



بررسی تجربی و عددی فرآیند تنش‌زدایی ارتعاشی در یک اتصال جوشی T شکل

پوریا شه فراق^۱، محمدرضا فراهانی^{۲*}، مجید صفرآبادی فراهانی^۳، مجید فرهنگ^۴

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۱۵۲۵۹۹، mrfarahani@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

از جمله روش‌های مرسوم تنش‌زدایی که می‌توان پس از انجام فرآیند ساخت بر روی قطعه اجرا نمود تنش‌زدایی حرارتی و ارتعاشی هستند. از مزایای روش تنش‌زدایی ارتعاشی نسبت به تنش‌زدایی حرارتی می‌توان به عدم نیاز به فیکسچر بندی، صرفه جویی در وقت و هزینه، عدم محدودیت وزنی و ابعادی و قابلیت استفاده برای تمامی آلیاژها نام برد. در این پژوهش به مطالعه عددی و تجربی تنش‌زدایی ارتعاشی یک اتصال جوشی T شکل پرداخته شده است. در گام اول نمونه T شکل با فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی ساخته شد. تنش‌های پسماند ایجاد شده در طول خط جوش به میزان ۲۵۱ مگاپاسکال و در عرض خط جوش به میزان ۱۹۱ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. انحراف ناشی از تنش‌های پسماند بدست آمده از شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری با نتیجه حاصل از مقادیر تجربی در راستای طولی حدود ۱۷ درصد و در راستای عرضی حدود ۱.۵ درصد بدست آمد. در ادامه از طریق شبیه‌سازی المان محدود فرآیند تنش‌زدایی ارتعاشی، مقادیر بهینه پارامترهای مؤثر بر تنش‌زدایی ارتعاشی مانند فرکانس اعمال نیرو، میزان نیرو و محل اعمال نیرو، به دست آمد. موثرترین حالت در مدل‌سازی تنش‌زدایی ارتعاشی مربوط به زمانی است که نیروی اعمالی در آن ۲۰٪ نیروی تسلیم قطعه و فرکانس تحریک ۹۵٪ فرکانس طبیعی قطعه لحاظ گردد. نتایج اندازه‌گیری تجربی پس از تنش‌زدایی ارتعاشی با نتایج مدل‌سازی خطای ۱۰ درصدی را نشان داد. نتایج نشان داد که با افزایش فرکانس بار اعمالی تا ۹۵٪ فرکانس طبیعی، تنش‌های پسماند طولی بیش از ۵۵ درصد و تنش‌های عرضی حدود ۷۰ درصد کاهش یافته‌اند.

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲ اسفند ۱۴۰۰

داوری اولیه: ۲۱ اسفند ۱۴۰۰

پذیرش: ۲۷ فروردین ۱۴۰۱

کلیدواژه‌ها:

تنش‌زدایی ارتعاشی

اندازه‌گیری تنش‌های پسماند

کرنش‌سنجی سوراخ

شبیه‌سازی المان محدود

Experimental and numerical investigation of the vibration stress relief process on a T- shape welded joint

Pouria Shahfaragh, Mohammadreza Farahani*, Majid Safarabadi Farahani, Majid Farhang

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

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

Article Information

Original Research Paper

Received: 21 February 2022

First Decision: 12 March 2022

Accepted: 16 April 2022

Keywords:

Vibration stress relief

Residual stress measurement

Hole drilling strain gauge method,

Finite element simulation

Abstract

Thermal and vibration stress relieving processes are among the common methods of reducing residual stresses that can be performed on the part after the manufacturing. The advantages of vibratory stress relief over thermal stress relief are no need for fixtures, time and cost savings, no weight and dimensional limitations and usability for all alloys. In this research, the numerical and experimental study of vibration stress relief process of a T-shaped weld has been done. In the first step, a T-joint was made using shielded metal arc welding. The longitudinal and transverse residual stresses equal to 251 MPa and 191 MPa were measured, respectively. The differences between the calculated and the measured residual stresses in the longitudinal and transverse direction are about 17% and 1.5%, respectively. Then, by finite element simulating the vibration stress relieving process, the optimal values of the parameters affecting the process, such as the frequency of force exertion, the amount of force and the location of force exertion, were obtained. The most effective vibration stress relief condition related to the case with the applied force equal to 20% of the yield force of the sample and the excitation frequency equal to 95% of the natural frequency of the sample. The differences between the calculated and the measured residual stresses after vibration stress relief process is about 10%. By increasing the applied load frequency to 95% of natural frequency of the sample, longitudinal and transverse residual stresses decreased by more than 55% and about 70%, respectively.

۱- مقدمه

می‌شد. اما این روش‌ها با مشکلات بسیاری مواجه بودند. زیرا این دسته از اتصالات سبب افزایش وزن سازه شده، برای آب‌بندی مناسب نبودند و یا بازرسی عیوب و پیشرفت آسیب در آنها نیاز به روش‌های خاص و پیچیده داشت [۱-۵]. در مقابل فرایندهای

در گذشته از روش‌های اتصال موقت و نیمه موقت به طور گسترده‌ای برای مونتاژ سازه‌های فولادی و غیر فولادی استفاده

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

P. Shahfaragh, M. Farahani, M. Safarabadi Farahani, M. Farhang, Experimental and numerical investigation of the vibration stress relief process on a T- shape welded joint, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 43- 53, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.155985>

به تنش‌زدایی ارتعاشی، تنش‌های پسماند بر روی صفحات فولادی زنگ‌نزن AISI 316 جوشکاری شده با لیزر را مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش نمودند که این روش علاوه بر آزادسازی تنش‌های پسماند با میانگین حدود ۱۰۰ مگاپاسکال، سبب افزایش مقاومت به ضربه و استحکام کششی نهایی و نیز کاهش میزان سختی می‌گردد [۲۳]. Tamasgavabar و همکاران با مقایسه اثر اعمال ارتعاش حین جوشکاری آلیاژ AA-5083-H321 و نمونه عادی جوشکاری شده (با همان پارامترها) به این نتیجه رسیدند که افزایش نیروی ارتعاشی سبب بهبود استحکام کششی و افزایش طول و توزیع ترکیبات بین فلزی در نمونه‌ها می‌شود [۲۴]. Xiaodong Hu و همکاران مقایسه شبیه‌سازی اجزای محدود و تجربی قبل و بعد از استفاده از ضربات آلتراسونیک بر تنش‌های باقیمانده اتصال جوشی سر به سر فولاد زنگ‌نزن AISI 316L ایجاد شده توسط فرایند GTAW را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که حداکثر تنش‌های پسماند طولی در نزدیکی خط مرکزی جوش و منطقه متأثر از حرارت مشاهده می‌شوند [۲۵].

