



مطالعه رفتار خستگی فولاد آ.آ.اس.آی ۱۰۴۵ با استفاده از دستگاه آزمایش خستگی فراصوتی

سعید امینی^{۱*}، محسن آقایی^۱

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۰
بازنگری: ۱۳۹۵/۰۳/۱۹
پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۵/۰۸/۱۹

کلمات کلیدی:

خستگی
چرخه بسیار بالا
پیزوالکتریک
مافوق صوت
فولاد آ.آ.اس.آی ۱۰۴۵

خلاصه: در استفاده از فلزات با توجه به پیشرفت های صورت گرفته، توجه به مساله خستگی امری ضروری می باشد. در دو دهه اخیر شاخه جدیدی در عمر خستگی به نام خستگی در چرخه خیلی زیاد مورد توجه محققان قرار گرفته است که دسترسی به این تعداد چرخه (10^7 به بالا) در عمل با استفاده از دستگاه های آزمایش امروزی به دلیل فرکانس های پایین آن ها زمانبر و پرهزینه می باشد. از طرفی برای بسیاری از مواد، شکست خستگی بعد از 10^7 چرخه گزارش شده است. بررسی خواص خستگی در چرخه خیلی زیاد، مساله ای قابل توجه برای حصول اطمینان از عمر زیاد و قابل اطمینان ماشین آلات با توجه به مطالبات رو به رشد صنعتی می باشد. برای دستیابی به این تعداد چرخه از دستگاه آزمایش تست خستگی با فرکانس کاری در حدود 20000 هرتز استفاده می شود که با توجه به فرکانس بالا، کاهش زمان و دستیابی به چرخه های بالا از مزایای این دستگاه می باشد. لذا در این مقاله به عنوان کاری جدید در کشور، به طراحی و ساخت دستگاهی با روش فرا صوتی و سپس مطالعه رفتار خستگی نمونه های فولادی پرداخته می شود.

۱- مقدمه

بسیاری از اجزای ساختاری متحمل بارگذاری بالاتر از 10^7 چرخه می شوند، اما خصوصیات مواد و پیش بینی خستگی به طور معمول بر اساس اطلاعات، محدود به محدوده های بین 10^6 و 10^7 چرخه می باشد و این موضوع به این دلیل می باشد که تجهیزات آزمایش خستگی مربوط به دهه های گذشته دارای سرعت کمتر از 200 چرخه در ثانیه بودند؛ بنابراین، آزمایش در محدوده فراتر از 10^7 چرخه بسیار زمان بر است. عمر خستگی در موتور خودروهای فعلی در محدوده 10^8 چرخه و برای موتورهای دیزل بزرگ کشتی یا قطار با سرعت بالا تا محدوده 10^9 چرخه می باشد. امروزه چرخه عمر خستگی در اجزای موتور توربین 10^{10} چرخه می باشد. پدیده شکست خستگی در محدوده چرخه خیلی زیاد^۱ در بسیاری از آلیاژها به طور گسترده مورد توجه واقع شده است [۱ و ۲]. با توجه به این شرایط، محققان تلاش نمودند تست های شتاب یافته را که در فرکانس بالا عمل می کنند توسعه دهند [۳].

استفاده از امواج فراصوتی در مکانیک پدیده ای رو به پیشرفت است. به طور مثال در ماشین کاری ارتعاشی که از نظر تجهیزات مورد نیاز تا حدی شبیه به تجهیزات مورد نیاز این پژوهش می باشد،

1 Very High Cycle Fatigue (VHCF)

* نویسنده عهده دار مکاتبات: amini.s@kashanu.ac.ir

کارهای فراوانی صورت گرفته است. محققان و امینی [۴] در مقاله ای در سال ۲۰۱۴ تاثیر ارتعاش فراصوت را در جوش اصطکاکی بررسی کردند و شاهد کاهش نیروی لازم برای این فرایند در حضور ارتعاش فراصوتی بودند. حکیمی و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۵ در پژوهشی شاهد کاهش نیرو و بهبود صافی سطح ماده و کاهش لبه انباشته در ماشین کاری ارتعاشی چرخشی بودند.

روش آزمایش خستگی با امواج فراصوت تفاوت هایی با روش آزمایش خستگی معمولی که محدود به فرکانس 100 هرتز می باشد، دارد. فرکانس آزمایش خستگی فراصوتی بین دو مقدار 15 و 25 کیلوهرتز متغیر می باشد که معمولاً فرکانس 20 کیلوهرتز در نظر گرفته می شود. با استفاده از این فرکانس بالا، زمان و هزینه برای به دست آوردن حد خستگی (در صورت وجود) و یا داده های آستانه نرخ رشد ترک می تواند به طور چشمگیری کاهش یابد. به عنوان مثال، زمان آزمایش برای 10^7 چرخه با استفاده از روش فراصوت 9 دقیقه می باشد، در حالی که آزمایش خستگی معمولی با فرکانس 100 هرتز برای این تعداد چرخه، حدود 12 روز طول خواهد کشید. حتی برای چرخه های بالاتر برای مثال، 10^9 چرخه به روش مافوق صوت تنها 14 ساعت نیاز است، در حالی که برای یک نمونه تنها در فرکانس 100 هرتز، بیش از 3 سال طول خواهد کشید.

