مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دوره 15، شماره 9، ص‌ص 1-10

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ارزیابی قابلیت روش اولتراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند طولی جوش‌کاری به‌وسیله اعتبارسنجی با روش پراش پرتو ایکس

محمد افتخاری[1]، مهدی احمدی‌نجف‌آبادی[2*]

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
* تهران، صندوق‌پستی: 15875-4413، ahmadin@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 30 اردیبهشت 1394
پذیرش: 07 تیر 1394
ارائه در سایت: 31 تیر 1394

کلید واژگان:
تنش پسماند جوش‌کاری
روش التراسونیک
روش پراش پرتو ایکس
آلیاژ آلومینیوم سری 5000

چکیده

در سال‌های اخیر، اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک به دلیل ماهیت غیرمخرب، تجهیزات قابل حمل، ارزان و سریع بودن، در حال توسعه است. در این پژوهش، قابلیت روش التراسونیک با استفاده از موج طولی با زاویه شکست بحرانی یا موج LCR، در اندازه‌گیری تنش پسماند طولی ناشی از جوش‌کاری، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین‌منظور دو ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم سری 5000 با روش جوش‌کاری تیگ به هم متصل شد. اندازه‌گیری تنش پسماند طولی با روش التراسونیک، توسط ترنسدیوسرهای 5 مگاهرتزی و در عمق نزدیک به سطح و بر مبنای تئوری آکستوالاستیسیته انجام شد. برای ایجاد موج LCR و ارسال آن به درون قطعه، گوه التراسونیک بر مبنای قانون اسنل ساخته شد، همچنین از یک میز سه‌محوره برای کنترل حرکت گوه و ثابت نگه‌داشتن فشار روی آن استفاده گردید. به‌منظور محاسبه تنش پسماند و افزایش دقت، ضریب آکستوالاستیک برای هر سه ناحیه جوش‌کاری فلز جوش، HAZ و فلز پایه به‌صورت جداگانه با انجام آزمون کشش تک‌محوره به‌دست آمد. جهت مقایسه نتایج هر دو روش مورد استفاده با هم، تطابق خوبی مشاهده شد که نشان‌دهنده قابلیت خوب روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند طولی است.

Evaluation of the Capability of Ultrasonic Method for Measuring Longitudinal Welding Residual Stress, by Validating with X-Ray Diffraction Method

Mohammad Eftekhary, Mehdi Ahmadi Najafabadi*

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 4413-15875 Tehran, Iran, ahmadin@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 May 2015
Accepted 28 June 2015
Available Online 22 July 2015

Keywords:
Welding Residual Stress
Ultrasonic Method
X-Ray Diffraction Method
Aluminum Alloy Series 5000

ABSTRACT

In recent years, measurement of residual stress by ultrasonic method has developed because of its nondestructive nature, portable equipment and being cheap and fast. In this research, the Capability of ultrasonic method by using longitudinal critically refracted or LCR wave in measurement of longitudinal welding residual stress has been scrutinized. For this purpose, two plates of aluminum alloy series 5000 were joined by TIG welding method. Measurement of longitudinal residual stress by ultrasonic method was done in closeness of surface via 5 MHz transducers based on acoustoelasticity theory. In order to create LCR wave and transmit it into specimen, an ultrasonic wedge was made based on Snell's law. Also, a triaxial table was used to control the wedge movement and keep the pressure on it fixed. In order to calculate residual stress and increase in accuracy, acoustoelastic constant for each three welding zones, including weld metal, HAZ and base metal was obtained separately from uniaxle tension test. In order to validate ultrasonic method results, measured longitudinal residual stress by x-ray diffraction method in 5 points on the specimen surface was used. Finally, after comparing the results of the two used methods with each other, good agreement was seen which indicates the good ability of ultrasonic method in measurement of longitudinal residual stress.

1- مقدمه

آگاهی از مقدار و چگونگی توزیع تنش‌ها، همواره مورد توجه بسیاری از محققین و مهندسین بوده است. روش‌های دقیقی که برای ارزیابی تنش‌های پسماند استفاده می‌شوند عموماً از نوع مخرب است. این روش‌ها اغلب برای قطعاتی که در حال کار در سیستم است، قابل اجرا نیستند و بنابراین امروزه ضرورت استفاده از روش‌های غیرمخرب در بسیاری از بخش‌های صنعت به اثبات رسیده است. یکی از روش‌های غیرمخرب اندازه‌گیری تنش در حال توسعه، به‌کارگیری امواج آلتراسونیک است. علت توجه روزافزون به روش

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Eftekhary, M. Ahmadi Najafabadi, Evaluation of the Capability of Ultrasonic Method for Measuring Longitudinal Welding Residual Stress, by Validating with X-Ray Diffraction Method, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 9, pp. 1-10, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.20.2]

التراسونیک و تلاش برای اثبات قابلیت این روش در اندازه‌گیری تنش پسماند، ماهیت غیرمخرب، قابل حمل بودن، ارزان و سریع بودن اندازه‌گیری با آن است، همچنین این روش، برخلاف بسیاری از روش‌های دیگر که تنش را در سطح قطعه اندازه می‌گیرند، قابلیت اندازه‌گیری تنش در عمق قطعه را بسته به فرکانس موج مورد استفاده دارد. اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک بر پایه خاصیت آکستوالاستیک مواد استوار است که براساس این خاصیت، سرعت انتشار موج التراسونیک در ماده به تنش موجود در آن بستگی دارد [1].

جرقه آغاز فعالیت‌های مربوط به بحث التراسونیک و تنش به شخصی به نام مورنگان [2] بازمی‌گردد. ایشان رابطه سرعت موج التراسونیک در یک محیط تحت تنش را برحسب ضرایب درجه سوم در تابع انرژی بیان کرد. آغاز توسعه استفاده از روش التراسونیک برای اندازه‌گیری تنش، توسط دو محقق هوگس و کلی [3] در سال 1953 و بر پایه نتایج و تئوری الاستیسیته غیرخطی مورنگان بود. آن‌ها تغییرات سرعت موج التراسونیک را به‌عنوان تابعی از کرنش‌های الاستیک ماده هم‌سانگرد، بیان کرده و با این کار تئوری آکوستوالاستیسیته را پایه‌گذاری کردند.

کرکرافت [4] در سال 1967 نشان داد که با استفاده از تئوری اثر آکستوالاستیک می‌توان تنش را در قطعات مهندسی برآورد کرد. ایگل و بری [5] در سال 1976، تغییرات ناشی از تنش بر سرعت موج التراسونیک را در نمونه‌های فولادی اندازه‌گیری کردند. با کار آن‌ها پیش‌بینی‌های تئوریک، تأیید شد و از آن پس در اندازه‌گیری‌ها به‌کار گرفته شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که امواج طولی با زاویه شکست بحرانی[1] بیشترین حساسیت را در مقابل تغییرات تنش از خود نشان می‌دهند. ایگل و بری [6،۷] در سال‌های 1978 و 1979 از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی برای اندازه‌گیری تنش در ریل قطار استفاده کردند.

نخستین استفاده از روش التراسونیک در زمینه اندازه‌گیری تنش پسماند جوشی به شخصی به نام سالامانکا [8] بازمی‌گردد. ایشان در سال 1990 از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی برای اندازه‌گیری تنش پسماند ناشی از جوش‌کاری در فولاد سری 60 استفاده کرد. ایشان توانست با تغییر فرکانس تحریک موج، تنش پسماند را در اعماق متفاوتی زیر سطح ورق اندازه‌گیری کند، همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک را با نتایج حاصل از اندازه‌گیری با روش کرنش‌سنجی سوراخ مقایسه کرد که تطابق قابل قبولی به‌دست آمد. این کار توانایی روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق قطعه را برجسته‌تر کرد.

سالامانکا و بری [9] در سال 1995 از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی برای اندازه‌گیری تنش پسماند جوشی در ورق‌های نورد گرم و سرد شده استفاده کردند. همچنین اثر انجام عمل تنش‌گیری را روی تنش پسماند بررسی کردند. برِی موفق شد در سال‌های 2002 و 2003 این روش اندازه‌گیری تنش را به‌عنوان تنها روش غیرمخرب که توانایی اندازه‌گیری تنش پسماند در لایه‌های زیرین سطح را دارد، ثبت اختراع کند.

لو و دیگران [10] در سال 2008 با استفاده از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی، تنش پسماند حاصل از جوش لب‌به‌لب را در نواحی به‌جز ناحیه فلز جوش، در ورق‌هایی از جنس فولاد Q235 و آلومینیوم 2219، اندازه‌گیری کرده و با داده‌های حاصل از کار شبیه‌سازی که در نرم‌افزار مارک[2] انجام شده بود، مقایسه کردند. گاچی و سایرین [11] در سال 2011 از امواج LCR برای اندازه تنش پسماند در جوش‌کاری اصطکاکی آلیاژ آلومینیوم AA7075-T6 استفاده کردند.

