

بررسی اثر پارامترهای هندسی بر تنش‌های پسماند جوشی در اتصالات سر به سر لوله‌ها

محمد رضا فراهانیⁱ؛ داوود اکبریⁱⁱ؛ ایرج ستاریⁱⁱⁱ؛ فرید رضا بیگلری^{iv}

چکیده

تنش‌های پسماند جوشی، یکی از انواع تنش‌های حرارتی است که در اثر توزیع غیر یکنواخت حرارت و تغییر شکل‌های پلاستیک موضعی در قطعات به وجود می‌آیند. در این مقاله، تنش‌های پسماند ایجاد شده در اتصالات سر به سر جوشکاری شده در لوله‌ها، با انجام تحلیل ترمو-الاستو-پلاستیک و به روش المان محدود محاسبه شده است. برای ارزیابی صحت نتایج به دست آمده، نتایج این آنالیز با نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی تنش‌های پسماند با استفاده از روش کرنش سنجی سوراخ و متد تفرق اشعه نوترونی موجود در منبع [7] مقایسه شده است. به کمک آنالیز المان محدود، اثرات تغییر ضخامت و زاویه پخ اتصال بر بزرگی و توزیع تنش‌های پسماند بررسی شده است.

کلمات کلیدی

تنش‌های پسماند، تحلیل ترمو-الاستو-پلاستیک، المان محدود، زاویه پخ.

Effect Of Weld Geometry On Residual Stress In Butt Welded Pipes

M. Farahani; D. Akbari; I. Sattarifar; F. Biglari;

ABSTRACT

Welding residual stresses is a kind of thermal stresses that is caused by non-uniform distribution of temperature and plastic deformation. In this work, the development of welding residual stresses in butt weld joints in pipes are studied by using finite element method (FEM). The FE results are verified by experimental measured data using hole drilling (HDSG) and neutron diffraction method obtained from reference[7]. Based on these studies, a simplified modelling procedure of reasonable accuracy was proposed.

In addition, the effect of weld geometry on magnitude and distribution of residual stresses has been studied that leads to good recommendation to predict these stresses.

KEYWORDS

Residual Stress-Thermo elastic plastic Analysis-Finite element-Groove Angle.

ⁱ دانشجوی دکتری، دانشگاه امیر کبیر: O.Farahani@Gmail.com

ⁱⁱ کارشناسی ارشد، دانشگاه امیر کبیر: Davood.Akbari@Gmail.com

ⁱⁱⁱ استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه امیر کبیر: Sattari@aut.ac.ir

^{iv} دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه امیر کبیر: Biglari@aut.ac.ir



پسگرم) و هندسه اتصال وابسته است. از پارامترهای هندسی مهم در این اتصالات می‌توان به ضخامت فلزات پایه و زاویه پخ جوشکاری اشاره کرد. در این مقاله، ابتدا نتایج حاصل از آنالیز المان محدود از طریق مقایسه با نتایج حاصل از اندازه‌گیری عملی تنش‌های پسماند ارزیابی شده است [۷]. در ادامه، اثرات ضخامت و زاویه پخ بر روی بزرگی و توزیع تنش‌های پسماند بررسی شده است.

۲- مدل‌سازی عددی تنش‌های پسماند

تنش‌های پسماند در اتصال سرب‌سر لوله از طریق تحلیل غیر کوپل و به کمک روش المان محدود محاسبه شده است. شکل (۱) روند این تحلیل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این روند نشان داده شده است، روش کلی آنالیز به دو قسمت مجزای تحلیل حرارتی و تحلیل مکانیکی تقسیم شده است. در بخش تحلیل حرارتی با به‌کارگیری معادلات حاکم و با اعمال شرایط مرزی (معادلات ۱ و ۲)، توزیع و تاریخچه دمایی کلیه نقاط نمونه معین می‌شود. این نتایج به عنوان یکی از ورودی‌های آنالیز مکانیکی استفاده می‌شود.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \{L\}^T \{q\} = Q \quad (1)$$

$$\{q\}^T \{\eta\} = -h_f (T_B - T_A) \quad (2)$$

در معادلات فوق، ρ چگالی (kg/m^3)، C ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)، T دما ($^{\circ}\text{C}$)، t زمان (s)، $\{L\}$ عملگر برداری، $\{q\}$ بردار شار حرارتی، $\{\eta\}$ بردار نرمال سطح، h_f ضریب هدایت همرفت، T_B دمای تعادل و T_A دمای سطح جسم است.

در بخش آنالیز مکانیکی نیز از معادلات پایه‌ای پلاستیسیته برای تشکیل معادلات ماتریسی المان محدود استفاده می‌شود. این معادلات شامل معادلات تعادل، معادلات ترمو-الاستو-پلاستیک و معادلات سازگاری است. در نهایت، با ترکیب این معادلات، معادله پایه‌ای المان محدود (رابطه ۳) به دست می‌آید:

$${}^{m+1} \{K_1\} \{\Delta U_e\} - {}^{m+1} \{K_2\} \{\Delta T_e\} = \{\Delta R\} \quad (3)$$

در این رابطه، $\{K_1\}$ ماتریس سختی مکانیکی، $\{\Delta U_e\}$ بردار جابجایی‌ها، $\{K_2\}$ ماتریس سختی حرارتی و $\{\Delta R\}$ بردار نرخ شار حرارتی است. خروجی نهایی این تحلیل، تغییر مکان و توزیع تنش پسماند در کلیه نقاط مدل است.

