

بررسی تاثیر ریزساختار بر تعیین ضرایب آکوستوالاستیک در جوشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی

ایمان رحیمی¹، شایان نژادشامسی²، فرزاد قسیم اکبری³، مهدی احمدی نجف آبادی^{4*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 2- کارشناسی ارشد، مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران، تهران
 3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 * تهران، صندوق پستی 4413-1587 ahmadin@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 24 بهمن 1394
 پذیرش: 22 فروردین 1395
 ارائه در سایت: 25 اردیبهشت 1395
 کلید واژگان:
 ضریب آکوستوالاستیک
 منطقه متاثر از حرارت
 فولاد زنگ نزن آستنیتی
 امواج L_{CR}
 کرنش سنجی سوراخ

چکیده

اندازه گیری تنش پسماند برای قطعات در حال کار یک مجموعه با روش های مخرب عملاً غیرممکن است. لذا در این موارد استفاده از روش های غیرمخرب مانند روش موج فراصوتی از اهمیت به سزایی برخوردار است. یکی از مشکلات موجود در زمینه اندازه گیری غیر مخرب تنش پسماند به روش امواج فراصوتی، تعیین ضرایب آکوستوالاستیک ماده می باشد. در واقع برای تبدیل داده های به دست آمده از اندازه گیری به روش امواج فراصوتی، می بایست این ضرایب به دقت تعیین شوند. اما به دلیل مشکلاتی مانند زاویه دار بودن منطقه متاثر از حرارت به دلیل پخش جوشکاری و ضخامت کم این منطقه تعیین ضرایب این منطقه به صورت دقیق انجام نمی شود. در این پژوهش برای تعیین ضریب آکوستوالاستیک منطقه متاثر از حرارت (HAZ) شبیه سازی عملی انجام گرفت. شبیه سازی به این صورت انجام گرفت که منطقه متاثر از حرارت به چهار قسمت تقسیم شد و سپس با انجام چرخه های مختلف عملیات حرارتی بر روی نمونه های استاندارد تست کشش، این منطقه به صورت چهار قسمت مجزا شبیه سازی شد. از این ضریب در تعیین تنش پسماند نمونه های جوشکاری شده فولاد زنگ نزن آستنیتی با استفاده از امواج فراصوتی L_{CR} استفاده شد و سپس داده های به دست آمده با روش کرنش سنجی سوراخ مقایسه گردید. با مقایسه تنش های به دست آمده از روش شبیه سازی عملی HAZ و روش های پیشین محاسبه ی ضریب آکوستوالاستیک و مقایسه با روش کرنش سنجی سوراخ، مشاهده شد که این روش موجب بهبود دقت اندازه گیری تنش پسماند در نمونه های جوشی شده است.

An investigation of the effect of microstructure on determination of acoustoelastic constants in austenitic stainless steel welding

Iman Rahimi¹, Shayan Nejadshamsi¹, Farzam Ghasimakbari², Mehdi Ahmadinajafabadi^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran
 2- Department of Metallurgy and Material Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
 * P.O.B. 4413-1587, Tehran, Iran, ahmadin@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 13 February 2016
 Accepted 10 April 2016
 Available Online 14 May 2016

Keywords:
 Acoustoelastic Coefficient
 HAZ
 Austenitic Stainless Steel
 L_{CR} Waves
 Hole-Drilling Strain-Gage

ABSTRACT

Residual stress measurement of in-service parts of a system is practically impossible by means of destructive methods. Therefore, the use of ultrasonic method as a non-destructive method has an important role. One of the problems in non-destructive measurement of residual stresses by means of ultrasonic waves is determination of acoustoelastic constants. In fact, for conversion of ultrasonic method data to stress state, it is necessary that these coefficients be determined very precisely. But for reasons like HAZ inclination and small width of this zone, determination of coefficient of this zone does not perform accurately. In this study, the practical simulation is performed for determination of acoustoelastic coefficient of HAZ. For this simulation, the heat affected zone is divided to four separate zones and then the microstructure of those four zones has been simulated on standard tensile test specimen by different heat treatment cycles. This coefficient has been used in evaluation of welding residual stresses of austenitic stainless steel by L_{CR} Ultrasonic waves and the results compared with the hole-drilling strain-gage method. By comparison of stress values achieved by HAZ simulation method, the conventional method and hole-drilling strain-gage method, it is seen that the HAZ simulation method causes an improvement in welding residual stress measurement accuracy.

1- مقدمه

به سزایی را ایفا می کنند. در میان فرآیندهای ساخت، جوشکاری از جمله فرآیندهای پرکاربرد و گسترده می باشد که در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار می گیرد، اما با این وجود اتصالات جوش دارای مزایا و محدودیت هایی است که در هنگام طراحی باید آنها را مورد توجه قرار داد. به طور کلی مزیت-

اطمینان حاصل نمودن از صحت فرآیندهای ساخت در پروژه های مهندسی دارای گستره ی وسیعی می باشد و در این زمینه آزمون های غیر مخرب¹ نقش

¹ Nondestructive Tests

گردید. جوادی و همکاران [13] به ارزیابی تنش‌های پسماند در نمونه‌های دارای اتصال جوشی از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی به کمک امواج LCR با هر دو روش تماسی¹³ و غوطه‌وری¹⁴ پرداختند. در پژوهشی دیگر از این نویسنده، مخزنی از جنس فولاد زنگ‌نزن¹⁵ (304L) به روش جوشکاری تیگ¹⁶ ساخته شد و تنش‌های پسماند محیطی و محوری ناشی از جوش مرکزی به روش امواج فراصوتی اندازه‌گیری شد و نتایج آن با روش کرنش-سنجی سوراخ¹⁷ اعتبارسنجی گردید و مطابقت خوبی بین نتایج این دو روش گزارش شد [14]. در راستای ادامه این مطالعات از همین نویسنده در مقاله ای دیگر، به اندازه‌گیری تنش پسماند و مقایسه نتایج با روش المان محدود پرداخته شد. برای محاسبه ضریب آکوستوالاستیک منطقه متأثر از حرارت (HAZ)¹⁸، 12 نمونه جهت متالوگرافی¹⁹ آماده شد که هر یک از آن‌ها دمای آنیل، مدت زمان آنیل، نرخ خنک شدن و محیط خنک شدن متفاوتی را تجربه کرده‌اند. از بین این 12 نمونه، بهترین نمونه که با منطقه متأثر از حرارت تطابق بیشتری از نظر اندازه دانه داشت، برای شبیه‌سازی این منطقه مورد استفاده قرار گرفت [15].

