

بررسی عددی و تجربی توزیع تنش پسماند ناشی از جوشکاری چند پاسه صفحات فولاد ضدزنگ

شهاب‌الدین امینی^{۱*}؛ مهسا سیدیان چوبی^۲؛ محمد حق پناهی^۳

چکیده

در جوشکاری چند پاسه، گستردگی تنش‌های پسماند و حداکثر مقدار آن با اضافه شدن هر پاس جوشکاری تغییر می‌نماید. فرایند شبیه‌سازی می‌تواند برای تخمین مقادیر و توزیع این تنش‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله، به بررسی میدان‌های حرارتی گذرا و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری چند پاسه لب به لب صفحات فولاد ضدزنگ ۳۰۴ به روش جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود تنگستن پرداخته شده است. تحلیل این مطلب با استفاده از مدل المان محدود حرارتی - مکانیکی غیرخطی غیرکوپله در حالت دو بعدی با استفاده از نرم افزار انسیس ۱۰ انجام شده است. در پایان، برای بررسی درستی نتایج تحلیل عددی، توزیع دما برای یک نمونه و تنش‌های پسماند برای دو نمونه با استفاده از روش سوراخکاری اندازه‌گیری شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری در اثر افزایش ضخامت صفحات، حداکثر مقدار عددی تنش‌های پسماند کاهش یافته ولی توزیع این تنش‌ها افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: میدان حرارتی، تنش پسماند، جوشکاری چند پاسه، فولاد ضدزنگ، روش سوراخکاری

Numerical and Experimental Investigation of Residual Stress Distribution due to Multi-Pass Welding of Stainless Steel Plates

Sh. Amini, M. Seyyedian Choobi and M. Haghpanahi

ABSTRACT

In multi-pass welding, residual stress distribution and its maximum value change with addition of each pass. Finite element simulation can be used to estimate residual stresses. In this paper, transient thermal fields and residual stresses due to multi-pass GTA welding of 304 stainless steel plates is investigated by experimental and numerical simulation. Two-dimensional un-coupled thermo-mechanical analysis has been performed using ANSYS 10. Residual stress measurement has been performed using hole-drilling method. The results of this study reveal that maximum residual stresses decrease with the increase of number of passes due to the increase of thickness, but it increase the width of tensile and compress zones.

KEYWORDS: Thermal fields, Residual stress, Multi-pass welding, Stainless steel, Hole-drilling method

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۹/۱۰

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۸/۲۵

* نویسنده مسئول و کارشناسی ارشد مکانیک؛ دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مکانیک: shahab_amini1363@yahoo.com

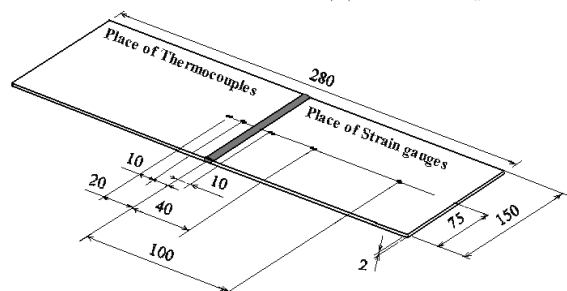
^۲ دکتری مکانیک؛ دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مکانیک: mseyyedian@yahoo.com

^۳ دانشیار؛ دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مکانیک: mhaghpanahi@yahoo.com

دو بعدی و مقایسه نتایج آن با کار آزمایشگاهی استفاده نموده‌اند. اکبری موسوی و همکارش [۹] اثر هندسه شیار روی توزیع تنش‌های پسماند را با استفاده از یک تحلیل المان محدود سه بعدی بررسی و با نتایج آزمایشگاهی انجام شده به روش تفرق اشعه ایکس مقایسه نموده که برابری خوبی داشته‌اند. دنگ^{۱۱} [۱۰] اثر تغییر فاز و تغییر حجم ناشی از تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت روی تنش‌های پسماند نهایی ناشی از جوشکاری فولادهای کربنی را به کمک یک مدل المان محدود سه بعدی مورد بررسی قرار داد. ستاری فر و همکارش [۱۱] با استفاده از مدل المان محدود سه بعدی علاوه بر بررسی تعداد پاس روی تنش‌های پسماند لوله‌هایی با ضخامت‌های مختلف به بررسی شکل شیار نیز پرداخته و نتایج بدست آمده را با نتایج آزمایشگاهی انجام شده به روش سوراخکاری مقایسه نموده‌اند. نتایج بدست آمده نشان دادند که این دو عامل مهم می‌توانند اثر قابل توجهی روی مقدار و توزیع تنش‌های پسماند داشته باشند. در این مقاله، اثر افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری در اثر افزایش ضخامت صفحات فولاد ضدزنگ ۳۰۴ روی تنش‌های پسماند بررسی شده است. برای این کار، تنش‌های پسماند در صفحاتی به ضخامت‌های ۲، ۶، ۸ میلی‌متر که به ترتیب به وسیله ۱، ۲، ۳ پاس و به روش جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود تنگستن^{۱۳} جوشکاری شده‌اند، به کمک روش المان محدود تعیین شده و سپس از روش سوراخکاری^{۱۴} [۱۲] برای تأیید نتایج شبیه‌سازی استفاده شد.