۳- نمونه اتصال

نمونه بررسی شده در این مقاله، اتصال سرب‌سر دو لوله از جنس JIS STPT410 (معادل فولاد ASTM A106) است.

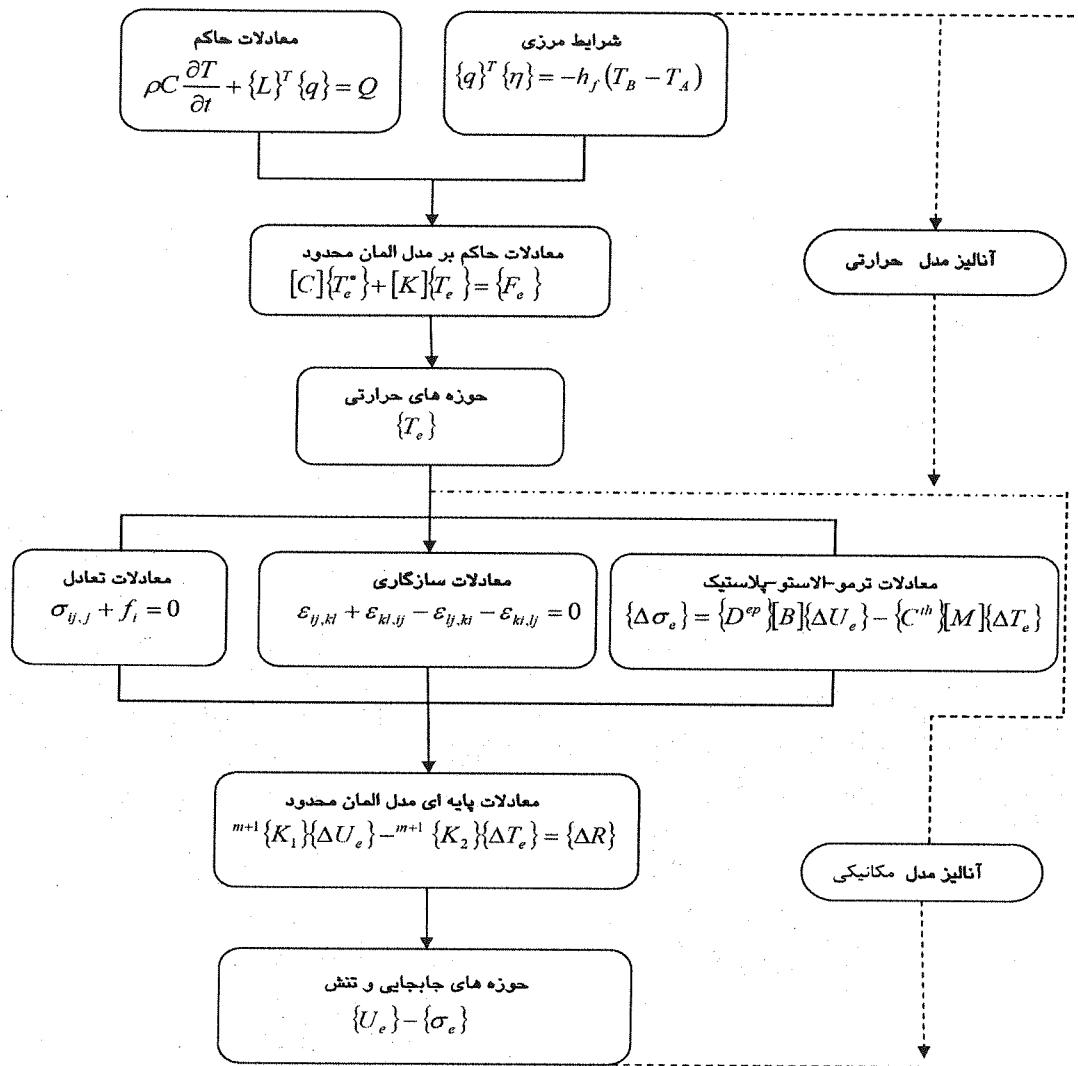
تنش‌های پسماند جوشی یکی از انواع تنش‌های حرارتی است که بواسطه توزیع غیر یکنواخت حرارت در حوزه جوش، انقباض و انبساط و تغییر شکل‌های پلاستیک موضعی در قطعه به وجود می‌آیند. این تنش‌ها باعث کاهش مقاومت سازه‌های جوشی در مقابل شکست ترد، خستگی و کمناش شده و به ایجاد تنش‌خوردگی در قطعه کمک می‌کنند [۱]. از این رو ایجاد روشی برای پیش‌بینی و تخمین مناسبی از بزرگی و توزیع این تنش‌ها در ارزیابی اطمینان سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد.

در سال‌های اخیر، تحقیقات فراوانی به منظور محاسبه تحلیلی و اندازه‌گیری عملی این تنش‌ها صورت گرفته است. به دلیل پیچیدگی و وجود پارامترهای زیاد تأثیرگذار در این مسأله، روش‌های تحلیل تنها برای هندسه‌های ساده و با فرضیات ساده‌کننده فراوان قابل انجام هستند. روش‌های تجربی نیز عموماً با صرف هزینه‌های بالا همراه است. از این رو، با افزایش سرعت و قابلیت کامپیوترها، کاربرد روش‌های عددی نظیر روش المان محدود رو به افزایش بوده است.