در سال 2012 و 2013، جوادی [1،12،13] تنش‌های پسماند جوشی در نمونه‌هایی از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L که به روش تیگ جوش‌کاری شده بودند را به کمک امواج طولی LCR اندازه‌گیری کرد و نتایج به‌دست‌آمده را با نتایج روش کرنش‌سنجی سوراخ اعتبارسنجی و تطابق خوبی را مشاهده کرد.

امروزه تلاش برای اثبات قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند و تدوین یک استاندارد معتبر برای آن همچنان ادامه دارد. در این پژوهش، قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند طولی ناشی از جوش‌کاری، با یک روش غیرمخرب دیگری (پراش پرتو ایکس) که دقت بسیار بالاتری دارد و برای آن استاندارد [14] تدوین شده است، بررسی شده که در پژوهش‌های دیگر به این مسئله چندان پرداخته نشده است، همچنین در مطالعات اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش التراسونیک، کمتر به آلومینیم و به‌ویژه جوش‌کاری ذوبی آن پرداخته شده است؛ بنابرین آلیاژ آلومینیوم سری 5000 و روش جوش‌کاری ذوبی تیگ (گاز محافظ آرگون و الکترود تنگستنی) برای پژوهش انتخاب شد. آلیاژهای آلومینیوم سری 5000، در صنایع مختلفی نظیر صنایع دریایی، هوافضا و ساخت مخازن تحت فشار مورد استفاده قرار می‌گیرند، بنابراین در این صنایع، اتصال این آلیاژها با روش جوش‌کاری، از اهمیت بسزایی برخوردار است.

2- روش تحقیق

2-1- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای این پژوهش دو ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم سری 5000، با درصد عناصر سازنده مندرج در جدول 1 و خواص مکانیکی مندرج در جدول 2، به ابعاد 150×50 میلی‌متر و به ضخامت 8 میلی‌متر تهیه شد. سایز کردن ورق‌ها و ایجاد پخ جوش‌کاری V شکل با زاویه 60 درجه، توسط ماشین‌کاری با دستگاه فرز انجام شد. شکل و اندازه شیار طبق استاندارد AWS D1.2/D1.2M [15] انتخاب شد.

از روش جوش‌کاری تیگ یا جوش‌کاری با الکترود تنگستنی و گاز محافظ آرگون که یکی از روش‌های مرسوم جوش‌کاری آلیاژهای آلومینیوم است، برای اتصال ورق‌ها به‌صورت لب‌به‌لب، استفاده شد. براساس همان استاندارد AWS D1.2/D1.2M، فیلر ER5183 به‌منظور جوش‌کاری انتخاب شد و درنهایت جوش‌کاری با جریان متناوب و در دو پاس، با پارامترهای موجود در جدول 3 انجام شد. در هنگام جوش‌کاری از قیودی مطابق شکل 1 به‌منظور مهار قطعه و ایجاد تنش پسماند بیشتر استفاده گردید.

جدول 1 درصد عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ آلومینیوم سری 5000 مورداستفاده

Al	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr	Cu
فلز اصلی	4/25	0/60	0/25	0/15	0/09	0/09	0/06

جدول 2 خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم سری 5000 مورد استفاده

تنش تسلیم کششی (MPa)	تنش نهایی کششی (MPa)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)
226	337	0/33	71

1- Longitudinal Critically Refracted (LCR)
2- Marc

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.20.2]

جدول 3 پارامترهای جوش‌کاری

شماره پاس جوش‌کاری	شدت جریان (A)	ولتاژ (V)	قطبیت	سرعت جوش‌کاری (mm/s)
1	140	15	AC	0/66
2	150	15	AC	0/77

شکل 1 شرایط و قیدوبندهای جوش‌کاری

پس از جوش‌کاری مشاهده شد که گرده‌ای به ارتفاع 0/6 میلی‌متر پدید آمد که با استفاده از سنباده‌زنی، این گرده با سطح ورق، هم‌ارتفاع شد تا هم سنسور التراسونیک به‌راحتی بتواند روی موضع جوش قرار گیرد و زمان پرواز را در خود فلز جوش اندازه‌گیری کند و هم در اندازه‌گیری تنش با پرتو ایکس، لازم بود که سطح قطعه هموار باشد تا از تفرق‌های ناخواسته پرتو ایکس جلوگیری شود.

2-2- اندازه‌گیری تنش پسماند طولی جوش‌کاری با روش التراسونیک

2-2-1- تئوری اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک

زاویه شکست بحرانی[1] و یا به‌اختصار امواج LCR است. این روش محدودیتی از نظر جنس ماده‌ای که مورد بررسی قرار می‌گیرد، ندارد و نیز برای اندازه‌گیری در قطعات ضخیم نیز مناسب است. اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک بر پایه خاصیت آکستوالاستیک مواد استوار است که براساس این خاصیت، سرعت انتشار موج التراسونیک در ماده به تنش موجود در آن بستگی دارد.

اصول ایجاد موج LCR این‌گونه است که وقتی موج طولی به مرز مشترک دو ماده با مقاومت آکوستیکی[2] متفاوت (یعنی سرعت انتشار موج طولی در این دو ماده متفاوت است.) برخورد می‌کند، قسمتی از آن منعکس شده، بازمی‌گردد که این فرآیند را انعکاس[3] گویند و قسمتی از آن با زوایای معینی وارد ماده می‌شود که به این فرآیند انکسار[4] می‌گویند. قسمت منکسرشده به دو دسته موج طولی و عرضی تقسیم می‌شود که هر کدام با زاویه متفاوتی در قطعه انتشار می‌یابند.

همان‌طور که در شکل 2 مشهود است، بخشی از موج برابر با همان زاویه تابش θ_o به محیط 1 منعکس می‌شود، مابقی موج یکی وارد محیط 2 می‌شود و دو نوع موج التراسونیک طولی و عرضی یا برشی تولید می‌کند. زوایای انکسار دو موج طولی و عرضی به‌ترتیب با θ_l و θ_s نشان داده شده است. این دو زاویه به زاویه تابشِ θ_o، بنا به معادله اسنل[5]، یعنی معادله (1) مربوط است؛ که در این فرمول C_o سرعت موج طولی برخوردی در محیط 1، C_l سرعت موج طولی در محیط 2 و C_s سرعت موج عرضی در محیط 2 است.

$$\frac{\sin\theta_o}{C_o} = \frac{\sin\theta_l}{C_l} = \frac{\sin\theta_s}{C_s} \quad (1)$$

چنان‌چه هدف این باشد که موج طولی منکسرشده در محیط 2، روی سطح قطعه بیفتد و در امتداد سطح قطعه حرکت کند باید زاویه انکسار موج طولی در محیط 2 برابر با 90 درجه شود؛ بنابراین طبق معادله اسنل، زاویه تابش موج طولی در محیط 1 باید مقدار خاصی باشد، که این زاویه تابش را زاویه بحرانی اول یا θ_{cr} می‌نامند. برای به‌دست آوردن این زاویه تابش، کافی است در رابطه اسنل به‌جای θ_l مقدار 90 درجه قرار داده شود، آن‌گاه θ_o به‌دست‌آمده همان زاویه بحرانی نخست و فرمول آن به شکل رابطه (2) خواهد بود.

$$\theta_{cr} = \sin^{-1}(C_o/C_l) \quad (2)$$

این موج طولی ایجادشده در سطحِ ماده 2 که به موازات سطح منتشر می‌شود را همان موج طولی با زاویه شکست بحرانی یا موج LCR می‌گویند [16].

هوگس و کلی[6] با توجه به شکل 3 معادلات مربوط به ارتباط سرعت‌های موج التراسونیک با کرنش الاستیک را در یک جسم ایزوتروپیک به‌صورت روابط (3-11) بیان کردند.

$$\rho_\circ V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \quad (3)$$

$$\rho_\circ V_{12}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \quad (4)$$

$$\rho_\circ V_{13}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \quad (5)$$

$$\rho_\circ V_{21}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 2\mu\alpha_1 + 4\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \quad (6)$$

$$\rho_\circ V_{22}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_2 \quad (7)$$

$$\rho_\circ V_{23}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_2 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_1 \quad (8)$$

$$\rho_\circ V_{31}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_3 + 2\mu\alpha_1 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \quad (9)$$

$$\rho_\circ V_{32}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_3 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_1 \quad (10)$$

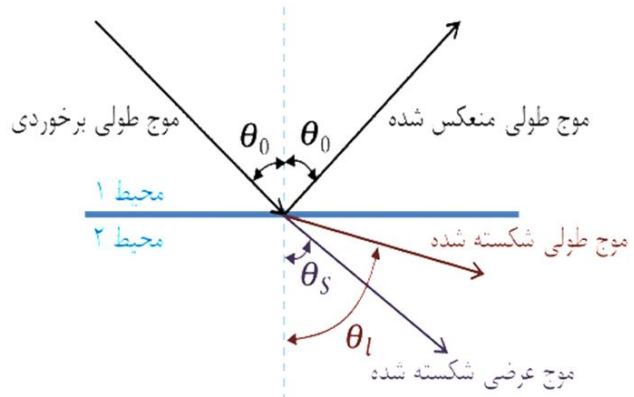
$$\rho_\circ V_{33}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_3 \quad (11)$$

