Archive of SID

چهاردهمین کنفرانس بین المللی انجمن هوافضای ایران
تهران،سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده مخابرات و فن آوری ماهواره، ۱۲ تا ۱٤ اسفند۱۳۹۳
Aero2015P710

تست خستگی با اولتراسونیک

سعید امینی[۱]، محسن آقایی[۲]
گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

چکیده

بسیاری از اجزای ساختاری ماشین‌ها متحمل بارگذاری بالاتر از 10^7 چرخه می‌شوند، اما خصوصیات مواد و پیش بینی خستگی به طور معمول بر اساس اطلاعات محدود به بین 10^6 و 10^7 چرخه می‌باشد برخی از نمونه‌های چنین شکست‌هایی در هواپیما، خودرو و قطارهای سرعت بالا و توربین ها یافت می‌شود. برای بسیاری از مواد شکست خستگی پس از 10^7 چرخه بار، یعنی در محدوده چرخه بسیار بالای خستگی (VHCF) گزارش شده است. همچنین در استفاده از منحنی S-N بایستی به این نکته توجه کرد که منحنی مجانب افقی در سیکل‌های خیلی بالاتر اتفاق می‌افتد بدان معنی که مکانیسم شروع خستگی از 10^6 به فراتر از 10^9 چرخه گسترش یافته است. در نتیجه حد مجانب منحنی S-N، برای مواد مختلف باید به منظور تضمین استحکام خستگی واقعی در محدوده چرخه بسیار بالا مشخص شود. بررسی خواص خستگی در چرخه بسیار بالا مسئله‌ای قابل توجه برای حصول اطمینان از عمر بلند مدت و قابل اطمینان ماشین آلات و اجزای ساختاری با توجه به مطالبات رو به رشد صنعتی می‌باشد. معمولا آزمون خستگی مواد، آزمونی با زمان طولانی، وقت گیر و گران قیمت می‌باشد. با توسعه عملگرهای پیزوالکتریک توان بالا امروزه اعمال چرخه‌های خیلی زیاد(در حد 10^{10} چرخه) در زمانی به مراتب کمتر از گذشته ممکن شده است . این مقاله به توصیف طراحی و ساخت و ساز یک دستگاه تست خستگی مافوق صوت به طور کامل، در فرکانس کاری ۲۰ کیلو هرتز می‌پردازد. لذا به منظور بررسی خواص خستگی دستگاه تست خستگی مافوق صوت در آزمایشگاه دانشگاه کاشان طراحی و ساخته شد.

واژه های کلیدی: *خستگی-چرخه بسیار بالا-پیزوالکتریک-مافوق صوت*

مقدمه

با تلاش مستمر صنعت تلاش برای دستیابی به سرعت های بالاتر، تجهیزات مدرن مانند هواپیماهای جدید قطار هایی با سرعت بالا و موتورهای سوخت کارآمد انتظار می رود این تجهیزات چرخه عمر بیشتری را دارا باشند. برای کنار آمدن با چنین انتظاراتی می بایست از موادی با کارایی بالا، (تا 10^9 چرخه) استفاده کرد. به منظور انجام آزمون خستگی برای چنین تعداد زیادی از چرخه در یک دوره زمانی مفید ، استراتژی جدیدی در حال توسعه می‌باشد.

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، ۰۳۱ ۵۵۹۱۲۴۹۷، Amini.s@kashanu.ac.ir
۲-دانشجوی کارشناسی ارشد

