

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان
مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Comparison between effectiveness of ultrasonic peening on fatigue and corrosion fatigue behavior of welded steel pipe

Abstract

Corrosion fatigue refers to the process in which a metal fractures prematurely under condition of simultaneous corrosion and repeated cyclic loading. Tensile residual stresses caused some manufacturing processes are the main reason of decreasing in life of structures under cyclic loading and corrosive environments. Applying ultrasonic peening is one of the promising and effective methods for enhancing fatigue behavior of materials. On the other hand, it has some positive effects on corrosion resistance of metals. In this work, effect of ultrasonic impact treatment on fatigue and corrosion fatigue behavior of A106-B welded steel pipe provided by Sarkhoon and Qeshm IRAN gas refinery, has been investigated. Obtained fatigue and corrosion fatigue results compared. It was demonstrated that UIT is more effective on corrosion fatigue life than fatigue life.

Keyword: Fatigue, Corrosion fatigue, Welding, Ultrasonic impact treatment, residual stress.

iMat
Conference 2014

مقایسه تأثیر عملیات ضربه فراصوتی بر رفتار خستگی و خستگی خوردگی لوله‌های فولادی جوشکاری شده

چکیده

خستگی خوردگی فرایندی است که طی آن، فلز به دلیل اثر همزمان بارهای دوره‌ای و محیط خوردنده به صورت ناگهانی دچار شکست می‌گردد. تنش‌های پسماند کششی ناشی از فرایندهای ساخت و تولید، یکی از اصلی‌ترین دلایل کاهش عمر سازه‌های تحت بار به حساب می‌آیند. یکی از روش‌های نوین، در حال پیشرفت و مؤثر جهت بهبود خواص خستگی مواد، اعمال عملیات ضربه فراصوتی است. از سمت دیگر تأثیرات مثبتی بر مقاومت خوردگی فلزات خواهد گذاشت. در این مطالعه تأثیر عملیات ضربه فراصوتی بر رفتار خستگی و خستگی خوردگی لوله‌های فولادی جوشکاری شده فولاد A106-B تهیه‌شده توسط پالایشگاه گاز سرخون و قشم، مورد ارزیابی قرار گرفته است. اعمال عملیات ضربه فراصوتی بر رفتار خستگی خوردگی بیش از رفتار خستگی مؤثر بود.

واژه‌های کلیدی: خستگی، خستگی خوردگی، جوشکاری، عملیات ضربه فراصوتی، تنش پسماند.

iMat
Conference 2014

مقدمه

خستگی فرایندی است که طی آن ماده در اثر قرار گرفتن در معرض بارهای تکرارشونده ضعیف شده و این موجب ایجاد خسارات موضعی و تصاعدی در سازه می‌گردد. مقدار تنش اسمی که باعث این خسارات می‌شود حتی ممکن است بسیار کمتر از استحکام آن ماده باشد (Kim and Laird, 1978). خستگی خوردگی هنگامی رخ می‌دهد که سازه به‌طور همزمان تحت بار دوره‌ای و محیط خوردنده قرار می‌گیرد. تقریباً همه سازه‌های مهندسی در حین عمر کاری‌شان در همچنین شرایطی قرار می‌گیرند. محیط، نقش قابل توجهی در خستگی مواد ساختمانی استحکام بالا نظیر فولاد، آلیاژهای آلومینیوم و تیتانیوم بازی می‌کند (Syrett and Acharya, 1979).

جوشکاری یکی از گسترده‌ترین روش‌های اتصال در صنایع مدرن بشمار می‌رود. علی‌رغم اینکه شکست در سازه‌های فولادی به‌وفور رخ می‌دهد که ۸۰ تا ۹۰ درصد آن‌ها ناشی از خستگی است، اما هر ساله ۵۰ درصد فولادهای تولیدی در جهان جهت ساخت سازه‌های فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Danqing, Dongpo, Hougnyang, Lingxing, 2010). از این رو، مسئله خستگی برای طراحی و نگهداری سازه‌های فولادی جوشکاری شده‌ای که در معرض بارهای دوره‌ای قرار دارند، از جمله پل‌ها، جرثقیل‌ها، خط لوله‌ها، کشتی‌ها، مخازن تحت فشار و غیره یک موضوع مهم تلقی می‌گردد. (Gunther, Kuhlmann, Durr, 2005).

پرواضح است که اتصالات جوشکاری شده در مقایسه با فلز پایه، استحکام خستگی پایین‌تری دارند، که این موضوع از تمرکز تنش‌های موضعی ناشی از حضور شیارها و وجود تنش‌های پسماند کششی زیاد سرچشمه می‌گیرد. شیارها هم می‌توانند به دلیل هندسه اتصال و هم به دلیل نقص‌های جوش مانند زیر برش و آخال‌های سرباره‌ای ایجاد گردند. تنش‌های پسماند کششی به دلیل انقباض فلز جوش در حین سرمایش و انجماد به وجود می‌آیند (Pedersen, Mouritsen, Andersen, Wenderby, 2009). همچنین این تنش‌ها می‌توانند به واسطه عملیاتی نظیر ریخته‌گری، نورد، برشکاری، ماشین‌کاری و غیره ایجاد شده و با افزایش سرعت رشد ترک، موجب کاهش عمر قطعات گردند (Shalvandi, Hojjat, Abdullah, Asadi, 2013).

مشکلاتی همچون خستگی، خوردگی و سایش به شرایط سطحی بستگی دارند. بسیاری از فناوری‌های اصلاح سطح جهت بهبود خواص مکانیکی و رفتار مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند (Yang, Zhou, Ling, 2012). در راستای افزایش خواص خستگی اجزاء جوشکاری شده امکان دارد سه پارامتر تحت تأثیر قرار گیرند: کیفیت جوش، هندسه موضعی، و تنش‌های پسماند. عملیاتی موسوم به عملیات پس از جوشکاری می‌توانند یک یا چند پارامتر از پارامترهای مذکور را تحت تأثیر قرار دهند. این فرایندها به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند؛ روش‌های اصلاح هندسه جوش و روش‌های مبتنی بر تنش پسماند. از رایج‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از: سنگ‌زنی، کوبش با گلوله و ذوب مجدد به‌وسیله تنگستن گاز خنثی (Galtier, Stanikov, 2004; Kirkhope, Bell, Caron, 1999).

یکی از جهات در حال پیشرفت در استفاده از انرژی پرقدرت مافوق صوت در کاربردهای صنعتی، اعمال ضربه مافوق صوتی بر مواد، اجزا و سازه‌های جوشکاری شده به‌عنوان عملیات پس از جوشکاری است. این روش تأثیرات مفید زیادی را در فلزات و آلیاژها به وجود می‌آورد، که شامل افزایش مقاومت مواد به شکست‌های وابسته به سطح مانند خستگی، خستگی فرسایشی و خوردگی توأم با تنش است. در طی مراحل مختلف گسترش این فناوری، فرایند کوبش مافوق صوتی به نام‌هایی همچون عملیات مافوق صوتی، عملیات ضربه مافوق صوتی و همچنین کوبش ضربه‌ای مافوق صوتی شناخته شده است (Kurdryavstev, Kleiman, 2006).

