



بررسی رفتار رشد ترک در همبسته آلومینیوم مورد استفاده در قطعات موتور، با استفاده از روش انتشار صوت

حسن سیار^۱، محسن علی‌زاده^۲، محمد آزادی^{۳*}، احمد قاسمی قلعه بهمن^۴، سید محمد جعفری^۵، امیر مافی^۶

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، hassan.sayyar@semnan.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، mohsen.alizadeh@semnan.ac.ir

^۳ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، m_azadi@semnan.ac.ir

^۴ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ghasemi@semnan.ac.ir

^۵ دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، m_jafari@sbu.ac.ir

^۶ شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایرانخودرو (ایپکو)، تهران، ایران، a_mafi@ip-co.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۴ شهریور ۱۳۹۶

پذیرش: ۲۳ دی ۱۳۹۶

کلیدواژه‌ها:

آلیاژ آلومینیوم

رشد ترک

انتشار صوت

ضریب تمرکز تنش

بارگذاری کششی

استفاده از همبسته های آلومینیوم در صنعت موتور، به دلیل سبکی، انتقال حرارت بالا و شکل پذیری خوب، متداول است. در این رابطه شناسایی خرابی‌ها در سازه‌های آلومینیومی برای افزایش قابلیت اطمینان آنها، امری ضروری است. یکی از روش‌های جدید تشخیص عیوب در سازه‌ها، روش انتشار صوت است. بر این اساس، هدف از این مقاله، بررسی و شناسایی خرابی در نمونه‌های آلومینیومی سوراخدار، تحت بار کششی با استفاده از روش انتشار صوت است. برای این منظور نخست نمونه آلومینیومی سوراخدار، تحت بارگذاری کششی قرار گرفت. سپس، موج‌های کشسان انتشار یافته حاصل از ترک در لبه‌های سوراخ توسط حسگر انتشار صوت از نوع نوار پهن ثبت شدند. در بخش نتایج، با استفاده از نمودار تنش- کرنش، ضریب تمرکز تنش اسمی، خالص و بیشترین تنش در اطراف سوراخ، از دو رابطه مختلف به دست آمد و مقایسه شد. برای تشخیص بسامد غالب شکست در قطعه از روش تبدیل فوریه سریع استفاده گردید. در ادامه نیز، بیشترین ولتاژ نشانه انتشار صوت مربوط به شکست به دست آمد. همچنین انرژی تجمعی انتشار صوت نیز با مقدار طول ترک مقایسه گردید و یک رابطه غیرخطی بین این دو متغیر، به دست آمد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

آلومینیوم در صنعت مورد استفاده بسیاری قرار می‌گیرد. به خصوص استفاده از آلیاژ آلومینیوم سری ۲۰۰۰ در سرسیلندر و پیستون موتور خودروها به دلیل سبکی، فرم‌دهی آسان، انتقال حرارت خوب، سوراخ-کاری مطلوب و مقاومت بالا به فراوانی استفاده می‌شود [۱]. به همین دلیل، تعیین خرابی در قطعات آلومینیومی مخصوصاً در اطراف سوراخ‌ها به دلیل تمرکز تنش بالا در این نواحی بسیار حائز اهمیت است. یکی از مباحث در موضوع خرابی‌ها ضریب تمرکز تنش^۱ است که می‌تواند کمک شایانی در آگاه شدن از بیشترین تنش در اطراف سوراخ و به طبع آن پیشگیری از بروز هرگونه مشکل نماید.

یکی از روش‌های تشخیص خرابی در آلومینیوم‌ها و در حالت کلی فلزات، روش انتشار صوت است که تاریخچه استفاده از آن به قبل از میلاد مسیح باز می‌گردد. ابداع این روش به آقای ژوزف کایزر نسبت داده شده است. وی در سال ۱۹۵۰ تلاش نمود به کمک آزمون کشش انواع فلزات و سیگنال‌های انتشار صوت ناشی از آنها حین آزمایشات، خواص انتشار صوت آنها را تعیین کند. تلاش‌های او منجر به شناسایی پدیده‌ای شد که به افتخار او « اثر کایزر » نامیده می‌شود. این اثر بیان می‌کند: « فلزی که تحت بارگذاری بوده و سپس بار از رویش برداشته شده در بارگذاری مجدد تا زمانی که بار به بالاتر از بیشترین بار قبلی نرسیده به هیچ وجه سیگنال انتشار صوتی آزاد نمی‌کند. » امروزه از این پدیده در بازرسی‌های دوره‌ای سلامت سازه‌ها با روش انتشار صوت استفاده می‌شود. اولین کاربرد عملی این پدیده در سال ۱۹۶۴ به وسیله گرین برای بررسی سلامت سازه‌ها انجام شد. فلاور در سال ۱۹۸۶ از آکوستیک امیشن برای از کار افتادگی تانکرهای ذخیره‌سازی فشار بالا استفاده کرد [۲]. بعد از آن استفاده از این روش به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

جعفری و همکاران [۳]، روش انتشار صوت و آموزش شبکه عصبی را در تشخیص سلامت و یا معیوب بودن سوپاپ هوای موتور درحین کارکرد آن بررسی کردند. آنها در ابتدا عیوبی را در سوپاپ ایجاد و مشخصه‌های انتشار صوتی آنها را به دست آوردند. آنها از تبدیل فوریه زمان کوتاه برای تشخیص خرابی و زمان اتفاق افتادن آن روی سیگنال‌های انتشار صوت و آموزش شبکه عصبی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که انتشار صوت روشی مؤثر در تشخیص و نوع خرابی در حوزه‌های زمان و فرکانس است و تشخیص بالای ۹۲٪ در نوع خرابی و یا سالم بودن سوپاپ توسط شبکه عصبی را نشان دادند.

