دمای اتاق پیرسازی^۲ می‌شود به همین منظور، آخرین مرحله، عملیات برگشت است. برای انجام عملیات برگشت، فقط نمونه‌های زیرصفر شده (گروه ۱ و گروه ۲) در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد (دما هنگام شستشو بدنه هواپیما و توقف در آشیانه) به مدت ده ساعت قرار داده شدند. چرخه^۳ عملیات حرارتی روش تحقیق در شکل ۳ و گردش کار^۴ آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

برای عملیات زیرصفر، مطابق شکل ۲، ابتدا در مخزن پایینی دستگاه، بیست لیتر نیتروزن مایع ریخته شد. سپس ۲۴ نمونه خستگی، ۸ نمونه کشش و ۲ نمونه آزمون ریزساختار در مخزن بالایی قرار داده شد تا با سرعت ۱ درجه سانتی گراد در دقیقه تا دمای -۶۰- درجه سانتی گراد سرد شود. سپس، بلافاصله، ۱۲ نمونه خستگی، ۴ نمونه کشش و ۱ نمونه ریزساختار از طریق دریچه تعبیه شده در مخزن بالایی به داخل مخزن پایینی، حاوی نیتروزن مایع خالص با دمای

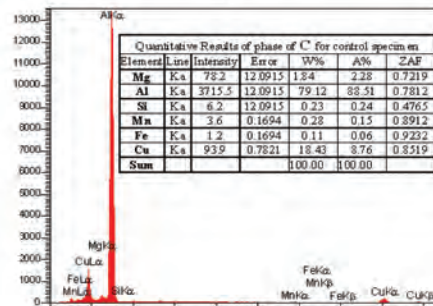
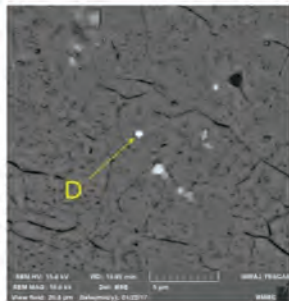
2. Aging
3. Cycle
4. Flow chart



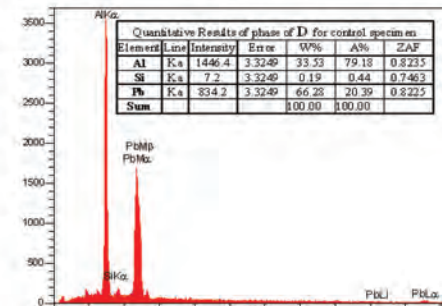
(a)



(b)

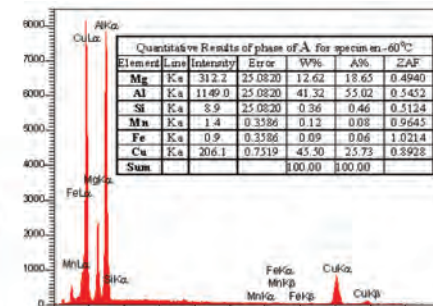
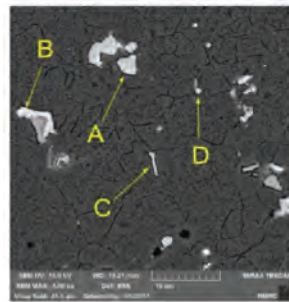


(c)

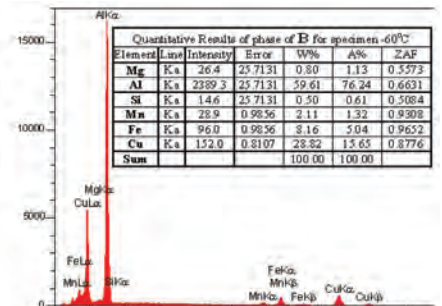


(d)

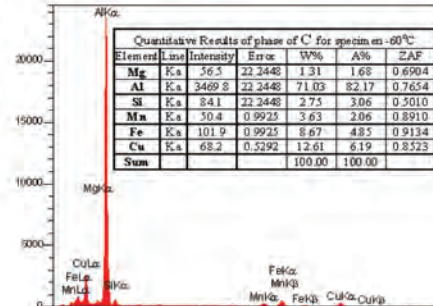
شکل ۵. EDS ذرات در نمونه شاهد



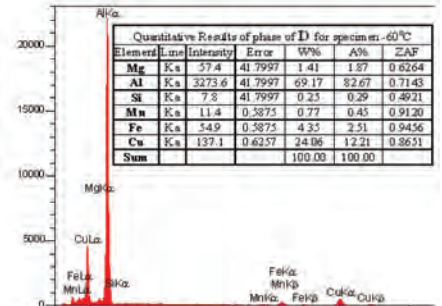
(a)



(b)



(c)



