

## تأثیر عملیات ضربه فراصوتی بر رفتار خستگی لوله‌های فولادی جوشکاری شده در محیط خورنده پالایشگاهی

مرتضی داوری<sup>۱\*</sup>، سید علی صدوق ونینی<sup>۲</sup> و غلام علی آشوری<sup>۳</sup>

### چکیده

تحلیل شکست‌های ناشی از خستگی، یکی از مسایل مهم در صنایعی همچون نفت، گاز و پتروشیمی بشمار می‌رود. از سوی دیگر جوشکاری یکی از روش‌های متداول و اجتناب‌ناپذیر در اتصال قطعات بوده و به دلیل عیوب ذاتی موجود در این اتصالات، خطرات ناشی از شکست‌های خستگی، بیش از سایر نقاط، متوجه آن‌هاست. یکی از منابع ترک و به دنبال آن شکست در جوش، ناحیه پنجه جوش است که حاوی مکان‌های تمرکز تنش و تنش پسماند زیان‌بار کششی است. راه‌های متفاوتی جهت بهبود عملکرد این مناطق مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ از جمله روش‌های کوبش، ذوب دوباره و سنگ‌زنی که به عملیات پس از جوشکاری موسوم‌اند. یکی از روش‌های نوین و درحال پیشرفت، روش عملیات ضربه فراصوتی است که می‌تواند عمر خستگی سازه‌های جوشکاری شده را به صورت قابل توجه افزایش دهد. از سوی دیگر، این روش می‌تواند تأثیرهای مثبتی بر مقاومت به خوردگی فلزات نیز داشته باشد. در این مقاله به بررسی تأثیر عملیات ضربه فراصوتی بر عمر خستگی خوردگی (خستگی در محیط خورنده) لوله‌های فولادی A106-B پرداخته شده است. همچنین، تأثیر این عملیات پس از جوشکاری با استفاده از آزمون‌های ریز سختی سنجی، تحلیل تنش پسماند و اندازه‌گیری هندسه جوش به عنوان آزمون‌های تکمیلی، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اعمال عملیات ضربات فراصوتی به‌طور میانگین موجب افزایش ۹۹/۴ درصدی عمر خستگی شد. همچنین، استحکام خستگی در ۲۰۰۰۰ چرخه را به مقدار ۱۹/۸ درصد بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: عمر خستگی خوردگی، اتصالات جوشی لب‌به‌لب، عملیات ضربه فراصوتی، لوله فولادی A106-B.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی خوردگی و حفاظت از مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، بخش مهندسی معدن و متالورژی.

۲- استاده، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، بخش مهندسی مکانیک.

۳- مهندس بازرسی فنی مکانیک، پالایشگاه گاز سرخون و قشم، بندرعباس.

\* نویسنده مسئول مقاله: m.daavari6753@gmail.com

## پیشگفتار

خستگی عبارت است از خسارات انباشته شونده، موضعی و دایمی ناشی از تنش‌های نوسانی و تکرارشونده که گاهی اوقات کم‌تر از تنش استاتیک طراحی سازه‌ها قرار دارند. این بارهای دوره‌ای می‌توانند منجر به رشد تدریجی ترک‌ها و یا شکست‌های ناگهانی سازه‌ها شوند. مسئله خستگی بیش از سایر سازوکارهای شکست در سازه‌های فلزی مهندسی مورد توجه واقع می‌شود [۱]. خستگی خوردگی هنگامی رخ می‌دهد که سازه به گونه همزمان تحت بار دوره‌ای و محیط خوردنده قرار می‌گیرد. تقریباً همه سازه‌های مهندسی در حین عمر کاری‌شان در چنین شرایطی قرار می‌گیرند. محیط، نقش قابل توجهی در خستگی مواد ساختمانی با استحکام بالا، نظیر فولاد، آلیاژهای آلومینیوم و تیتانیوم بازی می‌کند [۲].

جوشکاری یکی از پرکاربردترین روش‌های اتصال در صنایع مدرن است. هر ساله، ۵۰ درصد از فولادهای تولیدی جهان جهت ساخت سازه‌های فولادی استفاده می‌شود، اگرچه شکست در این سازه‌ها به‌وفور رخ می‌دهد و ۸۰ تا ۹۰ درصد آن‌ها ناشی از خستگی می‌باشد [۳]. از این‌رو، موضوع خستگی برای طراحی و نگهداری سازه‌های فولادی جوشکاری شده‌ای که در معرض بارهای دوره‌ای قرار دارند، مانند پل‌ها، جرثقیل‌ها، خط لوله‌ها، کشتی‌ها، مخازن تحت فشار و غیره، مسئله‌ای مهم بشمار می‌رود [۴]. پرواضح است که اتصالات جوشکاری شده در مقایسه با فلز پایه، استحکام خستگی پایین‌تری دارند که اصولاً 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<sup>۱</sup> و آخال‌های سرباره‌ای ایجاد شوند. تنش‌های پسماند کششی به دلیل انقباض فلز جوش در حین سرمایش و انجماد بوجود می‌آیند [۵]. هم‌چنین، این تنش‌ها می‌توانند به‌واسطه عملیاتی همچون ریخته‌گری، نورد، برشکاری، و ماشین‌کاری ایجاد شده و با افزایش سرعت رشد ترک موجب کاهش عمر قطعات شوند [۶].