چندروس^۳ و همکاران [۴]، عملکرد سه روش انتشار صوت، ارتعاش و فشار داخل سیلندر را در عیب‌یابی روی موتور بررسی کردند. آنها برای

آزمون‌های خود از یک موتور دیزلی چهار زمانه، دو سیلندر، هوا خنک و تنفس طبیعی در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه استفاده کردند. آنها در آزمون‌های خود چهار عیب فیزیکی عمدی ناشی دریچه دود، نشی دریچه هوا، کاهش پاشش سوخت و پاشش ضعیف افشانه سوخت ایجاد کردند و آنها را به شبکه عصبی آموزش دادند. نتایج آنها نشان داد می‌توان ایرادها را به وسیله شبکه عصبی تا ۹۰٪ شناسایی نمود. پنتوپیدان و سیگوردسون^۴ [۵]، سایش بین پیستون و دیواره سیلندر در دو حالت وجود روانکار و عدم وجود روانکار بر حسب زاویه لنگ را با بکارگیری حسگرهای انتشار صوت مطالعه کردند. آنها تغییرات سرعت زاویه‌ای همراه با تغییر باز و بسته شدن دریچه‌ها و افشانه‌ها بر حسب تغییرات بار ارائه کردند. نتایج آنها منجر به ایجاد الگویی تئوری و قابل توسعه، برای نشان دادن حالت صحیح وجود روغن و حالت عدم وجود آن و یا خراب شد. جیانگ^۵ و همکاران [۶]، از روش انتشار صوت برای بررسی وضعیت احتراق موتور استفاده کردند. در این پژوهش سیگنال-های انتشار صوت عیوبی که در سامانه پاشش و دریچه دود ایجاد کرده بودند ثبت کردند. آنها مبنا را در این موضوع گذاشتند که هرگونه تغییر در احتراق موتور بر روی سیگنال‌های انتشار صوت در سامانه خروج دود همراه است. بر همین اساس تغییر در احتراق موتور با تغییر در اثرات انتشار صوت همراه است. آنها نشان دادند که روش انتشار صوت برای تشخیص این عیوب کارایی مناسبی دارد.

بارلی^۶ و همکاران [۷]، یک روش شناسایی عیوب به وسیله اندازه‌گیری-های غیر مخرب روی سرسیلندر در حین کار ارائه کردند. آنها متغیرهای ارتعاشات و صدا را به فشار درون سیلندر ارتباط دادند. بررسی‌ها با نصب حسگر فشار در داخل سیلندر، حسگر شتاب‌سنج روی سرسیلندر و حسگر دورسنج روی چرخ طیار انجام شدند. نتایج آنها نشان داد داده‌های ارتعاشات و صدای ذخیره شده از روی سرسیلندر کاملاً به پدیده‌های داخل موتور مربوط هستند.

کاسلند و اسکارالا^۸ [۸]، داده‌های انتشار صوت مربوط به دو نوع آلیاژ آلومینیوم را حین بارگذاری کششی ثبت کردند. نتایج آنها نشان داد که روش انتشار صوت، روش مناسبی در تشخیص شکست در قطعات و همچنین شکست‌های کوچک اتفاق افتاده در تغییر شکل پلاستیک است و می‌توان برای پیدا کردن منبع خرابی در قطعه از این روش استفاده کرد. بلانچت^۸ و همکاران [۹]، داده‌های انتشار صوت را در آزمون کشش قطعه آلومینیومی و رشد ترک بررسی کردند. آنها بعد از تعیین چقرمگی شکست با استفاده از مقدار رشد ترک و ضرب آهنگ تجمعی سیگنال‌های انتشار صوت متغیرهای شکست را در قطعه به

5 Jiang

6 Barelli

7 Cousland and Scala

8 Blanchette

1 Stress Concentration Factor (SCF)

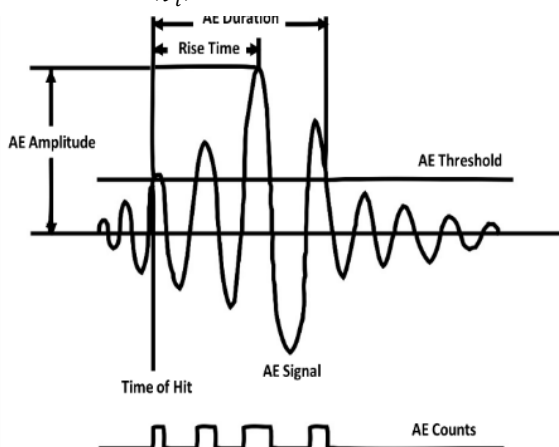
2 Joseph Kaiser

3 Chandroth

4 Pontoppidan and Sigurdsson

بیان می‌شود که در رابطه ۱ نشان داده شده است و به معنای نسبت ولتاژ خروجی (V_o) به ولتاژ ورودی (V_i) است [۱۲]:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_o}{V_i} \right) \quad (1)$$



شکل ۱: سیگنال انتشار صوت و مشخصه‌های مربوط به آن [۱۱].

رابطه ۲ انرژی سیگنال انتشار صوت را نشان می‌دهد که به وسیله مقدار میانگین مربعات در طول زمان محاسبه می‌شود [۲]:

$$E = \int_0^t v^2(t) dt \quad (2)$$

که v مقدار ولتاژ شکل موج انتشار صوت، s زمان و E انرژی انتشار صوت است. هرچه فاصله موج از منبع انتشار بیشتر شود، انرژی موج مطابق رابطه ۳ به صورت نمایی کاهش می‌یابد [۲]:

$$E(x) = E_0 e^{-kx} \quad (3)$$

که E انرژی در فاصله x از منبع، E_0 انرژی منبع، k ضریب افت امواج^۹ و x فاصله از منبع انتشار است.

۲-۲- تجهیزات انتشار صوت

برای ثبت داده‌های انتشار صوت، از دو حسگر نوار پهن^{۱۰} با محدوده فرکانس کاری ۱۰۰-۱۰۰۰ kHz استفاده شد. نرخ داده‌برداری ۱ میلیون داده در ثانیه بود که توسط کارت آنالوگ به دیجیتال PCI-2 انجام شد. کلیه تجهیزات و نرم افزار ثبت داده‌های انتشار صوت، ساخت شرکت PAC^{۱۳} است.

سیگنال‌ها با ضریب ۴۰ دسی‌بل توسط دو پیش تقویت کننده^۴ تقویت شدند و حد آستانه^۵ مناسب با روش سعی و خطا، ۱۰ دسی‌بل تعیین

دست آوردند و با نتایج تئوری مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد می‌توان از ضرب آهنگ تجمعی سیگنال انتشار صوت برای تعیین شروع شکست استفاده کرد.

به عنوان نوآوری و تفاوت در پژوهش حاضر می‌توان به تعیین ضریب تمرکز تنش از طریق دو رابطه و مقایسه آن‌ها، همچنین تعیین فرکانس و دامنه شکست همچنین پیش‌بینی رشد ترک در قطعه با روش انتشار صوت که به ندرت در این زمینه تحقیق شده، اشاره کرد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- انتشار صوت

انتشار صوت پدیده‌ای است که به تولید امواج الاستیکی گذرا در طی مدت زمان آزاد شدن انرژی از یک منبع موجود در محدوده فراصوتی (۲۰ MHz - ۱ kHz) در ماده اشاره می‌کند [۱۰]. متغیرهای متداول سیگنال‌های انتشار صوت که در شکل ۱ نشان داده شده است عبارتند از:

۱- ضرب آهنگ: هر گاه سیگنال از حد آستانه تعریف شده فراتر رود، یک ضربه ثبت می‌شود.

