

شبیه سازی‌های المان محدود و تجربی میدان‌های دما و تنش‌های پسماند در یک اتصال لوله به فلنج

جواد مصیب نژاد^۱، مهسا سیدیان چوبی^۲، محمد حق پناهی^۳ و محمد صدیقی^۴

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۴/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۱۰/۳۰)

چکیده

در این مقاله، توزیع گذرای میدان‌های دمایی و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری در جوش چند پاسه اتصال لوله به فلنج از جنس فولاد زنگ نزن AISI ۳۰۴ به روش المان‌های محدود و همچنین از طریق اندازه‌گیری‌های تجربی به دست آمده‌اند. برای این منظور، مدل المان محدود دو بعدی با استفاده از نرم افزار ABAQUS ایجاد شده و توزیع گذرای میدان‌های دما و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری محاسبه شده است. سپس، با استفاده از اندازه‌گیری‌های تجربی، توزیع دما در طی فرآیند جوشکاری به دست آمده، صحت پارامترهای شبیه‌سازی مانند راندمان جوشکاری و ضریب انتقال حرارت کلی مورد ارزیابی قرار گرفته و تابع مثلی شار حرارتی ناشی از قوس جوشکاری تخمین زده شده است. توزیع تنش‌های پسماند نیز با استفاده از روش سوراخکاری و کرنش سنج به دست آمده و صحت مدل المان محدود دو بعدی متقارن محوری در تخمین تنش‌های پسماند مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه نتایج به دست آمده از روش المان محدود با نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی برای دما و تنش‌های پسماند قابلیت مدل متقارن محوری را در تخمین تنش‌های پسماند نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: المان محدود، تنش پسماند، جوش، اتصال لوله به فلنج، روش سوراخکاری

Finite Element and Experimental Simulations of Temperature Fields and Residual Stresses in a Pipe-Flange Joint

J. Mosayebnejad, M. Seyyedian Choobi, M. Haghpanahi, and M. Sedighi

Mech. Eng. Dep't., Iran Sci. & Tech. Univ.

ABSTRACT

In this paper, temperature and residual stress fields due to multi-pass welding of AISI 304 stainless steel pipe-flange joints are investigated by both finite element method and experimental measurements. First, a two-dimensional axisymmetric finite element model has been developed, using ABAQUS software and transient temperature fields and residual stresses are computed. Then experimental measurements have been performed to verify welding parameters, such as welding arc, total heat transfer coefficient, and triangular heat input function. Residual stresses are measured using hole-drilling method. The obtained numerical results agree well with experimental measurements. The results indicate that 2D axisymmetric model can not only reduce the computational time, but also gives reasonable results.

Key Words: Finite Element, Residual Stress, Welding, Pipe-flange Joint, Hole-drilling Method

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد

۲- دانشجوی دکترا (نویسنده پاسخگو): mseyyedian@yahoo.com

۳- دانشیار

۴- دانشیار

۱- مقدمه

است، به نحوی که امکان حل تحلیلی معادلات حاکم به دلیل غیرخطی بودن شدید آنها مقدور نیست. به همین دلیل روش المان‌های محدود به عنوان مناسب‌ترین روش برای تحلیل فرآیند جوشکاری مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. نگاهی به تحقیقات انجام شده در طی سه دهه گذشته نشان می‌دهد که روش المان‌های محدود به طور گسترده‌ای در مدلسازی جوشکاری اتصالات لوله به لوله و تخمین میدان‌های دما و تنش‌های پسماند ناشی از آن به کار رفته است. اما در خصوص اتصال لوله به فلنج فعالیت‌های قابل ملاحظه‌ای تا کنون صورت نگرفته است. بریکستاد^۲ و همکارش [۳] با استفاده از روش المان‌های محدود توزیع میدان‌های دما و تنش پسماند را برای یک سری جوش‌های چند پاسه در اتصالات لب به لب لوله‌های فولادی تا ضخامت ۴۰ میلی‌متر را با استفاده از مدل دو بعدی متقارن محوری ارائه نمودند. موجیزوکی^۳ [۴] با استفاده از روش المان‌های محدود و انجام آنالیز ترمو الاستو پلاستیک به پیش‌بینی تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری در لوله‌های از جنس فولاد کربنی پرداخته، با انجام آزمایش‌های تجربی به روش انکسار اشعه نوترون صحت مدل المان محدود خود را در تخمین تنش‌های پسماند بررسی نمود. رایبیکي^۴ و همکارانش [۵] با استفاده از مدل اجزاء محدود دوبعدی متقارن محوری تنش‌های پسماند را در جوش لب به لب دو پاسه در اتصال لوله به لوله ارائه نمودند. رایبیکي و همکارانش [۶] در مطالعه دیگری تنش‌های پسماند را در جوش لب به لب اتصال لوله به لوله در حالت هفت پاس و سی پاس را با استفاده از مدل اجزاء محدود دوبعدی متقارن محوری به دست آوردند. نیر^۵ و همکارانش [۷] و همچنین کاسوگا^۶ و همکارانش [۸] نیز با استفاده از مدل متقارن محوری تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری را در اتصال لب به

جوشکاری یک پروسه اتصال فلز قابل اعتماد و کارآمد است که در اکثر صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. جوش انواع فلنج به لوله یکی از متداول‌ترین روش‌های نصب تجهیزات از قبیل پمپ‌ها، شیر آلات و سایر تجهیزات در سیستم‌های لوله‌کشی می‌باشد. به علت ضخامت زیاد در این سیستم‌ها، جوشکاری معمولاً در چندین پاس صورت می‌گیرد. در اثر تمرکز شدید حرارت در منطقه جوش، نواحی نزدیک جوش چندین سیکل حرارتی را طی می‌کنند. این سیکل‌های حرارتی باعث گرم و سرد شدن غیر یکنواخت ماده و در نتیجه باعث ایجاد تغییر شکل‌های ناهمگن و تنش‌های پسماند در قطعه می‌شوند. وجود تنش‌های پسماند در قطعات جوشکاری شده می‌تواند آثار نامطلوبی داشته باشد. تنش‌های پسماند کششی عموماً موجب افزایش حساسیت جوش به آسیب دیدگی‌های خستگی، ترک برداری، خوردگی تنشی و شکست می‌شود [۱]. زمانی که احتمال رشد ترک‌های سطحی در سیستم لوله‌کشی وجود داشته باشد تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری ممکن است سهم بیشتری را در کل میدان‌های تنش نسبت به سایر بارهای خارجی داشته باشد [۲]. بدین ترتیب در اتصالاتی مانند اتصال لوله به لوله یا اتصال لوله به فلنج در نواحی حساس همچون ریشه جوش، به منظور جلوگیری از ترک برداری ناشی از خوردگی تنشی بین دانه‌ای^۱ لازم است که ملاحظات خاصی در شرایط فرآیند جوشکاری برای کاهش و یا تغییر نحوه توزیع تنش‌های پسماند صورت گیرد.

