



مطالعه تجربی اثر ارتعاشات هارمونیک بر آزادسازی تنش در اتصال جوشی لوله فولادی AISI-1021

امیرحسین زمانپور¹، محمدرضا فراهانی^{2*}، مجید فرهنگ¹، نوید وفا³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران،

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران،

3- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران،

* تهران، صندوق پستی 11152599، mrfarahani@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 6 خرداد 1398

پذیرش: 21 تیر 1398

ارائه در سایت: اردیبهشت 1399

کلیدواژه‌ها:

جوش کاری

تنش‌های پسماند

کرنش‌سنجی سوراخ

تنش‌زدایی ارتعاشی

سختی‌سنجی

چکیده

وجود تنش‌های پسماند در مقاومت مواد در برابر عواملی همچون خستگی، خوردگی و شکست تأثیر شدیدی دارند. وجود حرارت محلی در حین جوش کاری منجر به شکل‌گیری و توسعه تنش‌های پسماند می‌شود. تنش‌زدایی ارتعاشی یک روش غیرمخرب و مدرن است که می‌تواند ضمن عدم تغییر در خواص متالورژیکی قطعه، در آزادسازی تنش‌های پسماند مؤثر باشد. در این پژوهش آزادسازی تنش بر اثر ارتعاشات هارمونیک در یک اتصال جوشی لوله از جنس AISI 1021 که به وسیله فرایند الکتروود دستی در وضعیت 2G (طبق استاندارد ASME) جوش کاری شده است، مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، پس از شناسایی فرکانس تشدید قطعه جوش کاری شده، ارتعاشات متناسب به قطعه اعمال گردید. آزمایش‌های سختی‌سنجی و اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به روش کرنش‌سنجی سوراخ قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی بر روی نمونه صورت گرفت. جهت تنش‌زدایی قطعه ساخته شده در فرکانس 27/8 هرتز به مدت 40 دقیقه تحت ارتعاش سینوسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده بیانگر کاهش 11/5 درصدی میانگین سختی و 42 درصدی تنش‌های پسماند محیطی در خط مرکزی جوش پس از اعمال ارتعاشات بر روی اتصال جوشی است. نتایج حاصله کارآمدی روش تنش‌زدایی ارتعاشی در آزادسازی تنش‌های پسماند در یک اتصال جوشی لوله را اثبات می‌نماید.

Experimental Study on the Effects of Harmonic Vibration on the Stress Relief of the Butt Welded AISI 1021 Pipes

Amirhossein Zamanpour¹, Mohammadreza Farahani^{1*}, Majid Farhang¹, Navid Vafa²

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- School of Mechanical Engineering, Alborz Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 11152599, Tehran, Iran, mrfarahani@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 27 May 2019

Accepted 12 July 2019

Available May 2020

Keywords:

Welding

Residual stresses

Hole drilling strain gauge method

Vibration stress relief

Hardness test

Abstract

The presence of residual stresses has severe effects in materials resistance to fatigue, corrosion and failure. The presence of local heat during welding leads to the formation of residual stresses. Vibration stress relief is a modern non-destructive method. This method can release the remained stresses without changing the metallurgical properties of the workpiece. In this study, stress relieving was carried out by harmonic vibrations in a welded joint from AISI 1021 steel, which was fabricated by the manual arc welding process in 2G position according to ASME standard. After the experimental evaluation of the resonance frequency of the welded pipe, the harmonic vibration was applied to the pipes. Hardness tests and measurements of residual stresses were done by hole drilling strain gauge method before and after the vibration stress relieving. For stress relaxation, the welded pipes were sinusoidally vibrated at frequency of 27.8 HZ for 40 minutes. The results show a 11.5% reduction in the hardness and 42% of the peripheral residual stress relieving in the central weld line after applying the vibration on the weld joint. The obtained results prove the efficacy of the vibratory stress relief technique in the release of residual stresses in a welded pipe.

1- مقدمه

جوش بدون عیب باشد ممکن است بسیاری از عناصر آن سوخته باشند [1].