روش تست خستگی مافوق صوت از روش تست خستگی معمولی که محدود به فرکانس ۱۰۰ هرتز می‌باشد متفاوت است. فرکانس تست خستگی اولتراسونیک بین دو مقدار۱۵و۲۰ کیلو هرتز متغیر می‌باشد که معمولا فرکانس ۲۰ کیلو هرتز در نظر گرفته می‌شود. 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 تست برای 10^7 چرخه با استفاده از روش مافوق صوت ۹ دقیقه می‌باشد ، در حالی که تست خستگی معمولی با فرکانس ۱۰۰ هرتز حدود ۱۲ روز طول خواهد کشید. حتی برای چرخه‌های بالاتر برای مثال، 10^9 سیکل به روش مافوق صوت تنها ۱۴ ساعت نیاز است، در حالی که آن برای یک نمونه تنها در فرکانس۱۰۰ هرتز بیش از ۳ سال طول خواهد کشید. از جمله مزایای تست اولتراسونیک می‌توان به حفظ زمان، حفظ انرژی، روش تست ممکن و شیوه مناسب برای نصب قطعه کار اشاره کرد[۱]. استفاده از آزمون خستگی مافوق صوت در نزدیکی آغاز قرن ۲۰ آغاز شده تا آن زمان بالاترین فرکانس تست خستگی که با تجهیز مکانیکی فراهم شده بود از ۳۳ هرتز تجاوز نمی کرد[۲]. مانسون (Manson) در سال ۱۹۵۰ دستگاه تستی را ساخت که یک نقطه بسیار مهم در توسعه تکنیک های تست خستگی مافوق صوت می‌باشد[۳] او انواع مبدل پیزوالکتریکی که قادر به تبدیل فرکانس۲۰ کیلو هرتز به جابجایی کنترلی ارتعاش مکانیکی ۲۰ کیلو هرتز بود را معرفی کرد. و از قدرت بالای امواج مافوق صوت در فرکانس ۲۰ کیلو هرتز برای وادار کردن مواد به شکست در خستگی استفاده نمود. طراحی ۲۰ کیلو هرتز دستگاه میسون به عنوان پایه و اساس اولتراسونیک مدرن ماشین آلات تست خستگی استفاده می‌شود. ابرا (Ebara) در سال ۲۰۰۶ در یک مقاله مروری به بحث در مورد روش تست خستگی اولتراسونیک پرداخت و نتیجه گرفت که این روش می‌تواند روشی مفید برای تست استحکام خستگی و رشد ترک خستگی باشد ولی بیان کرد که باید اثرات فرکانس بالا بررسی شود[۴]. استنلز (Stanzl) در سال۲۰۱۴ در مقاله ای مروری به بررسی تکنیک تست خستگی در چرخه خیلی زیاد پرداخته و بیان نموده که با توجه به در نظر گرفتن جنبه های مختلف نظیر قیمت و کیفیت، با در نظر گرفتن تجربه شخص نویسنده روش تست خستگی اولتراسونیک روش کاربردی و موثر می‌باشد. همچنین ایشان مزیا و معایب این روش را نیز بررسی کرده است [۵]. با توجه به پیشرفت صورت گرفته در زمینه خستگی در محدوده چرخه‌های خیلی زیاد امروزه تحقیقات فراوانی در این زمینه صورت می‌گیرد، که آن‌ها را می‌توان به طور کلی در دسته‌های: برتری های روش خستگی اولتراسونیک، خستگی خیلی زیاد در مواد پیشرفته، تاثیر شرایط محیطی دمایی بر خستگی اولتراسونیک، بررسی مکانیزم شروع ترک و بررسی

www.SID.ir

Archive of SID

میکروساختاری ونانو ساختاری و پیش‌بینی عمر تحلیل‌های استاتیکی و مدل‌سازی خستگی در رژیم سیکل خیلی زیاد قرار داد. در این تحقیق مراحل طراحی یک دستگاه تست خستگی مافوق صوت، در فرکانس کاری ۲۰ کیلو هرتز شرح داده می‌شود و به منظور تصدیق عملکرد دستگاه ساخته شده دو نمونه فولاد آلیاژی با موفقیت تست شد.