توزیع تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری به عوامل متعددی مانند ابعاد قطعه، مشخصات ماده، شرایط قیود، گرمای ورودی، تعداد پاس‌های جوش، ترتیب پاس زنی و غیره بستگی دارد، به همین دلیل تخمین توزیع تنش‌های پسماند در جوشکاری چند پاسه بسیار پیچیده و مشکل

1-Inter-Granular Stress Corrosion Cracking

2- Brickstad
3-Mochizuki
4- Rybicki
5- Nair
6- Kasuga

آمده‌اند. سپس با استفاده از اندازه‌گیری‌های تجربی برای دما و تنش‌های پسماند صحت نتایج عددی به دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- اندازه‌گیری‌های تجربی

در این تحقیق، جوشکاری لوله از جنس فولاد زنگ نزن AISI ۳۰۴ با قطر خارجی ۱۱۴/۳ میلی‌متر، ضخامت ۶ میلی‌متر و طول ۳۰۰ میلی‌متر به فلنج نوع تخت کلاس ۴۰ از همان جنس با قطر خارجی ۲۲۸/۶ میلی‌متر و ضخامت ۲۲/۲ میلی‌متر به روش جوشکاری قوس تنگستن با پوشش گاز محافظ^۵ صورت گرفته است. شکل ۱ طرح شماتیک اتصال لوله به فلنج را که در آن جوشکاری در دو ناحیه بیرونی و داخلی صورت گرفته است را نشان می‌دهد. برای جوشکاری، از ماده پر کننده همجنس لوله و فلنج استفاده شده است. به منظور آزاد سازی هر نوع تنش قبلی ناشی از تولید قطعات عملیات تنش زدایی قبل از انجام جوشکاری، با قرار دادن قطعه در کوره در دمای $1,050^{\circ}C$ و به مدت یک ساعت صورت گرفته است. گاز محافظ مورد استفاده در جوشکاری گاز آرگون بوده، جوش سطح خارجی در دو پاس و جوش سطح داخلی در یک پاس انجام گرفته است. جهت انجام جوشکاری در سرعت ثابت از تجهیزات خاصی به منظور چرخاندن لوله با سرعت ثابت در حین عملیات جوشکاری استفاده شده است. شرایط جوشکاری در این آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

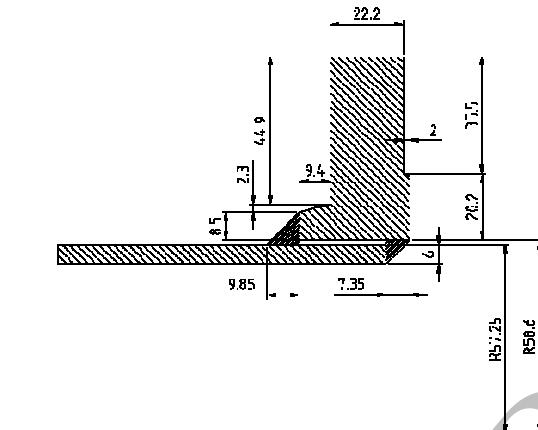
در این آزمایش سیکل‌های حرارتی ناشی از جوشکاری در سه نقطه روی سطح خارجی لوله و با استفاده از ترموکوپل‌های نوع k اندازه‌گیری شده‌اند. ترموکوپل‌ها مطابق شکل ۲ در فاصله ۷ میلی متری از مرز جوش و در فاصله ۷ میلی متری از یکدیگر در روی سطح خارجی لوله نصب شده‌اند.

لب لوله فولادی به دست آوردند. رونلمام^۱ و همکارش [۹] تنش‌های پسماند را در جوشکاری لوله‌های جدار نازک فولادی با استفاده از مدل المان محدود متقارن محوری و همچنین اندازه‌گیری‌های تجربی به روش اشعه نوترونی به دست آوردند. جیانگ^۲ و همکارانش [۱۰] نیز توزیع میدان‌های دما را در فرآیند جوشکاری اتصال لوله به لوله در حالت T شکل با استفاده از یک مدل اجزاء محدود سه بعدی به دست آورده، اما به دلیل پیچیدگی شکل مسیر جوشکاری تنش‌های پسماند را مورد مطالعه قرار ندادند. دنگ^۳ و همکارش [۱۱] فرآیند جوشکاری اتصال لب به لب لوله‌های زنگ نزن را با استفاده از روش المان‌های محدود در دو حالت دو بعدی و سه بعدی و همچنین اندازه‌گیری‌های تجربی به دست آوردند. در خصوص اتصال لوله به فلنج گفتنی است که تا کنون تنها ابید^۴ و همکارانش [۱۲] اتصال لوله به فلنج آن هم از نوع فلنج گلوبی و از جنس کربن استیل را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این حالت اتصال لوله به فلنج از طریق جوشکاری لب به لب لوله به فلنج صورت می‌گیرد. نگاهی به مراجع نشان می‌دهد که در خصوص اتصال لوله به فلنج نوع تخت که در آن دو خط جوش یکی در قسمت جلویی و دیگری در قسمت پشتی ایجاد می‌شود مطالعات خاصی تا کنون صورت نگرفته است. بدین ترتیب با توجه به اهمیت و کاربرد فراوان این نوع اتصال در سیستم‌های لوله کشی، لازم است که تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری در این نوع اتصال مورد بررسی قرار گیرد.