از این رو معمولاً شکست در جوش و یا اطراف آن اتفاق می‌افتد. در هنگام طراحی اتصال جوش رعایت ضریب اطمینان بر اساس داده‌های بارگذاری امری واجب است به این معنی که

جوش کاری یکی از روش‌های متداول اتصال دائم قطعات فلزی و غیر فلزی می‌باشد که در صنعت بسیار کاربرد دارد. در صنعت به قطعاتی که به‌وسیله فرایند جوش کاری تولید می‌شوند به‌عنوان یک قطعه با ریسک بالا نگاه می‌شود زیرا در بهترین حالت اگر

Please cite this article using:

A. Zamanpour, M. Farahani, M. Farhang, N. Vafa, Experimental Study on the Effects of Harmonic Vibration on the Stress Relief of the Butt Welded AISI 1021 Pipes, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 1- 7, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.sid.ir

اندازه‌گیری نمایندند. آنها همچنین گزارش کردند که دقت این روش در اندازه‌گیری حداکثر تنش پسماند طولی بیش از 92 درصد است [6].

تنش‌زدایی ارتعاشی یکی از روش‌های مدرن و غیر مخرب است که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این روش قطعات تحت ارتعاش قرار گرفته و بعد از گذشت چند دقیقه تا چند ساعت تنش‌های موجود در قطعات حذف شده و قطعه تنش‌زدایی می‌شود. در طول جنگ جهانی دوم، مزیت‌های کاربردی ارتعاشات، تا حدود زیادی آشکار شد. سازه‌های جوش کاری شده، که از طریق راه‌آهن، یا توسط کامیون، از محل ساخت، به محل اجرا منتقل می‌شدند، در هنگام ماشین‌کاری، اعوجاج کمتری از خود نشان می‌دادند. در آن زمان مهندسی آلمانی فرایندی را بنام انتقال پس از جوش کاری برای محصولات خود، معرفی کردند. آنها بر این باور بودند که این اعوجاج کمتر ممکن است در نتیجه جابجایی قطعه کار رخ داده باشد.

نخستین پژوهش در این زمینه منسوب به مک گولدریک و ساندرس [7] بر روی قاب‌های جوش کاری شده و ریخته‌گری شده انجام پذیرفت. گرچه آنها نتایج کمی قابل استفاده‌ای ارائه نکردند؛ لیکن به این نتیجه رسید که تنش‌زدایی ارتعاشی بستگی به بروز پدیده تغییر شکل پلاستیک در حین فرایند تنش‌زدایی دارد. لذا برای رسیدن به این هدف می‌بایست از دامنه‌های رزونانس معینی استفاده کرد.

لوکشین [8] توانست تا حدود 70 درصد، تنش‌های پسماند را در یک حلقه آلومینیومی ریخته‌گری شده پیش‌بار داده شده، از بین ببرد که برای این کار از یک تنش تکرار شونده رزونانسی استفاده کرد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که آزادسازی محلی تنش، تعادل تنش داخلی را بر هم زده، باعث توزیع مجدد تنش و کاهش کلی سطح تنش می‌شود.

بوتروس و همکاران [9] اثر ارتعاشات را بر روی الگوی تنش‌های پسماند ایجاد شده توسط جوش کاری سازه‌های از جنس فولاد نرم مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دادند که به‌کارگیری یک فرایند ارتعاشی مناسب برای یک سازه جوش کاری شده از جنس فولاد نرم، برای مدت زمان 15 دقیقه، قله‌های تنش پسماند را در سازه جوش کاری شده تا حد زیادی کاهش می‌دهد. همچنین آنها بیان نمودند که الگوی تنش در اثر کاهش قله‌های بلند در جوش، به یکنواختی بیشتری دست می‌یابد.

مانسی و همکاران [10] فعالیت‌های گسترده‌ای را در زمینه آزادسازی تنش‌های پسماند برای قطعات جوش کاری شده انجام دادند و به آزادسازی تنش چشمگیری دست یافتند. این کار با

با دانستن نوع و جهت آن می‌توان طراحی مناسبی برای اتصال در نظر گرفت. اما آنچه در هنگام طراحی اتصال جوش به آن توجه کافی نشده و یا کمتر به آن پرداخته می‌شود تنش‌های پسماند پس از ایجاد اتصال است. وجود تنش‌های پسماند باعث کاهش مقدار تنش طراحی مجاز می‌گردد [2].

تا سالیان نه‌چندان دور این مهم در طراحی سازه‌ها مورد توجه قرار نمی‌گرفت و از همین رو هزینه‌های تولید و یا تعمیر تجهیزات به میزان قابل توجهی افزایش می‌یافت [3]. البته افراط در لحاظ کردن آن نیز سبب ایجاد نتایجی مشابه است، زیرا یک اتصال جوشی ایده‌آل باید دارای ساختاری مطابق فلز پایه باشد اما ایجاد جوش عاری از هرگونه عیب نه امکان‌پذیر بوده و نه به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر است.