در روابط بالا α_1، α_2 و α_3 بیانگر کرنش‌های اصلی، ρ_o چگالی نخستین (با اعمال تنش، چگالی قطعه تغییر می‌کند)، μ و λ ثابت‌های الاستیک درجه دوم[7]، m، n و l ثابت‌های الاستیک درجه سوم[8]، $\theta = \alpha_3 + \alpha_2 + \alpha_1$ و V_{ij} بیانگر سرعت موج التراسونیکی است که در آن اندیس i نشانگر جهت انتشار موج و اندیس j نشانگر جهت ارتعاش ذراتِ تحت تأثیر موج است. برای نمونه V_{23} بیانگر انتشار یا ارسال موج در جهت 2 و حرکت ذرات حامل موج در راستای جهت 3 است. از آن‌جا که موج طولی، موجی است که جهت انتشار آن با جهت ارتعاش ذره یکسان باشد؛ بنابراین بر این اساس، سرعت‌های V_{11}، V_{22} و V_{33} نشانگر امواج طولی است که از این بین V_{11} سرعت موج طولی است که در راستای اعمال بار (امتداد جهت 1) در قطعه منتشر می‌شود. سایر سرعت‌ها مربوط به امواج عرضی هستند که در آن‌ها ذرات، عمود بر راستای

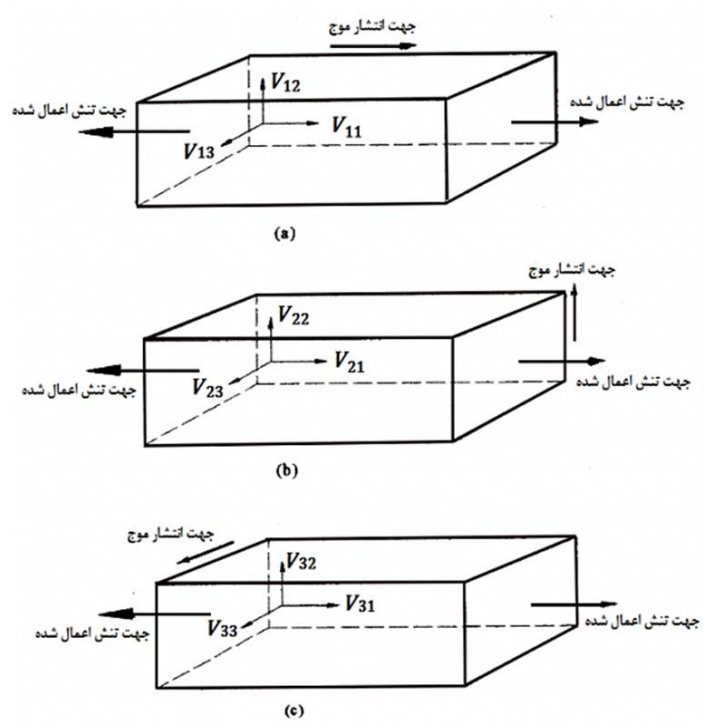
1- Longitudinal Critically Refracted
2- Acoustic Impedance
3- Reflection
4- Refraction

5- Snell's Equation
6- Hughes and Kelly
7- Lame's Elastic Constants
8- Murnaghan's Elastic Constants

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.20.2]



شکل 2 نتیجه برخورد موج طولی از یک محیط به محیط دیگر [16]



شکل 3 سرعت‌های مورد استفاده در روابط آکستوالاستیسیته [16]

انتشار موج، مرتعش می‌شوند.

از دیدگاه میکروسکوپی، اعمال تنش به یک ماده جامد سبب تغییر مدول الاستیک، فاصله بین اتمی و چگالی آن می‌شود. این تغییرات نیز به سهم خود سبب تغییر در سرعت موج التراسونیک می‌شود. این یعنی در قطعه تحت تنش، رابطه تنش و کرنش خطی نیست و به‌صورت رابطه (12) است.

$$\sigma = E\varepsilon + C\varepsilon^2 + D\varepsilon^3 + \cdots \quad (12)$$

در رابطه بالا C و D به‌ترتیب ثابت‌های غیر هارمونیک مرتبه دوم و سوم که خود تابعی از ثوابت الاستیک درجه دوم و سوم است. در برخی از حالات از جملات غیرخطی صرف‌نظر می‌کنند، ولی در آکستولاستیسیته نه‌تنها از آن‌ها صرف‌نظر نمی‌کنند بلکه آن‌ها بیشتر هم مورد توجه قرار می‌گیرند. با استفاده از ثوابت الاستیک درجه دوم، می‌توان مدول‌های مهندسی روابط (13-15) را نیز به‌دست آورد.

$$G = \mu \quad (13)$$

$$E = \mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu) \quad (14)$$

$$K = (3\lambda + 2\mu)/3 \quad (15)$$

در روابط بالا G، E و K به‌ترتیب مدول‌های برشی[1]، یانگ[2] و بالک[3] است. در حالت تنش تک‌محوره که تنش در جهت 1 به قطعه وارد می‌شود و کرنش در این جهت ε و ضریب پواسون υ است. معادلات سرعت که بالاتر بیان شد، به شکل روابط (16-21) درمی‌آیند.

$$\alpha_1 = \varepsilon, \qquad \alpha_2 = \alpha_3 = -\upsilon \times \varepsilon \quad (16)$$

$$\rho_\circ V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + [4(2\mu + \lambda) + 2(\mu + 2m) + \upsilon \times \mu\left(1 + \frac{2l}{\lambda}\right)]\varepsilon \quad (17)$$

$$\rho_\circ V_{12}^2 = \rho_\circ V_{13}^2 = \mu + [4\mu + m(1 - 2\upsilon) + \upsilon\left(\frac{n}{2}\right)]\varepsilon \quad (18)$$

$$\rho_\circ V_{22}^2 = \lambda + 2\mu + [2l(1 - 2\upsilon) - 4\upsilon(m + \lambda + 2\mu)]\varepsilon \quad (19)$$

$$\rho_\circ V_{21}^2 = \rho_\circ V_{31}^2 = \mu + [(\lambda + 2\mu + m)(1 - 2\upsilon) + \upsilon\left(\frac{n}{2}\right)]\varepsilon \quad (20)$$

$$\rho_\circ V_{23}^2 = \rho_\circ V_{32}^2 = \mu + [(\lambda + m)(1 - 2\upsilon) - 6\mu \times \upsilon\left(\frac{n}{2}\right)]\varepsilon \quad (21)$$

برای محاسبه تغییرات سرعت موج نسبت به کرنش، کافی است از طرفین معادلات بالا نسبت به کرنش، مشتق بگیریم که معادلات (22-26) به‌دست می‌آیند.

$$\frac{dV_{11}/V_{11}^{\circ}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\mu + 2m + \mu \times \upsilon\left(1 + {}^{2l}/_{\lambda}\right)}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \quad (22)$$

$$\frac{dV_{12}/V_{12}^{\circ}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{n \times \upsilon}{4\mu} + \frac{m}{2(\lambda + \mu)} = L_{12} \quad (23)$$

$$\frac{dV_{21}/V_{21}^{\circ}}{d\varepsilon} = \frac{\lambda + 2\mu + m}{2(\lambda + \mu)} + \frac{n \times \upsilon}{4\mu} = L_{21} \quad (24)$$

$$\frac{dV_{22}/V_{22}^{\circ}}{d\varepsilon} = -2\upsilon[1 + \frac{m - {}^{\mu l}/_{\lambda}}{\lambda + 2\mu}] = L_{22} \quad (25)$$

$$\frac{dV_{23}/V_{23}^{\circ}}{d\varepsilon} = \frac{m - 2\mu}{2(\lambda + \mu)} + \frac{n}{4\mu} = L_{23} \quad (26)$$

در روابط بالا L_{ij} را که نسبت تغییرات سرعت موج به تغییرات کرنش است، ثابت آکوستوالاستیک[4] می‌گویند و اندیس o نشانگر سرعت موج در حالتی است که ماده بدون کرنش و تغییر شکل باشد. L_{11} ضریب آکستوالاستیک موج LCR است [17].

با استفاده از رابطه تنش- کرنش یک‌بعدی در مواد الاستیک می‌توان مقدار تغییرات تنش را با تغییر رابطه (22) به طریق رابطه (27) به‌دست آورد.

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11}^{\circ})}{L_{11}} \quad (27)$$

در فرمول بالا $d\sigma$ تغییرات تنش و E مدول الاستیسیته است [1]. رابطه (27) را می‌توان برحسب زمان پرواز موج به‌صورت رابطه (28) ارائه کرد که t_o در رابطه (28) بیانگر زمان پرواز موج در ماده بدون تنش و dt بیانگر تغییرات زمان پرواز موج به دلیل حضور تنش است.

$$d\sigma = \frac{E({}^{dt}/_{t_o})}{L_{11}} \quad (28)$$

معادله بالا را می‌توان برای دیگر جهت‌ها نیز استفاده کرد. درنهایت برای اندازه‌گیری تغییرات تنش از روی تغییرات زمان پرواز موج، از رابطه (29) استفاده می‌شود.

$$\Delta\sigma = \frac{E}{L \times t_o}\Delta t = \frac{E(t - t_o)}{L \times t_o} \quad (29)$$

در رابطه بالا، L ضریب آکستوالاستیک ماده است که به‌صورت تجربی و با انجام تست کشش تک‌محوره برای هر ماده اندازه‌گیری می‌شود، همچنین در معادله بالا، t زمان پرواز موج در ماده تحت تنش و t_o زمان پرواز موج در همان ماده ولی در حالت بدون تنش است [18].