با وجود این که نظریه آکوستوالاستیک و اندازه‌گیری تنش به روش LCR، به عنوان یک روش شناخته شده در تست‌های غیر مخرب است، اما همچنان در زمینه‌ی تاثیر ساختار و اندازه دانه بر روی ضریب آکوستوالاستیک منطقه متأثر از حرارت، فضای مناسبی برای تحقیق و پژوهش مهیا است. اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک منطقه‌ی متأثر از حرارت به علت داشتن عرض کم و همچنین ساختار غیریکنواخت همواره با مشکل روبرو بوده است. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی منطقه متأثر از حرارت با استفاده از چرخه‌های مناسب عملیات حرارتی ابتدا ساختار این منطقه بر روی چهار نمونه‌ی استاندارد کشش به صورت سعی و خطا شبیه‌سازی شد و سپس با استفاده از ضریب به‌دست آمده از این روش، تنش پسماند موجود در ورق‌های با جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی²⁰ به روش LCR محاسبه گردید. در پژوهش‌های پیشین انجام شده برای اندازه‌گیری این ضریب، صرفاً شبیه‌سازی بر روی یک نمونه به صورت کلی انجام گردیده و یا با استفاده از روش سنتی به‌دست آوردن ضریب آکوستوالاستیک (محاسبه ضریب آکوستوالاستیک منطقه متأثر از حرارت به صورت ضریبی از ضریب آکوستوالاستیک فلز پایه) محاسبه شده است. همچنین نتایج به‌دست آمده از این روش با نتایج به‌دست آمده از روش سنتی محاسبه ضریب آکوستوالاستیک مقایسه شد. همچنین برای صحت‌سنجی نتایج این آزمون، از روش کرنش سنجی سوراخ برای اندازه‌گیری تنش پسماند ورق‌های جوشی در عمق 2 mm از سطح ورق استفاده گردید. مقایسه‌ی بین نتایج نشان داد که روش ارائه شده برای تعیین ضریب آکوستوالاستیک منطقه متأثر از حرارت، خطای ناشی از اندازه‌گیری تنش پسماند را به طور قابل توجهی کاهش داده است.

2- نظر به آکوستوالاستیک

ارزیابی تنش پسماند با استفاده از روش امواج فراصوتی بر مبنای رابطه‌ی خطی میان تنش و مدت زمان حرکت موج است که به آن اثر آکوستوالاستیک می‌گویند [16, 17]. این اثر سرعت موج فراصوتی را با توجه

های یک اتصال جوشی را می‌توان آب بندی کامل، استحکام استاتیکی¹ بالا (در حد استحکام فلز پایه و یا بالاتر از آن)، وزن پایین و زمان تولید کوتاه عنوان کرد. با این وجود، این اتصال باعث به وجود آمدن عیوب متالورژیکی و مکانیکی مانند ترک، تنش‌های پسماند² و تغییر شکل‌های جوشی در قطعات و اتصالات نیز می‌گردد که تاثیر منفی بر عملکرد سازه و ضریب اطمینان آن می‌گذارد. هر یک از عیوب گفته شده باعث کاهش خواص مکانیکی اتصال جوش و همچنین باعث عدم کارایی مناسب اتصال جوشی می‌شوند. بنا بر آن چه گفته شد لزوماً یک اتصال جوشی صد در صد طبق آنچه طراحی شده است، رفتار نخواهد کرد. از این رو حصول اطمینان از انجام صحیح این فرآیند در ساخت سازه‌های مهندسی دارای اهمیت بالایی می‌باشد.

یکی از پرکاربردترین روش‌های آزمون غیرمخرب برای اندازه‌گیری تنش پسماند، روش موج فراصوتی³ است که از موج LCR⁴ استفاده می‌کند. این روش بر اساس رابطه‌ی خطی بین سرعت موج فراصوتی و تنش پسماند می‌باشد. این رابطه در محدوده کشسانی⁵، اثر آکوستوالاستیک⁶ نام دارد که نشان می‌دهد زمان پرواز⁷ امواج فراصوتی به طور خطی با تنش تغییر می‌کند [1]. این روش، دستیابی به اندازه‌گیری زمان ورود تا دقت 1 ns را اقتضا می‌کند. همچنین پیچیدگی‌های هندسی قطعات، کاربرد موج LCR را برای اندازه‌گیری تنش محدود می‌کند [2]. علی‌رغم مزایای این روش، باید به اثر پارامترهای مختلف بر این روش از قبیل اثر ریزساختار (اندازه دانه⁸ [4,3]، بافت⁹ [6,5]، ساختار [7]) و شرایط محیطی (دما [9,8] و غیره) توجه داشت.

کوزام و همکاران [10] در تحقیقات خود نشان دادند که ساختار بر روی ثابت آکوستوالاستیک¹⁰ (L) و همچنین بر روی زمان پرواز در حالت بدون تنش (t_0) موثر است و لذا اندازه‌گیری تنش پسماند با روش امواج فراصوتی نیازمند تفکیک اثر آکوستوالاستیک و ساختار است. در حوزه اندازه‌گیری تنش پسماند جوشی به روش امواج فراصوتی، پژوهش‌هایی در داخل کشور انجام شده است که در ادامه آورده می‌شود. آذری و همکاران [11] با استفاده از امواج فراصوتی عرضی، تنش پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری لب به لب دو ورق غیرهم‌جنس (فولاد کربنی و فولاد زنگ نزن) را بررسی و اعلام نمودند که با استفاده از روش غیرمخرب موج فراصوتی می‌توان تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری را به صورت کیفی برآورد کرد. همچنین نشان داده شد که مقادیر برآورد شده با روش موج فراصوتی برای ورق از جنس فولاد زنگ‌نزن به نسبت فولاد کربنی مطابقت بهتری با نتایج مدل-سازی به روش المان محدود¹¹ دارد که تغییرات فازی¹² در آن اعمال نشده است. زیرا اثر تغییرات فازی بر تنش‌های پسماند جوشی فولادهای کربنی بسیار بیشتر است، به گونه‌ای که صرف‌نظر کردن از آن در شبیه‌سازی المان محدود منجر به خطای بیشتری در قیاس با فولاد زنگ‌نزن می‌شود. صادقی و همکاران [12]، به بررسی تغییرات تنش‌های پسماند طولی جوش در راستای ضخامت ورق از جنس آلومینیوم به کمک امواج طولی فراصوتی پرداخته‌اند. همچنین نتایج اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به این روش با نتایج حل عددی المان محدود جوش، مقایسه شدند و تطابق قابل قبولی بین این دو مشاهده

¹ Static Strength

² Residual Stress

³ Ultrasonic waves

⁴ Longitudinal Critically Refracted (LCR)

⁵ Elastic

⁶ Accoustoelastic Effect

⁷ Time of Flight (TOF)

⁸ Grain Size

⁹ Texture

¹⁰ Accoustoelastic Coefficient

¹¹ Finite Element Method

¹² Phase Change

¹³ Contact

¹⁴ Immersion

¹⁵ Stainless Steel

¹⁶ TIG (Tungsten Inert Gas)

¹⁷ Hole-Drilling Strain-Gage Method

¹⁸ Heat Affected Zone (HAZ)