سبک روح و فراهانی توزیع تنش‌های پسماند در جوش سر به سر لوله‌های فولادی X70 با قطر 56 اینچ را که به روش الکتروود دستی جوش کاری شده بودند را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در ابتدا با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS فرایند جوش کاری را شبیه‌سازی کرده و جهت ارزیابی و صحت‌گذاری نتایج بدست آمده از روش کرنش‌سنجی سوراخ کمک گرفتند. آنها علی‌رغم وجود متغیرهای زیاد تأثیرگذار بر فرایند جوش کاری، شبیه‌سازی برای تخمین توزیع این تنش‌ها مؤثر دانسته و گزارش نمودند که حداکثر تنش‌های پسماند کششی در خط مرکزی جوش و روی سطح خارجی لوله ایجاد شده است [4].

اکبری و همکاران اثرات شکل و هندسه پخ بر میزان تنش‌های پسماند در اتصال غیر همجنس لوله‌های فولاد زنگ‌نزن A240- TP304 به فولاد کم‌کربن A106-B را مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش نمودند که تفاوت خواص فیزیکی و مکانیکی لوله‌ها سبب توزیع نامتقارن تنش‌های باقیمانده می‌گردد و ضخامت دیواره لوله نقش مهمی بر مقدار و نحوه توزیع تنش‌های پسماند دارد. همچنین افزایش زاویه شیار جوش و فاصله باز شدن ریشه باعث افزایش تنش‌های محوری کششی بالاتر در سطح بیرونی فولاد کربنی ایجاد می‌نماید [5].

افتخاری و همکاران تنش‌های پسماند ناشی از جوش کاری آلومینیوم با فرایند قوس الکتروود تنگستنی تحت محافظت گاز آرگون در اتصال لب به لب را مورد مطالعه قرار دادند. آنها جهت صحت‌سنجی و تأیید اعتبار نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی المان محدود و روش التراسونیک از روش پراش اشعه ایکس استفاده نمودند. آنها توانستند تنش‌های پسماند طولی را با حداکثر خطای معادل 12 درصد تنش تسلیم ورق به روش التراسونیک

از مزایای این فرایند، می‌توان به حفظ ابعاد هندسی و خواص فیزیکی قطعات، سرعت و انعطاف‌پذیری بالا در انجام تنش‌زدایی و کاهش مصرف انرژی اشاره داشت. در این مقاله به بررسی تنش‌زدایی ارتعاشی در یک اتصال جوشی محیطی در لوله‌ای به قطر 10 اینچ پرداخته شد. با استفاده از آزمون‌های سختی‌سنجی و اندازه‌گیری تنش‌های پسماند موفقیت اجرای فرایند تنش‌زدایی ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفته است.

2- فعالیت‌های تجربی

2-1- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش دو لوله به قطر خارجی 278 میلی‌متر، ضخامت 9/27 میلی‌متر و طول 300 میلی‌متر از جنس AISI 1021 تهیه شدند. ترکیب شیمیایی حاصل از آزمایش کوانتومتری (بر حسب درصد وزنی) و خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده به صورت تجربی برای این آلیاژ در جداول 1 و 2 مشاهده می‌شود.

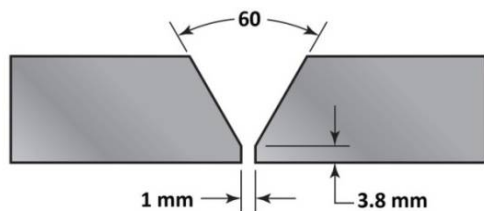
برای آماده‌سازی لوله‌ها، سطح مقطع توسط دستگاه تراش ماشین‌کاری گردیدند تا سطحی صاف و یکنواخت بدست آید. طرح اتصال مطابق شکل 1 بر روی لوله‌ها ایجاد گردیده و پس از آماده‌سازی لوله‌ها قطعات توسط پارامترهای نشان داده شده در جدول 3 به وسیله فرایند الکتروود دستی در وضعیت 2G (طبق کدهای ASME Section IX و AWS D1.1) جوش‌کاری شدند. مقدار دقیق جریان مورد نیاز باید به صورت تجربی تعیین شود که این کار با آزمایش و اندازه‌گیری جریان الکتریکی انجام شده است.