۲- کار آزمایشگاهی

دو صفحه از جنس فولاد ضدزنگ ۳۰۴ به ابعاد ۱۵۰×۱۴۰×۲ میلی‌متر، بدون در نظر گرفتن شیار^{۱۵} و بدون فاصله^{۱۶} و بدون گیره‌بندی و به صورت لب به لب به روش جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود تنگستن طی یک پاس جوشکاری شدند. قبل از انجام آزمایش‌ها، همه نمونه‌ها تنش‌زدایی شدند. شکل (۱) هندسه، جزئیات ابعادی، محل نصب دماسنج‌ها^{۱۷} و کرنش‌سنج‌ها^{۱۸} را نشان می‌دهد. شرایط جوشکاری نیز در جدول (۱) آورده شده است.



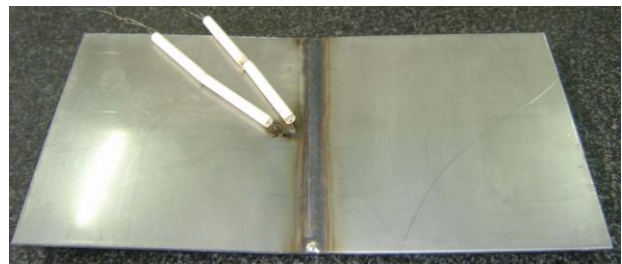
شکل (۱): هندسه، ابعاد و محل نصب ترموکوپل‌ها و کرنش‌سنج‌های نمونه آزمایشگاهی

جوشکاری ذوبی یکی از انواع فرایندهای قابل اطمینان در اتصال فلزات است که بطور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این میان، جوشکاری چند پاسه صفحات فولاد ضدزنگ ۳۰۴ کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد. بعلاوه حرارت‌دهی موضعی و نرخ خنک شدن سریع، تنش‌های پسماند قابل توجهی در فلز جوش و پایه ایجاد می‌شود. این تنش‌های پسماند می‌توانند مشکلات مهمی مانند کاهش عمر خستگی و یا افزایش احتمال شکست ترد را به همراه داشته باشند. عوامل زیادی روی بزرگی و توزیع این تنش‌ها اثرگذار هستند. برخی از محققان نیز به بررسی اثر این فرایند بر روی تنش‌های پسماند پرداخته‌اند. ریپکی^۲ [۱] مقدار و توزیع تنش‌های پسماند در جوشکاری چند پاسه لوله‌ها را به کمک یک مدل محاسباتی تخمین زده و برابری خوبی بین نتایج این مدل و نتایج آزمایشگاهی بدست آورده است. آرنولدفری^۲ [۲] به بررسی و تخمین تنش‌های پسماند با استفاده از روش المان محدود و ارائه یک مدل تئوری اصلاح شده پرداخته که قادر به تخمین تنش‌های پسماند سه بعدی در نمونه‌های جوشکاری شده چند پاسه است. لجلیل^۳ [۳] یک نمونه H شکل جوشکاری شده چند پاسه فولاد ضدزنگ را به کمک روش المان محدود بررسی نموده است. میدان‌های دمایی را با استفاده از معادله روزنتال^۴ محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نموده و سپس برای یک شبیه‌سازی مکانیکی دو بعدی مورد استفاده قرار داده است. تنگ^۶ و همکارش [۴] اثر عواملی مانند سرعت، حرکت قوس، ابعاد نمونه، شرایط مرزی و پیش‌گرمایش را روی مقدار و توزیع تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری صفحات فولادی به کمک روش المان محدود روی یک مدل سه بعدی مورد بررسی قرار داده‌اند. بریکستاد^۷ و همکارش [۵] با استفاده از یک مدل دو بعدی به بررسی تغییرات تنش‌های پسماند شعاعی و محوری در اثر تغییر پارامترهای جوشکاری در امتداد ضخامت لوله‌های فولاد ضدزنگ پرداخته‌اند. چانگ^۸ و همکارش [۶] به ارزیابی تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری چند پاسه لب به لب صفحات فولادی با استفاده از روش المان محدود پرداخته و با نتایج آزمایشگاهی به روش تفرق اشعه ایکس^۹ مقایسه نموده‌اند. دورانتن^{۱۱} و همکارانش [۷] جوشکاری چند پاسه لوله‌های فولاد ضدزنگ را به کمک یک مدل سه بعدی شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نموده و برابری خوبی بدست آورده‌اند. چو^{۱۱} و همکارانش [۸] توزیع تنش‌های پسماند بعد از جوشکاری و بعد از عملیات حرارتی را به کمک تحلیل المان محدود بررسی نموده‌اند. برای این کار از یک مدل