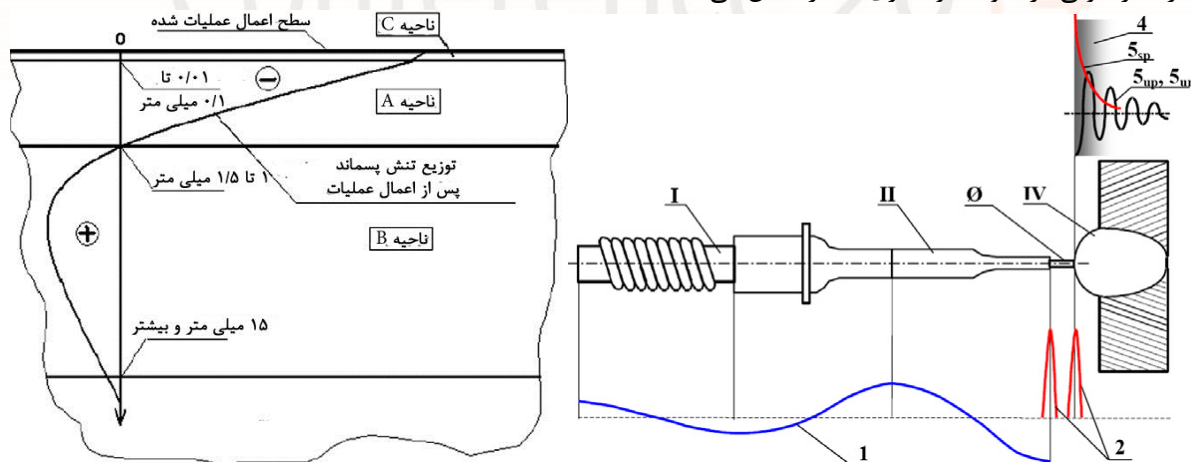
¹ Stress Corrosion Cracking (SCC)

از تفاوت‌ها و مزایای مهم این روش نسبت به روش‌های سنتی می‌توان به سهولت، دقت و سرعت آن اشاره نمود به‌علاوه روش‌های کلاسیک تنها مبتنی بر تنش‌زدایی است اما روش مدرن عملیات ضربات مافوق صوت، علاوه بر تنش‌زدایی، هندسه پنجه جوش از قبیل شعاع و زاویه آن را بهبود بخشیده و موجب کاهش تمرکز تنش در این نواحی خواهد شد؛ همچنین در برخی موارد می‌توان با اعمال تغییر شکل‌های پلاستیک شدید تنش‌های فشاری زیاد اعمال کرده که باعث بسته شدن ترک‌ها و حفرات می‌گردد که از مهم‌ترین ویژگی این روش در افزایش عمر کاری قطعات محسوب می‌گردد. شکستن دانه‌های سطحی و بازآرایی دانه‌ها در ابعاد نانو و در پی آن افزایش سختی سطح و قابل‌استفاده بودن برای قطعات حجیم، از دیگر مزایای این روش می‌باشند (Statnikov, 1999).

در این مقاله، به بررسی اثر عملیات ضربه مافوق صوتی بر عمر خستگی و خستگی خوردگی لوله‌های جوشکاری شده از جنس فولاد A106-B قشم که از جمله قطعات پرکاربرد در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی می‌باشند، تهیه‌شده توسط پالایشگاه گاز سرخون و قشم، در محیط شبیه‌سازی شده پالایشگاهی، پرداخته‌شده و تأثیر عملیات ضربه فراصوتی بر رفتار خستگی و خستگی خوردگی باهم مقایسه می‌شوند.

مبانی نظری پژوهش

در این بخش، به مبانی نظری و سازوکارهای بهبود رفتار خستگی فلزات به‌واسطه اعمال عملیات ضربه فراصوتی پرداخته خواهد شد. به‌طورکلی، تجهیزات عملیات ضربه فراصوتی شامل یک منبع تغذیه با فرکانس و ولتاژ بالا، مبدل فراصوت، متمرکز کننده و ابزار ضربه‌زننده است. شکل ۱ (راست)، سازوکار عملکرد کوبش فراصوتی را به‌صورت نمادین نشان می‌دهد. مبدل فراصوت I، نیرو را منبع تغذیه دریافت کرده و امواج ایستای I در نوک ایجاد می‌گردد. سپس دامنه این امواج در متمرکز کننده II تقویت شده و به ابزار ضربه‌زننده III منتقل می‌گردد. ارتعاش نوک ابزار بر روی سطح قطعه کار ضربه وارد می‌کند (امواج II) و موجب اعمال تغییر شکل پلاستیک بر سطح می‌گردد (ناحیه IV). به‌عنوان یک نتیجه این تغییر شکل پلاستیک، تنش پسماند فشاری بر روی سطح قطعه اعمال می‌شود که مقدار آن به‌تدریج در لایه‌های زیرین کاهش می‌یابد. نفوذ انرژی ارتعاشی (موج ۵) حرکت لایه‌های زیرین تحت تأثیر تنش‌های پسماند کششی ناشی از فرایندهای قبلی تسهیل کرده و به رهاسازی آن‌ها کمک می‌کند. شکل ۱ (چپ)، ابعاد تقریبی ناحیه تحت عملیات ضربه فراصوتی در نمونه جوشکاری شده را نشان می‌دهد (Abdullah, Maleki, Eskandari, 2012).



شکل ۱- سازوکار عملکرد عملیات ضربه فراصوتی (راست). سطح مقطع قطعه اعمال عملیات شده به‌صورت نمادین (چپ) (Abdullah et al, 2012).

پیشینه پژوهش

در این بخش به تاریخچه و مطالعات و پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه تأثیر عملیات ضربه فراصوتی بر رفتار مکانیکی فلزات مختلف پرداخته خواهد شد.

