

شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند جوشکاری زیرپودری لوله‌های API 5L-X70 با درز جوش مستقیم مورد استفاده در صنایع نفت و گاز

محمد رضا فروزان^{*}، علی حیدری^{**} و سید جعفر گلستانه^{**}

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

شرکت لوله و تجهیزات سدید، تهران

(دریافت مقاله: ۸۶/۱۱/۱۰ - دریافت نسخه نهایی: ۸۷/۸/۱۵)

چکیده - در این تحقیق تحلیل اجزای محدود غیرخطی ترمومکانیکال غیرکوپل از فرایند جوشکاری زیرپودری لوله‌های درز جوش مستقیم با رویکرد بررسی تنشهای پسماند ناحیه جوش ارائه شده است. تحلیل با بخش گرمایی آغاز می‌شود جایی که توان گرمایی بر اساس معادلات دوبیضوی گلداک به جسم اعمال می‌شود. سپس با تعیین تاریخچه گرمایی هر یک از المانها و با توجه به نمودارهای سرمایش پیوسته ماده هرگونه تغییر فاز در ساختار ماده بر اساس زمان سرمایش ۸۰۰ به ۵۰۰ (t_{g/5}) برای یک المانها در نواحی متأثر از جوشکاری و مذاب بررسی و فاز نواحی مختلف محاسبه شده است. بر این اساس و بر اساس خواص ترموفیزیکی ماده در فازهای مختلف برای هر المان خواص ترمومکانیکی مربوط توسط کد داخلی تعریف شده است. پس از تحلیل تنش و به منظور اعتبار سنجی روش، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از شبیه‌سازیها با نتایج تجربی حاصل از متالوگرافی و آزمون تست سوراخکاری کرنش سنجی به عمل آمده است که انطباق بسیار خوبی را نشان می‌دهد. از جمله جنبه‌های نو در این تحقیق علاوه بر نتایج به دست آمده مترتب بر شرایط خاص مورد مطالعه، می‌توان به تحلیل فرایند جوشکاری برای فولاد API 5L-X70 که باعث ایجاد منابع غیرخطی شدید هنگام تفکیک خواص ساختاری ماده می‌شود و استفاده از خواص معادل در بیان تغییر فازها و حالات فیزیکی ماده اشاره کرد.

واژگان کلیدی: لوله انتقال نفت و گاز - جوشکاری زیرپودری - روش اجزای محدود - تنش پسماند

FE Simulation of Submerged Arc Welding of API 5L-X70 Straight Seam Oil and Gas Pipes

M. R. Forouzan, A. Heidari, and S. J. Golestaneh

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology
Sadid Pipe and Equipment Co., Tehran, Iran

Abstract: In this paper, an uncoupled thermo-mechanical nonlinear FE analysis of submerged arc welding process for straight seam large diameter oil and gas pipes to determine residual stresses is presented. The analysis starts with thermal part where, bi-elliptical Goldak equation is used for applying heat input distribution. Afterward, a certain code checks the elements one by one in order to determine the metallurgical phase transformations during cooling process based on cooling time from 800°C to 500°C ($t_{8/5}$). Then the associated mechanical properties of each element is calculated and assigned to the corresponding element to execute the stress analysis phase. A good agreement is observed between simulation results and experimental results obtained from metallography and hole drilling test method. In addition to the results related to the special case studied in this research, undertaking severe nonlinearities due to phase transformation of the API X70-5L material and defining the equivalent material properties during phase transformation are of the new aspects of this research..

Keywords: Oil and gas pipeline, SAW, FEM, Residual stress.

فهرست علائم

تنسور تنش پستی	α_{ij}	شدت نیروی بدنی وارده به جسم	b_i
کرنش حجمی ناشی از استحاله a به b	$\beta_{a \rightarrow b}^T$	ظرفیت گرمایی ویژه جسم	c
تابع دلتای کروئکر است	δ_{ij}	تانسور ضریب الاستیک	C_{ijkl}
ضریب صدور جسم	ε	تابع سطح تسلیم	f
تانسور کرنش است.	ε_{kl}	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی جسم	h_c
نرخ کرنش پلاستیک مؤثر	$\dot{\varepsilon}^p$	ضریب انتقال گرمای معادل جابه‌جایی-تشنشعی	h_{eq}
کرنش الاستیک	$d\varepsilon_{ij}^e$	ضریب انتقال گرمای تشنشی	h_f
کرنش پلاستیک	$d\varepsilon_{ij}^p$	ضریب انتقال گرمای هدایتی جسم	k
کرنش گرمایی	$d\varepsilon_{ij}^{th}$	دمای آغاز تشکیل مارتنزیت	M_s
کرنش پلاستیک استحاله‌ای	$d\varepsilon_{ij}^{tp}$	نرخ تولید انرژی بر واحد حجم ماده	$\dot{Q}$
کرنش حاصل از استحاله	$d\varepsilon_{ij}^{tr}$	شار گرمایی بر واحد سطح	q
ضریب شدت تغییر فاز	η	شار گرمای در سطح	q_s
ضریب کرنش پلاستیسیته استحاله‌ای	κ	دمای مطلق جسم بر حسب کلوین	T
ضریب پلاستیک جسم	$d\lambda$	دمای سطح	T_s
دما بر حسب درجه سانتیگراد	θ	دمای محیط	T_{sur}
جرم واحد حجم	ρ	دمای سیال در تماس با قطعه	T_∞
تنش مؤثر	$\bar{\sigma}$	تنسور تنش کاهش یافته	S_{ij}
ثابت استفان بولتزمن	σ_{sb}	درصد حجمی فاز	z
حد تسلیم	σ_y	ضریب انبساط گرمای طولی	α

۱- مقدمه

معمولاً از روش جوشکاری قوس زیرپودری^۱ به دلیل سرعت و راندمان بالا در تولید لوله‌ها استفاده می‌شود. از جمله مشخصات بارز جوشکاری قوس زیرپودری تنشهای پسماند قابل توجهی است که پس از این نوع جوشکاری در قطعه به‌خصوص در منطقه متأثر از جوشکاری^۲ باقی می‌ماند. تحقیقات نشان داده است که میزان تنشهای پسماند در لوله‌ها در مجاورت خط جوش قابل مقایسه با تنش تسلیم است [۱-۳]. بنابراین تخمین مقدار و توزیع تنشهای پسماند جوشکاری امری ضروری تلقی می‌شود. اهمیت موضوع به حدی است که در بازه سالهای ۱۹۷۶ تا ۱۹۹۶ میلادی حدود ۹۲۰ مقاله علمی [۴] و در بازه سالهای ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۱ میلادی حدود ۵۵۰ مقاله علمی در رابطه با شبیه‌سازی جوشکاری به روش اجزای محدود ارائه شده است [۵]. از جمله پیشتازان این عرصه می‌توان به اندرسن [۶] اشاره کرد که با استفاده از روش اجزای محدود دو بعدی توزیع تنش پسماند در سطوح بالا و پایین صفحه پایه در نزدیکی جوش را طی فرایند جوشکاری زیرپودری بررسی کرد. وجود فرضیات متعدد که ناشی از محدودیت امکانات در آن زمان بود باعث شد تا وی تفاوت‌های قابل توجهی بین نتایج عددی و مقادیر تجربی مشاهده کند. در سال ۱۹۸۳، گلداک [۷] یک مدل ریاضی از منبع گرمایی^۳ بر پایه توزیع گوسی چگالی توان و با توزیع دو بیضی ارائه کرد که در محاسبه میدان دمای حاصل از جوشکاری به کمک روشهای عددی تاثیر گذار بود. اما تا اواسط دهه ۹۰ میلادی هزینه‌های محاسباتی بسیار بالای مترتب بر مسئله جوشکاری مانع از دستیابی به نتایج قابل قبول به کمک روشهای عددی بود.