۲- شمارش: تعداد دفعاتی که در طول یک مدت زمان، سیگنال از حد آستانه بیشتر می‌شود. یادآور می‌شود شاخص شمارش کاملاً به حد آستانه مشخص شده و فرکانس کاری بستگی دارد.

۳- دامنه: بیشترین مقدار ولتاژ سیگنال، دامنه نامیده می‌شود. در اندازه‌گیری‌های انتشار صوت، دامنه‌ها بر حسب دسی‌بل بیان می‌شوند. دامنه، وابستگی دقیقی به شدت دامنه منبع اتفاق دارد.

۴- مدت زمان: فاصله زمانی بین نخستین و آخرین ضربه سیگنال انتشار صوت است. مدت زمان به منبع و محدوده‌های فیلتر کردن نویزها بستگی دارد.

۵- زمان صعود: فاصله زمانی بین زمان نخستین ضربه و زمان بزرگترین مقدار سیگنال را مشخص می‌کند. زمان صعود ارتباط دقیقی با تابع زمانی منبع و نوع شکست یا روش حذف نویزها دارد.

۶- انرژی: در سامانه‌های انتشار صوت تعریف انرژی بر اساس مساحت زیر نمودار تعریف می‌شود. این پارامتر به دامنه و زمان استمرار سیگنال بستگی دارد [۱۱].

سیگنال آکوستیک امیسن، اغلب بوسیله پیش تقویت کننده^۴ قبل از فیلتر شدن، تقویت می‌شوند. خروجی تقویت کننده^۴ بر حسب دسی‌بل^{۱۰}

9 The gain of amplifier

1 Decibels (dB)

1 Attenuation factor

1 Wide band (WSA)

1 Physical Acoustic Corporation (PAC)

1 Preamplifier

1 Threshold

1 Acoustic emission (AE)

2 Count

3 Hit

4 Operating frequency

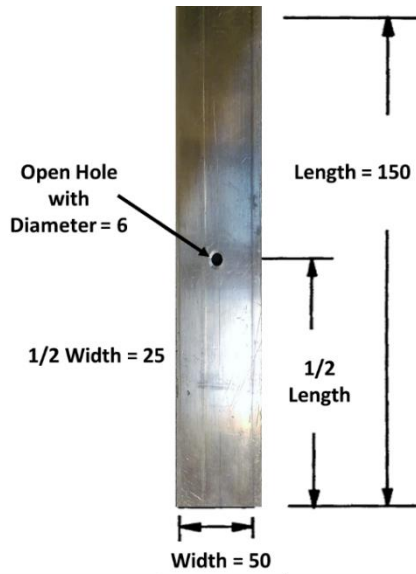
5 Amplitude

6 Duration

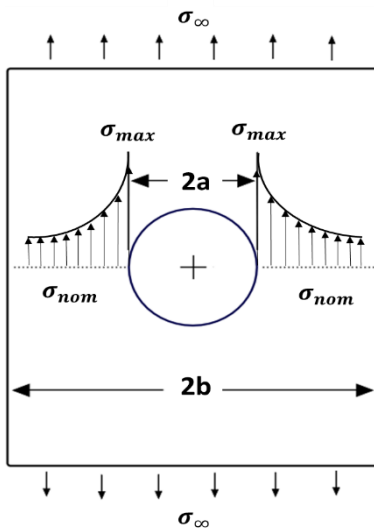
7 Rise time

8 Pre-amplifier

مربوط به آنها نیز ارائه شده است. نمای کلی کشش قطعه در شکل ۴ مشخص شده است [۱۴].



شکل ۳: ابعاد نمونه‌های ساخته شده



شکل ۴: نمای کلی کشش قطعه سوراخدار [۱۳]

مقادیر بیشترین تنش و تنش اسمی در روابط ۴ و ۵ آمده است [۱۴]:

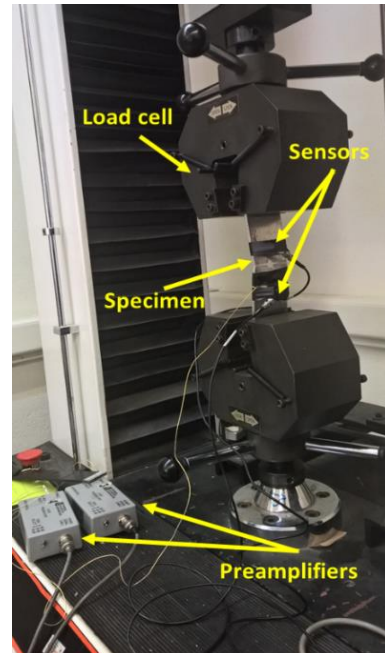
$$\sigma_{\infty} = \frac{P}{b} \quad (4)$$

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{(b-a)} \quad (5)$$

که σ_{∞} بیشترین تنش با وجود سوراخ در قطعه و σ_{nom} تنش در همان نقطه بدون وجود سوراخ می‌باشد [۱۴]. هر دوی این مقادیر از نمودار تنش- کرنش آزمون به دست می‌آید.

با توجه به تعریف تنش اسمی دو ضریب با نام‌های ضریب تمرکز تنش اسمی (K_{tg}) و ضریب تمرکز تنش خالص (K_{tn}) وجود دارد. این دو ضریب تمرکز تنش طبق رابطه ۶ با یکدیگر ارتباط دارند [۱۴].

گردید. برای مطمئن شدن از نحوه کارکرد صحیح حسگرهای انتشار صوت از آزمون مداد قبل از هر آزمون استفاده شد [۱۳]. شکل ۲، نمای کلی آزمون شامل تجهیزات بارگذاری کششی، تجهیزات انتشار صوت و کابل‌های رابط را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمای کلی تجهیزات انتشار صوت

۲-۳- مواد و آزمون‌ها

همه نمونه‌های آزمون کشش از آلیاژ آلومینیوم سری ۲۰۰۰، با ابعاد ۵ میلی‌متر ضخامت، ۵۰ میلی‌متر عرض و ۱۵۰ میلی‌متر ارتفاع که سوراخی به قطر ۶ میلی‌متر در مرکز نمونه‌ها ایجاد شده ساخته شده‌اند. ابعاد نمونه‌ها در شکل ۳ آمده است.