در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی تنش‌زدایی ارتعاشی در یک اتصال جوشی T شکل از جنس فولاد سازه‌ای پرداخته شده است. این پژوهش نسبت به مقالاتی که صرفاً در زمینه تجربی تنش‌زدایی ارائه شده اند به این موضوع توجه گردیده که با مدلسازی المان محدود یک نمونه می‌توان از صرف هزینه‌های گزاف ساخت و تست نمونه‌های متعدد جلوگیری کرد، و همین‌طور بررسی‌های زیادی در تنش ناشی از جوشکاری نمونه T شکل انجام شده است اما بررسی تنش‌زدایی این هندسه از نمونه مورد توجه محققان قرار نگرفته است.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش دو ورق فولادی از جنس St 52 با ابعاد $6 \times 500 \times 1000$ میلی‌متر برای جان و همچنین $4 \times 210 \times 1000$ میلی‌متر برای بال تهیه شدند. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی این آلیاژ در جداول ۱ و ۲ مشاهده می‌شوند.

برای آماده‌سازی لبه‌ها، مطابق شکل ۱ سطح آنها بصورت مربعی ماشین‌کاری گردیدند تا سطحی یکنواخت و یکپارچه جهت جوشکاری اتصال T شکل مهیا گردد. همچنین با توجه به بلند بودن خط جوش و پیشگیری از احتمال ایجاد اعوجاج قطعه حین جوشکاری، از تکنیک ضربدری برای جوشکاری استفاده شد. پارامترهای جوشکاری مطابق جدول ۳ انتخاب شدند.

جوشکاری به‌عنوان یک روش اتصال قابل‌اعتماد و کارآمد اما با ریسک‌پذیری بالا به صنایع مختلف معرفی و به کار گرفته شدند. ضعف این دسته از محصولات وقوع شکست در ناحیه جوشکاری یا اطراف آن است [۶]. حتی معرفی روش‌های جوشکاری حالت جامد که بعدها به صنایع معرفی شد نیز نتوانستند این مشکل را به‌طور کامل برطرف نمایند [۷، ۸]؛ چرا که آثار مخرب در این روش‌ها کاهش یافته اما حذف نشدند [۹، ۱۰]. عامل مهمی که در هنگام طراحی اتصال محصول کمتر مورد توجه قرار گرفته است تنش‌های پسماند پس از ساخت محصول می‌باشد [۱۱]. به منظور انجام یک طراحی ایمن و اقتصادی نیاز است تا طراح اطلاعات جامعی در خصوص اندازه و توزیع این تنش‌ها داشته باشد. بنابراین طراحی اتصال، نوع یخ، نوع فرایند جوشکاری، نوع بارگذاری و ... می‌توانند در کاهش مقدار تنش‌های پسماند و به دنبال آن تخمین مناسب‌تر عمر سازه مؤثر باشند [۱۲، ۱۳]. تنش‌های پسماند می‌توانند بر رفتار شکست و توسعه ترک‌های موجود نیز اثر بگذارند [۱۴، ۱۵]. اندازه و جهت دقیق تنش‌های باقیمانده به گرایان‌های حرارتی هنگام سیکل سرمایش و محدودیت‌های مکانیکی ایجاد شده توسط قیود بر روی فلز جوش حین خنک‌کاری بستگی دارند [۱۶، ۱۷]. از این رو اثرات مخرب تنش‌های پسماند، سبب استقبال بیشتر استفاده از روش‌های تنش‌زدایی و توسعه آن‌ها جهت افزایش باربری قطعات گردیده است [۱۸، ۱۹]. Cozzolino و همکاران روش نورد پس از انجام فرایند جوشکاری و تأثیر آن بر اعوجاج و تنش پسماند را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که توزیع تنش به ضرایب اصطکاک بین قطعه کار و غلتک حساس است. همچنین ضریب اصطکاک بالا، تغییر شکل پلاستیک و تنش فشاری را در مرکز گرده جوش متمرکز می‌نماید. آنها همچنین پیشنهاد کردند که نورد در بالای گرده جوش مناسب‌ترین روش برای کاهش تنش باقی‌مانده و کاهش اعوجاج است [۲۰]. گائو و همکاران از روش حرارتی، ارتعاشی و ترکیب آنها برای تنش‌زدایی استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که روش حرارتی- ارتعاشی یا ارتعاشی باعث گیر کردن نابجایی‌ها در بلورها شده و همچنین تأثیر چشمگیری بر اندازه دانه ندارند. همچنین روش ترکیبی تنش‌های پسماند را به میزان بیشتری نسبت به سایر روش‌ها کاهش می‌دهد [۲۱]. تاتار و همکاران تنش‌زدایی ارتعاشی بر روی ورق‌های جوشکاری شده از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی را بصورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش نمودند که اثر دامنه تحریک از زمان ارتعاش بیشتر است [۲۲]. موهانتی و همکاران با اضافه کردن یک تکنیک الکترومغناطیسی

توسط گلدک و همکاران برای قسمت جلویی و عقبی منبع گرما مطابق شکل ۴ و روابط (۳) و (۴) استفاده گردید [۴۱، ۴۰].

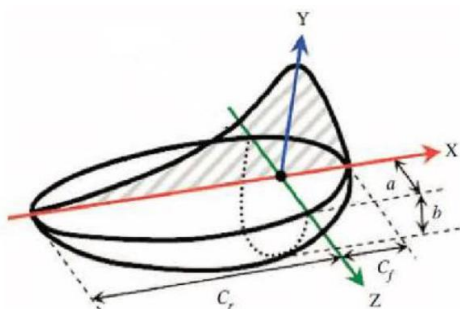


Fig. 4 Double ellipsoid heat source configuration

شکل ۴ ابعاد مقطع منبع حرارتی دو بیضی‌گون

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}r_f Q}{a_h b_h c_{hf} \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_{hf}^2} - \frac{3y^2}{a_h^2} - \frac{3z^2}{b_h^2}\right) \quad (۳)$$

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}r_b Q}{a_h b_h c_{hb} \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_{hb}^2} - \frac{3y^2}{a_h^2} - \frac{3z^2}{b_h^2}\right) \quad (۴)$$

که در آن c_f طول بیضی جلویی، c_r طول بیضی عقبی، a عرض منبع حرارتی، b عمق منبع حرارتی، f_r سهم حرارت در بیضی جلویی، f_b سهم حرارت در بیضی عقبی می‌باشند. لازم به ذکر است مقادیر این پارامترها مطابق با جدول ۴ اتخاذ گردیده است.

جدول ۴ پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی جوشکاری

| Table 4 Parameters used in welding simulation | | | | | | |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-----|-----|-------|-------|
| پارامتر (mm) | c_f | c_r | a | b | f_r | f_b |
| مقدار | ۱۱/۷ | ۲/۹ | ۳/۹ | ۳/۹ | ۰/۴ | ۱/۶ |

در این مدل از دو نوع شرایط مرزی تشعشع و همرفت استفاده گردید. برای این منظور از اتلاف حرارتی همرفت برای مناطق با دمای کمتر (دورتر از خط جوش) و از اتلاف حرارتی تشعشع برای منطقه با درجه حرارت بالا در ناحیه جوشکاری استفاده شد [۴۲]. رابطه (۵) ضریب انتقال حرارت وابسته به دما را شرح می‌دهد [۴۳]:

$$\alpha_h = \begin{cases} 0.0668T \left(\frac{W}{m^2}\right) & 0 < T < 500^\circ C \\ 0.231T - 82.1 \left(\frac{W}{m^2}\right) & 500^\circ C < T \end{cases} \quad (۵)$$

قطعه با ابعاد مذکور در نرم‌افزار اجزای محدود طراحی گردیده و خواص مکانیکی فولاد سازه‌ای St52 بر اساس منابع معتبر و مطابق شکل ۵ در نظر گرفته شد [۴۴].

