

بررسی تأثیر فرآیند ساچمه زنی بر رفتار خوردگی خستگی آلیاژ آلومینیم T۵ - ۶۰۶۳ در محیط آب دریا

رضا کریمیان^۱، محمود حاجی صفری^{۲*}

^۱ گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

* نویسنده مسئول: hajisafari1001@iauyazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۳۱

چکیده

در این پژوهش با انجام آزمون خوردگی خستگی مطابق با استاندارد چرخشی خمشی بر روی نمونه‌های مختلف، خواص خوردگی خستگی آلیاژ آلومینیم T۵-۶۰۶۳ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج با داده‌های حاصل از آزمون خستگی در هوا بر روی نمونه‌های مشابه مقایسه گردید. مطابق با نتایج، فرآیند ساچمه زنی به طور قابل ملاحظه‌ای منجر به افزایش عمر خستگی آلیاژ می‌گردد، اما از سوی دیگر هم‌زمان شدن حضور محیط خورنده و بارگذاری تناوبی کاهش چشمگیر عمر خستگی آلیاژ را در پی داشت. مطالعات بیشتر نشان داد ترک‌های خستگی هم از سطح و هم از داخل نمونه جوانه زنی و اشاعه پیدا می‌کنند، اما در نمونه‌های ساچمه زنی شده این ترک‌ها در عمقی از سطح جوانه زده و اشاعه می‌نمایند. این ترک‌ها در حین پیشروی پس از برخورد با ناخالصی‌ها و رسوباتی نظیر Mg_2Si از مسیر خود منحرف و یا منشعب می‌شوند. بررسی‌های ریز ساختاری بر روی سطوح شکست ناشی از خوردگی خستگی، رفتار تردی هیدروژن در آلیاژ را نشان می‌دهد. هم‌چنین علاوه بر وجود تفاوت‌های اساسی در شکل ظاهری سطوح شکست، ابعاد و نحوه اشاعه ترک خستگی در آزمون خوردگی خستگی کاملاً با ترک‌های ایجاد شده در آزمون خستگی متفاوت می‌باشد.

کلمات کلیدی: آلومینیم T۵-۶۰۶۳، ساچمه زنی، خوردگی خستگی، جوانه زنی ترک، شکست نگاری؛

The Effect of Shot peening on Corrosion Fatigue Properties of 6063-T5 Aluminum Alloy in Sea Water

R. Karimian¹, M. Hajisafari^{2*}

^{1,2} Department of Metallurgy and Materials Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

* Corresponding Author: hajisafari1001@iauyazd.ac.ir

Submission: 2016, 10, 20 Acceptance: 2017, 09, 22

Abstract

In the current study corrosion fatigue properties of 6063-T5 alloy were studied via standard test methods and the results were compared with the fatigue properties of the specimens at the same conditions. Results revealed that shot peening process caused a considerable increase on fatigue life of alloy. But on the other hand that presence of an aggressive environment around the alloy concurrent with applying a cyclic stress, Significantly reduced the fatigue life of the alloy. Further studies showed that the fatigue cracks initiate and propagate both from specimen external surface and internal bulk, while in shot peened specimens, these cracks initiate from underneath external surface. Furthermore, in propagation step, these cracks experience an evidence deviation from their expected direction or branch formation in case of facing to an impurity, phase or precipitation i.e. Mg-2Si. microstructural studies on Corrosion Fatigue fracture surfaces showed the occurrence of hydrogen embrittlement phenomenon. Furthermore, there was a significant different between the fatigue fracture surfaces compare to corrosion fatigue fracture surface. Dimensions, and crack propagation of fatigue specimens were completely different from corrosion fatigue cracks.

Keywords: Aluminum 6063-T5, Shot Peening, Corrosion Fatigue, Crack Initiation, Fractography;

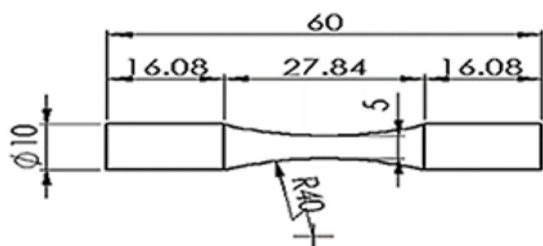
۱- مقدمه

آلومینیم و آلیاژهای آن به دلیل دارا بودن خواص مناسب، عملیات حرارتی پذیر بودن و برخی جوانب اقتصادی، امروزه پر مصرف ترین فلز بعد از فلزات آهنی به شمار می آیند. همین امر باعث شده تا این فلز به طور گسترده ای در صنایع دریایی، هوایی، خودروسازی و ... مورد استفاده قرار گیرد و به دلیل همین کاربرد فراوان قطعات زیادی از جنس آلومینیم در محیط های مختلف در حال سرویس دهی هستند. از آنجائیکه شکست خستگی عمدتاً به دلیل قرار گرفتن ریز ترک ها در ناحیه تنش کششی رخ می دهد بنابراین ایجاد تنش پسماند فشاری در قطعه سبب بسته شدن دهانه ریز ترک ها و توقف رشد آن ها می گردد. در چنین مواردی از جمله روش های افزایش طول عمر خستگی قطعات فرآیند ساچمه زنی می باشد [۱]. نتایج تحقیقات نشان می دهد فرآیند ساچمه زنی به طور قابل قبولی در بهبود عمر خستگی قطعات موثر است، زیرا ترک هایی که به ناحیه ساچمه زنی شده رسیده بودند در این ناحیه متوقف شدند [۲]. در چنین حالتی تنش پسماند فشاری ایجاد شده منجر به بسته شدن دهانه ریز ترک ها شده و زمان جوانه زنی و رشد ترک را به تأخیر می اندازد و نهایتاً افزایش طول عمر خستگی را در پی دارد. از طرف دیگر از آنجائیکه رشد ترک در ناحیه تحت فشار بسیار آهسته می باشد، هرچه عمق تنش پسماند ایجاد شده بیشتر باشد میزان مقاومت قطعه در برابر رشد ترک نیز افزایش می یابد [۳]. مطالعات صورت گرفته در زمینه اعمال پوشش بر زیر لایه آلومینیم ۶۰۶۳ نشان می دهد که این فرآیند سبب افزایش عمر خستگی آلیاژ نسبت به نمونه های بدون پوشش می گردد. اگرچه در این تحقیق تنش باقی مانده فشاری اندازه گیری نشد اما تصور می شود که طول عمر خستگی حاصله از سیستم زیر لایه و پوشش به علت وجود تنش های پسماند فشاری ناشی از اعمال پوشش، انتشار ترک خستگی را به تأخیر می اندازد [۴]. در تحقیقی مشابه، اعمال پوشش بر زیر لایه آلومینیم نیز نتیجه ای مشابه با پژوهش قبلی را به همراه داشت. بدین صورت که مقاومت به خستگی آلیاژ آلومینیم T5-۶۰۶۳ پوشش داده شده نسبت به نمونه بدون پوشش افزایش را به همراه داشت [۵]. بررسی تأثیر فرآیند ساچمه زنی بر رفتار خستگی دو سری از آلومینیم ریخته شده و کار شده نشان دهنده این است که نمونه های ساچمه زنی شده تنش باقی مانده فشاری بیشتری را برای هر دو سری از آلومینیم در سطح نشان می دهند اما نکته مهم این است که در آلیاژ ریخته شده ساختار دندریتی درشت در نزدیکی سطح به عنوان شیار تیز عمل کرده و محل مناسبی برای شروع ترک های ترجیحی است، بنابراین عمر خستگی و استحکام خستگی آلیاژ کار شده آلومینیم بیشتر از آلیاژ ریخته خستگی است [۱]. مطالعات دیگر در رابطه با شدت ساچمه زنی و عمر خستگی نمونه های آلومینیمی بیانگر اینست که عمر خستگی نمونه هایی که در معرض ساچمه زنی بوده اند از نمونه های بدون ساچمه زنی بیشتر است و با افزایش در میزان شدت

ساچمه زنی، عمر خستگی به دلیل وجود تنش پسماند فشاری بیشتر بهبود می یابد [۶]. در تحقیقی مشابه در ارتباط با شدت ساچمه زنی که بر روی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ صورت گرفت نتایج نشان داد، ساچمه زنی با شدت ۹/۶ آلمن (Almen) طول عمر خستگی را به میزان ۹ درصد افزایش می دهد اما اگر این شدت به ۱۴/۹ آلمن تغییر یابد طول عمر خستگی تا ۲۱ درصد کاهش می یابد در نتیجه انتخاب بازه ی مناسب در فرآیند ساچمه زنی از اهمیت بالایی برخوردار است [۷]. جنس و ابعاد ذرات شات نیز یکی دیگر از عوامل مهم در فرآیند ساچمه زنی است. به طور کلی انتخاب ذراتی که استحکام آنها نسبت به نمونه کمتر است پیشنهاد نمی گردد زیرا در این حالت ذرات شات در اثر برخورد با سطح نمونه دچار تغییر فرم می شوند و عملاً انجام فرآیند ساچمه زنی بی تأثیر می باشد هم چنین بهترین شرایط برای ساچمه زنی استفاده از مهره های فولادی و یا سرامیکی ریز می باشد [۸-۹]. آزمون های خستگی صورت گرفته بر روی نمونه های آلیاژ آلومینیم T5-۶۰۶۳ پیش خورده شده و پیش خورده نشده نشان می دهد، تحمل خستگی نمونه ها با افزایش زمان تهاجم خوردگی نمونه های پیش خورده شده کاهش می یابد [۱۰]. هدف اصلی این تحقیق، انجام فرآیند ساچمه زنی و بررسی اثر آن بر رفتار خستگی آلیاژ آلومینیم T5-۶۰۶۳ در محیط آب دریا می باشد. به گونه ای که ابتدا آزمون خستگی بر روی نمونه ها صورت پذیرفت و در ادامه نتایج حاصل شده با نتایج به دست آمده از آزمون خوردگی خستگی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