برای بارگذاری کششی نمونه‌ها از دستگاه کشش مدل STM-150 ساخت شرکت ستام با ظرفیت ۱۵ تن با قابلیت تنظیم بارگذاری در محدوده ۰،۱-۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. سرعت بارگذاری قطعات، ثابت و ۲ میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری شبه استاتیکی بود.

۲-۴- ضریب تمرکز تنش

سوراخ‌هایی که معمولاً در صفحات جهت اتصالات و یا مجاری مورد نظر ایجاد می‌شوند یکی از مناسب‌ترین محل‌ها برای شروع خرابی به شمار می‌آید. علت اصلی این موضوع افزایش تنش در این محل‌ها است. این افزایش تنش تا جایی پیش می‌رود که منجر به شکست در قطعه نیز می‌گردد. به همین دلیل بررسی مقدار تنش و توزیع آن در اطراف سوراخ‌ها امری اجتناب ناپذیر است. ضریب تمرکز تنش، نسبت بیشترین تنش با وجود سوراخ به تنش در همان نقطه بدون وجود سوراخ تعریف می‌شود. ضریب تمرکز تنش برای اشکال مختلف با سوراخ‌های مختلف به طور وسیعی توسط افراد بسیاری مورد بررسی قرار گرفته و روابط

$$K_{tg} = 3C = \frac{3}{1 - 0.5a^2/b^2 - 0.5a^4/b^4} \quad (11)$$

زمانی که نسبت قطر سوراخ به عرض قطعه به سمت صفر میل پیدا کند ضریب تمرکز تنش اسمی برابر ۳ می‌شود و زمانی که نسبت قطر سوراخ به عرض قطعه به سمت یک میل پیدا کند ضریب تمرکز تنش اسمی به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. برای اصلاح مقدار ضریب تمرکز تنش اسمی رابطه ۱۱ به شکل رابطه ۱۲ درمی‌آید [۱۷]:

$$K_{tg} = 3C = \frac{3}{1 - k_1 a^2/b^2 - k_2 a^4/b^4} \quad (12)$$

که k_1 و k_2 ضرایبی هستند که به دست آیند. از آنجاییکه نسبت قطر سوراخ به عرض قطعه به سمت یک میل پیدا کند، ضریب تمرکز تنش اسمی به سمت بی‌نهایت میل می‌کند که رابطه ۱۳ به دست می‌آید [۱۷]:

$$1 - k_1 - k_2 = 0 \quad (13)$$

و در این حالت طبق قانون ال-هوپیتال^۱ و رابطه ۸، روابط ۱۴ و ۱۵ حاصل می‌شود [۱۷].

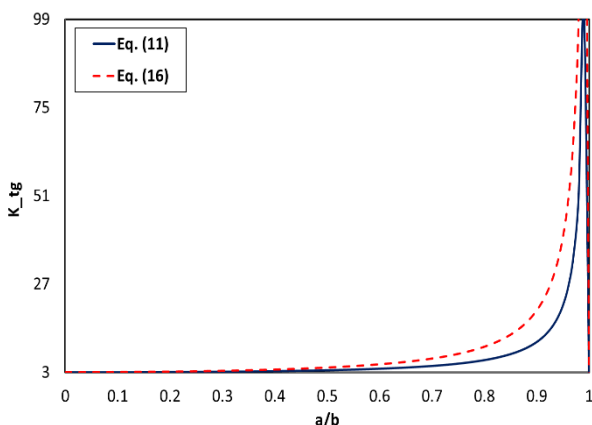
$$\lim_{a/b \rightarrow 1} K_{tn} = \lim_{a/b \rightarrow 1} \frac{3(1 - a/b)}{1 - k_1 a^2/b^2 - k_2 a^4/b^4} = 2 \quad (14)$$

$$2k_1 + 4k_2 = 1.5 \quad (15)$$

از حل روابط ۱۳ و ۱۵ مقدار k_1 برابر ۱،۲۵ و مقدار k_2 برابر ۰،۲۵- می‌شود و مقدار ضریب تمرکز تنش اسمی از رابطه ۱۶ به دست می‌آید [۱۷]:

$$K_{tg} = 3C = \frac{3}{1 - 1.25a^2/b^2 + 0.25a^4/b^4} \quad (16)$$

نمودار ضریب تمرکز تنش اسمی طبق دو رابطه ۱۱ و ۱۶ در شکل ۶ مشخص شده است.



شکل ۶: نمودار ضریب تمرکز تنش اسمی بر اساس رابطه ۱۱ و رابطه

۱۶

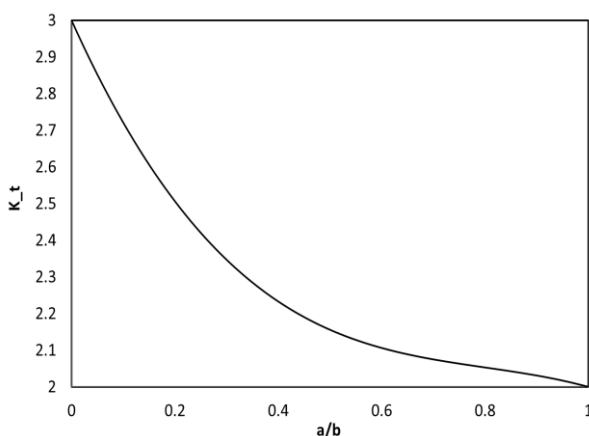
$$K_{tn} = K_{tg} \left(1 - \frac{a}{b}\right) \quad (6)$$

ضریب تمرکز تنش تئوری بر اساس روابط ۷ و ۸ تعریف می‌شود [۱۵].

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (7)$$

$$K_t = 3 - 3.14 \left(\frac{a}{b}\right) + 3.667 \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 1.527 \left(\frac{a}{b}\right)^3 \quad (8)$$

که σ_{max} طبق شکل ۴ به عنوان بیشترین تنش در لبه سوراخ می‌باشد. ضریب تمرکز تنش برای صفحات نامحدود برابر ۳ می‌شود، یعنی بیشترین تنش در اطراف سوراخ ۳ برابر تنش نهایی می‌شود. ضریب تمرکز تنش تئوری در قطعه آلومینیومی با توجه به نسبت قطر به عرض قطعه ۰،۱۲ و شکل ۵ برابر با ۲۶۷۳۳۶۶ به دست آمده است [۱۵]. طبق رابطه ۶ و مقدار ضریب تمرکز تنش تئوری، بیشترین تنش در لبه سوراخ برابر با ۲۸۲،۷۰۵۷ MPa به دست آمد.