چیدمان آزمون در شکل ۳ نشان داده شده است. برای تنش‌زدایی قطعه از موتور الکتریکی با قدرت ۱۰۰ kgf (معادل ۹۸۰ نیوتن) استفاده شد.



Fig. 3 Vibration stress relief setup on stress relief test

شکل ۳ مجموعه آزمایش جهت انجام آزمایش تنش‌زدایی ارتعاشی

۲-۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

۲-۳-۱- شبیه‌سازی فرایند جوشکاری

در سال‌های اخیر از روش اجزای محدود برای تخمین تنش‌های پسماند استفاده شده است. از این رو برای دستیابی به نتایج مطلوب بایستی مدل‌سازی را بسیار نزدیک به فیزیک مسئله اجرا کرد و از جزئیات کم اثر صرف نظر نمود. این روش به صنایع کمک می‌کند تا با صرف هزینه کمتر و زمان بهینه‌تر، نتایج مطلوبی بدست آورند. روش‌های تجربی اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به دلیل تأثیر پارامترهای متعدد اغلب پرهزینه و وقت‌گیر هستند زیرا بایستی برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد، تعدادی نمونه جوشی را ایجاد نموده و مورد آزمایش قرار داد.

برای مدل کردن فرایند جوشکاری از آنالیز اجزاء محدود کوپل غیرمستقیم حرارتی مکانیکی استفاده شده است. در این روش که در محیط نرم‌افزار ABAQUS 2020 انجام شده است، ابتدا یک تحلیل حرارتی برای به دست آوردن تاریخچه دمایی تمام نقاط موجود در مش اجزاء محدود انجام شد. سپس این داده‌ها به عنوان ورودی جهت تحلیل مکانیکی (تنش تغییر مکان) الاستیک-پلاستیک مورد استفاده قرار گرفتند. این ارتباط باعث می‌شود تاریخچه دمایی و تاثیرات مکانیکی آن به وسیله پدیده انبساط حرارتی مرتبط گردند و تغییرات دمایی بر رفتار مکانیکی مؤثر باشند.

۲-۳-۱-۱- تحلیل حرارتی

در طول انجام فرایند جوشکاری، توزیع دما از مدل حرارتی گذرا با استفاده از المان مرتبه اول برآورد شد. همچنین از مدل دو نیمه بیضی‌گون جهت مدل‌سازی توزیع منبع حرارتی پیشنهادی

به میزان $1/2 - 3/28$ میلی متر و از شکل المان شش وجهی و با روش چهارگوش استفاده شد. در نواحی دورتر فاصله بین گره‌ها حداکثر به میزان $2/82$ سانتی متر اتخاذ گردید. نوع المان تحلیلی از خانواده المان استاندارد با درجه حل خطی و بصورت خلاصه با کد اجزای محدود $C3D8R$ در نرم افزار آباکوس تعریف می گردد [45، 46] که به معنی المان بلوک خطی هشت گره‌ای با فرمول انتگرال کاهش یافته و جلوگیری کننده از خاصیت ساعت شنی می باشد.

به منظور حصول مش بهینه، از آنالیز حساسیت مش در ناحیه جوش استفاده شد. بطوری که از تعداد المان‌های حدود 72000 به بعد، تغییرات بیشترین دمای حوضچه جوش ناچیز است و این تعداد المان در ناحیه جوش به عنوان تعداد بهینه انتخاب گردیده است. نتایج آنالیز حساسیت مش در نمودار شکل ۷ نمایش داده شده است.

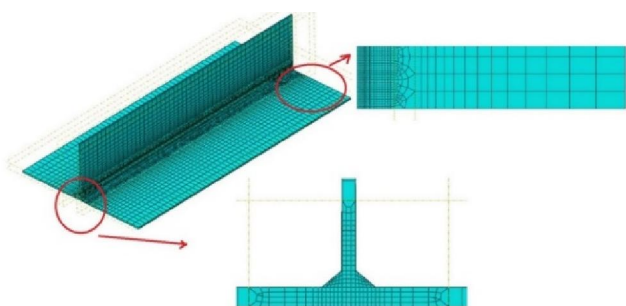


Fig. 6 Meshing in finite element simulation.

شکل ۶ مش بندی در شبیه سازی اجزای محدود

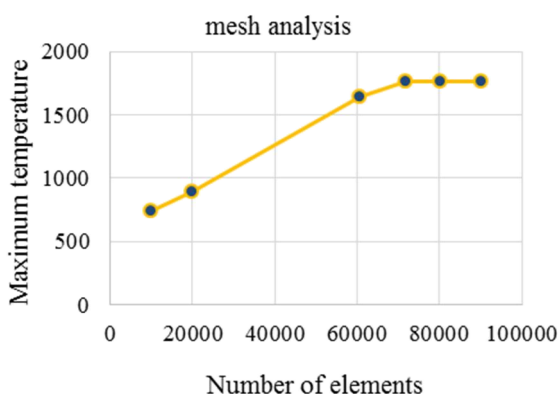


Fig. 7 Plot of maximum temperature obtained by the number of elements to analyze the sensitivity to the mesh

شکل ۷ نمودار بیشترین دمای بدست آمده به تعداد المان جهت تحلیل حساسیت به مش

۲-۴- شبیه سازی فرآیند تنش زدایی ارتعاشی

گام مهم در انجام فرآیند تنش زدایی ارتعاشی اطلاع از فرکانس طبیعی قطعه می باشد. شبیه سازی تحلیل فرکانسی برای قطعه