مطالعات صورت گرفته بر اعمال عملیات ضربه فراصوتی بر فلزات از سال ۱۹۵۰ میلادی در ایالات متحده، اتریش و شوروی سابق آغاز شد. این تحقیقات بیشتر تئوری بوده و عمدتاً بر نشان دادن تأثیرات مفید فراصوت بر شکل‌پذیری و استحکام فلزات متمرکز شده بودند. در همان زمان، برای اولین بار تلاش‌هایی برای بهبود هندسه اتصالات جوشکاری شده از طریق عملیات تغییر شکل به‌وسیله فراصوت انجام شد. مشکل اصلی، طراحی تجهیزاتی برای اعمال عملیات ضربه فراصوتی بود. در دهه ۶۰ و ۷۰ میلادی، پیشرفت‌هایی در زمینه طراحی این تجهیزات در ایالات متحده و شوروی سابق حاصل شد. تحقیقات ویژه‌ای به‌خصوص در موسسه فیزیک فلزی در کیف اوکراین انجام شد. با فناوری در دسترس، این موسسه شروع به تمرکز بر بهبود رفتار خستگی جوش‌ها کرد؛ اما به دلیل مرزهای سیاسی، این یافته‌ها در کشورهای شرقی اروپایی نگه‌داشته می‌شوند. فقط پس از سقوط کمونیسم، فواید عملیات بهینه‌سازی جوش توسط کوبش فراصوتی در غرب نیز بهتر شناخته می‌گردد که منجر به همکاری نزدیک موسسه فیزیک فلزی صنایع غربی می‌شود. در حال حاضر، تحقیقات عمدتاً بر گسترش کاربردهای بهینه و کاربرپسند کوبش فراصوتی برای صنعت متمرکز شده است. برخی پژوهش‌های انجام‌شده به شرح زیر است (Liu, 2013).

در پژوهش انجام‌شده بر رفتار خستگی استحکام دهنده‌ها و صفحات پوششی جوشکاری شده از جنس فولاد A588، بهبود عملکرد خستگی به‌واسطه بهبود مقطع پنجه جوش، تغییر در ریزساختار و اعمال تنش فشاری سودمند در ناحیه پنجه جوش گزارش شده است. همچنین اذعان شده که این عملیات آستانه رشد ترک و حد خستگی را بدون تغییر در شیب نمودار عمر-تنش بالا می‌برد (Roy, Fisher, Yen, 2003).

در پژوهش انجام‌شده توسط آقای والبریج و همکاران جهت ارائه یک مدل به‌منظور تعیین میزان تأثیر عملیات پس از جوشکاری کوبش فراصوتی بر عملکرد خستگی اتصالات لوله‌ای پل‌ها، افزایش قابل توجهی در عمر خستگی اتصالات جوشکاری شده ذکر شده پس از اعمال عملیات گزارش شده است (Walbridge, Nussbaumer, 2007).

در پژوهش انجام‌شده توسط آقای شلوندی و همکاران میزان تأثیر تنش‌زدایی فراصوتی و تنش‌زدایی حرارتی بر نمونه‌های از جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶ مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش کاهش ۳۶ درصدی در میزان تنش پسماند پس از اعمال عملیات تنش‌زدایی فراصوتی گزارش شده است (Shalvandi et al, 2013).

در پژوهش صورت گرفته توسط آقای موردیاک و همکاران بر میزان بهبود مقاومت به خوردگی در محلول نمکی آلیاژ زیرکونیوم به‌واسطه اعمال عملیات کوبش ضربه فراصوتی، افزایش مقاومت به خوردگی به دلیل افزایش ناحیه رویینگی این آلیاژ گزارش شده است (Mordyuk, Karasevskaya, Prokopenko, 2013).

در پژوهش انجام‌شده توسط آقای گالتیر و همکاران بر تأثیر عملیات ضربه فراصوتی بر رفتار خستگی فولادهای استحکام بالا جوشکاری شده به‌صورت تی، افزایش حد خستگی در ۲ میلیون سیکل به میزان ۱۲۰ درصد گزارش شده است (Galtier et al, 2004).
در پژوهش انجام‌شده توسط آقای عبدالله و همکاران بر تأثیر عملیات ضربه فراصوتی بر ورق فولاد ضدزنگ ۳۰۴ جوشکاری شده به‌صورت لب‌به‌لب، عمر خستگی به میزان ۱۰۸ درصد و استحکام خستگی به میزان ۲۱ درصد بهبود یافته، همچنین میزان بهبود مقاومت خوردگی به‌واسطه اعمال عملیات ضربه فراصوتی ۱۰۰ درصد گزارش شده است (Abdullah et al, 2012).

در پژوهش انجام شده توسط آقای لیاو و همکاران بر تأثیر عملیات ضربه فراصوتی بر رفتار خستگی ورق‌های پوسته‌پوسته شده از جنس آلومینیوم، تغییر در سازوکار ایجاد ترک به واسطه اعمال عملیات ضربه فراصوتی، همچنین اعمال عملیات ضربه فراصوتی موجب ایجاد تنش پسماند فشاری به مقدار ۱۵۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال بر روی سطح قطعه شده که منجر به افزایش عمر خستگی شده بود (Liao, Chen, Bellinger, 2008).

روش پژوهش

در این بخش، به روند آماده‌سازی نمونه‌ها و اعمال عملیات ضربه فراصوتی و همچنین روند انجام آزمون‌های کشش، خستگی، خستگی خوردگی و تحلیل تنش پسماند پرداخته شده است.

جنس و ابعاد نمونه‌ها

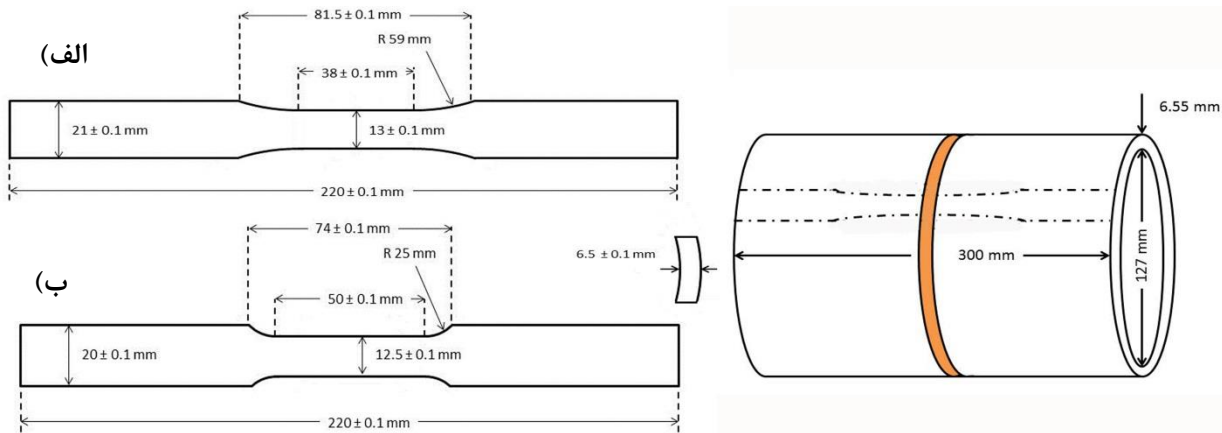
لوله فولادی A106-B به ضخامت جداره ۶/۵۵ میلی‌متر، قطر داخلی ۱۲۷ میلی‌متر (۵ اینچ) و طول ۱۵۰ میلی‌متر با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ و استحکام تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال و استحکام کششی ۴۱۵ مگاپاسکال توسط پالایشگاه گاز سرخون و قشم تأمین شده و طبق استاندارد ASME و پارامترهای ارائه شده در جدول ۲ به صورت لب‌به‌لب به روش قوس الکتریکی با الکتروود دستی پوشش‌دار جوشکاری شدند. سپس ۳ نمونه دمبلی شکل آزمون کشش و ۱۲ نمونه دمبلی شکل آزمون خستگی خوردگی (۶ نمونه اعمال عملیات شده و ۶ نمونه اعمال عملیات نشده)، به ترتیب با توجه به استانداردهای ASTM E8 و ASTM E466 از لوله استخراج شدند (شکل ۲). بدین منظور، ابتدا لوله توسط اره نواری به شکل نوارهای با عرض ۲۵ میلی‌متر برش داده شده و سپس نوارها توسط ماشین فرز به صورت دمبلی شکل آماده شدند. به منظور حذف اثر عملیات برش و ماشین‌کاری بر میزان تأثیر عملیات ضربه مافوق صوتی، این عملیات پس از ساخت و پرداخت نمونه‌ها، بر پنجه جوش خارجی لوله اعمال گردید.