شکل ۵: نمودار ضریب تمرکز تنش بر اساس نسبت قطر به عرض

در شکل ۴ اگر عرض قطعه به سمت بی‌نهایت میل کند، توزیع تنش (σ_y) طبق تئوری الاستیسیته برای صفحات با عرض نامحدود مطابق با رابطه ۹ خواهد شد [۱۶]:

$$\sigma_y = \frac{\sigma}{2} \left(2 + \frac{a^2}{x^2} + \frac{3a^4}{x^4}\right) \quad (9)$$

برای اینکه بتوان رابطه ۹ را برای صفحات با عرض محدود نیز استفاده کرد یک ضریب اصلاح (C) در سمت راست رابطه ضرب می‌شود. رابطه ۹ مربوط به یک طرف سوراخ و عرض دلخواه می‌شود. در نتیجه رابطه ۱۰ برای دو طرف سوراخ برقرار می‌شود [۱۶].

$$2 \int_a^w \frac{C\sigma}{2} \left(2 + \frac{a^2}{x^2} + \frac{3a^4}{x^4}\right) dx = 2\sigma b \quad (10)$$

با به دست آوردن (C) از رابطه ۱۰ و دانستن تمرکز تنش برابر با ۳ برای صفحات سوراخدار با عرض نامحدود طبق شکل ۵، ضریب تمرکز تنش اسمی صفحات با عرض محدود به صورت رابطه ۱۱ می‌شود [۱۶].

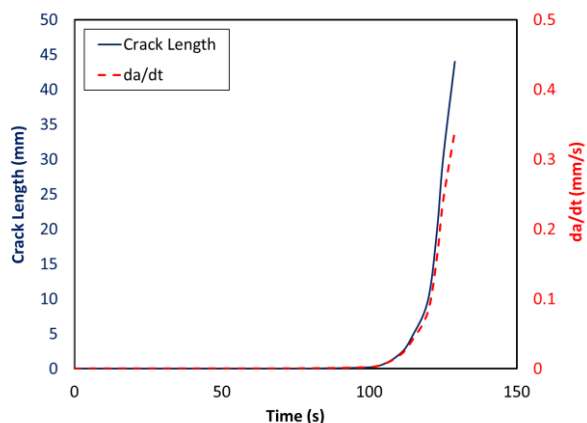
¹ L'Hopital

۳- نتایج

می‌باشد. این خطای نسبی برای بیشترین تنش نیز، کمتر از ۱ درصد محاسبه شده است که نشان از تطابق خوب نتایج این تحقیق، با سایر نتایج می‌باشد.

۳-۲- طول ترک و نرخ رشد ترک

بر اساس فیلم گرفته شده از آزمون کشش قطعه آلومینیومی رشد ترک و نرخ رشد ترک بر حسب زمان به دست آمد که در شکل ۸ این نمودار رسم شده است (به خاطر تقارن در شکل مقدار رشد ترک دو برابر حساب شده است). همان گونه که مشخص است، رفتار رشد ترک بصورت افزایشی است. همچنین در شکل ۹ رشد ترک در زمان ۲ دقیقه بعد از شروع آزمون و شکل ۱۰ رشد ترک در زمان ۳ دقیقه و ۳ ثانیه بعد از شروع آزمون به عنوان نمونه نشان داده شده است. شکل نهایی شکست نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

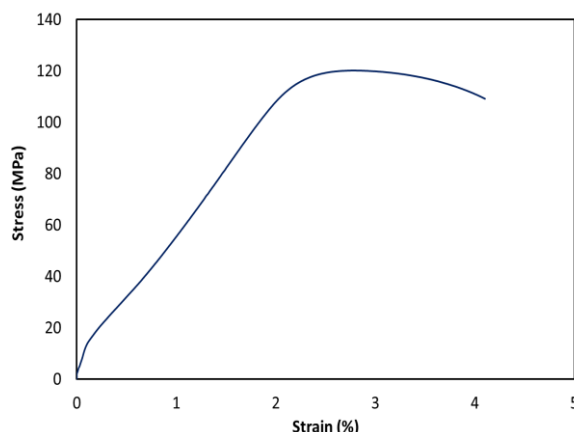


شکل ۸: نمودار رشد ترک و نرخ رشد ترک آزمون کشش قطعه آلومینیومی



شکل ۹: رشد ترک در زمان ۱۲۰ ثانیه بعد از شروع آزمون کشش قطعه آلومینیومی

۳-۱- بیشینه تنش در اطراف سوراخ
طبق نمودار تنش- کرنش مطابق شکل ۷، مقادیر مربوط به آزمون کشش قطعه آلومینیومی در جدول ۱ نشان داده شده است. در ادامه نیز، طبق روابط گفته شده در بخش ۲-۴، نتایج به دست آمده در جدول ۲ آمده و با نتایج سایر محققین مقایسه شده است.



شکل ۷: نمودار تنش- کرنش مربوط به آزمون کشش قطعه آلومینیومی

جدول ۱: مشخصات مربوط به آزمون کشش قطعه آلومینیومی

ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه
۱	بیشترین تنش	۱۲۰,۱۶۹ MPa
۲	کرنش در بیشترین تنش	۲,۸ %
۳	تنش تسلیم	۱۰۲,۶۹۲ MPa
۴	کرنش در تنش تسلیم	۱,۹ %
۵	تنش شکست	۱۰۹,۱۸۳ MPa
۶	کرنش در تنش شکست	۴,۱ %
۷	بیشترین تنش اسمی	۱۰۵,۷۴۹ MPa
۸	ضریب تمرکز تنش تئوری	۲,۶۷۳۳۶۶
۹	بیشترین تنش تئوری در لبه سوراخ	۲۸۲,۷۰۶ MPa

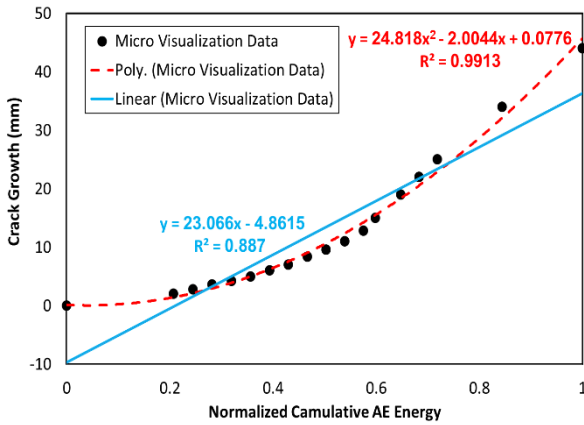
جدول ۲: مشخصات مربوط به آزمون کشش قطعه آلومینیومی