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 [۷]. در راستای افزایش مقاومت خستگی اجزای 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 یاد شده را تحت تأثیر قرار دهند. این فرایندها به دودسته کلی تقسیم می‌شوند که شامل روش‌های اصلاح هندسه جوش و روش‌های مبتنی بر تنش پسماند است. رایج‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از: سنگ‌زنی، کوبش با گلوله و ذوب دوباره به روش تنگستن گاز خنثی [۸،۹]. امروزه امواج فراصوت کاربردهایی گسترده در شاخه‌های گوناگون علم و صنعت یافته است [۱۰-۱۱]. یکی از مسیرهای در حال پیشرفت در استفاده از انرژی پرقدرت فراصوت در کاربردهای صنعتی، اعمال ضربه فراصوتی 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<sup>۳</sup> و خوردگی توأم با تنش<sup>۴</sup> است. در طی مراحل گوناگون گسترش این فناوری، فرایند کوبش فراصوتی به نام‌هایی همچون عملیات فراصوتی، عملیات ضربه فراصوتی و هم‌چنین، کوبش ضربه‌ای فراصوتی شناخته شده است [۱۲]. این فناوری نوین در پژوهش‌های مشترکی که بین کشورهای روسیه و اوکراین صورت گرفت، ابداع شد و از سال ۲۰۰۳ به بعد پژوهش‌های گسترده و گوناگونی در کشورهایی چون ایالات متحده، آلمان و چین در مورد آن انجام گرفته است [۱۲]. اثرات مفید عملیات ضربه فراصوتی اساساً به وسیله رهاسازی تنش‌های کششی پسماند و اعمال تنش‌های فشاری مفید در لایه‌های سطحی فلزات و آلیاژها، کاهش تمرکز تنش در ناحیه پنجه جوش و بهینه‌سازی خواص

<sup>۲</sup> Post weld treatment<sup>۳</sup> Fretting fatigue<sup>۴</sup> Stress Corrosion Cracking (SCC)<sup>۱</sup> Undercut

## مواد و روش پژوهش

### مواد

لوله‌های فولادی بدون درز مشابه از A106-B به ضخامت جداره ۶/۵۵ میلی‌متر، قطر داخلی ۱۲۷ میلی‌متر (۵ اینچ) و طول ۱۵۰ میلی‌متر به تولید شده به روش اکستروژن<sup>۳</sup>، با ترکیب شیمیایی ارایه شده در جدول ۱ [۱۸]، استحکام تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال و استحکام کششی ۴۱۵ مگاپاسکال به وسیله پالایشگاه گاز سرخون و قشم تأمین شده و بر اساس استاندارد ASME و پارامترهای ارائه شده در جدول ۲ به صورت لب‌به‌لب به روش قوس الکتریکی با الکتروود دستی پوشش‌دار<sup>۴</sup> 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 مربوطه، از لوله جوشکاری شده بدون درز، به صورت طولی استخراج شدند (شکل ۱) [۱۹، ۲۰].

بدین منظور، ابتدا لوله به وسیله اره نواری به شکل نوارهای با عرض ۲۵ میلی‌متر برش داده شده و سپس نوارها به وسیله ماشین فرز به صورت دمبلی شکل آماده شدند. به منظور حذف اثر عملیات برش و ماشین‌کاری بر میزان تأثیر عملیات ضربه فراصوتی، این عملیات پس از ساخت و پرداخت نمونه‌ها، بر یک سمت نمونه‌ها، روی ناحیه پنجه جوش اعمال گردید. نمونه‌های مربوط به آزمون سختی (۳ نمونه اعمال عملیات شده و ۳ نمونه اعمال عملیات نشده) نیز به شکل مستطیل از قسمت میانی نمونه‌های خستگی خوردگی (عمود بر درز جوش محیطی) بریده شدند.

### اعمال عملیات ضربه فراصوتی

همان گونه 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 خارجی آن‌ها اعمال گردید. فرکانس کاری عملیات ۲۰ کیلوهرتز و بیشینه توان ابزار اعمال ۱۲۰۰

مکانیکی لایه‌های سطحی مواد، حاصل می‌شود [۱۳ - ۱۲].

از تفاوت‌ها و مزایای مهم این روش نسبت به روش‌های سنتی می‌توان به سهولت، دقت و سرعت آن اشاره کرد. افزون بر این، روش‌های کلاسیک تنها مبتنی بر تنش‌زدایی است، اما روش مدرن عملیات ضربه فراصوتی افزون بر تنش‌زدایی، هندسه پنجه جوش<sup>۱</sup>، شامل 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. تبلور دوباره<sup>۲</sup> دانه‌های سطحی در ابعاد نانو و در پی آن افزایش سختی سطح و قابل‌استفاده بودن برای قطعات حجیم، از دیگر مزایای این روش می‌باشند [۱۴].

فناوری عملیات ضربات فراصوتی در بسیاری از زمینه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و ظرفیت تحلیل و بررسی بیش‌تری را نیز داراست. در صنعت راه و ساختمان و کشتی‌سازی، اتصالات جوشی موجود در تیرهای فولادی پل‌ها و عرشه‌ها که درصد بالایی احتمال شکست خستگی وجود دارد، بررسی‌هایی انجام شده است که همگی حاکی از افزایش استحکام و عمر سازه پس از اعمال عملیات ضربات فراصوتی است [۱۵]. هم‌چنین، در صنعت اتومبیل‌سازی مطالعاتی روی اسپوک چرخ‌ها که از جمله قطعات ریختگی آلومینیومی هستند، انجام شده که در این مورد نیز افزایش استحکام گزارش شده است [۱۶]. پژوهش‌های انجام گرفته روی نمونه‌های فولادی ضدزنگ ۳۰۴ نشان‌دهنده افزایش عمر خستگی از ۱۵۰۰۰۰ چرخه به ۳۳۰۰۰۰ چرخه به‌واسطه اعمال عملیات ضربات فراصوتی است [۱۷]. در این مقاله به بررسی تأثیر عملیات ضربه فراصوتی بر رفتار خستگی فولاد A106-B پرداخته شده است. هم‌چنین، مطالعات تکمیلی بر روی مقدار تغییر سختی سطح، تحلیل تنش پسماند با و بدون اعمال عملیات و بهبود هندسه جوش انجام گرفته است.