مفاهیم خستگی اولتراسونیک

خستگی اولتراسونیک متفاوت از آزمایش خستگی معمولی می‌باشد. در تست خستگی معمولی فرکانس کاری دستگاه متفاوت از فرکانس طبیعی مجموعه می‌باشد. به عبارت دیگر، نمونه در ارتعاش اجباری است. تست خستگی اولتراسونیک از این حیث با دستگاه‌های معمولی متفاوت است. در واقع فرکانس‌های خارجی ایجاد شده توسط دستگاه آزمون باید یکی از فرکانس های طبیعی نمونه باشد یا به عبارتی فرکانس طبیعی دستگاه می‌بایست برابر فرکانس اعمالی باشد بنابراین هندسه دستگاه که شامل ترنسدیوسر، هورن و قطعه کار می‌باشد نیازمند طراحی برای رسیدن به فرکانس طبیعی برابر با فرکانس اعمالی که در حدود ۲۰ کیلو هرتز، می‌باشد. برای نمونه خستگی با سطح مقطع متغیر، دامنه کرنش و تنش در هر قسمت متفاوت است. برای نشان دادن تمرکز تنش در مرکز قطعه برای تسریع تست خستگی، نمونه خستگی اولتراسونیک در اکثر مواقع به صورت سطح مقطع کاهش یافته در مرکز آن طراحی می‌شود. در شکل ۱ طول L1 را طول رزونانس می‌نامیم و برای تعیین آن از روش های عددی نظیر روش المان محدود استفاده می‌کنیم. اما اگر قسمت مرکزی همانند شکل ۱ در فرم توانی باشد. حل تحلیلی نیز می تواند وجود داشته باشد. معادله موج طولی برای یک قطعه با سطح مقطع متغیر می‌تواند به شکل زیر نوشته شود [۲و۶و۷].

$$^{\circ}S(x)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=\frac{\partial f}{\partial x} \qquad (۱)$$

ρ چگالی جرمی و S(x) مساحت سطح مقطع در نقطع X می‌باشد و

$$f = E_d S(x)\frac{\partial u}{\partial x} \qquad (۲)$$

نیروی وارد بر سطح مقطع می‌باشد درنتیجه از تعادل نیروها داریم

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}=c^2\left\{p(x)\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}+\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}\right\}=0 \qquad (۳)$$

که در آن سرعت موج برابر

$$c=\sqrt{\frac{E_d}{^{\circ}}} \qquad (۴)$$

و

$$p(x)=\frac{S'(x)}{S(x)} \qquad (۵)$$

چون شرایط مرزی قطعه در تست اولتراسونیک خستگی می‌بایست ارضا شود، حل معادله به صورت

$$u(x,t)=U(x)\sin(\mu t) \qquad (۶)$$

می‌باشد و معادله برای دامنه ارتعاش U(x) در تمامی طول نقاط قطعه براحتی به صورت معادله(۷) مشاهده می‌شود.

$$U''(x)+p(x)U'(x)+K^2U(x)=0 \qquad (۷)$$

که در آن

$$k=\frac{\mu}{c} \qquad (۸)$$

برای حل معادله اشاره شده می‌بایست هندسه قسمت میانی را تعریف کنیم. برای قطعه متقارن که در شکل آورده شد اگر منحنی قسمت میانی به صورت کسینوس هایپربولیک باشد برای قسمت استوانه‌ای و قسمت کسینوس هاپربولیکی داریم.

$$y(x)=R_2,\ L_2<|x|\le L \qquad (۹)$$
$$y(x)=R_1\cosh(\sim x)\ \ |x|\le L_2$$

درحالی که

$$L=L_1+L_2$$
$$\sim=\frac{1}{L_2}\arccos h\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (۱۰)$$

سپس با استفاده از شرایط مرزی می‌توانیم طول رزونانس قطعه را پیدا کنیم.

$$L_1=\frac{1}{k}\arctan\left\{\frac{1}{k}\left[\ \coth(\ L_2)-\sim\tanh(\sim L_2)\right]\right\} \qquad (۱۱)$$

که در آن

$$=\sqrt{\sim^2-k^2} \qquad (۱۲)$$

با اعمال شرایط مرزی معادله زیر جابجایی قطعه را نشان می‌دهد.

