



بررسی عددی اثر پوشش دهی جوشی بر تنش های پسماند ناشی از جوشکاری محیطی لوله های فولادی

مجید همت زاده، حسام‌الدین مشیدی*، ایرج ستاری فر

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۱ شهریور ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۱ دی ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۵ اسفند ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۱ اسفند ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

تنش پسماند
جوشکاری محیطی
پوشش دهی جوشی
تحلیل اجزا محدود
فولاد API X46

چکیده: یکی از روش‌های کاهش تنش‌های پسماند در جوشکاری لوله، پوشش دهی سطح خارجی لوله به وسیله جوشکاری است. در این تحقیق ابتدا یک مدل اجزا محدود جهت شبیه سازی فرایند جوشکاری محیطی دو لوله فولادی با در نظر گرفتن تغییرات فازی در نرم افزار سیسولد، توسعه یافته است و با استفاده از نتایج به دست آمده از روش کرنش سنجی سوراخ صحنه گذاری شده است. سپس با استفاده از تحلیل اجزا محدود به بررسی اثر استفاده از پوشش‌های ایجاد شده با سه نوع الکتروود جوشکاری مختلف بر تنش‌های پسماند ایجاد شده بر روی سطح داخلی لوله‌ها پرداخته شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که پوشش ایجاد شده با الکتروود ER70s باعث افزایش تنش‌های محوری و محیطی بر روی سطح داخلی لوله می‌شود، الکتروودهای ER304 و IN600 باعث کاهش تنش‌های پسماند محیطی بر روی سطح داخلی می‌شود و با افزایش انرژی جوش به عنوان یک عامل تأثیرگذار این تنش‌ها در ناحیه پوشش داده شده به حالت فشاری تبدیل می‌شوند. همچنین تنش‌های محوری حاصل از این دو الکتروود بر روی سطح داخلی لوله در انرژی جوش پایین از مقادیر تنش نمونه بدون پوشش بیشتر می‌باشد، با افزایش انرژی جوش مقدار این تنش‌ها هم کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

جوشکاری ذوبی به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف به کار می‌رود. به دلیل انبساط و انقباض غیریکنواخت ناشی از چرخه‌های گرم و سرد شدن حین جوشکاری، تنش‌های حرارتی موضعی در جوش و نواحی نزدیک آن ایجاد می‌گردد. تنش‌های پسماند کششی عملکرد سازه را تحت تأثیر قرار داده و می‌تواند باعث کاهش استحکام خستگی، بروز شکست ترد و یا ترک تنش-خوردگی^۱ شود [۱].

روش‌های متعدد مکانیکی مانند ساچمه زنی^۲، استفاده از الکتروودهای با دمای تحول پایین، ضربه زنی با چکش و ضربه زنی با فرکانس فراصوتی برای کاهش یا حذف تنش پسماند کششی از طریق ایجاد کرنش پلاستیک وجود دارد [۲]. با توجه به اینکه بیشترین مقدار تنش پسماند کششی در جوشکاری محیطی لوله‌ها در سطوح داخلی لوله ایجاد می‌شود، استفاده از روش‌های بیان شده به دلیل غیراجرایی بودن در سطوح داخلی لوله مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. در سال‌های اخیر از روش پوشش دهی جوشی^۳ برای جلوگیری از ایجاد ترک تنش خوردگی، تعمیر ترک‌ها و عیوب به‌وجود آمده بعد از جوشکاری و همچنین کاهش تنش‌های پسماند کششی در سطح داخلی

لوله استفاده می‌شود. این روش در پوشش دهی جوشکاری نازل به مخزن در راکتورهای هسته‌ای استفاده می‌شود که اغلب جوشکاری‌های غیرهم‌جنس و هندسه‌های غیرمشابه می‌باشند و مطالعات محدودی در زمینه جوشکاری لوله‌های مشابه انجام گرفته است، همچنین جنس مواد استفاده شده بیشتر شامل فولادهای زنگ‌نزن است [۳]. در پوشش دهی جوشی پس از انجام جوشکاری اصلی بین دو لوله پوششی از طریق جوشکاری به صورت محیطی بر روی سطح خارجی لوله ایجاد می‌شود [۴]. (شکل ۱)

از مزایای پوشش ایجاد شده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- کاهش تنش پسماند کششی و بعضاً ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح داخلی لوله
- افزایش ضخامت لوله در منطقه پوشش دهی شده
- تعمیر عیوب و ترک‌های ایجاد شده
- جلوگیری از ترک تنش خوردگی

از متغیرهای مؤثر در روش پوشش دهی می‌توان به طول پوشش در جهت محیطی، ضخامت پوشش، عرض پوشش در جهت محوری لوله، جنس لایه‌ی پوشش و همچنین متغیرهای جوشکاری از جمله انرژی جوش و تعداد پاس‌ها اشاره نمود [۴].

در سال ۲۰۰۲ دانگ و همکاران به بررسی اثر طول پوشش، بر تنش‌های پسماند در جوشکاری دو لوله مشابه از جنس فولاد زنگ نزن ۳۱۶ پرداختند. مشخص شد با افزایش طول پوشش تنش‌های پسماند محوری و محیطی بر

- 1 Stress corrosion cracking
- 2 Shot pining
- 3 Overlay welding

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.moshayedi@aut.ac.ir

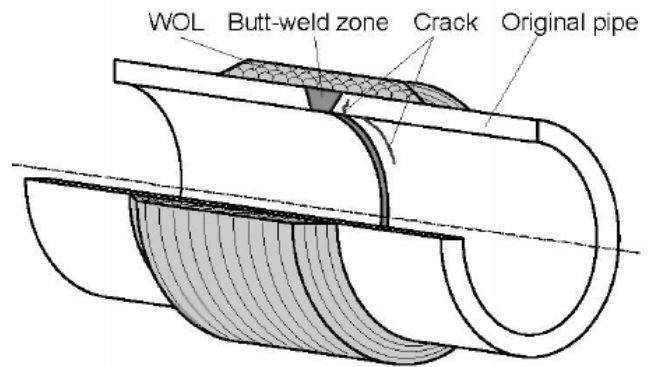


Fig. 1. Weld Overlay

شکل ۱: پوشش دهی جوشی [۴]

افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری پوشش، تنش‌های پسماند بر روی سطح داخلی لوله کاهش می‌یابد. همچنین انرژی جوش مورد استفاده تأثیرات چشم‌گیری بر توزیع تنش‌های پسماند حاصل دارد [۱۰].

