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

شهاب‌الدين اميني[i] *; مهسا سيديان چوبي[ii]; محمد حق پناهي[iii]

چکیده

در جوشكاري چند پاسه، گستردگي تنش‌هاي پسماند و حداكثر مقدار آن با اضافه شدن هر پاس جوشكاري تغيير مي‌نمايد. فرايند شبيه‌سازي مي‌تواند براي تخمين مقادير و توزيع اين تنش‌ها مورد استفاده قرار گيرد. در اين مقاله، به بررسي ميدان‌هاي حرارتي گذرا و تنش‌هاي پسماند ناشي از جوشكاري چند پاسه لب به لب صفحات فولاد ضدزنگ ۳۰۴ به روش جوشكاري قوس الكتريكي با الكترود تنگستن پرداخته شده است. تحليل اين مطلب با استفاده از مدل المان محدود حرارتي - مكانيكي غيرخطي غيركوپله در حالت دو بعدي با استفاده از نرم افزار انسيس[۱] ۱۰ انجام شده است. در پايان، براي بررسي درستي نتايج تحليل عددي، توزيع دما براي يك نمونه و تنش‌هاي پسماند براي دو نمونه با استفاده از روش سوراخكاري اندازه‌گيري شدند. نتايج اين تحقيق نشان مي‌دهند كه با افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري در اثر افزايش ضخامت صفحات، حداكثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند كاهش يافته ولي توزيع اين تنش‌ها افزايش مي‌يابد.

کلمات کلیدی : ميدان حرارتي، تنش پسماند، جوشكاري چند پاسه، فولاد ضدزنگ، روش سوراخكاري

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 it's 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

---

تاريخ دريافت مقاله: ۱۳۸۸/۹/۱۰
تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۸/۲۵

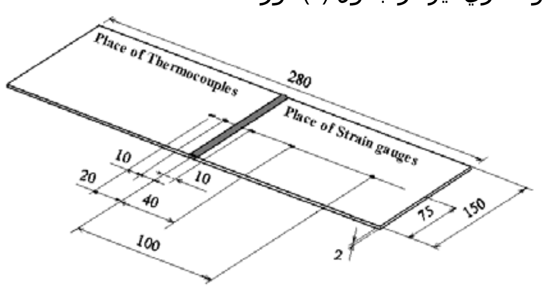
[i] * نويسنده مسئول و كارشناسي ارشد مكانيک; دانشگاه علم و صنعت ايران، دانشكده مكانيک: shahab_amini1363@yahoo.com.
[ii] دكتري مكانيک; دانشگاه علم و صنعت ايران، دانشكده مكانيک: mseyyedian@yahoo.com.
[iii] دانشيار; دانشگاه علم و صنعت ايران، دانشكده مكانيک: mhaghpanahi@yahoo.com.