جدول ۱- درصد عناصر آلیاژی موجود در فولاد A106-B

عناصر	کربن (بیشینه)	منگنز	فسفر (بیشینه)	گوگرد (بیشینه)	سیلیسیوم (کمینه)
درصد وزنی	۰/۳	۰/۲۹ - ۱/۰۶	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۱
عناصر	کروم (بیشینه)	مس (بیشینه)	مولیبدن (بیشینه)	نیکل (بیشینه)	وانادیوم (بیشینه)
درصد وزنی	۰/۴	۰/۴	۰/۱۵	۰/۴	۰/۰۸

جدول ۲- پارامترهای جوشکاری لوله‌ها.

شدت جریان	قطبیت	اندازه الکتروود	جنس الکتروود	پاس رویه
۸۰ - ۴۰ آمپر	DCEP	۳/۲ میلی‌متر	E-7018	پاس پرکن
۸۰ - ۴۰ آمپر	DCEP	۳/۲ میلی‌متر	E-7018	پاس ریشه
۱۴۰ - ۹۰ آمپر	DCEP	۲/۵ میلی‌متر	E-6010	



شکل ۲- الف) نمونه آزمون خستگی و خستگی خوردگی استخراج شده مطابق با استاندارد. ب) نمونه آزمون کشش استخراج شده مطابق با استاندارد

اعمال عملیات ضربه فراصوتی

همان‌طور که گفته شد، جهت حذف اثر فرایند برش و ماشین‌کاری بر میزان تأثیر عملیات ضربه فراصوتی، این عملیات پس از فرایند برش و ماشین‌کاری نمونه‌ها، بر پنجه جوش اعمال گردید. فرکانس کاری عملیات ۲۰ کیلوهرتز و بیشینه توان ابزار اعمال ۱۲۰۰ وات بود. ضربه زننده‌ها ۴ پین از جنس فولاد بلبرینگ به قطر ۵ میلی‌متر بودند که به‌طور مستقیم به مبدل مافوق صوت متصل می‌شدند. منبع تغذیه مافوق صوت از جنس MPI Ultrasonic Swiss بود که به‌طور خودکار توان مصرفی ضربه زننده‌ها را تنظیم می‌نمود (شکل ۳). عملیات ضربه مافوق صوت بر روی پنجه جوش خارجی نمونه‌ها به مدت زمان ۱ دقیقه برای هر نمونه اعمال گردید.



شکل ۳- نحوه اعمال عملیات ضربه فراصوتی بر لوله فولادی جوشکاری شده (راست). تجهیزات مورد استفاده در اعمال عملیات (چپ).

آزمون کشش

به‌منظور تعیین استحکام تسلیم نمونه‌های جوشکاری شده و تعیین میزان بار جهت انجام آزمون خستگی خوردگی، آزمون کشش بر ۳ نمونه اعمال گردید. پارامترهای آزمون کشش در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول، میانگین استحکام تسلیم برای لوله فولاد جوشکاری شده ۳۶۰/۶ مگاپاسکال محاسبه شد.

جدول ۳- پارامترهای آزمون کشش.

مدل دستگاه	شماره نمونه	نرخ بارگذاری mm/s	نیروی تسلیم KN	سطح مقطع mm ²	تنش تسلیم Mpa
IDTNT DTU-900mh ۳۰ کیلونیوتن	۱	۵	۲۹/۶۷	۸۱/۸۸	۳۶۲/۷
	۲	۵	۲۹/۴۸	۸۱/۸۸	۳۶۰/۱
	۳	۵	۲۹/۳۸	۸۱/۸۸	۳۵۸/۹