جدول 1 آنالیز شیمیایی لوله فولادی AISI 1021

عنصر	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni
%	بقیه	0/18	0/01	0/7	0/017	0/01	0/01

جدول 2 خواص استحکامی لوله فولادی AISI 1021

تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	سختی (HV)
397	475	126



Single-V Groove Weld

Fig. 1 Schematic overview of the welding joint

شکل 1 شماتیک طرح اتصال جوش کاری

اعمال فرکانس‌هایی با دامنه زیاد عملی شد. اما از آنجایی‌که جهت دستیابی به آزادسازی کامل، نیاز به اعمال فرکانس طبیعی وجود دارد و در این آزمایش دامنه‌های فرکانس بالا اعمال شده بود، آزادسازی کامل صورت نگرفت.

کوانگ و همکارانش [11] آزادسازی تنش توسط ارتعاش را به کمک مدل المان محدود، با فرض گسترش تنش‌ها با صرف نظر از تنش‌های ناشی از جوش تحلیل نمودند.

آوکی و همکاران [12] فرکانس‌های مختلف بارگذاری نوسانی را بر روی خط جوش اعمال کردند و به کمک اشعه ایکس تنش‌های پسماند موجود در جوش را اندازه‌گیری نمودند. نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از کاهش تنش‌های پسماند بود. همچنین آنها به کمک یک روش تحلیلی شامل جرم و فنرهای از پیش‌بار داده شده که دارای خواص الاستو-پلاستیک می‌باشند نیز کار خود را مورد بررسی قرار دادند. در این مدل تحلیلی نیز کاهش تنش‌های پسماند مشاهده گردید.

یانگ [13] در یک پژوهش علمی که به منظور درک بهتر فرایند بارگذاری ارتعاشی انجام شد، تنش‌های پسماند ناشی از جوش را شبیه‌سازی کردند و فرکانس‌های تشدید و زیر تشدید را در نرم‌افزار اعمال نمودند. تأثیر دامنه ارتعاشی و فرکانس به کمک مدل شبیه‌سازی شده تحت بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان دادند که هم فرکانس تشدید و هم فرکانس زیر تشدید، قادر به کاهش تنش‌های پسماند هستند. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که برای فرکانس‌های زیر تشدید، کاهش تنش وابستگی شدیدی به دامنه ارتعاش دارد.

هنریش و زندیان [14] به بررسی تنش‌زدایی بر روی دو نوار جوش‌کاری شده فولادی با روش‌های حرارتی و ارتعاشی پرداختند. با استفاده از ضربات اولتراسونیک عملیات تنش‌زدایی بر روی آن انجام گرفت. به دلیل نزدیک شدن شدت پیک‌های ماکزیمم و مینییم حاصل از روش استاندارد پراش اشعه ایکس به یکدیگر، پیکی حاصل نگردید و این نشان از کاهش تنش‌های پسماند در نمونه مذکور نسبت به نمونه تنش‌زدایی شده به روش حرارتی می‌باشد.

گو و همکاران [15] در تحقیقی نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی و مدل‌سازی المان محدود را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از روش ترکیبی ارتعاش اولتراسونیک و تابش اشعه لیزر پالسی بر روی نمونه کوچک فولاد AISI 1045 مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که آزادسازی تنش‌های پسماند به روش اولتراسونیک یک فرایند وابسته به زمان است. از این رو افزایش زمان ارتعاش می‌تواند تأثیر آزادسازی را بهبود بخشد.

جدول 3 پارامترهای جوش کاری

Table 3 Welding parameters

ردیف	شماره پاس	جریان (A)	الکتروود مصرفی	قطر الکتروود (mm)
1	ریشه	70	E6013	2/4
2	پرکن	90	E6013	5/3

2-2- انجام آزمایش‌ها

برای آگاهی از تغییرات سختی آزمایش سختی‌سنجی در مقیاس ویکرز و بر اساس استاندارد ASTM A956-2017 و در دمای محیط صورت گرفت. نقطه انتخابی شماره دو در مرکز فلز جوش که بیشترین تنش‌ها را دارد انتخاب شد. دو نقطه شماره یک و سه نیز در مجاورت جوش و در منطقه متأثر از حرارت انتخاب گردید که البته برای بررسی دقیق‌تر، دو نقطه میانی هم برای آزمون لحاظ گردید. اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در سازه‌های جوشی یک آزمایش تکمیلی است چراکه از این طریق می‌توان تخمین بهتری از رفتار سازه حین بهره‌برداری داشت [1].