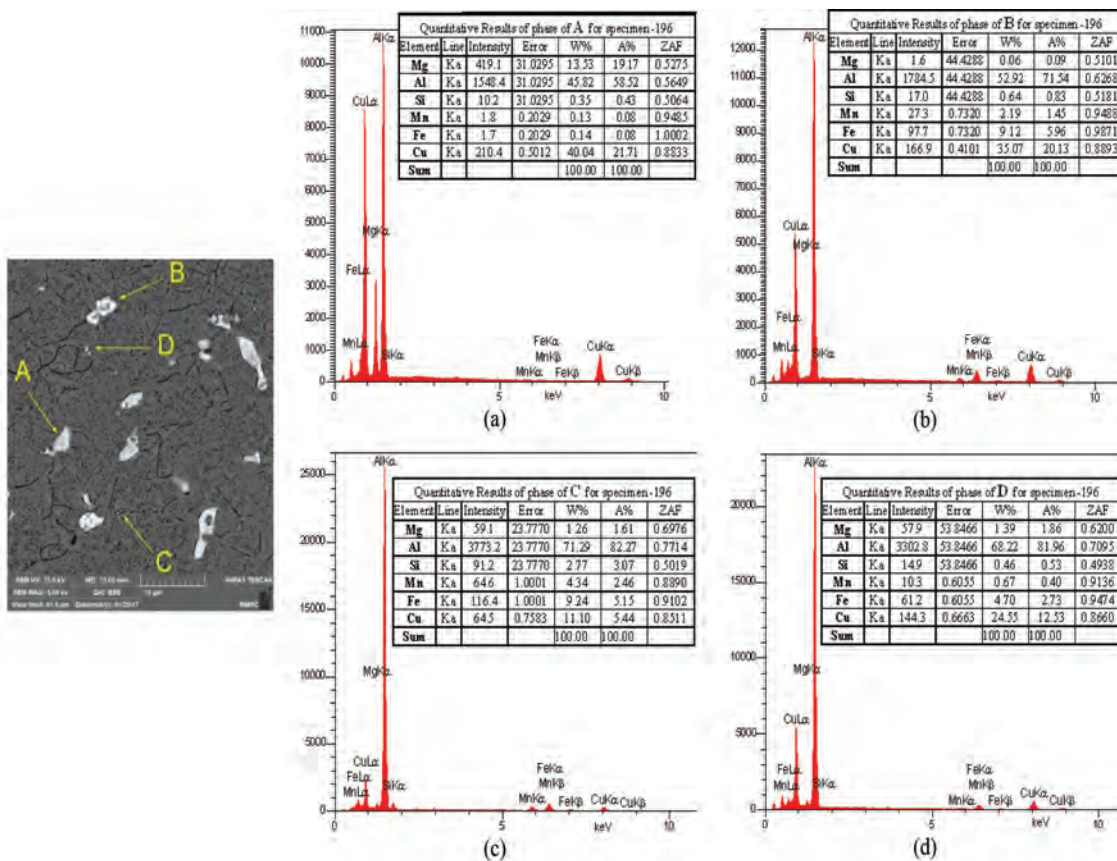
(d)

شکل ۶. EDS ذرات در گروه ۱

۳. نتایج و بحث

آلومینیم و سیلیسیم است درحالی که ذرات روشن شامل ذره D غنی از عناصر به نسبت سنگین مانند سرب است. ترکیب Al_2Cu شامل ۳۳/۳ درصد اتمی مس و بقیه آلومینیم می شود درحالی که ذرات A,B,C ذرات غنی از مس بین ۹ تا ۲۳ درصد اتمی هستند بنابراین این ذرات ترکیبات میانی Al_2Cu هستند.

با کمک EDS ترکیب شیمیایی ذرات در نمونه شاهد، گروه ۱ و گروه ۲ به ترتیب شکل ۵، شکل ۶ و شکل ۷ به نمایش گذاشته شده است. در نمونه شاهد (شکل ۵)، مشاهده می شود ذرات تیره شامل ذرات A,B,C غنی از عناصر به نسبت سبک مانند



شکل ۷. EDS ذرات در گروه ۲

جدول ۲. میانگین نتایج اندازه دانه، چگالی تعداد ذرات، سختی نسبی، استحکام تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول نسبی تمام نمونه‌ها

نمونه	اندازه دانه میکرومتر	چگالی تعداد ذرات mm^{-2}	سختی ویکرز $\pm 3\%$	ازدیاد طول نسبی درصد $\pm 10\%$	استحکام تسلیم مگاپاسکال $\pm 5\%$	استحکام کششی مگاپاسکال $\pm 3\%$	حداقل حد خستگی مگاپاسکال	استحکام کششی بر حد خستگی
شاهد	۳/۸ \pm ۰.۳	۵۵۴۷	۱۲۸	۴/۰	۳۶۶	۴۳۷	۱۸۵	۰/۴۲
گروه ۱	۳/۳ \pm ۰.۳	۶۹۳۴	۱۲۶	۵/۵	۳۹۰	۴۶۲	۱۳۷	۰/۳۰
گروه ۲	۳/۳ \pm ۱.۰	۷۸۵۸	۱۲۷	۵/۰	۳۹۸	۴۶۳	۱۴۷	۰/۳۲

در نمودار فازی آلومینیم-سرب، سرب و آلومینیم ترکیب یا محلولی با هم تشکیل نمی‌دهند لذا ذره D سرب خالص است منتهی آلومینیم موجود در EDS آن از زمینه ناشی می‌شود و متعلق به ذره نیست.