Ueda و Nomoto به منظور تحلیل حرارتی و محاسبه تنش‌های پسماند جوشی از ابزار المان محدود استفاده کردند [۲]، [۳]. Habbitt و Marcal با استفاده از المان محدود حالت ۲ بعدی در مدل‌سازی جوش تنش‌های پسماند جوشی را پیش‌بینی و ثبت کردند [۴]. Michaleris و Debbicari از مدل ۲ بعدی کرنش صفحه‌ای برای منطقه جوش در مقطع مدل ۳ بعدی برای پیش‌بینی تغییر شکل‌ها در قطعات بزرگ استفاده کردند [۵]. برای مدل‌سازی توزیع حرارت و تنش در جوشکاری از کدهای نوشته شده در قالب نرم‌افزارهای المان محدود (FE) تجاری نیز استفاده شده است. Karlsson، جوشکاری سر به سر لوله‌های کربن-مگنزی را به وسیله کد ADINA مدل کرد. Viccent et al جوشکاری لیزر CO2 را برای جوشکاری عدسی یک مخزن به کار بردند و نتایج اندازه‌گیری تنش‌های پسماند از طریق اندازه‌گیری تجربی و استفاده از کد FE به وسیله نرم‌افزارهای Sysweld و Code-Aster را مقایسه کردند [۶].

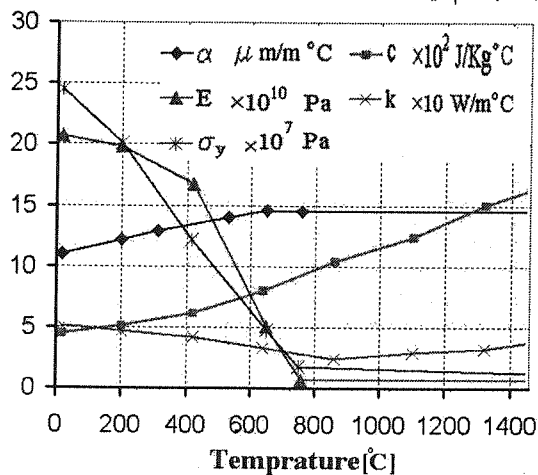
در مقاله حاضر، به محاسبه تنش‌های پسماند در اتصال سرب‌سر لوله با استفاده از روش آنالیز المان محدود ترمو-الاستو-پلاستیک و با کمک نرم‌افزار المان محدود ANSYS9.0 پرداخته شده است.

اندازه و توزیع تنش‌های پسماند جوشی به عوامل متعددی از جمله جنس قطعه، روش جوشکاری، پارامترهای جوشکاری (دمای پیشگرم، انرژی ورودی، سرعت جوشکاری و دمای



شکل (۱): روند نمای تحلیل المان محدود جوشکاری

پیوسته در طول محیط لوله و در یک مرحله، به صورت هم جهت با هم ایجاد شدند.



شکل (۲): خواص فولاد JIS STPT410 در دماهای مختلف [۸]

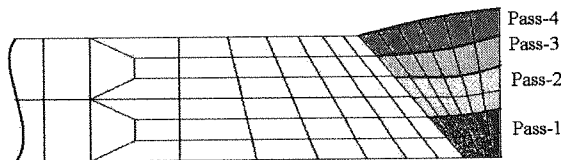
کلیه خواص حرارتی و مکانیکی این فولاد همان گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است وابسته به دما در نظر گرفته شده اند [۸]. با افزایش دما، مدول الاستیک، تنش تسلیم و ضریب هدایت حرارتی ماده کاهش پیدا می کنند و ضریب انبساط حرارتی و ظرفیت گرمایی آن افزایش می یابند. در مدل سازی المان محدود فرض شده است که فلز جوش و فلز پایه از یک جنس تشکیل شده باشند!

اتصال مورد نظر در طی چهار پاس و با انرژی 1.2 kJ/mm و سرعت 1 mm/s برای هر پاس انجام می شود. این مقدار انرژی ورودی از (۴) به دست آمده است:

$$Q = \frac{U.I.\eta}{v} \quad (4)$$

که در آن، U ولتاژ، I شدت جریان، v سرعت جوشکاری و η ضریب بازده جوش است.

پاس ها با ضخامت مساوی در چهار لایه، به صورت



شکل (۴): مدل المان محدود پاس‌های جوشکاری

در این مدل‌سازی، از تکنیک تولد و مرگ المان‌ها برای شبیه‌سازی تشکیل مذاب در طول زمان جوشکاری چندپاسه استفاده شده است. در این تکنیک، بایستی در ابتدا تمامی المان‌ها از جمله المان‌های جوش را ایجاد کرد و سپس المان‌هایی را که از نظر زمانی وجود ندارند، در حالت مرگ قرار داد. در این روش برای غیر فعال کردن المان‌های مرده، ضریب سختی آنها در یک فاکتور بسیار کوچک ضرب می‌شود. با این روش جرم، ضریب میرایی، گرمای ویژه و سایر خصوصیات این المان‌ها به منظور غیر فعال کردن آنها، صفر می‌شوند [۹]. در حین عبور منبع حرارتی جوشکاری از هر مقطع، المان‌های غیر فعال شده به ترتیب زنده می‌شوند، بگونه‌ای که سرعت زنده کردن المان‌ها و سرعت حرکت الکتروود با هم مساوی باشد.