نوع نتایج	تحقیق حاضر		مرجع [۱۷]	
	۱۱	۱۶	۱۱	۱۶
رابطه				
K_{tg}	۳,۰۲۱۴۴۱	۳,۰۵۴۸۲۹	۳,۰۳	۳,۰۴
	۲,۶۵۸۸۶۸	۲,۶۸۸۲۴۹	۲,۶۶۶۴	۲,۶۷۵۲
for σ_{max} K_{tg}	۳۱۹,۵۱۴	۳۲۳,۰۴۵	۳۲۰,۴۲۰	۳۲۱,۴۷۷
	MPa	MPa	MPa	MPa
for σ_{max} K_{tn}	۲۸۱,۱۷۳	۲۸۴,۲۸۰	۲۸۱,۹۷۰	۲۸۲,۹۰۰
	MPa	MPa	MPa	MPa

همان گونه که از نتایج جدول ۲ برمی‌آید، خطاهای نسبی در مقایسه با نتایج مرجع [۱۷]، برای مقادیر ضریب تمرکز تنش، کمتر از ۰,۵ درصد

رابطه غیر خطی بین مقدار رشد ترک و انرژی تجمعی انتشار صوت در رابطه ۱۷ آمده است که y طول ترک و x مقدار انرژی تجمعی مربوط به سیگنال انتشار صوت است.

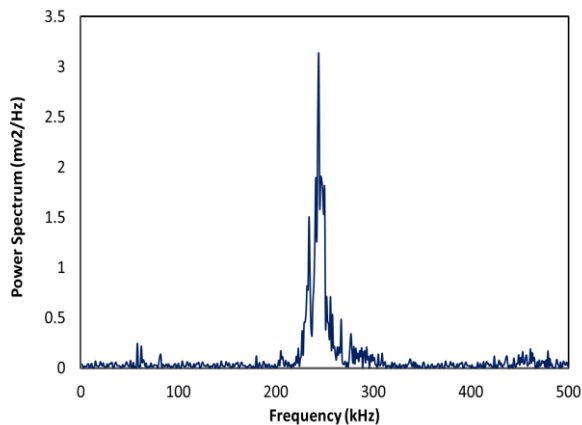
$$y = 24.818x^2 - 2.0044x + 0.0776 \quad (17)$$



شکل ۱۲: رابطه مقدار رشد ترک و انرژی تجمعی سیگنال انتشار صوت

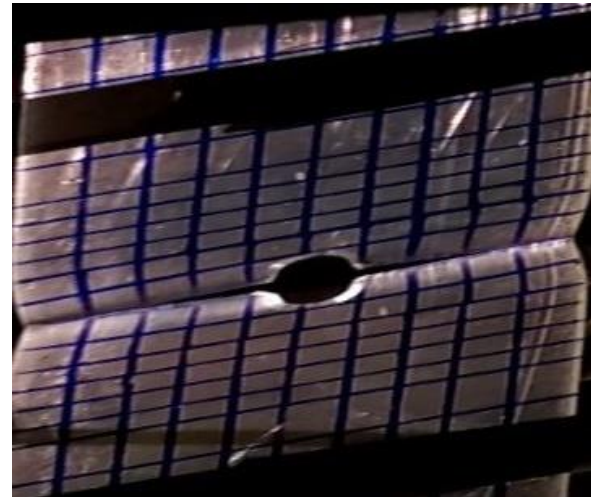
۳-۴- داده‌های سیگنال انتشار صوت

ابتدا برای مشخص شدن فرکانس غالب شکست در این قطعات از روش تبدیل فوریه سریع استفاده شده و با توجه به نرخ داده برداری و معیار نایکوئیست بازه فرکانسی از صفر تا ۵۰۰ kHz می‌شود. نتیجه حاصل شده با توجه به شکل ۱۳، بازه فرکانسی ۲۱۰ kHz تا ۳۰۰ kHz را برای شکست در قطعه آلومینیومی نشان می‌دهد.

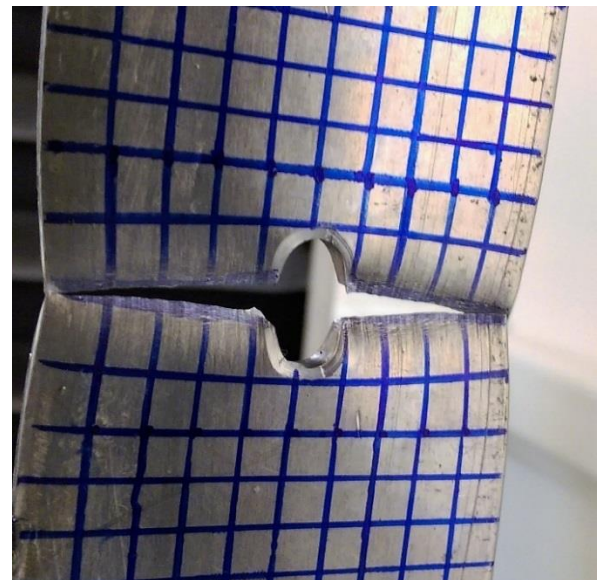


شکل ۱۳: بازه فرکانسی مربوط به شکست در آلومینیوم

در ادامه، همانطور که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است، می‌توان به تشخیص خوب روش انتشار صوت با توجه به انرژی آزاد شده حین آزمون در تعیین شروع کشیدگی قطعه در لحظه بیشترین مقدار تنش، متناظر با شروع ترک و افت تنش، متناظر با پایان رشد ترک اشاره کرد.