جدول (۱): شرایط جوشکاری تک پاسه صفحه ۲ میلی متری

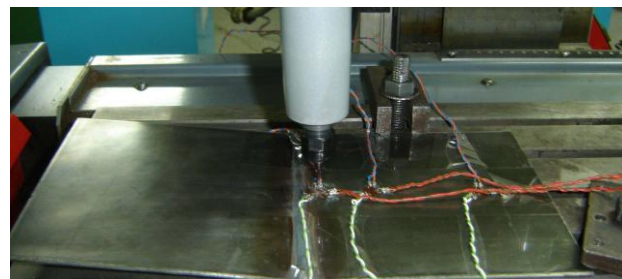
ضخامت (mm)	جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت (mm/sec)
۲	۸۰	۱۲	۲/۵

سطوح بالایی، پایینی و جانبی این صفحات در برابر جریان هوای آرام با دمای محیط قرار داشتند. برای تحلیل حرارتی و اندازه‌گیری دما، دو عدد دماسنج نوع K در دو نقطه به فواصل ۱۰ و ۲۰ میلی متری از خط جوش و در سطح مقطع میانی جوش روی سطح بالایی صفحه سمت چپ نصب شدند. شکل (۲)، دماسنج‌های نصب شده را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از گرم شدن دماسنج‌ها در اثر تشعشع ناشی از قوس جوشکاری، از یک صفحه محافظ بین دماسنج‌ها و خط جوش استفاده شد.



شکل (۲): دماسنج‌های نصب شده برای اندازه‌گیری دما

برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند از روش سوراخکاری استفاده گردید [۱۲]. سه عدد کرنش‌سنج نوع A در فواصل ۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ میلی متری از خط جوش و در سطح مقطع میانی جوش روی سطح بالایی صفحه سمت راست نصب شدند. برای انجام آزمایش از ابزار سوراخکاری به قطر ۲ میلی متر و یک ابزار دورانی با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه استفاده گردید. هم مرکز کردن ابزار با مرکز کرنش‌سنج‌ها نیز با چشم غیرمسلح انجام شد. شکل (۳)، صفحه نمونه مورد آزمایش را در حال انجام سوراخکاری نشان می‌دهد. در پایان برای اطمینان از نتایج کار آزمایشگاهی، اندازه‌گیری تنش پسماند روی دو قطعه متفاوت تکرار شد.



شکل (۳): صفحه نمونه در حین انجام آزمایش سوراخکاری

۳- تحلیل المان محدود

۳-۱- تحلیل حرارتی

معادله حاکم برای تحلیل انتقال حرارت گذرا به صورت

رابطه (۱) است:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

از انتقال حرارت در اثر تشعشع چشم‌پوشی شده و فقط

شرایط مرزی جابجایی با ضریب انتقال حرارت $15 \text{ W/m}^2\text{C}$ برای جریان آرام هوای محیط با دمای 20°C در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی منبع حرارتی جوشکاری از مدل تولید حرارت حجمی دو بیضی‌گون^{۱۱} گلداک^{۱۲} [۱۳] استفاده شده است.

این مدل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc \pi^{3/2}} e^{(-3x^2/a^2)} e^{(-3y^2/b^2)} e^{(-3z^2/c_f^2)} \quad (2)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi^{3/2}} e^{(-3x^2/a^2)} e^{(-3y^2/b^2)} e^{(-3z^2/c_r^2)} \quad (3)$$

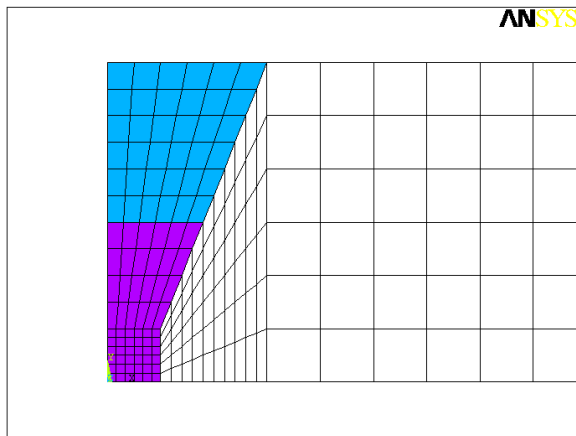
متغیر Q حرارت منتقل شده در واحد زمان بوده که برابر است با $Q = IU\eta$. بازده^{۱۱} در این روش جوشکاری بین ۵۰ الی ۷۰ درصد پیشنهاد می‌شود. در این تحقیق به علت ارائه نتایج بهتر و نزدیک‌تری به نتایج کار آزمایشگاهی از مقدار ۶۰ درصد برای بازده استفاده شده است. جدول شماره (۲) عوامل در نظر گرفته شده برای مدل گلداک در جوشکاری تک پاسه صفحه‌ای به ضخامت ۲ میلی متر را نشان می‌دهد. مقادیر a و b با توجه به سطح مقطع هندسه جوش و مقدار c در جلو و عقب با توجه به ابعاد واقعی حوضچه و به روش تجربی تعیین شده‌اند.