¹⁹ Metallography

²⁰ Austenitic Stainless Steel

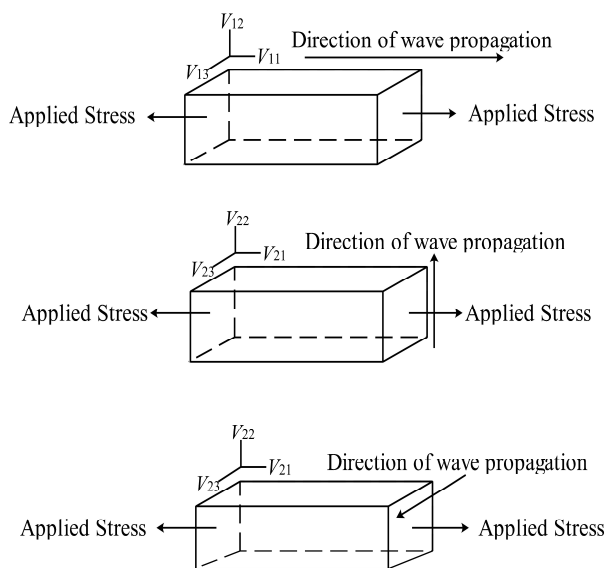


Fig. 1 The velocity of plane waves and stress field in perpendicular directions [19]

شکل 1 سرعت امواج صفحه ای و میدان تنش در جهات عمود بر هم [19]

3- روش تحقیق

3-1- مواد و آماده سازی نمونه ها

برای ساخت نمونه ها و عملیات جوشکاری، از فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L به عنوان یک ماده متشکل از کروم و نیکل که ترکیب مناسبی برای بهبود مقاومت به خوردگی، استحکام و چقرمگی دارد، استفاده شده است. کربن بسیار کم این فولاد باعث کاهش چشمگیر رسوب کاربیدها در حین جوشکاری می شود. این ویژگی ها سبب می شود تا این ماده به عنوان یکی از فولادهای پرکاربرد برای مصارف صنعتی به کار گرفته شود.

دو ورق نورد شده با ضخامت 6 mm به صورت لب به لب و بدون پیچ توسط یک پاس جوشکاری زیرپودری⁴ به هم متصل شدند. مشخصات این جوشکاری در جدول 1 آورده شده است. همچنین از یک ورق به ضخامت 10 mm به عنوان پشت بند جوش استفاده شد. علت عدم استفاده از پیچ زاویه دار و همچنین به کارگیری ورق پشت بند برای جوشکاری، حذف خطای پوشش دهی موج در راستای ضخامت ورق در ناحیه ای متاثر از حرارت جوش می باشد که با تبدیل ناحیه ای متاثر از حرارت به ناحیه ای موازی با مرز فلز جوش، این خطا از محاسبات اندازه گیری تنش حذف گردید. ورق های جوشکاری شده توسط عملیات حرارتی مناسب تنش گیری شدند (به مدت 2 ساعت در دمای 450 °C در کوره نگهداری گردید و سپس در هوای آرام اتاق خنک شد). این عملیات حرارتی تأثیری بر روی ریزساختار فلز پایه و فلز جوش ندارد [20]. به منظور شبیه سازی چرخه عملیات حرارتی طی شده در منطقه متاثر از حرارت، پنج نمونه استاندارد تست کشش بر اساس استاندارد ASTM E8 ساخته شد (شکل 2).

3-2- شبیه سازی ریزساختار منطقه متاثر از حرارت

فرآیند جوشکاری به علت تغییر دما، باعث تغییرات ریزساختار در فلز پایه و فلز جوش می شود. بدین منظور، برای کاهش خطای اندازه گیری ثابت آکوستوالاستیک از فولاد زنگ نزن آستنیتی استفاده شده است که دچار

به حالت کرنش ماده تغییر می دهد. نظریه آکوستوالاستیک توسط هیوگس و کلی معرفی شد [18]. با لحاظ کردن تعاریف و فرض های لازم برای یک ماده همگن¹، همسانگرد² و کشسان، رابطه ای سرعت موج فراصوتی برای یک جسم تحت تنش توسط هیوگس و کلی به دست آمد. روابط (1) تا (3) برای جسمی معتبر است که تحت یک کرنش همگن سه جهته باشد:

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \quad (1)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \quad (2)$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \quad (3)$$

که در آن

ρ_0 : چگالی اولیه

V_{11}, V_{12}, V_{13} : سرعت موج در جهت 1 و جابجایی در جهت های 1، 2 و 3

λ, μ : ثابت های الاستیک مرتبه ی دوم

l, m, n : ثابت های مرتبه ی سوم مورناگان³

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: مولفه های کرنش همگن سه جهته در راستای 1، 2 و 3.

$$\theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad (4)$$

برای حالت تنش تک محوره، 5 سرعت را می توان از روابط (1-3) به دست آورد. برای این منظور تنش در جهت 1، همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، در نظر گرفته شد. سپس کرنش ها به صورت زیر خواهند بود:

$$\alpha_2 = \alpha_3 = -v\varepsilon, \quad \alpha_1 = \varepsilon \quad (5)$$

که در آن ε کرنش در جهت 1 و v برابر ضریب پواسون است. روابط (1) تا (3) به صورت زیر نوشته می شود:

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + [4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + v\mu(1 + \frac{2l}{\lambda})]\varepsilon \quad (6)$$

اگر تغییرات سرعت نسبی موج با کرنش محوری کوچک باشد، آنگاه می توان آن را به صورت رابطه ی (7) نشان داد:

$$\frac{dV_{11}}{V_{11}} = 2 + \frac{(\mu + 2m) + v\mu(1 + \frac{2l}{\lambda})}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \quad (7)$$

در رابطه ی بالا، L_{11} برابر ثابت بی بعد آکوستوالاستیک برای امواج LCR است. بزرگترین تغییر در سرعت نسبی مربوط به انتشار طولی موج موازی با تنش اعمال شده است (V_{11})، که توسط ضریب L_{11} کنترل می شود. این رابطه نشان می دهد که این امواج بهترین کاندید برای اندازه گیری تنش می باشند که یکی از دلایل استفاده از امواج LCR می باشد. برای به دست آوردن رابطه ی میان تغییرات تنش و زمان پرواز می توان رابطه ی (7) را به صورت رابطه ی (8) بازنویسی کرد، که در آن t_0 زمان پرواز موج در ماده بدون تنش است.

$$d\sigma = \frac{E \left(\frac{dV_{11}}{V_{11}}\right)}{L_{11}} = \frac{E}{L_{11}t_0} dt \quad (8)$$

در رابطه ی (8)، $d\sigma$ تغییرات تنش (MPa) و E مدول کشسانی (MPa) است. همچنین $dt = t - t_0$ تغییرات زمان پرواز در اثر تغییرات تنش است. در رابطه ی (8) زمان پرواز اندازه گیری شده شامل ترکیبی از اثرها از قبیل تنش پسماند (Δt_{RS})، ریزساختار (Δt_{TX})، دما (Δt_T) و نیروی اعمالی (Δt_F) می باشد [17].

$$t = t_0 + \Delta t_{RS} + \Delta t_{TX} + \Delta t_T + \Delta t_F \quad (9)$$

در میان اثرات ریزساختار بر روی زمان پرواز، میانگین اندازه دانه نقش مهمی در محاسبه ی ثابت آکوستوالاستیک در منطقه متاثر از حرارت به خصوص در فولادهای زنگ نزن آستنیتی دارد. دلیل این اثر را می توان به ساختار ناهمگن منطقه متاثر از حرارت مربوط دانست.