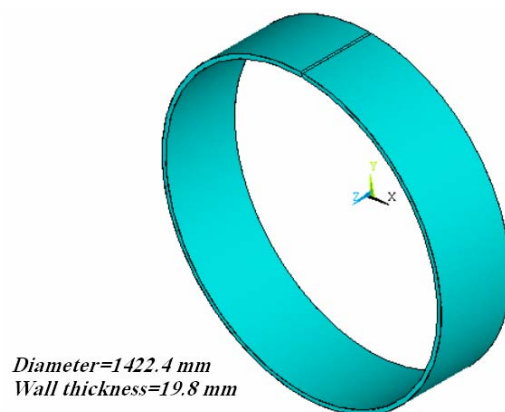
در سال ۱۹۹۵، روالنس [۸] جوشکاری دو ورق و لوله درز مستقیم به‌طور جداگانه را شبیه‌سازی کرد و تنشهای پسماند آنها را با یکدیگر مقایسه کرد و نشان داد هرگاه خواص ماده اصلی، شرایط هندسی مانند ضخامت و پارامترهای جوشکاری یکی باشد نتایج حاصل از دو مدل مختلف بسیار به یکدیگر نزدیک است.

در سال ۲۰۰۲، چو [۹] یک مدل جدید برای در نظر گرفتن استحاله‌های فازی ارائه کرد و به کمک نرم‌افزار ABAQUS تنشهای پسماند حاصل از جوشکاری قوس تنگستنی گازی را به‌دست آورد. وی نشان داد که اثر در نظر گرفتن استحاله‌های فازی بر روی تنشهای پسماند، در فولاد با کربن متوسط و بالا قابل توجه است ولی این اثر، در مورد فولاد کم کربن بسیار ناچیز است.

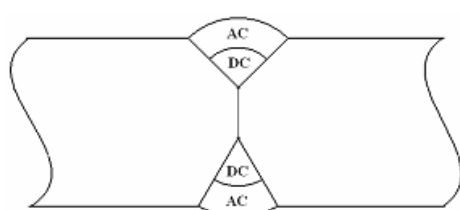
در سال ۲۰۰۴، یاجیانگ [۱۰] توزیع تنش پسماند در اتصال جوش صفحات فولادی با استحکام بالا توسط نرم‌افزار ANSYS را مورد بررسی قرار داد. روش جوشکاری در این تحقیق، از نوع جوشکاری قوسی با گاز محافظ است. روش اجزای محدود، وجود یک گرادیان شدید تنش اطراف منطقه جوش را نشان داد. از بررسی نتایج مشخص شد که تنش عمود بر امتداد جوشکاری اثر بیشتری روی ایجاد ترک نسبت به تنش در دو امتداد دیگر دارد.

در سال ۲۰۰۵، گری [۱۱] تحلیل گرمایی جوشکاری ذوبی را بر اساس مدل گلداک به صورت دو بعدی و سه بعدی ارائه کرد و اثرات سرعت جوشکاری، توان ورودی و پارامترهای مربوط به مدل گلداک را بررسی کرد.

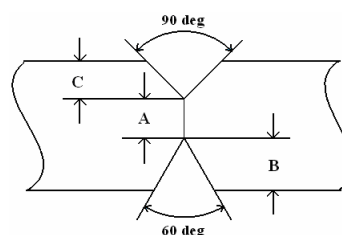
در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار ANSYS، برنامه‌ای برای شبیه‌سازی فرایند جوشکاری زیرپودری لوله‌های درز جوش مستقیم تهیه شده است. شبیه‌سازی فرایند جوشکاری در دو مرحله حل غیر خطی غیر کوپله گرمایی و مکانیکی صورت گرفته که از حل گرمایی تاریخچه دمایی و از حل مکانیکی، توزیع تنش به‌دست می‌آید. حل گرمایی فرایند جوشکاری برای مدل دوبعدی و سه‌بعدی انجام شده و مقایسه‌ای بین نتایج گرمایی حاصل شده از برنامه با نتایج متالوگرافی و آزمایشگاهی این تحقیق صورت گرفته است. حل مکانیکی فرایند جوشکاری برای مدل دوبعدی انجام شده و نتایج آن با تنشهای اندازه‌گیری شده به روش سوراخکاری کرنش سنجی^۴ مقایسه شده است. همچنین اثر استحاله‌های فازی بر روی تنشهای پسماند حاصل از جوشکاری بررسی شده است.



شکل ۱ - هندسه سه بعدی مدل



شکل ۳ - وضعیت قرارگیری جوشها



A=6 mm عمق پیشانی
B=8 mm عمق یخ داخل
C= 5.8 mm عمق یخ خارج

شکل ۲ - طرح اتصال دوسر لوله و مشخصات ابعادی

جدول ۱ - پارامترهای جوشکاری برای هر جوش

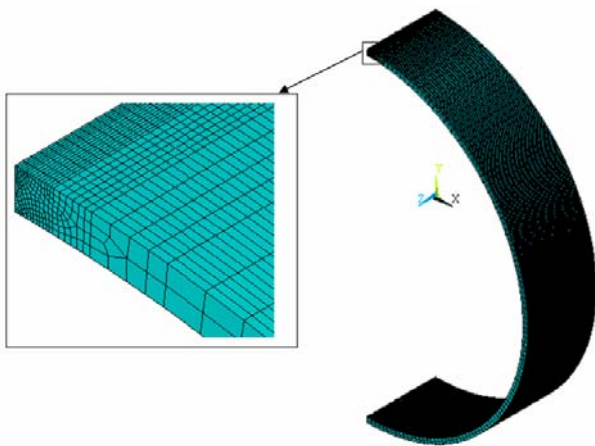
پارامترهای جوشکاری					جوش
راندمان	قطر سیم جوش (mm)	سرعت (cm/min)	جریان (A)	ولتاژ (V)	
٪۹۵	۳/۲	۸۰	۶۵۰	۳۴	AC داخل
٪۹۵	۳/۲	۸۰	۷۵۰	۳۰	DC داخل
٪۹۵	۴	۸۰	۷۰۰	۳۴	AC خارج
٪۹۵	۳/۲	۸۰	۱۱۰۰	۳۱	DC خارج

داخلی و خارجی در جدول (۱) آورده شده است. فاصله بین الکترودهای AC و DC داخل، ۱۳ میلیمتر و برای الکترودهای خارج، ۱۲ میلیمتر است.

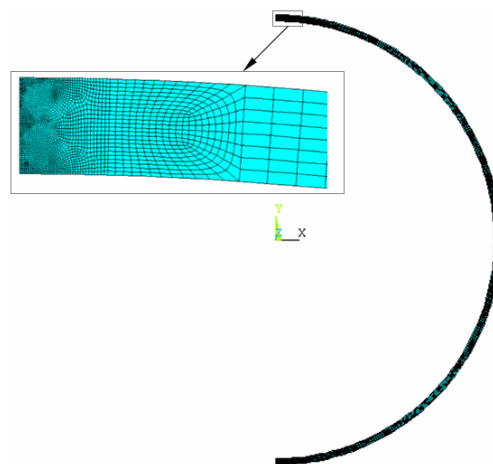
با توجه به تقارن مسئله برای شبیه سازی، تنها نیمی از جسم در نظر گرفته شده است. نحوه المان بندی برای مدل دوبعدی در شکل (۴) و برای مدل سه بعدی در شکل (۵) نمایش داده شده است. حداقل طول مورد نیاز برای لوله در حالت سه بعدی که بتواند نتایج یکنواختی در محدوده میانی در راستای طول لوله ایجاد کند با سعی و خطا حدود ۳۰۰ میلیمتر به دست آمده است

۲- مدل اجزای محدود

در این تحقیق جوشکاری درز مستقیم لوله ای با قطر خارجی ۱۴۲۲ میلیمتر و ضخامت ۱۹/۸ میلیمتر مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۱) هندسه سه بعدی مدل لوله را به همراه سیستم مختصات انتخاب شده نشان می دهد. طرح اتصال دو سر لوله و مشخصات ابعادی آن در شکل (۲) آمده است. شکل (۳) وضعیت قرارگیری جوشها را نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است جوش داخل و خارج هر کدام شامل جوش AC و DC اند. پارامترهای مربوط به جوشهای