با توجه به اینکه جوشکاری لوله‌های فولادی در صنایع مختلف از جمله صنایع نفت و گاز کاربرد وسیعی دارد و همچنین با استفاده از روش پوشش‌دهی جوشی می‌توان تنش‌های پسماند جوشی را کاهش داد در این مطالعه به بررسی این روش جهت کاهش تنش‌های پسماند و در نتیجه بهبود عملکرد پرداخته شده است. همچنین در بیشتر بررسی‌های گزارش شده، جهت سادگی در حل مسئله، از تغییرات متالورژیکی حین فرآیند جوشکاری صرف نظر شده است. با توجه به اینکه تغییرات فازی ناشی از جوشکاری می‌تواند اثر قابل توجهی بر توزیع تنش‌های پسماند داشته باشد، در این مطالعه با لحاظ کردن تغییرات متالورژیکی فرآیند جوشکاری و پوشش‌دهی تخمین واقع‌بینانه‌تری از تنش‌های پسماند ارائه شده است. به همین منظور ابتدا یک مدل اجزا محدود^۱ جهت تحلیل جوشکاری تیگ اتوماتیک لوله از جنس فولاد API X46 در نرم‌افزار سیسولدا^۲ توسعه یافته است [۱۱]، سپس با نتایج حاصل از روش کرنش سنجی سوراخ^۳ صحنه‌گذاری شده است. در نهایت با استفاده از مدل اجزا محدود تأیید شده به بررسی اثر پوشش‌دهی با استفاده از پوشش با جنس‌های مختلف، بر تنش‌های پسماند پرداخته شده است.

۲- شبیه‌سازی اجزا محدود

به منظور شبیه‌سازی جوشکاری محیطی دو لوله و بررسی اثر پوشش‌دهی جوشی، یک مدل اجزا محدود سه‌بعدی در نرم‌افزار سیسولدا توسعه داده شده است. بدین منظور ابتدا جوشکاری محیطی لوله‌ها در چهار پاس مطابق با ابعاد و شرایط نمونه تجربی انجام گرفت، سپس پوشش ایجاد شده در هشت پاس صورت پذیرفت. نحوه شبکه‌بندی مدل ایجاد شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. به دلیل وجود شیب حرارتی بالا در ناحیه جوشکاری، در این نواحی شبکه‌بندی کوچک‌تری در نظر گرفته شده است.

برای اینکه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مستقل از ابعاد شبکه باشد، تحلیل حساسیت شبکه بر روی نتایج مدل صورت پذیرفت. از دمای بیشینه در هنگام جوشکاری که بر روی مرکز جوش روی می‌دهد، به عنوان متغیری جهت انجام تحلیل حساسیت شبکه استفاده گردید. با ریز نمودن شبکه هنگامی که تعداد المان‌ها به ۷۰۰۰۰ می‌رسد دمای بیشینه تغییر محسوسی نشان نداد؛ بنابراین شبکه‌بندی انجام شده به عنوان ابعاد مناسب المان‌ها در نظر گرفته شده است. ابعاد المان‌ها در شبیه‌سازی به صورت مربع با طول ضلع ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد و با افزایش فاصله از ابعاد المان‌ها به جهت کاهش زمان تحلیل افزایش می‌یابد.

جوشکاری یک پدیده مکانیکی-حرارتی می‌باشد، در این پژوهش از تحلیل غیر هم بسته جهت شبیه‌سازی استفاده شده است. در تحلیل

روی سطح داخلی لوله کاهش می‌یابد [۵].

در سال ۲۰۰۷ فامینوری و همکاران با استفاده از یک مدل اجزا محدود به بررسی تأثیر تعداد لایه‌ها و ضخامت پوشش ایجاد شده پرداختند، در این مطالعه مشخص شد با افزایش تعداد لایه‌ها و ضخامت پوشش، تنش‌های پسماند محیطی بر روی سطح داخلی لوله به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته ولی تنش‌های محوری در مواردی افزایش می‌یابد [۷].

هانگ و همکاران در روشی مشابه، به بررسی اثر پوشش‌دهی بر تنش‌های پسماند در جوشکاری دو لوله مشابه از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با قطر خارجی ۲۶۷ میلی‌متر و ضخامت ۱۵ میلی‌متر پرداختند. در این تحقیق از روش‌های تجربی جهت تعیین تنش استفاده شده است، جنس لایه‌های پوشش‌دهی از فولاد زنگ نزن ۳۰۸ می‌باشد. در این مطالعه نشان داده شد که این روش پوشش‌دهی باعث کاهش تنش‌های کششی محوری و محیطی در سطح داخلی لوله می‌شود، همچنین تنش‌های پسماند محیطی بر روی سطح داخلی به حالت فشاری تبدیل می‌شوند [۷].

سانگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۵ به بررسی تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری در جوش محیطی نازل تحت فشار در صنایع هسته‌ای پرداختند، در ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی اجزا محدود توزیع تنش‌های پسماند در نقاط مختلف نازل مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از روش‌های مختلف از جمله روش پوشش‌دهی جوشی به ارائه راهکارهایی جهت کاهش تنش‌های پسماند پرداختند و روش پوشش‌دهی جوشی به عنوان روشی مؤثر برای کاهش تنش‌های پسماند بر روی سطوح داخلی نازل ارائه شد.

ژی یانگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۵ با استفاده از شبیه‌سازی اجزا محدود به بررسی اثر پوشش جوشی از جنس فولاد زنگ نزن ۳۱۶ بر روی نازل جوشکاری شده از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ پرداختند. در این مطالعه پوشش با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد با افزایش ابعاد پوشش ایجاد شده تنش‌های پسماند بیشتر کاهش می‌یابد، همچنین عمق پوشش و تعداد لایه‌های پوشش تأثیر چشم‌گیرتری نسبت به عرض پوشش دارد.

در حالت کلی می‌توان بیان کرد، با افزایش ابعاد پوشش ایجاد شده و

- 1 Finite element model
- 2 SYSWELD
- 3 Hole drilling method

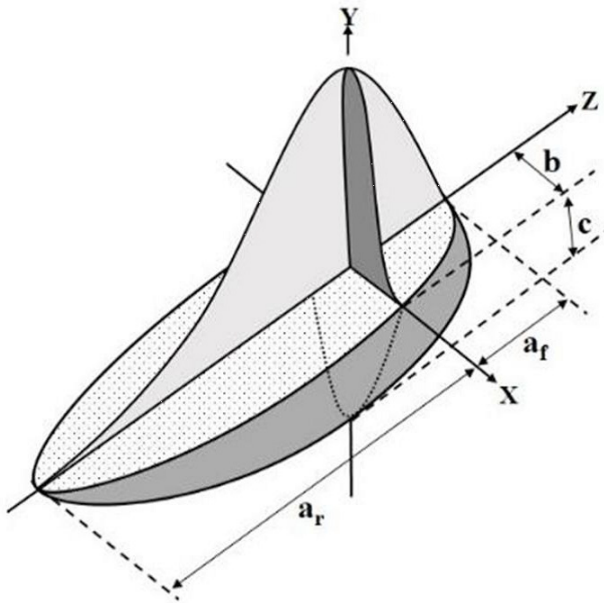


Fig. 3. Heat input FEM model

شکل ۳: مدل منبع حرارتی حجمی دو بیضی گون گلداک [۱۳]

در روابط (۲) و (۳)، a_r ، a_f ، b ، c ، ثابت‌های ابعادی مدل گلداک بوده و به ترتیب برابر عمق منبع حرارتی، نصف عرض منبع حرارتی، طول نیم بیضی عقبی و طول نیم بیضی جلویی می‌باشند.