ساخت دستگاه تست خستگی به روش التراسونیک بیش از یک دهه است که آغاز شده و دریچه‌ای جدید را که در گذشته دسترسی به آن با توجه به فرکانس پایین و هزینه آور بودن امکان نداشت، بر روی محققان باز نموده است. تمامی دستگاه‌هایی که از روش ترانسدیوسر پیزوالکتریکی استفاده می‌کنند شامل بخش‌های ثابت ژنراتور، ترانسدیوسر پیزوالکتریکی و هورن می‌باشند و دیگر دستگاه‌ها در ویژگی‌های دیگر نظیر اعمال بار پیچشی، خستگی سایشی، استفاده از سنسورهای مدرن تر نظیر لیزرهای سه‌بعدی، دوربین‌های حرارتی، استفاده در شرایط محیطی متفاوت و غیره، دارای تفاوت هستند. در ایران طبق تحقیقات صورت گرفته توسط نویسندگان تاکنون در مورد این موضوع تحقیقی صورت نگرفته است. همچنین در مورد آلیاژ مورد تحقیق، در میان تحقیقات سایر کشورها نیز با این دستگاه آزمایشی صورت نگرفته است.

۱-۱- دستگاه آزمایش خستگی فراصوتی، مزیت‌ها و معایب

در آزمایش خستگی فراصوتی، فرکانس‌های خارجی ایجاد شده توسط دستگاه آزمون باید یکی از فرکانس‌های طبیعی نمونه باشد یا به عبارتی فرکانس طبیعی دستگاه می‌بایست برابر فرکانس اعمالی باشد. بنابراین هندسه دستگاه که شامل ترانسدیوسر، ابزار تقویت‌کننده و قطعه کار می‌باشد، نیازمند طراحی برای رسیدن به فرکانس طبیعی برابر با فرکانس اعمالی که در حدود ۲۰ کیلوهرتز، می‌باشد. برای نمونه خستگی با سطح مقطع متغیر، دامنه کرنش و تنش در هر قسمت متفاوت است. برای تسریع در آزمایش خستگی، نمونه خستگی فراصوتی در اکثر مواقع با کاهش سطح مقطع در ناحیه میانی آن طراحی می‌شود. مزیت‌ها و معایب آزمایش خستگی فراصوتی در ادامه [۹ و ۱۳-۱۴]:

۱-۱-۱- مزایا

- زمان کمتر آزمایش:

آزمایش خستگی فراصوتی نیاز به زمان آزمایش به‌طور متوسط ۱۰۰-۱۰۰۰ بار کوتاه‌تر از آزمایش با تجهیزات معمولی دارد؛ بنابراین، ممکن است به تعداد بسیار بالایی از چرخه (10^8-10^9 چرخه) در کمتر از ۱ روز رسید. زمان آزمایش کوتاه امکان بررسی تعداد زیادی از نمونه‌ها در مدت زمان خاص را می‌دهد. این امر به‌ویژه برای مواد ناهمگن که در آن آزمایش‌های متعدد برای به دست آوردن داده‌های قابل اعتماد لازم است مهم می‌باشد.

- کاهش مصرف انرژی:

برای نیروی بارگذاری در حالت تشدید، توان مورد نیاز برای انجام آزمایش خستگی نسبتاً کم است. همچنین از آنجایی که آزمون خستگی ممکن است در مدت زمان کوتاهی انجام شود، بنابراین مقدار کمی از انرژی مصرف می‌شود.

- امکان پذیر بودن روش آزمایش برای شرایط مختلف

مطالعات طول عمر، شروع ترک خستگی و انتشار ترک خستگی در فرکانس بالا ممکن است تحت بارگذاری کششی فشاری همچنین

از جمله مزایای آزمایش خستگی فراصوت می‌توان به زمان کمتر آزمایش، کاهش انرژی مصرفی، روش آزمایش ممکن برای حالت‌های مختلف و مواد مختلف و شیوه مناسب برای نصب قطعه کار اشاره کرد [۶]. فعالیت‌های میسون در سال ۱۹۵۰ [۷] در توسعه روش‌های آزمایش خستگی فراصوت اهمیت بسیاری دارد. طراحی دستگاه ۲۰ کیلوهرتز میسون به عنوان پایه و اساس دستگاه‌های آزمایش خستگی مدرن استفاده می‌شود. در سال ۱۹۹۹ بسیز [۸] عنوان کرد که عمر نامحدود برای بیشتر مواد فلزی وجود ندارد و تصور یک مجانب افقی برای آلیاژها بعد از 10^7 چرخه اشتباه می‌باشد و مجانب تعریف شده هیچ تضمینی برای طراحی نیست. خروجی‌های وی توسط یک دستگاه آزمایش خستگی فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز بدست آمد و وی اثر فرکانس و اتلاف حرارتی ناشی از آن را در کار خود ناچیز پنداشت. ابرا [۹] در سال ۲۰۰۶ در یک مقاله مروری به بحث در مورد روش آزمایش خستگی فراصوتی پرداخت و نتیجه گرفت که این روش می‌تواند روشی مفید برای آزمایش استحکام خستگی باشد. پیتل و شوئرت [۱۰] در سال ۲۰۱۱ در مقاله‌ای مروری تحت عنوان آیا حد خستگی وجود دارد، به بررسی تحقیقات صورت گرفته در مورد رفتار خستگی و مکانیسم‌های شکست در ناحیه خستگی در چرخه خیلی زیاد پرداختند. واگنر و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۲ به بررسی رفتار خستگی فولاد در دمای بالا پرداختند. دما در این فرایند بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه و بارگذاری به طور کاملاً معکوس اعمال شد. اکثر تحقیقات قبلی صورت گرفته در ناحیه خستگی در چرخه خیلی زیاد در دمای اتاق بوده و کار ایشان از این نظر دارای اهمیت می‌باشد. ماده مورد استفاده در کار واگنر فولاد آستنیتی به دلیل خواص: استحکام بالا، تغییر کم مدول یانگ با دما و مقاومت مناسب می‌باشد. هینز و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۳ بر روی خواص آلیاژ Ti6Al4V در ناحیه خستگی در چرخه خیلی زیاد تحقیقی انجام دادند و شاهد کاهش استحکام خستگی در این ناحیه بودند. استنلز [۱۳] در سال ۲۰۱۴ در مقاله‌ای مروری به بررسی روش آزمایش خستگی در ناحیه خستگی در چرخه خیلی زیاد پرداخته و بیان نمود که با توجه به در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف نظیر قیمت و کیفیت، با در نظر گرفتن تجربه شخص نویسنده روش آزمایش خستگی فراصوتی روش کاربردی و مؤثری می‌باشد. با توجه به پیشرفت صورت گرفته در زمینه خستگی در چرخه خیلی زیاد، امروزه تحقیقات فراوانی در این زمینه صورت می‌گیرد که آن‌ها را می‌توان به طور کلی در دسته‌های برتری‌های روش خستگی فراصوتی، خستگی خیلی زیاد در مواد پیشرفته، تأثیر شرایط دمایی محیط بر خستگی فراصوتی، بررسی مکانیسم شروع ترک، بررسی میکرو ساختاری و نانو ساختاری، پیش‌بینی عمر و مدل‌سازی خستگی در ناحیه چرخه خیلی زیاد قرار داد. با توجه به استقبال صورت گرفته به مطالعه در مورد خستگی در چرخه‌های خیلی زیاد در خارج از کشور و نیاز مبرم به دستگاه آزمایش خستگی در چرخه خیلی زیاد در داخل، در این پژوهش پس از تولید ژنراتور فراصوتی، ابزار تقویت‌کننده و دیگر اجزای دستگاه، یک دستگاه آزمایش خستگی فراصوت در فرکانس کاری ۲۰ کیلوهرتز طراحی و ساخته شد و در ادامه با استفاده از آن نمودار تنش-چرخه فولاد آ.آ.آ.س.آی ۱۰۴۵ بدست آمد.