شکل ۵ - المان بندی مدل سه بعدی



شکل ۴ - المان بندی مدل دوبعدی

جدول ۲- درصد وزنی عناصر موجود در ترکیب شیمیایی فولاد API-5L-X70

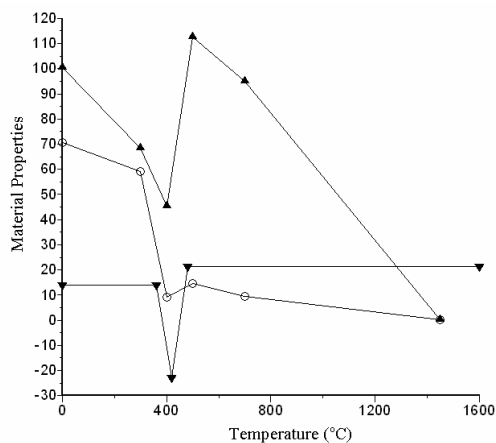
نام عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	B
درصد وزنی	۰/۰۵۳	۰/۱۹	۱/۶	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۱	۰/۱۷	کمتر از ۰/۰۰۰۱
نام عنصر	Ca	Cu	Mo	N	Nb	Ti	V	Al
درصد وزنی	۰/۰۰۲۳	۰/۰۱	۰/۲۴	۰/۰۰۴۷	۰/۰۴۳	۰/۰۲۳	۰/۰۴۴	۰/۰۴۲

که نتایج ارائه شده در قسمتهای بعدی بر اساس این طول است. صفحه میانی در راستای طول لوله را صفحه مرجع^۵ نامگذاری می کنیم و نتایج در حالت سه بعدی برای این صفحه ارائه می شود. صفحه مورد استفاده در مدل دوبعدی نیز حکم صفحه مرجع ما را دارد و مقایسه نتایج بین مدل دوبعدی و سه بعدی براساس نتایج این صفحه صورت می گیرد. با توجه به اینکه در طی زمان حل امکان تولید یا حذف المانها وجود ندارد، باید تمامی المانها در ابتدا تولید شوند. بنابراین برای مدل کردن ماده پرکننده در طی زمان جوشکاری از قابلیت تولد و مرگ المانها کمک گرفته شده است [۱۲-۱۳].

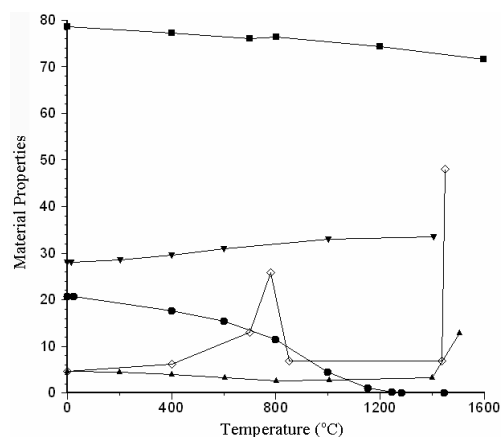
۳- خصوصیات ماده

جنس لوله API 5L-X70 است ترکیب شیمیایی این فولاد بر اساس اعلام تولید کننده در جدول (۲) ذکر شده است. خواص مکانیکی و ترموفیزیکی فولاد تابعی از دما است. این خواص به طور دقیق از تولیدکننده فولاد اخذ و تقریب چند

خطی از آن در برنامه استفاده شده است. به طور مثال شکل (۶) نمایش دهنده این خواص در ساختار مارتزیتی است. نمودارهای مشابهی برای ساختارهای دیگر تهیه شده است و برنامه قادر است بین نمودارها براساس درصد ساختارهای تشکیل شده حین استحاله فازی میانجیابی کند. برای در نظر گرفتن اثر جریان مذاب داخل حوضچه، ضریب انتقال گرمای هدایتی در دمای ذوب چهار برابر شده و برای در نظر گرفتن اثر گرمای نهان ذوب، ظرفیت گرمایی در بازه های دمایی استحاله آستنیتی و ذوب به نحوی تغییر کرده که تعادل انرژی ارضا شود [۶، ۹، ۱۱ و ۱۵]. برای در نظر گرفتن اثرات تغییر حجم ماده در هر یک از استحاله های بین فازی، مقدار ضریب انبساط گرمایی خطی در بازه دمایی استحاله تابع درصد استحاله که خود تابعی از دمای هر نقطه است تغییر می کند. به عنوان مثال در شکل (۶) در بازه دمایی حدود ۴۸۰ الی ۳۴۰ درجه سانتیگراد به طور مصنوعی ضریب انبساط خطی ماده تغییر داده شده تا افزایش حجم ناشی از تشکیل فاز مارتزیت از آستنیت

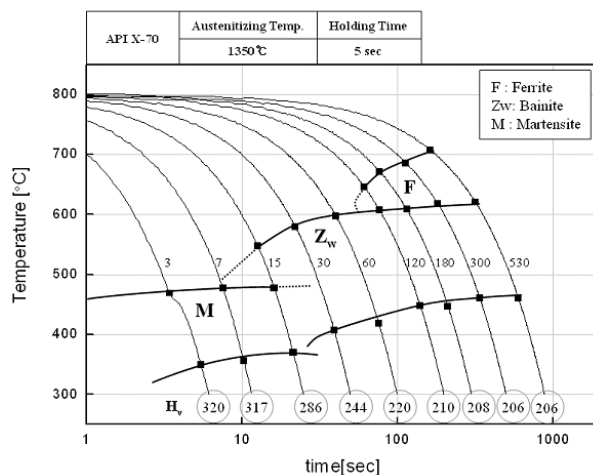


Symbol	Material Properties	Unit
○ -- σ_y	Yield stress	$\times 10^7 \text{ Pa}$
▲ -- E_T	Plastic modulus	$\times 10^7 \text{ Pa}$
▼ -- α	Thermal expansion	$\mu \text{ m/m}^\circ \text{C}$



Symbol	Material Properties	Unit
● -- E	Young 's modulus	$\times 10^{10} \text{ Pa}$
▲ -- k	Conductivity	$\times 10 \text{ W / m}^\circ \text{C}$
◇ -- c	Specific heat	$\times 10^2 \text{ J / Kg}^\circ \text{C}$
■ -- ρ	Density	$\times 10^2 \text{ Kg / m}^3$
▼ -- ν	Poisson 's ratio	m / m

شکل ۶- خواص مکانیکی و ترموفیزیکی فولاد X70 [14]



شکل ۷ - نمودار CCT فولاد X70 [14]

در برنامه استفاده شده است.

نمودار استحاله در سرد شدن ممتد^۶ (CCT) مربوط به فولاد X70 در شکل (۷) آورده شده است. در شبیه سازی برای مشخص شدن فاز در هر ناحیه بدین صورت عمل خواهد شد که در برنامه نمودار CCT با توجه به زمان سرد شدن جسم از دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد

متناسب با درصد مارتنزیت تشکیل یافته که خود تابعی از دماست به دقت شبیه سازی شود. همچنین با کاهش تنش تسلیم در بازه دمایی استحاله مارتنزیتی اثر کرنش پلاستیک استحاله ای در شبیه سازی لحاظ شده است [۱۶]. نتیجه تمامی این معادل سازیها برای استحاله آستنیتی به مارتنزیتی در شکل (۶) منعکس شده است. نمودارهای مشابهی برای استحاله های دیگر

($t_{g/5}$) به بازه‌هایی تقسیم خواهد شد که هر بازه مشخص کننده یک فاز یا ترکیبی از چند فاز است و در طی حل، مدت زمان $t_{g/5}$ محاسبه شده و با بررسی آن، بازه مربوطه مشخص و فاز تشخیص داده می‌شود.