<sup>3</sup> \_Extrusion

<sup>4</sup> \_Shield metal arc welding (SMAW)

<sup>1</sup> \_Weld toe

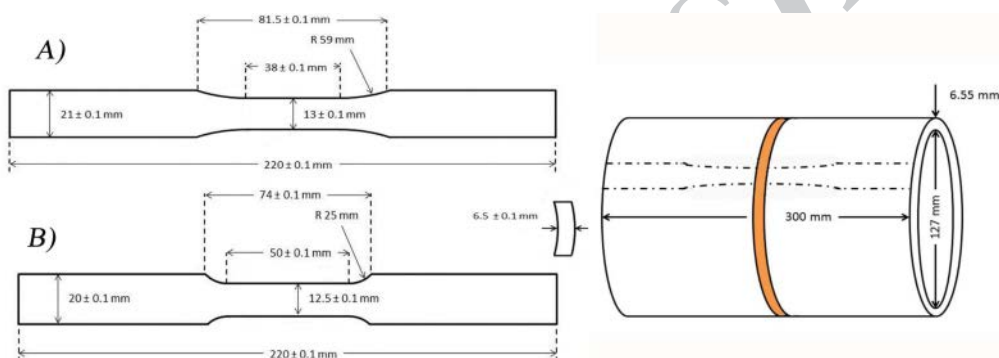
<sup>2</sup> \_Recrystallization

جدول ۱- درصد عناصر آلیاژی موجود در فولاد A106-B [۱۸].

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 بر اساس استاندارد ASME.

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 ۱- الف) لوله جوشکاری شده (ب) نمونه آزمون خستگی (ب) نمونه آزمون کشش.



شکل ۲- اعمال عملیات ضربه فراصوتی بر لوله جوشکاری شده جهت آزمون تحلیل تنش.

روی پنجه جوش نمونه‌ها به مدت زمان ۱ دقیقه برای هر نمونه اعمال گردید. همچنین، بمنظور انجام آزمون تحلیل تنش پسماند، عملیات ضربه فراصوتی روی یک سمت خط جوش یک لوله اعمال شد (شکل ۲).

وات بود. ضربه زننده‌ها ۴ پین از جنس فولاد بلبرینگ به قطر ۵ میلی‌متر بودند که به گونه مستقیم به مبدل فراصوت متصل می‌شدند. منبع تغذیه فراصوت از جنس ام پی آی التراسونیک<sup>۱</sup> بود که به گونه خودکار توان مصرفی ضربه زننده را تنظیم می‌کرد. عملیات ضربه فراصوت بر

<sup>۱</sup>\_MPI ultrasonic Swiss

## آزمون کشش

بمنظور تعیین استحکام تسلیم نمونه‌های استخراج شده و تعیین میزان بار جهت انجام آزمون خستگی، آزمون کشش بر ۳ نمونه اعمال گردید. سطح مقطع نمونه‌ها و نرخ بارگذاری به ترتیب ۸۱/۸۸ میلی‌متر مربع و ۵ میلی‌متر بر ثانیه بودند. پارامترهای آزمون کشش در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست‌آمده، میانگین استحکام تسلیم برای لوله فولاد جوشکاری شده بر اساس رابطه ۱، ۳۶۰/۶ مگاپاسکال محاسبه شد.

$$\sigma_y = \frac{362.7 + 360.1 + 358.9}{3} = 360.6 \text{ Mpa} \quad (1)$$

## آزمون خستگی خوردگی (خستگی در محیط خورنده)

آزمون‌های خستگی خوردگی برای ۱۲ نمونه (۶ نمونه اعمال عملیات شده و ۶ نمونه اعمال عملیات نشده) بر اساس نتایج بدست‌آمده از آزمون کشش انجام گردید. نسبت تنش<sup>۱</sup> و فرکانس بارگذاری بر اساس استاندارد مربوطه به ترتیب به صورت ۰/۰۵ و ۱ هرتز تنظیم شدند [۲۱]. بازه‌های تنشی اعمالی به صورت نسبت‌های گوناگون ۰/۸۵، ۰/۹۰ و ۰/۹۵ استحکام تسلیم در نظر گرفته شده و برای هر بازه دو آزمون انجام گرفت. با توجه به مساحت سطح مقطع نمونه‌ها، نیروی کمینه و بیشینه تعیین شده و روی دستگاه آزمون خستگی دارتک با ظرفیت اعمال نیروی ۵۰ کیلو نیوتن تنظیم شدند.

## سامانه اعمال محیط خورنده

محیط خورنده به وسیله یک سامانه گردش سیال روی نمونه‌ها حین انجام آزمون خستگی اعمال گردید. سامانه طراحی و ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. سامانه شامل یک مخزن با ظرفیت تقریبی ۲/۵ لیتر حاوی محیط خورنده و یک محفظه دربرگیرنده نمونه بود. محلول خورنده پس از رسیدن به دمای موردنیاز به وسیله گرم‌کن تعبیه شده درون مخزن، از راه لوله انتقال به وسیله یک پمپ ۶۰ وات به محفظه ارسال شده و از راه شیر تنظیم دبی خروجی محفظه، به درون مخزن برگردانده

می‌شد. از یک همزن نیز به منظور همگن‌سازی محلول استفاده گردید. محلول خورنده، شبیه‌سازی محیط گاز ترش پالایشگاهی بود. در این محلول به جای گاز سمی و خطرناک سولفید هیدروژن از بلورهای سدیم تیوسولفات استفاده گردید [۲۲]. 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. گفتنی است pH محلول به وسیله محلول ۱ مولار اسید سولفوریک و محلول ۱ مولار سود سوزآور، به مقدار موردنیاز تنظیم شد. محفظه دربرگیرنده نمونه، یک تیوب به قطر ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰ میلی‌متر از جنس پلکسی‌گلاس بود که از بالا به صورت چپ‌گرد و از پایین به صورت راست‌گرد رزوه شده بود.

## 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 شدند. جهت آب‌بندی محل ورود نمونه به درب از مخلوط موم زنبورعسل<sup>۲</sup>، کلیفونبه نسبت ۳ به ۱ و رزین پلی‌استر استفاده شد. نمونه واقعی، تصویر شماتیک محفظه دربرگیرنده و نمونه آزمون خستگی خوردگی در شکل ۴ ارائه شده است.