با توجه به مطالعات اخیر اثر تنش‌های پسماند در جوشکاری روش ذوبی در ناحیه جوش بیشتر از سایر نواحی است [16]. از این‌رو با استفاده از روش کرنش‌سنجی سوراخ که پرکاربردترین روش اندازه‌گیری تنش‌های پسماند بوده (گستره کاربرد حدود 22 درصدی) این اندازه‌گیری انجام شده است [2]. که بر مبنای استاندارد ASTM E837 عمل می‌نماید، اندازه‌گیری‌ها قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی و بر روی خط جوش انجام گردید. از مزایای این روش علاوه بر استاندارد بودن، می‌توان به طی نمودن یک فرایند مکانیکی جهت اندازه‌گیری اشاره کرد. زیرا این مهم امکان اندازه‌گیری مواد بلوری و غیر بلوری را مهیا می‌نماید و در ادامه کاربری آن در صنعت را افزایش می‌بخشد. اگرچه پس از جوش کاری ایجاد مقداری گرده اضافی سبب تقویت استحکام اتصال می‌شود. حذف همین مقدار می‌تواند سبب ایجاد خطا در مقدار واقعی تنش‌های پسماند شود اما انجام این کار برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند با روش‌های مختلف (از جمله کرنش‌سنجی سوراخ، پراش پرتو ایکس و التراسونیک) اجتناب ناپذیر است [18].

این روش شامل بستن و نصب کرنش‌سنج بر روی سطح و ایجاد یک سوراخ در مجاورت سنج‌ها و اندازه‌گیری کرنش‌های آزاد شده است. این عمل سبب ایجاد تغییرات در میدان کرنشی اطراف ناحیه مورد بررسی شده و با آزادسازی کرنش‌های پسماند و استفاده از روابط موجود در نهایت تنش‌های پسماند محاسبه

خواهند شد. مطابق با توصیه‌های مطابق با الزامات استاندارد مرجع و توصیه‌های شرکت سازنده پیش از انجام آزمایش تمیز-کاری و روغن‌زدایی توسط استون خالص صورت گرفت. از این رو برای انجام آزمایش کرنش‌سنج روزت تهیه شده و بر روی خط مرکزی جوش نصب شد. در پایان انجام فرایند سوراخ‌کاری با سرعت خیلی بالا و با استفاده از متدهای کاربایدی به طور موفقیت آمیزی صورت گرفت. محاسبه تنش‌های پسماند با استفاده از کرنش‌های آزاد شده و قرار دادن مقادیر بدست آمده در روابط (1) و (2) انجام شد [16].

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (2)$$

در این روابط σ_{\max} و σ_{\min} تنش‌های پسماند بیشینه و کمینه، ε_1 ، ε_2 و ε_3 به ترتیب کرنش‌های آزاد شده حین فرایند سوراخکاری و A و B ضرایب کالیبراسیون می‌باشند. نمایی از فرایند اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در شکل 2 نمایش داده شده است.

هر قطعه صنعتی دارای تعداد زیادی فرکانس طبیعی است. از این رو برای تنش‌زدایی ارتعاشی نیاز به تعیین پایین‌ترین فرکانس طبیعی است. برای این که بتوان تنش‌زدایی را بر روی لوله انجام داد نیاز به ساخت یک فیکسچر مناسب است. نمایی از این مجموعه مونتاژ شده در شکل 3 نشان داده شده است.

تنش‌زدایی ارتعاشی نیز به وسیله مجموعه آماده شده در این پژوهش انجام پذیرفت. گام سخت در انجام تنش‌زدایی ارتعاشی تعیین فرکانس طبیعی قطعه می‌باشد. برای این منظور به روش تحریک ضربه‌ای و با استفاده از دو شتاب‌سنج نصب شده بر روی قطعه اندازه‌گیری فرکانس طبیعی قطعه انجام شد.