همچنین Q حرارت ورودی کل و η بازده منبع حرارتی است. f_r و f_f به ترتیب برابر ضریب توزیع حرارت در نیمه جلویی و عقبی است و مجموع آن‌ها برابر ۲ است. مقدار حرارت ورودی با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

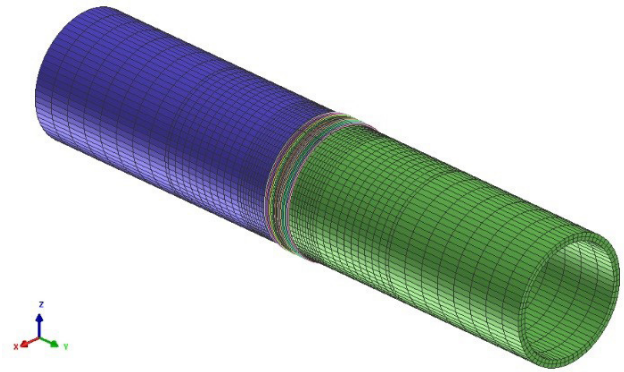
$$Q = U \cdot I \quad (4)$$

در این رابطه U ولتاژ و I شدت جریان جوشکاری می‌باشد. با توجه به اینکه در این پژوهش از فرایند جوشکاری تیگ استفاده شده است، با اندازه‌گیری ابعاد خط جوش در قطعه و با توجه به مرجع [۱۴]، متغیرهای ابعادی مدل گلداک برای شبیه‌سازی انجام‌شده مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

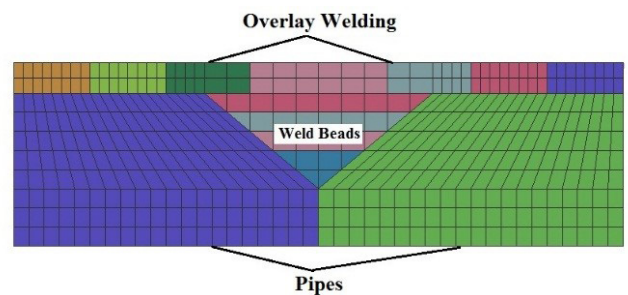
جدول ۱: متغیرهای مدل گلداک [۱۲]

Table 1. Goldak parameters

| مقدار | متغیرهای منبع حرارتی |
|-------|-------------------------|
| ۱۵ | طول بیضی جلویی (mm) |
| ۵ | طول بیضی عقبی (mm) |
| ۱۰ | عرض منبع حرارتی (mm) |
| ۳ | عمق منبع حرارتی (mm) |
| ۱/۵ | سهم حرارت در بیضی جلویی |
| ۰/۵ | سهم حرارت در بیضی عقبی |



(الف)



(ب)

Fig. 2. FEM Model

شکل ۲: مدل اجزا محدود سه‌بعدی، الف: نمای سه بعدی لوله‌ها، ب: مقطع عرضی شیار جوشکاری و پوشش ایجادشده

غیرهم‌بسته، تحلیل حرارتی به‌منظور به‌دست آوردن تاریخچه دمایی جسم انجام‌گرفته و سپس نتایج حاصل از آن به‌عنوان بار حرارتی اولیه به تحلیل مکانیکی اعمال می‌شود. در تحلیل حرارتی از معادله (۱) به‌عنوان معادله انتقال حرارت گذرا استفاده می‌شود [۱۲].

$$\rho C_p = \text{div} (k \cdot \nabla T) + \rho q \quad (1)$$

در این معادله C_p گرمای ویژه، q حرارت تولیدی در واحد حجم، k ضریب رسانایی گرمایی، ρ چگالی و T دما می‌باشد.

جهت شبیه‌سازی منبع حرارتی در حال حرکت از مدل دو بیضی‌گون گلداک استفاده شده است [۱۳]. شکل ۳ شماتیکی از مدل گلداک و متغیرهای ابعادی آن را نشان می‌دهد.

معادله توزیع منبع حرارتی گلداک در نیمه جلویی و پشتی به ترتیب در معادله‌های (۲) و (۳) آمده است [۱۲]:

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_f}{\pi\sqrt{\pi} a_f b c} \exp \left\{ -3 \left(\frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right\} \quad (2)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_r}{\pi\sqrt{\pi} a_r b c} \exp \left\{ -3 \left(\frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right\} \quad (3)$$

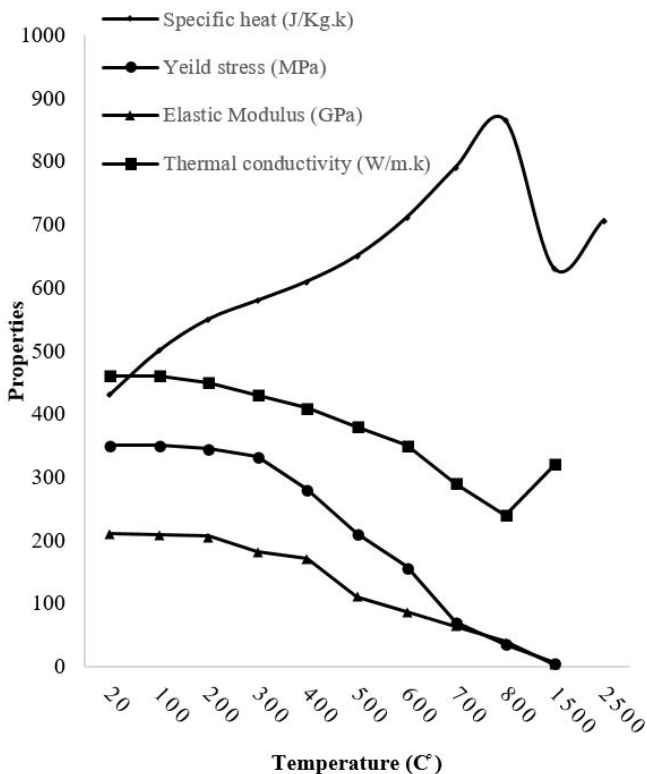


Fig. 4. Mechanical and thermal properties of API X46 steel
 شکل ۴: خواص حرارتی و مکانیکی فولاد API X46 [۱۵]

۳- اعتبار سنجی مدل اجزا محدود

جهت اعتبار سنجی مدل اجزا محدود، از نتایج تنش‌های پسماند محوری و محیطی اندازه‌گیری شده بر روی سطح خارجی لوله به روش کرنش‌سنجی سوراخ، بر روی نمونه تجربی استفاده شده است. نمونه تجربی شامل دو لوله مشابه از جنس فولاد API X46 با قطر ۱۵۲/۴ میلی‌متر (۶ اینچ)، ضخامت ۱۰ میلی‌متر و طول ۴۰۰ میلی‌متر است. طرح اتصال در شکل ۵ نشان داده شده است.