¹ Homogenous

² Isotropic

³ Murnaghan

⁴ Submerged Arc Welding (SAW)

بعد از ناحیه‌بندی مورد نظر، عملیات‌های حرارتی متفاوتی بر روی نمونه‌های فولاد زنگ نزن آستنیتی صورت گرفت تا در آخر ریزساختار این چهار ناحیه بر روی نمونه‌های استاندارد کشش شبیه‌سازی گردد. ناحیه 4، نزدیک‌ترین ناحیه به فلز جوش است که دارای افزایش اندازه دانه‌ی بیشتری نسبت به دیگر ناحیه‌هاست (شکل 4). برای شبیه‌سازی ریزساختار این ناحیه، باید دمای 1100 درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه‌ها به مدت 120 دقیقه اعمال شده و سپس در هوای بدون جریان به آرامی خنک شود. برای شبیه‌سازی ناحیه‌ی 1، که نزدیک‌ترین ناحیه به فلز پایه است و به همین دلیل نسبت به مناطق دیگر کمترین رشد در اندازه دانه را دارد، دمای 1000 درجه سانتی‌گراد به مدت 45 دقیقه اعمال گردید و سپس در هوای بدون جریان به آرامی خنک شد. به همین ترتیب نیز دو ناحیه‌ی دیگر در محدوده‌ی دمایی 1000 تا 1100 درجه سانتی‌گراد در کوره قرار گرفته و ریزساختار مورد نظر شبیه‌سازی شد. تحلیل متالوگرافی نمونه‌های شبیه‌سازی شده نشان داد که تطابق مناسبی میان اندازه دانه نمونه‌های شبیه‌سازی شده و نمونه اصلی وجود دارد. نتایج مرتبط با محاسبه‌ی اندازه دانه نمونه‌ها در جدول 2 آمده است.

3-3- محاسبه‌ی ثابت آکوستوالاستیک

به منظور محاسبه‌ی ثابت آکوستوالاستیک فلز جوش و فلز پایه، نمونه‌های استاندارد کشش به صورت موازی با خط جوش برش داده شده‌اند تا از اثر بافت بر روی اندازه‌گیری زمان پرواز جلوگیری شود.

همچنین برای ضرایب آکوستوالاستیک منطقه متاثر از حرارت، چهار نمونه استاندارد در نظر گرفته شد. هر یک از این مناطق که بر روی یک نمونه استاندارد شبیه‌سازی شده بود، برای محاسبه‌ی ثابت آکوستوالاستیک در دستگاه آزمون کشش قرار گرفت. برای این منظور، یک دستگاه کشش زویک² با ظرفیت 30 ton و قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری 0.1-500 mm/min مورد استفاده قرار گرفت. برای ارسال و دریافت موج از دستگاه اپ تل³ با نرخ داده-برداری 100MHz استفاده شد و یک ترانسدوسر⁴ فرستنده و دو ترانسدوسر گیرنده با قطر 6 mm در یک گوه⁵ نگه‌دارنده از جنس پلکسی گلس⁶ در یک زاویه معین برای ایجاد موج Lcr ثابت شدند (شکل 5).

همچنین پارامتر t_0 نیز در حالت بدون تنش برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه شد. با توجه به رابطه‌ی (10) و به دست آوردن زمان پرواز موج و نیروی اعمال شده بر نمونه استاندارد به طور هم‌زمان، ضریب آکوستوالاستیک (L) محاسبه شد.

$$\Delta\sigma = \frac{E(t - t_0)}{L t_0} \quad (10)$$

t_0 و t زمان پرواز موج اندازه‌گیری شده در نمونه استاندارد کشش برای حالت تحت تنش و بدون تنش است. تنش اعمال شده به نمونه‌ها تا 80% حد تسلیم⁷ فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L می‌باشد

3-4- محاسبه‌ی تنش پسماند

از آنجایی که عمق اندازه‌گیری در فرکانس 1 MHz برابر 5mm می‌باشد [21]، روش اندازه‌گیری تنش به کمک امواج فراصوتی می‌تواند تنش‌های پسماند زیر سطح را نیز اندازه‌گیری کند. اندازه‌گیری زمان پرواز موج در ناحیه‌ی نفوذ جوش در هر 2.5 mm و بر روی فلز پایه در هر 5 mm به موازات

تغییرات فازی قابل توجه در حین عملیات جوشکاری نمی‌شود. اندازه دانه فاز آستنیت فولاد، برای اندازه‌گیری دقیق‌تر ثابت آکوستوالاستیک به عنوان یکی از عوامل موثر در زمان پرواز موج، می‌بایست در محاسبات مد نظر قرار گرفته شود. منطقه‌ی متاثر از حرارت به دلیل داشتن عرض کم (در حدود 2-6 mm) برای اندازه‌گیری ثابت آکوستوالاستیک محدودیت ایجاد می‌کند. به همین منظور برای کاهش خطای اندازه‌گیری تنش پسماند با روش Lcr منطقه‌ی متاثر از حرارت نمونه‌ی جوشکاری شده با انجام عملیات حرارتی مختلف به روش سعی و خطا، شبیه‌سازی شد. این شبیه‌سازی بدین صورت انجام پذیرفت که ابتدا یک نمونه از مقطع جوش ورق جوشکاری شده توسط فرآیند برش جت آب¹ بریده شد و سپس میانگین اندازه دانه منطقه متاثر از حرارت با روش‌های متالوگرافی اندازه‌گیری شد (شکل 3). در مرحله‌ی بعد برای شبیه‌سازی این ناحیه و افزایش دقت اندازه‌گیری، این منطقه مطابق شکل 3 به چهار ناحیه تقسیم‌بندی شد.

جدول 1 مشخصات جوشکاری

Table 1 Welding Specification

ولتاژ جوشکاری (V)	جریان جوشکاری (A)	سرعت جوشکاری (cm/min)	جنس الکتروود
27	450	60	ER308L