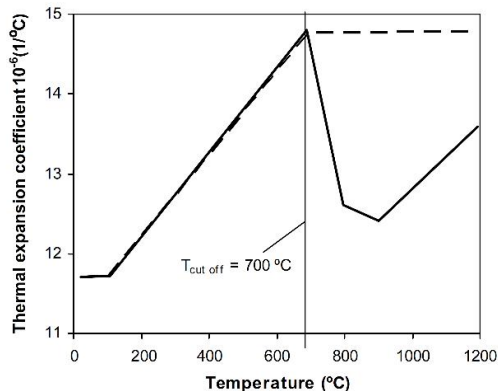
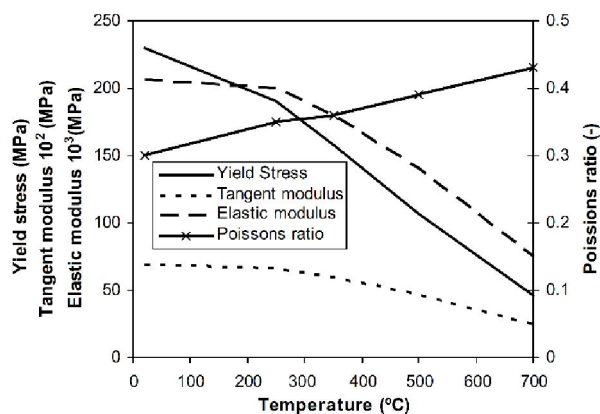
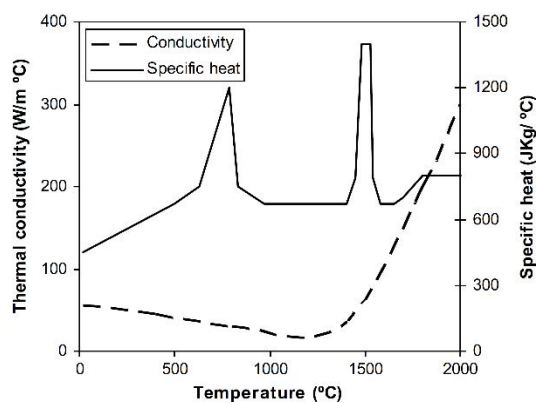


Fig. 5 Material model used for the welding simulations: (a) conductivity and specific heat; (b) yield stress, tangent modulus and elastic modulus and (c) thermal expansion coefficient.

شکل ۵ مدل مواد مورد استفاده برای شبیه سازی جوش: (الف) رسانایی و حرارت خاص. (ب) تنش تسلیم، مدول مماس و مدول الاستیک و (ج) ضریب انبساط حرارتی.

۲-۳-۱-۲- تحلیل مکانیکی

همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می شود با توجه به اهمیت ناحیه جوش و منطقه متأثر از حرارت (HAZ) در این نواحی از مش های ریز استفاده شد. لازم به ذکر است برای بهینه سازی زمان تحلیل با فاصله گرفتن از منطقه متأثر از حرارت از مش بندی درشت تری استفاده شده است. نظر به اهمیت ناحیه جوش و منطقه متأثر از حرارت فاصله بین گره ها در این محدوده

می‌شود، هم پوشانی و ارتباط خوبی میان نتایج حاصل از هر دو روش عددی و تجربی وجود دارد. اختلاف جزئی میان این دو ناشی از اختلاف خواص مکانیکی مواد مورد استفاده و اطلاعات درج شده در فرآیند شبیه‌سازی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدل اجزای محدود حاضر، تخمین قابل اطمینانی از تنش‌های پسماند حاصل از اتصال جوشی T شکل از جنس فولاد St52 ارائه می‌نماید.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- تجزیه و تحلیل تنش‌های پسماند در حالت‌های عددی و تجربی پیش از تنش‌زدایی ارتعاشی

تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری قوس فلزی تحت محافظت گاز با استفاده از مدل FEM محاسبه شدند. همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ ملاحظه می‌شود در امتداد خط جوش تنش‌های پسماند کششی ایجاد می‌گردد. مقادیر این تنش‌ها با فاصله گرفتن از خط مرکزی جوش روند نزولی را طی می‌نمایند. از آنجا که برآیند توزیع تنش در هر سازه صفر می‌باشد، تنش‌های باقیمانده فشاری در فواصل دورتر از منطقه جوش ایجاد می‌شوند [۶].

برای تأیید نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود حاصل از مدل‌سازی، نمونه تجربی ساخته شد. اندازه‌گیری تنش‌های باقیمانده با استفاده از روش کرنش‌سنجی سوراخ در پشت نمونه و روی خط مرکزی جوش صورت گرفت. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه نتایج عددی و تجربی تنش‌های پسماند طولی و عرضی را نمایش می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی میان نتایج پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی اجزای محدود با آزمایش تجربی وجود دارد.

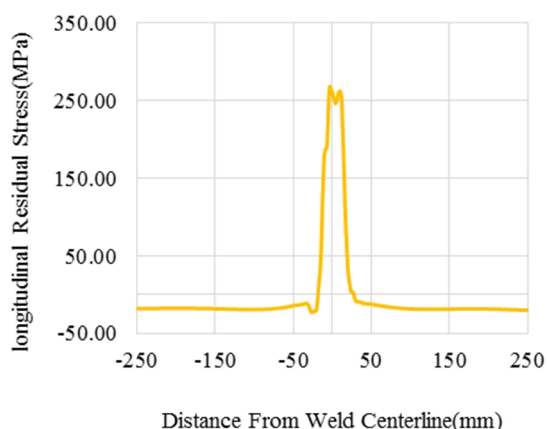


Fig. 8 Distribution of longitudinal residual stresses resulting from finite element simulations in welding centerline.

شکل ۸ توزیع تنش‌های پسماند طولی حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود در امتداد خط جوش.

به دو صورت آزاد (free-free) و مقید انجام شد. سه فرکانس اول هر دو حالت آزاد و مقید در جدول ۵ ارائه شده است. شکل مودها در فرکانس‌های انتخابی نیز به شرح جدول ۶ با توجه به حساسیت مش در فرکانس اول گزارش شده است.

جدول ۵ فرکانس‌های طبیعی در مدل‌سازی المان محدود

Table 5 Natural frequencies in finite element modeling

| حالت فرکانس | فرکانس اول (هرتز) | فرکانس دوم (هرتز) | فرکانس سوم (هرتز) |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| آزاد | ۳۶ | ۸۱ | ۸۳ |
| مقید | ۲۵ | ۳۸ | ۴۷ |

جدول ۶ سه فرکانس طبیعی اولیه نمونه با حالت‌های ارتعاش آنها

Table 6 The first three natural frequencies of the specimen with their vibration modes

| شکل مود | مقید | آزاد |
|--------------------|------|------|
| شکل مود فرکانس اول | | |
| شکل مود فرکانس دوم | | |
| شکل مود فرکانس سوم | | |

برای شبیه‌سازی تنش‌زدایی از یک حلگر دینامیک ضمنی استفاده شد. نتایج تحلیل جوشکاری به عنوان حالت اولیه برای تحلیل تنش‌زدایی اعمال گردید. برای اعمال نیرو از یک نیروی هارمونیک مطابق رابطه (۱) استفاده شد. در قسمت مش از المان‌های C3D8R و برای شرایط مرزی از قید بین‌گذاری در چهار گوشه مدل اجرا گردید.

$$F = F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

برای انتخاب نیرو ابتدا بارگذاری با نسبت‌های ۰/۰۳، ۰/۰۶، ۰/۱۴ و ۰/۲ به نیروی بیشینه و برای انتخاب فرکانس از نسبت‌های ۰/۷۵، ۰/۹۵، ۱/۰۵ و ۱/۵ استفاده شد.