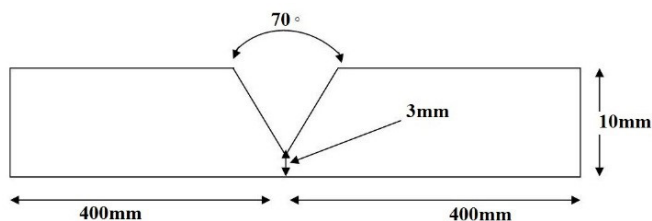


Fig. 5. Joint design
 شکل ۵: طرح اتصال

جوشکاری محیطی این لوله مطابق شکل ۶ در چهار پاس با استفاده از روش جوشکاری تیگ خودکار با محور چرخان انجام شده است.

تنش‌های ایجاد شده در نمونه تجربی در چهار نقطه بر روی سطح خارجی لوله‌ها مطابق شکل ۷، در فاصله ۱۸۰ درجه از نقطه شروع جوشکاری، در راستای محیطی اندازه‌گیری شده است. نقطه یک بر روی خط مرکزی

با توجه به اینکه از روش جوشکاری تیگ استفاده شده است، بازده ۷۰ درصد در نظر گرفته شده است [۱۴]. مقدار حرارت ورودی پاس جوشکاری لوله، ۶۰۰ ژول و پاس جوشکاری پوشش ۱۵۰۰ ژول در نظر گرفته شده است. همچنین از روش تولد و مرگ المان‌ها برای مدل‌سازی مذاب و رسوب جوشی استفاده شد.

از عواملی که می‌تواند اثرات قابل‌توجهی بر تنش‌های پسماند جوشی در فولادهای کربنی داشته باشد، تغییرات فازی^۱ است. تغییرات فازی از دو طریق بر تنش‌های پسماند تأثیر می‌گذارد که عبارت‌اند از:

۱. تغییر در خواص مکانیکی و حرارتی فولاد با تغییر ساختار کریستالی
۲. تغییر حجم ناشی از تغییر فاز

در شبیه‌سازی انجام شده، تغییرات فازی با استفاده از روابط (۵) و (۶) در نظر گرفته شده است. رابطه (۵) برای محاسبه درصد فاز مارتزیت و رابطه (۶) برای محاسبه سایر فازها، نظیر پرلیت و بینیت استفاده شده است.

$$P(T) = 1 - \exp(-b \cdot (Ms - T)) \quad (5)$$

$$\frac{dP_j}{dt} = n_y \cdot \left(\frac{K_{ij} P_i - K'_{ij} P_j}{TR} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{K_{ij} \cdot (P_i + P_j)}{K'_{ij} P_i - K'_{ij} P_j} \right) \right)^{(n-1)/n} \quad (6)$$

در روابط بالا P درصد فاز، T دما، Ms دمای شروع مارتزیت، b ثابت کوپستن ماربرگر^۲، TR زمان تأخیر واکنش، n توان سرعت واکنش و K و K' ثابت‌های واکنش هستند. زیرنویس ij بیان‌کننده انتقال انجام شده از فاز i به j است [۱۰]. در مدل اجزا محدود درصد هر کدام از فازها با استفاده از روابط (۵) و (۶) و نمودارهای CCT^۳ و IT^۴، با توجه به چرخه جوشکاری اعمال شده، محاسبه می‌شود. همچنین خواص مکانیکی و حرارتی ماده موردنظر در هر کدام از فازها، به صورت وابسته به دما، بیان شده است. با محاسبه درصد هر کدام از فازها در دمای مشخص می‌توان خواص مکانیکی و حرارتی مربوط به ماده را تعیین نمود.

فولاد استفاده شده در این پژوهش API X46، با تنش تسلیم ۳۵۲ مگاپاسکال است. خواص مکانیکی و حرارتی این فولاد به صورت وابسته به دما، برای هر کدام از فازها، در نرم‌افزار سیسولد تعریف شده است [۱۵]. خواص این فولاد برای فاز پایه آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

در جوشکاری نمونه تجربی، جهت اعتبارسنجی، از الکتروود ER70s استفاده شده است. خواص این الکتروود بسیار نزدیک به خواص فلز پایه می‌باشد و در شبیه‌سازی‌های انجام شده از خواص فلز پایه برای این الکتروود استفاده شده است.

- 1 Phase transformation
- 2 Koisten Marberuger
- 3 Continues Cooling Temperature
- 4 Isothermal Temperature

اطمینان خوبی از این روش مدل سازی نمود. از آنجایی که عموماً در جوشکاری لوله تنش های پسماند بر روی سطح داخلی از سطح خارجی لوله مهم تر می باشند، توزیع تنش های محوری و محیطی در سطح داخلی مدل در شکل ۹ نشان داده شده است.

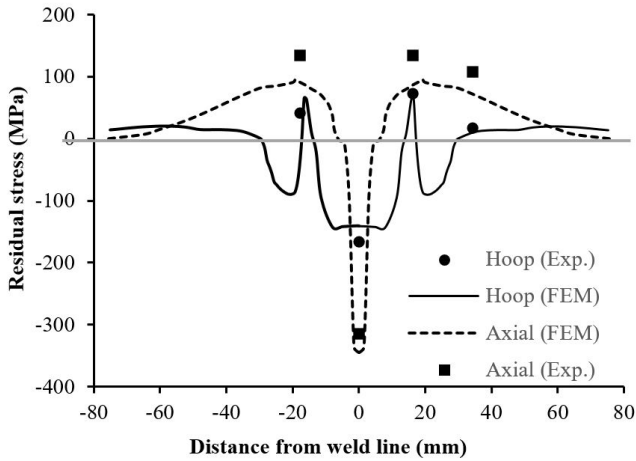


Fig. 8. Residual stresses in FEM model and experimental data

شکل ۸: مقایسه توزیع تنش پسماند محوری و محیطی حاصل از حل اجزا محدود و نمونه تجربی بر روی سطح خارجی

همان طور که در شکل های ۸ و ۹ مشخص است، بیشترین مقادیر تنش کششی بر روی سطح داخلی لوله ها ایجاد می شود، بیشترین مقدار تنش محوری در خط مرکزی جوش و ۱۰۸ مگاپاسکال، حدود ۳۰ درصد تنش تسلیم فلز پایه و بیشترین تنش محیطی در منطقه متأثر از جوشکاری و ۲۴۷ مگاپاسکال، حدود ۷۰ درصد تنش تسلیم فلز پایه است. با توجه به اینکه بیشترین حرارت ایجاد شده در مرکز جوش و منطقه متأثر از جوشکاری است، مقادیر بیشترین تنش هم در این نواحی ایجاد می شود، نوسانات ایجاد شده در مقدار تنش به خاطر وجود قیود مکانیکی و شکل هندسی قطعه است، الگوی ایجاد شده در توزیع تنش با الگوی تنش گزارش شده در منابع [۱۵] و [۱۷] هم خوانی قابل قبولی دارد.