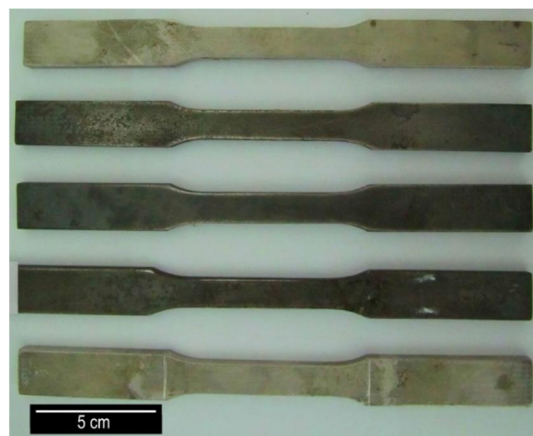


Fig. 2 Standard tensile test specimens

شکل 2 نمونه‌های استاندارد تست کشش

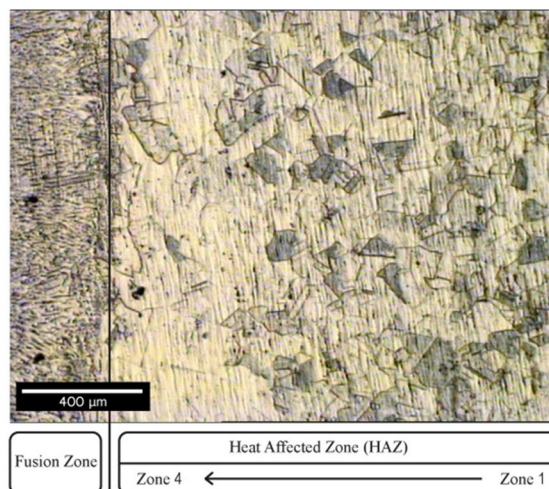


Fig. 3 Microstructure of fusion zone and heat affected zone

شکل 3 ریز ساختار منطقه فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت

¹ Water Jet Cutting

² Zwick
³ OPTEL
⁴ Transducer
⁵ Wedge
⁶ Plexiglas
⁷ Yield Limit

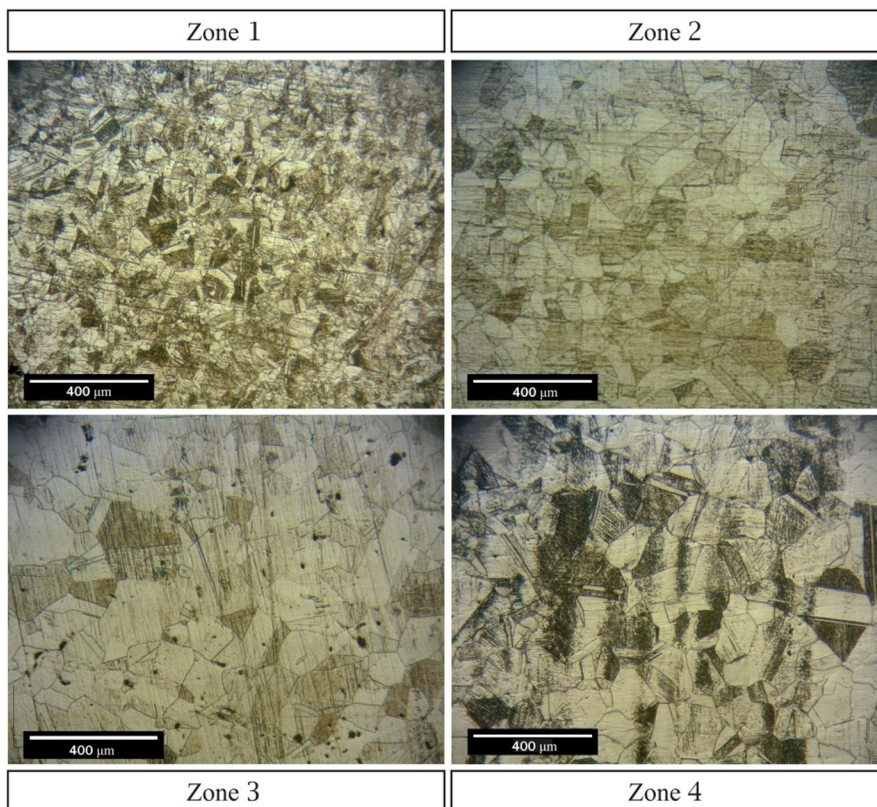


Fig. 4 Microstructure of first to fourth zone of heat affected zone

شکل 4 ریز ساختار مناطق اول تا چهارم منطقه متأثر از حرارت

خط جوش انجام شد.

با استفاده از زمان پرواز موج به دست آمده از آزمون فراصوتی و ضریب آکوستوالاستیک محاسبه شده در مرحله ی قبل، تنش پسماند برای نقاط مختلف در هر قسمت (فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش) توسط رابطه ی (10) محاسبه گردید. به منظور صحت سنجی مقادیر تنش های پسماند به دست آمده از آزمون موج فراصوتی، از روش کرنش سنجی سوراخ به عنوان یک روش نیمه مخرب¹ استفاده شد. در روش کرنش سنجی سوراخ، استرین گیج های با آرایش روزت² در نقاط مختلف فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش چسبانده شد و تنش پسماند موجود در ورق در عمق 2 mm از سطح ورق محاسبه گردید (شکل 6). مقایسه نتایج روش امواج فراصوتی و کرنش سنجی سوراخ نشان می دهد که روش امواج فراصوتی را می توان برای اندازه گیری تنش پسماند به کار برد.

4- بحث و نتایج

4-1- تاثیر ریزساختار بر ضریب آکوستوالاستیک

منحنی های محاسبه ضریب آکوستوالاستیک فلز پایه، فلز جوش و نواحی چهارگانه متأثر از حرارت در فرکانس های مختلف رسم و مقایسه گردید که نمونه این نمودار در شکل 7 برای فرکانس 4MHz نشان داده شده است. میانگین ضریب آکوستوالاستیک در نواحی متأثر از حرارت دارای انحراف از معیار³ $0.04e-5$ می باشد که نشان دهنده ی تکرارپذیری مناسب آزمایش است. با مقایسه ی میان نواحی چهارگانه متأثر از حرارت و همچنین توجه به

جدول 2 میانگین اندازه دانه در نمونه های شبیه سازی ناحیه HAZ

Table 2 Average of grain size in HAZ simulated samples

شماره نمونه	میانگین اندازه دانه به دست آمده (μm)	انحراف از معیار
1	43	12
2	60	13
3	78	14
4	110	20

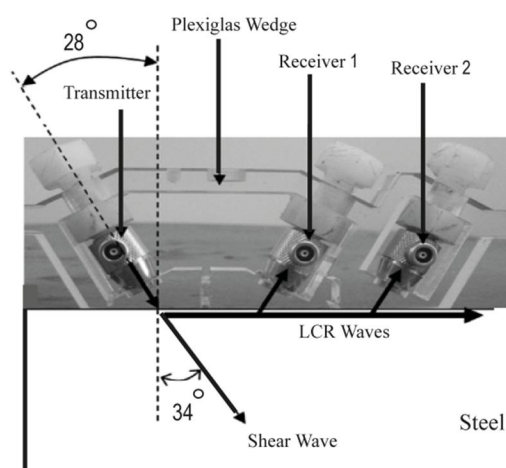


Fig. 5 Plexiglas wedge for LCR waves on steel by the normal transducers with the same frequency.