در گروه ۱ (شکل ۶)، مشاهده می‌شود ذرات تیره شامل ذرات A, B, C, D غنی از عناصر به نسبت سبک مانند آلومینیم و منیزیم (به‌ویژه برای ذره A) است. ترکیب Al_2Cu شامل ۳۳/۳ درصد اتمی مس و بقیه آلومینیم می‌شود درحالی‌که ذرات A, B, C, D از مس بین ۵/۵ تا ۲۲ درصد اتمی هستند بنابراین این ذرات ترکیبات میانی $\text{AlCu}_x\text{Mg}_y\text{Si}_z$ هستند. در ذرات B, C, D ناخالصی آهن تا ۶ درصد اتمی وجود دارد درحالی‌که ذره A تقریباً فاقد ناخالصی و حاوی حدود ۵۸/۵ درصد اتمی آلومینیم و ۲۲ درصد اتمی مس و ۱۹

در گروه ۲ (شکل ۷)، مشاهده می‌شود ذرات تیره شامل ذرات A, B, C, D غنی از عناصر به نسبت سبک مانند آلومینیم و منیزیم (به‌ویژه برای ذره A) است. ترکیب $\text{AlCu}_x\text{Mg}_y\text{Si}_z$ شامل ۳۳/۳ درصد اتمی مس و بقیه آلومینیم می‌شود درحالی‌که ذرات A, B, C, D از مس بین ۶ تا ۲۶ درصد اتمی هستند بنابراین این ذرات ترکیبات میانی $\text{AlCu}_x\text{Mg}_y\text{Si}_z$ هستند. در ذرات B, C, D ناخالصی آهن تا ۵ درصد اتمی وجود دارد درحالی‌که ذره A فاقد ناخالصی و حاوی حدود ۵۵ درصد

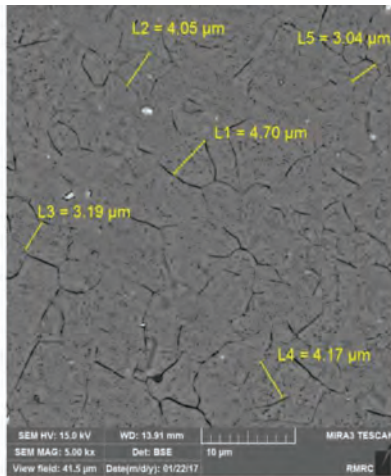
ازدیاد طول نسبی، استحکام تسلیم و استحکام کششی آلیاژ آلومینیم ۲۱۹۵ را به ترتیب ۲ درصد، ۴۵ مگاپاسکال و ۷۹ مگاپاسکال نسبت به دمای محیط افزایش می‌دهد و همچنین، دمای ۲۵۳- درجه سانتی‌گراد ازدیاد طول نسبی، استحکام تسلیم و استحکام کششی آلیاژ آلومینیم ۲۱۹۵ را به ترتیب ۲ درصد، ۹۳ مگاپاسکال و ۱۳۹ مگاپاسکال نسبت به دمای محیط افزایش می‌دهد. مطالعات میکروسکوپ الکترونی عبوری آن‌ها نشان داد که تشکیل رسوبات صفحه‌ای شکل جدید Al_2CuLi با همان ساختار زمینه آلومینیم که روی خانواده صفحات {۱۱۱} رسوب کرده‌اند عامل این بهبودی هستند.

در پژوهش حاضر، استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه گروه ۱ (۶۰- درجه سانتی‌گراد) نسبت به نمونه گروه ۲

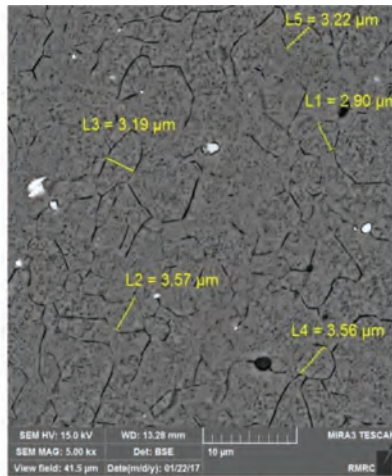
درصد اتمی منیزیم است به این ترتیب ترکیب شیمیایی ذره A به صورت Al_3CuMg است.

میانگین نتایج اندازه دانه، چگالی تعداد ذرات، سختی سنجی و آزمون کشش در جدول ۲ فهرست شده است. تصاویر اندازه دانه و چگالی تعداد ذرات به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۹ نمایش داده شده است.

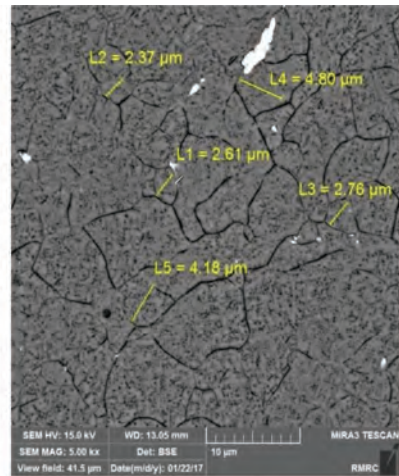
مطابق جدول ۲، در این پژوهش، با انجام عملیات زیرصفر در دمای ۶۰- درجه سانتی‌گراد (گروه ۱) و ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد (گروه ۲)، ازدیاد طول نسبی، استحکام تسلیم و استحکام کششی نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۵/۱ و ۱ درصد، ۲۴ و ۳۲ مگاپاسکال و ۲۵ و ۲۶ مگاپاسکال افزایش پیدا کرد. نتایج حاضر در تطابق با نتایج نایان و همکاران (۳)، است. آن‌ها دریافتند که دمای ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد



شاهد، میانگین اندازه دانه ۳/۸ میکرومتر

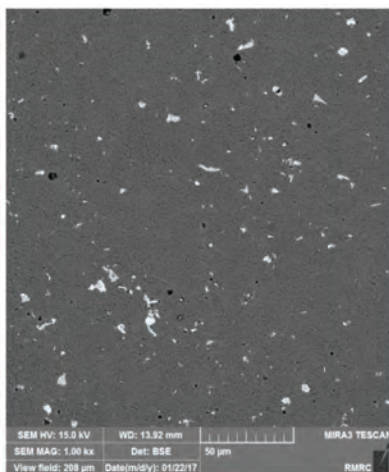


گروه ۱، میانگین اندازه دانه ۳/۳ میکرومتر



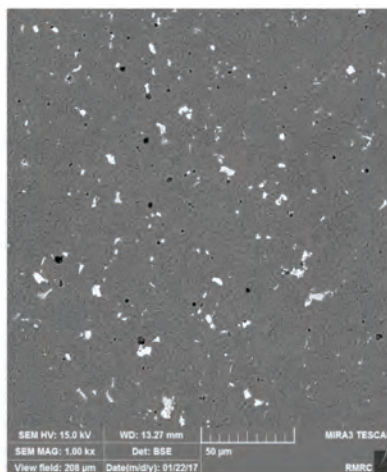
گروه ۲، میانگین اندازه دانه ۳/۳ میکرومتر

شکل ۸. مقایسه اندازه دانه در تمام نمونه‌ها



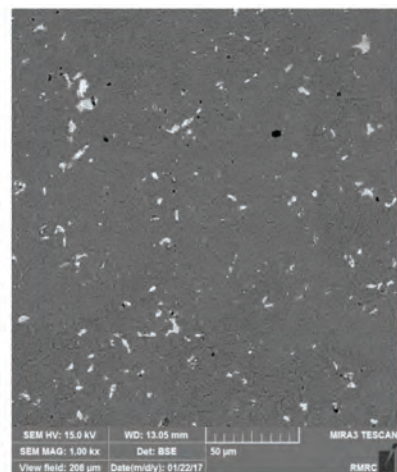
FESEM

الف-شاهد، میانگین چگالی تعداد ذرات ۵۵۴۷ بر میلی‌متر مربع



FESEM

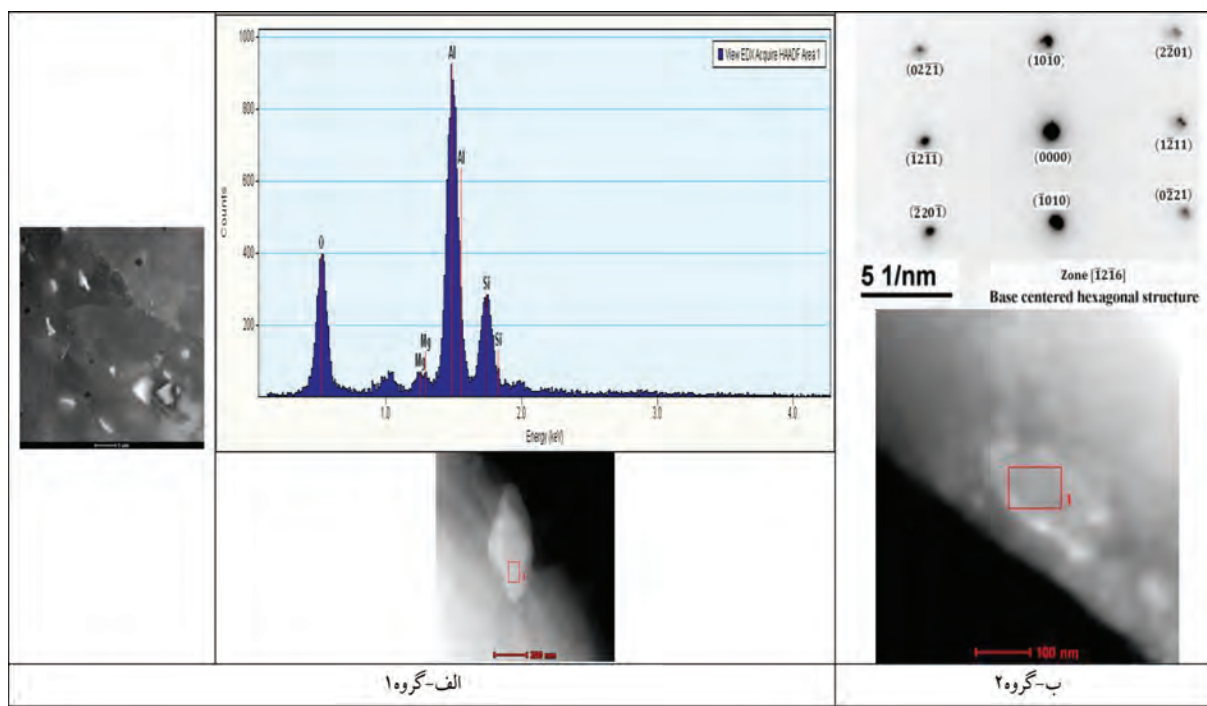
ب-گروه ۱، میانگین چگالی تعداد ذرات ۶۹۳۴ بر میلی‌متر مربع