۱- مقدمه

جوشكاري ذوبي يكي از انواع فرايندهاي قابل اطمينان در اتصال فلزات است كه بطور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار مي‌گيرد. در اين ميان، جوشكاري چند پاسه صفحات فولاد ضدزنگ ٣٠٤ كاربرد بسيار گسترده‌اي در صنايع مختلف دارد. بعلت حرارت‌دهي موضعي و نرخ خنک شدن سريع، تنش‌هاي پسماند قابل توجهي در فلز جوش و پايه ايجاد مي‌شود. اين تنش‌هاي پسماند مي‌توانند مشكلات مهمي مانند كاهش عمر خستگي و يا افزايش احتمال شكست ترد را به همراه داشته باشند. عوامل زيادي روي بزرگي و توزيع اين تنش‌ها اثرگذار هستند. برخي از محققان نيز به بررسي اثر اين فرايند بر روي تنش‌هاي پسماند پرداخته‌اند. ريبيكي[٢] [۱] مقدار و توزيع تنش‌هاي پسماند در جوشكاري چند پاسه لوله‌ها را به كمک يک مدل محاسباتي تخمين زده و برابري خوبي بين نتايج اين مدل و نتايج آزمايشگاهي بدست آورده است. آرنولدفري[٣] [۲] به بررسي و تخمين تنش‌هاي پسماند با استفاده از روش المان محدود و ارائه يک مدل تئوري اصلاح شده پرداخته كه قادر به تخمين تنش‌هاي پسماند سه بعدي در نمونه‌هاي جوشكاري شده چند پاسه است. لجيل[٤] [۳] يک نمونه H شكل جوشكاري شده چند پاسه فولاد ضدزنگ را به كمک روش المان محدود بررسي نموده است. ميدان‌هاي دمايي را با استفاده از معادله روزنتال[٥] محاسبه و با نتايج آزمايشگاهي مقايسه نموده و سپس براي يک شبيه‌سازي مكانيكي دو بعدي مورد استفاده قرار داده است. تنگ[٦] و همكارش [۴] اثر عواملي مانند سرعت، حركت قوس، ابعاد نمونه، شرايط مرزي و پيش گرمايش را روي مقدار و توزيع تنش‌هاي پسماند ناشي از جوشكاري صفحات فولادي به كمک روش المان محدود روي يک مدل سه بعدي مورد بررسي قرار داده‌اند. بريكستاد[٧] و همكارش [۵] با استفاده از يک مدل دو بعدي به بررسي تغييرات تنش‌هاي پسماند شعاعي و محوري در اثر تغيير پارامترهاي جوشكاري در امتداد ضخامت لوله‌هاي فولاد ضدزنگ پرداخته‌اند. چانگ[٨] و همكارش [۶] به ارزيابي تنش‌هاي پسماند ناشي از جوشكاري چند پاسه لب به لب صفحات فولادي با استفاده از روش المان محدود پرداخته و با نتايج آزمايشگاهي به روش تفرق اشعه ايكس[٩] مقايسه نموده‌اند. دورانتن[١٠] و همكارانش [۷] جوشكاري چند پاسه لوله‌هاي فولاد ضدزنگ را به كمک يک مدل سه بعدي شبيه‌سازي و با نتايج آزمايشگاهي مقايسه نموده و برابري خوبي بدست آورده‌اند. چو[١١] و همكارانش [۸] توزيع تنش‌هاي پسماند بعد از جوشكاري و بعد از عمليات حرارتي را به كمک تحليل المان محدود بررسي نموده‌اند. براي اين كار از يک مدل دو بعدي و مقايسه نتايج آن با كار آزمايشگاهي استفاده نموده‌اند. اكبری موسوي و همكارش [۹] اثر هندسه شيار روي توزيع تنش‌هاي پسماند را با استفاده از يک تحليل المان محدود سه بعدي بررسي و با نتايج آزمايشگاهي انجام شده به روش تفرق اشعه ايكس مقايسه نموده كه برابري خوبي داشته‌اند. دنگ[١٢] [۱۰] اثر تغيير فاز و تغيير حجم ناشي از تبديل فاز آستنيت به مارتنزيت روي تنش‌هاي پسماند نهايي ناشي از جوشكاري فولادهاي كربني را به كمک يک مدل المان محدود سه بعدي مورد بررسي قرار داد. ستاري‌فر و همكارش [۱۱] با استفاده از مدل المان محدود سه بعدي علاوه بر بررسي تعداد پاس روي تنش‌هاي پسماند لوله‌هايي با ضخامت‌هاي مختلف به بررسي شكل شيار نيز پرداخته و نتايج بدست آمده را با نتايج آزمايشگاهي انجام شده به روش سوراخكاري مقايسه نموده‌اند. نتايج بدست آمده نشان دادند كه اين دو عامل مهم مي‌توانند اثر قابل توجهي روي مقدار و توزيع تنش‌هاي پسماند داشته باشند. در اين مقاله، اثر افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري در اثر افزايش ضخامت صفحات فولاد ضدزنگ ٣٠٤ روي تنش‌هاي پسماند بررسي شده است. براي اين كار، تنش‌هاي پسماند در صفحاتي به ضخامت‌هاي ۲، ٦، ٨ ميلي‌متر كه به ترتيب به وسيله ١، ٢، ٣ پاس و به روش جوشكاري قوس الكتريكي با الكترود تنگستن[١٣] جوشكاري شده‌اند، به كمک روش المان محدود تعيين شده و سپس از روش سوراخكاري[١٤] [۱۲] براي تأييد نتايج شبيه‌سازي استفاده شد.

۲- كار آزمايشگاهی

دو صفحه از جنس فولاد ضدزنگ ٣٠٤ به ابعاد ١٥٠×١٤٠×٢ ميلي‌متر، بدون در نظر گرفتن شيار[١٥] و بدون فاصله[١٦] و بدون گيره‌بندي و به صورت لب به لب به روش جوشكاري قوس الكتريكي با الكترود تنگستن طي يک پاس جوشكاري شدند. قبل از انجام آزمايش‌ها، همه نمونه‌ها تنش‌زدايي شدند. شكل (۱) هندسه، جزييات ابعادي، محل نصب دماسنج‌ها[١٧] و كرنش‌سنج‌ها[١٨] را نشان مي‌دهد. شرايط جوشكاري نيز در جدول (۱) آورده شده است.