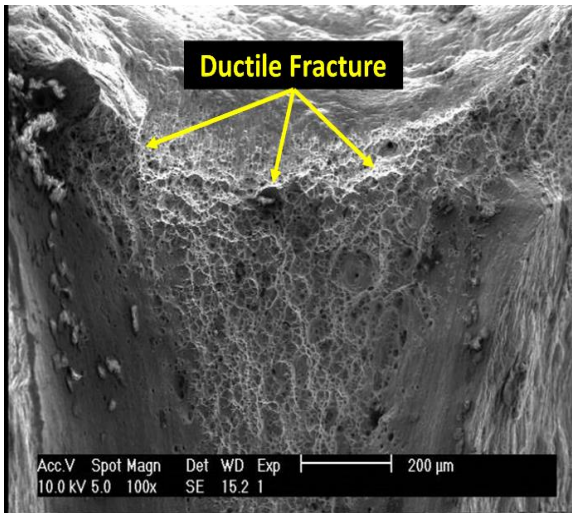
شکل ۱۰: رشد ترک در زمان ۱۲۳ ثانیه بعد از شروع آزمون کشش قطعه آلومینیومی



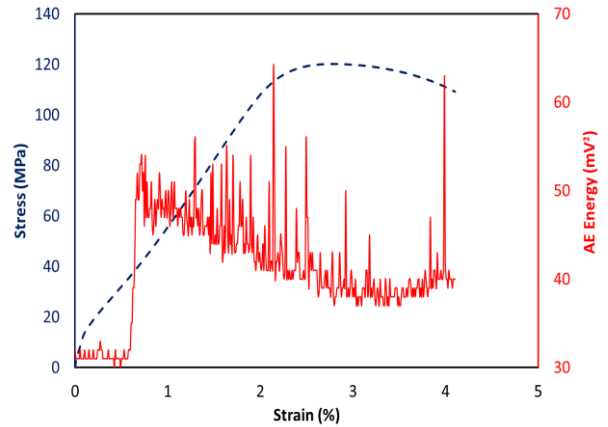
شکل ۱۱: شکل نهایی شکست قطعه آلومینیومی

۳-۳- پیش‌بینی رشد ترک با استفاده از انرژی تجمعی انتشار صوت انرژی تجمعی سیگنال‌های انتشار صوت که از داده‌های انتشار صوت و مقدار رشد ترک بر حسب زمان که از فیلم برداری حین آزمون به دست آمده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است هر دو از صفر شروع شده و با افزایش رشد ترک مقدار انرژی سیگنال‌های انتشار صوت نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین با توجه به مقدار پراکندگی داده‌ها در روابط نشان داده شده در شکل ۱۲ می‌توان گفت که رشد ترک با انرژی تجمعی رابطه غیر خطی دارد و نمی‌توان به رابطه خطی بین این دو اعتماد کرد. با توجه به رابطه غیر خطی نشان داده شده می‌توان با استفاده از انرژی تجمعی سیگنال‌های انتشار صوت مکان نوک ترک را پیش‌بینی کرد.

¹ Fast Fourier Transform (FFT)

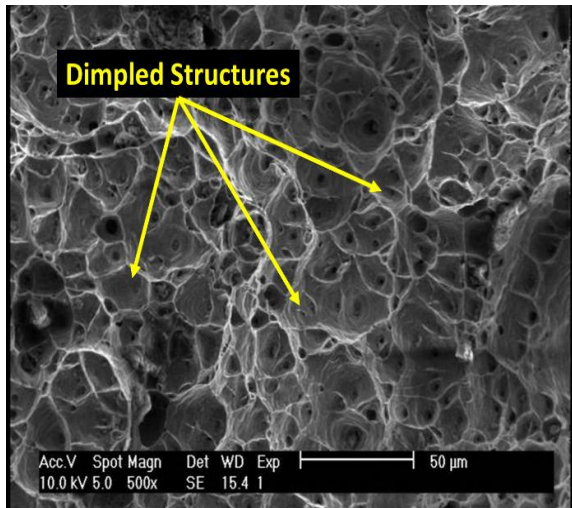


شکل ۱۶: شکست در لبه سوراخ

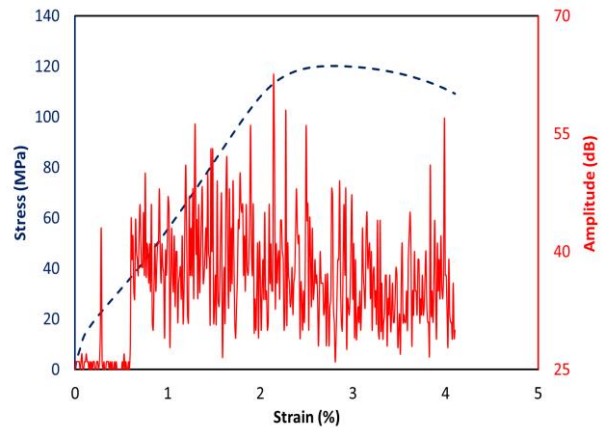


شکل ۱۴: نمودار تنش- کرنش و انرژی سیگنال انتشار صوت

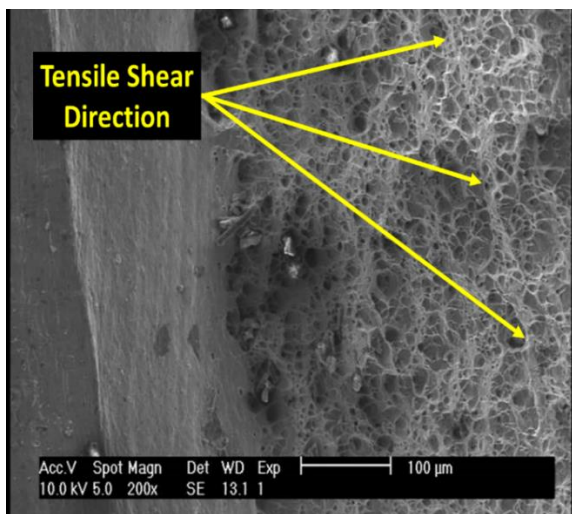
همچنین برای تعیین بیشترین مقدار ولتاژ سیگنال انتشار صوت مربوط به شروع شکست در قطعه می‌توان از مقایسه داده‌های انتشار صوت و نمودار تنش- کرنش استفاده نمود و بیشترین مقدار ولتاژ شکست را بر حسب دسی‌بل تعیین کرد. همانطور که از شکل ۱۵ مشخص است، دامنه مربوط به شروع شکست ۶۲ دسی‌بل و دامنه مربوط به پایان رشد ترک ۵۵ دسی‌بل می‌باشد.



شکل ۱۷: نقطه شروع شکست در لبه سوراخ



شکل ۱۵: نمودار تنش- کرنش و دامنه سیگنال انتشار صوت



شکل ۱۸: سطح شکست در امتداد سوراخ

۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این قسمت تصاویر مربوط به قطعه آزمون به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی، نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۶ که مربوط به نقطه شروع شکست می‌شود می‌توان به این نتیجه رسید که شکست در آزمون کشش قطعه، شکست نرم^۱ بوده، همچنین با توجه به شکل ۱۷ ساختارهای حفره‌ای^۲ به وضوح دیده می‌شود که در آزمون کشش قطعات آلومینیومی به وجود می‌آید که با تحقیقات پیشین نیز مطابقت دارد [۱۸-۱۹]. در انتها جهت سطح شکست در امتداد سوراخ در شکل ۱۸ قابل مشاهده است.