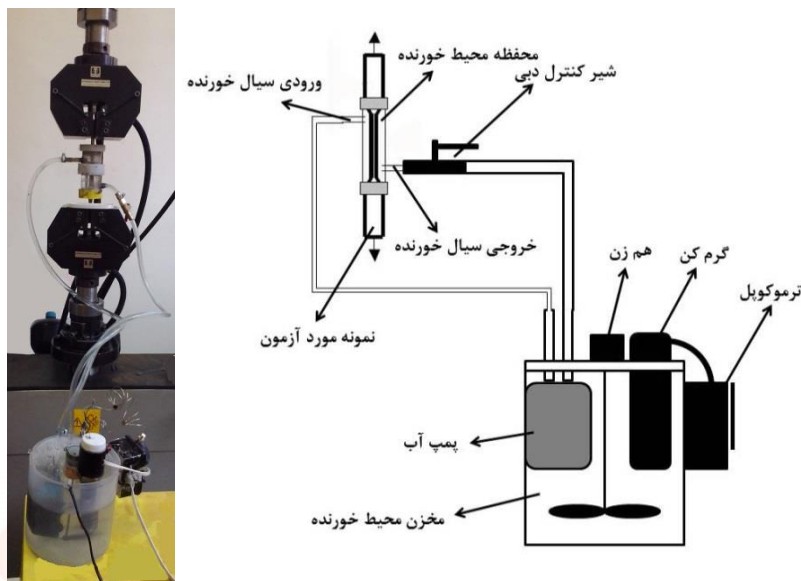
آزمون خستگی و خستگی خوردگی

آزمون‌های خستگی برای ۱۲ نمونه (۶ نمونه اعمال عملیات شده و ۶ نمونه اعمال عملیات نشده) بر طبق نتایج به دست آمده از آزمون کشش انجام گردید. نسبت تنش^۲ و فرکانس بارگذاری بر طبق استاندارد ASTM E467 به ترتیب به صورت ۰/۰۵ و ۱۵ هرتز تنظیم شدند. بازه‌های تنشی اعمالی به صورت نسبت‌های مختلف ۸۵٪، ۹۰٪ و ۹۵٪ استحکام تسلیم در نظر گرفته شده و برای هر بازه دو آزمون انجام گرفت که به نام‌های آزمون ۱ و آزمون ۲ در جدول ۴ نام‌گذاری شده‌اند. با توجه به مساحت سطح مقطع نمونه‌ها، نیروی کمینه و بیشینه تعیین شده و بر روی دستگاه آزمون خستگی دارتک با ظرفیت اعمال نیروی ۵۰ کیلو نیوتن تنظیم شدند. آزمون خستگی خوردگی نیز مشابه با آزمون خستگی انجام شد؛ به جز اینکه در این آزمون از فرکانس بارگذاری ۱ هرتز استفاده شده و محیط انجام آزمون، محیط شبیه‌سازی پالایشگاهی بود که در ادامه توصیف خواهد شد.

سامانه اعمال محیط خوردنده

محیط خوردنده توسط یک سامانه گردش سیال بر روی نمونه‌ها حین انجام آزمون خستگی اعمال گردید. سامانه طراحی و ساخته شده در شکل ۴ نشان داده شده است. سامانه شامل یک مخزن با ظرفیت تقریبی ۲/۵ لیتر حاوی محیط خوردنده و یک محفظه دربرگیرنده نمونه بود. محلول خوردنده پس از رسیدن به دمای موردنیاز توسط گرم‌کن تعبیه شده درون مخزن، از طریق لوله انتقال توسط یک پمپ ۶۰ وات به محفظه ارسال شده و از طریق شیر تنظیم دبی خروجی محفظه، به درون مخزن برگردانده می‌شد. از یک همزن نیز به منظور همگن‌سازی محلول استفاده گردید. محلول خوردنده، شبیه‌سازی محیط گاز ترش پالایشگاهی بود. در این محلول به جای گاز سمی و خطرناک سولفید هیدروژن از بلورهای سدیم تیوسولفات استفاده گردید (TsujiKawa, Miyasaka, Veda, Ando, Yamada, 1993). محتوی محلول مورد استفاده عبارت بود از: محلول ۱۰ درصد وزنی سدیم کلرید + محلول آبی ۰/۱ تا ۰/۱ مولار سدیم تیوسولفات با pH ۳/۵ و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد. لازم به ذکر است pH محلول توسط محلول ۱ مولار اسید سولفوریک و محلول ۱ مولار سود سوزآور، به میزان موردنیاز تنظیم شد. محفظه دربرگیرنده نمونه، یک تیوب به قطر ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰ میلی‌متر از جنس پلکسی گلاس بود که از بالا به صورت چپ‌گرد و از پایین به صورت راست‌گرد رزوه شده بود.

² Stress ratio

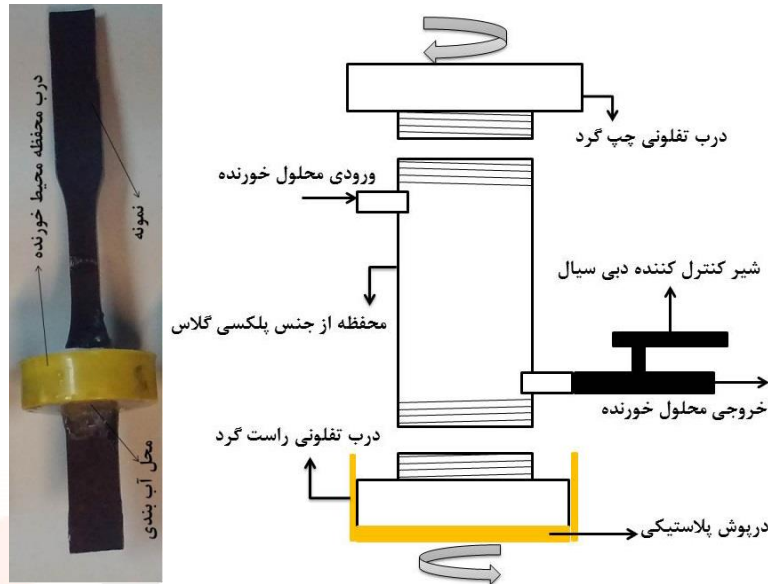


شکل ۴- شکل نمادین سامانه آزمون خستگی خوردگی (راست). شکل واقعی سامانه آزمون خستگی خوردگی (چپ).

آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت آماده‌سازی نمونه‌های خستگی خوردگی، ۱۲ درب از جنس تفلون رزوه شده به صورت راست‌گرد به اندازه عرض نمونه سوراخ‌کاری شده و نمونه‌های دمبلی شکل از آنها عبور داده شد. جهت آب‌بندی محل ورود نمونه به درب از مخلوط موم زنبورعسل^۳ و کلیفون به نسبت ۳ به ۱ و رزین پلی‌استر استفاده گردید. تصویر نمادین محفظه دربرگیرنده نمونه و نمونه واقعی آزمون خستگی خوردگی در شکل ۵ ارائه شده است.

³ Beeswax



شکل ۵- شکل نمادین محفظه دربرگیرنده نمونه (راست). نمونه آماده شده آزمون خستگی خوردگی (چپ).

آزمون تحلیل تنش پسماند به روش مافوق صوت

آزمون تحلیل تنش پسماند به روش غیر مخرب فراصوتی برای لوله جوشکاری شده در دو طرف جوش انجام گردید. بدین منظور یک طرف جوش اعمال عملیات شده و طرف دیگر بدون اعمال عملیات مورد آزمون قرار گرفت. اجزا مورد استفاده در تحلیل تنش به روش فراصوت عبارت بودند از: جعبه فراصوت^۴، رایانه، دو مبدل فراصوت با بسامد ۵ مگاهرتز که یکی از آن‌ها فرستنده و یکی گیرنده بوده و هر دو بر روی یک گوه^۵ ساخته شده از پلکسی گلاس سوار شده بودند (شکل ۶). همچنین جهت جفت شدن بهتر مبدل‌ها و قطعه، از ژل مافوق صوت استفاده شد.



شکل ۶- تجهیزات مورد استفاده در آزمون تحلیل تنش پسماند.