۲-۵- صحنه‌سنجی شبیه‌سازی اجزای محدود

برای صحنه‌سنجی شبیه‌سازی اجزای محدود از روش کرنش‌سنجی سوراخ استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده

۲-۳- بررسی اثر پارامترهای تنش‌زدایی ارتعاشی

۲-۳-۱- بررسی تأثیر فرکانس بر تنش‌زدایی ارتعاشی

انتخاب فرکانس در روش تنش‌زدایی ارتعاشی یک نکته کلیدی است. تحقیقات نشان داده است که نزدیک شدن به اولین فرکانس طبیعی جسم بیشترین تأثیر را در کاهش میزان تنش‌ها دارد. این در حالی است که عبور از مقدار فرکانس طبیعی و فاصله گرفتن از آن سبب کاهش میزان آزادسازی تنش‌های پسماند می‌گردد. کاهش تنش‌های پسماند طولی برای فرکانس‌های مختلف در عرض ناحیه جوش، در شرایط تحریک از لبه پایینی مطابق شکل ۱۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نسبت فرکانس اعمال شده به فرکانس طبیعی (f/f_n) نسبت طبیعی (f/f_n) بیشترین میزان تنش‌زدایی را به همراه دارد. نسبت فرکانس اعمال شده به فرکانس طبیعی (f/f_n) ۰/۹۵ در اتصال سر به سر ورق‌های فولادی BS 970 080A15 تولید شده به روش جوشکاری قوس فلزی تحت محافظت گاز نیز بیشترین کاهش را ارائه کرده بود [۳۹].

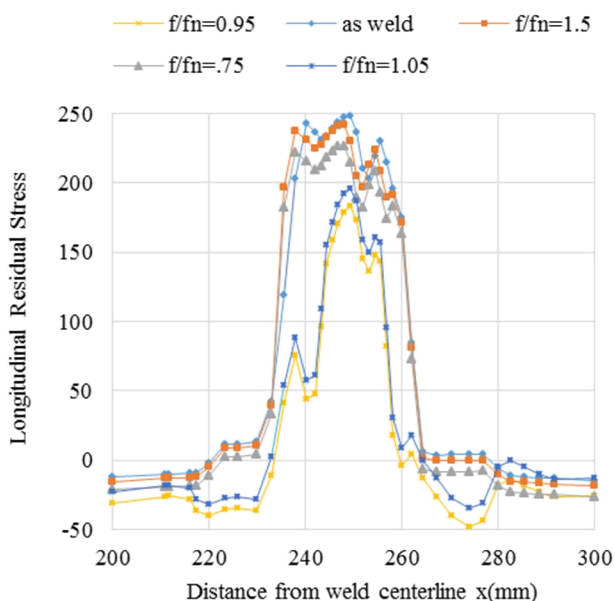


Fig. 12 Reduction distribution of longitudinal residual stresses at different frequencies of the weld zone

شکل ۱۲ توزیع کاهش تنش‌های پسماند طولی در فرکانس‌های مختلف ناحیه جوش هنگام تحریک از لبه پایینی

۲-۳-۲- بررسی اثر همزمان فرکانس و نیرو بر تنش‌زدایی ارتعاشی

اعمال بار بر ناحیه جوشکاری سبب تغییر در میدان‌های کرنشی و تنش می‌گردد. جهت آزادسازی تنش‌های پسماند، تأثیر همزمان فرکانس و نیرو بر میزان تنش‌زدایی ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود با افزایش میزان بار وارده، مقادیر تنش‌های پسماند آزاد شده در راستاهای طولی و عرضی افزایش می‌یابند.

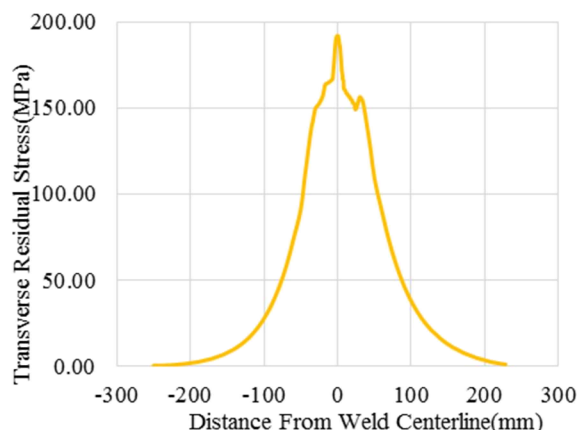


Fig. 9 Distribution of transverse residual stresses resulting from finite element simulations in welding centerline.

شکل ۹ توزیع تنش‌های پسماند عرضی حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود در امتداد خط جوش.

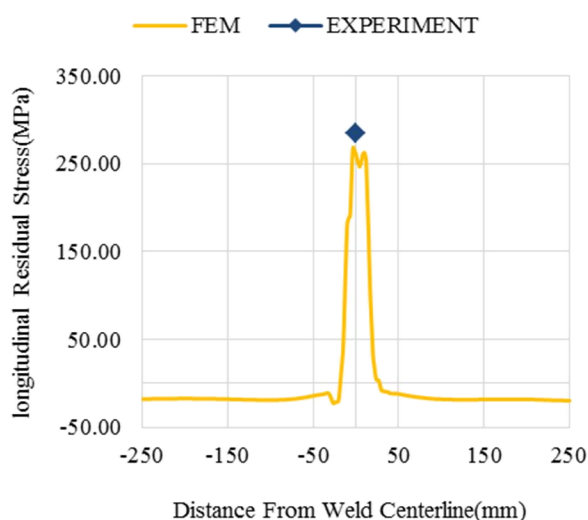


Fig. 10 Comparison of the results of longitudinal residual stress measurements after welding

شکل ۱۰ مقایسه نتایج اندازه‌گیری تنش‌های پسماند طولی پس از جوشکاری

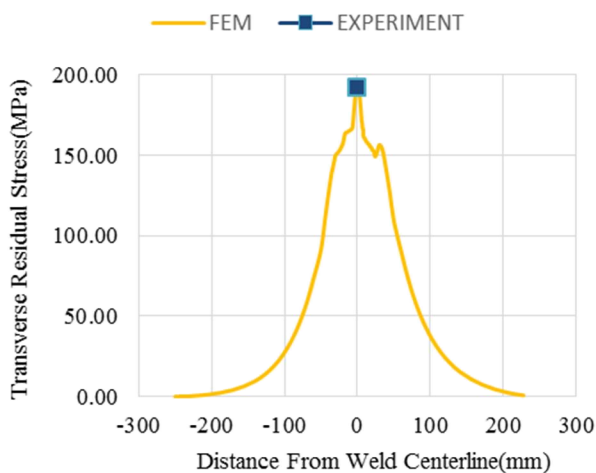


Fig. 11 Comparison of the results of transverse residual stress measurements after welding

شکل ۱۱ مقایسه نتایج اندازه‌گیری تنش‌های پسماند طولی پس از جوشکاری

پسماند کششی در حالت تجربی و عددی دارای اختلاف اندکی هستند. دلیل وجود چنین اختلافی با توجه به غیر قابل کنترل بودن بسیاری از پارامترهای موثر در فرایند بدیهی است. زیرا محصول خروجی از کارخانجات کاملاً همگن و همسانگرد نبوده و منطبق با مقادیر وارد شده در مدل‌سازی اجزای محدود نمی‌باشند [۴۷].