$$U(x)=A_0\frac{\cos(L_1 k)\cosh(\sim L_2)}{\sinh(\ L_2)}\frac{\sinh(\ x)}{\cosh(\sim x)},|x|\le L_2 \qquad (۱۳)$$
$$U(x)=A_0\cos(k(L-x)),L_2<|x|<L$$

که A_0 میزان جابجایی انتهای نمونه می‌باشد. به این ترتیب، به دست آوردن کرنش و تنش برای بخش کاهش یافته و برای بخش استوانه‌ای آسان است. نتایج به دست آمده به شرح زیر است.

$$£(x,t)=\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \qquad (۱۴)$$
$$\pm(x,t)=E_d\,£(x,t)$$

در عمل می‌توان مقادیر تنش را با استفاده از جابجایی انتهای نمونه و یا کرنش سنج‌هایی که در میانه نمونه متصل می‌گردد اندازه گیری نمود.

دستگاه تست خستگی اولتراسونیک و نحوه عملکرد آن

تا به حال، هیچ استانداردی برای روش های تست و دستگاه‌های تست خستگی مافوق صوت، وجود نداشته است. به این دلیل، آزمایشگاه‌ها باید خود دستگاه‌های خود را توسعه دهند و طراحی عملی برای روش تست ارائه دهند. دستگاه تست خستگی مافوق صوت باید شامل سه بخش مشترک زیر باشد[۲].

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

www.SID.ir

Archive of SID

ژنراتور اولتراسونیک توان الکتریکی را به پیزوالکتریک‌های موجود در ترانسدیوسر وارد می‌کند و ترانسدیوسر این انرژی الکتریکی را به حرکت‌های مکانیکی(ارتعاشات) تبدیل می‌کند و باعث ارتعاش هورن در حالت تشدید می‌شود. این سه بخش دستگاه هایی مورد نیاز برای تولید بار خستگی مافوق صوت می‌باشند. دیگر لوازم جانبی دستگاه تست خستگی مافوق صوت ممکن است شامل سیستم های اندازه گیری دما، جابجایی،کرنش، دستگاه‌هایی جهت ایجاد شرایط محیطی با دمای بالا و دمای پایین باشد.لذا برای ساخت دستگاه تست خستگی این اجزا گرد هم آمده و با اعمال شرایط کنترلی امکان ایجاد تست خستگی تسریع یافته فراهم می‌شود. به طور مثال در شکل ۲ می‌توان این اجزا را در کنار هم مشاهده نمود.در این شکل دستگاهی جهت اعمال شرایط محیطی دما بالا بر روی قطعه کار نیز مشاهده می‌شود همچنین از دستگاه ترمومتر نیز می‌توان جهت اندازه گیری دمای قطعه کار حین فرایند استفاده نمود.یکی از معایب دستگاه تست خستگی افزایش دمای نمونه حین فرایند می‌باشد که این امر را می‌توان با استفاده از شرایط کنترلی پالسی و یا با استفاده از خنک کننده‌هایی مثل هوای تازه انجام داد. شکل ۳ نمای کلی اتصال هد اولتراسونیک و هورن و قطعه را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است در نقطه میانی قطعه ارتعاش حداقل می‌باشد و میزان تنش حداکثر با اعمال تنش به صورت خطی قطعه از ناحیه میانی دچار شکست خستگی می‌شود

طراحی هندسه هورن و نمونه با استفاده از المان محدود

به منظور تحقق طول رزونانس قطعه و هورن برای جنس‌های مختلف میتوان از آنالیز مودال در یک نرم افزار المان محدود استفاده کرد.