آزمایش خستگی فراصوت، تدوین نشده است. به این دلیل، آزمایشگاه‌ها باید خود دستگاه‌های خود را توسعه دهند و طراحی عملی برای روش آزمایش ارائه دهند. دستگاه آزمایش خستگی فراصوت دارای سه بخش مشترک زیر می‌باشد [۲].

- ژنراتور برق که سیگنال ولتاژ ۵۰ یا ۶۰ هرتز است را به سیگنال مافوق صوت سینوسی ۲۰ کیلو هرتز تبدیل می‌کند.
- مبدل پیزوالکتریک که توسط ژنراتور برق، سیگنال‌های الکتریکی را به امواج مافوق صوت طولی و ارتعاش مکانیکی از همان فرکانس تبدیل می‌کند.
- ابزار تقویت‌کننده مافوق صوت که ارتعاشاتی که از مبدل می‌آید را تقویت می‌کند.

ژنراتور فراصوتی توان الکتریکی را به پیزوالکتریک‌های موجود در ترانسدیوسر وارد می‌کند. در این پژوهش از ژنراتوری ساخته شده در آزمایشگاه استفاده شد که قابلیت‌های کنترلی نظیر تغییر فرکانس و تغییر بازه‌های زمانی اعمال بارگذاری به آن اضافه شده است. ترانسدیوسر که از نوع پیزوالکتریک است با استفاده از خواص پیزوالکتریک انرژی الکتریکی را به حرکت‌های مکانیکی (ارتعاشات) تبدیل می‌کند و باعث ارتعاش ابزار تقویت‌کننده در حالت تشدید می‌شود. در مورد ابزار تقویت‌کننده نیز طراحی آن باید به گونه‌ای باشد که پارامترهایی نظیر جنس، قطر و هندسه آن به نحوی مطلوب طراحی شوند. ابعاد ابزار تقویت‌کننده ساخته شده با توجه به هندسه بدست آمده از نرم‌افزار آباکوس به شکل‌های مخروطی، پله‌ای و نمایی می‌تواند باشد. که در این آزمایش ترکیبی از شکل پله‌ای و مخروطی طراحی شده است که در مقایسه با دیگر هندسه‌های آزمایش شده عملکرد بهتری را دارا است. جنس ابزار تقویت‌کننده از فولاد آ.آ.ی. ۱۰۴۵ می‌باشد و همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است برای اتصال ابزار تقویت‌کننده به ترانسدیوسر و همچنین اتصال قطعه به ابزار تقویت‌کننده از پیچ مغزی استفاده شده است.

طراحی و آنالیز تمامی قطعات ترانسدیوسر، ابزار تقویت‌کننده، نمونه و تحلیل مودال آن در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفت. همان‌طور که بیان شد تفاوت دستگاه آزمایش خستگی فراصوتی با دستگاه‌های گذشته در همین امر می‌باشد که تمامی اجزا می‌بایست دارای فرکانس طبیعی در محدوده فرکانس تولیدی ژنراتور باشد. لذا می‌بایست با طراحی‌های متعدد هندسه مورد نظر را که دارای فرکانسی برابر با دیگر اجزا باشد بدست آورد.

شکل ۲ تصویر مونتاژ شده ترانسدیوسر، ابزار تقویت‌کننده و قطعه را در محیط نرم‌افزار آباکوس و پس از تحلیل در مود طولی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است ارتعاشات در طول ترانسدیوسر تا قطعه چندین برابر می‌شود. دیگر لوازم جانبی دستگاه آزمایش خستگی مافوق صوت ممکن است شامل دستگاه‌های اندازه‌گیری دما، جابجایی، کرنش، دستگاه‌هایی جهت ایجاد شرایط محیطی با دمای بالا و دمای پایین باشد. لذا برای ساخت دستگاه آزمایش خستگی این اجزا گرد هم آمده و با اعمال شرایط کنترلی امکان ایجاد آزمایش خستگی فراصوتی فراهم می‌شود.