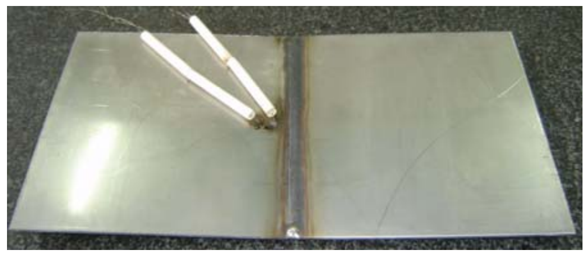


شكل (۱): هندسه، ابعاد و محل نصب ترموكوپل‌ها و كرنش‌سنج‌هاي نمونه آزمايشگاهي

جدول (۱): شرايط جوشكاري تک پاسه صفحه ۲ میلي‌متري

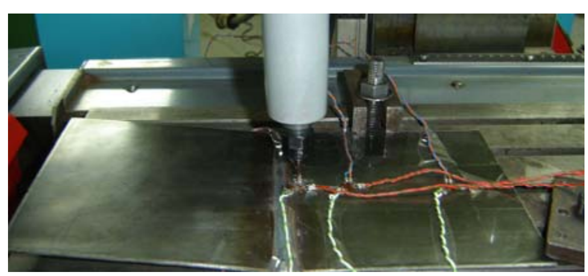
سرعت (mm/sec)	ولتاژ (V)	جريان (A)	ضخامت (mm)
۲/۵	۱۲	۸۰	۲

سطوح بالايي، پاييني و جانبي اين صفحات در برابر جريان هواي آرام با دماي محيط قرار داشتند. براي تحليل حرارتي و اندازه‌گيري دما، دو عدد دماسنج نوع K در دو نقطه به فواصل ۱۰ و ۲۰ ميلي‌متري از خط جوش و در سطح مقطع مياني جوش روي سطح بالايي صفحه سمت چپ نصب شدند. شكل (۲)، دماسنج‌هاي نصب شده را نشان مي‌دهد. براي جلوگيري از گرم شدن دماسنج‌ها در اثر تشعشع ناشي از قوس جوشكاري، از يک صفحه محافظ بين دماسنج‌ها و خط جوش استفاده شد.



شكل (۲): دماسنج‌هاي نصب شده براي اندازه‌گيري دما

براي اندازه‌گيري تنش‌هاي پسماند از روش سوراخكاري استفاده گرديد [۱۲]. سه عدد كرنش‌سنج نوع A در فواصل ۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ ميلي‌متري از خط جوش و در سطح مقطع مياني جوش روي سطح بالايي صفحه سمت راست نصب شدند. براي انجام آزمايش از ابزار سوراخكاري به قطر ۲ ميلي‌متر و يک ابزار دوراني با سرعت ۳۰۰۰۰ دور در دقيقه استفاده گرديد. هم مركز كردن ابزار با مركز كرنش‌سنج‌ها نيز با چشم غيرمسلح انجام شد. شكل (۳)، صفحه نمونه مورد آزمايش را در حال انجام سوراخكاري نشان مي‌دهد. در پايان براي اطمينان از نتايج كار آزمايشگاهي، اندازه‌گيري تنش پسماند روي دو قطعه متفاوت تكرار شد.



شكل (۳): صفحه نمونه در حين انجام آزمايش سوراخكاري

۳- تحليل المان محدود

۳-۱- تحليل حرارتی

معادله حاكم براي تحليل انتقال حرارت گذرا به صورت رابطه (۱) است:

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q \qquad (۱)$$

از انتقال حرارت در اثر تشعشع چشم‌پوشي شده و فقط شرايط مرزي جابجايي با ضريب انتقال حرارت ۱۵ $W/m^2{}^\circ C$ براي جريان آرام هواي محيط با دماي ۲۰ $^\circ C$ در نظر گرفته شده است. براي شبيه‌سازي منبع حرارتي جوشكاري از مدل توليد حرارت حجمي دو بيضي‌گون[۱۹] گلداک[۲۰] [۱۳] استفاده شده است. اين مدل به صورت زير تعريف مي‌شود:

$$q_f(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}f_fQ}{abc_f\pi^{3/2}}e^{(-3x^2/a^2)}e^{(-3y^2/b^2)}e^{(-3z^2/c_f^2)} \qquad (۲)$$

$$q_r(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}f_rQ}{abc_r\pi^{3/2}}e^{(-3x^2/a^2)}e^{(-3y^2/b^2)}e^{(-3z^2/c_r^2)} \qquad (۳)$$

متغير Q حرارت منتقل شده در واحد زمان بوده كه برابر است با $Q=IU\eta$. بازده[۲۱] در اين روش جوشكاري بين ۵۰ الي ۷۰ درصد پيشنهاد مي‌شود. در اين تحقيق به علت ارائه نتايج بهتر و نزديک‌تري به نتايج كار آزمايشگاهي از مقدار ٦٠ درصد براي بازده استفاده شده است. جدول شماره (۲) عوامل در نظر گرفته شده براي مدل گلداک در جوشكاري تک پاسه صفحه‌اي به ضخامت ۲ ميلي‌متر را نشان مي‌دهد. مقادير a و b با توجه به سطح مقطع هندسه جوش و مقدار c در جلو و عقب با توجه به ابعاد واقعي حوضچه و به روش تجربي تعيين شده‌اند.