جدول (۲): مقدار عوامل مدل گلداک

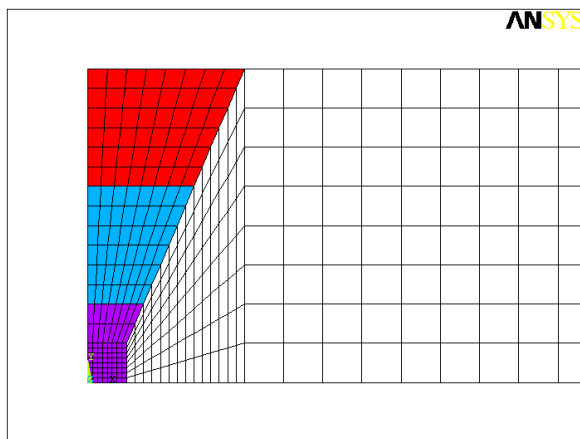
عوامل	مقدار
a	۰/۰۰۲ m
b	۰/۰۰۲ m
c_f	۰/۰۰۷ m
c_r	۰/۰۰۲ m
f_f	۱/۴
f_r	۰/۶

۳-۲- تحلیل مکانیکی

نتایج تحلیل حرارتی به عنوان اطلاعات ورودی تحلیل مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بعلت تقارن، فقط نیمی از



شکل (۵): مدل المان‌بندی شده صفحه‌ای به ضخامت ۶ میلی‌متر



شکل (۶): مدل المان‌بندی شده صفحه‌ای به ضخامت ۸ میلی‌متر

برای شبیه‌سازی فلز پرکن^{۲۰} اضافه شده در منطقه جوش به عنوان یک پاس جوش جدید در جوشکاری چند پاسه از روش تولد و مرگ المان^{۲۱} [۱۴] استفاده شده است. در این روش همه المان‌ها حتی آن دسته از المان‌هایی که در مراحل بعدی زنده می‌شوند باید در ابتدا ایجاد شوند و برای قرار دادن المان‌ها در حالت مرگ هیچ المانی جدا نمی‌شود و یا از بین نمی‌رود بلکه با ضرب کردن سختی آنها در یک ضریب بسیار کوچک، این المان‌ها غیرفعال می‌شوند. خصوصیات حرارتی و مکانیکی فلز جوش و پایه به صورت وابسته به دما [۵] تعریف شده است. جدول شماره (۳) شرایط جوشکاری را برای پاس‌های مختلف نشان می‌دهد.

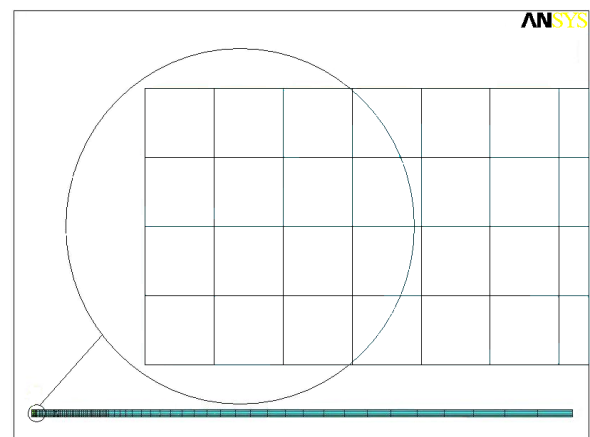
جدول (۳): شرایط جوشکاری برای پاس‌های مختلف جوش

تعداد پاس‌ها	جریان (A)	ولتاژ (V)	قطر سیم جوش (mm)	سرعت (mm/sec)
۱	۷۰-۸۰	۱۲	۲/۴	۲/۵
۲	۱۳۰-۱۴۰	۱۲	۲/۴	۲/۵
۳	۱۷۰-۱۸۰	۱۲	۲/۴	۲/۵

نمونه به عنوان مدل مورد مطالعه انتخاب شد و صفحه تقارن در جهت عمود بر خط جوش قیدگذاری گردید. نرخ کرنش عبارت است از:

$$\varepsilon_i = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{th} \quad (۴)$$

شبیه‌سازی فرایند جوشکاری قوسی انجام گرفته، شامل یک تحلیل حرارتی - مکانیکی غیرکوپله است. به این ترتیب که ابتدا یک مدل با هندسه مشخص از سطح مقطع میانی نمونه ترسیم و المان‌بندی شده، پس از آن یک تحلیل حرارتی گذرای غیرخطی و سپس یک تحلیل سازه‌ای غیرخطی روی این مدل انجام گرفت. اشکال (۴) الی (۶) مدل‌های المان محدود صفحات با ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهند. به علت شیب حرارتی بالا در منطقه جوش^{۲۲} و منطقه متأثر از حرارت^{۲۳}، از یک مش‌بندی به نسبت ریزتری تا فاصله ۲۰ میلی‌متر از خط جوش استفاده شده و پس از آن المان‌ها با نسبت خاصی بزرگ‌تر شده‌اند. در مدل‌سازی جوشکاری چند پاسه، صفحاتی با ابعاد مشخص شده در شکل شماره (۱) ولی با یک شیار V شکل با زاویه ۵۰ درجه و فاصله ۲ میلی‌متری بین صفحات مدل‌سازی شده‌اند. در مدل حرارتی از المان‌های صفحه‌ای ۴ گره‌ای^{۲۴} که هر گره فقط دارای یک درجه آزادی دمایی است استفاده شد و در مدل مکانیکی از المان‌های صفحه‌ای ۴ گره‌ای که هر گره دارای دو درجه آزادی جابجایی در جهات افقی و عمودی است استفاده شد.