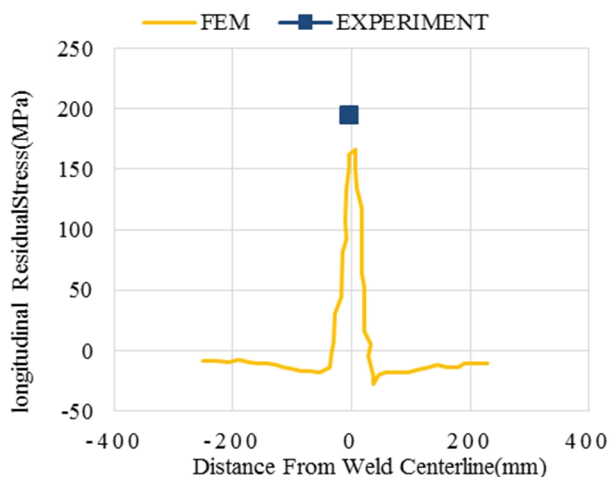


Fig. 15 Comparison of measurement results of longitudinal residual stresses after vibrational stress relief

شکل ۱۵ مقایسه نتایج اندازه‌گیری تنش‌های پسماند طولی پس از تنش‌زدایی ارتعاشی جوش

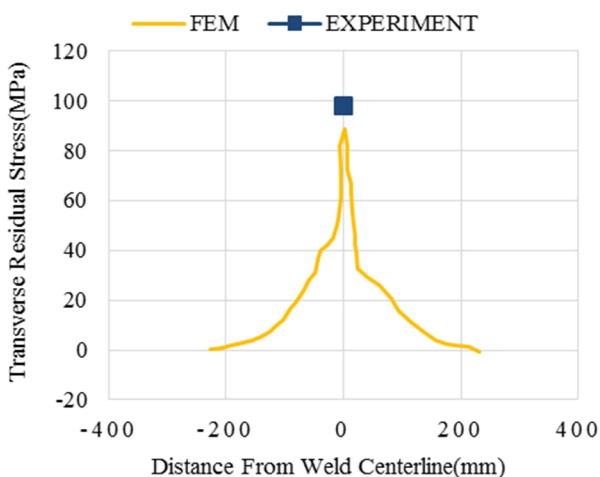


Fig. 16 Comparison of the results of measuring transverse residual stresses after vibrational stress relief

شکل ۱۶ مقایسه نتایج اندازه‌گیری تنش‌های پسماند عرضی پس از تنش‌زدایی ارتعاشی جوش

۳-۴- مقایسه تنش‌های پسماند تجربی قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی

نمودار تغییرات تنش‌های پسماند در شکل ۱۷ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات تنش‌های

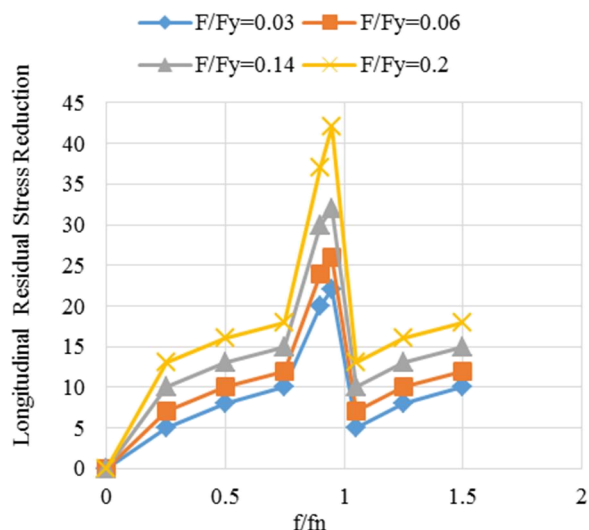


Fig. 13 Simultaneous effect of force and frequency on the reduction of longitudinal residual stress

شکل ۱۳ تأثیر همزمان نیرو و فرکانس بر کاهش تنش پسماند طولی

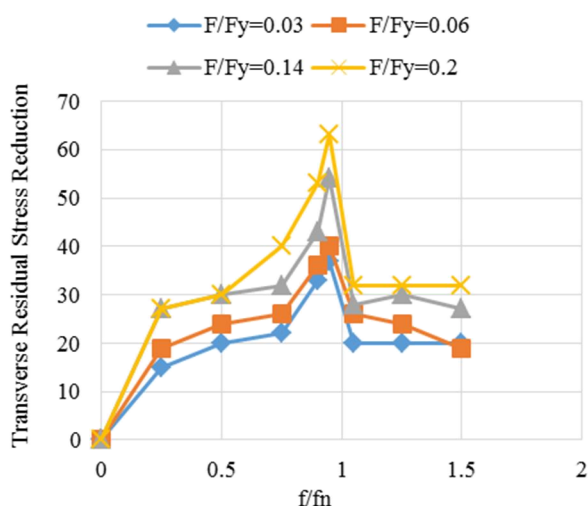


Fig. 14 Simultaneous effect of force and frequency on the reduction of transverse residual stress

شکل ۱۴ تأثیر همزمان نیرو و فرکانس بر کاهش تنش پسماند عرضی

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس طراحی آزمایش صورت گرفته، بهترین نتایج زمانی به دست می‌آید که نسبت فرکانس اعمال شده به فرکانس طبیعی $0.95 (f/f_n)$ و نیروی تحریک به نیروی تسلیم $0.03 (F/F_y)$ باشد. این مقادیر در اتصال سر به سر ورق‌های فولادی از جنس BS 970 080A15 تولید شده به روش جوشکاری قوس فلزی تحت محافظت گاز نیز وجود داشت [۳۹].

۳-۳- تجزیه و تحلیل تنش‌های پسماند در حالت‌های عددی و تجربی پس از تنش‌زدایی ارتعاشی
همان‌طور که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ملاحظه می‌شود تنش‌های

ارتعاشی یک اتصال T شکل پرداخته شد. تأثیر پارامترهایی مانند فرکانس اعمال نیرو، میزان نیرو و محل اعمال نیرو بر تنش‌زدایی ارتعاشی به صورت عددی بررسی گردیدند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که:

- انحراف ناشی از تنش‌های پسماند بدست آمده از شبیه‌سازی فرایند جوشکاری با نتیجه حاصل از مقادیر تجربی در راستای طولی حدود ۱۷ درصد و در راستای عرضی حدود ۱٫۵ درصد است.

- فرکانس بهینه جهت تنش‌زدایی ۹۵ درصد اولین فرکانس طبیعی بوده و افزایش نیرو سبب افزایش میزان تنش‌های پسماند آزاد شده می‌شود.

- در شبیه‌سازی تنش‌زدایی ارتعاشی کاهش ۵۵ درصدی برای تنش طولی و ۷۰ درصدی برای تنش عرضی به دست آمد.

- خطای ناشی از تنش‌های پسماند بدست آمده از شبیه‌سازی فرایند تنش‌زدایی ارتعاشی با نتیجه حاصل از مقادیر تجربی در راستای طولی حدود ۱۶/۵ و در راستای عرضی ۱۰ درصد است.