FESEM

پ-گروه ۲، میانگین چگالی تعداد ذرات ۷۸۵۸ بر میلی‌متر مربع

شکل ۹. مقایسه چگالی تعداد ذرات در تمام نمونه‌ها



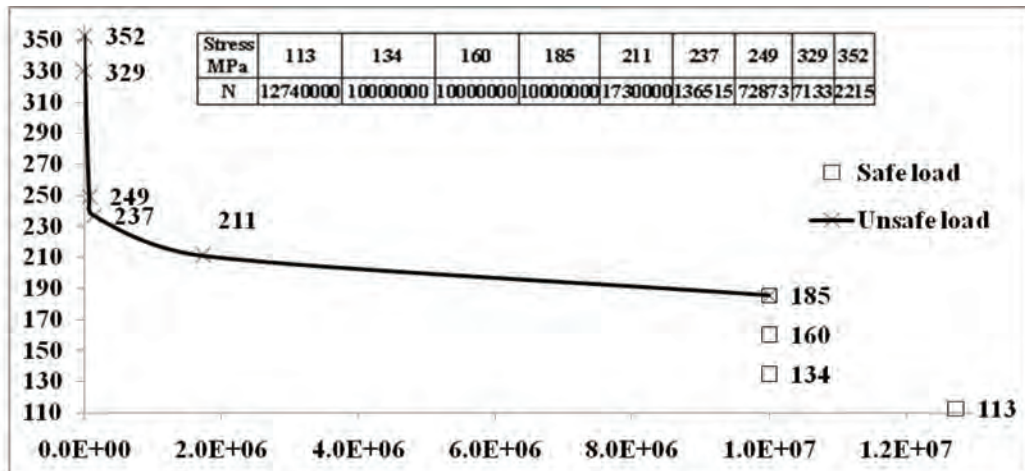
شکل ۱۰. تصویر STEM از ذرات نمونه الف-گروه ۱ و ب-گروه ۲

می‌دهد که نتیجه آن بهبود در استحکام است. در این پژوهش، در تمام نمونه‌ها، سختی تغییر محسوسی نکرده است زیرا مطابق شکل ۹ و شکل ۱۰، ذراتی که با انجام عملیات زیرصفر تشکیل شده‌اند ترکیبات انتقالی $\text{AlCu}_x\text{Mg}_y\text{Si}_z$ با ساختار هگزاگونال باقاعده مرکزدار با اندازه بسیار ریز (کمتر از یک میکرومتر) هستند که بیشتر استحکام تسلیم و کمتر استحکام کششی را افزایش می‌دهند و روی سختی بی‌تأثیر هستند.

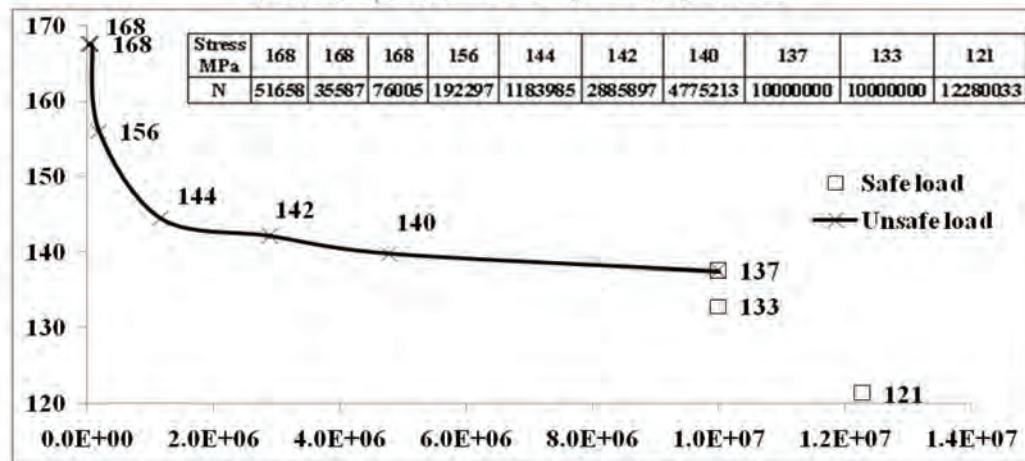
مطابق شکل ۱۱ الف، شکل ۱۱ ب و شکل ۱۱ ج به ترتیب منحنی‌های تنش-چرخه خستگی نمونه شاهد، گروه ۱ و گروه ۲، حد خستگی نمونه شاهد، گروه ۱ و گروه ۲ به ترتیب برابر با ۱۸۵ مگاپاسکال، ۱۳۷ مگاپاسکال و ۱۴۷ مگاپاسکال است. به این ترتیب، به‌طور قاطع می‌توان گفت حد خستگی نمونه‌ها پس از عملیات زیر صفر کاهش می‌یابد. در حالی که با انجام عملیات زیر صفر، استحکام حداقل ۶ درصد افزایش یافته است بنابراین انتظار می‌رود حدخستگی نمونه‌های زیر صفر شده بیشتر از نمونه شاهد باشد. دلیل این تناقص را می‌توان به حساسیت بیشتر حدخستگی نسبت به استحکام به وجود ترک‌های ریز میکروسکوپی (بر اثر قرارگیری در دمای زیر صفر) نسبت داد. اگرچه تشکیل احتمالی ترک‌های ریز میکروسکوپی در نمونه‌های زیر صفر شده موجب کاهش استحکام می‌شود اما افزایش حداقل ۲۵ درصدی چگالی تعداد ذرات (که استحکام دهنده آلیاژ هستند) در زمینه نمونه‌های زیر صفر شده بر آن غالب شده و