آزمون ها بر روی نمونه هایی از جنس آلومینیم T5-۶۰۶۳ که بر اساس استاندارد ASTM E466 [۱۱] تهیه و سپس آماده سازی شده بودند صورت گرفت (شکل ۱). در ادامه ترکیب شیمیایی عناصر سازنده آلیاژ به همراه نتایج آزمون کشش به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده است. آزمون خستگی در هوا و محیط خورنده (آب دریا) با رعایت استاندارد چرخشی خمشی انجام شد. و در نهایت تمامی داده های به دست آمده جمع آوری و ارزیابی گردید. هم چنین سطح نمونه ها پس از شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی گردید و با استفاده از نرم افزار MIP مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.



شکل ۱- شکل و ابعاد نمونه آزمون (بر حسب میلی متر).

R و فرکانس ۱۰ Hz در ۸ سطح تنش متفاوت (۳ نمونه در هر سطح تنش) با استفاده از دستگاه MSA 2014 ساخت شرکت P. T. V Co. Corrosion Protection، صورت پذیرفت. مطابق با استاندارد ASTM E466 بارگذاری از σ_{uts} 2/3 آغاز شده و تا کمی پایین تر از مقدار σ_{uts} 1/2 ادامه یافت و تنش اعمالی در بازه ۸۰-۱۵۰ مگاپاسکال تغییر داشت. آزمون خوردگی خستگی نیز در شرایط کاملاً مشابه با آزمون خستگی صورت گرفت. محلول آزمون نیز، آب دریا تهیه شده از خلیج فارس با رعایت استاندارد ASTM D 1141 [۱۳] و آنالیز یکساله از آن می باشد (جدول ۴). در انجام آزمون ها به منظور جلوگیری از خوردگی بین فلزی در محل اتصال نمونه ها با شفت دستگاه، دو سر نمونه به وسیله عایق حرارتی، عایق کاری گردید.

به منظور انجام آزمون ها نمونه ها بعد از تراشکاری تا مرز آینه ای شدن با استفاده از کاغذ سمباده پولیش شده و سپس توسط پنبه تحت پولیش نهایی قرار گرفتند. در انتها به منظور جلوگیری از کاهش صافی سطح و عدم ایجاد خراش بر روی نمونه ها، هر کدام از نمونه ها به صورت مجزا درون بسته های زیپ کیپ قرار داده شدند تا برای آزمون مورد استفاده قرار گیرند. در ادامه نیمی از نمونه ها با رعایت استاندارد AMS 2431 و ASM-S-13165 [۱۲] تحت فرآیند ساچمه زنی قرار گرفتند. تمامی مشخصات مربوط به فرآیند ساچمه زنی در جدول ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است که ابتدا به منظور تعیین بازه شدت مناسب ساچمه زنی، تست آلن بر روی نمونه صورت پذیرفت و بازه مناسب محاسبه گردید. آزمون خستگی به روش چرخشی خمشی با نسبت تنشی ۱- =

جدول ۱- درصد وزنی عناصر آلیاژی آلومینیم T5-۶۰۶۳ مورد استفاده

عنصر	Mn	Ni	Ti	Cu	Fe	Si	Mg	Al
درصد وزنی (%wt)	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۳۵	۰/۵	Base
عنصر	Cd	Pb	Co	Ca	Na	Cr	Bi	V
درصد وزنی (%wt)	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱
عنصر	Ga	Be	B	Sr	Zr	Li	Zn	Sn
درصد وزنی (%wt)	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace	<۰/۰۰۵

جدول ۲- نتایج آزمون کشش آلیاژ آلومینیم T5-۶۰۶۳ مورد استفاده

بدون ساچمه زنی		ساچمه زنی شده	
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
استحکام کششی (Mpa)	۲۱۱	استحکام کششی (Mpa)	۲۲۹
سطح مقطع اولیه (mm ²)	۱۹/۸۷	سطح مقطع اولیه (mm ²)	۱۸/۱۷
قطر نمونه (mm)	۵/۰۳	قطر نمونه (mm)	۴/۸۱

جدول ۳- پارامتر های فرآیند ساچمه زنی آلیاژ آلومینیم T5-۶۰۶۳ مورد استفاده

مقدار	مشخصه
S۲۳۰ - فولادی	کد و جنس ذرات شات
۵۵°	زاویه نازل
۴۹/۸-۵۵ HRC	سختی ذرات شات
۰/۰۸ A	شدت ساچمه زنی

جدول ۴- پارامتر های آب دریای خلیج فارس - مورد استفاده در آزمون خوردگی خستگی

مقدار	پارامتر
۲۷ ± ۱	دما (°C)
۳/۶	شوری (%)
۷/۸	pH

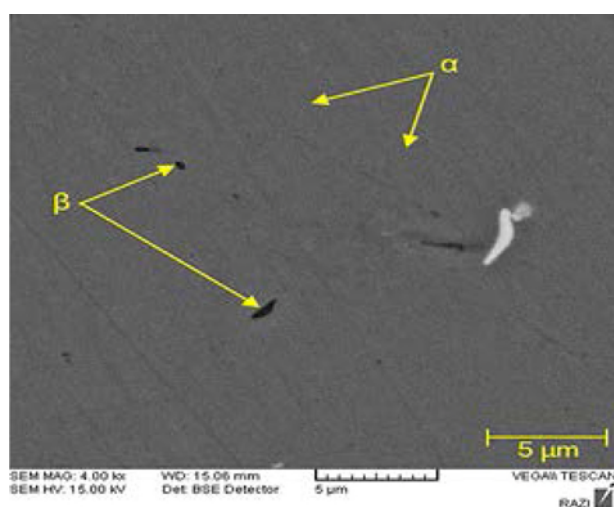
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریز ساختار

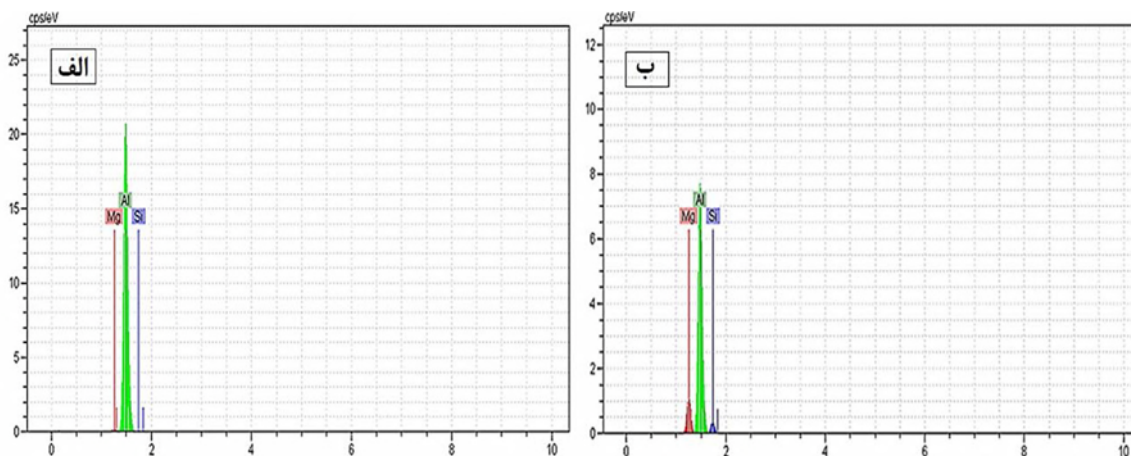
تصویر SEM از سطح نمونه قبل از انجام آزمون در شکل ۲ نشان داده شده است. بررسی‌های انجام شده و آنالیز ترکیب شیمیایی مشخص نمود (شکل ۳)، ساختار آلیاژ از دو فاز α و β تشکیل شده و فاز β همان ذرات Mg_2Si هستند که در فاز زمینه (α) توزیع شده‌اند.

۳-۲- آزمون خستگی

منحنی S-N (تنش - تعداد سیکل منجر به شکست) نمونه‌های تحت آزمون خستگی در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود آلیاژ آلومینیم T۵-۶۰۶۳، در دمای اتاق استحکام خستگی برابر با ۸۰ مگاپاسکال و عمر خستگی 7×10^6 چرخه (سیکل) را از خود نشان می‌دهد و در همین شرایط



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه (فازهای α و β) قبل از آزمون، حکاکی با محلول ۵٪ HF.