تحت بارگذاری پیچشی انجام شود. این آزمایش ممکن است در دماهای مختلف و در مایعات، گازها و یا در خلأ انجام شود. آزمایش خستگی به روش فراصوتی می‌تواند به تمامی این روش‌ها انجام شود.

- شیوه مناسب نصب نمونه تنش در انتهای نمونه کم است. مواد شکننده، مانند سرامیک، می‌توانند بدون مشکل شکست در محل بسته شدن نمونه مورد آزمایش قرار بگیرند. اگر آزمایش خستگی تحت شرایط بارگذاری به طور کامل معکوس انجام شود، فقط یک انتهای نمونه باید ثابت شود.

۱-۱-۲- معایب

• شرایط بارگذاری تشدید برای بارگذاری تحت شرایط تشدید تمام قسمت‌های مکانیکی متصل به ترانسدیوسر از لحاظ هندسی، باید هم فرکانس با ترانسدیوسر باشند و این امر با طراحی هندسه این قسمت‌ها توسط نرم‌افزار اجزای محدود و تحلیل مودال صورت می‌گیرد. همچنین با توجه به این که اجزای مورد استفاده می‌بایست هم فرکانس باشند برای برخی از اجزا که دارای مود فرکانسی برابر با ترانسدیوسر نمی‌باشند، نمی‌توان به طور مستقیم از آزمایش خستگی فراصوتی بهره برد. همچنین بارگذاری به صورت چرخه تکی نمی‌تواند انجام شود به دلیل اینکه در هر ثانیه ۲۰۰۰۰ چرخه اعمال می‌شود.

- افزایش دمای مواد بارگذاری چرخه‌ای در فرکانس فراصوتی ممکن است به افزایش در درجه حرارت نمونه منجر شود. تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک می‌تواند دمای محلی در نزدیکی نوک ترک را بالا ببرد، به خصوص اگر آزمایش خستگی در مورد موادی با رسانایی حرارتی پایین انجام شود. مکث دوره‌ای بین پالس‌ها ممکن است در این موارد نسبتاً طولانی باشد که به طور قابل توجهی زمان آزمایش مورد نیاز را افزایش می‌دهد. اصطکاک داخلی زیاد و یا رسانایی حرارتی کوچک باعث می‌شود آزمایش خستگی فراصوتی در محیط خلأ دشوار باشد.

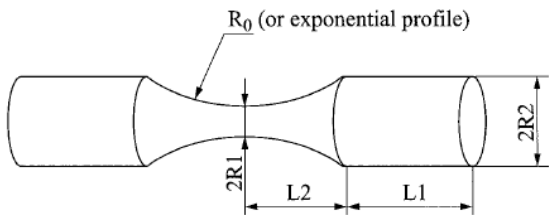
• کنترل نیرو جابجایی در انتهای نمونه و یا کرنش در گره ارتعاشی ممکن است جهت کنترل بارگذاری چرخه‌ای استفاده شود. دامنه تنش چرخه‌ای در مرکز نمونه نمی‌تواند به طور مستقیم اندازه‌گیری شود، بلکه باید از اندازه‌گیری کرنش محاسبه شده بر اساس قانون هوک بدست آید؛ بنابراین، تنش چرخه‌ای که به نمونه اعمال می‌شود باید کمتر از استحکام تسلیم آن باشد به طوری که تغییر شکل نمونه الاستیک باشد.

- بارگذاری چرخه‌ای پایین آزمایش خستگی فرکانس بالا برای بارگذاری چرخه‌ای پایین دارای محدودیت می‌باشد. تغییر شکل چرخه پلاستیک بزرگ ممکن است منجر به گرم شدن نمونه و دسترسی به داده‌های خستگی غیر قابل اعتماد، شود. تا به حال، هیچ استاندارد دی برای روش‌های آزمایش و دستگاه‌های

برای یک قطعه با سطح مقطع متغیر می‌تواند به شکل زیر نوشته شود [۲]. در شکل ۴ طول L_1 طول تشدید نامیده می‌شود و برای تعیین آن از روش‌های عددی نظیر روش المان محدود استفاده می‌شود.

$$\rho S(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (1)$$

ρ چگالی جرمی و $S(x)$ مساحت سطح مقطع در نقطه x می‌باشد و رابطه (۲) بیانگر نیروی وارد بر سطح مقطع می‌باشد.



شکل ۴: نمای کلی قطعه کار برای حل تحلیلی [۱]

Fig4: Sample geometry in analytical method

$$f = E_d S(x) \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

در نتیجه از تعادل نیروها رابطه (۳) حاصل می‌گردد:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \left\{ p(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial^2 u(x,0)}{\partial x^2} \right\} = 0 \quad (3)$$

که در آن سرعت موج برابر است با:

$$c = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (4)$$

و

$$p(x) = \frac{S'(x)}{S(x)} \quad (5)$$

چون شرایط مرزی قطعه در آزمایش فراصوتی خستگی می‌بایست برقرار باشد، حل معادله به صورت رابطه (۶) است:

$$u(x,t) = U(x) \sin(\omega t) \quad (6)$$

معادله برای دامنه ارتعاش $U(x)$ در تمامی طول نقاط قطعه به راحتی به صورت معادله (۷) بدست می‌آید.

$$U''(x) + p(x)U'(x) + K^2U(x) = 0 \quad (7)$$

که در آن:

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (8)$$

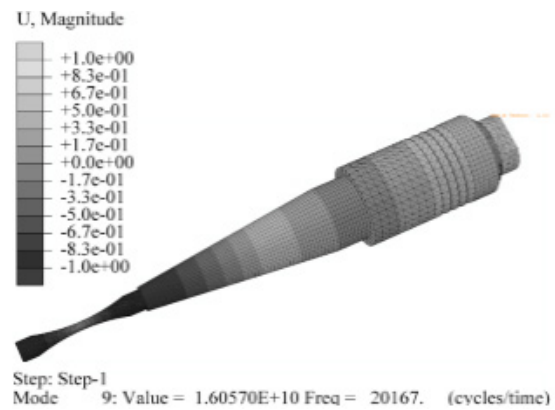
برای حل معادله اشاره شده می‌بایست هندسه قسمت میانی را تعریف کنیم. برای قطعه متقارن که در شکل ۴ آورده شد، اگر منحنی قسمت میانی به صورت کسینوس هایپربولیک باشد برای قسمت استوانه‌ای و قسمت کسینوس هایپربولیکی رابطه (۹) وجود دارد:

همان‌طور که در شکل ۲ و در شکل ۳ به صورت شماتیک نشان داده شده است، جابجایی در نقاط مختلف مجموعه متفاوت است و طراحی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که در وسط نمونه گره ارتعاشی و در دو انتهای آن شکم ارتعاشی به وجود بیاید و بدین صورت در قسمت میانی ماکزیمم تنش و در قسمت‌های انتهایی مینیمم تنش در حالت ارتعاش به وجود می‌آید.



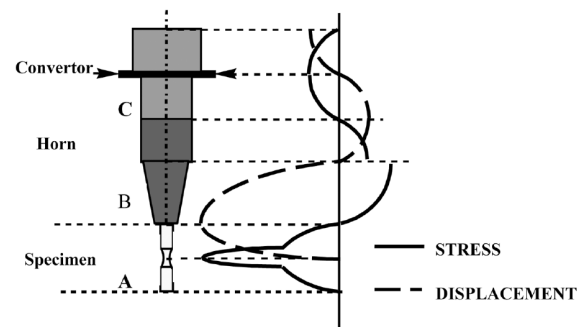
شکل ۱: ابزار تقویت‌کننده استفاده شده در آزمایش

Fig1: The horn uses in test



شکل ۲: تحلیل مودال مجموعه ترانسدیوسر، ابزار تقویت‌کننده و قطعه

Fig2: Modal analysis of transducer, horn and sample



شکل ۳: توزیع جابجایی و تنش در مجموعه [۱]

Fig3: Contour of displacement and stress

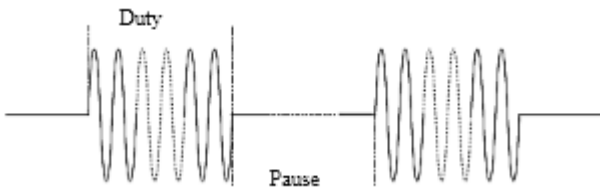
۱-۲- تئوری فرایند

اندازه‌گیری تنش در قسمت میانی قطعه کار به صورت عددی انجام می‌شود اما اگر قسمت مرکزی همانند شکل ۴ به شکل توانی باشد، حل تحلیلی نیز می‌تواند وجود داشته باشد. معادله موج طولی

یکی از معایب دستگاه آزمایش خستگی همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد، افزایش دمای نمونه حین فرایند است [۱۴]. که این امر در قسمت میانی که بیشترین تنش وجود دارد مشخص‌تر است. نمونه‌ای از این مورد را می‌توان در شکل ۵ مشاهده کرد. برای حل این مشکل می‌توان از شرایط کنترلی پالسی (شکل ۶) و یا خنک‌کننده‌هایی مثل هوای خشک استفاده نمود؛ که در آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش از شرایط کنترلی پالسی استفاده شده است.



شکل ۵: نمونه گداخته شده بدون اعمال شرایط کنترلی
Fig5: Heated sample in without control situation



شکل ۶: اعمال ارتعاش به صورت چرخه‌ای به منظور جلوگیری از افزایش دما
Fig6: Applying vibration in pulse mode because of preventing heat

۲- آزمایش خستگی فولاد آ.آ.آ.اس.آی ۱۰۴۵ و نتایج آن

پس از آن که دستگاه آزمایش مونتاژ شد و آزمایش‌های اولیه در مورد برخی فولادها عملکرد مطلوب دستگاه را نشان داد، نمونه‌هایی از جنس فولاد آ.آ.آ.اس.آی ۱۰۴۵ مورد استفاده قرار گرفت که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی که در تحلیل مودال مورد استفاده قرار گرفته است در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است. نمونه با ابعادی که در شکل ۷ با استفاده از نرم‌افزار و تحلیل مودال بدست آمده است، تولید و جهت اتصال به ابزار تقویت‌کننده سوراخ‌کاری و فلاویز شد. در تولید تمامی قطعات سعی بر آن شد که کیفیت سطح در بهترین شرایط ممکن باشد تا اثر پراکندگی در نتایج را کاهش دهد. در اکثر مطالعات صورت گرفته در مورد خستگی فراصوتی از قطعاتی به شکل ساعت شنی ۳ با قطر میانی حداقل ۳ میلی‌متر تا حداکثر ۶ میلی‌متر استفاده شده است. به منظور ایجاد تنش بیشتر در قسمت

$$y(x) = R_2 \quad L_2 < |x| \leq L \quad (9)$$

$$y(x) = R_1 \cosh(\alpha x) \quad |x| \leq L_2$$

در حالی که:

$$L = L_1 + L_2, \quad \alpha = \frac{1}{L_2} \operatorname{arccosh}\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (10)$$

سپس با استفاده از شرایط مرزی طول تشدید قطعه بدست می‌آید:

$$L_1 = \frac{1}{K} \arctan \left\{ \frac{1}{k} [\beta \coth(\beta L_2) - \alpha \tanh(\alpha L_2)] \right\} \quad (11)$$

که در آن:

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2} \quad (12)$$

با اعمال شرایط مرزی رابطه (۱۳) جابجایی قطعه را نشان می‌دهد:

$$U(x) = A_0 \frac{\cos(L_1 k) \cosh(\alpha L_2) \sinh(\beta x)}{\sinh(\beta L_2) \cosh(\alpha x)}, \quad |x| \leq L_2 \quad (13)$$

$$U(x) = A_0 \cos(k(L-x)), \quad L_2 < |x| < L$$

که A_0 میزان جابجایی انتهای نمونه است. به این ترتیب، به دست آوردن کرنش و تنش برای بخش کاهش‌یافته و برای بخش استوانه‌ای آسان است. نتایج به دست آمده به در رابطه (۱۴) مشاهده می‌شوند:

$$\varepsilon(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \quad (14)$$

$$\sigma(x, t) = E_d \varepsilon(x, t)$$

در نهایت رابطه (۱۵) شکل نهایی معادلات تنش و کرنش در قسمت میانی را بیان می‌کند:

$$\varepsilon(x) = A_0 \varnothing(L_1, L_2) \frac{\beta \cosh(\beta x) \cosh(\alpha x) - \alpha \sinh(\beta x) \sinh(\alpha x)}{\cosh^2(\alpha x)} \quad (15)$$

$$\sigma(x) = E_d A_0 \varnothing(L_1, L_2) \frac{[\beta \cosh(\beta x) \cosh(\alpha x) - \alpha \sinh(\beta x) \sinh(\alpha x)]}{\cosh^2(\alpha x)}$$

که در آن:

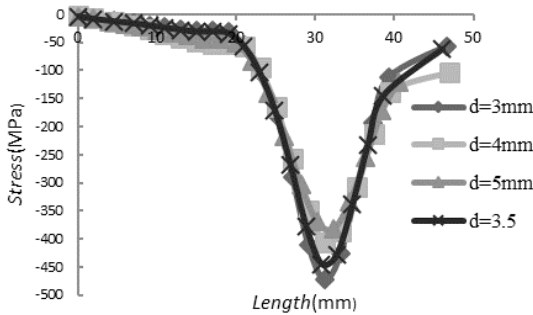
$$\varnothing(L_1, L_2) = \frac{\cos(L_1 k) \cosh(\alpha L_2)}{\sinh(\beta L_2)} \quad (16)$$

در عمل می‌توان مقادیر تنش را با استفاده از جابجایی انتهای نمونه و یا کرنش‌سنج‌هایی که در میانه نمونه متصل می‌شوند، اندازه‌گیری نمود [۲].

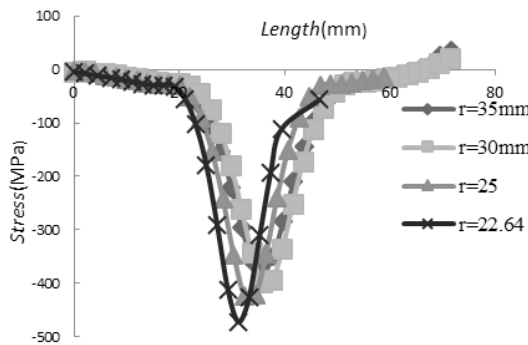
در این پژوهش به منظور اندازه‌گیری دامنه جابجایی از سنسور القایی با دقت ۰/۵ میکرون ساخت شرکت آ.آ.آ.سی^۱ با مدل پی.یو.۲۰۲ استفاده شده است.

1 AEC

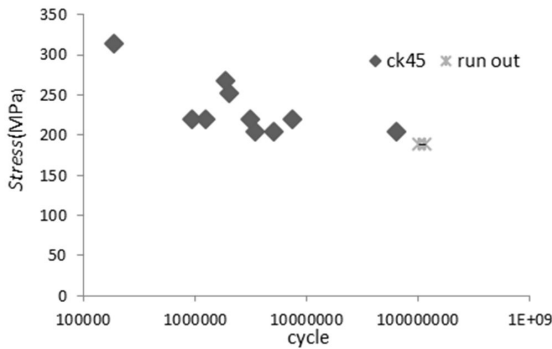
2 PU



شکل ۸: تغییر قطر میانی نمونه در انحنای ثابت ۲۲/۶۴ میلی‌متر
Fig8: Change of sample diameter at constant curvature of 22.64 millimeters



شکل ۹: تغییر انحنای نمونه در قطر ثابت ۳ میلی‌متر
Fig9: Change of sample curvature at constant diameter of 3 millimeters



شکل ۱۰: نمودار تنش-چرخه فولاد آ.آ.ای.اس. آی. ۱۰۴۵
Fig10: Stress-life of AISI 1045 sample

جدول ۳ داده‌های شکل ۱۰ را نشان می‌دهد. نمونه‌ها تا حد 10^8 چرخه بارگذاری شده و اگر نمونه‌ای در این بازه نشکند به عنوان نمونه خارج شده از آزمایش محسوب شده است. شکل ۱۱ تصویر مقطع میانی را نشان می‌دهد که با بزرگنمایی توسط وی.ام.ام. تصویر برداری شده است. مشاهده می‌شود که با شروع ترک و رشد آن فرکانس تشدید نمونه تغییر می‌کند تا نمونه شکسته شود. در شکل ۱۲ تصویر سطح شکست خورده نمونه‌ای را که در آن اثر چشم ماهی^۳ مشاهده می‌شود، آورده شده است.

میانی می‌توان قطر قسمت میانی را کاهش داد و یا شعاع آن را کوچکتر کرد. این دو روش توسط نرم افزار المان محدود مورد آزمایش قرار گرفته شد و نتایج آن در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است. در شکل ۸ شعاع انحنا قطعه کار ثابت و برابر با ۲۰/۶۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و با افزایش قطر از ۳ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر، کاهش تنش در قسمت میانی صورت می‌گیرد. همچنین در شکل ۹ با در نظر گرفتن قطر میانی به صورت ثابت و برابر با ۳ میلی‌متر و افزایش شعاع ناحیه میانی تنش در آن ناحیه کاهش می‌یابد.