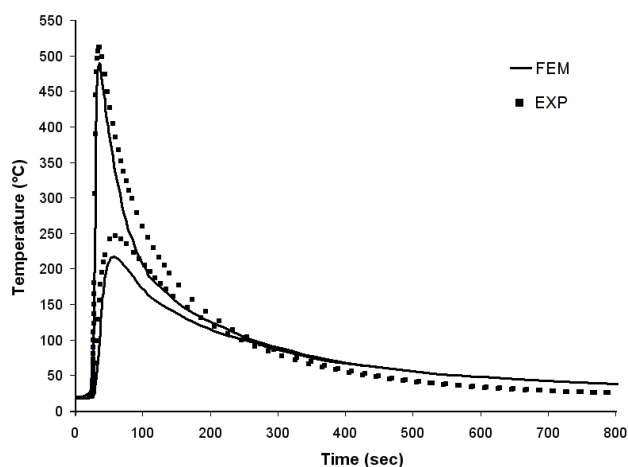
شکل (۴): مدل المان‌بندی شده صفحه‌ای به ضخامت ۲ میلی‌متر

۴- بحث و نتایج

۴-۱- نتایج حرارتی

۴-۱-۱- مقایسه نتایج حرارتی عددی و آزمایشگاهی

برای اطمینان از درستی عوامل در نظر گرفته شده در مدل گلدک و مقایسه نتایج شبیه‌سازی حرارتی با نتایج آزمایشگاهی، چرخه حرارتی نقاطی به فواصل ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر از خط جوش با چرخه حرارتی گزارش شده به وسیله دماسنج‌های متصل شده در همین نقاط مقایسه شد. با توجه به شکل (۷) و مقایسه بین این نتایج می‌توان درستی عوامل در نظر گرفته شده را دریافت.

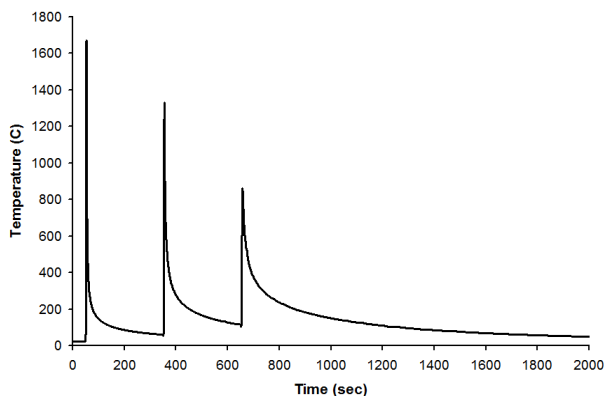


شکل (۶): مقایسه نتایج شبیه‌سازی چرخه حرارتی و کار آزمایشگاهی

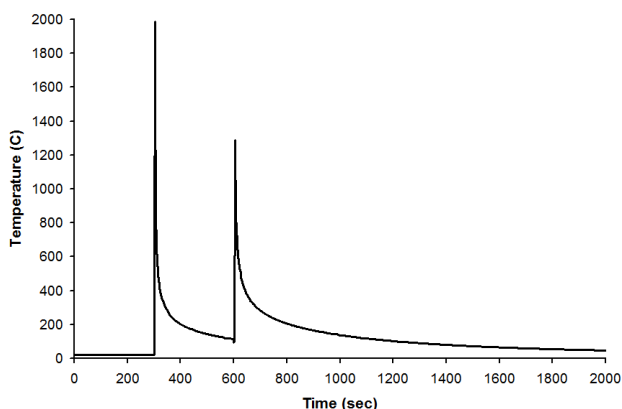
۴-۱-۲- نتایج حرارتی جوشکاری چند پاسه

اشکال (۸) الی (۱۰)، چرخه حرارتی نقاط مختلفی روی خط جوش در جوشکاری سه پاسه صفحه ۸ میلی‌متری را نشان می‌دهند. نقطه اول در ریشه^{۳۷} جوش واقع شده است. طبق شکل (۸) نمودار حرارتی این نقطه دارای سه مقدار حداکثر مجزا است. حداکثر مقدار دما در نقطه اول برابر با ۱۶۷۱ درجه سانتی‌گراد است که در جوشکاری پاس اول ایجاد شده. شکل (۹) نمودار حرارتی را برای نقطه‌ای در وسط ضخامت صفحه نشان می‌دهد. در هنگام جوشکاری پاس اول هیچ ماده‌ای در این نقطه وجود ندارد یعنی در طول جوشکاری اولین پاس دمای این نقطه برابر دمای محیط معادل ۲۰ درجه سانتی‌گراد ثابت باقی می‌ماند. این نقطه هنگام جوشکاری پاس دوم ایجاد شده و سپس تحت اثر جوشکاری سومین پاس نیز قرار می‌گیرد. در نتیجه، نمودار حرارتی این نقطه فقط دارای دو مقدار حداکثر