شکل ۳- طیف پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) از سطح نمونه پیش از انجام آزمون، (الف) فاز α ، (ب) فاز β از شکل ۲.

جدول ۵- نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی از سطح نمونه، شکل ۲

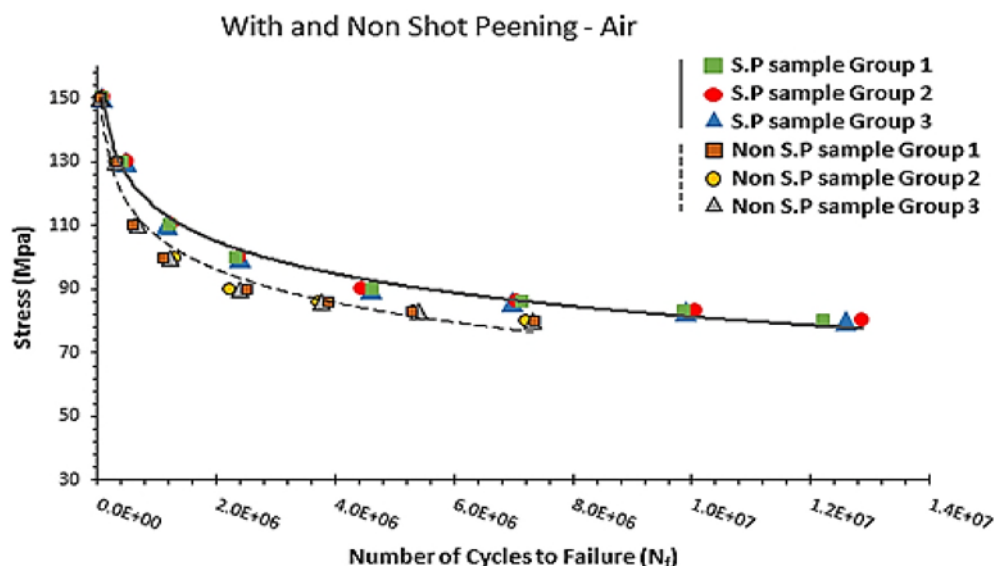
عناصر موجود (Wt %)			
نام فاز	منیزیم (Mg)	سیلیسیم (Si)	آلومینیم (Al)
فاز α	۰/۷۰	۰/۱۹	۹۹/۱۱
فاز β	۱۱/۲۲	۵/۹۱	۸۲/۸۷

۱-۲-۳- بررسی‌های شکست‌نگاری

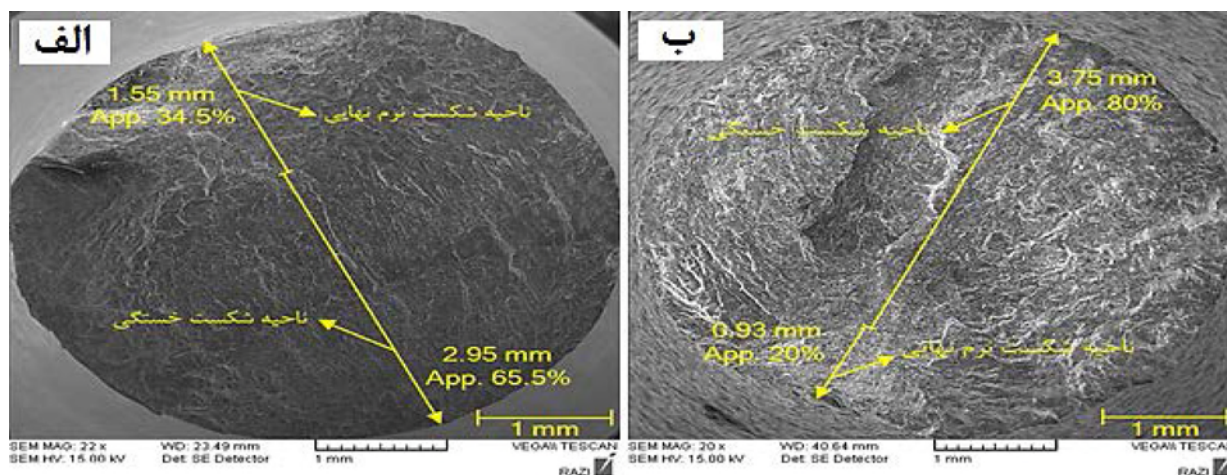
شکل ۵ نمای کلی از سطوح شکست نمونه‌ها در تنش ۸۳ مگاپاسکال نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها شکست خستگی پس از تحمل $۵/۳ \times 10^6$ چرخه برای نمونه ساده و ۱۰×10^6 چرخه برای نمونه ساچمه‌زنی شده رخ داده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است مساحت ناحیه شکست خستگی در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده به نسبت بیشتر می‌باشد. علت اصلی این افزایش (یا کاهش ناحیه شکست نرم نهایی)، تنش‌های پسماند فشاری باقیمانده ناشی از فرآیند ساچمه‌زنی است. این امر به نوبه خود سبب افزایش سیکل تحملی توسط نمونه‌ها شده و در فواصل زمانی بیشتری دچار شکست می‌گردند. به عبارت دیگر و در راستای بیان نتایج سایر تحقیقات، افزایش طول عمر کاری قطعه در شرایط سرویس‌دهی را به همراه دارد [۱].

تصاویر SEM از سطح شکست دو نمونه ی شکل ۵ با بزرگ‌نمایی

استحکام خستگی آلیاژ آلومینیم T۵-۶۰۶۳ ساچمه‌زنی شده، برابر با ۸۰ مگاپاسکال و عمر خستگی $۱/۲ \times 10^7$ چرخه می‌باشد. در این آزمون‌ها، آخرین سطح تنشی که در آن نمونه‌های ساچمه‌زنی شده دچار شکست شدند برابر با ۸۳ مگاپاسکال ثبت شد و در تنش ۸۰ مگاپاسکال و کمتر از آن تعداد چرخه متحمل توسط نمونه‌ها بالاتر از ۱۰^7 چرخه بوده و در آن‌ها شکست صورت نگرفت. به عبارت دیگر آلیاژ تحت عملیات ساچمه‌زنی در تنش ۸۰ مگاپاسکال و کمتر از آن دچار شکست نشده و استحکام خستگی آن به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته و به نوعی از خود حد خستگی نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های به دست آمده از آزمون‌ها و منحنی، فرآیند ساچمه‌زنی عمر خستگی نمونه‌های آلومینیمی را در بازه‌ای بین ۲ - ۱/۵ برابر افزایش داده است که دلیل آن تنش پسماند فشاری باقیمانده، ناشی از برخورد ساچمه‌ها با سطح نمونه می‌باشد.



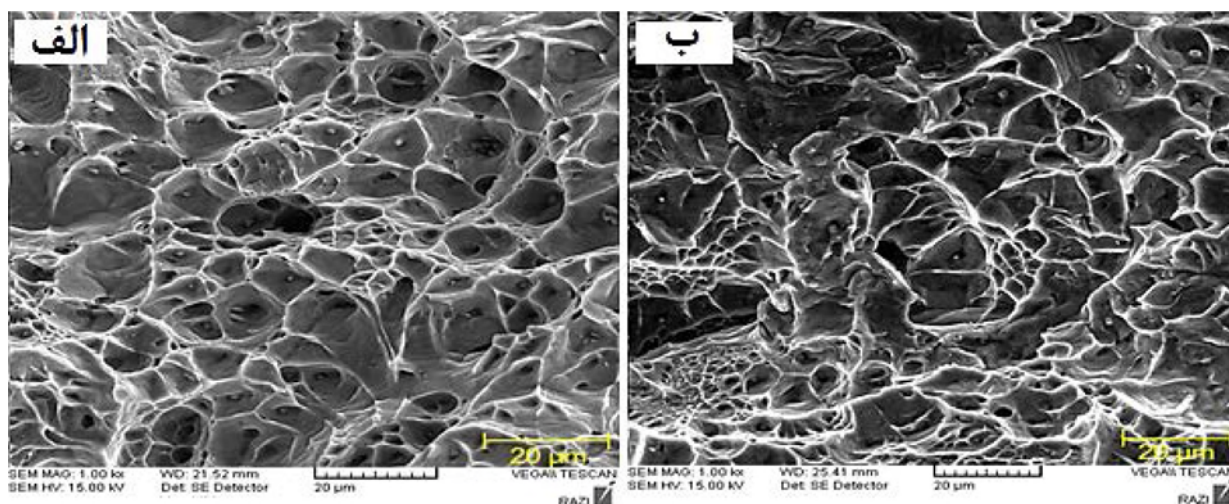
شکل ۴ - منحنی S-N نمونه‌های آلیاژ آلومینیم T۵-۶۰۶۳ در هوا.