جدول (۲): مقدار عوامل مدل گلداک

مقدار	عوامل
۰/۰۰۳ m	a
۰/۰۰۲ m	b
۰/۰۰۷ m	c_f
۰/۰۰۳ m	c_r
۱/۴	f_f
۰/۶	f_r

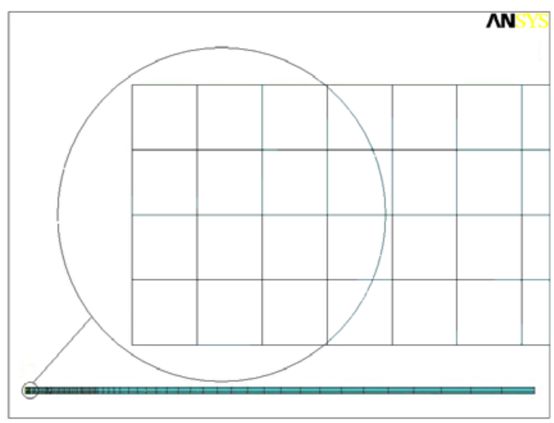
۳-۲- تحليل مكانيكی

نتايج تحليل حرارتي به عنوان اطلاعات ورودي تحليل مكانيكي مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بعلت تقارن، فقط نيمي از

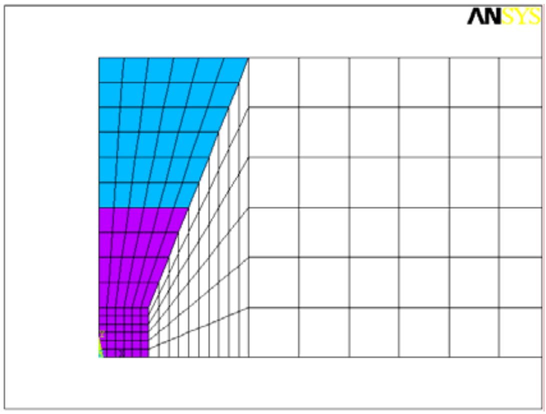
نمونه به عنوان مدل مورد مطالعه انتخاب شد و صفحه تقارن در جهت عمود بر خط جوش قيدگذاري گرديد. نرخ کرنش عبارت است از:

$$\dot{\varepsilon}_t = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p + \dot{\varepsilon}^{th} \qquad (٤)$$

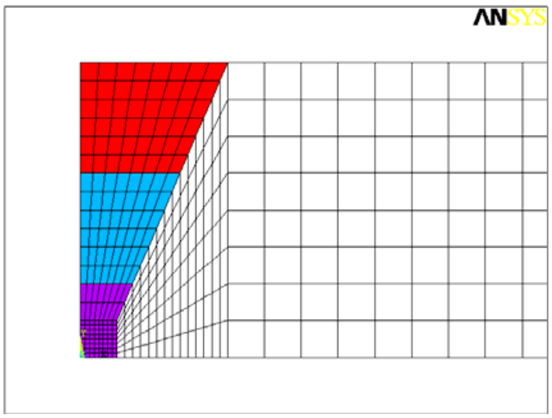
شبيه‌سازي فرايند جوشکاري قوسي انجام گرفته، شامل يک تحليل حرارتي - مکانيکي غيرکوپله است. به اين ترتيب که ابتدا يک مدل با هندسه مشخص از سطح مقطع مياني نمونه ترسيم و المان‌بندي شده، پس از آن يک تحليل حرارتي گذراي غيرخطي و سپس يک تحليل سازه‌اي غيرخطي روي اين مدل انجام گرفت. اشکال (٤) الي (٦) مدل‌هاي المان محدود صفحات با ضخامت‌هاي مختلف را نشان مي‌دهند. به علت شيب حرارتي بالا در منطقه جوش[٢٢] و منطقه متأثر از حرارت[٢٣]، از يک مش‌بندي به نسبت ريزتري تا فاصله ٢٠ ميلي‌متر از خط جوش استفاده شده و پس از آن المان‌ها با نسبت خاصي بزرگ‌تر شده‌اند. در مدل‌سازي جوشکاري چند پاسه، صفحاتي با ابعاد مشخص شده در شکل شماره (١) ولي با يک شيار V شکل با زاويه ٥٠ درجه و فاصله ٢ ميلي‌متري بين صفحات مدل‌سازي شده‌اند. در مدل حرارتي از المان‌هاي صفحه‌اي ٤ گره‌اي[٢٤] که هر گره فقط داراي يک درجه آزادي دمايي است استفاده شد و در مدل مکانيکي از المان‌هاي صفحه‌اي ٤ گره‌اي که هر گره داراي دو درجه آزادي جابجايي در جهات افقي و عمودي است استفاده شد.