⁴ Ultrasonic box
⁵ Wedge

با استفاده از میدل‌های فراصوت با بسامد ۵ مگاهرتز می‌توان تنش پسماند را تا عمق ۱ میلی‌متر زیر سطح اندازه گرفت. فاصله نقاط تحلیل تنش بر روی لوله ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد و نزدیک‌ترین نقطه به خط جوش ۷/۵ میلی‌متر بود.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج آزمون‌های خستگی اتمسفری، خستگی خوردگی شامل نمودار عمر- تنش آزمون خستگی اتمسفری و خستگی خوردگی و نتایج آماری مدل رگرسیون خطی و همچنین نتایج مربوط به تخمین تنش پسماند در دو طرف خط جوش ارائه می‌گردد. یکی از مستعدترین مناطق برای ایجاد ترک خستگی منطقه پنجه جوش است. ترک‌های ایجاد شده در این مناطق منجر به ایجاد تمرکز تنش می‌شود. هنگامی که ترک‌ها از سطح شروع به رشد در عمق قطعه می‌کنند، سطح مقطع قطعه کاهش پیدا کرده، تنش زیاد شده و منجر به شکست نهایی می‌گردد. بنابراین، می‌توان گفت که حذف ترک‌ها و به تعویق انداختن رشد آن‌ها یکی از راه‌های مؤثر برای افزایش عمر خستگی قطعات بشمار می‌رود.

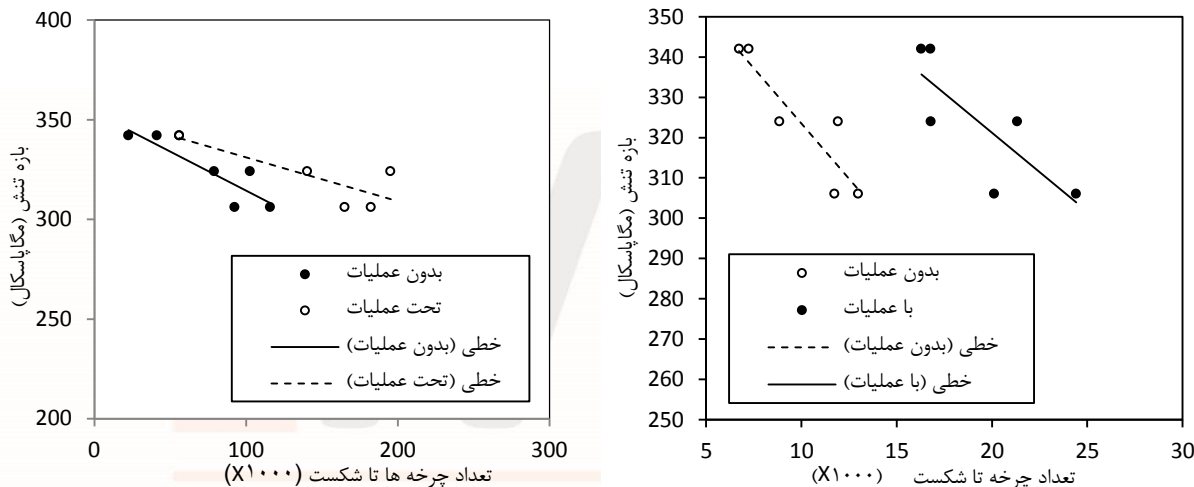
همان‌طور که گفته شد، آزمون خستگی در درصد‌های مختلف استحکام تسلیم برای نمونه‌ها انجام شد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، علی‌رغم برخی مطالعات صورت گرفته، مانند مطالعه صورت گرفته بر فولاد ضدزنگ ۳۰۴ (Abdullah et al, 2012)، که اعمال عملیات ضربه فراصوتی موجب جابجایی محل شکست شده بود، در این مطالعه، شکست در تمام نمونه‌های آزمایش شده (اعمال عملیات شده و نشده)، از ناحیه اتصال فلز جوش به فاز پایه یا ناحیه متأثر از حرارت صورت گرفت، که می‌توان با توجه به یک‌طرفه بودن جوش و عدم دسترسی اپراتور به درون لوله در محیط واقعی جهت جوشکاری و اعمال عملیات ضربه فراصوتی، عدم تأثیر این عملیات بر منطقه شکست را استنباط نمود.



شکل ۷- نمونه‌های آزمون خستگی پس از انجام آزمون (راست). نمونه‌های آزمون خستگی خوردگی پس از انجام آزمون (چپ).

⁶ Heat affected zone (HAZ)

با توجه به نمودارهای عمر- تنش رسم شده در شکل ۸، به‌طور کلی افزایش عمر خستگی را به‌واسطه اعمال عملیات ضربات فراصوتی برای بازه تنش ۱ (۳۰۶ مگاپاسکال)، ۷۹ درصد، بازه تنش ۲ (۳۲۴ مگاپاسکال)، ۸۳ درصد و بازه تنش ۳ (۳۴۲ مگاپاسکال)، ۱۳۷ درصد می‌توان مشاهده کرد که به‌صورت میانگین افزایش ۹۹/۷ درصدی در عمر خستگی خوردگی و افزایش ۵۸ درصدی در عمر خستگی اتمسفری حاصل شده است. این افزایش در عمر خستگی به دلیل حذف تنش‌های پسماند کششی مضر ناشی از جوشکاری در ناحیه اتصال فلز جوش به فلز پایه، اعمال تنش‌های سودمند فشاری که موجب کاهش بار تحمل شده توسط این ناحیه در دوره‌های بارگذاری شده و بستن ترک‌های به وجود آمده به‌واسطه فرایند جوشکاری یا کند کردن رشد آن‌ها و افزایش سختی و جلوگیری از ایجاد ترک‌های سطحی، است. به‌علاوه، می‌توان گفت در صورت دسترسی به ناحیه ریشه جوش و اعمال عملیات بر آن ناحیه این درصد می‌تواند به درصد‌های بالاتر افزایش یابد.



شکل ۸- نمودار عمر- تنش آزمون خستگی خوردگی (راست). نمودار عمر- تنش آزمون خستگی (چپ).

بیشتر ترک‌ها از ناحیه سطح یا زیر سطح سازه‌ها و قطعات ایجاد می‌شوند و به دلیل تنش‌های کششی رشد می‌کنند. به دلیل تنش پسماند فشاری ایجاد شده در یک عمق مشخص توسط عملیات ضربه فراصوتی، تنش کششی اعمالی حین بارگذاری دوره‌ای، و تنش فشاری پسماند ایجاد شده توسط عملیات، همدیگر را خنثی کرده و منجر به کاهش سطح تنش کلی و در نتیجه افزایش استحکام خستگی مواد و افزایش عمر خستگی آن‌ها می‌گردند. بر اساس رابطه گودمن:

$$\sigma_a = \sigma_{fat} \times \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{ts}}\right) = \sigma_{fat} - \left(\frac{\sigma_{fat}}{\sigma_{ts}}\right) \times \sigma_m = \sigma_{fat} - n \times \sigma_m \quad (1)$$