## آزمون ریز سختی

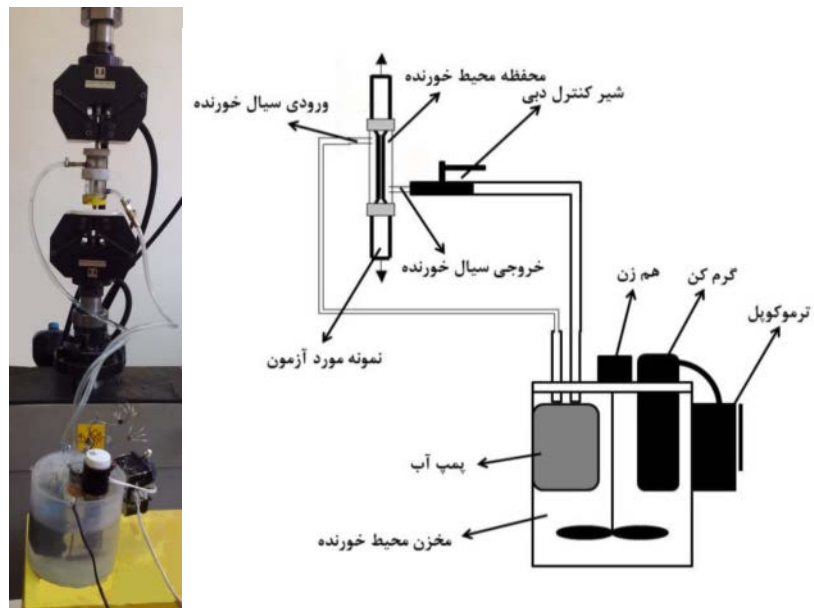
نمونه‌های مربوط به آزمون ریز سختی سنجی جهت سهولت انجام آزمون در رزین پلی‌استرمانت شده و به وسیله کاغذ سنباده از درجه ۸۰ تا ۳۰۰۰ پولیش شدند و پس از اعمال پولیش نهایی، مورد آزمون ریز سختی قرار گرفتند.

آزمون ریزسختی برای نمونه‌های اعمال عملیات شده و اعمال عملیات نشده در ۴۰ نقطه به وسیله دستگاه ریزسختی سنج ویکرز شیمیدزو نوع ام با بار اعمالی ۵۰ گرم نیرو و زمان ۲۰ ثانیه بر اساس استانداردهای مربوطه انجام گرفت [۲۳، ۲۴]. مناطق سختی سنجی شده روی نمونه‌ها در شکل ۵ ارائه شده است.

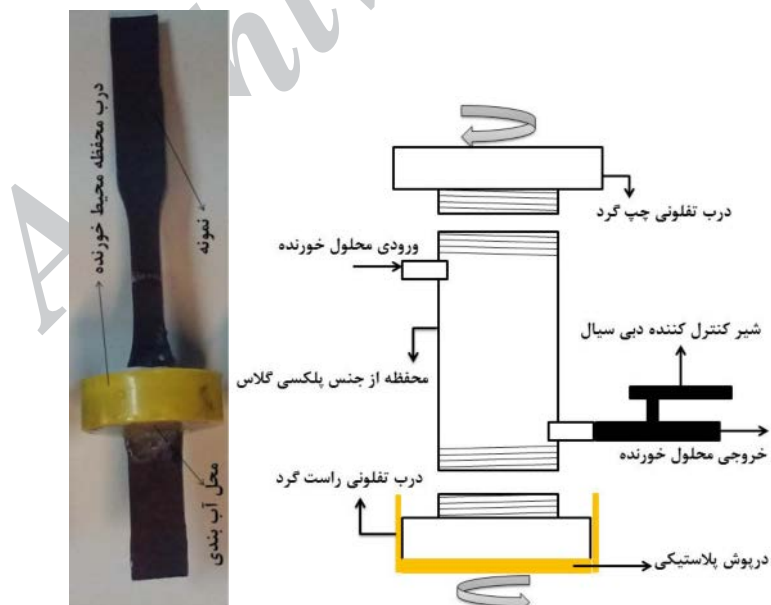
<sup>2</sup>\_Beeswax<sup>1</sup>\_Stress ratio

جدول ۳- پارامترهای آزمون کشش.

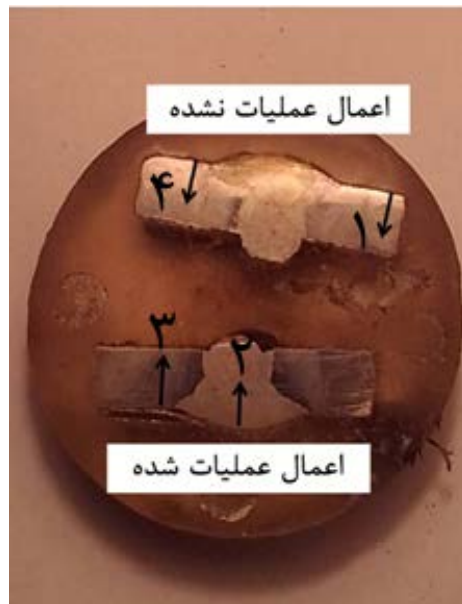
مدل دستگاه	شماره نمونه	نرخ بارگذاری mm/s	نیروی تسلیم kN	سطح مقطع mm <sup>2</sup>	تنش تسلیم MPa
IDTNT DTU-900mh ۳۰ کیلو نیوتن	۱	۵	۲۹/۶۷	۸۱/۸۸	۳۶۲/۷
	۲	۵	۲۹/۴۸	۸۱/۸۸	۳۶۰/۱
	۳	۵	۲۹/۳۸	۸۱/۸۸	۳۵۸/۹



شکل ۳- سامانه آزمون خستگی خوردگی.



شکل ۴- الف) شکل شماتیک محفظه دربرگیرنده نمونه. ب) نمونه آماده سازی شده آزمون خستگی خوردگی.



شکل ۵- مناطق ریزسختی سنجی شده.