شکل (٤): مدل المان‌بندي شده صفحه‌اي به ضخامت ٢ ميلي‌متر



شکل (٥): مدل المان‌بندي شده صفحه‌اي به ضخامت ٦ ميلي‌متر



شکل (٦): مدل المان‌بندي شده صفحه‌اي به ضخامت ٨ ميلي‌متر

براي شبيه‌سازي فلز پرکن[٢٥] اضافه شده در منطقه جوش به عنوان يک پاس جوش جديد در جوشکاري چند پاسه از روش تولد و مرگ المان[٢٦] [١٤] استفاده شده است. در اين روش همه المان‌ها حتي آن دسته از المان‌هايي که در مراحل بعدي زنده مي‌شوند بايد در ابتدا ايجاد شوند و براي قرار دادن المان‌ها در حالت مرگ هيچ الماني جدا نمي‌شود و يا از بين نمي‌رود بلکه با ضرب کردن سختي آنها در يک ضريب بسيار کوچک، اين المان‌ها غيرفعال مي‌شوند. خصوصيات حرارتي و مکانيکي فلز جوش و پايه به صورت وابسته به دما [٥] تعريف شده است. جدول شماره (٣) شرايط جوشکاري را براي پاس‌هاي مختلف نشان مي‌دهد.

جدول (٣): شرايط جوشکاري براي پاس‌هاي مختلف جوش

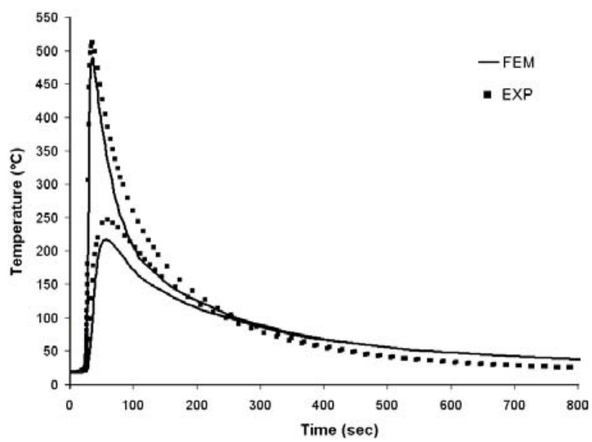
سرعت (mm/sec)	قطر سيم جوش (mm)	ولتاژ (V)	جريان (A)	تعداد پاس‌ها
۲/۵	۲/۴	۱۲	۷۰-۸۰	۱
۲/۵	۲/۴	۱۲	۱۳۰-۱۴۰	۲
۲/۵	۲/۴	۱۲	۱۷۰-۱۸۰	۳

۴- بحث و نتايج

۴-۱- نتايج حرارتی

۴-۱-۱- مقايسه نتايج حرارتی عددی و آزمايشگاهی

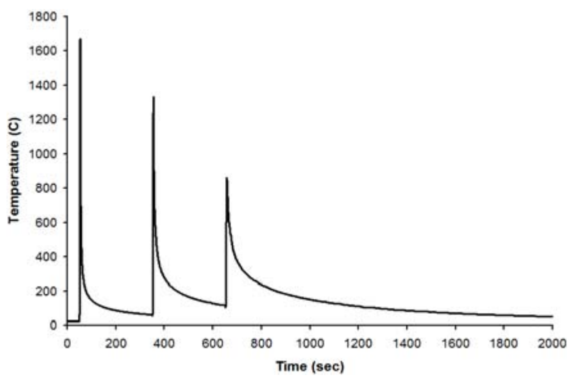
براي اطمينان از درستي عوامل در نظر گرفته شده در مدل گلداک و مقايسه نتايج شبيه‌سازي حرارتي با نتايج آزمايشگاهي، چرخه حرارتي نقاطي به فواصل ۱۰ و۲۰ ميلي‌متر از خط جوش با چرخه حرارتي گزارش شده به وسيله دماسنج‌هاي متصل شده در همين نقاط مقايسه شد. با توجه به شکل (۷) و مقايسه بين اين نتايج مي‌توان درستي عوامل در نظر گرفته شده را دريافت.