۴- حل گرمایی و حل مکانیکی

معادلات حاکم بر محیط در پیوست (الف) ارائه شده است. در اغلب موارد و به دلیل آنکه سرعت انجام عملیات جوشکاری نسبت به سرعت پخش گرما در امتداد جوشکاری بسیار بیشتر است می‌توان از اثر شار گرمایی در امتداد جوش صرف نظر کرد ($\partial T / \partial z = 0$). بدین ترتیب فرض مدل دو بعدی صادق خواهد بود [۶ و ۹]. بر این اساس در شبیه‌سازی صورت گرفته، برای مدل دوبعدی گرمایی از المان Plane55 و در مدل سه‌بعدی گرمایی از المان Solid70 استفاده شده است. در کلیه تحلیلها توزیع گرمای جوشکاری بر اساس منبع گرمایی گُلداک لحاظ شده است. در تحلیل دو بعدی با در نظر گرفتن گذر سیم جوش از صفحه مرجع توزیع گرما متناسب با آن تابعی از زمان و دو بعد مکانی به المانها انتساب داده شده است در حالی که در حل سه‌بعدی، مرکز منبع گرمایی روی خط جوش به اندازه یک المان جلو می‌رود و تا مدت زمان مشخصی که با توجه به سرعت جوشکاری و طول المان تعیین می‌شود، در آنجا ثابت می‌ماند.

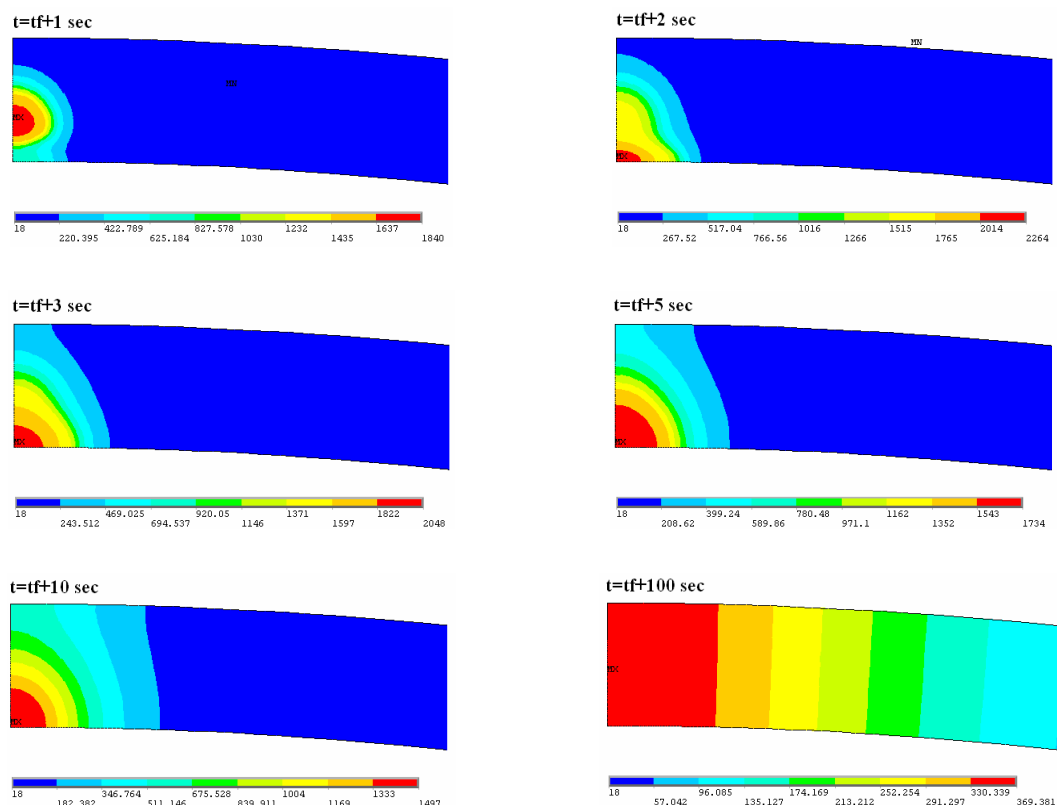
شرایط مرزی گرمایی بر سطوح تقارن و نواحی پوشیده از فلاکس به نحوی اعمال شده که انتقال گرما از این نواحی صفر و برای دیگر سطوح مجموع ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی و تشعشعی تابعی از دما به صورت ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی معادل و بر اساس رابطه (الف-۱۰) لحاظ شده است. از آنجایی که در جوشکاری گرمای حاصل از کرنش پلاستیک، اثر تنشهای قطعه بر روی استحاله‌های فازی و تغییرات ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی در اثر کرنشهای سطحی ناچیز است می‌توان معادلات مکانیکی و گرمایی را به صورت مستقل یا به عبارت دیگر غیر کوپله تحلیل کرد [۶، ۱۵، ۱۷-۲۰ و ۹-۱۰].

۱۰]. لذا ابتدا حل گرمایی توزیع دما را طی فرایند جوشکاری مشخص می‌کند و سپس تاریخچه دمایی حاصل به صورت بار گرمایی به مدل مکانیکی اعمال می‌شود و از حل مکانیکی توزیع تنش به دست می‌آید. به جز نوع المان و شرایط مرزی به کار رفته در مدل مکانیکی، بقیه موارد شبیه مدل گرمایی است. در مدل مکانیکی که به صورت دوبعدی انجام شده است از المان Plane42 با شرط رفتار کرنش صفحه‌ای استفاده شده است. ماده از معیار تسلیم فون میزز و قانون جریان تبعیت می‌کند. قانون سختی به صورت مدل سختی سینماتیک در نظر گرفته شده است [۱۶، ۲۱ و ۲۲]. از آنجایی که درصد فازهای تشکیل شده به صورت پیوسته برای برنامه قابل محاسبه است تغییرات شدید خواص ماده در فازهای مختلف با استفاده از قانون جمع‌پذیری تابعی پیوسته از مکان شده و تحلیل مکانیکی برای ماده‌ای همچون فولاد API 5L-X70 امکانپذیر شده است.

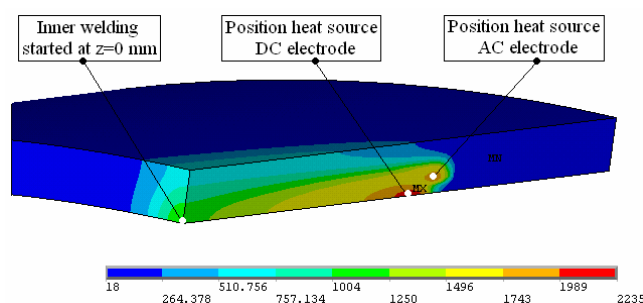
۵- نتایج حل گرمایی

شکل (۸) توزیع دما را برای زمانهای بعد از شروع جوش داخل و قبل از شروع جوش خارج در مدل دوبعدی نشان می‌دهد. t_f و t_s که در این شکل آمده و در ادامه نیز از آنها استفاده می‌کنیم به ترتیب زمان رسیدن جوش AC داخل و خارج به صفحه مرجع‌اند. از این شکل می‌توان دریافت که گرما سریعاً در امتداد ضخامت (جهت y) به سطح لوله رسیده و از آنجایی که انتقال گرمای جابه‌جایی در سطح نسبت به انتقال گرمای هدایتی ناچیز است از این لحظه به بعد انتقال گرما در راستای عرضی (جهت x) نقش مهمتری خواهد یافت. بنابراین می‌توان دریافت که ضریب انتقال گرمای هدایتی نقش بسیار مهمی در خنک‌سازی ناحیه جوش دارد. این اثر در حدی است که انتقال گرمای از حدود ده ثانیه بعد از جوش دادن تقریباً یک بعدی شده است و این مطلب در صد ثانیه بعد از جوش دادن به نحو بهتری مشهود است.