² Dimpled Structures

¹ Ductile Fracture

Ball, Monitoring of Diesel Engine Combustions Based on the Acoustic Source Characterization of the Exhaust System, Mechanical System and Signal Processing, Vol. 22, pp. 1465-1480, 2008

[7] L. Barelli, G. Bidini, C. Buratti, R. Mariani, Diagnosis of Internal Combustion Engine Through Vibration and Acoustic Pressure Non-Interasive Measurement, Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 1707-1713, 2009

[8] K. Cousland and C.M. Scala, Acoustic Emission During the Plastic Deformation of Aluminum Alloys 2024 and 2124, Material Science and Engineering, Vol. 57, pp. 23-29, 1983

[9] Y. Blanchette, J.I. Dickson and M.N. Bassim, Acoustic Emission Behavior Crack Growth of 7075-T651 Al Alloy, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 24, No. 5, pp. 647-656, 1986

[10] A.G. Beattie, Acoustic Emission, Principles and Instrumentation, Journal of Acoustic Emission, Vol. 2, pp. 95-128, 1983

[11] ISO 12716, Non-Destructive Testing - Acoustic Emission Inspection - Vocabulary, 1998

[12] P.E. Mix, Introduction to Nondestructive testing: a training guide, Wiley, 2005

[13] ASTM E976-10, Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

[14] J.E. Shigley, C.R. Mischke, Standard Hand book of Machine Design, McGraw Hill, 1986

[15] W.D. Pilkey, Peterson's Stress Concentration Factors, NY: John Wiley & Sons Inc., Second Edition, 1997

[16] S.P. Timoshenko and J.N. Goodier, Theory of Elasticity, McGraw-Hill, New York, 3rd edition, 1970

[17] Q.Z. Wang, Simple Formulae for the Stress Concentration Factor for Two and Three Dimensional Holes, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 37, No. 3, pp. 257-264, 2002

[18] J. Chen, X. Yuan, Z. Hu, T. Li, K. Wu, C. Li, Improvement of Resistance-Spot-Welded Joints for DP 600 Steel and A5052 Aluminum Alloy with Zn Slice Interlayer, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 30, pp. 396-405, 2017

[19] M. Tocci, A. Pola, L. Montesano, M. Merlin, G.L. Garagnani, G.M. La Vecchia, Tensile Behavior and Impact Toughness of an AlSi3MgCr Alloy, Procedia Structural Integrity, Vol. 3, pp. 517-525, 2017

۵- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا ضریب شدت تنش اسمی طبق دو رابطه محاسبه و بر اساس آنها ضریب شدت تنش خالص نیز به دست آمد. همچنین بر اساس دو مقدار گفته شده بیشترین تنش اسمی و خالص در لبه سوراخ نیز محاسبه شد در ادامه رابطه غیر خطی بین مقدار رشد ترک و انرژی تجمعی انتشار صوت برای پیش‌بینی رشد ترک تعیین شد و پس از آن بازه فرکانسی غالب شکست در قطعه برابر ۲۱۰ kHz تا ۳۰۰ kHz مشخص گردید. در انتها مقدار بیشترین ولتاژ سیگنال انتشار صوت مربوط به شکست در قطعه آلومینیومی ۶۲ دسی‌بل به دست آمد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان به تشخیص و مشخص کردن زمان شروع ترک در قطعات آلومینیومی موتور، روند رشد آن و نیز مکان آن با استفاده از روش انتشار صوت اشاره کرد. با توجه به اهمیت موضوع خستگی در قطعات در ادامه روند این پژوهش می‌توان بررسی خستگی در قطعات آلومینیومی موتور با استفاده از روش انتشار صوت را مورد مطالعه قرار داد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، برای حمایت مالی ایشان در زمینه اجرای آزمون‌ها و استفاده از تجهیزات انتشار صوت، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- [1] G. Mathers, The Welding of Aluminium and its Alloy, Woodhead Publishing Ltd, pp. 7, 2002
- [2] C.U. Grosse and O. Masayasu, Acoustic Emission Testing, Springer, 2008
- [3] S.M. Jafari, H. Mehdigholi and M. Behzad, Valve Fault Diagnosis in Internal Combustion Engines Using Acoustic Emission and Artificial Neural Network, Shock and Vibration, Vol. 2014, 9 pages, 2014
- [4] G. Chandroth, A. Sharkey and N. Sharkey, Cylinder Pressures and Vibration in Internal Combustion Engine Condition Monitoring, Proceeding of Comadem, Vol. 99, pp. 294-297, 1999
- [5] N.H. Pontoppidan and S. Sigurdsson, Independent Component in Acoustic Emission Energy Signals from Large Diesel Engines, International Journal of Comadem, 2005
- [6] J. Jiang, F. Gu, R. Gennish, D. Moore, G. Harris, A.



Investigation of crack growth behavior in aluminum alloy used in engine components, by acoustic emission method

H. Sayar¹, M. Alizadeh², M. Azadi^{3*}, A. Ghasemi-ghalebahman⁴, S. M. Jafari⁵, A. Mafi⁶

¹Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, hassan.sayyar@semnan.ac.ir

²Faculty of Aerospace Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, mohsen.alizadeh@semnan.ac.ir

³Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, m_azadi@semnan.ac.ir

⁴Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, ghasemi@semnan.ac.ir

⁵Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, m_jafari@sbu.ac.ir

⁶Irankhodro Powertrain Company (IPCo), Tehran, Iran, a_mafi@ip-co.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 August 2017

Accepted: 13 January 2018

Keywords:

Aluminum alloy

Crack growth

Acoustic emission

Stress concentration factor

Tensile loading

ABSTRACT

Aluminum alloys have been widely used in the engine industry. This is due to low weight, high heat transfer and proper ductility of aluminum alloys. To obtain appropriate reliability, detecting damages in aluminum structures is important. One way to detect defects is the acoustic emission (AE) approach. Therefore, the objective of this article is to detect damages in an open-hole aluminum alloy specimen, under tensile loading. Firstly, the specimen was tested and elastic waves (according to cracks from the hole) were measured by AE sensors. As a result, nominal and pure stress concentration factors and the maximum stress around the hole were calculated by two formulations and then, they were compared. For the fracture frequency in the specimen, the fast Fourier transform was utilized and the AE maximum voltage of the failure was obtained. Then also, the cumulative AE energy was compared to the crack length and a non-linear relation was fitted to experimental data.