در مطالعه حاضر جوشکاری لوله به فلنج تخت از جنس فولاد زنگ نزن AISI ۳۰۴ مورد توجه قرار گرفته، با استفاده از یک مدل المان محدود دوبعدی متقارن محوری فرآیند جوشکاری شبیه‌سازی شده است. مدلسازی با استفاده از نرم افزار ABAQUS صورت گرفته، میدان‌های دمایی و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری به دست

- 1- Runnemalm
- 2- Jiang
- 3- Deng
- 4- Abid

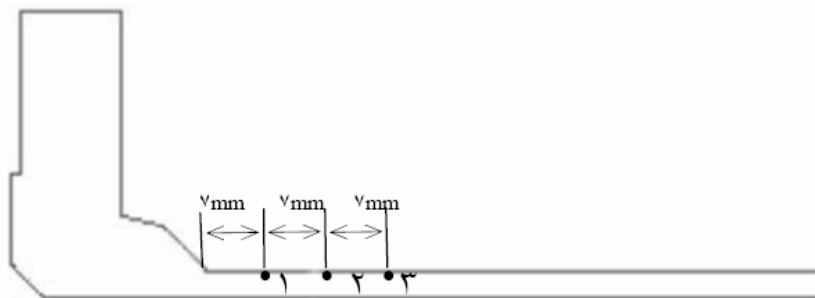
5- Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)



شکل (۱): شکل شماتیک اتصال لوله به فلنج.

جدول (۱): شرایط جوشکاری.

Weld	Pass	Current (A)	Voltage (U)	Speed (mm/min)	Net heat input (kJ/mm)
Outer Surface	1	120	9.5	70	0.6
	2	140	9.5	70	0.7
Inner Surface	1	120	9.5	70	0.6



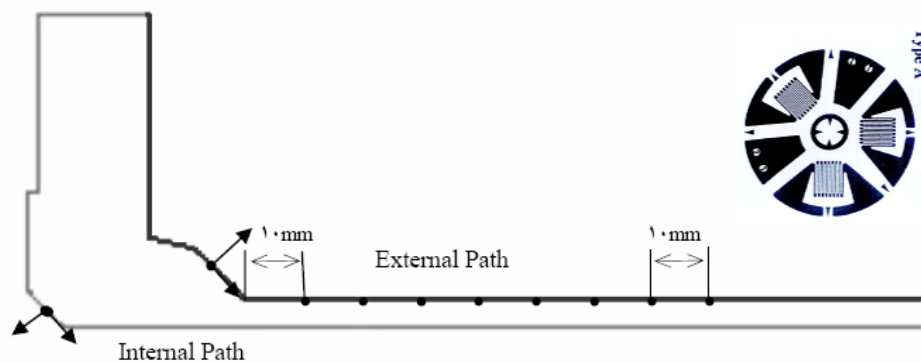
شکل (۲): محل نصب ترموکوپل‌ها روی سطح خارجی لوله.

کرنش سنج نوع A) را نشان می‌دهد. کرنش سنج به گونه‌ای نصب شده است که گیج شماره ۱ در راستای محوری قرار گیرد. پس از نصب کرنش سنج سوراخی در مرکز هندسی کرنش سنج به قطر D_0 و عمق 0.4 قطر

پس از اتمام فرآیند جوشکاری کرنش‌ها در سطح خارجی لوله و در ۹ نقطه و با استفاده از روش سوراخکاری و کرنش سنج اندازه‌گیری شده‌اند. شکل ۳ محل نصب کرنش سنج‌ها و همچنین نوع کرنش سنج مورد استفاده

که بر حسب نوع کرنش سنج از طرف کارخانه سازنده تعیین می‌شود. شکل ۴ تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری تنش پسماند را نشان می‌دهد.

متوسط کرنش سنج (D) توسط مته فرز ایجاد می‌شود. بدین ترتیب با ایجاد سوراخ، تنش‌های پسماند در نواحی اطراف سوراخ آزاد شده، کرنش‌های آزاد شده توسط دستگاه کرنش متر خوانده می‌شوند. گفتنی است که قطرهای D_0 و D جزء مشخصات هندسی کرنش سنج بوده



شکل (۳): محل نصب کرنش سنج‌ها و نمونه کرنش سنج به کار رفته.



شکل (۴): اندازه‌گیری تنش پسماند در روی گرده جوش اول با استفاده از روش سوراخکاری و کرنش سنج.

بدین ترتیب مقادیر کرنش‌های آزاد شده در حین فرآیند سوراخکاری توسط کرنش متر خوانده شده و سپس تنش‌های اصلی از روابط (۱) و (۲) به دست می‌آیند [۱۳].

سه کرنش سنج شعاعی می‌باشند. ثوابت A و B با توجه به ابعاد هندسی کرنش سنج، مشخصات الاستیک ماده و همچنین ضرایب کالیبراسیون \bar{a} و \bar{b} از روابط ۴ و ۵ به دست می‌آیند. مقادیر ضرایب \bar{a} و \bar{b} نیز مطابق جدول ۲ از استاندارد ASTM E837 [۱۳] بصورت زیر به دست می‌آیند:

$$A = -\frac{1+\nu}{2E}\bar{a}, \quad (4)$$

$$B = -\frac{\bar{b}}{2E}. \quad (5)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}, \quad (2)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}. \quad (3)$$

در روابط فوق A و B ثوابت کالیبراسیون، σ_{\min} کوچک‌ترین تنش اصلی که در محل سوراخ قبل از سوراخکاری وجود دارند، α زاویه ساعتگرد اندازه‌گیری شده از گیج شماره ۱ تا جهت σ_{\max} بوده،

جدول (۲): ضرایب ثابت \bar{a} و \bar{b} ارائه شده در استاندارد ASTM E837 برای کرنش سنج نوع A [۱۳].