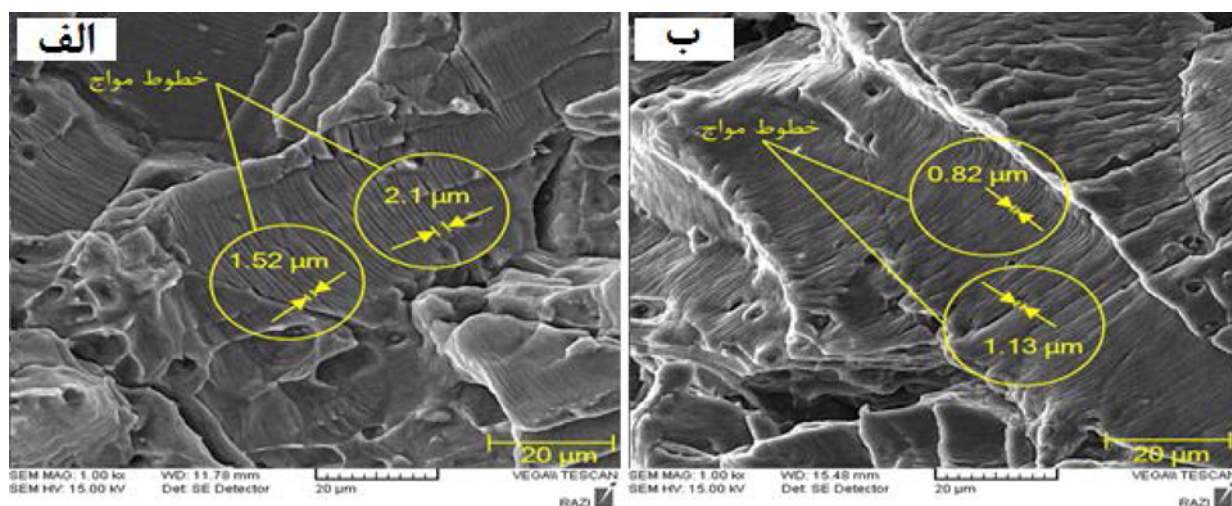
شکل ۵ - نمای کلی از سطح شکست آلیاژ آلومینیم T۵-۶۰۶۳ در آزمون خستگی، (الف) نمونه بدون ساچمه زنی (ب) نمونه ساچمه‌زنی شده.

در یک راستا می‌باشد. به‌منظور بررسی اثر فرآیند ساچمه‌زنی بر بسته‌شدن دهانه ریز ترک‌های سطحی مطالعات میکروسکوپی در نواحی ابتدایی سطح نمونه‌ها انجام گرفت. در شکل ۸ و ۹، به ترتیب ترک خستگی در سطح برای نمونه بدون ساچمه‌زنی و ترک خستگی در عمقی از سطح در نمونه ساچمه‌زنی شده آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد، در نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی (شکل ۸)، ترک‌های خستگی عمدتاً از سطح جوانه زده و انتشار می‌یابند در حالیکه برای نمونه‌های ساچمه‌زنی شده (شکل ۹) به دلیل برخورد ذرات شات با سطح، این ترک‌ها در زیر لایه میدان تنش باقی مانده فشاری ناشی از این برخورد، ایجاد می‌گردند. علت همان تنش پسماند فشاری است که سبب بسته شدن دهانه ریز ترک‌های سطحی می‌گردد و زمان ایجاد و انتشار ترک را به تأخیر می‌اندازد.

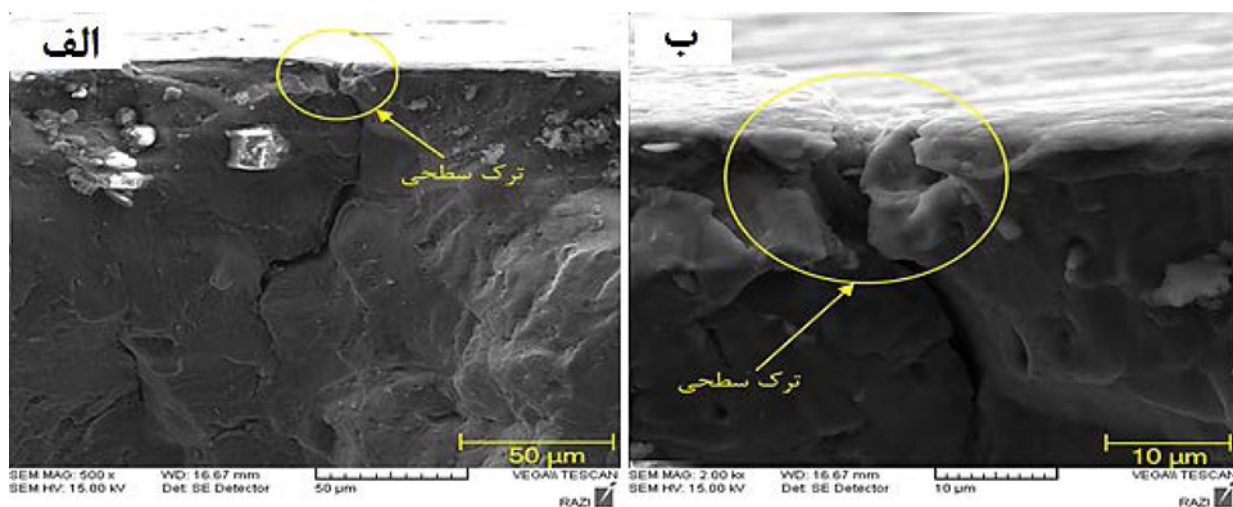
بالتر در شکل ۶ نشان داده شده است. در این تصویر، شکست در آلیاژ (هر دو نمونه) از نوع نرم می‌باشد. زیرا حضور گودی (Dimple) های موجود رفتار نرم را سبب می‌شوند. یکی از مشخصه‌های اصلی شکست خستگی، خطوط موج یا Striation Features ها می‌باشد. این خطوط حاصل سیکل‌های تنش اعمالی در حین بارگذاری خستگی بوده و هر یک از این موج‌ها نماینده یک سیکل تنش هستند. فاصله بین آن‌ها نیز به عوامل مختلفی بستگی دارد [۱۴-۱۵]. شکل ۷، تصویر SEM از خطوط موج مربوط به ناحیه شکست خستگی نمونه‌ها در شکل ۵ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اثر اعمال تنش پسماند فشاری ناشی از فرآیند ساچمه‌زنی فاصله بین خطوط موج در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده کاهش یافته، و این نمونه‌ها استحکام خستگی بهتری داشته و سیکل بیشتری را تحمل کرده و عمر خستگی بالاتری نشان دادند. این نتایج با یافته‌های [۹] Gao



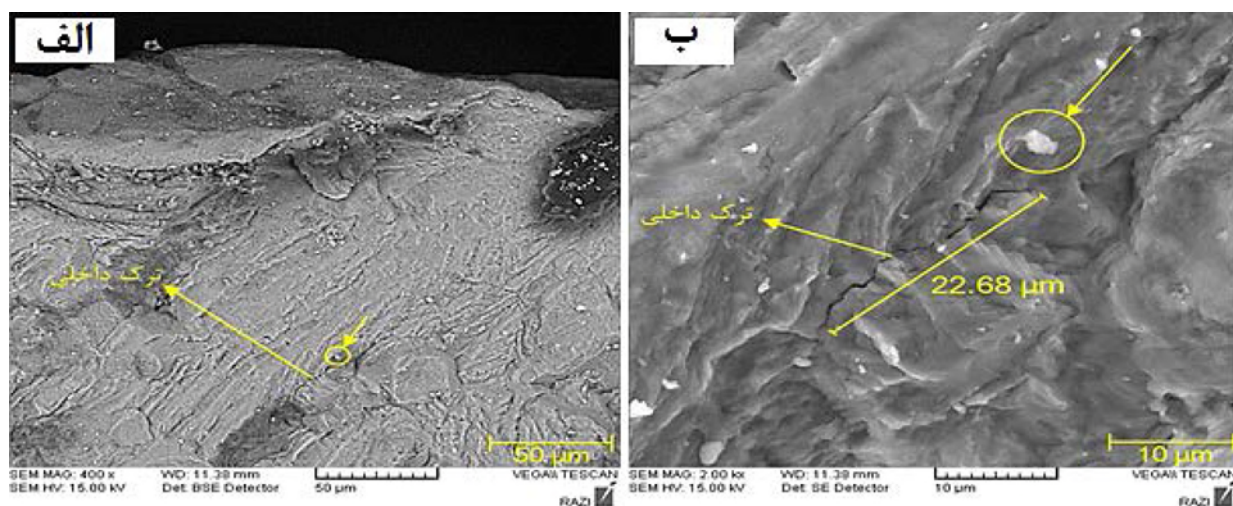
شکل ۶ - تصویر SEM از ناحیه شکست نهایی آلیاژ آلومینیم T۵ - ۶۰۶۳ در آزمون خستگی، (الف) نمونه بدون ساچمه‌زنی (ب) نمونه ساچمه‌زنی شده.