Fig. 2 overview of the residual stress measurement with hole drilling method

شکل 2 نمایی از اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به روش کرنش‌سنجی سوراخ

پسماند در داخل قطعه که معمولاً به صورت تنش‌های هیدرواستاتیک مشاهده می‌شوند منجر به مقاومت ماده در مقابل تغییر شکل و گاهی تردی ماده می‌شود. همین مسأله سختی بیشتری را نیز منجر می‌گردد؛ لذا انتظار می‌رود که با آزادسازی تنش‌های پسماند، ماده رفتار نرم‌تری را از خود نشان دهد. نتایج بدست آمده بیانگر کاهش 11/5 درصدی میانگین سختی در نقاط مذکور نسبت به قبل از اعمال تنش‌زدایی ارتعاشی است. در مقیاس میکروسکوپی دلیل این اتفاق را می‌توان ناشی از پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی دانست. به‌طوری‌که کاهش تجمع‌ها نابجایی در روی مرز دانه‌ها سبب سهولت حرکت آنها نسبت به حالت اولیه و در نهایت کاهش سختی در قطعات تنش‌زدایی شده می‌شود [21].

همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود سختی در خط مرکزی جوش نسبت به نقاط دیگر کاهش کمتری داشته است. در این منطقه پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی نقشی چندانی نداشته و به دلیل حضور عناصر آلیاژی و استحکام مناسب تر فلز پرکننده، نرم‌شدگی ناشی از تنش‌زدایی نسبت به نقاط مجاور کمتر بوده است.

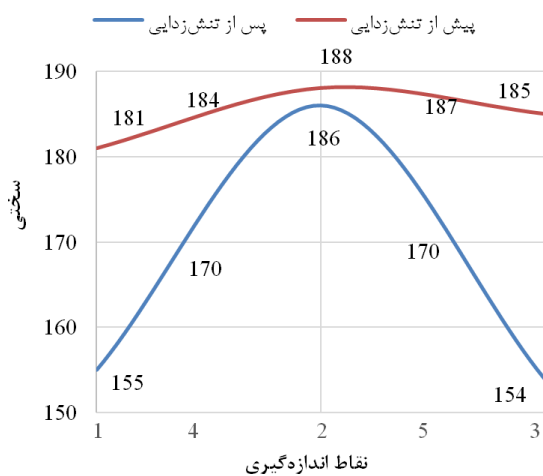


Fig. 4 Comparison of hardness profiles in different locations

شکل 4 مقایسه پروفیل سختی در نقاط مختلف

3-2- اندازه‌گیری تنش‌های پسماند قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی

دومین آزمایش انجام شده بر روی قطعات قبل و بعد از تنش‌زدایی اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به روش کرنش‌سنجی سوراخ است. تنش‌های پسماند در داخل لوله به دلیل حرارت محلی ناشی از جوش و نیز هندسه ویژه لوله ایجاد می‌گردد. حرارت محلی در منطقه جوش و مقاومت مناطق اطراف جوش



Fig. 3 Vibration stress relief setup on pipe

شکل 3 مجموعه تنش‌زدایی ارتعاشی بر روی لوله

با انجام آنالیز تبدیل فوریه سریع (FFT) بر روی داده‌های دریافت شده از شتاب‌سنج مشخص گردید که حداکثر برانگیختگی قطعه در فرکانس 27/8 هرتز رخ داده است. لذا در ادامه جهت تنش‌زدایی، تحریک سینوسی قطعه در همین فرکانس به مدت 40 دقیقه انجام شد. انجام آنالیز فوریه به صورت آنلاین توسط نرم افزار دستگاه داده برداری در حین آزمایش انجام می‌گردد. جزئیات تئوری این تبدیل در مرجع [19] قابل دسترس می‌باشد.

3- بحث و نتیجه‌گیری

نمونه‌ها بر اساس آنچه که در بخش قبلی به آن اشاره شد ساخته شدند. بر همین اساس یک لوله از جنس AISI 1021 با مشخصات مذکور ساخته شده و آزمایش‌های سختی و اندازه‌گیری تنش‌های پسماند قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی صورت گرفت. در این مقاله تنها جهت بررسی تجربی تنش‌زدایی ارتعاشی، اعمال ارتعاشات با فرکانسی معادل با فرکانس طبیعی قطعه که مطابق با پژوهش‌های انجام شده توسط فراهانی و همکاران [20]، بیشترین کارایی در آزادسازی تنش‌های پسماند را دارد، مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه به بررسی نتایج آزمایشات پرداخته خواهد شد.