Rosette A	\bar{a}					\bar{b}				
Blind hole	Hole Diameter, D_h/D					Hole Diameter, D_h/D				
Depth/D	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.00	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
0.05	.027	.037	.049	.063	.080	.051	.069	.090	.113	.140
0.10	.059	.081	.108	.138	.176	.118	.159	.206	.255	.317
0.15	.085	.115	.151	.192	.238	.180	.239	.305	.375	.453
0.20	.101	.137	.177	.223	.273	.227	.299	.377	.459	.545
0.25	.110	.147	.190	.238	.288	.259	.339	.425	.513	.603
0.30	.113	.151	.195	.243	.293	.279	.364	.454	.546	.638
0.35	.113	.151	.195	.242	.292	.292	.379	.472	.566	.657
0.40	.111	.149	.192	.239	.289	.297	.387	.482	.576	.668
Through Hole	.090	.122	.160	.203	.249	.288	.377	.470	.562	.651

جوشکاری از محدوده مورد مطالعه در این کار بیشتر باشد در مورد فرض تقارن محوری باید تأمل بیشتری صورت پذیرد. در طی فرآیند جوشکاری قوسی عموماً بدلیل کم بودن تأثیر کار مکانیکی بر میدان‌های دمایی می‌توان از فرمولاسیون ترموالاستوپلاستیک کوپل نشده استفاده کرد [۱۱]. در این حالت فرآیند حل شامل دو مرحله مجزا است. در مرحله اول توزیع گذرای میدان‌های دمایی با حل معادله هدایت حرارتی فوریه در قطعه به دست آمده،

۳- مدل‌سازی المان محدود

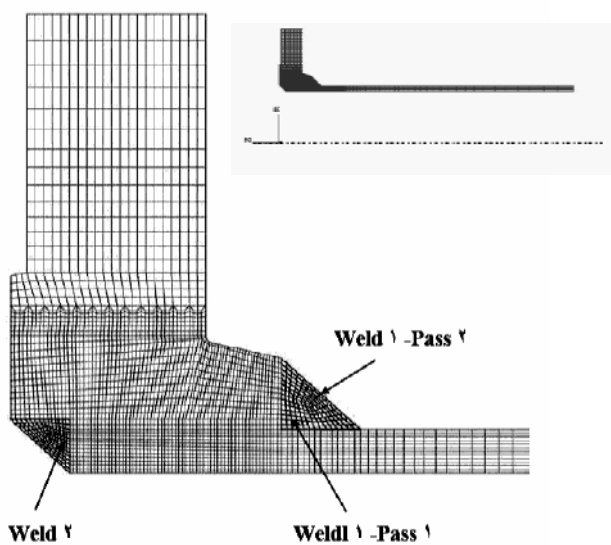
در این تحقیق از روش المان‌های محدود برای تخمین میدان‌های دما و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری استفاده شده است. مطالعات انجام شده توسط محققان [۱۱ و ۱۴] نشان داده است که نتایج حاصل از استفاده از مدل متقارن محوری مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته، منجر به کاهش قابل ملاحظه در زمان محاسباتی می‌شود. بدیهی است که اگر نسبت ضریب پخش حرارتی به سرعت

جدول (۳): خواص ترموفیزیکی و مکانیکی فولاد زنگ نزن AISI ۳۰۴ [۱۱].

Temperature (°C)	Specific heat (J/g°C)	Conductivity (J/mm°Cs)	Density (gr/mm ³)	Yield stress (Mpa)	Thermal expansion (°C ⁻¹)	Young's modulus (Gpa)	Poisson's ratio
0.0000	0.462	0.0146	0.790	265.00	1.70 e ⁻⁵	198.50	0.294
100.00	0.496	0.0151	0.788	218.00	1.74 e ⁻⁵	193.00	0.295
200.00	0.512	0.0161	0.783	186.00	1.80 e ⁻⁵	185.00	0.301
300.00	0.525	0.0179	0.779	170.00	1.86 e ⁻⁵	176.00	0.310
400.00	0.540	0.0180	0.775	155.00	1.91 e ⁻⁵	167.00	0.318
600.00	0.577	0.0208	0.766	149.00	1.96 e ⁻⁵	159.00	0.326
800.00	0.604	0.0239	0.756	91.000	2.02 e ⁻⁵	151.00	0.333
1200.0	0.676	0.0322	0.737	25.000	2.07 e ⁻⁵	60.000	0.339
1300.0	0.692	0.0337	0.732	21.000	2.11 e ⁻⁵	20.000	0.342
1500.0	0.700	0.120	0.732	10.000	2.16 e ⁻⁵	10.000	0.388

جنس فلز پایه و فلز پرکننده جوش یکسان و از نوع فولاد زنگ نزن AISI ۳۰۴ بوده که خواص ترموفیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۳ ارائه شده است. خواص حرارتی المان‌های شکاف بین لوله و فلنج خواص حرارتی هوا و خواص مکانیکی آن چندین برابر ضعیف‌تر و نرم تراز فلز لوله و فلنج در نظر گرفته شده است.

سپس، نتایج توزیع دمایی وارد تحلیل تنش شده، توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها به دست می‌آید. لازم به یادآوری است که در فرمولاسیون تنش اثرات میدان‌های دمایی گذرا به صورت انبساط حرارتی و خواص ترموفیزیکی و مکانیکی وابسته به دما لحاظ می‌شود.



شکل (۵): مدل المان محدود دوبعدی.

۱-۳ آنالیز حرارتی

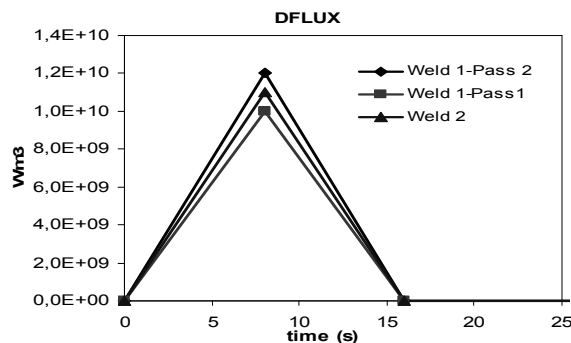
شکل ۵ مدل المان محدود مسئله را در حالت دو بعدی متقارن محوری نشان می‌دهد. در این مدل از المان‌های چهار وجهی هشت گره‌ای *DCA8X* با درجه آزادی دما استفاده شده است. تعداد کل المان‌ها ۱۲۰۰ عدد بوده، به دلیل بالا بودن گرادیان‌های دمایی در اطراف ناحیه جوش از المان‌های ریزتر و در نواحی دورتر از جوش از المان‌های درشت‌تر استفاده شده است. اندازه کوچکترین المان در حدود $0.2 \times 0.2 \times 0.2$ میلی‌متر است. در مدل‌سازی ابتدا هر دو پاس جوش ایجاد شده، سپس قبل از جوشکاری پاس اول، جوش پاس دوم غیر فعال شده است. پس از اتمام جوشکاری پاس اول، المان‌های مربوط به جوش پاس دوم فعال شده‌اند.