- مقایسه مقادیر تنش‌های پسماند تجربی قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی در تنش‌های طولی نزدیک به ۳۶ درصد و در تنش‌های عرضی حدوداً ۵۰ درصد کاهش یافته‌اند.

- در این پژوهش نسبت به مقاله‌های مشابه که با محوریت تنش‌زدایی ارتعاشی می‌باشد از تغییر موقعیت تحریک استفاده شده است مشخص گردید که در لبه بالایی میزان کاهش تنش‌های پسماند به میزان ۱۰ درصدی افزایش می‌یابد که می‌توان این موضوع را به علت ضخامت کمتر لبه بالایی دانست.

- همانند اتصال سر به سر ورق‌های فولادی حداکثر میزان کاهش تنش‌های پسماند در فرکانس تحریک ۹۵ درصد فرکانس طبیعی قطعه اتفاق افتاد.

۵- فهرست علائم

| | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|
| E | مدول یانگ (MPa) |
| \bar{A} | ضرایب کالیبراسیون (وابسته به قطر سوراخ و خواص مکانیکی فلز پایه) |
| \bar{B} | مکانیکی فلز پایه |
| c | ظرفیت گرمایی ویژه |
| a | مقاطع منبع حرارتی جوشکاری |
| c | کسر حرارت ورودی |
| f | نیرو |
| F | فرکانس |
| f | فرکانس |
| t | زمان |

پسماند طولی و عرضی در راستای خط جوش روند نزولی را طی می‌نماید. با توجه به پارامترهای انتخاب شده در طراحی آزمایش، تنش‌های طولی نزدیک به ۳۶ درصد و تنش‌های عرضی حدوداً ۵۰ درصد کاهش یافته‌اند. اگرچه درصد تغییرات نمودار تنش‌های پسماند آزاد شده در جهت عرضی بیش از راستای طولی است، اما مقدار عددی تنش‌های طولی آزاد شده بیش از مقدار عرضی آزاد شده در فرایند تنش‌زدایی ارتعاشی می‌باشد. این در حالی است که در اتصال سر به سر ورق‌های فلزی اثربخشی فرآیند VSR برای تنش پسماند عرضی بیشتر از تنش طولی بود [۳۹].

لازم به ذکر است تنش‌های پسماند طولی در قطعات جوشکاری شده به دلیل دارا بودن مقادیر بیشتر، اثر چشمگیرتری بر عمر سازه داشته و کاهش بیشتر تنش‌های کششی از رشد ترک‌ها جلوگیری می‌کنند.

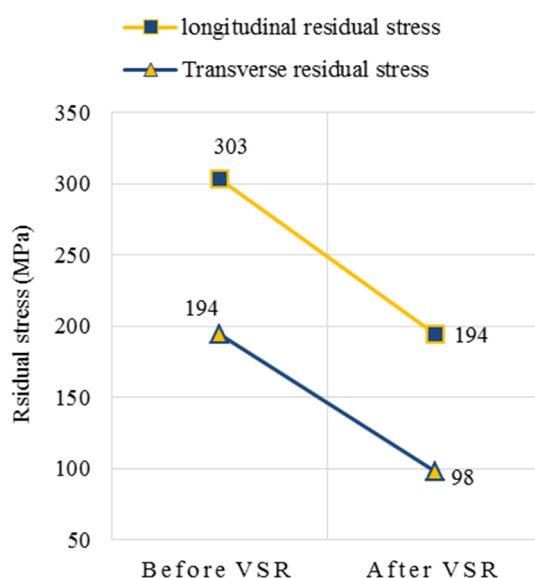


Fig. 17 Comparison of the results of measuring residual stresses before and after vibrational stress relief

شکل ۱۷ مقایسه نتایج اندازه‌گیری تنش‌های پسماند قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی

۴- جمع‌بندی

در این مقاله تنش‌های پسماند فرایند جوشکاری و تنش‌زدایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج حاصل از آزمایش تجربی به روش کرنش سنجی سوراخ در اتصال T شکل ورق St52 در امتداد خط طولی جوش مورد ارزیابی قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان داد:

در این تحقیق به مطالعه عددی و تجربی تنش‌زدایی

- Parameters on AL2024T3 Joint Strength*. Advanced Design and Manufacturing Technology Journal, 2021. **14**(4): pp. 105-112.
- [10] Farhang, M., M. Farahani, and M. Nazari, *Incorporation of Al2O3 powder for improvement of the mechanical and metallurgical properties of multi-passes friction stir welding of Al 2024*. Iranian Journal of Manufacturing Engineering, 2021. **8**(3): pp. 35-46.
- [11] Zamanpour, A., et al., *Experimental Study on the Effects of Harmonic Vibration on the Stress Relief of the Butt Welded AISI 1021 Pipes*. Iranian Journal of Manufacturing Engineering, 2020. **7**(2): (pp. 1-7).
- [12] Akbari, D., M. Farahani, and N. Soltani, *Effects of the weld groove shape and geometry on residual stresses in dissimilar butt-welded pipes*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2012. **47**(2): pp. 73-82.
- [13] 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. 723-731.
- [14] Farahani, M. and I. Sattari-Far, *Effects of residual stresses on crack-tip constraints*. Scientia Iranica, 2011. **18**(6): pp. 1267-1276.
- [15] Farahani, M., et al., *Numerical and experimental investigations of effects of residual stresses on crack behavior in Aluminum 6082-T6*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2012. **226**(9): pp. 2178-2191.
- [16] Bachmann, M., et al., *Numerical simulation of thermally induced residual stresses in friction stir welding of aluminum alloy 2024-T3 at different welding speeds*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **91**(1): pp. 1443-1452.
- [17] Coules, H.E., *Contemporary approaches to reducing weld induced residual stress*. Materials Science and Technology, 2013. **29**(1): pp. 4-18.
- [18] Chuvas, T.C., D.A. Castello, and M.P. Cindra Fonseca, *Residual stress relief of welded joints by mechanical vibrations*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2016. **38**(8): p. 2449-2457.
- [19] Sadeghi, B., et al., *Effects of post weld heat treatment on residual stress and mechanical properties of GTAW: The case of joining A537CL1 pressure vessel steel and A321 austenitic stainless steel*. Engineering Failure Analysis, 2018. **94**: pp. 396-406.
- [20] Cozzolino, L.D., et al., *Investigation of post-weld rolling methods to reduce residual stress and distortion*. Journal of Materials Processing Technology, 2017. **247**: pp. 243-256.
- [21] Gao, H., et al., *Experimental and simulation investigation on thermal-vibratory stress relief process for 7075 aluminium alloy*. Materials & design, 2020. **195**: pp. 108954.
- [22] Tatar, F., A.-H. Mahmoudi, and A. Shooshtari, *Vibratory Stress Relief of Welded Austenite Stainless Steel Plates: Numerical and Experimental Approach*. Iranian Journal of Materials Forming, 2021. **8**(1): pp. 50-6.۴
- [23] Mohanty, S., et al., *The residual stress distribution of CO2 laser beam welded AISI 316 austenitic stainless steel*
- گرما Q
 علایم یونانی
 تنش‌های پسماند (MPa) σ
 کرنش ϵ
 فرکانس ω
 عدد پی (۳/۱۴) π
 زیر نویس‌ها
 حداکثر max
 حداقل min
 1 و 2 و 3 جهت‌های کرنش‌های آزاد شده
 جلو f
 عقب r
 حرارت h
 x
 محورهای مختصاتی y
 z
- ۶- مراجع
- [1] Li, W., H. Frederick, and G. Palardy, *Multifunctional films for thermoplastic composite joints: Ultrasonic welding and damage detection under tension loading*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021. **141**: pp. 106221.
- [2] Sam-Daliri, O., et al., *Impedance analysis for condition monitoring of single lap CNT-epoxy adhesive joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019. **88**: p. 59-65.
- [3] Sam-Daliri, O., M. Farahani, and A. Araei, *Condition monitoring of crack extension in the reinforced adhesive joint by carbon nanotubes*. Welding Technology Review, 2019. **91**(12): pp. 7-15.
- [4] Sam-Daliri, O., et al., *Structural health monitoring of defective single lap adhesive joints using graphene nanoplatelets*. Journal of Manufacturing Processes, 2020. **55**: pp. 119-130.
- [5] Stetco, C., et al. *Piezocapacitive sensing for structural health monitoring in adhesive joints*. in 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). 2019. IEEE.
- [6] Masubuchi, K., *Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences*. Vol. 33. 2013: Elsevier.
- [7] Enami, M., M. Farahani, and M. Farhang, *Novel study on keyhole less friction stir spot welding of Al 2024 reinforced with alumina nanopowder*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **101**(9): pp. 3093-3106.
- [8] Shahmirzaloo, A., M. Farahani, and M. Farhang, *Evaluation of local constitutive properties of Al2024 friction stir-welded joints using digital image correlation method*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2021. **56**(7): pp. 419-429.
- [9] Farhang, M., M. Farahani, and M. Enami, *Experimental Study on the Effects of Friction Stir Spot Welding Process*