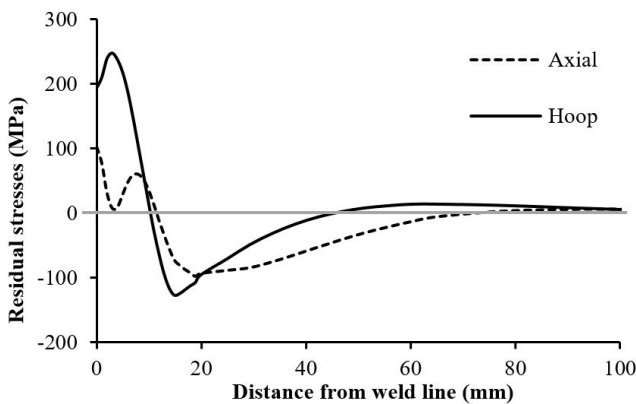


Fig. 9. Residual stresses in FEM model at inner surface

شکل ۹: توزیع تنش های پسماند حاصل از حل اجزا محدود بر روی سطح داخلی



Fig. 6. Welding of pipes

شکل ۶: جوشکاری لوله ها توسط دستگاه تیگ خودکار

جوش، نقاط دو و چهار به ترتیب در فاصله ۱۶ و ۱۸ میلی متری در ناحیه متأثر از حرارت^۱ و نقطه ۳ در فاصله ۳۴ میلی متری از خط جوش و خارج از ناحیه متأثر از حرارت می باشند. اندازه گیری تنش پسماند با استفاده از روش کرنش سنجی سوراخ مطابق با استاندارد ASTM E837 و مرجع [۱۶] انجام شده است.

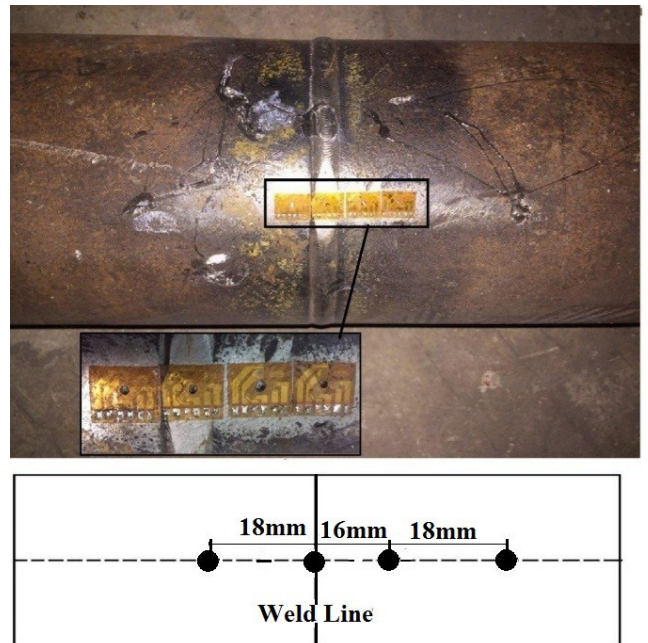


Fig. 7. Points to measure residual stresses

شکل ۷: نقاط اندازه گیری تنش پسماند بر روی سطح خارجی لوله

مقدار تنش های پسماند محیطی و محوری بر روی سطح خارجی لوله، حاصل از روش کرنش سنجی سوراخ و مدل اجزا محدود، در شکل ۸ مقایسه شده اند.

ملاحظه می شود، تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد. این تطابق نشان دهنده مناسب بودن فرض ها و اصول مدل سازی فرایند است، لذا مدل های دیگر با هندسه های مشابه و شرایط مختلف را می توان با

1 Heat Affected Zone (HAZ)

پوشش‌دهی و الکترودهی ER70s به خاطر مشابه بودن خواص آن به فلز پایه موردبررسی قرار گرفته‌اند. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده کلیه خواص مکانیکی و حرارتی این مواد به صورت وابسته به دما در نظر گرفته شده است. مقادیر تنش تسلیم و مدول الاستیک فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و اینکونل ۶۰۰ در جدول ۲ بیان شده است [۱۸ و ۱۹]. پوشش موردنظر در ۸ پاس با ضخامت ۳ میلی‌متر و عرض ۵۰ میلی‌متر، به صورتی که محیط لوله را کامل فرامی‌گیرد، ایجاد شده است و انرژی جوش هر پاس ۱۵۰۰ ژول است.

جدول ۲: خواص مکانیکی فیلرهای جوشکاری

Table 2. Mechanical properties of filler materials

| اینکونل ۶۰۰ | | فولاد زنگ نزن ۳۰۴ | | دما (°C) |
|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|----------|
| مدول یانگ (GPa) | تنش تسلیم (MPa) | مدول یانگ (GPa) | تنش تسلیم (MPa) | |
| ۲۱۴ | ۴۱۳ | ۱۹۸/۵ | ۲۶۵ | ۰ |
| ۲۱۰ | ۳۸۷ | ۱۹۳ | ۲۱۸ | ۱۰۰ |
| ۱۹۹ | ۳۶۹ | ۱۷۷ | ۱۷۰ | ۳۰۰ |
| ۱۸۷ | ۳۳۱ | ۱۵۴ | ۱۵۳ | ۵۰۰ |
| ۱۷۲ | ۲۹۳ | ۱۱۵ | ۱۲۰ | ۷۰۰ |
| ۹۳ | ۱۳۰ | ۷۰ | ۷۰ | ۹۰۰ |
| ۴۵ | ۲۳ | ۳۵ | ۲۵ | ۱۲۰۰ |
| ۱۴ | ۵ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۵۰۰ |

توزیع تنش‌های محوری و محیطی حاصل از جوشکاری و پوشش ایجادشده، برای سه جنس بیان شده، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. مقادیر تنش در زاویه ۱۸۰ درجه از محل شروع جوشکاری لوله محاسبه شده است، دلیل این انتخاب وجود حداکثر فاصله از محل شروع و خاتمه جوشکاری می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۲ مشخص است، مقدار تنش‌های محوری بر روی سطح داخلی با استفاده از پوشش ایجادشده، توسط الکترودهی مختلف، افزایش چشمگیری داشته است. در الکترودهی ER304 و ER70s مقدار بیشترین تنش محوری بر روی سطح داخلی ایجادشده در مرکز جوش در مقایسه با نمونه بدون پوشش در حدود صد درصد افزایش یافته است. همچنین پوشش‌های ایجادشده با هر سه جنس، موجب افزایش ناحیه تحت تنش کششی بر روی سطح داخلی گردیده است. اندازه ناحیه تحت تنش کششی محوری در نمونه بدون پوشش در حدود ۱۲ میلی‌متر و در نمونه‌های با پوشش تا ۳۳ میلی‌متر، برای الکترودهی ER70s، افزایش یافته است.