2-2-2- آماده‌سازی تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک

جهت ایجاد و ارسال موج LCR و دریافت آن، از ترنسدیوسر[5]های موج

1- Shear moduli
2- Young's moduli
3- Bulk moduli

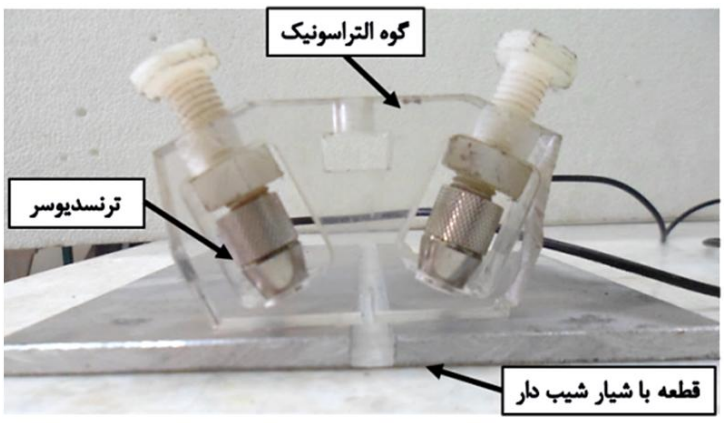
4- Acoustoelastic constant
5- Transducer

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.20.2]

التراسونیک استفاده می‌شود. هرچه فرکانس موج التراسونیک بیشتر باشد، عمق نفوذ موج LCR در قطعه کمتر شده و از این ویژگی برای اندازه‌گیری تنش در نواحی نزدیک به سطح قطعه استفاده می‌شود. بدین منظور از 2 عدد ترنسدیوسر 5 مگاهرتز (فرستنده و گیرنده) به قطر 5 میلی‌متر که در شکل 4 مشهود است، استفاده شد [1].

دستگاه مورد استفاده برای تولید و دریافت امواج، یک بورد التراسونیک با قابلیت اتصال به رایانه است. این بورد، اپ‌باکس[1] نام دارد و ساخت شرکت اپتل[2] است که در شکل 5 نشان داده شده است. این دستگاه دارای قابلیت اتصال به رایانه است، همچنین این دستگاه قابل حمل بوده و نرخ داده‌برداری آن 100 مگاهرتز است. علی‌رغم نرخ داده برداری 100 مگاهرتزی، دستگاه مجهز به سیستم هماهنگ‌سازی[3] بین سیگنال فرستاده شده[4] و ساعت دیجیتالی داخلی[5] است که تبدیل آنالوگ به دیجیتال[6] را کنترل می‌کند. چنین سیستمی اندازه‌گیری زمان پرواز موج با دقت 10 نانوثانیه را میسر می‌سازد که اهمیت اساسی در مبحث اندازه گیری تنش پسماند دارد.

گوه‌ی التراسونیک که در همان شکل 4 نشان داده شد، قطعه‌ای از جنس پلکسی گلاس[7] است [18] که با زاویه و شکل مناسب با برش‌کاری لیزر ساخته شد تا نخست سبب موقعیت‌دهی و تثبیت مکان ترنسدیوسرهای فرستنده و گیرنده در موقعیت مطلوب (زاویه بحرانی نخست) شود و دوم موج التراسونیکی را به شکل موج LCR به داخل قطعه وارد کند. برای تولید موج LCR، طراحی گوه بر مبنای قانون اسنلز که در بخش تئوری بیان شد، انجام پذیرفت تا از 90 درجه بودن زاویه شکست موج خروجی از گوه اطمینان حاصل شود. بدین‌منظور در رابطـه اسنل، رابطه (2)، با قرار دادن سرعت موج طولی در پلکسی گلاس یا گوه التراسونیک به‌عنوان محیط نخست ($C_0 = C_{PMMA} = 2749 m/s$) و سرعت موج طولی در آلیاژ آلومینیوم سری 5000 به‌عنوان محیط دوم ($C_l = C_{Al} = 6393\ m/s$) ، زاویه بحرانی نخست، 25/5 درجه به‌دست آمد.



شکل 4 گوه التراسونیک و اندازه‌گیری عمق نفوذ موج

شکل 5 بورد التراسونیک مورد استفاده

1- OPBOX
2- OPTEL
3- Synchronization
4- Pulser signal
5- Internal clock
6- A/D converter
7- PMMA

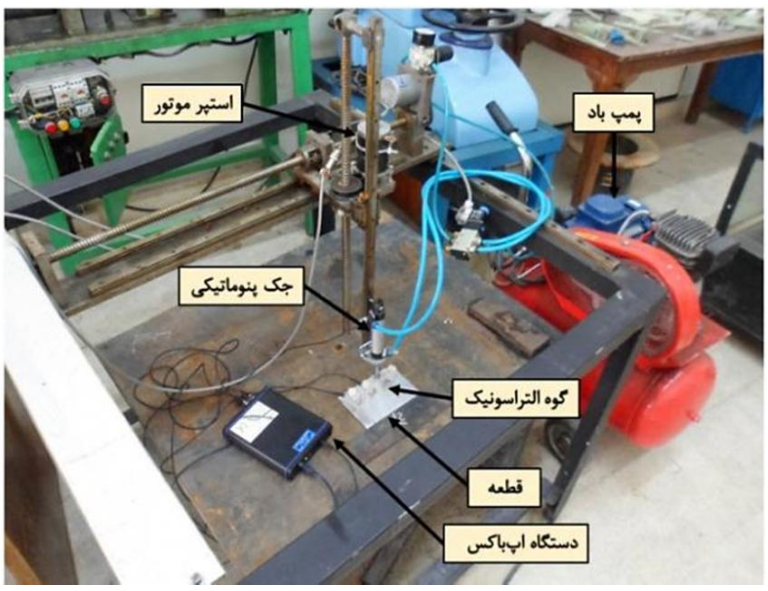
در هنگام اندازه‌گیری تنش پسماند، بین گوه التراسونیک و سطح قطعه از مایعی لزج به نام کوپلنت[8] استفاده شد [13]؛ کوپلنت ماده‌ای است که سبب عبور موج از گوه التراسونیک به داخل ماده مورد بررسی می‌شود به‌طوری‌که زمانی گوه اندازه‌گیری روی سطح قرار داده شود، کوپلنت بین گوه و سطح قطعه قرار می‌گیرد و فاصله هوایی بین گوه و سطح را پر می‌کند و موج را به داخل قطعه عبور می‌دهد.

وجود تغییر در ضخامت کوپلنت به هنگام اندازه‌گیری با موج LCR، سبب تغییر در مسافت طی‌شده موج، از لحظه خروج موج از ترانسدیوسر فرستنده تا لحظه دریافت توسط ترانسدیوسر گیرنده می‌شود. در نتیجه زمان پرواز موج با تغییر ضخامت کوپلنت تغییر خواهد کرد.

جهت ثابت نگه‌داشتن ضخامت کوپلنت بین گوه و سطح قطعه در هنگام اندازه‌گیری زمان پرواز در نقاط مختلف، بایستی همواره فشار ثابتی به گوه التراسونیک در نقاط اندازه‌گیری، وارد شود تا ضخامت کوپلنت همواره در هنگام اندازه‌گیری تنش پسماند ثابت بماند [19]. بدین جهت از یک میز سه‌محوره مجهز به سیستم کنترل فشار و استپر موتور برای ایجاد حرکت در سه جهت اصلی کارتزین، استفاده شد. در این میز با استفاده از راه‌انداز مربوط به استپر موتور، امکان کنترل حرکت توسط رایانه فراهم شد و این سبب افزایش سرعت کار شد. برای اعمال فشار ثابت روی گوه از یک جک پنوماتیکی با کورس حرکتی 10 سانتی‌متر که روی میز سوار شده بود، استفاده و به‌منظور کنترل حرکت رفت و برگشتی جک از یک شیر پنوماتیکی دو جهته استفاده شد، همچنین برای اعمال نیروی ثابت توسط جک پنوماتیکی، یک شیر تنظیم فشار جهت ثابت نگه‌داشتن هوای ورودی به داخل جک، در مسیر هوای ورودی از کمپرسور استفاده شد که این خود علاوه‌بر ایجاد فشار ثابت، سبب جلوگیری از اعمال بار اضافی ناگهانی روی گوه و آسیب دیدن آن می‌شود. در شکل 6 نمایی از این میز و اجزای آن، قطعه مورد مطالعه و سایر تجهیزات لازم برای اندازه‌گیری تنش پسماند، هنگام آزمون نشان داده شده است.