شکل 5 گوه پلکسی گلس برای امواج LCR روی فولاد توسط تراندوسرهای با فرکانس یکسان

¹ Semi destructive Method

² Strain gage rosette arrangement

³ Standard Deviation

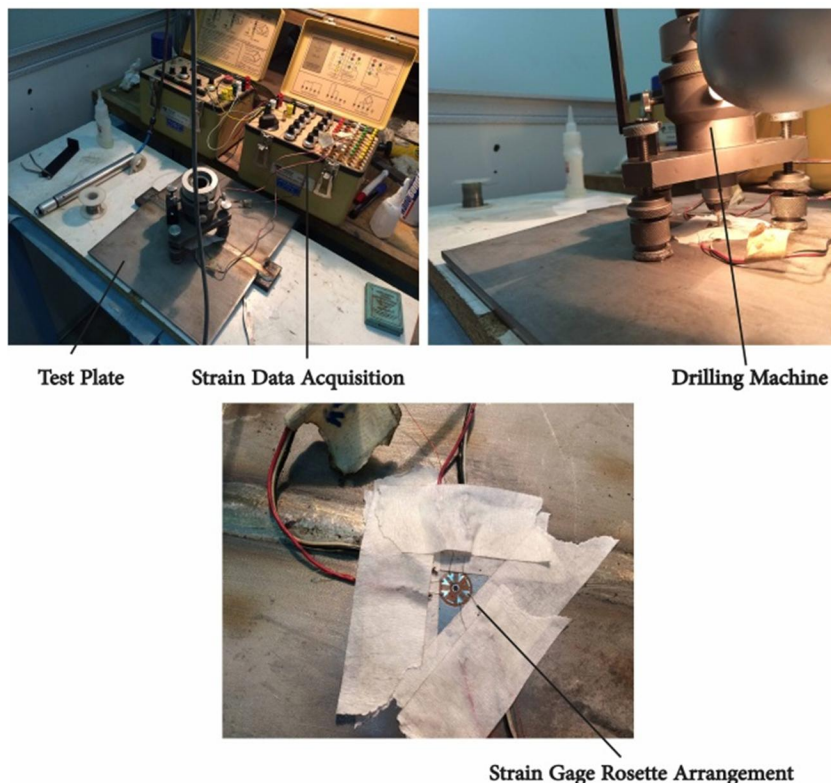


Fig. 6 Measurement of welding residual stress by hole-drilling strain-gage method

شکل 6 اندازه گیری تنش پسماند جوشی به کمک روش کرنش سنجی سوراخ

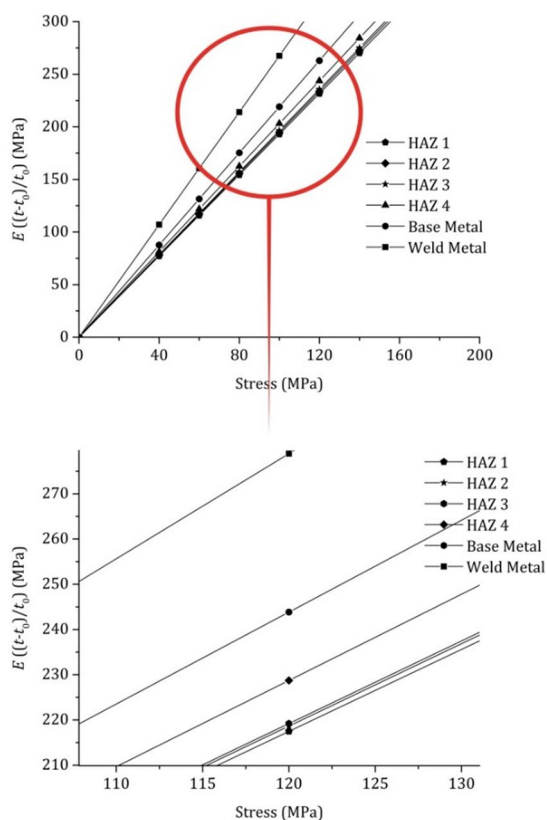


Fig. 7 Time of flight vs. applied stress diagram and determination of acoustoelastic constant in 4 MHz frequency

شکل 7 نمودار زمان پرواز بر حسب تنش اعمالی و محاسبه ضرایب آکوستوالاستیک در فرکانس 4 MHz

میانگین اندازه دانه این مناطق (جدول 2) می توان تاثیر ریزساختار بر ضریب آکوستوالاستیک را مشاهده کرد. با دقت در نمودار شکل 7 مشخص می شود که با افزایش اندازه دانه از ناحیه ی اول تا چهارم، ضریب آکوستوالاستیک (شیب نمودار) نیز افزایش می یابد.

4-2- بررسی تاثیر اندازه دانه بر زمان پرواز موج فراصوتی

تخمین اضافی تنش پسماند در ناحیه متاثر از حرارت را می توان ناشی از توزیع ناهمگن دانه ها که منجر به تغییرات زمان پرواز موج می شود، دانست. اندازه دانه، زمان پرواز t_0 را تحت تاثیر قرار می دهد حتی اگر ماده عاری از هرگونه تنش پسماند باشد. تحلیل های متالوگرافی نمونه ها نشان می دهد که اندازه دانه می تواند یکی از عوامل ایجاد تفاوت در ضریب آکوستوالاستیک در نواحی چهارگانه منطقه متاثر از حرارت شود. به منظور بررسی بیشتر و دقیق تر در مورد تاثیر اندازه دانه بر ضریب آکوستوالاستیک، آزمایشی طراحی و انجام پذیرفت. پنج نمونه که با انجام چرخه های مختلف عملیات حرارتی دچار تغییر اندازه دانه شده اند، در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این آزمایش در شکل 8 قابل مشاهده است. با توجه به شکل 8 مشاهده می شود که با افزایش اندازه دانه زمان پرواز موج نیز افزایش یافته و لذا اندازه ضریب آکوستوالاستیک نیز افزایش خواهد یافت.

4-3- مقایسه ی میان روش های اندازه گیری ضریب آکوستوالاستیک

منطقه متاثر از حرارت

برای اندازه گیری ضریب آکوستوالاستیک ناحیه ی متاثر از حرارت دو روش پیشنهاد شده است. روش سنتی محاسبه ی این ضریب برای منطقه متاثر از حرارت، استفاده از ضریب آکوستوالاستیک فلز پایه است. به همین منظور

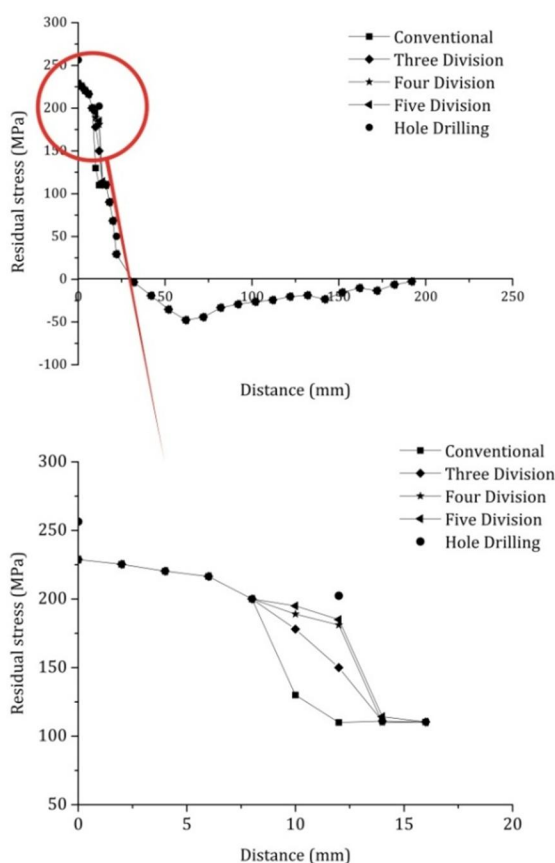


Fig. 9 Comparison between the conventional, coefficient modification and hole-drilling strain gage method for of acoustoelastic coefficient determination

شکل 9 نمودار مقایسه روش سنتی تعیین ضرایب آکوستوالاستیک، روش تصحیح ضرایب و روش کرنش سنجی سوراخ