(۱۹۶- درجه سانتی‌گراد) تقریباً یکسان هستند زیرا افزایش استحکام، بسیار جزئی (کمتر از ۳ درصد) است. درحالی‌که، ازدیاد طول نسبی ۰/۵ درصد کاهش دارد. درحالی‌که در پژوهش نایان (۳، ۴) وقتی دمای زیرصفر از ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد به ۲۵۳- درجه سانتی‌گراد می‌رسد ازدیاد طول نسبی بدون تغییر اما استحکام تسلیم و استحکام کششی به ترتیب ۴۸ مگاپاسکال و ۶۰ مگاپاسکال افزایش نشان می‌دهد. دلیل این تفاوت در سرعت سرد شدن است. مطابق شکل ۴ ب، در پژوهش حاضر، نمونه گروه ۲ از دمای ۶۰- درجه سانتی‌گراد تا دمای ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد به یک‌باره سرد شده است که می‌تواند منشأ تشکیل ترک‌های میکروسکوپی باشد درحالی‌که در پژوهش نایان و همکاران (۳، ۴) هیچ اشاره‌ای به سرعت سرد شدن نشده است اما حدس زده می‌شود سرعت سرد شدن بسیار آهسته (کمتر از ۱ درجه در دقیقه) بوده است.

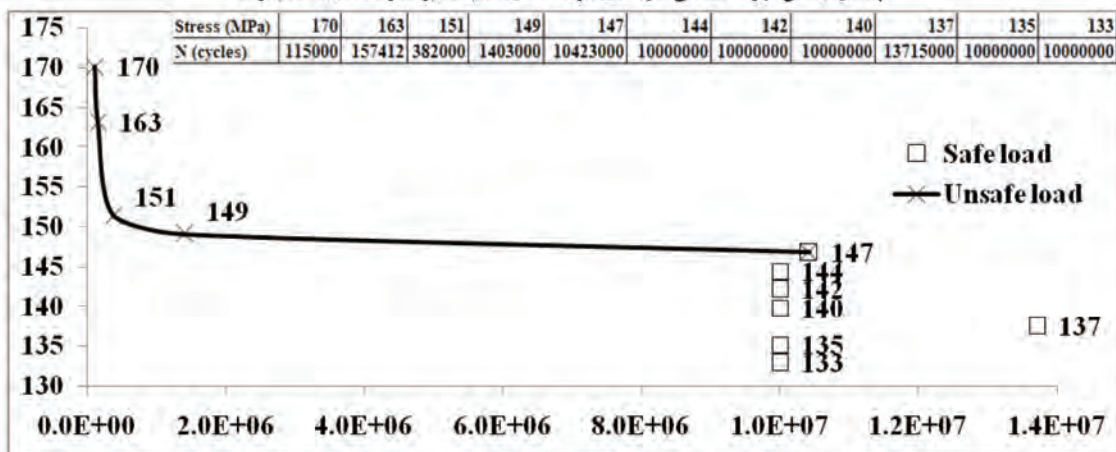
مطابق جدول ۲، افزایش خواص کششی نمونه‌های زیرصفر شده (گروه ۱ و گروه ۲) نسبت به نمونه شاهد به کوچک‌تر شدن اندازه دانه (از ۳/۸ میکرومتر به ۳/۳ میکرومتر) و از طرف دیگر، به زیاد شدن چگالی تعداد ذرات (از ۵۵۴۷ به ۷۸۵۸ ذره در هر میلی‌متر مربع) نسبت داده می‌شود. یافته فوق در تطابق با یافته لی و همکاران (۵) است. آن‌ها دریافتند که عملیات زیرصفر در دمای ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد تا مدت ۴۸ ساعت، دانه بندی آلیاژ آلومینیم-روی-منیزیم-مس را ریز می‌کند و نانو ذرات تا اندازه ۴۰ نانومتر در ریزساختار تشکیل



الف: نمودار تنش-چرخه خستگی نمونه های شاهد (بدون انجام عملیات زیر صفر)



ب: نمودار تنش-چرخه خستگی نمونه های گروه ۱ (دمای عملیات زیر صفر ۶۰- درجه سانتیگراد)

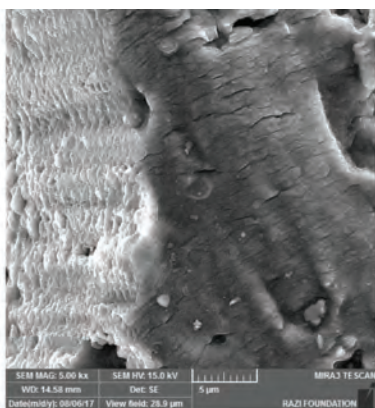


ج: نمودار تنش-چرخه خستگی نمونه های گروه ۲ (دمای عملیات زیر صفر ۱۹۶- درجه سانتیگراد)