در مدل حرارتی، انرژی ورودی به صورت شارحرارتی بر المان‌های جوش اعمال شد. برای مدل کردن عبور الکتروود از یک مقطع خاص، این شارحرارتی با توزیع نوزنقه‌ای اعمال شد. گرمای نهان ذوب (تغییر فاز جامد به مایع) و تغییرات فازی حالت جامد با استفاده از مفهوم تغییرات آنتالپی حرارتی در نظر گرفته شده اند (۵).

$$H = \int \rho c(T) dT \quad (5)$$

در این رابطه، H آنتالپی و $c(T)$ گرمای ویژه وابسته به دماست. گرمای ویژه معادل C^* در فاصله دمایی بین فاز جامد و فاز مایع ثابت در نظر گرفته شده است. این ضریب با (۶) تعریف می‌شود:

$$C^* = H / \rho \Delta T \quad (6)$$

به منظور در نظر گرفتن اثر جریان‌ها همرفتی ناشی از تلاطم مذاب، ضریب انتقال حرارت در دماهای بالای نقطه ذوب دو برابر شده است [۱۰].

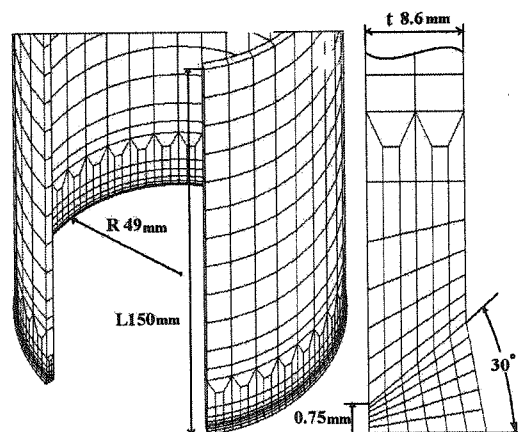
شرایط مرزی حرارتی به صورت انتقال حرارت همرفتی با هوا، در تمام سطوح اعمال شده است. ضریب همرفت معادل $15 W / m^2 \text{ } ^\circ C$ و به صورت ثابت در طی جوشکاری و خنک شدن پس از آن در نظر گرفته شده است.

در تحلیل مکانیکی تاریخچه حرارتی به دست آمده از آنالیز حرارتی در کل زمان جوشکاری (هر چهار پاس) و خنک شدن تا دمای محیط به عنوان یک بار حرارتی بر سازه اعمال و سپس تنش و کرنش‌های حاصل در هر بازه زمانی برای المان‌ها محاسبه می‌شود. این عملیات تا سرد شدن قطعه تا

لبه لوله‌ها قبل از جوشکاری با زاویه ۶۰ درجه پخ زده می‌شود و اندازه ریشه جوش نیز 3 mm در نظر گرفته شده است.

۳-۱- مدل المان محدود

برای مدل‌سازی نمونه از مدل‌های سه‌بعدی و دوبعدی و از نرم افزار المان محدود ANSYS9.0 استفاده شده است. این مدل در شکل (۳) مشاهده می‌شود. در تحلیل حرارتی از 2280 المان Solid70 با 5040 نود و در تحلیل مکانیکی از 408 المان Plane42 با 496 نود استفاده شده است.



شکل (۳): مدل المان محدود دو بعدی تقارن محوری و سه بعدی

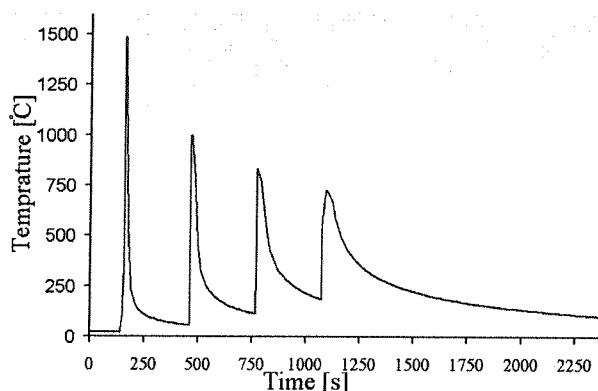
تحلیل فرآیند جوشکاری با یک آنالیز کوپل غیر مستقیم ترمو-مکانیکال انجام گرفته است. به منظور انجام آنالیز حرارتی از مدل ۳ بعدی نشان داده شده در سمت چپ شکل (۳) استفاده شد و تحلیل مکانیکی مدل نیز با در نظر گرفتن یک مقطع طولی از لوله و با استفاده از فرض تقارن محوری به صورت دو بعدی نشان داده شده در سمت راست شکل (۳) انجام شده است. مسأله بسیار مهم در این مدل‌ها، نحوه مش‌بندی آنهاست. مناطق نزدیک به خط جوش، به دلیل وجود شیب حرارتی زیاد، از نظر تحلیل در موقعیت حساس‌تری قرار دارند؛ از این رو، مش بندی در این مناطق با درجه ریزتری صورت می‌گیرد. به منظور کاهش زمان و حجم محاسبات، مناطقی که در موقعیت دورتری نسبت به خط جوش قرار دارند با درجه درشت‌تری مش‌بندی می‌شوند. در شکل (۴)، المان‌های جوشی و پاس‌های جوشی در مدل المان محدود نشان داده شده‌اند. با توجه به وجود تقارن در نمونه مورد بررسی، تنها نیمی از نمونه، مدل شده است و در مرز میانی از شرط مرزی تقارن در تحلیل‌ها استفاده شده است. این تکنیک یک روش سودمند برای کاهش حجم محاسباتی و در نتیجه زمان است.