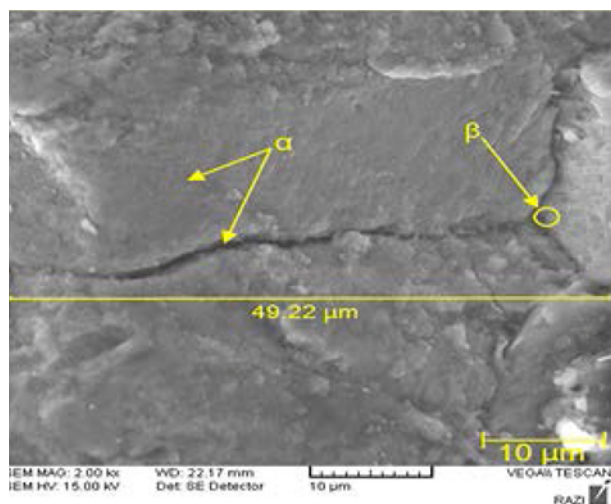
شکل ۷ - تصویر SEM از خطوط موج در آزمون خستگی، (الف) نمونه بدون ساچمه‌زنی (ب) نمونه ساچمه‌زنی شده.



شکل ۸ - تصویر SEM از ترک سطحی در نمونه بدون ساچمه زنی، آزمون خستگی، (الف) بزرگ نمایی ۵۰۰x (ب) بزرگ نمایی ۲۰۰۰x.



شکل ۹ - تصویر SEM از ترک داخلی در نمونه ساچمه زنی شده، آزمون خستگی، (الف) بزرگ نمایی ۴۰۰x (ب) بزرگ نمایی ۲۰۰۰x.



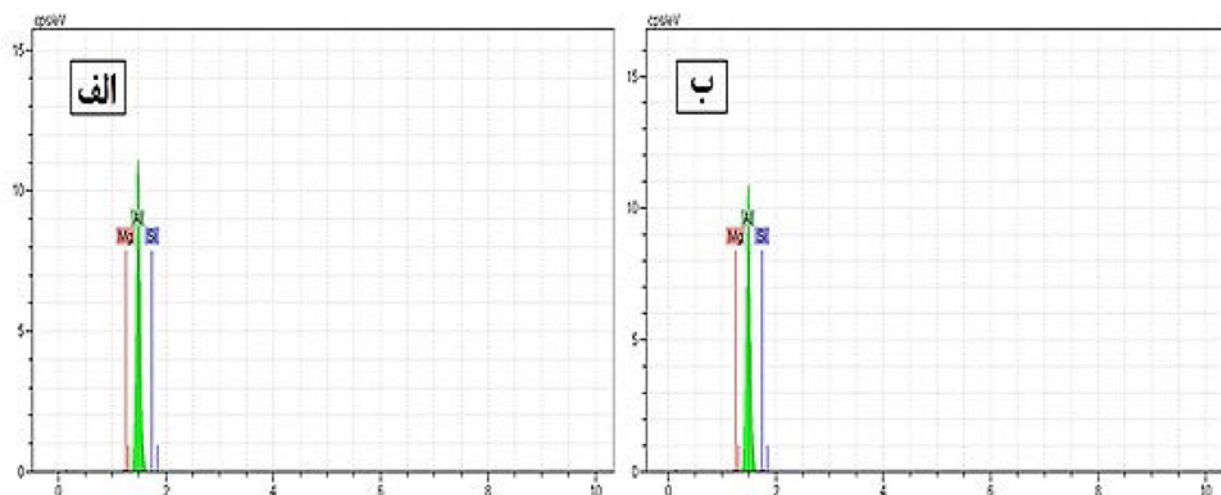
شکل ۱۰ - تصویر SEM از ریز ترک داخلی در نمونه ساچمه زنی شده، آزمون خستگی.

بررسی‌های دقیق‌تر تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نحوه اشاعه ترک نشان داد در برخی موارد ترک منشعب و یا منحرف می‌گردد. مطابق با شکل ۱۰، ترک خستگی در مسیر اشاعه خود در فاز زمینه (α) به محض مواجهه با فاز دوم (فاز سخت‌تر β) از مسیر خود منحرف گشته و دچار انشعاب می‌گردد. در شکل ۱۱ طیف پراش پرتو ایکس (EDS) گرفته شده از مسیر اشاعه ترک مربوط به سطح نمونه ساچمه‌زنی شده نشان داده شده است. آنالیز انجام شده حضور سیلیسیم بیشتر را که سبب افزایش استحکام که سدی در برابر پیشروی ترک می‌باشد را نشان می‌دهد (شکل ۱۱).

۳-۳-آزمون خوردگی خستگی

مطابق با منحنی S-N نمونه‌های تحت آزمون خوردگی خستگی که در شکل ۱۲ آورده شده، آلیاژ آلومینیم T۵-۶۰۶۳ در محیط آب دریا دارای استحکام

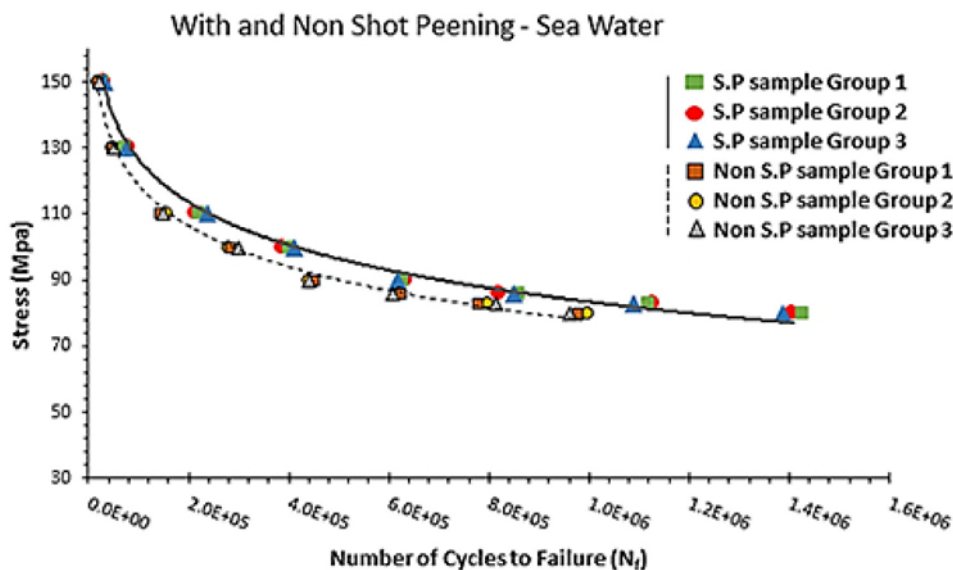
خستگی برابر با ۸۰ مگاپاسگال و عمر خستگی $9/5 \times 10^5$ چرخه می باشد. در همین شرایط با انجام ساچمه زنی در آلیاژ، استحکام خستگی ۸۰ مگاپاسگال و عمر خستگی $1/4 \times 10^6$ چرخه مشاهده شد.



شکل ۱۱ - طیف پراش پرتو ایکس (EDS) از سطح نمونه ساچمه‌زنی شده، الف) فاز α ، ب) فاز β از شکل ۱۰.

جدول ۶ - نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی از سطح نمونه، شکل ۱۰

عناصر موجود (Wt %)			
نام فاز	منیزیم (Mg)	سیلیسیم (Si)	آلومینیم (Al)
فاز α	۰/۵۵	۰/۲۰	باقیمانده
فاز β	۰/۶۵	۰/۸۵	باقیمانده



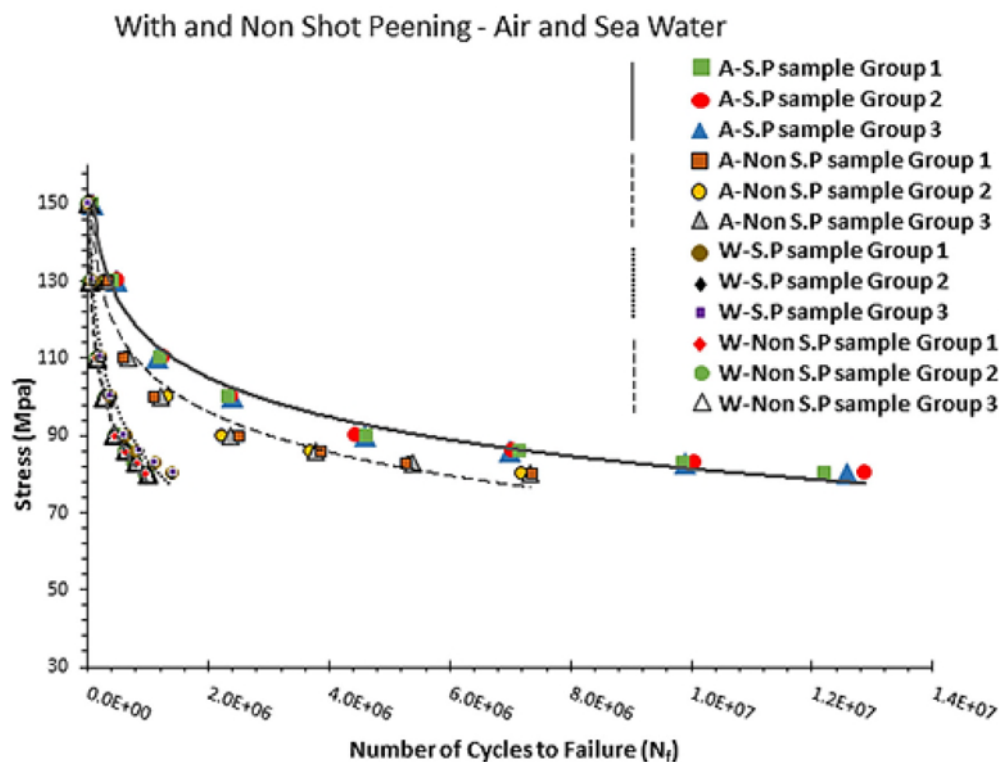
شکل ۱۲ - منحنی S-N نمونه‌های آلیاژ آلومینیم T۵-۶۰۶۳ در محیط خورنده آب دریا.