2-2-3- اندازه‌گیری عمق نفوذ موج LCR

برای اندازه‌گیری عمق نفوذ موج LCR در فرکانس 5 مگاهرتز، براساس همان شکل 4 از قطعه‌ای با همان جنس آلیاژ آلومینیم سری 5000 که با دستگاه فرز، شیاری شیب‌دار از ارتفاع کم تا زیاد روی آن ایجاد شده بود، استفاده شد. به این طریق که ترانسدیوسر فرستنده و گیرنده، مطابق همان شکل به‌صورت متقارن در دو طرف شیار قرار داده شد و در این وضعیت، با حرکت دادن گوه



شکل 6 تجهیزات مورد استفاده در روش التراسونیک

8- Couplant

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.20.2]

در راستای شیار از سمت قسمتی با عمق شیار کم تا عمق زیاد، عمقی که در آن سیگنال موج LCR دیگر قابل تشخیص نباشد، به‌عنوان عمق نفوذ موج LCR در آن فرکانس درنظر گرفته می‌شود. پس از آزمون مشخص شد که عمق نفوذ موج LCR در فرکانس 5 مگاهرتز، کمتر از 1/1 میلی‌متر و تراکم موج در نواحی نزدیک به سطح قطعه بیشتر است.

2-2-4- اندازه‌گیری ضریب آکستوالاستیک

تغییر ریزساختار در نواحی مختلف جوش، بر زمان پرواز موج LCR تأثیر دارد؛ به همین دلیل به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری تنش پسماند، لازم است تا ضریب آکستوالاستیک در سه ناحیه جوش‌کاری فلز جوش، منطقه متأثر از حرارت معروف به HAZ و فلز پایه به‌صورت جداگانه تعیین شود [1].

برای اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک سه منطقه فلز پایه، HAZ و فلز جوش ابتدا باید مرز این مناطق مشخص شود. بدین‌منظور از قطعه جوش‌کاری‌شده یک نمونه متالوگرافی استخراج و سپس اچ[1] شد که مشخص شد عرض ناحیه فلز جوش روی هر ورق 5/5 میلی‌متر و عرض ناحیه HAZ روی هر ورق 2/1 میلی‌متر است.

روش اندازه‌گیری ضریب آکستوالاستیک بدین‌گونه است که رابطه (29) معکوس می‌شود و به‌صورت رابطه (30) درمی‌آید.

$$L = \frac{E}{(\Delta\sigma)t_o}\Delta t = \frac{E(t-t_o)}{\Delta\sigma \times t_o} \qquad (30)$$

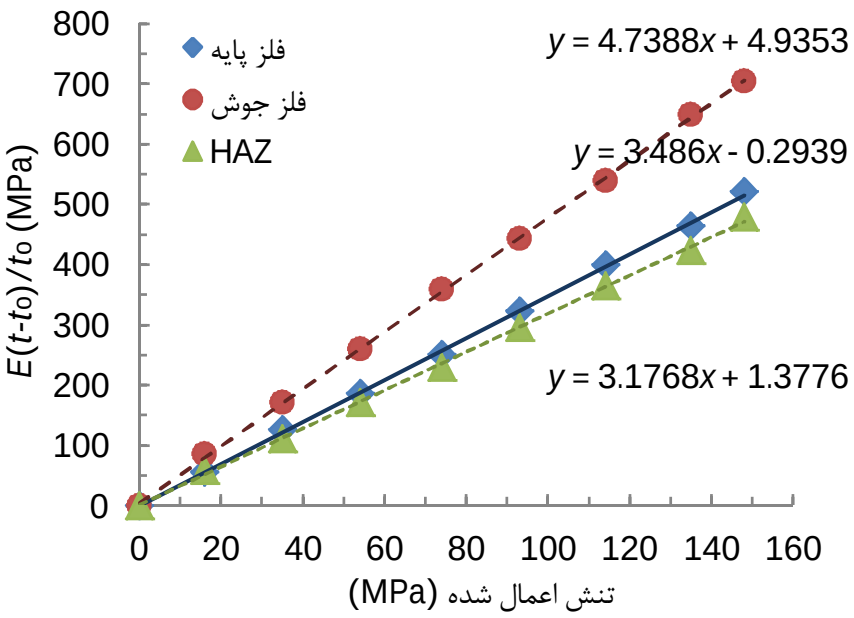
در این رابطه، در صورت معلوم بودن چهار پارامتر t، t_o، E و σ، ضریب آکستوالاستیک یا L محاسبه می‌شود. برای اعمال یک تنش معلوم σ از آزمون کشش تک‌محوری و فک‌های دستگاه کشش استفاده می‌شود [18]. برای اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک منطقه HAZ و فلز جوش، نواری به عرض 3/5 سانتی‌متر که خط جوش در وسط آن قرار داشت و شامل هر دو منطقه HAZ و فلز جوش بود، از ورق استخراج شد و تحت کشش قرار گرفت. در هنگام کشش همین نوار با تنش‌های معلوم، با عبور دادن موج LCR از ناحیه فلز جوش و ناحیه HAZ، با قرار دادن گوه التراسونیک روی این مناطق مطابق شکل 7 زمان پرواز موج اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک فلز پایه، نمونه تست کشش استاندارد از فلز پایه استخراج شد و در دستگاه کشش تحت تنش معلوم قرار گرفت. در نهایت بنا به رابطه (30)، نموداری مطابق شکل 8 برای هر سه ناحیه جوش رسم شد که شیب هر نمودار بیانگر ضریب آکستوالاستیک آن ناحیه است. نتایج حاصل در جدول 4 درج شده است.

2-2-5- اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک

به‌منظور اندازه‌گیری تنش پسماند طولی، مقطع عرضی تقارن و منصف قطعه که در شکل 9 مشخص شده است، انتخاب شد. زمان پرواز موج LCR در نقاط مختلف این مقطع، توسط دو ترانسدیوسر با فرکانس 5 مگاهرتز (فرستنده و گیرنده) که مطابق همان شکل 9 در گوه بسته‌شده و در جهت نشان داده در همین شکل، حرکت داده می‌شد، اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری زمان پرواز موج در همان میز سه‌محوره مشهود در شکل 6 انجام گرفت، همچنین موقعیت گوه، هنگام اندازه‌گیری زمان پرواز موج، نیز در شکل 9 قابل مشاهده است. پس از اندازه‌گیری زمان پرواز موج در نقاط اندازه‌گیری و با در دست داشتن ضریب آکستوالاستیک مناطق مختلف جوش‌کاری، تنش پسماند طولی بنا به رابطه (29) به‌دست آمد که نتایج در شکل 10 مشهود است. از

1- Etch

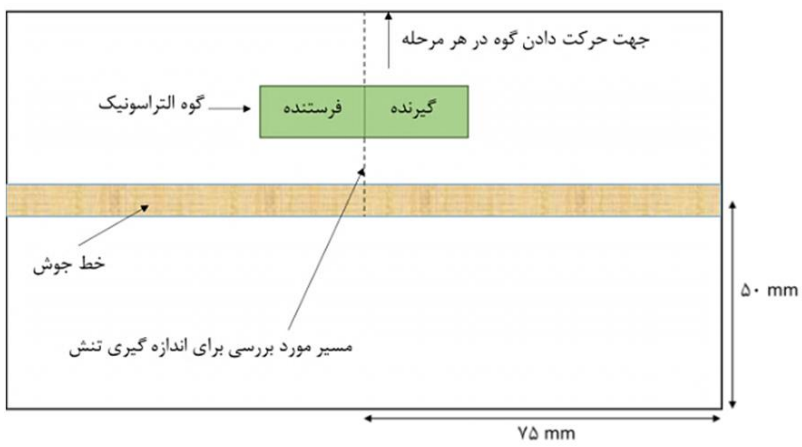
شکل 7 اندازه‌گیری ضریب آکستوالاستیک



شکل 8 نمودار محاسبه ضریب آکستوالاستیک برای سه منطقه جوشکاری

جدول 4 ضریب آکستوالاستیک به‌دست‌آمده برای سه ناحیه جوش‌کاری

پارامتر	فلز پایه	HAZ	فلز جوش
ضریب آکستوالاستیک	3/4860	3/1768	4/7388



شکل 9 مسیر مورد بررسی برای اندازه‌گیری تنش پسماند

آن‌جا که مقدار تنش پسماند طولی ناشی از جوش‌کاری لب به لب دو ورق، در اواسط طول ورق در مقطع موازی خط جوش، تقریباً ثابت می‌ماند [20]؛ بنابراین در نقاط موجود در فاصله بین دو ترنسدیوسر، مقدار تنش پسماند طولی تقریباً ثابتی وجود دارد به همین دلیل نقاط موجود در شکل 10، بیانگر تنش پسماند طولی جوش‌کاری اندازه‌گیری شده در نقاط واقع در وسط فاصله

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.20.2]

بین دو ترنسدیوسر است. مطابق همان شکل 10 گام‌های طی‌شده برای اندازه‌گیری تنش پسماند نقاط مقطع مورد بررسی، در راستای عمود بر خط جوش و در حالتی که گوه التراسونیک به موازات خط جوش قرار دارد، است.