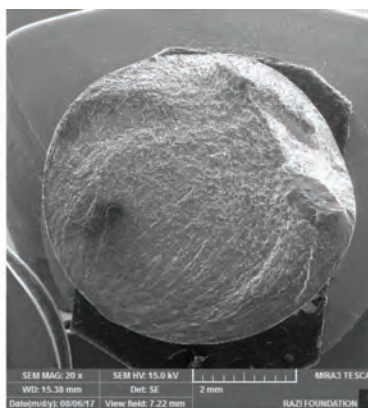
شکل ۱۱. منحنی های خستگی نمونه های الف-شاهد، ب-گروه ۱، ج-گروه ۲

استحکام دهنده آلیاژ در نمونه های زیر صفر شده غالب شده است و موجب شده است تا حدخستگی نمونه های زیر صفر شده نسبت به نمونه شاهد حداقل ۲۰ درصد کاهش یابد. همین طور با افزایش دمای زیر صفر از ۶۰- به ۱۹۶- درجه سانتیگراد (به ترتیب نمونه های گروه ۱ و گروه ۲)

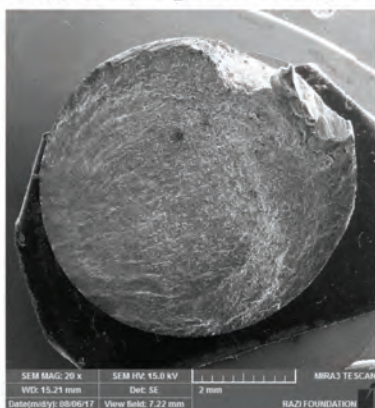
مجموعاً موجب افزایش حداقل ۶ درصدی استحکام می شود. اما در ارتباط با حدخستگی باید گفت: حدخستگی حساسیت بیشتری نسبت به وجود ترک های ریز میکروسکوپی دارد لذا اثر تشکیل ترک های ریز میکروسکوپی در نمونه های زیر صفر شده بر اثر افزایش حداقل ۲۵ درصدی چگالی تعداد ذرات



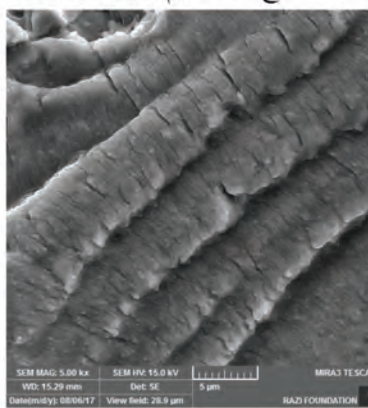
۱۲ت: فاصله خطوط شکست خستگی حدود ۱ میکرومتر، نمونه گروه ۱



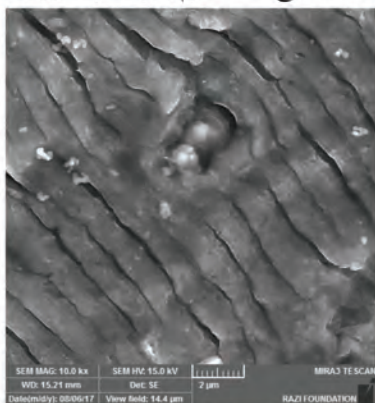
۱۲الف: سطح شکست نرم و ترد، نمونه شاهد



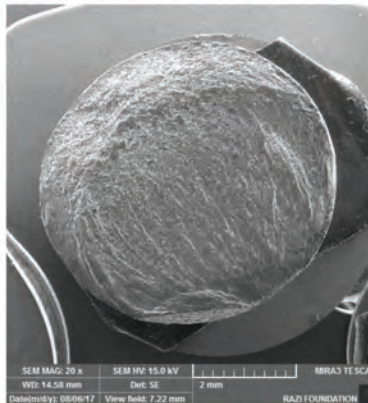
۱۲ث: سطح شکست نرم و ترد، نمونه گروه ۲



۱۲ب: فاصله خطوط شکست خستگی حدود ۵ میکرومتر، نمونه شاهد



۱۲ج: فاصله خطوط شکست خستگی حدود ۱ میکرومتر، نمونه گروه ۲



۱۲پ: سطح شکست نرم و ترد، نمونه گروه ۱

شکل ۱۲. سطح شکست خستگی، الف و ب: نمونه شاهد، پ و ت: نمونه گروه ۱، ث و ج: نمونه گروه ۲

دو، موجب افزایش جزئی حدخستگی از ۱۳۷ مگاپاسکال به ۱۴۷ مگاپاسکال (۷ درصد) در نمونه گروه ۲ نسبت به نمونه گروه ۱ شده است.

تصویر سطح شکست نمونه‌های شاهد، گروه ۱ و گروه ۲ به ترتیب در شکل‌های ۱۲ الف و ب، ۱۲ پ و ت و ۱۲ ث و ج به نمایش گذاشته شده است. در تصویر، سطح شکست ترد نسبتاً تخت (هموار) بوده درحالی که سطح شکست نرم (آخرین مرحله شکست)، ناهموار (غیرتخت) است.