شکل (۹) توزیع دما را در زمان عبور جوش داخل از صفحه مرجع برای مدل سه‌بعدی نمایش می‌دهد. موقعیت



شکل ۸ - توزیع دما برای زمانهای بعد از شروع جوش داخل و قبل از شروع جوش خارج

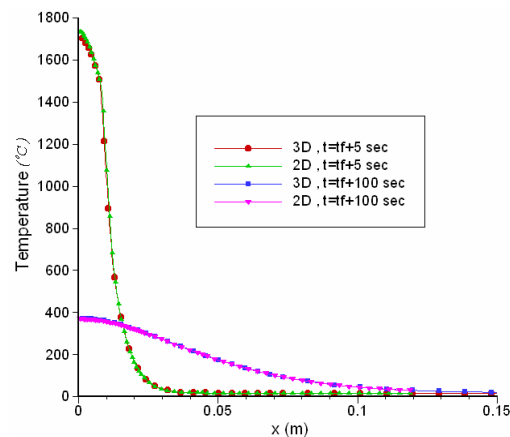


شکل ۹ - توزیع دما در زمان عبور جوش داخل از صفحه مرجع

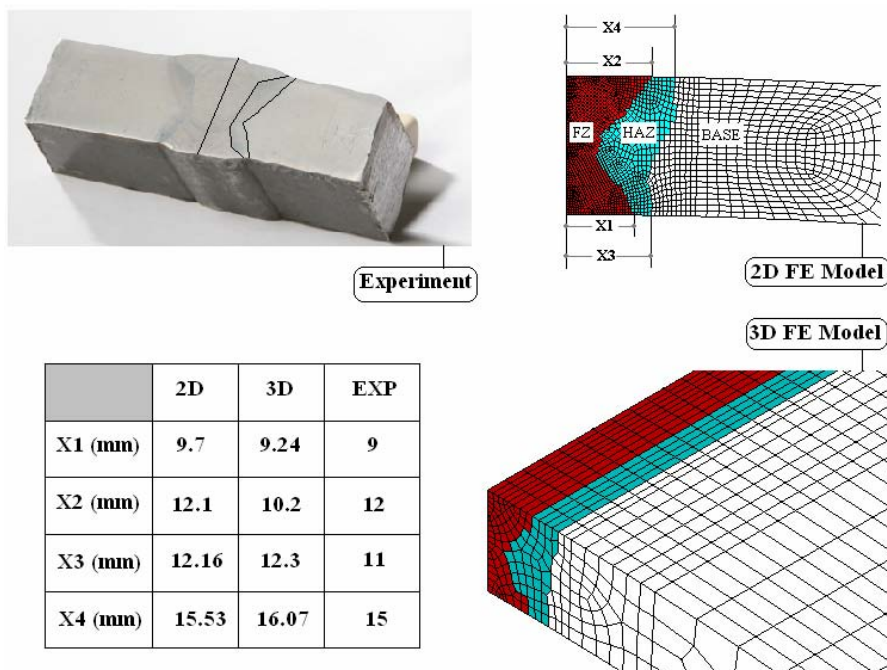
نقاط دورتر همچنان افزایش یابد. نکته قابل توجه در این نمودار رخ دادن گرادیان بالای دما بر حسب موقعیت x در نزدیکی ناحیه جوش است. همچنین صرف نظر کردن از انتقال گرما در جهت طولی برای مدل دوبعدی باعث شده است که دمای نقاط برای ناحیه نزدیک جوش در مدل دوبعدی بالاتر از مدل سه بعدی باشد و برای نقاط دور از این ناحیه، دما کمی پایینتر از مدل سه بعدی باشد که این نشان می دهد علاوه بر جهت عرضی

قرارگیری منبع گرمایی مربوط به جوش AC و DC در مشخص شده است.

شکل (۱۰) دما را در دو زمان متفاوت بر روی سطح داخلی برای مدل دوبعدی و سه بعدی بر حسب موقعیت x نشان می دهند. مشاهده می شود که با گذشت زمان، دمای نقاط نزدیک به ناحیه جوش که به شدت داغ شده اند در سطح داخلی پس از مدت کوتاهی سیر نزولی می یابد در حالی که ممکن است دمای



شکل ۱۰ - دما در دو زمان متفاوت بر روی سطح داخلی برای مدل دوبعدی و سه بعدی بر حسب فاصله محیطی از مرکز جوش



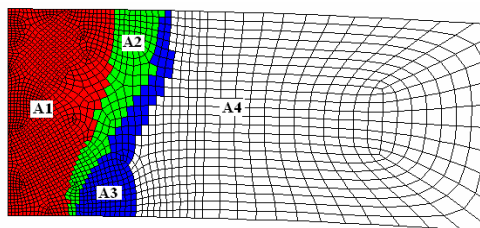
شکل ۱۱ - منطقه ذوب و منطقه متأثر از جوشکاری برای سه مورد: مدل دوبعدی، سه بعدی و آزمایشگاهی

با نتایج آزمایشگاهی از نظر کیفی و کمی مقایسه شده است. همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، صرف‌نظر کردن از انتقال گرما در جهت طولی باعث شده است که پهنای منطقه مذاب در حالت دوبعدی از سه بعدی بیشتر شود و برعکس، پهنای ناحیه متأثر از گرما در حالت سه بعدی از دوبعدی بیشتر شود.

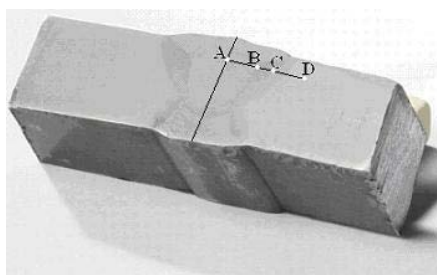
تا حدی انتقال گرمای هدایتی در جهت طولی نیز صورت می‌گیرد.

در انتهای حل گرمایی، برنامه قادر خواهد بود منطقه ذوب^۷ (FZ) و منطقه متأثر از جوشکاری (HAZ) را مشخص کند. نتایج حاصل از این کار برای مدل دوبعدی و سه بعدی در شکل (۱۱)

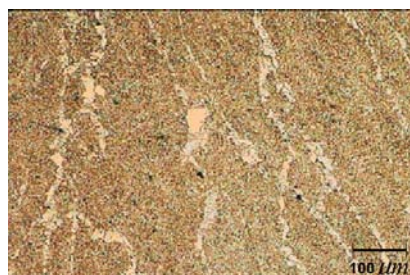
Zone	% Bainite	% Ferrite
A1	60	40
A2	40	60
A3	20	80
A4	0	100



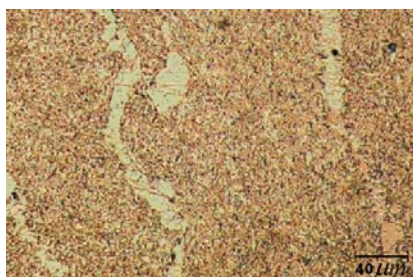
شکل ۱۲ - فازهای به دست آمده از شبیه سازی



موقعیت نقاط بررسی شده



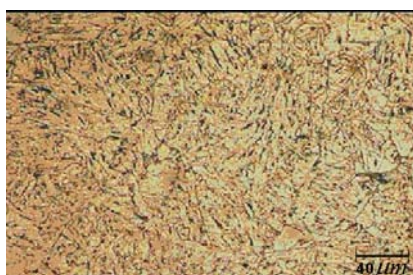
نقطه A (داخل ناحیه FZ)



نقطه A (داخل ناحیه FZ)



نقطه B (فصل مشترک ناحیه FZ و HAZ)



نقطه C (داخل ناحیه HAZ)



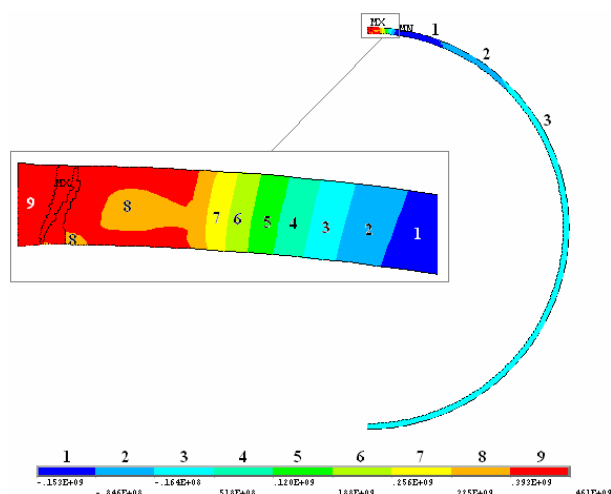
نقطه D (داخل ناحیه BASE)