2-3- اندازه‌گیری تنش پسماند طولی جوش‌کاری با روش پراش پرتو ایکس

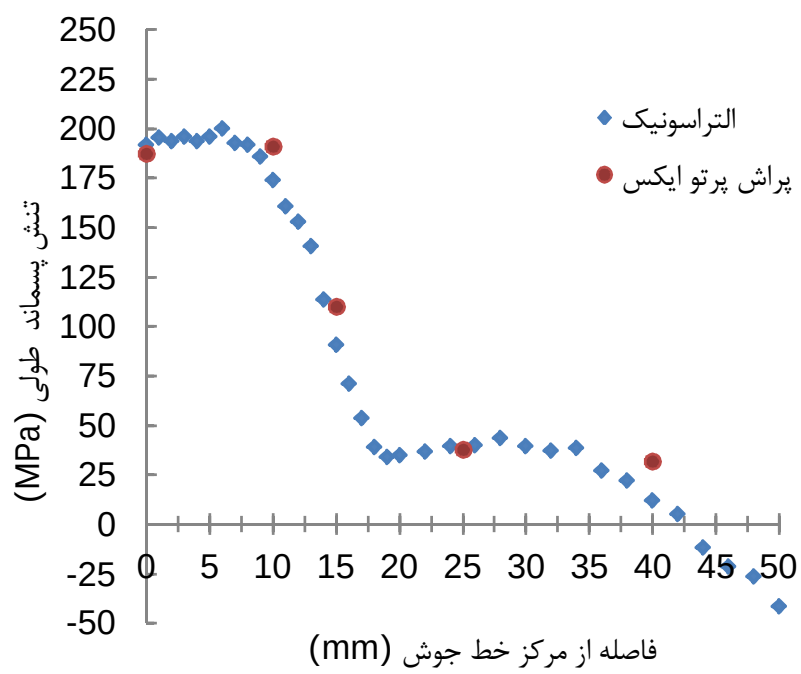
2-3-1- تئوری اندازه‌گیری تنش پسماند با روش پراش پرتو ایکس

رابطه اساسی در روش پراش پرتو ایکس، قانون براگ[1] که به‌صورت رابطه (31) است.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \qquad (31)$$

در رابطه بالا، n مرتبه انعکاس، λ طول موج پرتو ایکس، d فاصله بین صفحات کریستالی و θ زاویه انعکاس است. در این روش، ابتدا سطح قطعه تحت تابش پرتو ایکس تک طول (طول موج ثابت) موج قرار می‌گیرد؛ سپس پرتوهای منعکس شده در جایی که با هم تداخل سازنده کرده و رابطه براگ را ارضا کنند و در نتیجه دارای بیشترین شدت باشند، دریافت می‌شوند و در آن محل یک پیک پراش مشاهده خواهد شد؛ بنابرین براساس رابطه براگ، در صورت بروز هر تغییری در فاصله صفحات کریستالی، d، تحت عواملی مانند تنش، زاویه انعکاس، θ، جابه‌جا خواهد شد. تیوب‌های تولید پرتو ایکس در واقع طیفی پیوسته از طول موج‌ها تولید می‌کنند که سه پرتو پرانرژی تک‌فام آن، $k\beta$، $k\alpha_1$ و $k\alpha_2$ نام دارند. البته با انجام فیلتراسیون تلاش می‌شود تا پرتو تک طول موج به سطح قطعه تابیده شود. در اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده از پیک‌های پراش دریافت‌شده با مقدار 2θ در حد 120 درجه و بالاتر از آن توصیه شده است؛ زیرا در این زوایا، پیک‌های پراش دقت و شدت بالاتری دارند و نیز پرتو $k\beta$ از پرتوهای $k\alpha_1$ و $k\alpha_2$ فاصله می‌گیرد و دقت تشخیص مکان دقیق پیک پراش بالاتر رفته و دیگر نیازی به استفاده از فیلتر برای حذف آن، نیست [21].

وجود تنش پسماند در قطعه سبب می‌شود که چنان‌چه به قطعه در برابر پرتو ایکس، چندین بار تحت زاویه ψ شیب داده شود، در هر زاویه شیب، پیک مورد بررسی برای تعیین مقدار تنش پسماند، مطابق شکل 11 مقداری جابه‌جا شود و در هر زاویه شیب، مقدار 2θ و d متفاوتی به‌دست آید [22]. به همین دلیل، روال کار چنین است که به قطعه در برابر پرتو چندین بار شیب داده می‌شود، سپس در هر زاویه شیب، مقدار d اندازه گرفته شده و در



شکل 10 تنش پسماند طولی اندازه‌گیری شده با دو

1- Bragg's law

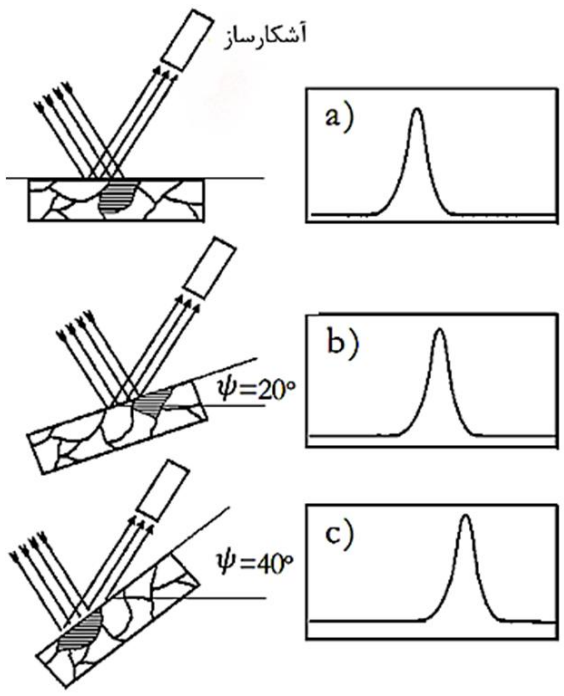
آخر نمودار d برحسب $\sin^2\psi$ رسم می‌شود و از شیب نمودار حاصل، در رابطه (32) استفاده می‌شود تا تنش پسماند در هر جهت دلخواه ϕ که در شکل 12 مشخص است، به‌دست آید. این فرمول از روابط الاستیسیته و اعمال شرط تنش صفحه‌ای به دلیل محدود بودن عمق نفوذ پرتو در ضخامت ماده و اندازه‌گیری تنش سطحی قطعه به‌دست آمده است.

$$\sigma_\phi = \frac{E}{d_{\phi 0}(1+\upsilon)} \times \frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2\psi} \qquad (32)$$

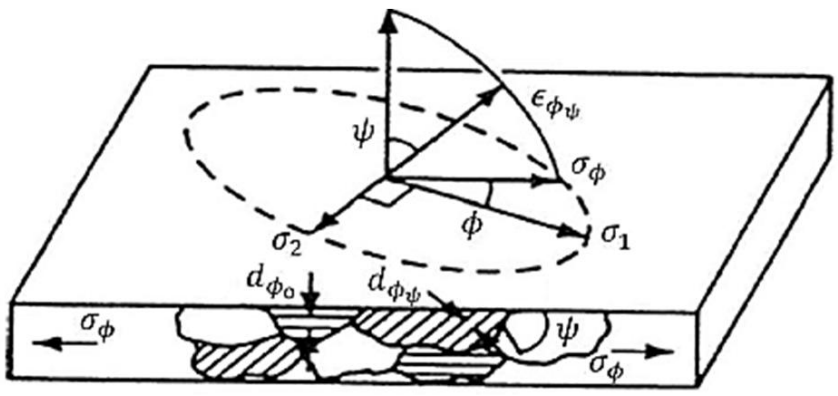
در رابطه بالا، E مدول الاستیسیته، υ ضریب پواسون، $d_{\phi 0}$ فاصله بین صفحات کریستالی در ψ=0 و $d_{\phi\psi}$ فاصله بین صفحات کریستالی در زاویه دلخواه ϕ و ψ است [23].