با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، مقدار تنش‌های پسماند محیطی بر روی سطح داخلی با استفاده از پوشش‌های ایجادشده، در ناحیه پوشش شده، کاهش یافته است و همچنین مقدار بیشترین تنش ایجادشده با استفاده از الکترودهی ER304، ER70s و IN600 کاهش چشمگیری یافته است.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ توزیع تنش‌های پسماند محوری و محیطی در راستای ضخامت لوله و در نقاطی که به روش کرنش سنجی سوراخ تنش اندازه‌گیری شد با استفاده از مدل اجزا محدود نشان داده شده است.

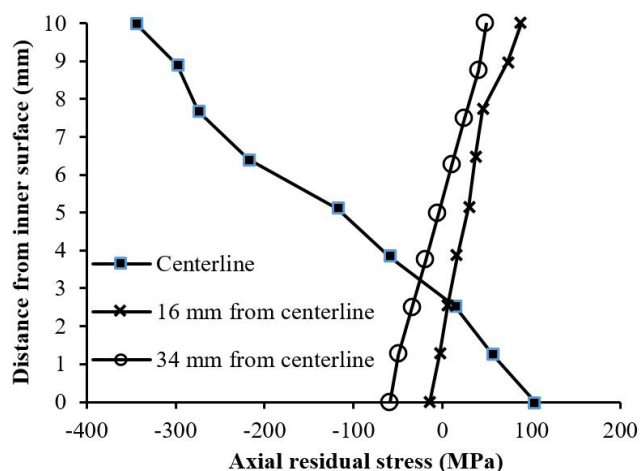


Fig. 10. Axial residual stress on thickness direction

شکل ۱۰: توزیع تنش‌های پسماند محوری در راستای ضخامت

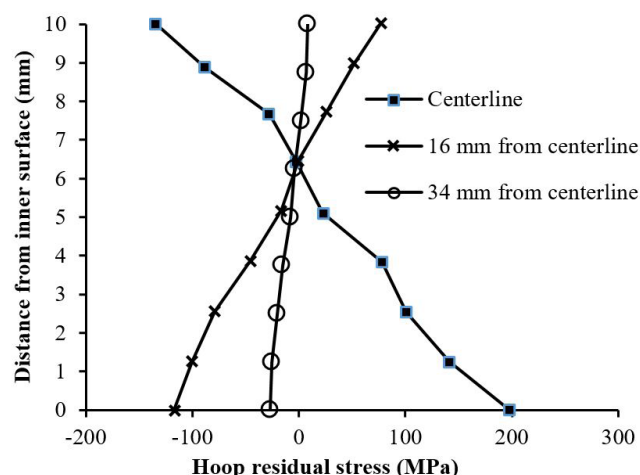


Fig. 11. Hoop residual stress on thickness direction

شکل ۱۱: توزیع تنش‌های پسماند محیطی در راستای ضخامت

۴- بررسی اثر پوشش‌دهی جوشی

یک عامل مهم در پوشش‌دهی انتخاب جنس پوشش است. با توجه به شرایط استفاده از لوله می‌توان پوشش با جنس‌های مختلف را استفاده نمود، برای مثال در صورت نیاز به مقاومت در برابر اکسید شدن و خوردگی در محیط‌های مرطوب، استفاده از فولادهای زنگ‌نزن به‌عنوان پوشش پیشنهاد می‌شود. در این پژوهش به بررسی سه جنس متفاوت پوشش پرداخته می‌شود. فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و اینکونل ۶۰۰ به خاطر رایج بودن در

- 1 ER304
- 2 IN600

۱۵ نشان داده شده است.

با افزایش انرژی جوش در پوشش‌ها تنش‌های محوری بر روی سطح داخلی کاهش یافته است ولی در نمونه ER70s همچنان مقدار این تنش از تنش نمونه بدون پوشش بیشتر می‌باشد. در دو الکتروود دیگر مقدار تنش از نمونه بدون پوشش کمتر است، مقدار تنش در الکتروود IN600 حدود صد درصد کاهش یافته و به مقدار ۶۵ مگاپاسکال رسیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار تنش بیشینه در فاصله ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متری از خط جوش ایجاد شده است، این ناحیه در واقع محل اتمام پوشش است و همین موضوع موجب افزایش ناگهانی تنش محوری بر روی سطح داخلی در این ناحیه می‌شود.

همان‌طور که در قسمت‌های قبل هم توضیح داده شد نوسانات ایجاد شده در الگوی تنش محیطی مربوط به هندسه، ابعاد و نحوه جوشکاری قطعه است. باین وجود، با افزایش انرژی جوش در پوشش‌ها الگوی تنش محیطی بر روی سطح داخلی لوله کاملاً تغییر یافته است. در نواحی نزدیک به مرکز جوش، تنش‌های محیطی سطح داخلی لوله، به حالت فشاری تبدیل می‌شوند. بیشترین تنش کششی محیطی به فاصله حدود ۲۰ میلی‌متر از مرکز جوش،

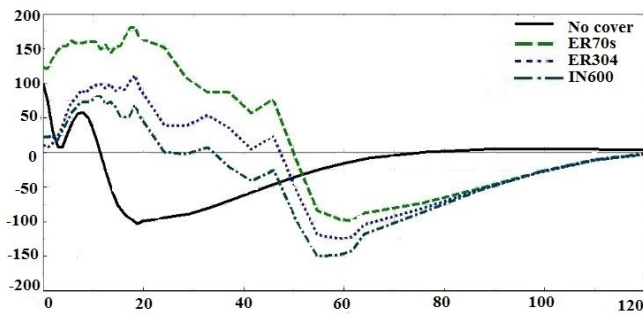


Fig. 14. Axial residual stress on thickness direction for 3000 J of heat input

شکل ۱۴: توزیع تنش پسماند محوری حاصل از حل اجزا محدود بر روی سطح داخلی لوله برای سه جنس متفاوت پوشش با انرژی جوش ۳۰۰۰ ژول