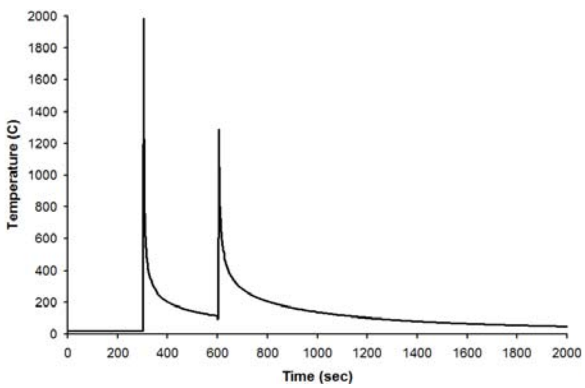
شکل (٦): مقايسه نتايج شبيه‌سازي چرخه حرارتي و کار آزمايشگاهي

۴-۱-۲- نتايج حرارتی جوشکاری چند پاسه

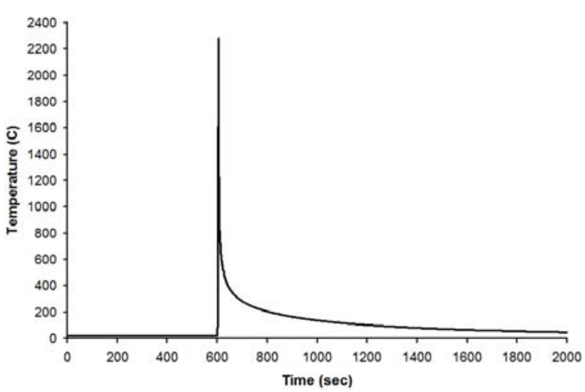
اشکال (۸) الي (۱۰)، چرخه حرارتي نقاط مختلفي روي خط جوش در جوشکاري سه پاسه صفحه ۸ ميلي‌متري را نشان مي‌دهند. نقطه اول در ريشه[۲۷] جوش واقع شده است. طبق شکل (۸) نمودار حرارتي اين نقطه داراي سه مقدار حداکثر مجزا است. حداکثر مقدار دما در نقطه اول برابر با ١٦٧١ درجه سانتي‌گراد است که در جوشکاري پاس اول ايجاد شده. شکل (۹) نمودار حرارتي را براي نقطه‌اي در وسط ضخامت صفحه نشان مي‌دهد. در هنگام جوشکاري پاس اول هيچ ماده‌اي در اين نقطه وجود ندارد يعني در طول جوشکاري اولين پاس دماي اين نقطه برابر دماي محيط معادل ۲۰ درجه سانتي‌گراد ثابت باقي مي‌ماند. اين نقطه هنگام جوشکاري پاس دوم ايجاد شده و سپس تحت اثر جوشکاري سومين پاس نيز قرار مي‌گيرد. در نتيجه، نمودار حرارتي اين نقطه فقط داراي دو مقدار حداکثر است. شکل (۱۰) نيز نمودار حرارتي را براي نقطه‌اي روي گرده جوش نشان مي‌دهد. در هنگام جوشکاري پاس‌هاي اول و دوم هيچ ماده‌اي در اين منطقه وجود ندارد و در طول جوشکاري اولين و دومين پاس دماي اين نقطه برابر دماي محيط ثابت باقي مي‌ماند. اين نقطه هنگام جوشکاري پاس سوم ايجاد مي‌شود. در نتيجه، نمودار حرارتي اين نقطه فقط داراي يک مقدار حداکثر حرارتي است.