دمای محیط تکرار می‌شود. مقادیر محاسبه شده در مرحله نهایی، نشان دهنده تنش‌ها و کرنش‌های پسماند جوشی هستند. رفتار مکانیکی مواد به صورت همسانگرد کرنش سخت و با معیار تسلیم فون مایسز در نظر گرفته شده است.

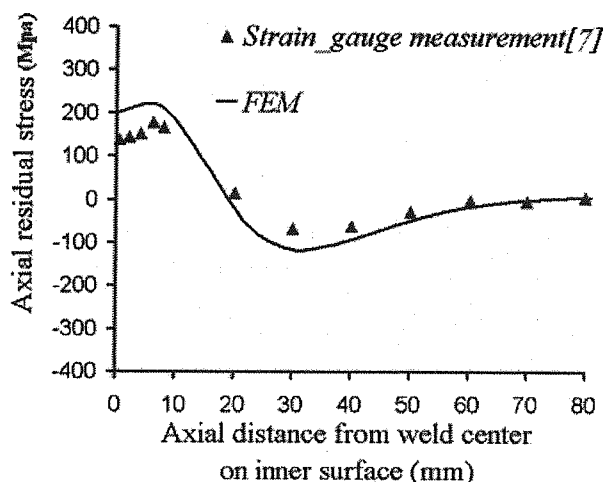
۴- نتایج حاصله

در شکل (۵)، تاریخچه حرارتی برای نودی در ریشه جوش، در زاویه ۱۸۰ درجه‌ای از نقطه شروع جوشکاری نشان داده شده است. چهار پیک مشاهده شده در این نمودار به زمان عبور الکتروود از نقطه مورد نظر مربوط است. تحلیل حرارتی تا رسیدن دمای نمونه به دمای محیط ادامه پیدا کرد؛ که البته در این شکل تنها دما تا زمان ۲۳۵۰ ثانیه پس از زمان شروع جوشکاری نشان داده شده است.

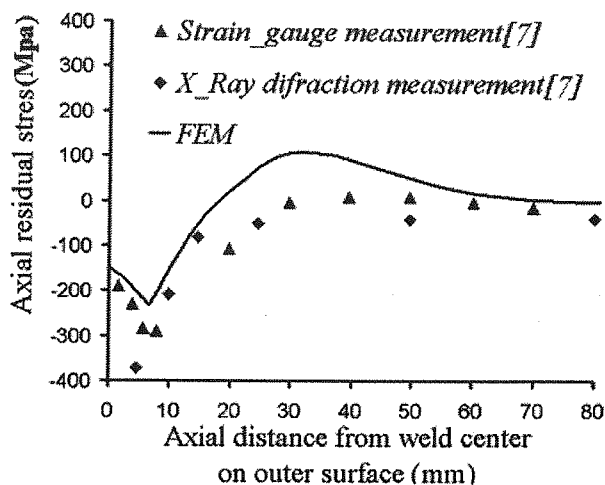
در اتصالات استوانه‌ای تنش‌های پسماند جوشی در سه جهت محیطی، محوری و شعاعی وجود دارند. در شکل (۶) و (۷) توزیع تنش‌های پسماند محوری در راستای محور لوله به ترتیب در سطح داخلی و خارجی نشان داده شده است:



شکل (۵): نمودار دما-زمان در ریشه جوش



شکل (۶): توزیع تنش‌های پسماند محوری در راستای محور لوله در سطح داخلی



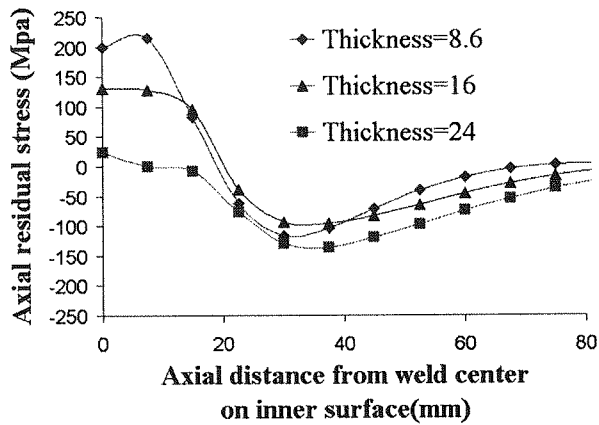
شکل (۷): توزیع تنش‌های پسماند محوری در راستای محور لوله در سطح خارجی

به منظور مقایسه نتایج حاصل از آنالیز المان محدود، مقادیر محاسبه شده با مقادیر بدست آمده از اندازه‌گیری تجربی، با استفاده از کرنش سنج و متد تفرق اشعه نوترونی (Masahito Mochizuki, 2000) مقایسه شده اند [۷].