در طول جوشکاری، معادله حاکم بر انتقال حرارت گذرا به صورت رابطه زیر است:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t}(r, z, t) = -\nabla \cdot \vec{q}(r, z, t) + Q(r, z, t), \quad (۶)$$

$$DFLUX = \frac{Q \cdot v}{V} \quad (10)$$

تنها راه برای تعیین مقدار حجم پاس جوش V تخمین زدن است، زیرا این حجم در ارتباط با حجم موثر ماده جوش که به طور مستقیم تحت تأثیر شار حرارتی در شبیه سازی متقارن محوری قرار گرفته است، می باشد. طبق پیشنهاد بریکستاد و جوزفسون [۲] برای تخمین حجم V می توان جزء محیطی برابر با $1/16$ تا $1/2$ رادیان مورد استفاده قرار گیرد. بدین ترتیب در شبیه سازی ابتدا با یک تخمین اولیه $DFLUX$ محاسبه شده، سپس آنالیز حرارتی انجام شده، نتایج دمایی مورد بررسی قرار می گیرد. در صورتی که ابعاد ناحیه مذاب و همچنین مقادیر دما در ناحیه جوش و ناحیه متأثر از حرارت^۱ (HAZ) با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد تخمین در نظر گرفته شده برای مقدار $DFLUX$ درست است اما در غیر این صورت، لازم است که مقدار این عامل اصلاح شود به نحوی که نتایج آنالیز المان محدود با نتایج تجربی به دست آمده مطابقت داشته باشد. شکل ۶ توزیع شار حرارتی حجمی مثلثی شکل مورد استفاده را نشان می دهد.



شکل (۶): مدل شار حرارتی جوش به صورت تابع مثلثی.

به منظور لحاظ نمودن تلفات حرارتی، هر دو عامل تشعشع حرارتی^۲ و انتقال حرارت همرفتی^۳ از سطح در نظر گرفته شده اند. اتلافات حرارتی تشعشعی در دماهای بالا در

که در آن، ρ چگالی ماده، c ظرفیت گرمایی ویژه، T دما، \vec{q} بردار شار حرارتی، Q تولید داخلی حرارت، r و z مختصات در سیستم مرجع، t زمان و ∇ عملگر گرادیان می باشند. با اعمال معادله ساختاری ایزوتروپیک غیرخطی فوری خواهیم داشت:

$$\vec{q} = -k\nabla T, \quad (7)$$

که در آن، k هدایت حرارتی وابسته به دما است. گرمای ناشی از قوس جوشکاری از طریق اعمال شار حرارتی گسترده به المان های جوش به صورت تابع گرمایی مثلثی شکل در واحد حجم در واحد زمان در نظر گرفته شده است. در این روش فرض می شود شار حرارتی به صورت خطی از صفر تا مقدار ماکزیمم خود برسد و سپس دوباره از مقدار ماکزیمم خود به صورت خطی تا صفر کاهش یابد و در مقدار صفر باقی بماند. پس از خنک شدن پاس اول، پاس دوم جوش نیز به همین ترتیب انجام می شود. و در نهایت، پس از اتمام جوشکاری قطعه تا دمای محیط خنک می شود. شار حرارتی اعمال شده از قوس جوشکاری برابر است با [۱۱ و ۲]:

$$DFLUX = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{V}, \quad (8)$$

که در آن، U ولتاژ، I شدت جریان، η راندمان قوس، و V حجم پاس جوش است. تغییرات زمانی شار حرارتی مثلثی به معنی نزدیک شدن و عبور مشعل جوشکاری از محل جوش است. حجم پاس جوش V یک پارامتر سه بعدی بوده و وابسته به مدت زمان Δt تابع زمان مثلثی است که در آن Δt زمان لازم برای حرکت مشعل جوشکاری در حول حجم V با سرعت v در محیط پیرامونی لوله جهت ذوب ماده در ناحیه جوش است. انرژی خالص خطی به وسیله رابطه (۹) بصورت زیر ارائه می شود [۱۱ و ۲]:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{v} \quad (9)$$

از روابط (۸-۹) شار حرارتی گسترده به صورت زیر حاصل می شود:

- 1- Heat Affected Zone
- 2- Radiation
- 3- Convection

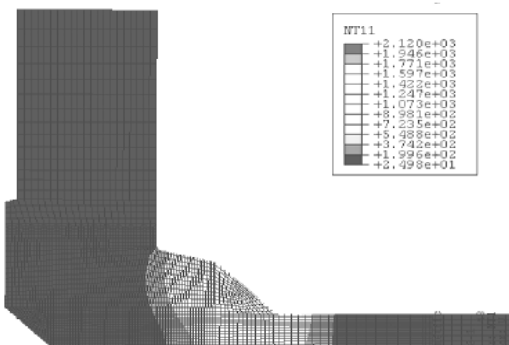
دما محاسبه می‌شود. کرنش پلاستیک نیز با استفاده از قانون جریان با فرض معیار تسلیم فون مایزس، خواص ماده وابسته به دما و مدل سخت شوندگی سینماتیک به دست می‌آید. از آنجایی که در فرآیند جوشکاری نقاط مادی سیکل های بارگذاری و باربرداری را تجربه می‌کنند بهتر است که از مدل سخت شوندگی سینماتیک استفاده شود [۱۵]. در آنالیز تنش به منظور جلوگیری از حرکت صلب قطعه، درجات آزادی جابه‌جایی گره‌های المان‌های انتهایی سر آزاد لوله نیز مقید شده‌اند.

۴- نتایج آنالیز ترمومکانیکی و مقایسه آن با اندازه-گیری های تجربی

در این قسمت داده‌های به دست آمده از آنالیز ترمومکانیکی با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه شده است.

۴-۱ نتایج آنالیز حرارتی و اندازه گیری های دمایی

به دلیل نزدیک بودن ترموکوپل های نصب شده به محل پاس دوم در ابتدا نتایج حرارتی پاس دوم از جوش اول ارائه شده است. شکل ۷ توزیع دما در سطح را در جوشکاری پاس دوم از جوش اول و در لحظه ای که گرده جوش به پیک دمایی رسیده است نشان می‌دهد. همان طور که از شکل پیداست بیشترین دما در حوضچه جوش در حدود $2,100^{\circ}C$ است که به مراتب بالاتر از دمای ذوب فولاد زنگ نزن $304^{\circ}C$ است.