شکل ۱۳ - نتایج حاصل از متالوگرافی نمونه

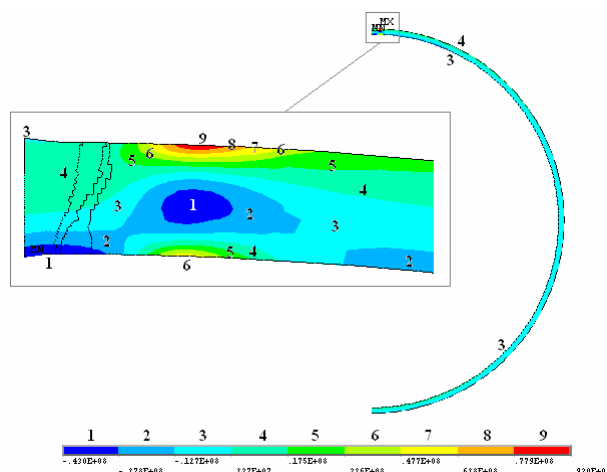
۶- تعیین ساختارهای متالورژیکی

بعد از مشخص شدن نواحی مذاب و متاثر از گرما نوبت به تعیین فازها درون این دو ناحیه می‌رسد و از آنجایی که ناحیه بدنه لوله تغییر فاز نمی‌دهد این ناحیه وارد حلقه محاسبات نمی‌شود. نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل (۱۲) آمده است که نشان می‌دهد در ناحیه‌های مذاب و متاثر از گرما، ترکیبی از فازهای فریت و بینیت تشکیل می‌شود به طوری که درصد بینیت

با دور شدن از صفحه تقارن کاهش می‌یابد. انتهای ناحیه A3 در این شکل در حقیقت همان انتهای ناحیه متاثر از گرماست. لازم به ذکر است چون فولاد مربوطه در ناحیه بدنه شامل فریت و درصد کمی پرلیت است در شکل تنها فاز فریت قید شده است. نتایج حاصل از متالوگرافی نمونه نیز در شکل (۱۳) آمده است. در این شکل نتایج مربوط به چهار نقطه با فاصله متفاوت از صفحه تقارن و روی یک خط نشان داده شده است.



شکل ۱۵ - توزیع تنش پسماند طولی بعد از فرایند جوشکاری (Pa)



شکل ۱۴ - توزیع تنش پسماند عرضی بعد از فرایند جوشکاری (Pa)

جابه‌جایی نسبت به انتقال گرما هدایتی در سرد کردن ناحیه جوش، ناچیز می‌شود و لذا تنشهای پسماند طولی تقریباً تغییری از x خواهند بود. در مورد تنشهای پسماند عرضی (محور x) با توجه به ناچیز بودن گرادیان گرما در جهت z این تنشها فقط متأثر از گرادیان در جهت y اند که خود در مقایسه با گرادیان گرما در جهت x ناچیز است لذا باید انتظار داشت تنشهای پسماند عرضی نسبت به تنشهای پسماند طولی کمتر باشد. این موضوع در نتایج به خوبی مشهود است.

در شکل (۱۶) تنشهای پسماند طولی بر روی سطح خارجی لوله حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از آزمایش سوراخکاری کرنش سنجی مقایسه شده است، انطباق بسیار خوب نتایج اعتبار تحلیل را به اثبات می‌رساند. در فواصلی که گرما ناشی از جوشکاری قادر به تنش زدایی بدنه لوله حاوی تنشهای ناشی از عملیات شکل‌دهی قبل نیست نتایج شبیه‌سازی و آزمایش از هم فاصله گرفته‌اند.

۸- تأثیر استحاله‌های فازی بر تنشهای پسماند

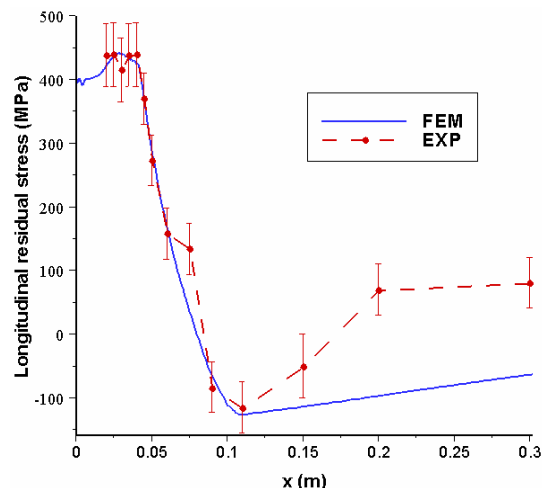
به منظور بررسی تأثیر استحاله‌های فازی بر روی تنشهای پسماند، شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن استحاله‌های فازی انجام

بررسیهای ریز ساختاری کیفی توسط میکروسکوپ نوری بر روی نمونه نیز نشان می‌دهد که ساختار نمونه در منطقه بدنه شامل فریت و درصد کمی پرلیت است و در نواحی مذاب و متأثر از گرما دانه‌های فریت و بینیت مشاهده می‌شود. درصد فاز بینیت در ناحیه مذاب از ناحیه متأثر از گرما بیشتر است که این نتایج با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطابقت دارد.

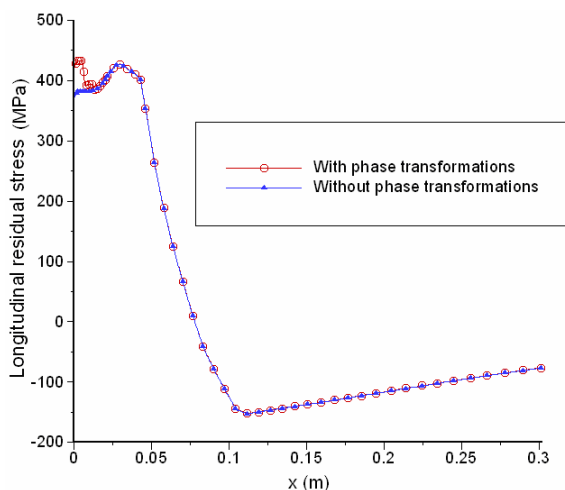
۷- نتایج حل مکانیکی

تنش عمود بر امتداد خط جوش را تنش پسماند عرضی و تنش موازی با امتداد خط جوش را تنش پسماند طولی نامگذاری می‌کنیم. شکل (۱۴) توزیع تنش پسماند عرضی و شکل (۱۵) توزیع تنش پسماند طولی را بعد از فرایند جوشکاری در حالت دوبعدی نشان می‌دهد.

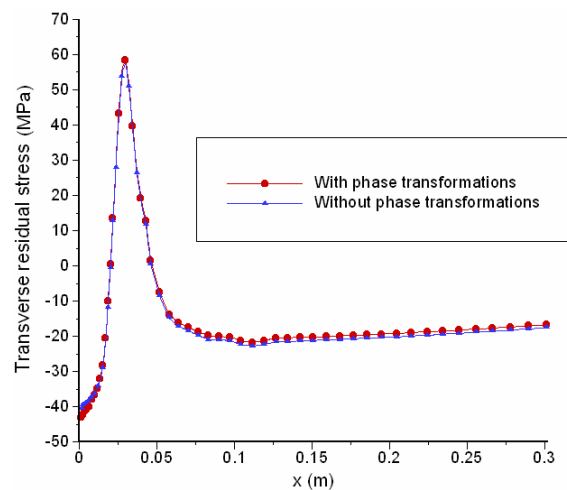
به طور کلی در مورد تنشهای پسماند طولی (محور z) شاهد تنش کششی بسیار بزرگی در نزدیک ناحیه جوش هستیم که دلیل این امر را مطابق نتایج حل گرمایی باید در وجود گرادیان بالای دما نسبت به جهات عمود بر آن (x و y) در نزدیکی ناحیه جوش دانست. البته در بخشهای قبل مشخص شد که گرادیان گرما در جهت y پس از مدتی به دلیل سهم کمتر انتقال گرما



شکل ۱۶ - تنش پسماند طولی بر روی سطح خارجی بر حسب موقعیت فاصله محیطی از مرکز جوش



شکل ۱۸ - تنش پسماند طولی بر روی سطح داخلی بر حسب فاصله محیطی از مرکز جوش
(با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن استحاله‌های فازی)



شکل ۱۷ - تنش پسماند عرضی بر روی سطح داخلی بر حسب فاصله محیطی از مرکز جوش
(با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن استحاله‌های فازی)