3-1- بررسی تغییرات سختی قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی

مقادیر سختی اندازه‌گیری شده قبل و بعد از انجام تنش‌زدایی ارتعاشی در شکل 4 نمایش داده شده است. وجود تنش‌های

بررسی‌ها نشان داد که در نواحی دورتر از گرده جوش ارتعاشات وارد شده به لوله به دلیل رخداد پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی سبب سهولت حرکت نابجایی‌ها نسبت به حالت اولیه و در نهایت کاهش سختی در قطعات تنش‌زدایی شده گردیده است. این در حالی است که به دلیل حضور عناصر آلیاژی و استحکام مناسب‌تر فلز پرکننده، سختی در خط مرکزی جوش پس از تنش‌زدایی ارتعاشی نسبت به نقاط دیگر کاهش اندکی داشته است.

میزان تنش پسماند محیطی با ایجاد کرنش ثانویه ناشی از ارتعاش و توزیع مجدد تنش در داخل به دلیل تغییر شکل‌های پلاستیک و نسبت به نمونه اولیه جوش کاری شده 42% کاهش یافته است که موفقیت‌آمیز بودن فرایند تنش‌زدایی ارتعاشی را تأیید می‌نماید. ایجاد تنش‌های محلی فشاری در راستای طول لوله نیز اثرات مثبت فرایند تنش‌زدایی ارتعاشی را نشان می‌دهد.

2- فهرست علائم

E مدول یانگ (MPa)

B ضرایب کالیبراسیون (وابسته به قطر سوراخ و خواص مکانیکی فلز پایه)

علائم یونانی

σ تنش‌های پسماند (MPa)

ϵ کرنش

زیر نویس‌ها

n حداکثر

n حداقل

3 جهت‌های کرنش‌های آزاد شده

6- مراجع

- [1] Sabokrouh, M., Farahani, M., *Mathematical modeling of residual stress distribution in girth welding of high strength low alloy steel gas pipelines*. Modares Mechanical Engineering, 2018. 18(7): pp. 226-232.
- [2] Sabokrouh, M., Farahani, M.R., *Simulation of the Residual Stresses Distribution in Girth Weld of Gas Transmission Pipeline*. Modares Mechanical Engineering, 2019. 19(1): pp. 223-228.
- [3] Masubuchi, K., *Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences*. Vol. 33. 2013: Elsevier.
- [4] Sabokrouh, M., Farahani, M., *Correlation between the Weld Residual Stresses and its Tensile and Impact Strength*. Journal of Applied and Computational Mechanics, 2019, 5(4): pp. 727-734.
- [5] Akbari, D., Farahani, M., Soltani, N., *Effects of the weld groove shape and geometry on residual stresses in dissimilar butt-welded pipes*. The Journal

که در دمای پایین‌تری قرار دارند، تنش‌های پسماند جوشی را شکل می‌دهد. هندسه متقارن لوله نیز از انقباض محیطی لوله پس از سرد شدن جوش جلوگیری می‌نماید که این مسأله نیز توزیع تنش‌های پسماند جوش لوله را متأثر می‌کند. همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود میزان تنش‌های پسماند محیطی از 165 مگاپاسکال به 95 مگاپاسکال تقلیل یافته‌اند. دلیل این پدیده را می‌توان چنین بیان نمود که با اعمال نیروی دینامیکی خارجی ناشی از ارتعاش وارد شده در فرایند تنش‌زدایی، اتم‌ها با بیشترین دامنه شروع به حرکت می‌نمایند. این نیروها سبب ایجاد کرنش ثانویه در نواحی پرتنش شده و قطعه را به صورت محلی و بسیار کوچک وارد منطقه پلاستیک می‌کنند. ایجاد تغییر شکل پلاستیکی موضعی منجر به آزادسازی تنش‌های پسماند پس از حذف کرنش دینامیکی ارتعاش، می‌شود.

نکته قابل توجه افزایش تنش‌های پسماند فشاری طولی در لوله است. به این صورت که ارتعاشات وارد شده فشار طولی بیشتری را در سطح خارجی لوله ایجاد کرده است. وجود تنش‌های پسماند فشاری از شکل‌گیری و رشد ترک‌های سطحی جلوگیری می‌کند و به همین دلیل در طراحی اتصالات جوشی از وجود آنها صرف‌نظر می‌شود.