محلول خورنده ۵۰ درصد از عمر نمونه ها حتی با اعمال عملیات ساچمه زنی کاهش می یابد. لذا به عنوان یک نتیجه برای کاربردهای خوردگی - خستگی عملیات ساچمه زنی را می توان به عنوان یکی از فرآیندهای بهبود رفتار خوردگی - خستگی پیشنهاد داد.

۱-۳-۳- بررسی های شکست نگاری

بررسی های سطح شکست نمونه های آزمون خوردگی خستگی نیز کاهش عمر خستگی را توجیه می کنند، در این سطوح مساحت ناحیه شکست خستگی کاهش و پیشروی ناحیه شکست نرم نهایی در تصاویر مشهود است (شکل ۱۴). این نمونه ها پس از تحمل $9/5 \times 10^5$ (نمونه ساده) و $1/4 \times 10^6$ (نمونه ساچمه زنی شده) چرخه دچار شکست شدند. در این حالت اثر محیط خورنده بر کاهش استحکام آلیاژ نمایان است چرا که سیکل تحملی در تنش ۸۰ مگاپاسکال برای نمونه های غوطه ور در آب دریا با سیکل تحملی نمونه های آزمون خستگی در تنش ۱۱۰ مگاپاسکال برابری دارد. در آزمون خوردگی خستگی مرز میان تغییر نوع شکست بین دو ناحیه شکست خستگی و شکست نرم نهایی با آزمون خستگی تفاوت خاصی دارد (شکل ۱۶). در آزمون خستگی در دو طرف مرز شکست، ناحیه شکست خستگی (شامل خطوط مواج) و ناحیه

به جهت تحلیل آسان تر شکل ۱۳ منحنی S-N آلیاژ آلومینیم T5-۶۰۶۳ در دو محیط برای هر دو سری از نمونه ها را به صورت یکجا نشان می دهد. همان طور که از منحنی پیداست رفتار خستگی آلیاژ در هوا و آب دریا کاملاً متفاوت است و با قرار گرفتن نمونه ها در محیط خورنده آب دریا استحکام خستگی آلیاژ به طور چشمگیری کاهش می یابد (به میزان ۲۰٪). دلیل این کاهش هم زمان شدن اثر بار چرخه ای و خوردگی ناشی از محیط که منجر به ایجاد حفره های سطحی شده و در اثر تمرکز تنش در محل حفره ها، استحکام کاهش یافته و نمونه ها در سیکلی بسیار پایین تر دچار شکست می شوند. اما هم چنان تأثیر فرآیند ساچمه زنی بر میزان اختلاف سیکل تحملی توسط نمونه ها قابل ملاحظه است. برای نمونه ساده سیکل تحملی در تنش ۹۰ مگاپاسکال برای نمونه های آزمون بدون ساچمه زنی در هوا از 4×10^6 چرخه به 8×10^6 چرخه پس از ساچمه زنی رسیده و افزایش ۱۰۰ درصدی مشاهده گردید. به همین ترتیب برای نمونه های آزمون در محلول آب دریا عمر خوردگی - خستگی نمونه های بدون ساچمه زنی از $4/4 \times 10^5$ چرخه به $6/3 \times 10^5$ چرخه برای نمونه های ساچمه زنی شده تغییر یافت به عبارتی در حدود ۵۰ درصد افزایش را نشان داد. بنابراین با مقایسه این دو نتیجه مشاهده می گردد که در اثر حضور

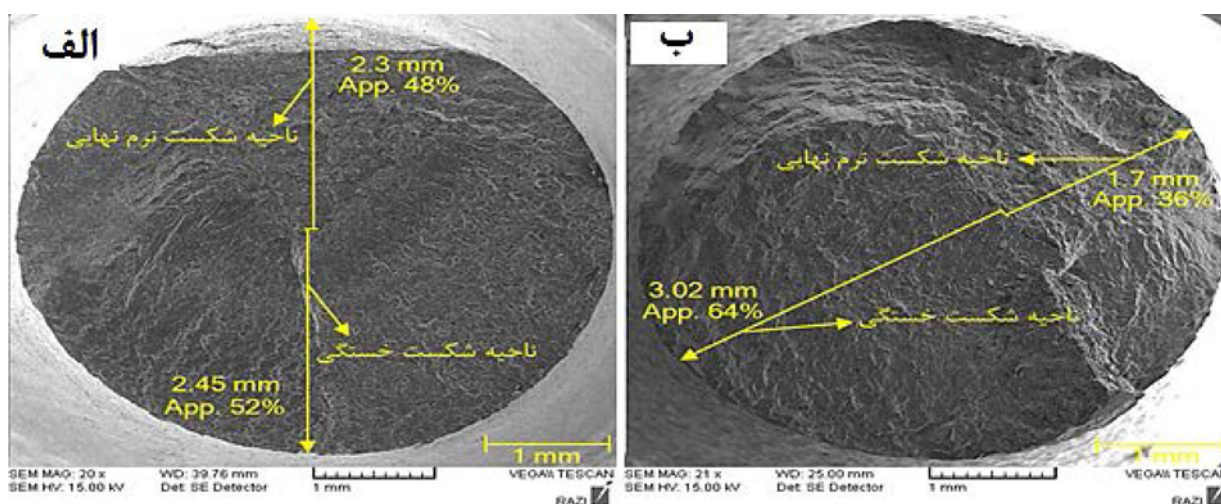


شکل ۱۳ - منحنی S-N نمونه های آلیاژ آلومینیم T5-۶۰۶۳ در هوا و محیط خورنده آب دریا.

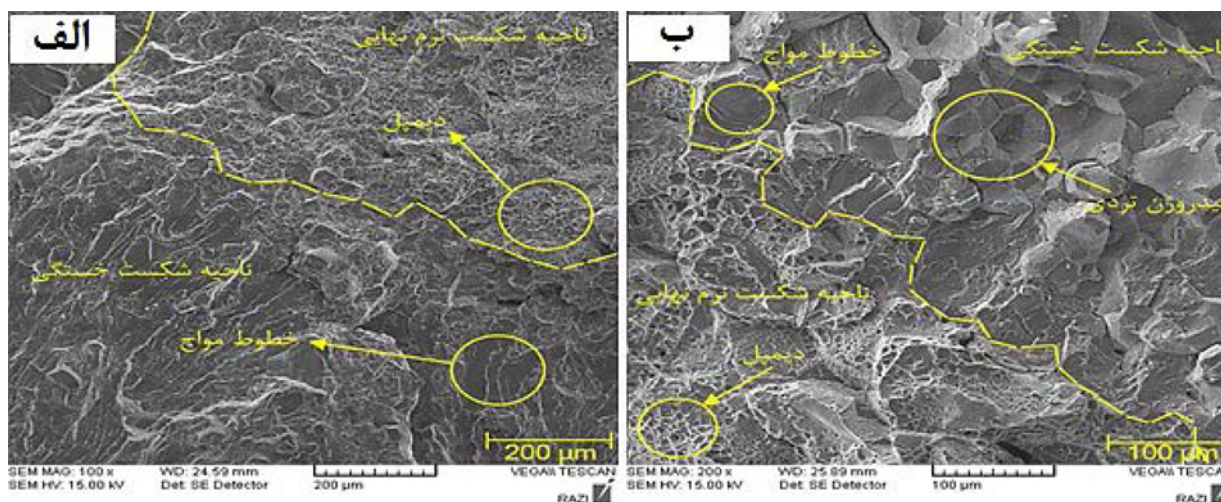
نیز دیده شد و هم‌چنان شکست در آلیاژ در آزمون خوردگی خستگی، از نوع نرم می‌باشد.