میلی‌متر در نظر گرفته شد و نزدیک‌ترین نقطه به خط جوش ۷/۵ میلی‌متر بود.

### نتایج و بحث

همان گونه که گفته شد، آزمون خستگی در درصدهای گوناگون استحکام تسلیم برای نمونه‌ها انجام شد. همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با وجود برخی مطالعات صورت گرفته، مانند مطالعه صورت گرفته بر فولاد ضدزنگ ۳۰۴ [۱۷]، که اعمال عملیات ضربه فراصوتی موجب جابه‌جایی محل شکست از منطقه متأثر از حرارت به فلز پایه 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<sup>۳</sup> انجام گرفت که می‌توان با توجه به یک‌طرفه بودن جوش و نبود دسترسی اپراتور به درون لوله در محیط واقعی جهت جوشکاری و اعمال عملیات ضربه فراصوتی، تأثیر نداشتن این عملیات بر منطقه شکست را برداشت کرد.

با توجه به نمودارهای عمر-تنش رسم شده در شکل ۸، روی هم رفته، افزایش عمر خستگی به‌واسطه اعمال عملیات ضربات فراصوتی برای بازه تنشی ۱ (۳۰۶ مگاپاسکال)، ۷۹ درصد، بازه تنشی ۲ (۳۲۴ مگاپاسکال)،

فاصله نقطه نخست از لبه نمونه ۵۰ میکرون، فاصله نقطه دوم از نقطه نخست ۱۰۰ میکرون، و فاصله سایر نقاط از نقطه پیش ۲۰۰ میکرون در نظر گرفته شد و هر منطقه در مجموع ۱۰ نقطه سختی‌سنجی شد.

### آزمون تحلیل تنش پسماند به روش فرا صوت

آزمون تحلیل تنش پسماند به روش نا مخرب فراصوتی برای لوله جوشکاری شده در دو سمت جوش انجام گردید. بدین منظور، یک سمت جوش اعمال عملیات شده و سمت دیگر بدون اعمال عملیات مورد آزمون قرار گرفت. اجزا بکار رفته در تحلیل تنش به روش فراصوت عبارت بودند از: جعبه فراصوت<sup>۱</sup>، رایانه، دو میدل فراصوت با بسامد ۵ مگاهرتز که یکی از آن‌ها فرستنده و یکی گیرنده بوده و هر دو روی یک گوه<sup>۲</sup> ساخته‌شده از پلکسی گلاس سوار شده بودند (شکل ۶)، هم‌چنین، جهت جفت شدن بهتر میدل‌ها و قطعه، از ژل فرا صوت استفاده شد.

با استفاده از میدل‌های فراصوت با بسامد ۵ مگاهرتز می‌توان تنش پسماند را تا عمق ۱ میلی‌متر زیر سطح اندازه گرفت [۲۵]. فاصله نقاط تحلیل تنش روی لوله ۵

<sup>3</sup>-Heat affected zone (HAZ)

<sup>1</sup>-Ultrasonic box

<sup>2</sup>-Wedge

می‌توان گفت در صورت دسترسی به ناحیه ریشه جوش و اعمال عملیات بر آن ناحیه این درصد می‌تواند به درصدهای بالاتر افزایش یابد.

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 ایجادشده در یک عمق مشخص به وسیله عملیات ضربه فراصوتی، تنش کششی اعمالی حین بارگذاری دوره‌ای و تنش فشاری

۸۳ درصد و بازه تنشی ۳ (۳۴۲ مگاپاسکال)، ۱۳۷ درصد را می‌توان مشاهده کرد که به طور میانگین، افزایش ۹۹/۷ درصدی در عمر خستگی حاصل شده است.

این افزایش در عمر خستگی به دلیل حذف تنش‌های پسماند کششی زیان‌بار ناشی از جوشکاری در ناحیه اتصال فلز جوش به فلز پایه، اعمال تنش‌های سودمند فشاری که موجب بستن شدن ترک‌های بوجود آمده به واسطه فرایند جوشکاری یا کند کردن رشد آن‌ها و افزایش سختی و جلوگیری از ایجاد ترک‌های سطحی می‌شود. افزون بر این،

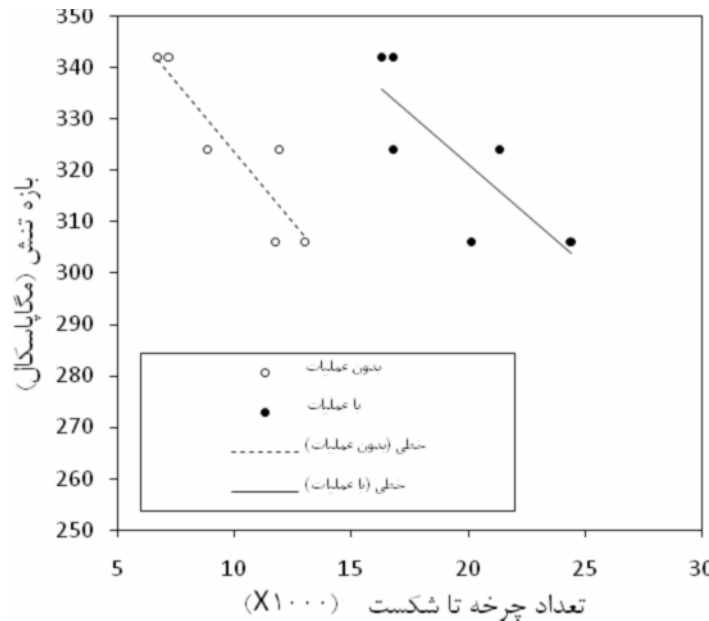


شکل ۶- تجهیزات و سامانه مورد استفاده در تحلیل تنش پسماند.



شکل ۷- نمونه‌های آزمون خستگی خوردگی پس از انجام آزمون.





شکل ۸- نمودار عمر- تنش برای نمونه‌های اعمال عملیات شده و نشده

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 شماتیک حالت گفته شده را نشان می‌دهد.