این دو روش اندازه‌گیری تنش‌های پسماند جزء پرکاربردترین روش‌های اندازه‌گیری این کمیت هستند. متد اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از تفرق نوترونی و کرنش‌سنجی سوراخ به تفصیل در منبع [۱۱] توضیح داده شده است.

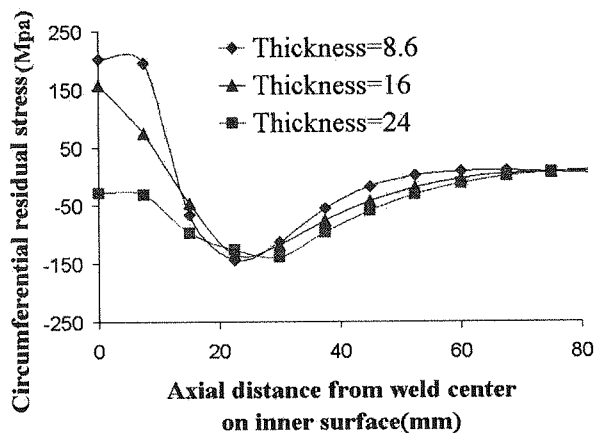
همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از تحلیل المان محدود، با نتایج اندازه‌گیری عملی همخوانی خوبی دارند. تنش‌های پسماند در سطح داخلی لوله در مرکز جوش کششی بوده و با فاصله گرفتن از مرکز جوش کاهش می‌یابند؛ در حالی که در سطح خارجی عکس روند فوق مشاهده می‌شود، به گونه‌ای که در خط مرکزی، این تنش‌ها فشاری است. در اجسام استوانه‌ای رابطه تنگاتنگی بین تنش‌های پسماند محیطی و محوری وجود دارد. انقباض محیطی در این نوع جوشکاری باعث ایجاد خمش محوری در سیلندر می‌شود، به نحوی که تنش‌های پسماند کششی در سطوح داخلی و تنش‌های پسماند فشاری در سطح خارجی پدید می‌آید. نتایج تحلیل المان محدود و اندازه‌گیری عملی نیز به خوبی مؤید این مطلب است.

تفاوت بالای بین نتایج حاصل از المان محدود و مقادیر اندازه‌گیری شده در بعضی از نقاط را می‌توان ناشی از خطاهای روش اندازه‌گیری تجربی، خطاهای انجام تست تجربی، عدم کنترل صحیح پارامترهای جوشی در حین ساخت نمونه‌ها و نیز خطاهای ناشی از ساده‌سازی در مدل‌سازی المان محدود همچون استفاده از فرض تقارن محوری و یا



شکل (۱۰): اثر ضخامت بر تنش‌های پسماند محوری در سطح داخلی لوله

همان گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت لوله، این تنش‌ها در نواحی مرکزی جوش کاهش یافته است، در حالی که در نقاط دورتر تغییرات چندانی مشاهده نشده است.

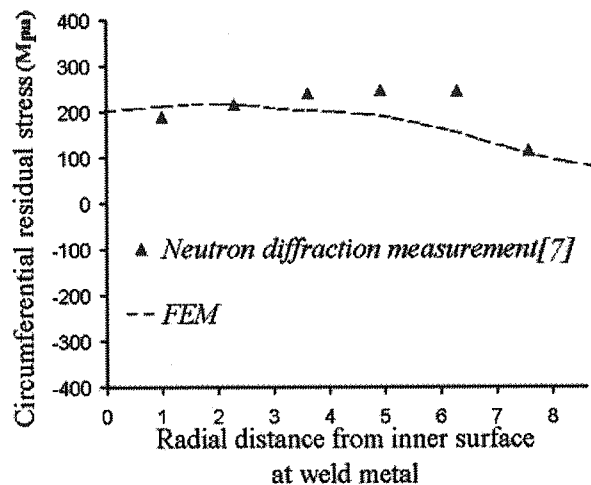


شکل (۱۱): اثر ضخامت بر تنش‌های پسماند محیطی در سطح داخلی لوله

در شکل (۱۱)، توزیع مؤلفه محیطی تنش‌های پسماند در سطح داخلی لوله در هر سه نمونه نشان داده شده است که در اینجا نیز افزایش ضخامت لوله باعث کاهش این تنش‌ها در نواحی مرکزی جوش شده است، درحالی‌که تغییرات زیادی در نواحی دورتر مشاهده نمی‌شود.

در این اتصالات، با افزایش ضخامت لوله مقاومت آن در مقابل انقباض محیطی افزایش می‌یابد و از آنجاکه مقدار انرژی ورودی در هر پاس و زاویه پخ ثابت نگه داشته شده‌اند؛ لذا تغییر طول شعاعی لوله کاهش می‌یابد و در نتیجه، میزان تنش‌های پسماند کششی محیطی و تنش‌های پسماند محوری وابسته به آن در دیواره داخلی کاهش می‌یابد. همین عامل باعث کاهش تنش‌های پسماند محوری در دیواره خارجی لوله نیز می‌شود. از نتایج بالا مشاهده می‌شود که ضخامت قطعه جوشکاری شده تأثیر بسزایی بر روی بزرگی تنش‌های پسماند

صرفنظر کردن از اثرات مکانیکی تغییر فاز حالت جامد دانست.