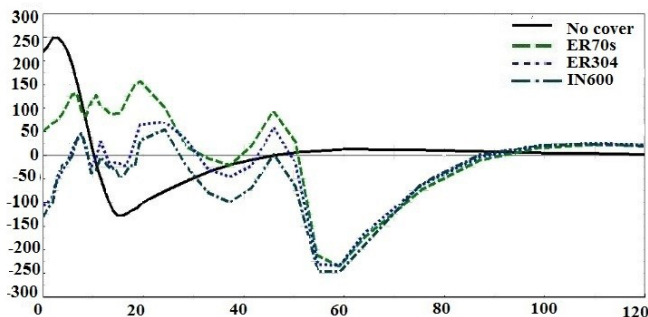


Fig. 15. Hoop residual stress on thickness direction for 3000 J of heat input

شکل ۱۵: توزیع تنش پسماند محیطی حاصل از حل اجزا محدود بر روی سطح داخلی لوله برای سه جنس متفاوت پوشش با انرژی جوش ۳۰۰۰ ژول

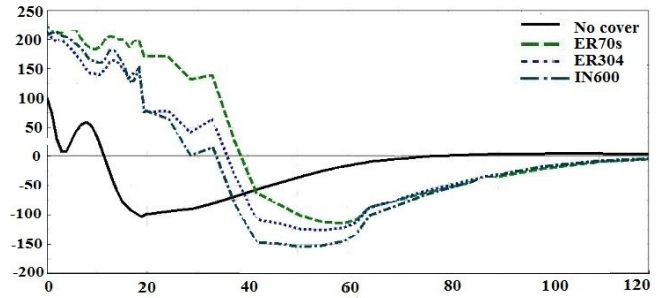


Fig. 12. Axial residual stress on thickness direction for 1500 J of heat input

شکل ۱۲: توزیع تنش پسماند محوری حاصل از حل اجزا محدود بر روی سطح داخلی لوله برای سه جنس متفاوت پوشش با انرژی جوش ۱۵۰۰ ژول

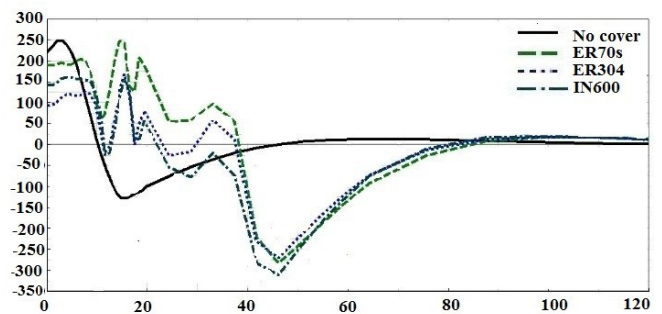


Fig. 13. Hoop residual stress on thickness direction for 1500 J of heat input

شکل ۱۳: توزیع تنش پسماند محیطی حاصل از حل اجزا محدود بر روی سطح داخلی لوله برای سه جنس متفاوت پوشش با انرژی جوش ۱۵۰۰ ژول

مقدار بیشترین تنش محیطی بر روی سطح داخلی در نمونه بدون پوشش از ۲۴۷ مگاپاسکال به ترتیب به مقدارهای ۱۰۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ مگاپاسکال کاهش یافته است. پوشش ایجاد شده موجب تغییر محسوس در الگوی تنش گردیده و در فاصله حدود ۱۲ میلی‌متری از مرکز جوش تنش‌ها کاهش ناگهانی پیدا کرده و در الکتروود ER304 و IN600 تنش‌ها به حالت فشاری تبدیل شده است.

با توجه به اینکه در جوشکاری لوله، عوامل متعددی از جمله نحوه جوشکاری (محیطی یا محوری)، قیدهای مکانیکی و ابعاد لوله تأثیر بسزایی بر روی الگوی تنش محوری و محیطی دارند، مشاهده می‌شود که در پوشش ایجاد شده هم رفتار تنش‌های محوری و محیطی متفاوت است. همچنین انرژی جوش یک عامل بسیار تعیین‌کننده بر مقدار تنش‌های پسماند می‌باشد، انرژی جوش به دلیل ایجاد حرارت در ناحیه جوشکاری، مهم‌ترین عامل در شکل‌گیری تنش‌های پسماند می‌باشد [۱۵]، به همین دلیل، مقدار انرژی جوش برای پاس‌های پوشش ایجاد شده با هر سه الکتروود از مقدار ۱۵۰۰ ژول به مقدار ۳۰۰۰ ژول افزایش یافته و نتایج حاصل برای تنش‌های محوری و محیطی بر روی سطح داخلی لوله به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و

۲. استفاده از الکتروود مشابه فلز پایه به عنوان پوشش در انرژی جوش پایین موجب افزایش مقدار بیشینه تنش‌های پسماند محوری بر روی سطح داخلی تا حدود صد درصد می‌شود. در ناحیه پوشش داده شده، مقدار تنش‌های محیطی بر روی سطح داخلی را کاهش می‌دهد و مقدار تنش بیشینه کششی که تغییر محسوس نداشتند است را به فاصله حدود ۲۰ میلی‌متری از خط جوش انتقال می‌دهد. این الکتروود در انرژی جوش بالا موجب افزایش ۵۰ درصدی تنش محوری بر روی سطح داخلی، کاهش ۶۰ درصدی تنش محیطی و انتقال تنش بیشینه کششی به فاصله ۲۵ میلی‌متری از خط جوش می‌شود.

۳. استفاده از الکتروود زنگ نزن ER304 و IN600 با انرژی جوش پایین موجب کاهش ۵۵ درصدی تنش محیطی بر روی سطح داخلی، افزایش ۹۵ درصدی تنش محوری و انتقال تنش‌های بیشینه کششی به ناحیه ۲۵ میلی‌متری از خط جوش می‌شود. در انرژی جوش بالا، این الکتروودها موجب کاهش تنش بیشینه محیطی بر روی سطح داخلی از ۲۵۰ به ۵۵ مگاپاسکال می‌شود و تغییری در تنش بیشینه محوری ایجاد نمی‌شود. همچنین باعث ایجاد تنش محیطی فشاری بر روی سطح داخلی در ناحیه جوشکاری می‌شوند. این دو الکتروود تقریباً اثر مشابهی بر تنش‌های پسماند دارند، با این تفاوت که اثر الکتروود ER304 محسوس‌تر می‌باشد و مقدار تنش‌ها بر روی سطح داخلی را بیشتر کاهش می‌دهد.