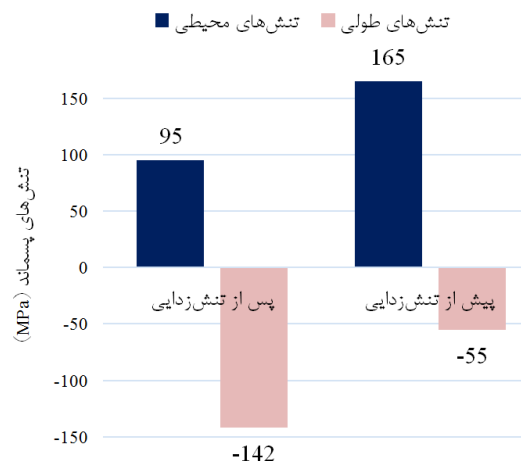


Fig. 5 Variation of residual stresses before and after vibration stress relief

شکل 5 تغییرات مقادیر تنش‌های پسماند قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از آماده‌سازی مجموعه تنش‌زدایی ارتعاشی، فرایند تنش‌زدایی بر روی اتصال لب به لب محیطی لوله از جنس AISI 1021 انجام گرفت. با بررسی توزیع سختی نقاط قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی و همچنین اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، اثرات فرایند تنش‌زدایی ارتعاشی مورد مطالعه قرار گرفت.

- Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 273-278, 2014 (in Persian فارسی)
- [15] Gu, B.-p., et al., *Reduction of pulsed-laser surface irradiation induced residual stress using ultrasonic vibration method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017. 88(1-4): pp. 755-765.
- [16] Akbari, D. and I. Sattari-Far, *Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints. International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2009. 86(11): p. 769-776.
- [17] Sattari-Far, I. and M. Farahani, *Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes. International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2009. 86(11): pp. 723-730.
- [18] Eftekhari, M., ahmadi najaf abadi, M., Farahani, M., *Evaluation of longitudinal residual stress variations along the thickness of welded joint of 5086 aluminum alloy*, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 2017. 7(3): pp. 1-16.
- [19] Cooley, J.W., Lewis, P.A. and Welch, P.D, *The fast Fourier transform and its applications. IEEE Transactions on Education*, 1969. 12(1): pp. 27-34.
- [20] Ebrahimi, S. M., M. Farahani, and D. Akbari, *The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. 102(5): pp. 2147-2158.
- [21] Shalvandi, M., et al., *Experimental evaluation of ultrasonic stress relieving on steel specimens considering grain size effect. Modares Mechanical Engineering*, 2012. 12(4): pp. 21-23, (in Persian فارسی)
- of Strain Analysis for Engineering Design, 2012, 47(2): pp. 73-82.
- [6] Eftekhari, M., Ahmadi Najafabadi, M., Farahani, M., *Evaluation of Ultrasonic Method Capability in Measurement of Longitudinal Welding Residual Stress through Thickness. Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 2018. 8(3): pp. 29-47.
- [7] McGoldrick, R. and H. Saunders, *Experiments in stress relieving castings and welded structures by vibration. Journal of the american society of naval engineers*, 1943. 25(4): pp. 589s-609s.
- [8] Lokshin, I.K., *Vibration Treatment and Dimensional Stabilization of Castings. RUSS CAST PROD*, 1965(10): pp. 454-457.
- [9] Botros, B., *Residual stresses in welded steel structure. II. SME technical paper MF80-305*, 1980.
- [10] Munsif, A., A. Waddell, and C. Walker, *Modification of welding stresses by flexural vibration during welding. Science and technology of welding and joining*, 2001. 6(3): pp. 133-138.
- [11] Kuang, L., *Finite element predictions of residual stress relief in a two-dimensional cantilever beam*. 2002, Alfred University. Faculty of Ceramic Engineering. Kazuo Inamori School of...
- [12] Aoki, S., et al., *Reduction method for residual stress of welded joint using harmonic vibrational load. Nuclear Engineering and Design*, 2007. 237(2): pp. 206-212.
- [13] Yang, Y., *Understanding of vibration stress relief with computation modeling. Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009. 18(7): p. 856-862.
- [14] HONARPISHEH, M. and V. ZANDIAN, *Investigation of residual stresses in stress-relieved samples by heat treatment and ultrasonic methods using hole-drilling method. Modares Mechanical*