- joints to evaluate the efficacy of vibration stress relief compared to thermal stress relief. Materials Research, 2020. 23.*
- [38] Yang, Y., *Understanding of vibration stress relief with computation modeling. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009. 18(7): pp. 856-862.*
- [39] Ebrahimi, S., 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): p. 2147-2158.*
- [40] Moattari, M., et al., *Evaluations of residual stresses in repair welding of Ni-based IN939 superalloy. Journal of Thermal Stresses, 2020. 43(7): pp. 801-815.*
- [41] Zargar, S.H., M. Farahani, and M.K.B. Givi, *Numerical and experimental investigation on the effects of submerged arc welding sequence on the residual distortion of the fillet welded plates. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016. 230(4): pp. 654-661.*
- [42] Lindgren, L.-E. *Modelling for residual stresses and deformations due to welding: "knowing what isn't necessary to know". in International Seminar on Numerical Analysis of Weldability: 01/10/2001-02/10/2001. 2002. Maney Publishing (for The Institute of Materials, Minerals and Mining).*
- [43] Charkhi, M. and D. Akbari, *Experimental and numerical investigation of the effects of the pre-heating in the modification of residual stresses in the repair welding process. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019. 171: pp. 79-91.*
- [44] Barsoum, Z. and I. Barsoum, *Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM. Engineering failure analysis, 2009. 16(1): pp. 449-467.*
- [45] Sam Daliri, O., M. Farahani, and M. Farhang, *A combined numerical and statistical analysis for prediction of critical buckling load of the cylindrical shell with rectangular cutout. Engineering Solid Mechanics, 2019. 7(1): pp. 35-46.*
- [46] Sam Daliri, O. and M. Farahani, *Characterization of Stress Concentration in Thin Cylindrical Shells with Rectangular Cutout Under Axial Pressure. Advanced Design and Manufacturing Technology Journal, 2017. 10(2): pp. 133-141.*
- [47] Fatemi, A. and B. Mollaei Dariani, *Forming limit prediction of anisotropic material subjected to normal and through thickness shear stresses using a modified M-K model. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. 80(9): pp. 1497-1509.*
- and the effect of vibratory stress relief. Materials Science and Engineering: A, 2017. 703: pp. 227-235.*
- [24] Tamasgavabari, R., et al., *The effect of harmonic vibration with a frequency below the resonant range on the mechanical properties of AA-5083-H321 aluminum alloy GMAW welded parts. Materials Science and Engineering: A, 2018. 736: pp. 248-257.*
- [25] Hu, X., et al., *Study on residual stress releasing of 316L stainless steel welded joints by ultrasonic impact treatment. International Journal of Steel Structures, 2020. 20(3): pp. 1014-1025.*
- [26] Schajer, G.S., *Practical residual stress measurement methods. 2013: John Wiley & Sons.*
- [27] Wang, Q., et al., *Influence of restraint conditions on residual stress and distortion of 2219-T8 aluminum alloy TIG welded joints based on contour method. Journal of Manufacturing Processes, 2021. 68: pp. 796-806.*
- [28] Safarabadi, M., *Evaluation of curing residual stresses in three-phase thin composite laminates considering micro-scale effects. Journal of Composite Materials, 2016. 50(27): pp. 3753-3764.*
- [29] Shokrieh, M. and M. Safarabadi, *Effect of fibre transverse isotropy on micro-residual stresses in polymeric composites. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2011. 46(8): pp. 817-824.*
- [30] Manawan, M., et al. *XRD Residual Stress and Texture Analysis on 6082T Aluminum Alloy. in Materials Science Forum. 2021. Trans Tech Publ.*
- [31] Sasaki, T., et al. *Standardization of Cosa Method for X-Ray Stress Measurement. in Materials Science Forum. 2021. Trans Tech Publ.*
- [32] Farahani, M., S. Hakkak Zargar, and D. Akbari, *Investigation of the effects of the weld groove shape on the residual stress formation in the butt-welded plates. Scientia Iranica, 2016. 23(5): pp. 2230-2237.*
- [33] Farhang, M., et al., *Effect of friction stir welding parameters on the residual stress distribution of Al-2024-T6 alloy. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 2021. 15(1): pp. 7684-7694.*
- [34] Schajer, G., *Compact calibration data for hole-drilling residual stress measurements in finite-thickness specimens. Experimental Mechanics, 2020. 60(5): pp. 665-678.*
- [35] Zhang, K., M. Yuan, and J. Chen, *General calibration formulas for incremental hole drilling optical measurement. Experimental Techniques, 2017. 41(1): pp. 1-8.*
- [36] Aoki, S., T. Nishimura, and T. Hiroi, *Reduction method for residual stress of welded joint using random vibration. Nuclear engineering and design, 2005. 23(14): pp. 1441-1445.*
- [37] Moraes, A.G.d., T.G.R. Clarke, and I.L. Diehl, *Quantification of CTOD fracture toughness in welded*