به دلیل تفاوت‌های ایجاد شده در سطوح شکست نمونه‌ها، در شکل ۱۶ تصویر SEM از خطوط موج مربوط به ناحیه شکست خستگی شکل ۱۴ آورده شده است. واضح است که فاصله بین خطوط موج در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده به میزان ۵۰ درصد کاهش یافته است. اما دلیل این کاهش فاصله نسبت به آزمون خستگی با در نظر گرفتن این توجیه که هر کدام از این خطوط نشان دهنده یک سیکل تنش هستند و پیشروی ترک در هر سطح تنش را نشان می‌دهند این است که، کاهش ناحیه شامل خطوط موج به دلیل بروز تردی هیدروژنی بوده و افزایش در سرعت پیشروی ترک در محیط خورنده، فاصله بین این خطوط را کاهش داده است.

شکست نرم نهایی (ناحیه شامل دیمپل‌ها) قابل مشاهده است. در حالی که در آزمون خوردگی خستگی، ناحیه شکست خستگی خود شامل تردی هیدروژنی و خطوط موج در کنار یکدیگر می‌باشد و در طرف دیگر مرز شکست، ناحیه شکست نرم نهایی قابل مشاهده است. در سطوح شکست نمونه‌های آزمون خوردگی، رفتار ترد مرزدانه‌ای ناشی از حضور هیدروژن در آلیاژ کاملاً مشخص است. پیش از این برخی محققان [۱۶-۱۷] گزارش نموده‌اند که این امر به دلیل حساسیت ذاتی آلومینیم و آلیاژهای آن به تردی هیدروژنی می‌باشد که در تحقیق حاضر نیز این پدیده مشاهد گردید (شکل ۱۵ ب). تردی هیدروژنی به‌طور چشمگیری مساحت ناحیه شامل خطوط موج را کاهش داده و در این ناحیه اثری از خطوط موج دیده نمی‌شود. مشابه همین رفتار نیز در نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی



شکل ۱۴ - نمای کلی از سطح شکست آلیاژ آلومینیم T۵-۶۰۶۳ در آزمون خوردگی خستگی، (الف) نمونه بدون ساچمه‌زنی (ب) نمونه ساچمه‌زنی شده

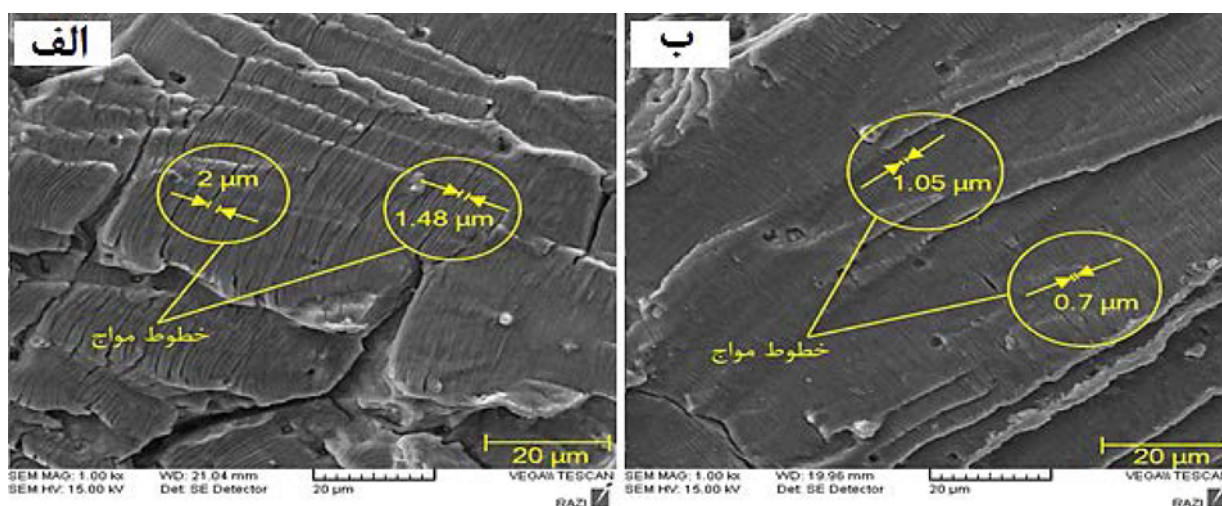


شکل ۱۵ - نمای کلی نواحی شکست آلیاژ آلومینیم T۵-۶۰۶۳ ساچمه‌زنی شده، (الف) آزمون خستگی، (ب) آزمون خوردگی خستگی

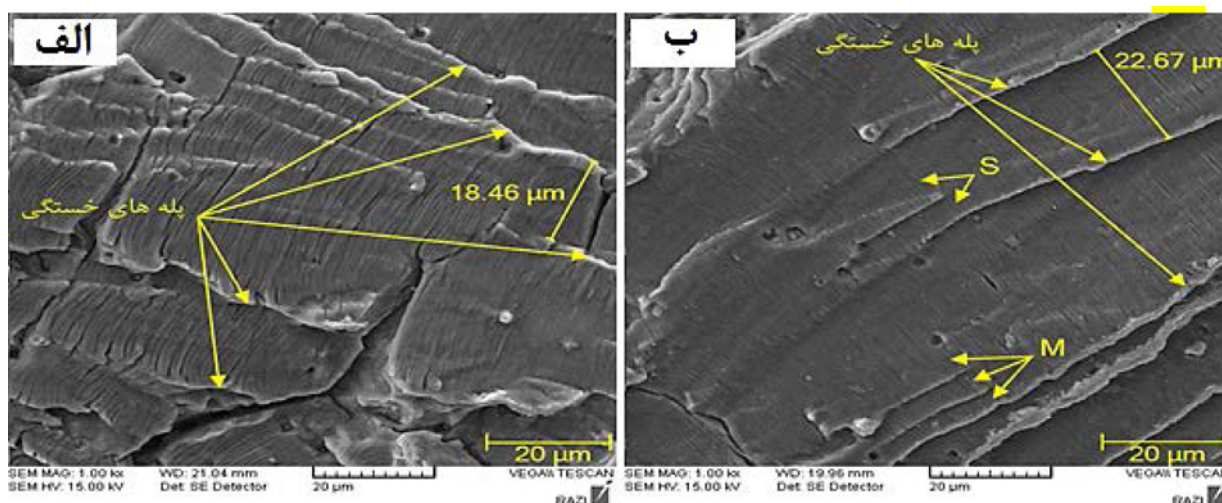
تنها مکانیسم غالب رفتار ترد و ترک‌های مرزدانه‌ای (بین دانه‌ای) می‌باشد (شکل ۱۸ الف). نتایج نشان می‌دهد، ترک‌های ایجاد شده در محیط خورنده عمدتاً ریز تر بوده به گونه‌ای که یافتن آن‌ها کمی مشکل است. بروز تغییر در اندازه و نحوه اشاعه ترک در محیط خورنده را می‌توان به اندرکنش محیط خورنده با سطح در حین بارگذاری سیکلی مرتبط دانست که سبب ایجاد ترک‌های ریز تر می‌شود، چنین ترک‌هایی در مسیر اشاعه خود با فازهایی که عموماً دارای ترکیبات سخت‌تری می‌باشند برخورد داشته و از این رو متوقف و در برخی موارد ناچار به تغییر مسیر می‌گردند. در شکل ۱۸ ب، یک نمونه از این رفتار ترک نشان داده شده است. به وضوح ملاحظه می‌شود که ابعاد این ترک نسبت به ترک پیدا شده در آزمون خستگی در هوا کوچکتر می‌باشد (به منظور درک بهتر با شکل ۱۰ مقایسه گردد).

نکته مهم دیگر در وضعیت ظاهری سطح شکست نمونه‌ها، پله‌ای بودن آن است (شکل ۱۷). از آنجائیکه خطوط موج در نواحی به صورت گروهی وجود دارند و به وسیله همین پله‌ها از یکدیگر جدا می‌شوند، سطح این پله‌ها به دو صورت محدب و مقعر است و حاصل از هم گسیختگی یک نمونه و ایجاد دو سطح شکست می‌باشد. در برخی نواحی پله‌ها با هم ترکیب شده و یا از یکدیگر جدا می‌شوند. این پله‌ها در اثر برخورد با مرز دانه و یا موانع دیگر متوقف می‌شوند [۱۸]. دلیل تعدد پله و فاصله بین پله‌ای کمتر در نمونه‌های ساده نسبت به نمونه‌های ساچمه‌زنی شده، حضور ریز ترک‌های بیشتر و سرعت پیشروی بالاتر آن‌ها می‌باشد.