برای دستیابی به نمودار تنش-چرخه ۱ از روش پلکانی استفاده شد بدین صورت که در صورت شکست نمونه دامنه تنش کاهش می‌یابد و اگر نمونه نشکند دامنه افزایش می‌یابد [۱۵]. همچنین مقادیر تنش نیز با جایگذاری مقادیر دامنه جابجایی بدست آمده از سنسور القایی در رابطه ۱۵ بدست می‌آید. در نهایت در شکل ۱۰ نمودار تنش-چرخه مرتبط با این فولاد از طریق آزمایش خستگی فراصوتی نشان داده شده است.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد آ.آ.ای.اس. آی. ۱۰۴۵ [۱۶]

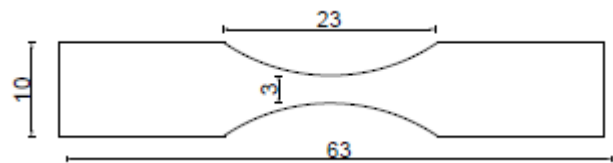
Table1: Composition of AISI 1045

ماده	درصد وزنی (%)
کروم	۰/۱۵
گوگرد	۰/۰۱۲
فسفر	۰/۰۰۶
منگنز	۰/۶۴
سیلیسیم	۰/۲۲
کربن	۰/۴۴
مولبیدن	۰/۰۵
نیکل	۰/۱۱

جدول ۲: خواص مکانیکی فولاد آ.آ.ای.اس. آی. ۱۰۴۵ [۱۷]

Table2: Mechanical property of AISI 1045

خواص مکانیکی	مقدار	واحد
چگالی (ρ)	۷۸۵۰	kg m^{-3}
نسبت پواسون (ν)	۰/۳۰	
مدول الاستیسیته (E)	۲۰۶	GPa



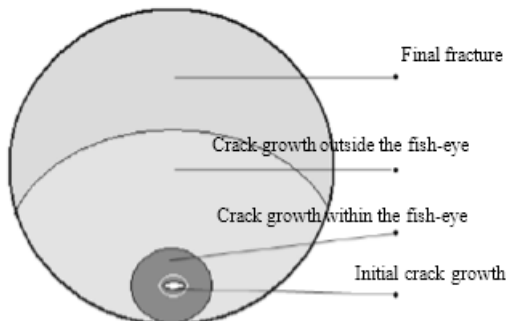
شکل ۷: ابعاد نمونه طراحی شده آ.آ.ای.اس. آی. ۱۰۴۵

Fig7: Geometry of designed AISI 1045 sample

۱ Stress-Cycle (S-N) Curve

- 2 VMM
- 3 Fish-Eye

خوردگی‌های سطح و دیگر عوامل شروع به شکل‌گیری می‌کند و در مرحله بعد این ترک در داخل ناحیه چشم ماهی رشد کرده و بعد از آن مرحله شروع ترک در بیرون از این ناحیه آغاز می‌شود و سرانجام در نهایت شکست اتفاق می‌افتد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: تصویر شماتیک سطح شکست و مراحل مختلف آن

Fig13: Schematic image of the failure surface and its various stages

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ضمن معرفی دستگاه آزمایش خستگی فراصوتی، مزایای آن که شامل زمان کمتر آزمایش، کاهش انرژی مصرفی، امکان‌پذیری روش آزمایش برای حالت‌های مختلف و مواد مختلف و شیوه مناسب برای نصب قطعه کار، در کنار معایب آن شامل طراحی مورد نیاز برای شرایط تشدید، شرایط کنترل نیرو، افزایش دما و عدم توانایی کار در چرخه‌های پایین می‌باشد، برشمرده شد. همچنین ضمن تشریح نحوه عملکرد دستگاه، نمونه‌ای از این دستگاه به منظور انجام آزمایش خستگی طراحی و ساخته شد و سپس نمونه‌ای فولادی با جنس فولاد آ.آ.آ.اس.آی ۱۰۴۵ مورد آزمایش قرار گرفت و نمودار تنش-چرخه آن بدست آمد در قسمت پایانی با استفاده از تصاویر سطح شکست نمونه روند کلی خستگی و رشد ترک و در نهایت شکست نمونه با استفاده از دستگاه تست خستگی فراصوتی به صورت شماتیکی بیان شد. در مجموع با تحلیل روابط و انجام آزمایش‌های مربوطه از پژوهش، نتایج زیر حاصل گردید:

- استفاده از آزمایش خستگی فراصوتی سبب کاهش زمان بدلیل فرکانس بالای آن می‌شود.
- با توجه به کاهش زمان لازم به منظور دستیابی به تعداد چرخه خاص، رسیدن به چرخه‌های بالای 10^7 چرخه در مدت زمان به مراتب کمتری از گذشته امکان‌پذیر می‌باشد.
- کاهش قطر در قسمت میانی سبب ایجاد تنش اعمالی بزرگ‌تری به آن ناحیه می‌شود.
- افزایش انحنا در قسمت میانی سبب ایجاد تنش اعمالی بزرگ‌تری به آن ناحیه می‌شود.
- استحکام خستگی آ.آ.آ.اس.آی ۱۰۴۵ تا ۲۰۴ مگا پاسکال کاهش پیدا کرد.