۹- نتیجه‌گیری

۱. انتقال گرما دایمی نقش بسیار مهمتری نسبت به انتقال گرما جابه‌جایی و تشعشع، در خنک‌سازی ناحیه جوش دارد.
۲. در تمامی موارد مورد مطالعه در این تحقیق که برگرفته از شرایط عملی جوشکاری لوله‌ها بود نسبت سرعت جوشکاری به سرعت انتقال گرمای هدایتی در امتداد جوش بسیار بیشتر است لذا نتایج مدل دو بعدی تطابق بسیار خوبی با نتایج مدل سه‌بعدی دارد. این امر در بالا بردن

شده است. شکلهای (۱۷) و (۱۸) تنشهای پسماند عرضی و طولی بر روی سطح داخلی را برای دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن استحاله‌های فازی مقایسه کرده است. این شکلهای بیانگر این مطلب‌اند که برای شرایط این تحقیق، استحاله‌های فازی تنها در ناحیه جوش تأثیر کمی بر روی تنشهای پسماند دارند و در ناحیه‌های دیگر این اثر بسیار ناچیز است. که این مطلب با نتیجه به‌دست آمده توسط چو [۹] در مورد فولادهای کم کربن نظیر آنچه در این تحقیق مطالعه شده‌است، تطابق دارد.

قدردانی

این تحقیق به طور کامل تحت حمایت شرکت لوله و تجهیزات سدید به انجام رسیده است. کلیه نمونه‌های مورد مطالعه بر مبنای اطلاعات خطوط تولید این شرکت شبیه‌سازی و آزمایشات عملی متالوگرافی و سوراخکاری کرنش سنجی بر روی نمونه‌ها به ترتیب در شهرک علمی تحقیقاتی اصفهان و آزمایشگاه جوشکاری دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام گرفته‌اند. همچنین اطلاعات جامع خواص مواد مورد استفاده از سوی تولید کننده آن، شرکت پوسکو^۸ کره جنوبی، در اختیار محققان قرار گرفته است که بدین وسیله از همکاری کلیه عزیزان تشکر می‌شود. همچنین مراتب قدردانی گروه پژوهشی را از همکاری پروفیسور گادالا^۹ نسبت به موافقت در اجرا و اخذ پاسخهای نهایی در آزمایشگاه اجزای محدود و بهینه سازی دانشگاه بریتیش کلمبیا در ونکوور کانادا اعلام می‌دارد.

سرعت شبیه‌سازی موثر است. این موضوع مشاهدات محققان قبلی مبتنی بر کفایت دقت تحلیل‌های دوبعدی فرایند جوشکاری را تأیید می‌کند.

۳. روی سطوح ماکزیمم تنش پسماند عرضی در نزدیکی ناحیه جوش رخ می‌دهد و در نقاط دور از این منطقه مقدار این تنش تقریباً صفر می‌شود.

۴. در اطراف ناحیه جوش، تنش پسماند طولی کششی بسیار بزرگی حاصل می‌شود و با دور شدن از ناحیه جوش این مقدار کاهش می‌یابد.

۵. با توجه به نتایج نشان داده شد که استحاله‌های فازی برای شرایط این تحقیق تأثیر چندانی بر روی تنشهای پسماند ندارند. این موضوع با نتایج محققان دیگر که تأثیر استحاله‌های فازی بر روی تنشهای پسماند را در فولادهای کم کربن ناچیز دانسته‌اند تطابق دارد.

واژه نامه

1. submerged arc welding (SAW)
2. heat affected zone (HAZ)
3. heat source
4. hole drilling
5. reference plane
6. continuous cooling transformation diagram (CCT)
7. fusion zone
8. Posco
9. Gadala

10. Dirichlet
11. Neumann
12. Stefan-Boltzmann
13. back stress tensor
14. Transformation induced plasticity
15. Greenwood
16. Johnson
17. Koistinen
18. Marburger

مراجع

1. Koch, F.O., Peek, A., and Elfinger, F.X., "Influence of Weld Residual Stresses on the Stress Corrosion Cracking Behavior of Submerged arc Welded Pipes," *Residual Stresses Science and Technology*, Vol. 2, Garmisch-partenkirchen, FRG, 1986.
2. Koch, F.O., Peek, A., Haumann, W., and Christensen, C., "Treatment of SAW-Pipes to Attain Improved Resistance Against Hydrogen Sulphide Stress Corrosion Cracking," *Int. Journal of Pipelines*, Vol. 26, No. 5, pp. 335-340, 1987.
3. Manfredi C., and Otegui J.L. "Failures by SCC in Buried Pipelines," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, pp. 495-509, 2002.
4. Mackerle, J., "Finite Element Analysis and Simulation of Welding: a Bibliography (1976-

- 1996)," *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 4, pp. 501-533, 1996.
5. Mackerle, J., "Finite Element Analysis and Simulation of Welding-an Addendum: a Bibliography (1996-2001)," *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 10, pp. 295-318, 2002.
6. Andersson, B. A. B., "Thermal Stresses in a Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformations," *Transactions of the ASME*, Vol. 100, pp. 356-362, 1978.
7. Goldak, J., Chakravarti, A., and Bibby, M., "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 15B, pp. 299-305, 1984.

8. Roelens, J.B., "Numerical Simulation of Some Multipass Submerged arc Welding Determination of the Residual Stresses and Comparison with Experimental Measurements," *Welding in the world*, Vol.35, No.2, pp. 17-24, 1995.
9. Cho, S. H., and Kim, J. W., "Analysis of Residual Stress in Carbon Steel Weldment incorporating Phase Transformations," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 7, No. 4, pp. 212-216, 2002.
10. Yajiang, L., Juan, W., Maoai, C., and Xiaoqin, S., "Finite Element Analysis of Residual Stress in the Welded Zone of a High Strength Steel," *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 27, No. 2, pp. 127-132, 2004.
11. Gery, D., Long, H., and Maropoulos, P., "Effects of Welding Speed, Energy Input and Heat Source Distribution on Temperature Variations in Butt Joint Welding," *Journal of Materials Processing Technology*, 2005.
12. ANSYS Rev 10.0, ANSYS, Inc, Canonsburg, PA, 2006.
13. Pilipenko, A., "Computer Simulation of Residual Stress and Distortion of Thick Plates in Multi-Electrode Submerged arc Welding," Department of Machine Design and Materials Technology, Norwegian University of Science and Technology, N-7491, Trondheim, Norway, 2001.
14. Forouzan, M.R., and Choo, W.Y., Personal Conversation.
15. Taljat, B., Radhakrishnan, B., and Zacharia, T., "Numerical Analysis of GTA Welding Process with Emphasis on Post-Solidification Phase Transformation Effects on Residual Stresses," *Materials Science and Engineering*, Vol. A246, pp. 45-54, 1998.
16. Rammerstorfer, F.G., and Fisher, D.F., "On Thermo-Elastic-Plastic Analysis of Heat-Treatment Process Including Creep and Phase Changes," *Computers and Structures*, Vol. 13, pp. 771-779, 1981.
17. Alberg, H., "Material Modeling for Simulation of Heat Treatment," Division of Computer Aided Design, Lulea University of Technology, MS Thesis, 2003.
18. Kamamoto, S., Nihimori, T., and Kinoshita S., "Analysis of Residual Stress and Distortion Resulting from Quenching in Large Low-Alloy Steel Shafts," *Journal of Mechanical Science and Technology*, pp.798-804, 1985.
19. Wen, S. W., Hilton, P., and Farrugia, D. C. J., "Finite Element Modeling of a Submerged Arc Welding Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, pp. 203-209, 2001.
20. Chang P. H., and Teng, T. L., "Numerical and Experimental Investigations on the Residual Stresses of the Butt-Welded Joints," *Computational Materials Science*, Vol. 29, pp. 511-522, 2004.
21. Toparli, M., and Aksoy, T., "Calculation of Residual Stresses in Cylindrical Steel Bars Quenched in Water from 600C," *Proceeding of ASME Conference*, Vol. 4, India, pp. 93-104, New Delhi 1991.
22. Wang, K. F., Chandrasekhar, S., and H. T. Yang, "An Efficient 2D Finite Element Procedure for the Quenching Analysis With Phase Change," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, pp. 124-138, 1993.
23. Denis, S. D., Gautier, E., Simon, A., and Beck, G., "Stress-Phase-Transformation Interactions Basic Principles Modeling and Calculation of Intended Stresses," *Materials Science and Technology*, Vol. 1, pp. 805-814, 1985.
24. Toparli, M., and Shain, S. , "Residual Thermal Stress Analysis in Cylindrical Steel Bars sing Finite Element Method and Artificial Neural Networks," *Computers and Structures*, Vol. 80, pp. 1763-1770, 2002.
25. Fernandes, F. M. B., Denis, S., and Simon, A., "Mathematical Model Coupling Phase Transformation and Temperature Evolution During Quenching of Steels," *Material Science and Technology*, Vol.1, pp. 838-844, 1985.