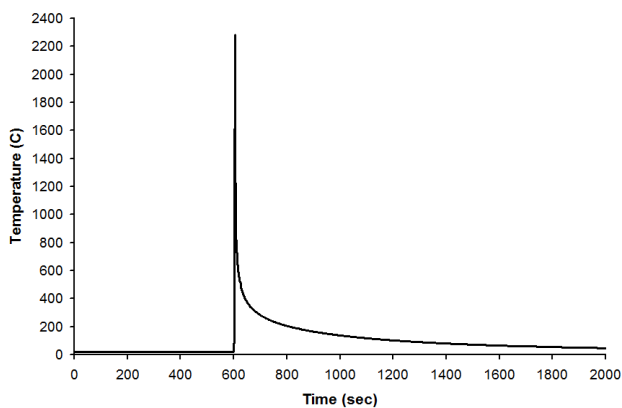
است. شکل (۱۰) نیز نمودار حرارتی را برای نقطه‌ای روی گرده جوش نشان می‌دهد. در هنگام جوشکاری پاس‌های اول و دوم هیچ ماده‌ای در این منطقه وجود ندارد و در طول جوشکاری اولین و دومین پاس دمای این نقطه برابر دمای محیط ثابت باقی می‌ماند. این نقطه هنگام جوشکاری پاس سوم ایجاد می‌شود. در نتیجه، نمودار حرارتی این نقطه فقط دارای یک مقدار حداکثر حرارتی است.



شکل (۸): چرخه حرارتی نقطه‌ای در ریشه جوش



شکل (۹): چرخه حرارتی نقطه‌ای در وسط ضخامت

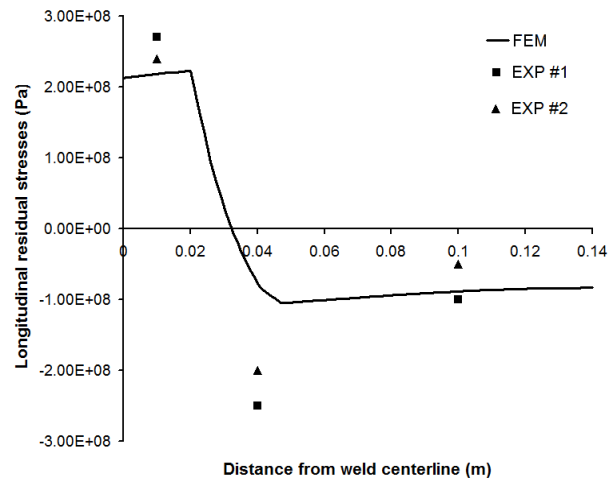


شکل (۱۰): چرخه حرارتی نقطه‌ای در گرده جوش

۲-۴- نتایج تنش‌های پسماند

۱-۲-۴ مقایسه نتایج تنش پسماند عددی و آزمایشگاهی

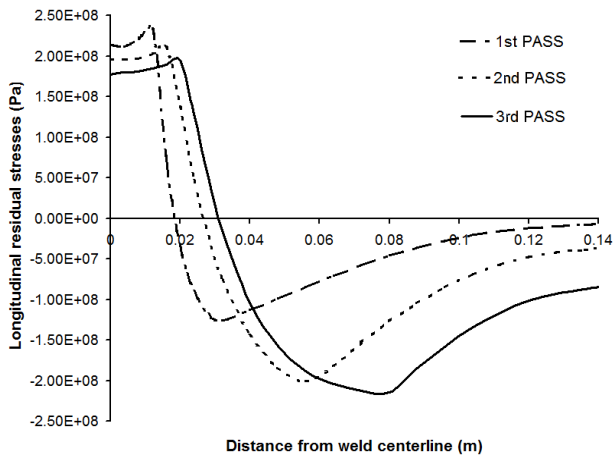
اندازه‌گیری تنش‌های پسماند روی دو نمونه صفحه جوشکاری شده مشابه با ضخامت ۲ میلی‌متر تکرار شد. شکل (۱۱) نتایج این دو بررسی آزمایشگاهی و مقایسه آنها با نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. نتایج مشابه بدست آمده در این دو تکرار، نشان دهنده تکرارپذیر بودن کار آزمایشگاهی است.