جدول ۳: داده‌های نمودار تنش-چرخه

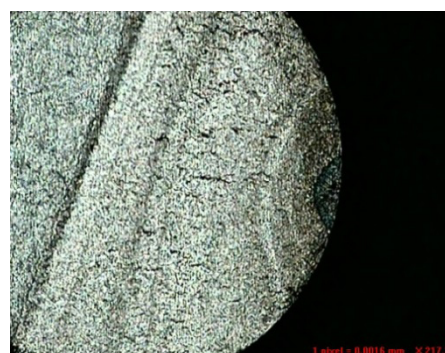
Table3: Data of stress-life diagram

شماره	تنش MPa	چرخه
۱	۵۱۴۷۱۳۱/۳۱۴	۱۸۷۶۵۰
۲	۳۳۷۵۰۶۱/۲۶۷	۱۸۷۶۵۰۰
۳	۶۱۱۷۷۰۵/۲۵۱	۲۰۰۱۶۰۰
۴	۱۶۰۲۹۹۲/۲۲۰	۷۵۰۶۰۰۰
۵	۱۶۰۲۹۹۲/۲۲۰	۳۱۲۷۵۰۰
۶	۱۶۰۲۹۹۲/۲۲۰	۱۲۵۱۰۰۰
۷	۱۶۰۲۹۹۲/۲۲۰	۹۳۸۲۵۰
۸	۴۳۴۵۶۳۵/۲۰۴	۶۳۸۰۱۰۰۰
۹	۴۳۴۵۶۳۵/۲۰۴	۵۰۶۶۵۵۰
۱۰	۴۳۴۵۶۳۵/۲۰۴	۳۴۴۰۲۵۰
۱۱	۷۰۸۸۲۷۹/۱۸۸	۱۰۱۶۴۳۷۵۰
۱۲	۷۰۸۸۲۷۹/۱۸۸	۱۱۴۵۹۱۶۰۰



شکل ۱۱: ترک رشد یافته در نمونه که با وی.ام.ام.عکس‌برداری شده است

Fig11: Crack in sample pictured with VMM



شکل ۱۲: مثالی از شکست شروع شده از سطح و اثر چشم ماهی مشاهده شده در آن

Fig12: An example of the fracture starting from the surface and the effect of the fish eye observed there

همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است می‌توان مراحل شکست خستگی را در ۴ مرحله بیان نمود بدین صورت که در مرحله اول بسته به نوع عیب ریز ساختاری ترک از این عیوب ریز و حفره‌ها،

measurements at very high frequencies, International Materials Reviews, 44(1) (1999) 1-34.

- [7] W.P. Manson, Piezoelectric Crystals and their Application in Ultrasonics, New York: Van Nostrand, 1956.
- [8] Bathias, There is no infinite fatigue life in metallic materials, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 22(7) (1999) 559-565.
- [9] R. Ebara, The present situation and future problems in ultrasonic fatigue testing – Mainly reviewed on environmental effects and materials' screening, International Journal of Fatigue, 28(11) (2006) 1465-1470.
- [10] B. Pyttel, D. Schwerdt, C. Berger, Very high cycle fatigue – Is there a fatigue limit?, International Journal of Fatigue, 33(1) (2011) 49-58.
- [11] D. Wagner, F.J. Cavalieri, C. Bathias, N. Ranc, Ultrasonic fatigue tests at high temperature on an austenitic steel, Propulsion and Power Research, 1(1) (2012) 29-35.
- [12] S. Heinz, F. Balle, G. Wagner, D. Eifler, Analysis of fatigue properties and failure mechanisms of Ti6Al4V in the very high cycle fatigue regime using ultrasonic technology and 3D laser scanning vibrometry, Ultrasonics, 53(8) (2013) 1433-1440.
- [13] S. Stanzl-Tschegg, Very high cycle fatigue measuring techniques, International Journal of Fatigue, 60 (2014) 2-17.
- [14] W. Peng, Y. Zhang, B. Qiu, H. Xue, A Brief Review of the Application and Problems in Ultrasonic Fatigue Testing, AASRI Procedia, 2 (2012) 127-133.
- [15] A.R. Shahani, I. Shakeri, H. Moayeri Kashani, Fatigue life estimation of bolts in flanges of a reinforced cylindrical shell, Modares Mechanical Engineering, 14(13) (2015) 201-208. (in Persian)
- [16] A. Zabet, R. Irankhah, -, E. Zohourvahid Karimi, M. Hashemi, Fatigue Life of Forged, Hardened and Tempered Carbon Steel with and, in, 2007.
- [17] Y. Hu, Z. Yao, Overlapping rate effect on laser shock processing of 1045 steel by small spots with Nd:YAG pulsed laser, Surface and Coatings Technology, 202(8) (2008) 1517-1525.

۴- فهرست علائم

دامنه جابجایی انتهای نمونه	A_0
سرعت صوت	c
مدول دینامیکی الاستیک	E_d
نیروی وارد بر سطح مقطع	f
بردار موج	k
طول کل	L
طول تشدید	L_1
طول قسمت نمایی	L_2
شعاع قطعه در مرکز و انتها	R^1, R^2
تنش	S
مساحت سطح مقطع در مکان x	$S(x)$
زمان	t
جابجایی در مکان x	$U(x)$
محور مختصات	x
چگالی	ρ
تنش در مکان x	$\sigma(x)$
سرعت زاویه‌ای	ω

منابع

- [1] C. Bathias, Paris, P.C., Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice, Marcel Dekker, 2004.
- [2] C. Bathias, Pineau, A., Fatigue of materials and structures. in Great Britain and the United States, Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- [3] T. Nicholas, high cycle fatigue a mechanics of material respective, Elsevier Ltd., 2006.
- [4] A.S. Mohagheghian N, Rotary vibration tool in Ultrasonic vibration-assisted turning process, Modares Mechanical Engineering, 14(1) 51-58.(in Persian)
- [5] E. Hakimi, S. Amini, M. Aghaei, Investigation of Built-up edge in rotary vibration-assisted turning of aluminum 7075, Modares Mechanical Engineering, 15(20) (2016) 223-227. (in Persian)
- [6] H. Mayer, Fatigue crack growth and threshold