2-3-2- اندازه‌گیری عملی تنش پسماند طولی با روش پراش پرتو ایکس

برای اندازه‌گیری تنش پسماند طولی با روش پراش پرتو ایکس برای اعتبارسنجی نتایج روش التراسونیک، از دستگاه پراش پرتو ایکس اکویناکس[2] مدل 3000 که ساخت شرکت اینل[3] است، مطابق شکل 13 استفاده شد. این دستگاه یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین نوع دستگاه‌های پراش پرتو ایکس محسوب می‌شود، زیرا در ساخت آن از آشکارساز[4]های نوع جدید مکان ثابت سی‌پی‌اس[5] نوع 120 (دارای انحنای 120 درجه و به شعاع انحنای 250 میلی‌متر) استفاده شده است که سرعت و دقت کار را افزایش داده است. این نوع آشکارسازها (شکل 13) این مزیت مهم را دارند که در مدت زمان کوتاه‌تری نسبت به آشکارسازهای قدیمی، تمام پراش‌های صورت‌گرفته از سطح را به‌طور هم‌زمان، در طول انحنای خود، دریافت می‌کنند که دیگر



شکل 11 شیب دادن به قطعه در برابر پرتو و جابه‌جایی پیک پراش [22]



شکل 12 محور و جهات مورد استفاده در بحث پراش پرتو ایکس [23]

2- Equinox
3- Inel
4- detector
5- CPS

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.20.2]

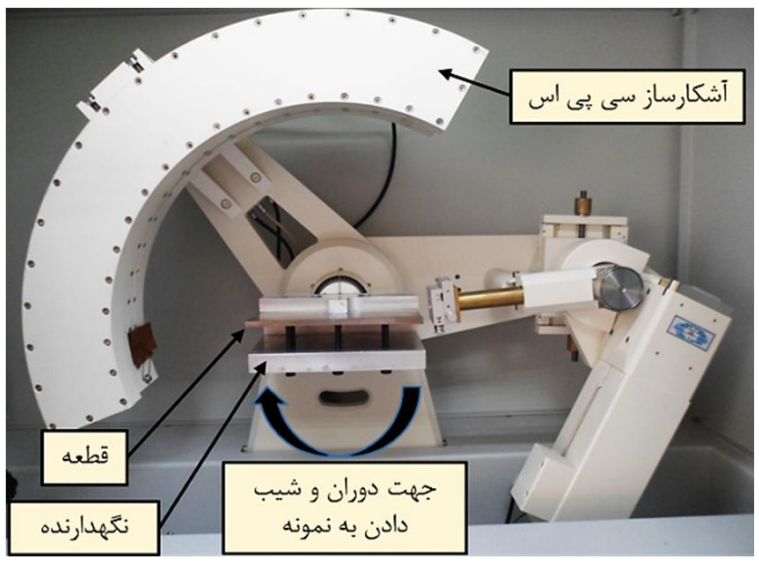
نیازی به حرکت آشکارساز برای دریافت پیک پراش نیست [24]، همچنین این دستگاه دارای قدرت تفکیک[1] خیلی بالایی است، قدرت تفکیک زاویه‌ای این دستگاه در حد 0/01 درجه که بسیار بهتر از رنج پیشنهادی برای بحث اندازه‌گیری تنش پسماند (یعنی محدوده 0/2– 0/05 درجه) است [25]. سایر مشخصات دستگاه پراش پرتو ایکس مورد استفاده در جدول 5 آمده است.

پس از انجام یک آزمون پراش روی قطعه، پیک پراش ظاهرشده در 2θ بین 111 و 112 درجه که دارای شدت و دقت کافی و از لحاظ مکانی نزدیک به 120 درجه بود (شکل 14)، برای بررسی انتخاب شد، همچنین به دلیل انجام فیلتراسیون قوی در دستگاه پراش مورد استفاده، دیگر نگرانی از حضور پرتو kβ و کاهش دقت اندازه‌گیری وجود نداشت. در هر نقطه مورد اندازه‌گیری تنش پسماند، به قطعه چندین بار تحت زاویه ψ در برابر پرتو ایکس، شیب داده شد که اطلاعات و نتایج به‌دست‌آمده برای نقطه روی خط جوش در جدول 6 درج شده است. درنهایت نمودار d برحسب $\sin^2\psi$ برای هر یک از نقاط مورد اندازه‌گیری تنش پسماند رسم شد و شیب نمودار حاصل، در رابطه (32) استفاده و مقدار تنش پسماند طولی محاسبه شد. نمودار d برحسب $\sin^2\psi$ برای نقطه روی خط جوش در شکل 15 نشان داده شده است.

مطابق شکل 10 که پیش‌تر آورده شد، تنش پسماند طولی در 5 نقطه واقع بر مقطع مورد مطالعه، با روش پراش پرتو ایکس اندازه‌گیری شد. موقعیت مکانی هر نقطه و مقدار تنش پسماند طولی اندازه‌گیری‌شده با هر دو روش غیرمخرب مورد استفاده و اختلاف نتایج حاصله، در جدول 7 درج شده است.

3- بحث روی نتایج

با توجه به شکل 10 و نتایج مندرج در جدول 7 در ناحیه مهم و اساسی جوش که کمتر از 10 میلی‌متر وسعت دارد و شامل هر دو منطقه حساس

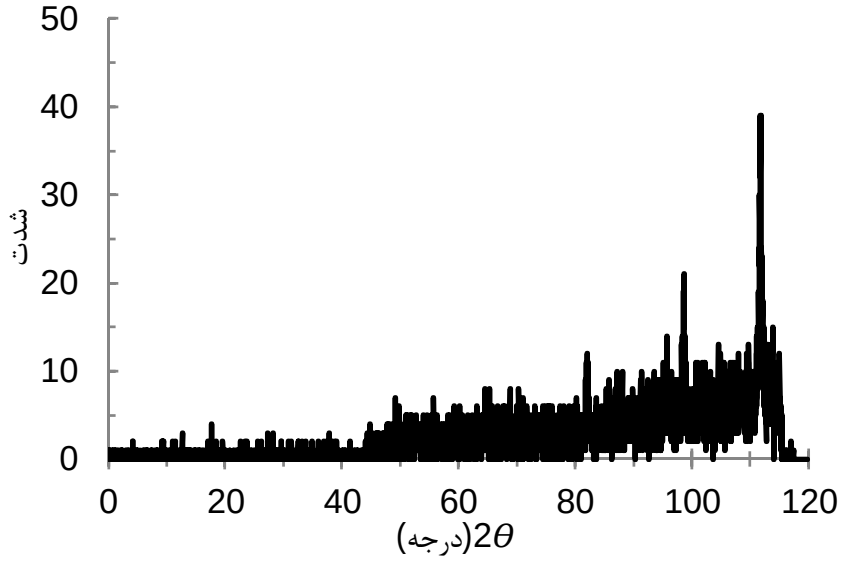


شکل 13 دستگاه پراش پرتو ایکس مورد استفاده

جدول 5 سایر مشخصات دستگاه پراش پرتو ایکس مورد استفاده

مشخصات دستگاه	مقدار و واحد
طول موج پرتو $k\alpha_1$	1/54059 [Å]
طول موج پرتو $k\alpha_2$	1/544426 [Å]
مشخصات ژنراتور	40kV و 30mA
زمان هر پرتودهی	350 s
نوع تیوب	مس
نوع تابش پرتو	پیوسته

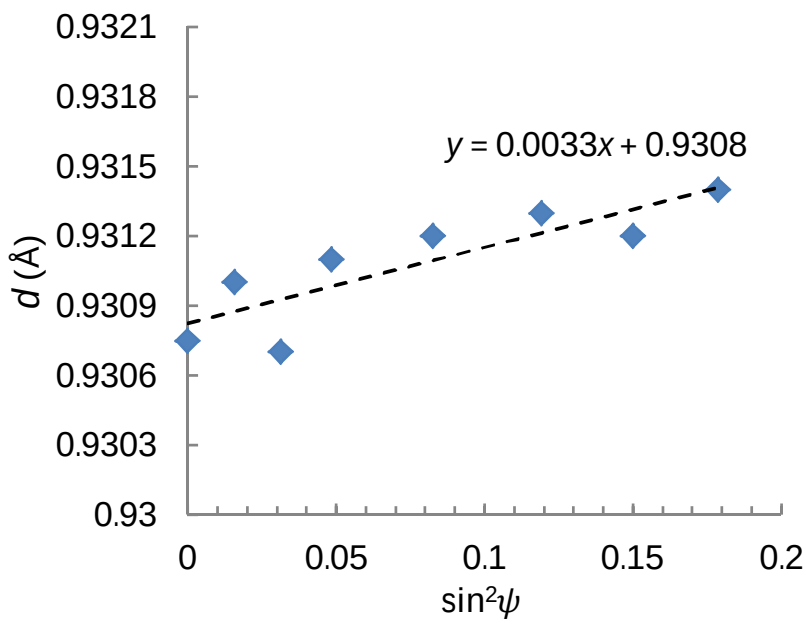
1- Resolution



شکل 14 آنالیز پراش برای انتخاب پیک پراش مناسب

جدول 6 نتایج پراش برای نقطه واقع روی خط جوش

شماره شیب	ψ (درجه)	$\sin^2\psi$	2θ (درجه)	d (آنگستروم)
1	0	0	111/893	0/9308
2	7/2	0/015708	111/875	0/9310
3	10/2	0/031359	111/839	0/9307
4	12/7	0/048332	111/875	0/9311
5	16/7	0/082576	111/839	0/9312
6	20/2	0/119231	111/875	0/9313
7	22/8	0/150168	111/831	0/9312
8	25	0/178606	111/766	0/9314



شکل 15 نمودار d-$\sin^2\psi$ برای نقطه واقع روی خط جوش

جدول 7 نقاط اعتبارسنجی و تنش پسماند اندازه‌گیری شده با هر دو روش مربوطه

فاصله نقطه از مرکز خط جوش (mm)	تنش پسماند طولی حاصل از روش پراش (MPa)	تنش پسماند طولی حاصل از روش التراسونیک (MPa)	اختلاف نتایج (MPa)	درصد اختلاف %
0	187/5	192	4/5	2/4
10	191	174/2	-16/8	8/8
15	110	91	-19	17/2
25	37/8	39/5	2/3	6
40	32	12/4	-19/6	-

HAZ و فلز جوش است، تطابق بسیار خوبی بین نتایج دو روش مشاهده

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.20.2]

می‌شود؛ بزرگی بیشترین اختلاف نتایج در این محدوده، 16/8 مگاپاسکال، که نسبت به بزرگی اندازه تنش‌های پسماند مقدار کوچکی است.