شکل (۸): چرخه حرارتي نقطه‌اي در ريشه جوش



شکل (۹): چرخه حرارتي نقطه‌اي در وسط ضخامت

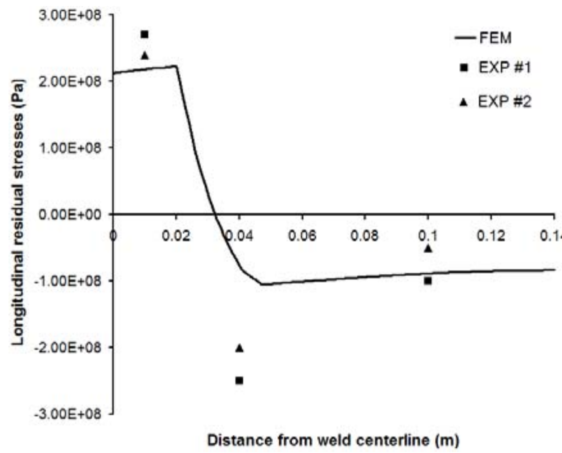


شکل (۱۰): چرخه حرارتي نقطه‌اي در گرده جوش

۴-۲- نتايج تنش‌های پسماند

۴-۲-۱ مقايسه نتايج تنش پسماند عددي و آزمايشگاهي

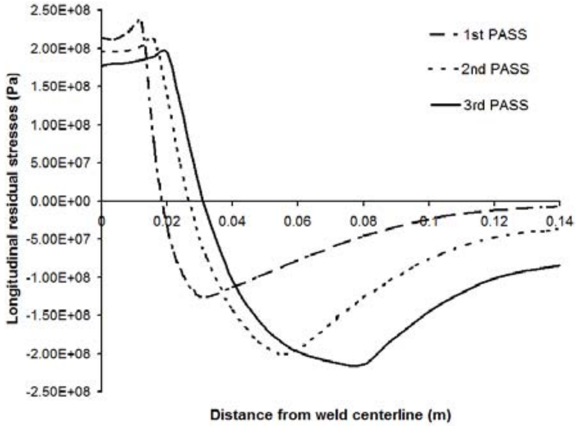
اندازه‌گيري تنش‌هاي پسماند روي دو نمونه صفحه جوشكاري شده مشابه با ضخامت ۲ ميلي‌متر تكرار شد. شكل (۱۱) نتايج اين دو بررسي آزمايشگاهي و مقايسه آنها با نتايج شبيه‌سازي را نشان مي‌دهد. نتايج مشابه بدست آمده در اين دو تكرار، نشان دهنده تكرارپذير بودن كار آزمايشگاهي است.



شكل (۱۱): مقايسه نتايج كار آزمايشگاهي با نتايج المان محدود

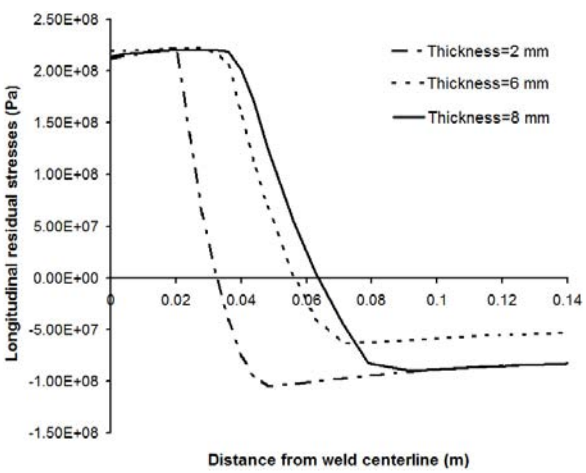
۴-۲-۲ نتايج تنش پسماند در جوشكاری چند پاسه

شكل (۱۲) تنش‌هاي پسماند طولي در ريشه جوش از جوشكاري سه پاسه صفحه ۸ ميلي‌متري را نشان مي‌دهد. با توجه به اين شكل مشخص است كه با افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري، حداكثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند كششي كاهش مي‌يابد. علت آن را مي‌توان اين طور توجيح نمود كه با افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري، به طور مداوم چرخه‌هاي حرارتي جديدي روي منطقه جوش اعمال مي‌شوند كه همين چرخه‌هاي حرارتي باعث نرم شدن[۲۸] جزئي فلز در منطقه ريشه جوش و پاس‌هاي قبلي شده و باعث كاهش تنش‌هاي پسماند در اين منطقه مي‌شود. ولي با توجه به منطقه تنش‌هاي فشاري مشخص شد كه با اضافه شدن هر پاس جوشكاري، تنش‌هاي ايجاد شده ناشي از پاس جديد به تنش‌هاي ايجاد شده ناشي از پاس‌هاي قبلي اضافه مي‌شود و باعث منفي‌تر شدن تنش‌ها در اين منطقه مي‌شود.



شكل (۱۲): مقايسه تنش‌هاي پسماند در جوشكاري چند پاسه

شكل (۱۳) تنش‌هاي پسماند طولي در گرده جوش صفحات مورد بررسي با ضخامت‌هاي مختلف را پس از انجام آخرين پاس جوشكاري نشان مي‌دهد. اشكال (۱۲) و (۱۳) نشان مي‌دهند كه با افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري علاوه بر تغيير حداكثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند كه در قسمت قبل توضيح داده شد، تغييراتي نيز در توزيع اين تنش‌ها رخ مي‌دهد. به اين ترتيب كه با افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري در اثر افزايش ضخامت صفحات، منطقه‌ي داراي تنش‌هاي پسماند كششي افزايش مي‌يابند كه علت آن را مي‌توان همان علت بيان شده در قسمت قبل دانست؛ يعني با افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري، به طور مداوم چرخه حرارتي جديدي روي صفحه اعمال و باعث ايجاد تنش‌هاي پسماند جديد شده كه منجر به گسترش وسعت منطقه حاوي تنش‌هاي پسماند مي‌گردد. البته اين بحث در مورد تنش‌هاي پسماند فشاري نيز درست است.