حدخستگی به مقدار جزئی ۱۰ مگاپاسکال (۷ درصد) افزایش یافته است. دلیل این بهبودی را می‌توان این‌گونه توصیف کرد: با انجام عملیات زیر صفر ترک‌های ریز میکروسکوپی تشکیل شده‌اند اما با کاهش دما از ۶۰- به ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد رشد نکرده‌اند (اما ممکن است بیشتر شده باشند زیرا نمونه گروه ۲، سریع سرد شده است) درحالی که با کاهش دما از ۶۰- به ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد، چگالی تعداد ذرات استحکام دهنده آلیاژ ۱۳ درصد افزایش یافته است که نهایتاً برآیند این

References

- [1] Challen B, Baranescu R. Diesel Engine Reference Book: Butterworth-Heinemann; 1999. 682 p.
- [2] Polmear I. Light Alloys. 4th ed: Butterworth-Heinemann; 2005. 416 p.
- [3] Nayan N, Narayana Murty SVS, Jha AK, Pant B, Sharma SC, George KM, et al. Mechanical properties of aluminium-copper-lithium alloy AA2195 at cryogenic temperatures. *Materials & Design*. 2014;58:445-50.
- [4] Nayan N, Narayana Murty SVS, Mukhopadhyay AK, Prasad KS, Jha AK, Pant B, et al. Ambient and cryogenic tensile properties of AA2195T87 sheets with pre-aging cold work by a combination of cold rolling and stretching. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;585:475-9.
- [5] Li CM, Cheng NP, Chen ZQ, Guo N, Zeng SM. Deep-cryogenic-treatment-induced phase transformation in the Al-Zn-Mg-Cu alloy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2015;22(1):68-77.
- [6] Vahdat SE, Nategh S, Mirdamadi S. Microstructure and tensile properties of 45WCrV7 tool steel after deep cryogenic treatment. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;585:444-54.
- [7] Vahdat SE, Nategh S, Mirdamadi S. Microstructure and Tensile Toughness Correlation of 1.2542 Tool Steel after Deep Cryogenic Treatment. *Procedia Materials Science*. 2014;6:202-7.
- [8] Niaki KS, Vahdat SE. Fatigue Scatter of 1.2542 Tool Steel after Deep Cryogenic Treatment. *Materials Today: Proceedings*. 2015;2(4-5):1210-5.
- [9] Schneider R, Grant RJ, Sotirov N, Falkinger G, Grabner F, Reichl C, et al. Constitutive flow curve approximation of commercial aluminium alloys at low temperatures. *Materials & Design*. 2015;88:659-66.
- [10] Shahsavari A, Karimzadeh F, Rezaeian A, Heydari H. Significant Increase in Tensile Strength and Hardness in 2024 Aluminium Alloy by Cryogenic Rolling. *Procedia Materials Science*. 2015;11:84-8.
- [11] Sotirov N, Falkinger G, Grabner F, Schmid G, Schneider R, Grant RJ, et al. Improved Formability of AA5182 Aluminium Alloy Sheet at Cryogenic Temperatures. *Materials Today: Proceedings*. 2015;2, Supplement 1:S113-S8.
- [12] Meng XK, Zhou JZ, Tan WS, Su C, Huang S. Reening mechanism of laser shock wave in Al-Cu alloy at liquid nitrogen temperature. *Guangxue Jingmi Gongcheng/Optics and Precision Engineering*. 2016;24:245-51.
- [13] Murugappan S, Arul S, Narayanan SK. An Experimental Study on Turning of AL6063 under Cryogenic Pre Cooled Condition. *Procedia CIRP*. 2015;35:61-6.
- [14] Zhang X, Mu H, Huang X, Fu Z, Zhu D, Ding H. Cryogenic Milling of Aluminium-lithium Alloys: Thermo-mechanical Modelling towards Fine-tuning of Part Surface Residual Stress. *Procedia CIRP*. 2015;31:160-5.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر دمایی زیرصفر روی خواص کششی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ که در ساخت بدنه هواپیماهای مسافربری کاربرد فراوان دارد در دو دمای ۶۰- درجه سانتی‌گراد و ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که با انجام عملیات زیرصفر در دمای ۶۰- درجه سانتی‌گراد (گروه ۱) و ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد (گروه ۲)، ازدیاد طول نسبی، استحکام تسلیم و استحکام کششی نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱/۵ و ۱ درصد، ۲۴ و ۳۲ مگاپاسکال و ۲۵ و ۲۶ مگاپاسکال افزایش پیدا کرده است. از طرف دیگر، استحکام تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول نسبی نمونه گروه ۱ (۶۰- درجه سانتی‌گراد) نسبت به نمونه گروه ۲ (۱۹۶- درجه سانتی‌گراد) تقریباً یکسان (بهبودی جزئی) هستند. بنابراین، با افزایش دمای عملیات زیرصفر، خواص کششی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته اما در سرعت سرد کردن آهسته (کمتر از ۱ درجه در دقیقه) بهبودی بیشتری در خواص کششی حاصل شده است. بعلاوه، حد خستگی نمونه شاهد از ۱۸۵ مگاپاسکال، به ۱۳۷ مگاپاسکال و ۱۴۷ مگاپاسکال (به ترتیب در گروه ۱ و گروه ۲) کاهش یافته است. همین‌طور با کاهش دمای زیر صفر از ۶۰- به ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد (به ترتیب نمونه‌های گروه ۱ و گروه ۲) حدخستگی به مقدار جزئی (۱۰ مگاپاسکال) از ۱۳۷ مگاپاسکال به ۱۴۷ مگاپاسکال (۷ درصد) افزایش یافته است.