ضرایب تصحیح شده منطقه متاثر از حرارت کمک گرفته شده است. با استفاده از نمونه‌های کشش استاندارد که برای شبیه‌سازی منطقه متاثر از حرارت تهیه شده بود، ضرایب مربوط به این ناحیه محاسبه شد. با مقایسه‌ی نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند جوشی به‌دست آمده توسط ضرایب آکوستوالاستیک تصحیح شده و همچنین ضرایبی که از روش‌های سنتی به‌دست آمده، تغییر چشمگیری در نتایج تنش پسماند مشاهده شد. استفاده از روش سنتی برای محاسبه‌ی ضرایب آکوستوالاستیک منطقه متاثر از حرارت موجب تخمین نامناسب در اندازه‌گیری تنش پسماند شد که این تخمین نامناسب در مقایسه نتایج اندازه‌گیری تنش با روش کرنش سنجی سوراخ به وضوح قابل مشاهده است (شکل 9). تصحیح ضرایب آکوستوالاستیک منطقه متاثر از حرارت که با شبیه‌سازی عملی این منطقه همراه بود باعث شد که مقدار اختلاف نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند به دو روش کرنش سنجی سوراخ و آزمون امواج فراصوتی در حدود 65 MPa کاهش پیدا کند.

5- نتیجه گیری

هدف انجام این پژوهش بهبود اندازه‌گیری تنش پسماند جوشی با روش امواج فراصوتی L_{CR} است. به دلیل عرض کم ناحیه‌ی متاثر از حرارت جوش، محاسبه‌ی ضرایب آکوستوالاستیک این منطقه همواره با چالش روبرو بوده است. ارتقا و بهبود اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از شبیه‌سازی منطقه

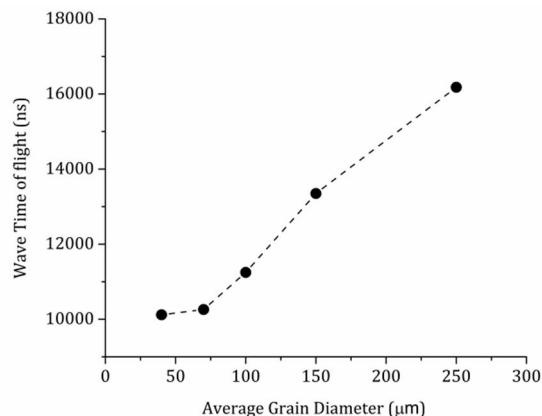


Fig. 8 Effect of grain size on wave time of flight

شکل 8 تاثیر اندازه دانه بر زمان پرواز موج

ابتدا ضرایب آکوستوالاستیک فلز پایه محاسبه و سپس ضرایب آکوستوالاستیک منطقه متاثر از حرارت به عنوان ضرایب ثابتی (حدوداً 0.9) از ضرایب فلز پایه در نظر گرفته شد. روش سنتی به دلیل در نظر نگرفتن تاثیر ریز ساختار بر ضرایب آکوستوالاستیک دارای خطای زیادی است. به دلیل عرض کم منطقه متاثر از حرارت، محاسبه‌ی مستقیم این ضرایب به کمک استخراج نمونه کشش از این منطقه، امکان پذیر نیست و همواره با خطا روبرو است. به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری ضرایب آکوستوالاستیک و در نتیجه افزایش دقت اندازه‌گیری تنش پسماند، منطقه متاثر از حرارت به نواحی جداگانه که هر کدام اندازه دانه متفاوتی داشتند، تقسیم بندی شد. ابتدا نمونه جوش داده شده مقطع زده شد و میانگین اندازه دانه در نواحی مختلف منطقه متاثر از حرارت توسط تحلیل‌های متالوگرافی محاسبه گردید.

برای حصول بهترین شبیه‌سازی، منطقه متاثر از حرارت به سه روش مختلف تقسیم بندی شد. منطقه متاثر از حرارت در مرتبه اول به سه، مرتبه دوم به چهار و برای سومین بار به پنج قسمت مجزا همراه با اندازه دانه‌های متفاوت تقسیم شد و ضرایب آکوستوالاستیک هر قسمت محاسبه گردید. با مقایسه‌ی مقادیر تنش‌های پسماند به‌دست آمده در تقسیم بندی‌های مختلف مشاهده می‌شود که با افزایش نواحی تقسیم‌بندی، ضرایب آکوستوالاستیک و در نتیجه تنش پسماند حاصل شده، به نتایج کرنش سنجی سوراخ نزدیک‌تر می‌شود (شکل 9). با توجه به شکل 9، اختلاف روش سنتی اندازه‌گیری ضرایب آکوستوالاستیک منطقه متاثر از حرارت با روش کرنش سنجی سوراخ در حدود 85 MPa است در حالی که در شبیه‌سازی منطقه متاثر از حرارت به صورت سه، چهار و پنج بخش مجزا اختلاف تنش پسماند به ترتیب به 20، 50 و 15 مگاپاسکال کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی منطقه متاثر از حرارت به چهار بخش مجزا برای محاسبه‌ی تنش پسماند بهینه است.

4-4- نمودار تنش پسماند

در این قسمت به اندازه‌گیری تنش پسماند و رسم نمودار تنش نسبت به خط جوش پرداخته شده است. تنش پسماند در فواصل مختلف از خط جوش در چهار فرکانس مختلف (1، 2، 4 و 5 مگاهرتز) در شکل 10 رسم شده است. با توجه به نمودار مشخص می‌شود که اندازه‌ی تنش پسماند بر روی خط اتصال جوش دارای بیشترین مقدار است و هر چه این فاصله افزایش یابد، حالت تنش پسماند از کششی به فشاری تغییر می‌یابد. در رسم این نمودار از

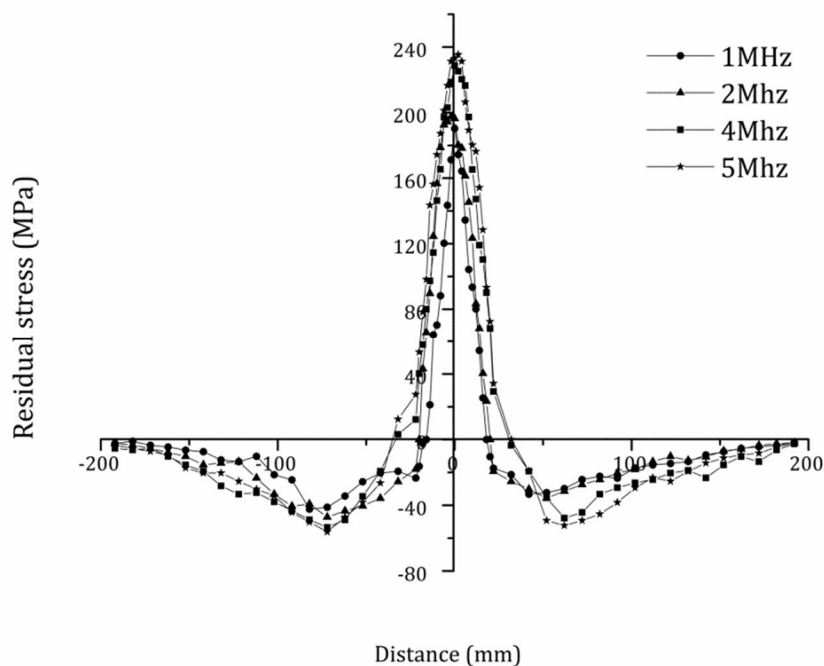


Fig. 10 Residual stress vs. distance from centerline in different frequencies (depths of penetration)

شکل 10 نمودار تنش پسماند بر حسب فاصله از مرکز جوش در کرناس (عمق نفوذ) های مختلف

σ تنش (MPa)

7- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از آزمایشگاه‌های تست غیرمخرب و جوشکاری دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، به خاطر در اختیار قرار دادن تجهیزات این آزمایش، کمال تشکر و قدردانی را نمایند.