شکل (۷): توزیع دما در جوشکاری پاس دوم از جوش اول در لحظه‌ای که گرده جوش به پیک دمایی رسیده است.

منطقه جوش و اطراف آن، و اتلافات حرارتی همرفتی در دماهای پایین و در مناطق دور از جوش حکمفرما هستند. دنگ [۱۱] با ترکیب این دو عامل، ضریب انتقال حرارت کلی را به صورت تابعی از دما مطابق رابطه (۱۱) به دست آورد:

$$h = \begin{cases} 0.68T \times 10^{-8} (W/mm^2) & 0 < T < 500^{\circ}C, \\ (0.231T - 82.1) \times 10^{-6} (W/mm^2) & T > 500^{\circ}C, \end{cases} \quad (11)$$

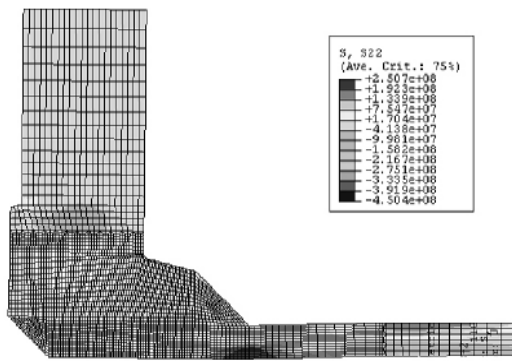
که در آن، T دمای سطح است. بدین ترتیب شرایط مرزی همرفتی با در نظر گرفتن ضریب انتقال حرارت کلی به صورت رابطه (۱۱) به کلیه سطوح آزاد قطعه اعمال شده است. به منظور لحاظ کردن انتقال حرارت ناشی از جریان سیال در حوضچه مذاب، مقداری افزایش مجازی برای ضریب هدایت حرارتی در دماهای بالاتر از دمای ذوب به میزان چندین برابر بزرگتر از مقدار آن در دمای اتاق در نظر گرفته شده است. همچنین آثار حرارتی ناشی از انجماد حوضچه مذاب با در نظر گرفتن گرمای ویژه ذوب لحاظ شده است.

۳-۲ آنالیز مکانیکی

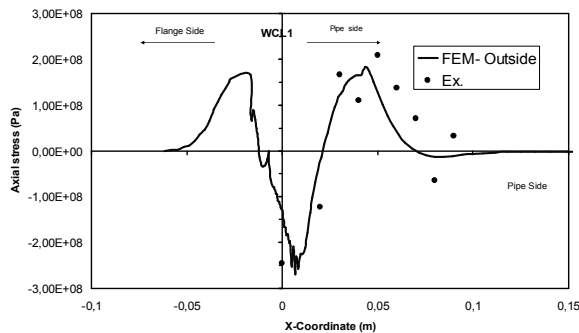
در این قسمت مش به کار رفته در تحلیل تنش همانند روش تحلیل حرارتی بوده با این تفاوت که در تحلیل تنش از المان‌های چهار وجهی هشت گره‌ای $CAX8R$ با درجه آزادی جابه‌جایی استفاده شده است. جهت انجام آنالیز تنش نتایج توزیع دما از آنالیز حرارتی به عنوان بار حرارتی وارد مدل مکانیکی شده، آنالیز تنش انجام شده است. از آنجایی که در جوشکاری فولاد زنگ نزن تغییر فاز حالت جامد اتفاق نمی‌افتد نرخ کرنش کل را می‌توان مطابق رابطه (۱۲) در نظر گرفت [۱۱].

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p + \dot{\epsilon}^{th} \quad (12)$$

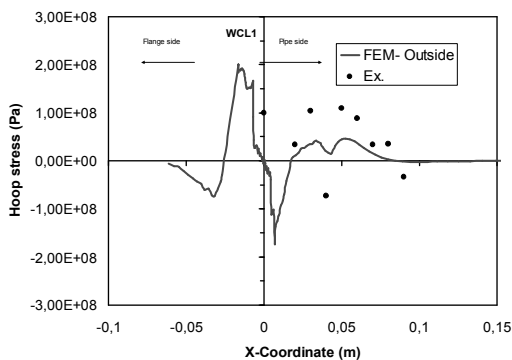
مؤلفه‌های سمت راست رابطه (۱۲) به ترتیب نرخ کرنش الاستیک، نرخ کرنش پلاستیک و نرخ کرنش حرارتی هستند. کرنش الاستیک از قانون هوک با مدول یانگ و نسبت پواسن وابسته به دما به دست می‌آید. کرنش حرارتی با در نظر گرفتن ضریب انبساط حرارتی وابسته به



شکل (۹): توزیع تنش پسماند محوری بعد از خنک شدن قطعه.



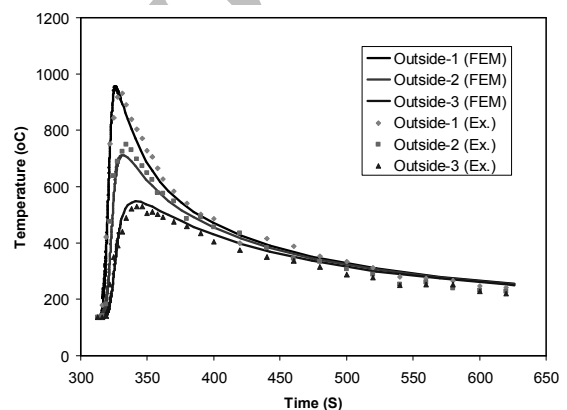
شکل (۱۰): توزیع تنش پسماند طولی در مسیر خارجی.



شکل (۱۱): توزیع تنش پسماند محیطی در مسیر خارجی.

در شکل‌های ۱۲-۱۳ به ترتیب تنش محوری و محیطی در سطح داخلی لوله و سطح داخلی فلنج نشان داده شده است. با مشاهده این منحنی‌ها ملاحظه می‌شود که: الف) تنش پسماند طولی در روی جوش دوم و اطراف آن هم در قسمت لوله و هم در قسمت فلنج، به صورت

شکل ۸ سیکل‌های حرارتی را در طی پاس دوم از جوش اول و در سه نقطه در سطح خارجی لوله (مطابق شکل ۲) و همچنین نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی دما در فاصله ۱۸۰ درجه از نقطه شروع جوش را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که نتایج به دست آمده از آنالیز المان محدود مطابقت خوبی با اندازه‌گیری‌های تجربی دارد که این موضوع معرف صحت مقادیر تخمین زده شده برای شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت و دیگر پارامترهای شبیه سازی جوش می‌باشد.