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 خورنده 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 مقدار بهبود استحکام خستگی به واسطه اعمال عملیات ضربه فراصوتی را بر اساس جدول ۴ محاسبه کرد.

انتظار می‌رفت، سطح قطعه به دلیل قرار گرفتن در معرض گرمایش و سرمایش حین فرایند ساخت و جوشکاری و با توجه به درصد کربن این نوع فولاد، دچار تغییرات ساختاری، از جمله کربن‌زدایی شده باشد که این موجب کاهش سختی مناطق نزدیک به سطح قطعه نسبت به عمق آن می‌شود. این مسئله را می‌توان از شکل ۱۰ که نمودار تغییرات ریزسختی برحسب فاصله از لبه قطعه را نشان می‌دهد، برداشت کرد.

پسماند ایجاد شده به وسیله عملیات، یکدیگر را خنثی کرده و منجر به کاهش سطح تنش کلی و در نتیجه، افزایش استحکام خستگی مواد و افزایش عمر خستگی آن‌ها می‌شوند. بر اساس رابطه گودمن:

$$\sigma_a = \sigma_{fat} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{ts}}\right) = \sigma_{fat} - \left(\frac{\sigma_{fat}}{\sigma_{ts}}\right) \cdot \sigma_m \quad (2)$$

$$\sigma_m = \sigma_{fat} - n \cdot \sigma_a$$

که  $\sigma_m$ ، تنش میانگین،  $\sigma_a$ ، تنش متناوب،  $\sigma_{fat}$ ، حد خستگی،  $\sigma_{ts}$ ، استحکام کششی و  $n = \sigma_{fat} / \sigma_{ts}$  ضریب حساسیت به تنش می‌باشند. هنگامی که تنش پسماند با تنش میانگین معادل در نظر گرفته شود، رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$\sigma_a = \sigma_{fat} - n \times (\sigma_m + \sigma_r) \quad (3)$$

که پارامتر  $\sigma_r$ ، همان تنش پسماند می‌باشد که نقش تنش میانگین را بازی می‌کند. بنابراین،  $\Delta\sigma_a$ ، تغییر استحکام خستگی به دلیل وجود تنش پسماند می‌باشد که به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\Delta\sigma_a = -n \times \sigma_r \quad (4)$$

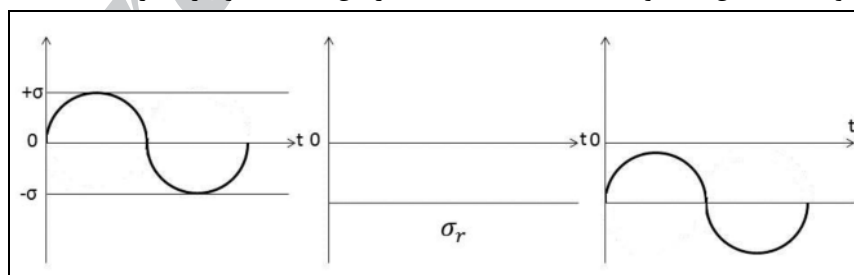
مطالب گفته شده نشان می‌دهند، هنگامی که ضریب حساسیت به تنش افزایش یابد، تأثیر تنش میانگین بر استحکام خستگی نیز بیش‌تر می‌شود و افزایش تنش پسماند فشاری موجب افزایش استحکام خستگی خواهد شد. در آزمون‌های انجام شده در این مقاله، هنگامی که بار

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 به وسیله سازه حین بارهای دوره‌ای می‌شود. از این رو، عمر خستگی سازه را به مقدار شایان توجهی بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، کاهش تنش پسماند می‌تواند منجر به کاهش مقدار خوردگی ناشی از تنش می‌شود. افزایش حدوداً صد درصدی عمر خستگی در محیط خورنده گویای این مسئله می‌باشد.

با توجه به تصویر ارائه شده از هندسه جوش (ناحیه پنجه جوش) در شکل ۱۲، پیش و پس از اعمال عملیات ضربه فراصوتی، می‌توان دریافت که زاویه و شعاع ناحیه اتصال فلز جوش به فلز پایه به ترتیب، کاهش و افزایش یافته است که این موضوع موجب کاهش فاکتور تمرکز تنش و در نتیجه، کاهش تمرکز تنش در این منطقه می‌شود و از این راه موجب افزایش عمر خستگی می‌گردد. از سوی دیگر، کم بودن شعاع پنجه جوش موجب به دام افتادن یون‌های خورنده موجود در محلول در این ناحیه شده و احتمال ایجاد و رشد ترک را بیش از پیش امکان‌پذیر می‌کند که با افزایش شعاع پنجه می‌توان از این مسئله جلوگیری کرد.