شکل (۱۱): مقایسه نتایج کار آزمایشگاهی با نتایج المان محدود

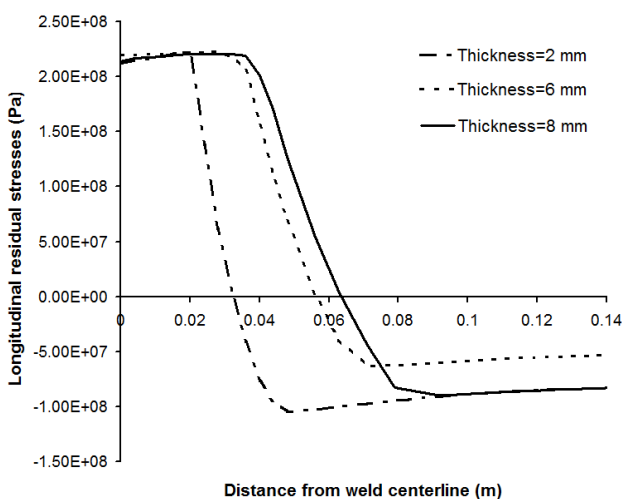
۲-۲-۴ نتایج تنش پسماند در جوشکاری چند پاسه

شکل (۱۲) تنش‌های پسماند طولی در ریشه جوش از جوشکاری سه پاسه صفحه ۸ میلی‌متری را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری، حداکثر مقدار عددی تنش‌های پسماند کششی کاهش می‌یابد. علت آن را می‌توان این طور توجیح نمود که با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری، به طور مداوم چرخه‌های حرارتی جدیدی روی منطقه جوش اعمال می‌شوند که همین چرخه‌های حرارتی باعث نرم شدن^{۲۸} جزئی فلز در منطقه ریشه جوش و پاس‌های قبلی شده و باعث کاهش تنش‌های پسماند در این منطقه می‌شود. ولی با توجه به منطقه تنش‌های فشاری مشخص شد که با اضافه شدن هر پاس جوشکاری، تنش‌های ایجاد شده ناشی از پاس جدید به تنش‌های ایجاد شده ناشی از پاس‌های قبلی اضافه می‌شود و باعث منفی‌تر شدن تنش‌ها در این منطقه می‌شود.



شکل (۱۲): مقایسه تنش‌های پسماند در جوشکاری چند پاسه

شکل (۱۳) تنش‌های پسماند طولی در گرده جوش صفحات مورد بررسی با ضخامت‌های مختلف را پس از انجام آخرین پاس جوشکاری نشان می‌دهد. اشکال (۱۲) و (۱۳) نشان می‌دهند که با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری علاوه بر تغییر حداکثر مقدار عددی تنش‌های پسماند که در قسمت قبل توضیح داده شد، تغییراتی نیز در توزیع این تنش‌ها رخ می‌دهد. به این ترتیب که با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری در اثر افزایش ضخامت صفحات، منطقه‌ی دارای تنش‌های پسماند کششی افزایش می‌یابد که علت آن را می‌توان همان علت بیان شده در قسمت قبل دانست؛ یعنی با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری، به طور مداوم چرخه حرارتی جدیدی روی صفحه اعمال و باعث ایجاد تنش‌های پسماند جدید شده که منجر به گسترش و وسعت منطقه حاوی تنش‌های پسماند می‌گردد. البته این بحث در مورد تنش‌های پسماند فشاری نیز درست است.



شکل (۱۳): بررسی اثر تعداد پاس روی گستره تنش‌های پسماند کششی

۴-۲-۳ بررسی اثر تعداد پاس روی تنش‌های پسماند

صفحات، حداکثر مقدار عددی تنش‌های پسماند کششی کاهش می‌یابند.

- با توجه به منطقه تنش‌های فشاری مشخص شد که با اضافه شدن هر پاس جوشکاری، تنش‌های ایجاد شده ناشی از پاس جدید به تنش‌های ایجاد شده ناشی از پاس‌های قبلی اضافه می‌شود و باعث منفی‌تر شدن تنش‌ها در این منطقه خواهد شد.

- با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری در اثر افزایش ضخامت صفحات، منطقه‌ی دارای تنش‌های پسماند کششی و فشاری افزایش می‌یابد.

۶- فهرست علائم

k	ضریب هدایت حرارتی، $W/m\ ^\circ C$
c	گرمای ویژه، $J/kg\ ^\circ C$
T	دما، $^\circ C$
t	زمان، sec
Q	نرخ تولید حرارت، W
f_f	حرارت منتقل شده به جلوی حوضچه
f_r	حرارت منتقل شده به عقب حوضچه
I	شدت جریان، A
U	ولتاژ، V
ρ	چگالی، kg/m^3
η	بازده
$\dot{\epsilon}_i$	نرخ کرنش کل
$\dot{\epsilon}^e$	نرخ کرنش الاستیک
$\dot{\epsilon}^p$	نرخ کرنش پلاستیک
$\dot{\epsilon}^{th}$	نرخ کرنش حرارتی

در کنار این مجموعه، تحقیقاتی نیز در مورد اثر تغییرات ضخامت صفحات و بدون تغییر در تعداد پاس‌های جوشکاری روی تنش‌های پسماند برای مقایسه با نتایج ارائه شده در این مقاله انجام گرفت. برای این کار، صفحات فولاد ضدزنگ با ضخامت ۱ الی ۳ میلی‌متر به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با تغییر ضخامت صفحات، حرارت ورودی در واحد ضخامت تغییر می‌یابد. افزایش یا کاهش حرارت ورودی هیچ اثری روی حداکثر مقدار عددی تنش‌های پسماند طولی کششی نداشته ولی باعث تغییر حداکثر مقدار عددی تنش‌های پسماند طولی فشاری می‌شود. کاهش حرارت ورودی همچنین باعث افزایش پهنای منطقه تنش‌های پسماند طولی کششی و کاهش پهنای منطقه تنش‌های پسماند طولی فشاری می‌شود [۱۵].