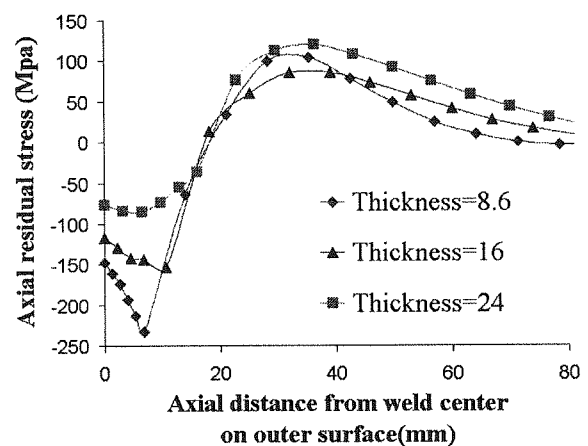


شکل (۸): توزیع تنش‌های پسماند محیطی در جهت ضخامت لوله در فلز جوش

در شکل (۸) نیز توزیع تنش‌های پسماند محیطی در جهت ضخامت لوله نشان داده شده است. مقایسه این نتایج نشان دهنده دقت مناسب آنالیز المان محدود است.

۴-۱- بررسی اثرات تغییر ضخامت

به منظور بررسی اثر ضخامت قطعه بر روی تنش‌های پسماند جوشی، سه نمونه با ضخامت‌های ۸/۶ میلی‌متر، ۱۲ میلی‌متر و ۲۴ میلی‌متر بررسی شده است. تعداد پاس‌های جوشکاری متناسب با ضخامت انتخاب شده است، به‌گونه‌ای که انرژی هر پاس ثابت (1.2 kJ/mm) نگه داشته شده است. زاویه پخ نیز در تمامی این نمونه‌ها معادل 60° در نظر گرفته شده است. در شکل (۹) و (۱۰) توزیع مؤلفه محوری تنش‌های پسماند به ترتیب در سطح خارجی و داخلی لوله، حاصل از مدل‌سازی المان محدود در هر سه نمونه نشان داده شده است.

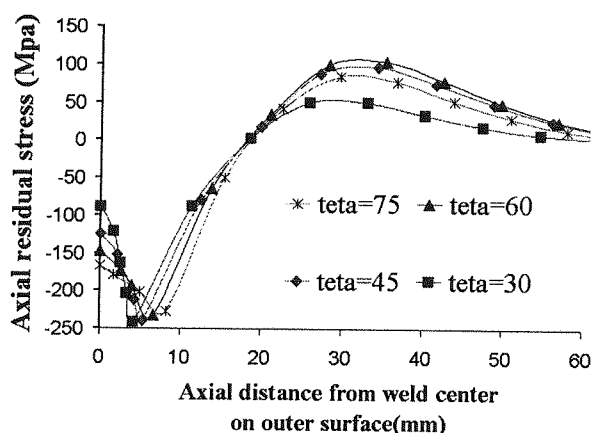


شکل (۹): اثر ضخامت بر تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله

طولی در منطقه جوش دارد، در حالی که در نواحی دورتر، تغییرات چندانی مشاهده نمی‌شود. در ضمن، این پارامتر تأثیر زیادی بر گستردگی تنش‌های پسماند در راستای محوری لوله ندارد.

۴-۲- بررسی اثرات تغییر زاویه پخ

در این قسمت، با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی چهار نمونه مختلف، به بررسی اثرات تغییر زاویه پخ بر روی تنش‌های پسماند پرداخته شده است. این نمونه‌ها مشابه نمونه عملی (Masahito Mochizuki, 2000) هستند و تنها زاویه پخ آنها متفاوت است. زوایای پخ در این نمونه‌ها به ترتیب برابر ۲۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۲) توزیع مؤلفه محوری تنش‌های پسماند در سطح خارجی لوله، در قطعات ذکر شده نشان داده شده است.

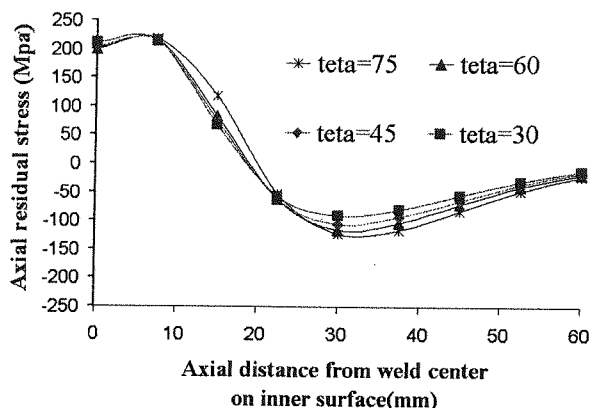


شکل (۱۲): اثر زاویه پخ بر تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله

نمودارها نشان می‌دهند که افزایش زاویه پخ، باعث افزایش ماکزیم تنش‌های پسماند فشاری در مرکز جوش شده است؛ به طوری که مقادیر این تنش‌ها از $-88MPa$ در نمونه با زاویه پخ 30° تا $166MPa$ در نمونه با پخ 75° درجه تغییر کرده است؛ همچنین با افزایش این زاویه، پیک تنش پسماند فشاری محوری در سطح خارجی لوله، از خط جوش فاصله گرفته است، بدون آنکه بزرگی آن تغییر چندانی کرده باشد. نتایج نشان می‌دهند که ماکزیم تنش‌های پسماند فشاری برای نمونه‌های با زوایای پخ 20° ، 45° ، 60° و 75° به ترتیب در فاصله $4/2$ ، $5/3$ ، $6/7$ و $8/3$ میلی‌متری از مرکز جوش رخ می‌دهند. علت این تغییرات گسترده شدن عرض جوش با افزایش زاویه پخ و در نتیجه گسترده‌تر شدن بار حرارتی اعمال شده به قطعات و به دنبال آن گسترش توزیع تنش‌های پسماند در مناطق نزدیک به جوش می‌باشد. با فاصله گرفتن بیشتر از مرکز جوش، تنش‌های پسماند فشاری به تنش‌های پسماند

کششی تبدیل می‌شوند.

در شکل (۱۳)، توزیع تنش‌های پسماند محوری در سطح داخلی لوله در نمونه‌ها نشان داده شده است. همان گونه که در این نمودارها دیده می‌شود، افزایش زاویه پخ تأثیر چندانی بر بزرگی و توزیع تنش‌های پسماند جوشی در سطح داخلی لوله ندارد. این مسأله به دلیل بی‌تأثیر بودن زاویه پخ در گستردگی توزیع حرارتی و بزرگی منطقه نفوذ در ریشه جوش (سطح داخلی لوله) است.



شکل (۱۳): اثر زاویه پخ بر تنش‌های پسماند محوری در سطح داخلی لوله

۵- نتیجه گیری

تنش‌های پسماند ایجاد شده در جوشکاری سربسته دو لوله از جنس JIS STPT410 با استفاده از مدل‌سازی المان محدود محاسبه شد.

نتایج بدست آمده از آنالیز المان محدود با تنش‌های حاصل از اندازه‌گیری عملی موجود در مرجع [۷] مقایسه شدند. تطابق قابل قبولی بین این نتایج مشاهده شد. اثر تغییر ضخامت و زاویه پخ در تنش‌های پسماند لوله‌ها بررسی شد، نتایج زیر قابل ارائه است:

- تنش‌های پسماند در منطقه جوش برای جوش‌های تحلیل شده در سطح داخلی لوله کششی و در سطح خارجی فشاری است.
- با فاصله گرفتن از خط جوش تنش‌های پسماند در سطح داخلی کاهش و در سطح خارجی افزایش پیدا می‌کنند.
- با افزایش ضخامت قطعه، ماکزیم تنش‌های پسماند محوری در سطوح داخلی و خارجی لوله در مرکز خط جوش کاهش پیدا می‌کنند.
- افزایش ضخامت لوله باعث کاهش تنش‌های پسماند محیطی در سطح داخلی لوله در نزدیکی خط جوش می‌شود.

- افزایش ضخامت قطعه، بر بزرگی تنش‌های پسماند در مناطق دور از خط جوش، تأثیر چندانی ندارد.
- افزایش زاویه پخ پیک تنش‌های پسماند را در سطوح خارجی لوله در مرکز جوش کاهش می‌دهد.
- افزایش زاویه پخ پیک تنش‌های پسماند فشاری در سطح خارجی لوله را از مرکز خط جوش دور می‌کند.
- اندازه و گستردگی تنش‌های پسماند در سطوح داخلی لوله (ریشه جوش) با افزایش زاویه پخ تغییر چندانی نمی‌کند.

۶- مراجع

- D. Radaj, "Heat Effects of Welding", Springer, 192 . [۱]
- Y. Ueda, T. Yamakawa, "Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during welding by finite element method", Transactions of Japan Welding Society, 1971. [۲]
- T. Nomoto, "Finite element analysis of thermal stress during welding", PhD. Thesis, Tokyo, 1971. [۳]
- H. Hibbitt, P. Marcal, "A numerical thermo-mechanical model of the welding and subsequent loading of a fabricated structure", Computer Structure, 3, 45-74, 1973. [۴]
- P. Michaleris, A. Debicari, "Prediction of Welding Distortion", Welding Journal, 76 172-181, 1997. [۵]
- Y. Vincent, JF. Jullien, N. Cavallo, L. Taleb, V. Cano, S. Taheri and Ph. Gilles, "On the Validation of the Models Related to the Prevision of the HAZ Behaviour", ASME PVP Fracture, Fatigue and Weld Residual Stress, 393, 193-200, 1999 [۶]
- M. Mochizuki, "Numerical Analysis of Welding Residual Stress and Its Verification Using Neutron Diffraction Measurement", Journal of Engineering Materials and Technology, 122, 2000 [۷]
- P. Chang, T. Teng, "Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints", Computational Materials Science, 29, 511-522, 2004. [۸]
- I. Fanous, "3-D finite element modeling of the welding process using element birth and element movement techniques", ASME, Vol.125, 144-150, 2003 [۹]
- F. Lu, "Modeling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool", Computational Materials Science, 29, 371-378, 2004 [۱۰]
- "Handbook of Measurement of Residual Stress", Society for Experimental Mechanics, 2-7, 1996. [۱۱]

۷- زیر نویس

¹ Autogeneous weldment