در نواحی 10 تا 25 میلی‌متری از خط جوش نیز تطابق نتایج، خوب است و بزرگی بیشترین اختلاف، برابر 19 مگاپاسکال است، ولی در فواصل دورتر از خط جوش مانند نقطه واقع در 40 میلی‌متری از خط جوش که تنش پسماند، مقادیر کوچک‌تری دارد و خطری ایمنی سازه را تهدید نمی‌کند، مقدار اختلاف نتایج مقداری بیشتر شده است و برابر 19/6 مگاپاسکال، که در مقایسه با تنش تسلیم سازه مقدار کوچکی است.

همان‌طور که در شکل 10 مشهود است، در گام‌های 1 میلی‌متری، تنش پسماند طولی جوش‌کاری با روش التراسونیک اندازه‌گیری شده است. از آن‌جا که قطر پراب‌ها 5 میلی‌متر است؛ بنابراین در هر گام، میانگین تنش پسماند، در عرض یک ناحیه 5 میلی‌متری اندازه‌گیری شده است، ولی از آن‌جایی که پهنای پرتو ایکس تابیده‌شده روی سطح نیز همین مقدار است؛ بنابراین مشکلی در اعتبارسنجی و مقایسه نتایج دو روش پراش پرتو ایکس و التراسونیک وجود ندارد.

از دلایل وجود اختلاف بین نتایج دو روش، می‌توان به عوامل زیر اشاره کرد:

- موقعیت‌دهی احتمالی نامناسب گوه التراسونیک به هنگام آزمون نقاط که سبب موازی قرار نگرفتن گوه التراسونیک در راستای خط جوش‌شده و در نتیجه سبب ایجاد مقداری خطا می‌شود.
- اندازه‌گیری‌شدن میانگین تنش پسماند طولی بین دو ترنسدیوسر به دلیل وجود فاصله بین ترانسدیوسرها در طراحی گوه.
- احتمال بروز خطاهای کوچک در طراحی و ساخت گوه و به تبع آن در ایجاد و ارسال موج LCR در قطعه.
- اندازه‌گیری‌شدن میانگین تنش پسماند طولی در عمق قطعه زیرا موج LCR در ضخامت معینی زیر سطح قطعه حرکت می‌کند نه فقط روی خود سطح.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند طولی ناشی از جوش‌کاری بررسی شد. بدین‌منظور دو ورق از جنس آلومینیوم سری 5000 با روش جوش‌کاری تیگ به‌هم متصل شدند. سپس در یک مقطع معین از سطح قطعه، تنش پسماند طولی با روش التراسونیک اندازه‌گیری شد. درنهایت برای اعتبارسنجی نتایج روش التراسونیک، در 5 نقطه از مقطع مورد بررسی، تنش پسماند طولی با روش پراش پرتو ایکس اندازه‌گیری شد و با نتایج روش التراسونیک مقایسه که نتایج زیر حاصل شد:

- روش التراسونیک قادر به پیش‌بینی پروفیل و شکل نمودار تنش پسماند طولی است.
- روش التراسونیک قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند طولی ناشی از جوش‌کاری را در قطعات از جنس آلیاژ آلومینیوم سری 5000 دارد به‌طوری که میزان تطابق دو روش التراسونیک و پراش پرتو ایکس، بسته به حساسیت منطقه مورد بررسی به شرح زیر است:

1. بهترین تطابق نتایج روش التراسونیک و پراش پرتو ایکس در ناحیه حساس و پرتنش جوش و نواحی نزدیک به آن است که بزرگی بیشترین اختلاف نتایج در این محدوده، 16/8 مگاپاسکال که نسبت به بزرگی اندازه تنش‌های پسماند و تنش تسلیم فلز پایه، مقدار کوچکی است.
2. در مناطق دورتر از خط جوش هم که مقدار تنش‌های پسماند کمتر و در حد ایمن قرار دارد، تطابق خوبی مشاهده شد به‌طوری که بزرگی بیشترین اختلاف نتایج در این محدوده، 19/6 مگاپاسکال که در مقایسه با تنش تسلیم سازه مقدار کوچکی است.

- محاسبه ضریب آکستوالاستیک برای هر سه ناحیه جوش‌کاری شامل فلز جوش، HAZ و فلز پایه به‌صورت جداگانه، دقت نتایج تنش پسماند به‌دست‌آمده از روش التراسونیک را افزایش می‌دهد.

5- مراجع

[1] Y. Javadi, M. Akhlaghi, and M. A. Najafabadi, "Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates", *Materials & Design,* vol. 45, pp. 628-642, 2013.

[2] F. D. Murnaghan, "Finite deformations of an elastic solid", *American Journal of Mathematics,* pp. 235-260, 1937.

[3] D. S. Hughes and J. Kelly, "Second-order elastic deformation of solids, Physical Review", vol. 92, p. 1145, 1953.

[4] D. Crecraft, "The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves", *Journal of Sound and Vibration,* vol. 5, pp. 173-192, 1967.

[5] D. Egle and D. Bray, "Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel", *The journal of the Acoustical Society of America,* vol. 60, pp. 741-744, 1976.

[6] D. M. Egle and D. Bray, Nondestructive Measurement of Longitudinal Rail Stresses: Application of the Acoustoelastic Effect to Rail Stress Measurement, 1978.

[7] D. Egle, "Application Of The Acoustoelastic Effect To Rail Stress Measurement, in Ultrasonic Materials Characterization", Proceedings of the First International Symposium on Ultrasonic Materials Characterization Held at the National Bureau of Standards, Gaithersburg, Md., June 7-9, 1978, 1980, p. 213.

[8] T. Leon-Salamanca, "Ultrasonic measurement of residual stress in steels using critically refracted longitudinal waves (LCR)", Texas A & M University, 1988.

[9] T. Leon-Salamanca and D. Bray, "Residual stress measurement in steel plates and welds using critically refracted longitudinal (LCR) waves", *Journal of Research in Nondestructive Evaluation,* vol. 7, pp. 169-184, 1996.

[10] H. Lu, X. Liu, J. Yang, S. Zhang, and H. Fang, "Ultrasonic stress evaluation on welded plates with LCR wave", *Science and Technology of Welding & Joining,* vol. 13, pp. 70-74, 2008.

[11] S. Gachi, F. Boubenider, and F. Belahcene, "Residual stress, microstructure and microhardness measurements in AA7075-T6 FSW welded sheets, "*Nondestructive Testing and Evaluation,* vol. 26, pp. 1-11, 2011.

[12] Y. Javadi, "*Residual Stress Evaluation through Thickness of an Austenitic Stainless Steel Welded Joint by using Ultrasonic Technique*", PhD Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, 2012. (In Persion)

[13] Y. Javadi, H. S. Pirzaman, M. H. Raeisi, and M. A. Najafabadi, "Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual stresses through thickness", *Materials & Design,* vol. 49, pp. 591-601, 2013.

[14] DIN EN 15305, EUROPEAN STANDARD, Non-destructive testing-Test method for residual stress analysis by X-ray diffraction, 2009.

[15] AWS Standard D1.6/D1.6M, American Welding Society, Structural Welding Code-Aluminum, An American National Standard, 2003.

[16] M. Eftekhary, "*Simulation of longitudinal residual stress in welded austenitic stainless steel plates and evaluation with x-ray diffraction and ultrasonic methods*", MSc Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, 2014. (In Persion)

[17] D. Egle and D. Bray, "Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel", *The journal of the Acoustical Society of America,* vol. 60, pp. 741-744, 1976.

[18] S. Sadeghi, M. A. Najafabadi, Y. Javadi, and M. Mohammadisefat, "Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates", *Materials & Design,* vol. 52, pp. 870-880, 2013.

[19] D. J. Minicuci, A. A. dos Santos Junior, M. H. Andrino, and F. de Carvalho Santos, "Stress evaluation of railroad forged wheels by ultrasonic testing", *Journal of Testing and Evaluation,* vol. 35, p. 66, 2007.

[20] Ueda, Yukio, Hidekazu Murakawa, and Ninshu Ma. "Welding deformation and residual stress prevention". Elsevier, p. 7, 2012.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.20.2]

[21] Adachi, Tomohiko, et al, "Measurement of microscopic stress distribution of multilayered composite by X-ray stress analysis", *Materials Letters* 57.20, 3057-3062, 2003.
[22] V. Hauk, "Structural and residual stress analysis by nondestructive methods: Evaluation-Application-Assessment", *Elsevier*, 1997.
[23] M. E. Hilly, "Residual stress measurement by X-ray diffraction", *SAE J784a, Society of Automotive Engineers,* Warrendale, PA, pp. 19, 1971.
[24] V. Pecharsky and P. Zavalij,"Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials", *Springer*, 2008.
[25] M. Fitzpatrick, A. Fry, P. Holdway, F. Kandil, J. Shackleton, and L. Suominen, "Determination of residual stresses by X-ray diffraction", p. 45, 2005.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.20.2]