۵- نتیجه و جمع بندی

در این مقاله، به بررسی میدان‌های حرارتی گذرا و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری چند پاسه لب به لب صفحات فولاد ضدزنگ ۳۰۴ به روش جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود تنگستن پرداخته شد. مسئله، به وسیله تحلیل المان محدود حرارتی - مکانیکی غیرخطی غیرکوپله در حالت دو بعدی تحلیل شد و برای بررسی درستی نتایج تحلیل عددی، میدان‌های حرارتی و تنش‌های پسماند یک نمونه آزمایشگاهی با استفاده از روش سوراخکاری تعیین شدند. نتایج نشان می‌دهند که:

- با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری در اثر افزایش ضخامت

۷- مراجع

- | | | | |
|-----|---|-----|---|
| [۶] | Chang, P. H.; and Teng, T. L.; "Numerical and Experimental Investigations on the Residual Stresses of the Butt-Welded Joints", Computational Materials Science, 29, pp. 511-522, 2004. | [۱] | Rybicki, E. F.; "Computation of Residual Stresses due to Multi-Pass Welds in Piping Systems", Journal Pressure Vessel Technology, 101, pp. 149-154, 1979. |
| [۷] | Durantou, P.; Devaux, J.; Robin, V.; Gilles, P.; and Bergheau, J. M.; "3D Modeling of Multi-Pass Welding of a 316L Stainless Steel Pipe", Journal of Materials Processing Technology, 153, pp. 457-463, 2004. | [۲] | Arnold Free, J.; "Predicting Residual Stresses in Multi-Pass Weldments with the Finite Element Method", Computers & Structures, 32, 2, pp. 365-378, 1989.. |
| [۸] | Cho, J. R.; Lee, Y. B.; Moon, Y. H.; and Van Tyne, C. J.; "Investigation of Residual Stress and Post Weld Heat Treatment of Multi-Pass Welds by Finite Element Method and Experiments", Journal of Materials Processing Technology, 155, pp. 1690-1695, 2004. | [۳] | Lejeail, Y.; "Simulation of a Stainless Steel Multi-Pass Weldment", 5 th International Conference on Residual Stresses (ICRS-5), Linkoping, Sweden, pp. 484-489, June, 1997. |
| [۹] | Akbari Mousavi, S. A. A.; and Miresmaeili, R.; "Experimental and Numerical Analysis of Residual Stress Distribution in TIG Welding Process for 304L Stainless Steel", Journal of Materials Processing Technology, 208, pp. 383-394, 2008. | [۴] | Teng, T. L.; and Lin, C. C.; "Effect of Welding Conditions on Residual Stresses due to Butt Welds", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 75, pp. 857-864, 1998. |
| | | [۵] | Brickstad, B.; and Josefson, B. L.; "A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 75, pp. 11-25, 1998. |

- Goldak, J. A.; and Akhlaghi, M.; Computational Welding Mechanics, Springer, 2005. [۱۳]
- ANSYS User Manual, ANSYS release 10.0., Swanson Analysis System, Houston, USA, 2006. [۱۴]
- Seyyedian, M.; Amini, Sh.; and Haghpanahi, M.; “Study of the Effect of Thickness on Residual Stresses in Butt-Welding of SUS304 Plates”, The 62nd Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding (IIW), Singapore, pp. 195–200, 2009. [۱۵]
- Deng, D.; “FEM Prediction of Welding Residual stress and Distortion in Carbon Steel Considering Phase Transformation Effects”, Material and Design, 30, pp. 359–366, 2009. [۱۰]
- Sattari-Far, I.; and Farahani, M. R.; “Effect of the Weld Groove Shape and Pass Number on Residual Stresses in Butt-Welded Pipes”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 86, pp. 723–731, 2009. [۱۱]
- ASTM Standard: “Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method”, Designation: E 837-01, 2002. [۱۲]

۸- زیر نویس ها

- ۱ ANSYS
 ۲ Rybicki
 ۳ Arnold Free
 ۴ Lejeail
 ۵ Rosenthal
 ۶ Teng
 ۷ Brickstad
 ۸ Chang
 ۹ X-Ray Diffraction
 ۱۰ Duranton
 ۱۱ Cho
 ۱۲ Deng
 ۱۳ Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)
 ۱۴ Hole Drilling Method
 ۱۵ Groove
 ۱۶ Gap
 ۱۷ Thermocouples
 ۱۸ Strain Gages
 ۱۹ Double Ellipsoid
 ۲۰ Goldak
 ۲۱ Efficiency
 ۲۲ Fusion Zone (FZ)
 ۲۳ Heat Affected Zone (HAZ)
 ۲۴ Node
 ۲۵ Filler Metal
 ۲۶ Element Birth and Death
 ۲۷ Root
 ۲۸ Annealing