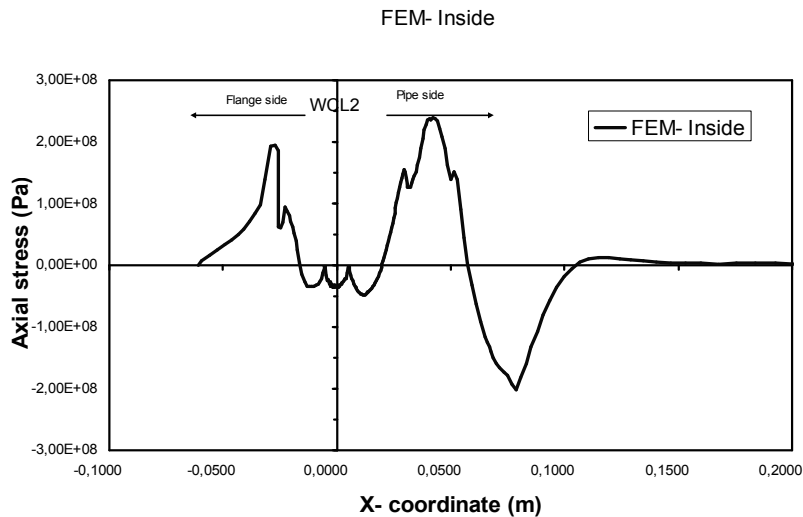
شکل (۸): توزیع دماهای به دست آمده از آنالیز حرارتی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی.

۲-۴ نتایج آنالیز تنش و اندازه‌گیری‌های تنش پسماند

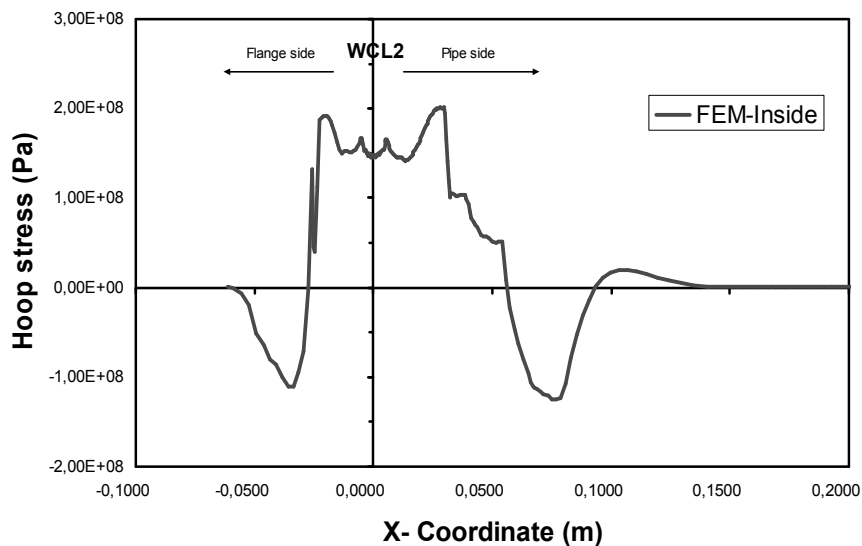
شکل ۹ تنش محوری حاصل از جوشکاری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌گردد که توزیع تنش پسماند در نواحی جوش اول بحرانی‌تر می‌باشد. شکل‌های ۱۰-۱۱ به ترتیب توزیع تنش‌های طولی و محیطی را در سطح خارجی لوله و سطح پشتی فلنج نشان می‌دهد. در منحنی‌های مربوط به تنش پسماند طولی، با استفاده از مقادیر تنش محوری، شعاعی و برشی، و با استفاده از دایره مور تنش‌ها در راستای مسیر داخلی و خارجی (مطابق شکل ۳) محاسبه و رسم گردیده‌اند. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که روند تغییرات تنش در هر دو روش یکسان بوده، با دور شدن از منطقه جوش تنش‌های طولی از حالت فشاری به کششی تبدیل شده، در دوردست جوش به مقدار صفر می‌رسند.

کششی بوده، در نواحی دور از آن در هر دو سمت به صورت فشاری ظاهر شده است. تنش پسماند محیطی کششی در سطح داخلی لوله و بین دو خط جوش از مقدار بالایی برخوردار بوده، می‌تواند موجب تسریع در خوردگی ناشی از سیال و ترک برداری بین دانه‌های تنشی در این نواحی گردد.

کششی با مقدار نزدیک به تنش تسلیم در دمای محیط است. دور از ناحیه جوش در سطح داخلی لوله تحت تأثیر جوش اول قرار گرفته، به صورت فشاری ظاهر شده است، در حالی که در قسمت فلنج مقدار آن به صفر نزدیک شده است و (ب) تنش پسماند محیطی در روی جوش دوم به صورت



شکل (۱۲): توزیع تنش پسماند طولی در مسیر داخلی.



شکل (۱۳): توزیع تنش پسماند محیطی در مسیر داخلی.

۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر تحلیل ترمومکانیکی فرآیند جوشکاری اتصال لوله به فلنج از نوع تخت به روش المان های محدود و با استفاده از مدل دو بعدی متقارن محوری صورت گرفته، توزیع میدان های دما و تنش های پسماند ناشی از جوشکاری به دست آمده اند. سپس صحت مدل ارائه شده به وسیله اندازه گیری های تجربی برای دما و تنش های پسماند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می دهد که:

- ۱) مدل دو بعدی متقارن محوری نتایج قابل قبولی را در پیش بینی میدان های دمایی و توزیع تنش های پسماند می تواند ارائه نماید. دلیل این امر را می توان در کم بودن نسبی انتقال حرارت در مقایسه با سرعت پیشروی مشعل جوشکاری جستجو کرد که در حقیقت مشعل جوشکاری زودتر از گرمای انتقالی از پایین دست جوش حرکت کرده و حرارت جوش لحظات قبلی بر جوش لحظات بعدی تأثیر کمتری دارد، اگر چه مدل متقارن محوری دقت مدل سه بعدی را ندارد اما می تواند در زمان محاسباتی کمتر با دقت خوبی توزیع میدان های دما و تنش های پسماند ناشی از جوشکاری را به دست دهد،
- ۲) مشخصات توزیع تنش پسماند در اتصال لب به لب لوله به فلنج در نواحی جوش اول و در قسمت لوله بسیار شبیه توزیع تنش پسماند در جوش لب به لب لوله است و تنها در توزیع تنش محیطی سطح خارجی باهم اختلاف دارند. به عبارت دیگر تنش پسماند محوری در سمت لوله و در نزدیکی جوش اول در سطح داخلی و خارجی دارای توزیع مخالف یکدیگر هستند. در ناحیه جوش و اطراف آن تنش محوری کششی در سطح داخلی و تنش محوری فشاری در سطح خارجی ایجاد می شود. در نواحی دور از خط جوش تنش محوری کششی در سطح خارجی و تنش محوری فشاری در سطح داخلی ایجاد می شود،
- ۳) تنش پسماند طولی در روی جوش دوم مقدار کمی داشته، در اطراف آن هم در قسمت لوله و هم در قسمت فلنج به صورت کششی با مقدار نزدیک به تنش تسلیم در دمای محیط است. در ناحیه دور از جوش

در سطح داخلی لوله تحت تأثیر جوش اول قرار گرفته و تنش طولی به صورت فشاری ظاهر شده است در حالی که در قسمت فلنج مقدار آن به صفر نزدیک شده است. تنش پسماند محیطی در روی جوش دوم به صورت کششی بوده، در نواحی دور از آن در هر دو سمت به صورت فشاری ظاهر شده است. در سطح داخلی لوله بین دو جوش مقادیر تنش پسماند کششی زیادی ایجاد شده است که می تواند موجب تسریع در خوردگی ناشی از سیال و یا ترک برداری بین دانه های تنشی در این نواحی شود و

۴) با توجه به منحنی های توزیع تنش پسماند ملاحظه می شود که انجام عملیات حرارتی محلی در فاصله ۱۱ سانتی متری از خط جوش می تواند منجر به کاهش تنش های پسماند ناشی از جوش شود.

مراجع

1. Murugan, S., Rai, S.K., Kumar, P.V., Jayakumar, T., Raj, B., and Bose, M.S.C. "Temperature Distribution and Residual Stresses due to Multipass Welding in type 304 Stainless Steel and Low Carbon Steel Weld Pads", Int. J. Pressure Vessel Tech., Vol. 78, No. 4, pp. 307-317, 2001.
2. Ueda, Y., Nakacho, K., and Shimizu, T. "Improvement of Residual Stresses of Circumferential Joint of Pipe by Heat-sink Welding", ASME J. Pressure Vessel Tech., Vol. 108, No. 1, pp. 14-23, 1986.
3. Brickstad, B. and Josefson, B.L. "A Parametric Study of Residual Stresses in Multipass Butt-Welded Stainless Steel Pipe", Int. J. Pressure Vessel and Piping, Vol. 75, No. 1, pp. 11-25, 1998.
4. Mochizuki, M., Hayashi, M., and Hattori, T. "Numerical Analysis of Welding Residual Stress and its Verification, Using Neutron Diffraction Measurement", ASME J. Eng. Materials and Tech., Vol. 122, No. 1, pp. 98-103, 2000.
5. Rybicki, E.F., McGuire, P.A., Merrick, E., and Wert, J. "The Effect of Pipe Thickness on Residual Stresses Due to Girth Welds", ASME J. Pressure Vessel Tech., pp. 204-209, 1982.
6. Rybicki, E.F., Schmueser, D.W., Stonesifer, R.W., Groom, J.J., and Mishler, H.W. "A Finite Element Model for Residual Stresses and Deflections in Girth Butt Welded Pipes", ASME J. Pressure Vessel Tech., Vol. 100, No. 1, pp. 256-262, 1978.

7. Nair, S., Pang, E., and Dix, R.C. "Residual Stress Generation and Relaxation in Butt-Welded Pipes", ASME J. Pressure Vessel Tech., Vol. 104, No. 2, pp. 42-46, 1982.
8. Kasuga, Y., Jimma, T., and Yamagushi, Y. "Analysis of Temperature and Membrane Stresses on Welding and Cooling in the Process of Producing 304 Stainless Steel Pipes", J. Material Processing Tech., Vol. 31, No. 4, pp. 295-306, 1992.
9. Runnemalm, H. and Lin, R. "Investigation of Residual Stresses in a Laser Welded Pipe by Finite Element Simulations and Neutron Diffraction Measurements", The 5th Int. Conf. on Residual Stresses (ICRS-5), Linköping, Sweden, p.p 183-188, 1997.
10. Jiang, W., Yahiaoui, K., and Hall, F.R. "Finite Element Predictions of Temperature Distributions in a Multipass Welded Piping Branch", ASME J. Pressure Vessel Tech., Vol. 127, No. 3, pp. 7-12, 2005.
11. Deng, D., Murakawa, H., and Liang, W. "Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stress in Multipass Welds in Stainless Steel Pipe and Comparison with Experimental Measurements", Computational Materials Science, Vol. 42, No. 2, pp. 234-244, 2008.
12. Abid, M., Siddique, M., and Mufti, R.A. "Prediction of Welding Distortions and Residual Stresses in a Pipe-flange Joint, Using the Finite Element Technique", Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., Vol. 13, No. 2, pp. 455-470, 2005.
13. ASTM E837. "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method", Annual ASTM Book of Standards, 2004, or www.astm.org.
14. Yaghi, A.H., Hyde, T.H., Becker, A.A., Williams, J.A., and Sun, W. "Residual Stress Simulation in Welded Sections of P91 Pipes", J. Materials Processing Tech., Vol. 167, No's. 2-3, pp. 480-487, 2005.
15. Dong, P. "Residual Stress Analysis of a Multipass Girth Weld: 3-D Special Shell Versus Axisymmetric Models", ASME J. Pressure Vessel Tech., Vol. 123, No. 1, pp.207-213, 2001.
16. Deng, D., Liang, W., Murakawa, H. "Determination of Welding Deformation in Fillet-Welded Joint by Means of Numerical Simulation and Comparison with Experimental Measurements", J. Materials Processing Tech., Vol. 183, No. 1, pp. 219-225, 2007.