۴. استفاده از پوشش‌دهی جوشی موجب تغییر در الگوی توزیع تنش می‌شود و در هر دو حالت محوری و محیطی ناحیه تحت تنش کششی را افزایش می‌دهد. این روش موجب می‌شود که محل ایجاد تنش‌های بیشینه کششی محوری و محیطی، از ناحیه جوشکاری و خط جوش به فاصله ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متری از خط جوش انتقال یابد

منابع

- [1] V. Karimnia, Investigating the influence of effective parameters on the residual stresses in circumferentially arc welded thin walled cylinders of aluminum alloy series, *Modares Mechanical Engineering*, 15(3) (2015) 10.
- [2] S. Thomas, *Analysis of Low Transformation Temperature Welding (LTTW) consumables distortion control and evolution of residual stresses*, PHD Thesis, University of Colorado (2013).
- [3] F. Fredette, An Analytical Evaluation of the Effect of Weld Sequencing on Residual Stresses Produced by Full Structural Weld Overlays on Pressurized Water Reactor Primary Cooling Piping, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, 10 (2009) 6.

ناحیه تمام پوشش، انتقال می‌یابد. در مقایسه با نمونه بدون پوشش، مقدار تنش بیشینه کششی با استفاده از هر سه نوع الکتروود کاهش یافته است. این کاهش تنش محیطی بر روی سطح داخلی لوله برای الکتروودهای ER304 و IN600 تا حدود ۱۰۰ درصد هم مشاهده می‌شود.

هنگامی که پوشش جوشی بر روی لوله به واسطه جوشکاری ایجاد می‌شود انقباض فلز جوش بر روی لوله باعث ایجاد انقباض در سطح خارجی لوله و ایجاد تنش پسماند کششی می‌شود. همچنین به دلیل این انقباض به سطح لوله نیروی فشاری اعمال می‌شود. با اعمال نیروی فشاری تنش‌های کششی بر روی سطح داخلی لوله کاهش می‌یابند، با توجه به حرارت ورودی و انقباض و انبساط‌های انجام شده، این مقدار کاهش تنش در مواردی می‌تواند حتی تنش‌های کششی را به حالت فشاری تبدیل نماید. بنا بر توضیحات ارائه شده می‌توان دریافت که مهم‌ترین عامل در تغییر تنش‌های پسماند به واسطه پوشش‌دهی جوشی انرژی جوش می‌باشد که هرچه بیشتر باشد انقباض ایجاد شده بیشتر می‌باشد و تنش‌های کششی کاهش بیشتری خواهند داشت. از طرفی خواص حرارتی و مکانیکی پوشش ایجاد شده از جمله مسائل انتقال حرارت، تغییر حجم ناشی از حرارت و... یکی دیگر از عوامل مهم و تأثیرگذار می‌باشد؛ بنابراین می‌توان تغییرات تنش ناشی از اعمال پوشش با جنس‌های مختلف را توجیه نمود. در حالت کلی با توجه به توزیع تنش‌های ارائه شده مشاهده می‌شود که ناحیه تحت تنش در پوشش‌دهی در مقایسه با نمونه بدون پوشش افزایش یافته است، این موضوع با توجه به افزایش ناحیه جوشکاری و همچنین افزایش انرژی حرارتی نهایی وارد شده به قطعه طبیعی است. تنش‌های پسماند در منطقه جوشکاری کاهش چشم‌گیری داشته‌اند ولی با این وجود، این تنش‌ها در فاصله ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متری از خط جوش همچنان در سطح بالایی قرار دارند. با توجه به اینکه ناحیه مهم و بسیار تأثیرگذار، از لحاظ تنش و مسائل مربوط به عمر قطعه، منطقه جوشکاری است لذا انتقال محل ایجاد تنش بیشینه به نواحی دورتر از خط جوش باعث بهبود شرایط از نظر کارایی و عمر قطعه خواهد شد. همچنین پوشش ایجاد شده در مواردی می‌تواند موجب حفاظت از جوش ایجاد شده در برابر خوردگی و آسیب‌های احتمالی شود.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، ابتدا یک مدل اجزا محدود جهت شبیه‌سازی فرایند جوشکاری محیطی دو لوله فولادی X46 در نرم‌افزار سوسولد توسعه یافت و با استفاده از نتایج تجربی صحت‌گذاری شد. سپس با استفاده از مدل اجزا محدود به بررسی اثر استفاده از پوشش‌های ایجاد شده با جنس و انرژی جوش متفاوت بر تنش‌های پسماند پرداخته شده است. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

۱. توسعه یک مدل اجزا محدود جهت شبیه‌سازی جوشکاری محیطی لوله‌های فولادی، در نرم‌افزار سوسولد، با در نظر گرفتن تغییرات فازی.

- [13] J. Goldak, M. Bibby, A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical transactions*, 15 (1984) 6.
- [14] M. Ivanov M.A., The Metodology of Calculation of Geometric size of the Welds on the Parameters of the Mode of Automatic Arc Welding Under a Layer of Flux, *Materials Science and Engineering*, 8 (2009) 8.
- [15] A. Laursen, Influence of Weld Thermal Cycle on Residual Stress of API 5L X65 and X70 Welded Joint, *Canadian Welding Association Conference*, (2014) 5.
- [16] A. Standard, *E837-08 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-drilling Strain-gage Method*, ASMT international West Conshohocken, PA, ed., (2008).
- [17] X. Ren, Residual Stresses of X80 Pipe Girth Weld, *International Offshore and Polar Engineering Conference*, (2012) 10.
- [18] C. H.Lee, three dimensional finite element simulation of residual stresses in circumferential welds of steel pipe including pipe diameter effects, *Materials Science and Engineering*, 7 (2008) 6.
- [19] A. Chintapalli, weld overlay size sensitivity on residual stress in a welded pipe, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, (2008) 6.
- [4] R. Liu, Welding residual stress analysis for weld overlay on a BWR feed water nozzle, *Nuclear Engineering and Design*, 11(2) (2013) 12.
- [5] P. Dong, Effects of Repair Weld Length on Residual Stress Distribution, *ASME Conference*, 124 (2002) 7.
- [6] F. Iwamatsu, effect of weld overlay repair on residual stress and crack propagation in a welding pipe, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, (2007) 5.
- [7] H. Yen, L. Chen, 1996, Residual Stress Measurement in 304 Stainless Steel Weld Overlay Pipes, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 118 (1996) 5.
- [8] J. Sung Kim, Investigation on the effects of geometric variables on the residual stresses and PWSCC growth in the RPV BMI penetration nozzles, *Journal of Mechanical Science and Technology*, (2015) 11.
- [9] Y.L. W. Jiang, B.Y. Wang,, Residual stress reduction in the penetration nozzle weld joint by overlay welding, *Journal of Materials and Design*, (2015) 15.
- [10] T. Zhang, D. Rudland,, Weld-Overlay Analyses – An Investigation of the Effect of Weld Sequencing, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, (2008) 7.
- [11] ESI Group, User Manual, (2012).
- [12] SYSWELD, Reference Manual, (2014).

Please cite this article using:

M. Hemmat zadeh, H. Moshayedi, I. Sattari-Far, Numerical Study of Overlay Welding Effects on Residual Stresses in Girth Welded Steel Pipes, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 479-488.
DOI: 10.22060/mej.2017.11934.5221

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