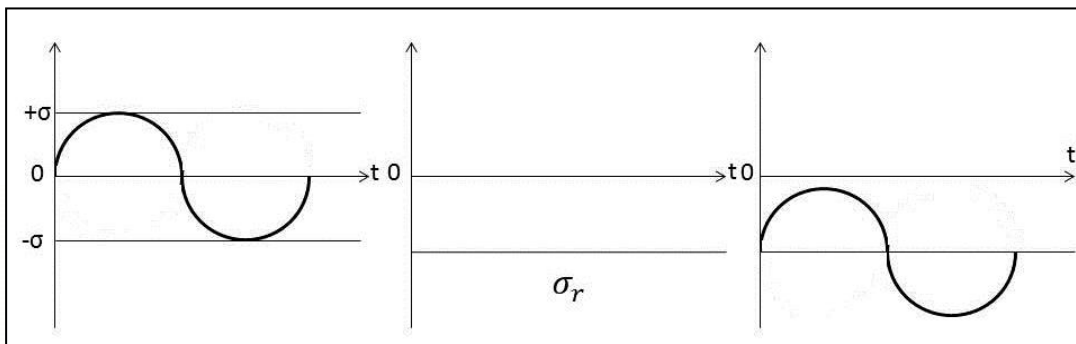
که σ_m تنش میانگین، σ_a تنش متناوب، σ_{fat} حد خستگی و $n = \sigma_{fat} / \sigma_{ts}$ ضریب حساسیت به تنش گفته می‌شود، می‌باشند. هنگامی که تنش پسماند با تنش میانگین معادل در نظر گرفته شود، رابطه (۱) خواهد شد:

$$\sigma_a = \sigma_{fat} - n \times (\sigma_m + \sigma_r) \quad (2)$$

که پارامتر σ_r همان تنش پسماند است که نقش تنش میانگین را بازی می‌کند. بنابراین $\Delta\sigma_a$ تغییر استحکام خستگی به دلیل وجود تنش پسماند است که به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

$$\Delta\sigma_a = -n \times \sigma_r \quad (3)$$

مطالب گفته شده نشان می‌دهند، هنگامی که ضریب حساسیت به تنش افزایش یابد، تأثیر تنش میانگین بر استحکام خستگی نیز بیشتر می‌شود و افزایش تنش پسماند فشاری موجب افزایش استحکام خستگی خواهد شد. در آزمون‌های انجام شده در این مقاله، هنگامی که بار متناوب به بیشینه تنش کششی می‌رسد، تنش پسماند فشاری می‌تواند نقش کاهنده مقدار کلی تنش را بازی کرده و در نتیجه لایه سطحی فلز را در سطح تنش پایین‌تری نگه دارد. شکل ۹ تصویر نمادین حالت گفته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۹- تنش پسماند و بارگذاری چرخه‌ای قبل و بعد از برهم‌کنش.

کاهش تنش پسماند به واسطه اعمال عملیات ضربه فراصوتی می‌تواند موجب کاهش میزان خوردگی ناشی از تنش نیز شود، همچنین با ایجاد تغییر شکل پلاستیک سطحی، حفرات سطحی و زیرسطحی که مکانی برای نفوذ یون‌های خوردنده کلر هستند، بسته می‌شوند، از این رو فلز در محلول حاوی یون‌های کلر مقاوم‌تر می‌گردد.

با توجه به نمودار رسم شده در شکل ۸ به روش رگرسیون خطی، می‌توان میزان بهبود استحکام خستگی به واسطه اعمال عملیات ضربه فراصوتی را طبق جدول ۴ و جدول ۵ محاسبه نمود.

جدول ۴- مدل آماری رگرسیون خطی نتایج آزمون خستگی خوردگی.

نمودار عمر برحسب تنش	بدون اعمال عملیات	اعمال عملیات شده
شیب	-۰/۰۰۵۵	-۰/۰۰۳۹
عرض از مبدأ	۳۸۷/۳۷	۳۹۹/۴۷
استحکام در ۲۰۰۰۰ چرخه	۲۶۷/۳۷	۳۲۱/۴۷
میزان بهبود	-	٪۱۹/۸

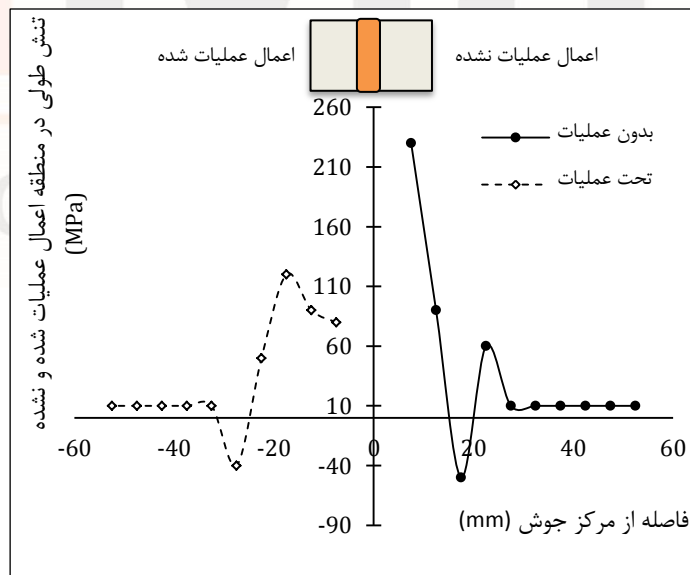
جدول ۵- مدل آماری رگرسیون خطی نتایج آزمون خستگی.

نمودار عمر برحسب تنش	بدون اعمال عملیات	اعمال عملیات شده
شیب	-۰/۰۰۰۴	-۰/۰۰۰۲
عرض از مبدأ	۳۵۳/۶۱	۳۵۲/۸۸
استحکام در ۲۰۰۰۰ چرخه	۲۷۳/۶۱	۳۱۲/۸۸
میزان بهبود	-	٪۱۴

همان‌طور که گفته شد، در آزمون تحلیل تنش پسماند، تنش پسماند ناشی از جوشکاری دو سمت خط جوش به کمک امواج فراصوت تخمین زده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به واسطه اعمال عملیات ضربه فراصوتی در سمت چپ نمودار شکل ۱۰، میزان تنش پسماند در نزدیک‌ترین نقطه به خط جوش از ۲۳۰ مگاپاسکال در سمت اعمال عملیات نشده به ۸۰ مگاپاسکال در سمت اعمال عملیات شده افت کرده است. همچنین، با توجه به شکل ۱۰، و با مقایسه نقاط متقارن در دو طرف خط جوش، مشاهده می‌شود که تأثیر عملیات اعمال شده بر تنش پسماند با دور شدن از خط جوش محو می‌گردد.