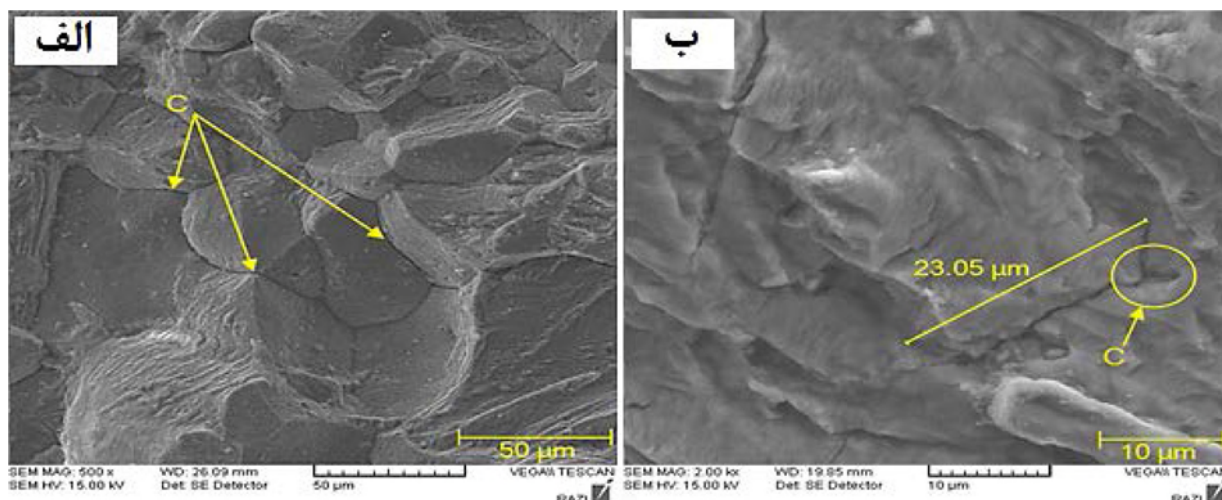
در ادامه بررسی ترک‌های مشاهده شده در آزمون خوردگی خستگی یک موضوع نمایان است که در ناحیه هیدروژن تردی



شکل ۱۶- تصویر SEM از خطوط موج در آزمون خوردگی خستگی، (الف) نمونه بدون ساچمه‌زنی (ب) نمونه ساچمه‌زنی شده



شکل ۱۷- تصویر SEM از خطوط پله های خستگی در آزمون خوردگی خستگی، (الف) نمونه بدون ساچمه‌زنی (ب) نمونه ساچمه‌زنی شده



شکل ۱۸ - تصویر SEM از سطح شکست در آزمون خوردگی خستگی، (الف) ترک مرز دانه‌ای (ب) ترک داخلی

نتیجه‌گیری

- ۱ - آلیاژ آلومینیم T5 - ۶۰۶۳ مورد مطالعه در این پژوهش، در دمای اتاق دارای استحکام خستگی برابر با ۸۰ مگاپاسکال و عمر خستگی برابر با 7×10^6 چرخه بود. با انجام عملیات ساچمه‌زنی در شرایط ذکر شده آلیاژ دارای استحکام خستگی (به نوعی رفتار حد خستگی) ۸۰ مگاپاسکال و عمر خستگی برابر با $1/2 \times 10^7$ بود. با قرار گرفتن نمونه‌ها در محیط خورنده (آب دریا) و اعمال بار چرخه‌ای بر آن‌ها، استحکام خستگی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. عمر خستگی آلیاژ در تنش ۸۰ مگاپاسکال برابر با $9/5 \times 10^5$ شد. این کاهش در عمر خستگی در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده نیز رویت گردید بگونه‌ای که عمر خستگی نمونه‌های ساچمه‌زنی شده در تنش ۸۰ مگاپاسکال برابر با $1/4 \times 10^6$ بود. هرچند محیط خورنده طول عمر خستگی آلیاژ را کاهش داده است اما عملیات ساچمه‌زنی سبب افزایش عمر خستگی نمونه‌ها گردید.
- ۲ - عمر خستگی در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده بین $1/5$ تا 2 برابر نسبت به نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی افزایش داشت.
- ۳ - با افزایش زمان غوطه‌وری نمونه‌ها در محیط خورنده استحکام کششی نهایی آلیاژ کاهش می‌یابد.
- ۴ - بررسی ریز ساختار آلیاژ آلومینیم T5 - ۶۰۶۳ نشان داد که آلیاژ دارای دو فاز α (فاز زمینه) و فاز β بوده و جوانه‌زنی و رشد ترک خستگی در فاز نرم تر اتفاق می‌افتد. اشاعه ترک خستگی در فاز α صورت گرفته و در اثر مواجه شدن ترک با فاز سخت تر β منحرف می‌گردد.
- ۵ - در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده عمدتاً ترک‌های خستگی از عمقی از سطح ایجاد می‌شوند که عامل آن تنش پسماند فشاری باقیمانده در سطح ناشی از فرآیند ساچمه‌زنی است.
- ۶ - ابعاد ترک‌های خستگی در سطح شکست نمونه‌های به دست آمده از آزمون خوردگی خستگی ($23/05$ میکرومتر طول) کاملاً با ترک‌های خستگی ایجاد شده در هوا ($49/22$ میکرومتر طول) متفاوت است.
- ۷ - هم‌زمان شدن پدیده خوردگی با اعمال تنش چرخه‌ای سبب کاهش چشمگیر در نسبت مساحت ناحیه شکست خستگی به مساحت ناحیه شکست نرم نهایی در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده و بدون ساچمه‌زنی می‌گردد.
- ۸ - تفاوت نمایان در آزمون خستگی با آزمون خوردگی خستگی پدیده تردی هیدروژن در نمونه‌های آزمون می‌باشد. این امر به دلیل حساسیت ذاتی آلومینیم و آلیاژهای آن به تردی هیدروژنی می‌باشد.
- ۹ - بروز رفتار تردی هیدروژنی منجر به کاهش ناحیه شامل خطوط موج می‌گردد. در ناحیه شامل تردی هیدروژنی خطوط موج دیده نمی‌شود و تنها مکانیسم غالب ترک‌های مرزدانه‌ای (بین دانه‌ای) می‌باشد.

مراجع

- [1] K. Timmermann, W. Zinn, B. Scholted. Effect of Shot Peening Treatments on Corrosion Fatigue of Cast or Wrought Al-base Alloys, 11th International Conference on Shot Peening, Institute of Materials Engineering, Department of Mechanical Engineering University of Kassel Mönchebergstr. 3, 34109 Kassel, Germany
- [2] M. Guagliano. Relating Almen Intensity to Residual Stresses Induced by Shot Peening: a Numerical approach, Journal of Materials Processing Technology Vol. 110, 2001, Pp. 277-286
- [3] H. Y. Miao, S. Larose, C. Perron, Martin Levesque, An Analytical approach to Shot Peening Parameters to Almen Intensity, Journal of surface & coatings Technology Vol. 205, 2010, Pp. 2055-2066
- [4] C. Villalobos, G. Gedler, J. La Barbera, et. all, Fatigue and Corrosion Fatigue Behavior of an AA6063-T6 Aluminum Alloy Coated with a WC-10Co-4Cr Alloy Deposited by HVOF Thermal Spraying, Journal surface and Coating Technology, Vol. 202, 2008, Pp. 4572-4577
- [5] J. Marin Camarago, H. Cornelis, et. all, Journal surface and Coating Technology, Vol. 201, 2007, Pp. 9448.
- [6] L. V. Sheng, C. You, G. Xiaosheng, T. S. Srivatsan, Influence of Exposure to Aggressive Environment on Fatigue Behavior of a Shot Peened High Strength Aluminum Alloy, J. Mater. Sci. Eng. A Vol. 574, 2013, Pp. 243-252
- [7] L. Trsko, M. Guagliano, O. Bokuvka, F. Novy, Fatigue Life of AW 7075 Aluminum Alloy after Severe Shot Peening Treatment with Different Intensities, Procedia Engineering, Vol. 74, 2014, Pp. 246-252
- [8] O. Kazuyuki, Fatigue Life Enhancement of Aluminum Alloy for Aircraft by Fine Particle Shot Peening (FPSP), Journal of Material Processing Technology, Vol. 211, 2011, Pp. 1395-1399
- [9] Y. K. Gao, Improvement of Fatigue Property in 7050-T7451 Aluminum Alloy by Laser Peening and Shot Peening Material and Science Engineering A Vol. 528, 2011, Pp. 3823-3828
- [10] M. Gonzalo, L. Jorge, Fatigue Endurance and Crack Propagation Under Rotating Bending Fatigue Tests on Aluminum Alloy AISI 6063-T5 with Controlled Corrosion Attack, Journal Eng. Fracture Mechanic, Vol. 93, 2012, Pp. 119-131
- [11] ASTM E 466, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials
- [12] AMS 2431 & S-13165, Standard of Shot Peening – (SAE) Shot Media General Requirements
- [13] ASTM D 1141, Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water
- [14] W. Hertzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, 1996
- [15] A. J. McEvily, H. Matsunaga, On Fatigue Striations, 2010
- [16] Rajan. A. ES. Dwarakadasa, Effect of Hydrogen in Aluminum Alloys, Bull. Mater. Sci., Vol. 19, No. 1, February 1996, Pp. 103-114. (Center for Advanced Study, Department of Metallurgy, Indian Insititute of Science, Bangalore 560 012, India)
- [17] Rafiq. A. Sidique. ,Sayyad. Z. Qamar, et. All, Hydrogen Embrittlement in 6063 Aluminum Alloy, 11th International Research/Expert Conference – Trends in the Development of Machinery and Association Technology, TMT 2007, Hammamet, Tunisia
- [18] Milella. P. P. ,Fatigue and Corrosion in Metals - Chapter 2, 2013, ISBN 978-88-470-2335-2