شكل (۱۳): بررسي اثر تعداد پاس روي گستره تنش‌هاي پسماند كششي

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

در کنار اين مجموعه، تحقيقاتي نيز در مورد اثر تغييرات ضخامت صفحات و بدون تغيير در تعداد پاس‌هاي جوشكاري روي تنش‌هاي پسماند براي مقايسه با نتايج ارائه شده در اين مقاله انجام گرفت. براي اين كار، صفحات فولاد ضدزنگ با ضخامت ۱ الي ۳ ميلي‌متر به صورت عددي و آزمايشگاهي مورد بررسي قرار گرفتند. نتايج اين تحقيق نشان مي‌دهد كه با تغيير ضخامت صفحات، حرارت ورودي در واحد ضخامت تغيير مي‌يابد. افزايش يا كاهش حرارت ورودي هيچ اثري روي حداكثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند طولي كششي نداشته ولي باعث تغيير حداكثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند طولي فشاري مي‌شود. كاهش حرارت ورودي همچنين باعث افزايش پهناي منطقه تنش‌هاي پسماند طولي كششي و كاهش پهناي منطقه تنش‌هاي پسماند طولي فشاري مي‌شود [۱۵].

۵- نتيجه و جمع‌بندی

در اين مقاله، به بررسي ميدان‌هاي حرارتي گذرا و تنش‌هاي پسماند ناشي از جوشكاري چند پاسه لب به لب صفحات فولاد ضدزنگ ۳۰٤ به روش جوشكاري قوس الكتريكي با الكترود تنگستن پرداخته شد. مسئله، به وسيله تحليل المان محدود حرارتي - مكانيكي غيرخطي غيركوپله در حالت دو بعدي تحليل شد و براي بررسي درستي نتايج تحليل عددي، ميدان‌هاي حرارتي و تنش‌هاي پسماند يک نمونه آزمايشگاهي با استفاده از روش سوراخكاري تعيين شدند. نتايج نشان مي‌دهند كه:

- با افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري در اثر افزايش ضخامت صفحات، حداكثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند كششي كاهش مي‌يابند.
- با توجه به منطقه تنش‌هاي فشاري مشخص شد كه با اضافه شدن هر پاس جوشكاري، تنش‌هاي ايجاد شده ناشي از پاس جديد به تنش‌هاي ايجاد شده ناشي از پاس‌هاي قبلي اضافه مي‌شود و باعث منفي‌تر شدن تنش‌ها در اين منطقه خواهد شد.
- با افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري در اثر افزايش ضخامت صفحات، منطقه‌ي داراي تنش‌هاي پسماند كششي و فشاري افزايش مي‌يابد.

۶- فهرست علائم

k	ضريب هدايت حرارتي، $W/m\,°C$
c	گرماي ويژه، $J/kg\,°C$
T	دما، $°C$
t	زمان، sec
Q	نرخ توليد حرارت، W
f_f	حرارت منتقل شده به جلوي حوضچه
f_r	حرارت منتقل شده به عقب حوضچه
I	شدت جريان، A
U	ولتاژ، V
ρ	چگالي، kg/m^3
η	بازده
$\dot{\varepsilon}_t$	نرخ كرنش كل
$\dot{\varepsilon}^e$	نرخ كرنش الاستيک
$\dot{\varepsilon}^p$	نرخ كرنش پلاستيک
$\dot{\varepsilon}^{th}$	نرخ كرنش حرارتي

۷- مراجع

[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.

[۲] Arnold Free, J.; “Predicting Residual Stresses in Multi-Pass Weldments with the Finite Element Method”, Computers & Structures, 32, 2, pp. 365–378, 1989..

[۳] Lejeail, Y.; “Simulation of a Stainless Steel Multi-Pass Weldment”, 5th International Conference on Residual Stresses (ICRS-5), Linkoping, Sweden, pp. 484–489, June, 1997.

[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.

[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.

[۷] Duranton, 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.

[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.

[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.

[۱۰] 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.

[۱۱] 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.

[۱۲] ASTM Standard: “Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method”, Designation: E 837-01, 2002.

[۱۳] Goldak, J. A.; and Akhlaghi, M.; Computational Welding Mechanics, Springer, 2005.

[۱۴] ANSYS User Manual, ANSYS release 10.0., Swanson Analysis System, Houston, USA, 2006.

[۱۵] 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.

۸- زیرنویس ها

۱ ANSYS
۲ Rybicki
۳ Arnold Free
٤ Lejeail
٥ Rosenthal
٦ Teng
۷ Brickstad
۸ Chang
۹ X-Ray Diffraction
۱۰ Duranton
۱۱ Cho
۱۲ Deng
۱۳ Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)
١٤ Hole Drilling Method
١٥ Groove
١٦ Gap
۱۷ Thermocouples
۱۸ Strain Gages
۱۹ Double Ellipsoid
۲۰ Goldak
۲۱ Efficiency
۲۲ Fusion Zone (FZ)
۲۳ Heat Affected Zone (HAZ)
٢٤ Node
٢٥ Filler Metal
٢٦ Element Birth and Death
۲۷ Root
۲۸ Annealing