تفاوت دستگاه تست خستگی اولتراسونیک با دستگاه های گذشته در همین امر می‌باشد که تمامی اجزا می‌بایست دارای فرکانس طبیعی در محدوده فرکانس تولیدی ژنراتور باشد. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است آنالیز مودال بر روی مجموعه هد اولتراسونیک، هورن و قطعه صورت گرفته و هندسه آنها به گونه‌ای تغییر می‌یابد تا کل مجموعه دارای فرکانس طبیعی در حدود ۲۰ کیلو هرتز شود. شکل ۴ نمای کلی از کل مجموعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است ارتعاشات در طول ترنسدیوسر تا قطعه چندین برابر می‌شود. با توجه به آنکه پیزوالکتریک‌های مورد استفاده از نوع خطی می‌باشند فرکانس طبیعی ۲۰کیلو هرتز می‌بایست در مود طولی اتفاق بیفتد که همین امر سبب ایجاد تغییرات مستمر تا رسیدن به یک هندسه مناسب می‌باشد.

آماده سازی دستگاه و اجرای تست

به منظور ایجاد یک دستگاه تست خستگی اولتراسونیک همانطور که قبلا بحث شد نیاز به سه جز اصلی ژنراتور، هورن و ترانسدیوسر می‌باشد لذا برای این کار از ژنراتور اولتراسونیک MPI که دارای توانی تا ۳کیلو وات می‌باشد و ترانسدیوسر با فرکانس طبیعی ۲۰۵۰۰ کیلو هرتز و هورن طراحی شده در محدوده فرکانس ۲۰ کیلو هرتز استفاده شده است. به منظور راست آزمایی عملکرد دستگاه دو نمونه از جنس mo40 و ck45 طراحی گردید و مورد آزمایش قرار گرفت. به خاطر اینکه نمونه تحت شرایط تشدید قرار می‌گیرد انتهای آزاد برای شرایط بارگذاری متقارن کافی است. درحالی که برای گیره بندی نمونه در تست های معمولی به قطعات و آرایش بندی بزرگی نیاز است. اگر بار گذاری متفاوت باشد. آرایش بندی متفاوت می‌شود. در حالت انتها آزاد میزان تنش ماکزیمم و مینیمم بر روی قسمت میانی برابر می باشد (R=-1) .

شکل۵ تصویر سطح مقطع شکست خورده بر اساس خستگی این دو نمونه را نشان می‌دهد. در این شکل می توان براحتی اثرات شکست بر اساس خستگی و خطوط بصورت سایه روشن همانند ساحل دریا (micro crack) و یا پوسته صدف (beach mark) می‌توان مشاهده کرد.

نتیجه‌گیری

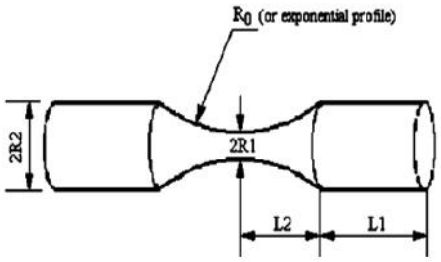
در این تحقیق مراحل طراحی یک دستگاه تست خستگی مافوق صوت، در فرکانس کاری ۲۰ کیلو هرتز شامل تئضیح اجزا مختلف و نحوه عملکرد و طراحی آنان شرح داده می‌شود و و به منظور تصدیق عملکرد دستگاه ساخته شده دو نمونه فولاد آلیاژی با موفقیت تست می‌شود. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت:

- دستگاه تست خستگی اولتراسونیک نمونه‌ای کارآمد برای اعمال تست خستگی تسریع یافته در مورد مواد گوناگون می‌باشد.
- از این دستگاه می‌توان به منظور مطالعه .بررسی عمر خستگی و رشد ترک در چرخه‌های خیلی زیاد استفاده نمود