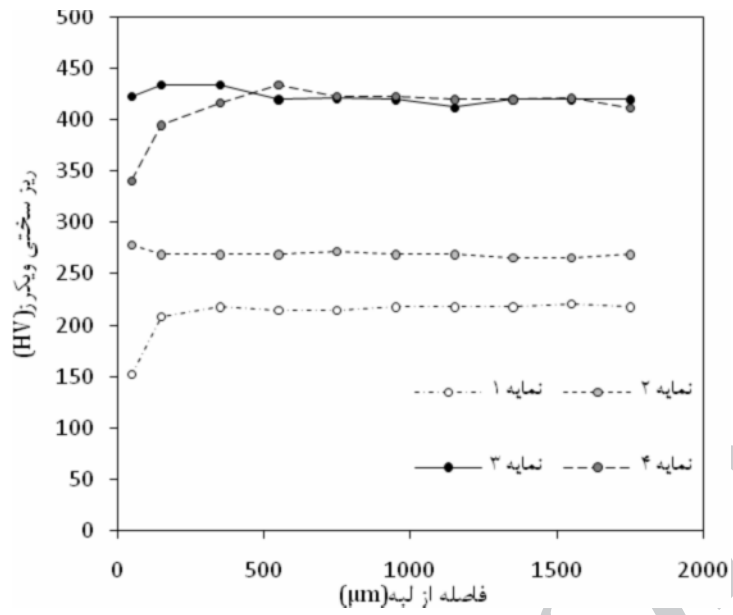
از سوی دیگر، با توجه به نتایج ریزسختی، منطقه متأثر از حرارت، متشکل از دو ناحیه درشت‌دانه و ریزدانه است. ناحیه نخست به دلیل قرار گرفتن در نزدیکی جوش دیرتر سرد شده و در نتیجه، دانه‌ها درشت شده‌اند، اما مناطق دورتر از منطقه جوش زودتر سرد شده و دانه‌های این منطقه ریز است و در نتیجه، سختی بالاتری (حدود ۵۵ درصد) نسبت به ناحیه نخست دارد که نتایج سختی بیانگر این موضوع است. از سوی دیگر، عملیات ضربه فراصوتی که بر سطح منطقه متأثر از حرارت اعمال شده و موجب بالاتر رفتن سختی (حدود ۲۵ درصد) این ناحیه نسبت به ناحیه نزدیک به سطح منطقه مشابه در نمونه اعمال عملیات نشده، شده است که در نمودار ریزسختی سنجی برحسب عمق قابل مشاهده است. سختی بالاتر منطقه پنجه جوش که به دلیل اعمال عملیات ضربه فراصوتی ایجاد شده که دلیل آن بالا رفتن چگالی و حرکت نابه‌جایی‌ها و افزایش اندرکنش بین آن‌هاست. این مسئله موجب افزایش مقاومت این ناحیه در برابر ایجاد ترک و هم‌چنین، نفوذ محیط خورنده حین بارهای دوره‌ای شده و از این راه افزایش عمر خستگی خوردگی را باعث می‌گردد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به واسطه اعمال عملیات ضربه فراصوتی در سمت چپ نمودار شکل ۱۱، مقدار تنش پسماند در نزدیک‌ترین نقطه به خط جوش از ۲۳۰ مگاپاسکال در سمت اعمال عملیات نشده به ۸۰ مگاپاسکال در سمت اعمال عملیات شده کاهش یافته است. هم‌چنین، با توجه به شکل ۱۱، و با مقایسه نقاط



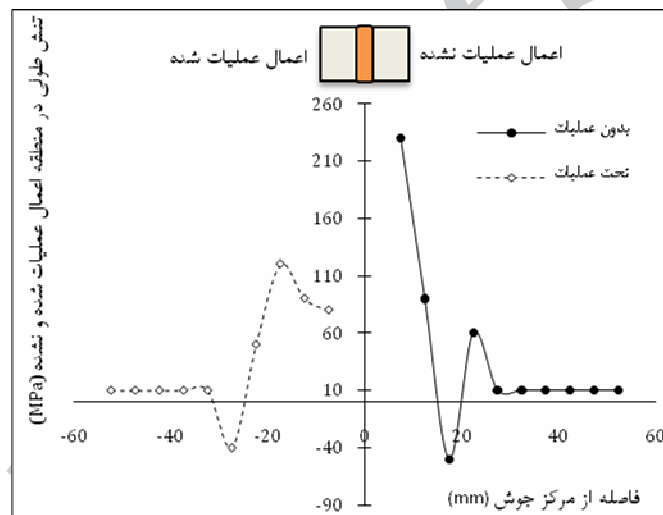
شکل ۹- بارگذاری چرخه‌ای و تنش پسماند پیش و پس از برهم‌کنش [۲۶].

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

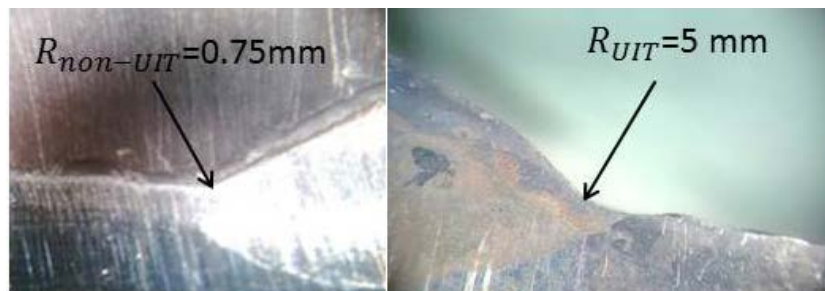
اعمال عملیات شده	بدون اعمال عملیات	نمودار عمر بر حسب تنش
-۰/۳۹۰۰	-۰/۰۰۵۵	شیب
۳۹۹/۴۷	۳۸۷/۳۷	عرض از مبدا
۳۲۱/۴۷	۲۶۷/۳۷	استحکام در ۲۰۰۰۰ چرخه
-	٪۱۹/۸	میزان بهبود



شکل ۱۰- نمودار ریزسختی بر حسب فاصله از لبه برای مناطق گوناگون نمونه‌ها.



شکل ۱۱- نمودار تنش پسماند بر حسب فاصله از خط جوش در دو طرف خط جوش.



شکل ۱۲- مقایسه هندسه جوش نمونه‌های اعمال عملیات شده و نشده.

## نتیجه‌گیری

- تحلیل تنش پسماند به روش غیر مخرب فراصوت نشان‌دهنده کاهش ۶۵ درصدی مقدار تنش پسماند ناشی از جوشکاری در سمت اعمال عملیات شده نسبت به سمت اعمال عملیات نشده گرده جوش است.

- اعمال عملیات ضربه فراصوتی با افزایش شعاع پنجه جوش به مقدار  $\frac{4}{5}$  برابر و کاهش زاویه پنجه جوش به مقدار ۴۰ درصد، از تمرکز تنش در ناحیه پنجه جوش می‌کاهد.

## سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌ها و همکاری‌های حامی پروژه، پالایشگاه گاز سرخون و قشم، سپاسگزاری می‌شود.