8- مراجع

- [1] S. Sadeghi, M. Ahmadinajafabadi, Y. Javadi, M. Mohammadisefat, Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in friction stir welding of aluminum plates, *Materials and Design Journal*, Vol. 52, No. 0, pp. 870-880, 2013.
- [2] S. L. Chu, H. Peukert, E. Schneider, Evaluation of residual stress states in welded parts using ultrasonic techniques, *Nondestructive Test and Evaluation International*, Vol. 28, No. 2, pp. 120-134, 2005.
- [3] N. Grayli, J.C. Shyne, Effect of microstructure and prior austenite grain size on acoustic velocity and attenuation in steel, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 4, No. 0, pp. 927-936, 1985.
- [4] P. Palanchamy, A. Joseph, T. Jayakumar, Ultrasonic velocity measurement for estimation of grain size in austenitic stainless steel, *Nondestructive Test and Evaluation International*, Vol. 3, No. 3, pp. 179-185, 1995.
- [5] MA. Ploix, El. Guerjouma, R. Moysan, J. Corneloup, G. Chassignole, Acoustical characterization of austenitic stainless steel welds for experimental and modelling NDT, *Journal of Advanced Science*, Vol. 17, No. 1, pp. 76-81, 2005.
- [6] M. Spies, E. Schneider, Non-destructive analysis of texture in rolled sheets by ultrasonic techniques, *Texture and Microstructure*, Vol. 12, No. 4, pp. 219-231, 1990.
- [7] C. Hakan Gür, İ. Çam, Comparison of magnetic Barkhausen noise and ultrasonic velocity measurements for microstructure evaluation of SAE 1040 and SAE 4140 steels, *Materials Characterization*, Vol. 58, No. 5, pp. 447-454, 2007.
- [8] H. Mohrbacher, E. Schneider, K. Goebbels, Temperature dependence of third-order elastic constants, *9th International Conference on Experimental Mechanics, Aaby Truk, Copenhagen*, Vol. 3, No. 0, pp. 1189-1197, 1990.

متاثر از حرارت با استفاده از انجام عملیات های حرارتی متفاوت بر روی نمونه‌های استاندارد کشش به صورت سعی و خطا صورت پذیرفت. با انجام این عملیات علاوه بر رفع مشکل عرض کم این محدوده، دقت اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک ناحیه متاثر از حرارت به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. تصحیح ضرایب آکوستوالاستیک موجب کاهش تخمین نامناسب اندازه‌گیری تنش پسماند شده که این روند مثبت را می‌توان با مقایسه نتایج آزمون امواج فراصوتی L_{CR} و کرنش سنجی سوراخ به وضوح مشاهده کرد. با مقایسه نمودارهای ضرایب آکوستوالاستیک برای مناطق متاثر از حرارت مشاهده شد که این مناطق ضرایب متفاوتی با یکدیگر دارند، به طوری که با حرکت از سمت فلز پایه به سمت مناطق نزدیک به فلز جوش این ضریب افزایش می‌یابد. همچنین در این پژوهش نشان داده شد که میانگین اندازه دانه به عنوان یکی از عوامل اصلی ریزساختار مواد، نقش کلیدی بر زمان پرواز موج فراصوتی دارد. این اثر را می‌توان یکی از دلایل تغییر ضریب آکوستوالاستیک در ناحیه‌ی متاثر از حرارت دانست.

6- فهرست علائم

E	مدول کشسانی (MPa)
L	ضریب آکوستوالاستیک
l, m, n	ثابت های مرتبه سوم مورناگان
T	زمان (s)
V	سرعت (ms^{-1})

علائم یونانی

α	کرنش همگن
ϵ	کرنش
λ, μ	ثابت های الاستیک مرتبه دوم
ν	ضریب پواسون
ρ	چگالی (kgm^{-3})

- Design Journal*, Vol. 49, No. 0, pp. 591-601, 2013.
- [15] Y. Javadi, M. Akhlaghi, M. Ahmadi Najafabadi, Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates, *Materials and Design Journal*, Vol. 45, No. 0, pp. 628-642, 2013.
- [16] D.M. Egle, D.E. Bray, Measurement of acoustoelastic and third order elastic constants for rail steel, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 60, No. 3, pp. 741-744, 1976.
- [17] D. E. Bray, *Nondestructive evaluation: A Tool in Design, Manufacturing and Service*, Revised Edition, p. 586, Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [18] D.S. Hughes, J.L. Kelly, Second-order elastic deformation of solids, *American Physical Society*, Vol. 92, No. 5, pp. 1145-1149, 1953.
- [19] W. Tang, D.E. Bray, Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the Lcr ultrasonic wave, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 207, No. 2, pp. 231-240, 2001.
- [20] J. Hoblos, G. Bourse, C. Robin, H. Walaszek, S. Chaki, Ultrasonic stress measurement in welded joints by using Lcr waves: an approach to separate microstructure and stress effect, *World Congress on Ultrasonics*, pp. 701-704, 2003.
- [21] Y. Javadi, S. Hloch, Employing the LCR waves to measure longitudinal residual stresses in different depths of a stainless steel welded plate, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2013, 2013.
- [9] A. Aparecido Buenos, P. Pereira Jr, C. Soares Santos, A. dos Santos, Effect of mean grain size in the time of flight for Lcr Waves, *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Vol. 33, No. 0, pp. 562-570, 2012.
- [10] H. Qozam, S. Chaki, G. Bourse, C. Robin, H. Walaszek, P. Bouteille, Microstructure effect on the Lcr elastic wave for welding residual stress measurement, *Experimental Mechanics*, Vol. 50, No. 2, pp. 179-185, 2010.
- [11] Kh. Azari, M. Ahmadi Najafabadi, Y. Alizadeh Vaghasloo, Investigation of residual stress measurement of carbon steel-stainless steel butt weld by non-destructive method of double refraction phenomenon, *12th Iranian Conference on Manufacturing Engineering (ICME)*, Tehran, 2012. (in Persian فارسی)
- [12] S. Sadeghi, M. Ahmadi Najafabadi, Y. Javadi, M. ohammadisefat, Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates, *Materials and Design Journal*, Vol. 52, No. 0, pp. 870-880, 2013.
- [13] Y. Javadi, M. Ahmadi Najafabadi, M. Akhlaghi, Comparison between contact and immersion method in ultrasonic stress measurement of welded stainless steel plates, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 41, No. 5, pp. 788-797, 2013.
- [14] Y. Javadi, H. Salimi Pirzaman, M. Hadizadeh Raeisi, M. Ahmadi Najafabadi, Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual stresses through thickness, *Materials and*