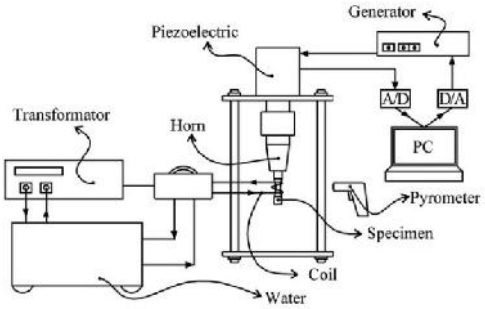
www.SID.ir

Archive of SID

شکل‌ها و نمودارها

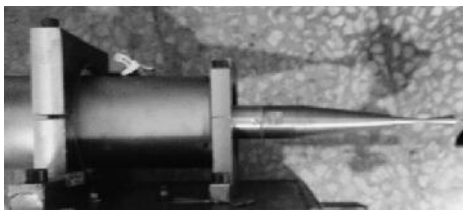


شکل ۱-نمای کلی قطعه کار برای حل تحلیلی

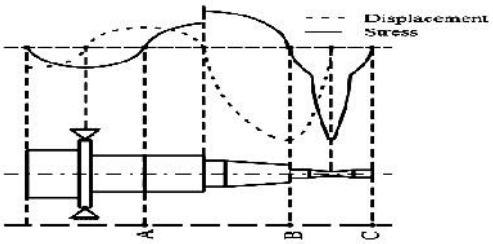


شکل۲-نمای کلی دستگاه تست خستگی اولتراسونیک [۸]

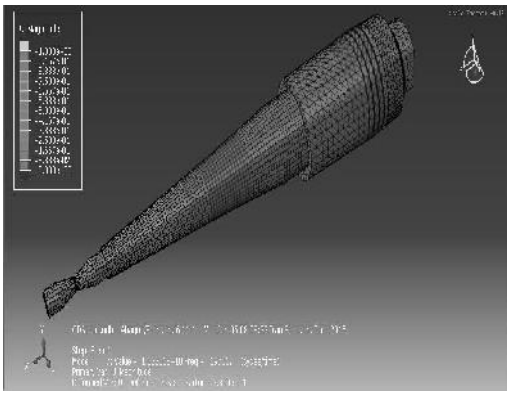
الف



ب

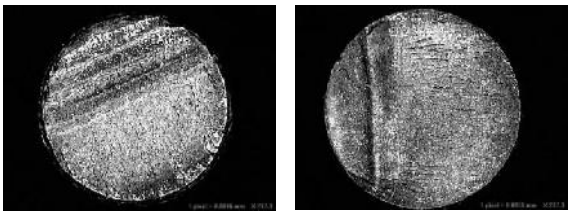


شکل۳-الف)هد اولتراسونیک و هورن ونمونه ساخته شده
ب)ارتعاش و تنش اعمالی به نمونه



شکل۴- آنالیز مجموعه ترانسدیوسر، هورن و قطعه و هندسه بدست آمده با توجه با آنالیز

St37 Mo40



شکل۵- نمونه های شکسته شده در اثر خستگی توشط دستگاه تست خستگی اولتراسونیک

مراجع

1. Mayer, H., *Fatigue* crack growth and threshold measurements at very high frequencies. *International Materials Reviews*, **44**(1), 1999, p. 1-34.
2. Bathias C, Paris PC., Gigacycle fatigue in mechanical practice. New York: Marcel Dekker; 2005.
3. Manson, W. P., Piezoelectric Crystals and their Application in Ultrasonics. New York: Van Nostrand, 1956
4. Ryuichiro Ebara, The present situation and future problems in ultrasonic fatigue testing – Mainly reviewed on environmental effects and materials' screening, *International Journal of Fatigue* ,v.28,2006,pp.1465–1470
5. Stefanie Stanzl-Tschegg, Very high cycle fatigue measuring techniques, *International Journal of Fatigue* ,v.60 2014,pp.2–17
6. Bathias C., Piezoelectric fatigue testing machines and devices, *International Journal of Fatigue*,v.28, 2006,pp. 1438 – 1445.
7. Mayer H., Ultrasonic torsion and tension– compression fatigue testing: Measuring principles and investigations on 2024-T351 aluminum alloy, *International Journal of Fatigue* v.28, 2006, pp.1446 – 1445.
8. 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,pp. 29–35

www.SID.ir