با توجه به نتایج، اعمال عملیات ضربه فراصوتی موجب اعمال تنش فشاری سودمند شده و برهم‌کنش تنش‌های کششی پسماند و تنش‌های فشاری اعمالی را موجب می‌گردد، بنابراین موجب کاهش تنش میانگین تحمل شده توسط سازه حین بارهای دوره‌ای می‌شود، از این‌رو عمر خستگی سازه را به میزان قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. از طرفی، کاهش تنش پسماند می‌تواند منجر به کاهش میزان خوردگی ناشی از تنش می‌شود. افزایش حدوداً صد درصدی عمر خستگی در محیط خوردنده گویای این مسئله است.

با مقایسه نمودارهای عمر- تنش مربوط به خستگی و خستگی خوردگی، مشاهده می‌شود میزان بهبود عمر خستگی خوردگی به- واسطه اعمال عملیات ضربه فراصوتی به میزان ۴۱ درصد بیشتر از بهبود در خستگی اتمسفری است. این موضوع را می‌توان به کاهش تنش پسماند به واسطه اعمال عملیات ضربه فراصوتی نسبت داد. تنش پسماند در قطعات موجب بالاتر رفتن انرژی آن منطقه شده و در نتیجه افزایش سرعت خوردگی را در پی دارد؛ اعمال عملیات ضربه فراصوتی با کاهش تنش پسماند، سرعت خوردگی ناشی از تنش پسماند را نیز کاهش می‌دهد، از این‌رو، علاوه بر تأثیر عملیات ضربه فراصوتی بر رفتار خستگی خوردگی بیش از خستگی اتمسفری است.



شکل ۱۰- نمودار مقدار تنش پسماند تخمین زده شده بر حسب فاصله از خط جوش.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج و تحلیل‌های ارائه‌شده در بخش‌های قبل می‌توان نتایج ذیل را استنباط نمود:

- اعمال عملیات ضربه فراصوتی موجب افزایش عمر خستگی اتمسفری به میزان ۵۸ درصد و افزایش استحکام خستگی در ۲۰۰۰۰۰ چرخه به میزان ۱۴ برای نمونه‌ها مرتبط با این پژوهش شد.
- اعمال عملیات ضربه فراصوتی موجب افزایش عمر خستگی خوردگی به میزان ۹۹/۷ درصد و افزایش استحکام خستگی در ۲۰۰۰۰ چرخه به میزان ۱۹/۸ برای نمونه‌ها مرتبط با این پژوهش شد.
- میزان تنش پسماند در لوله به واسطه اعمال عملیات ضربه فراصوتی به یک‌سوم کاهش یافت.

منابع

- Abdullah, A., Malaki, M., Eskandari, A. (2012). "Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening", *Materials and Design*, 38, Pp. 7-18.
- Danqing, Y., Dongpo, W., Hongyang, J., Linxing, H. (2010). "The Effect of Ultrasonic Peening Treatment on the Ultra-Long Life Fatigue Behavior of Welded Joints", *Materials and Design*, 31, Pp. 3299-3307.
- Galtier, A., Stanikov, E.S. (2004). "The influence of ultrasonic impact treatment on fatigue behavior of welded joints in high-strength steel", *Welding in the World*, 48, Pp. 61-66.
- Gunther, H., Kuhlmann, U., Durr, A. (2005). "Rehabilitation welded joints by ultrasonic impact treatment (UIT)", *IABSE Symposium Lisbon*.
- Kim, W. H., Laird, C. (1978). "Crack nucleation and stage I propagation in high strain fatigue—II. Mechanism", *Acta Metallurgica*, 5, Pp. 789-799.
- Kirkhope, K. J., Bell, R., Caron, L., Basu, R. I., Ma, K. T. (1999). "Weld details fatigue life improvement techniques, part-1: review", *Marine structures*, 12, Pp. 447-474.
- Kudryavstev, Y., Kleiman, J. (2006). "Fatigue life improvement of tubular welded joint by ultrasonic peening", *International Institute of Welding*, XIII-2117-06.
- Liao, M., Chen, W.R., Bellinger, N.C. (2008) "Effect of ultrasonic impact treatment on fatigue behavior of naturally exfoliated aluminum alloys", *International Journal of Fatigue*, 30, Pp. 717-726.
- Liu, Zhe, (2013). "Corrosion behavior of designed ferritic-martensitic steels in supercritical water", Master of science in chemical engineering, University of Alberta, Canada, Pp. 120.
- Mordyuk, B.N., Karasevskaya, O.P., Prokopenko, G.I. (2013) "Structurally induced enhancement in corrosion resistance of Zr-2.5%Nb alloy in saline solution by applying ultrasonic impact peening", *Materials Science and Engineering A*, 559, Pp. 453-461.
- Pedersen, M., Mouritsen, O., Andersen, M., Wenderby, J. (2009). "Comparison of post weld treatment of high strength steel welded joints in medium cycle fatigue", *International Institute of Welding*, XIII-2272-09.

Roy, S., W. Fisher, J., T. Yen, B. (2003). "Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT)", *International Journal of Fatigue*, 25, Pp. 1239-1247.

Shalvandi, M., Hojjat, Y., Abdullah, A., Asadi, H. (2013), "Influence of ultrasonic stress relief on stainless steel 316 specimens: A comparison with thermal stress relief", *Materials and Design*, 46, Pp. 713-723.

Statnikov, S. (1999). "Guide for application of ultrasonic impact treatment improving fatigue life of welded structures", *International Institute of Welding, IIW/IIS - DOCUMENT XIII - 1757 - 99*.

Syrett B., Acharya A. "Corrosion and degradation of implant materials", ASTM International, 1979.

Tsujikawa, S., Miyasaka, A., Veda, M., Ando, S., Yamada, T. (1993). "Alternative for evaluating sour gas resistance of low-alloy steels and corrosion resistant alloys", *corrosion*, 49, Pp. 409-419.

Walbridge, S., Nussabaumer, A. (2007). "A probabilistic model for determining the effect of post-weld treatment on the fatigue performance of tubular bridge joints", *International Journal of Fatigue*, 29, Pp. 516-532.

Yang, X., Zhou, J., Ling, X., (2012). " Study on Plastic Damage of AISI 304 Stainless Steel Induced by Ultrasonic Impact Treatment", *Materilas and Design*, 36, Pp. 477-481.

iMat
Conference 2014

8th Congress & 3rd International
Engineering Materials & Metallurgy
Conference

Iranian Metallurgical Engineering Society & Iranian Foundrymen's Soci-
18-19 Nov., 2014 - Shahid Beheshti Conference Center, Tehran, Iran

iMat
Conference 2014

هشتمین همایش مشترک و
سومین کنفرانس بین المللی
مواد مهندسی و متالورژی

(انجمن مهندسين متالورژی ايران و انجمن علمی ريخته‌گری ايران)
۲۷ و ۲۸ آبان ۱۳۹۳ - مرکز همایش‌های بین‌المللی شهید بهشتی، تهران

iMat
Conference 2014