## References

- 1-Welding Technology Institute of Australia, "Introduction to Fatigue of Welded Steel Structures and Post-Weld Improvement Techniques", TGN-D-2, pp. 1-8, 2006.
- 2-Ch. V Prudhvi Raj and K. Arun Kumar, "Stress Analysis of Gas Turbine Multi Stage Rotor Assembly", International Journal of Science and Research, Vol. 3, Issue. 3, pp. 441-445, 2014.
- 3- Y. Danqing, W. Dongpo and J. Hongyang, Huo. Linxing, "the Effect of Ultrasonic Peening Treatment on the Ultra-Long Life Fatigue Behavior of Welded Joints", Materials and Design, 31, pp. 3299-3307, 2010.
- 4-H. Gunther, U. Kuhlmann and A. Durr, "Rehabilitation Welded Joints by Ultrasonic Impact Treatment (UIT)", IABSE Symposium Lisbon, 2005.
- 5-M. Pedersen, O. Mouritsen, M. Andersen and J. Wenderby, "Comparison of Post Weld Treatment of High Strength Steel Welded Joints in Medium Cycle Fatigue", International Institute of Welding XIII-2272-09, 2009.
- 6-M. Shalvandi, Y. Hojjat, A. Abdullah and H. Asadi, "Influence of Ultrasonic Stress Relief on Stainless Steel 316 Specimens; A Comparison with Thermal Stress Relief", Materials and Design, 46, pp. 713-723, 2012.
- 7-X. Yang, J. Zhou and X. Ling, "Study on Plastic Damage of AISI 304 Stainless Steel Induced by Ultrasonic Impact Treatment", Materilas and Design, 36, pp. 477-481, 2012.

با توجه به مجموع نتایج آزمون‌های انجام‌شده در این پژوهش می‌توان به نکته‌های زیر دست یافت:

- اعمال عملیات ضربه فراصوتی بر پنجه جوش موجب افزایش ۹۹/۷ درصدی عمر خستگی خوردگی در نمونه‌های فولاد مرتبط با این پژوهش شده است.

- اعمال عملیات ضربه فراصوتی سبب افزایش سختی ناحیه پنجه جوش شده به مقدار ۲۵ درصد نسبت به پنجه جوش اعمال عملیات نشده می‌گردد و احتمال ایجاد و رشد ترک در این ناحیه را کاهش می‌دهد.

- اعمال عملیات ضربه فراصوتی منجر به افزایش استحکام خستگی نمونه‌های مرتبط با این پژوهش به میزان ۱۹/۸ درصد در ۲۰۰۰۰ چرخه شده است.

8-A. Galtier and E.S. Stanikov, "the Influence of Ultrasonic Impact Treatment on Fatigue Behavior of Welded Joints in High-Strength Steel", Welding in the World, Vol. 48, pp. 61-66, 2004.

9-K.J. Kirkhope, R. Bell and L. Caron, "Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques". Part 1: Review, Marine Structures, 12, pp. 447-474, 1999.

۱۰-اکرم صالحی؛ سید مجتبی زبرجد؛ ابوالفضل باباخانی؛ محمدصادق ابروی. "بررسی ریزساختاری فوم نانوکامپوزیتی آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات اکسید سیلیسیوم تولید شده با استفاده از امواج مافوق صوت"، مجله مواد نوین، دوره ۴، شماره ۱۶، ص ۱-۱۲، تابستان ۱۳۹۳.

۱۱-سمانه صاحبیان سقی؛ سید مجتبی زبرجد؛ جلیل وحدتی خاکی؛ اندرا لاتزری، "تأثیر همزمان عملیات سطحی و امواج آلتراسون بر توزیع‌پذیری نانولوله‌های کربنی در زمینه پلی‌اتیلن"، مجله مواد نوین، دوره ۵، شماره ۱۷، ص ۴۱-۵۴، پاییز ۱۳۹۳.

12-Y. Kudryavstev and J. Kleiman, "Fatigue Life Improvement of Tubular Welded Joint by Ultrasonic Peening", International Institute of Welding, XIII-2117-06, 2006.

13-S. Statinkov, "Guide for Application of Ultrasonic Impact Treatment Improving Fatigue Life of Welded Structures", International Institute of Welding, XIII-1757-99, 1999.

- 14-R. Tehrani Yekta, "Acceptance criteria for Ultrasonic Impact Treatment of Highway Steel Bridge", Ms Thesis, University of Waterloo, Canada, 2012.
- 15-B. Vilhauer, R. C. Bennet, A. Matamoros and S. Rolfe, "Fatigue Behavior of Welded Cover plates Treated with Ultrasonic Impact Treatment and Bolting", Engineering Structures, Vol. 24, pp. 163-172, 2012.
- 16-A. Berg-Pollack, F.-J. Voellmecke and C.M. Sonsino, "Fatigue Strength Improvement by Ultrasonic Impact Treatment of Highly Stressed Spokes of Cast Aluminum Wheels", International Journal of Fatigue, Vol. 33, Issue 4, pp. 513-518, 2011.
- 17-A. Abdullah and M. Maleki, "Strength Enhancement of the Welded Structures by Ultrasonic Peening", Materials and Design, 38, pp. 7-18, 2012.
- 18-ASTM A106M-13, "Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service", American Society for Testing and Materials, 2013.
- 19-ASTM E466-96, "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Testing of Metallic Materials", American Society for Testing and Materials, 1996.
- 20-ASTM E8-04, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", American Society for Testing and Materials, 2004.
- 21-ASTM E467-99, "Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Forces in an Axial Fatigue Testing System", American Society for Testing and Materials, 1999.
- 22-S. Tsujikawa, A. Miyasaka, M. Veda, S. Ando and T. Yamada, "Alternative for Evaluating Sour Gas Resistance of Low-Alloy Steels and Corrosion-Resistant Alloys", Corrosion, 49, pp. 409-419, 1993.
- 23-ASTM E92-82, "Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials", American Society for Testing and Materials, 2003.
- 24-ASTM E384-99, "Standard Test Method for Micro indentation Hardness of Materials", American Society for Testing and Materials, 1999.

Archive