پیوست:

پیوست الف - معادلات حاکم

الف-۱- معادلات گرمایی

انتقال گرما در فلزات تابع قانون فوریه است. شار گرمایی بر واحد سطح (q) متناسب با گرادیان دما (T) است که ضریب آن (k) معرف هدایت حرارتی است:

$$q = -k_n \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{الف-۱})$$

در رابطه فوق n جهت عمود بر سطح را نمایش می دهد. با استفاده از قانون فوریه و اصل بقای انرژی می توان معادله گرما را مستقل از کرنشها به صورت زیر بیان کرد:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q} \quad (\text{الف-۲})$$

در این رابطه c و ρ و k به ترتیب ظرفیت گرمایی، چگالی و ضریب انتقال گرمای هدایتی جسم و $\dot{Q}$ نرخ تولید انرژی بر واحد حجم ماده است. با توجه به اینکه معمولاً خواص c و ρ و k نسبت به دما متغیرند رابطه فوق غیر خطی خواهد بود.

الف-۲- شرایط مرزی و شرایط اولیه گرمایی

به طور کلی در مسئله جوشکاری پنج نوع شرط مرزی می‌تواند ظاهر شود.

شرط مرزی اول - دمای سطح ثابت: این شرط معمولاً شرط دیریشله^{۱۰} نامیده می‌شود. و برای بیان شرایط تماس یک سطح با مذاب مناسب است.

$$T(0, t) = T_s \quad (\text{الف-۳})$$

که T_s دمای سطح است.

شرط مرزی دوم - شار گرمای معین: این شرط، شرط نیومن^{۱۱} نام دارد و برای بیان اثر قوس ناشی از جوشکاری بر سطح ماده به کار می‌رود.

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0} = q_s \quad (\text{الف-۴})$$

که q_s شار گرمای ثابت در سطح است.

شرط مرزی سوم - سطح عایق بندی یا آدیاباتیک: این شرط حالت خاصی از شرط دوم است و برای بخشهای پوشش یافته با فلاکس یا مرزهای متقارن کاربرد دارد.

$$\frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0} = 0 \quad (\text{الف-۵})$$

شرط مرزی چهارم - جابه‌جایی روی سطح: این شرط به وجود گرمایش یا سرمایش در سطح مربوط می‌شود و از قانون نیوتن تبعیت می‌کند:

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0} = h_c (T_s - T_\infty) \quad (\text{الف-۶})$$

که در این رابطه T_∞ دمای سیال در تماس با قطعه است و h_c ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی جسم بوده و تابع دما، موقعیت سطوح، سرعت سیال و... است. در مناطق پوشش یافته توسط پودر جوش (فلاکس) عملاً جابه‌جایی آزاد از سطح در جوشکاری زیرپودری به نزدیک صفر می‌رسد که منطبق بر شرط سوم است. در این نوع جوشکاری سطوح دیگر با هوای آزاد در تماس اند که در این تحقیق $h_c = 10$ در نظر گرفته شده است [۹]. در جوشکاریها یی که با گاز محافظ انجام می‌گیرد بسته به نوع و سرعت گاز این عدد می‌تواند تا چندین برابر افزایش یابد.

شرط مرزی پنجم - تشعشع روی سطح: انتقال گرمای تشعشعی سطح نیز به وسیله قانون استفان بولتزمن^{۱۲} محاسبه می‌شود:

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0} = \varepsilon \sigma_{sb} (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (\text{الف-۷})$$

که T_{sur} دمای محیط اطراف و ε ضریب صدور جسم و σ_{sb} ثابت استفان بولتزمن است که مقدار آن برابر با $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ است.

در بسیاری از کاربردها ساده‌تر است که انتقال گرمای تشعشعی سطح به صورت زیر بیان شود:

$$q_{\text{rad}} = h_r (T_s - T_{\text{sur}}) \quad (\text{الف-۸})$$

که در آن ضریب انتقال گرمای تشعشعی h_r با استفاده از روابط (الف-۷) و (الف-۸) به صورت زیر در می آید:

$$h_r = \varepsilon \sigma_{\text{sb}} (T_s + T_{\text{sur}})(T_s^2 + T_{\text{sur}}^2) \quad (\text{الف-۹})$$

چون این رابطه به دمای سطح که خود مجهول مسئله است وابسته است شرایط غیر خطی شدیدی بر تحلیل عددی مسئله حاکم می شود. لذا اغلب به طور مستقیم از رابط (الف-۹) استفاده نمی کنند. رابطه (الف-۱۰) تقریب دو خطی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد.

$$h_{\text{eq}} = h_c + h_r = \begin{cases} 10 + 0.06\theta \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C} & 0 \leq \theta \leq 500 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.22\theta - 70 \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C} & \theta > 500 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (\text{الف-۱۰})$$

شرط اولیه گرمایی: برای شرط اولیه گرمایی بایستی توزیع دمای اولیه تمام نقاط مشخص باشد که معمولاً در فرایندهای جوشکاری همان دمای محیط است.

الف-۳- تحلیل تنش

ورود جسم به ناحیه پلاستیک عامل اصلی ظهور تنشهای پسماند در جسم است. معادلات حاکم در این بخش معادلات تعادل، متشکله و پیوستگی است که تحت شرایط بارگذاری گرمایی می بایست حل شود. انبساط ماده در اثر تغییر دما باعث ایجاد کرنشهای گرمایی می شود که ارتباط حرارت و بارگذاری گرمایی را مشخص می کند. اما باید دانست که در مسئله جوشکاری کرنشهای دیگری ناشی از خواص متالورژیکی ماده به مسئله تحمیل می شود. به دنبال، کل این روابط به صورت خلاصه ارائه شده است:

رابطه تعادل:

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0 \quad (\text{الف-۱۱})$$

در این رابطه b_i شدت نیروی بدنی وارده به جسم و $\sigma_{ij,j}$ معرف مشتقات تنش در امتدادهای مختلف است.

رابطه متشکله جسم الاستو پلاستیک

در بخش الاستیک

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e \quad (\text{الف-۱۲})$$

که در آن C_{ijkl} تانسور ضریب الاستیک جسم است و برای مواد همسانگرد تنها دارای دو ثابت مستقل است و ε_{kl}^e نماینده تانسور کرنش الاستیک است.

در بخش پلاستیک متشکله غیرخطی است و توسط مفاهیم سطح تسلیم و قانون جریان بیان می شود.

سطح تسلیم

$$f = \bar{\sigma} - \sigma_y \begin{cases} < 0 & \text{حالت الاستیک} \\ = 0 & \text{روی سطح تسلیم} \end{cases} \quad (\text{الف-۱۳})$$

σ_y حد تسلیم نامیده می شود که وابسته به دما بوده و تغییرات آن وابسته به نوع کارسختی جسم است. $\bar{\sigma}$ تنش موثر نام دارد و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{3}{2} (S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{الف-۱۴})$$

در این رابطه α_{ij} تانسور تنش پستی^{۱۳} است که در سختی سینماتیک موقعیت مرکز سطح تسلیم را نشان می‌دهد و S_{ij} تانسور تنش کاهش یافته یا انحراف تنش بوده و توسط رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{II} \quad (\text{الف-۱۵})$$

که δ_{ij} تابع دلتای کرونکر است و σ_{II} برابر با جمع روی مؤلفه‌های قطری تانسور تنش جسم است. بهتر است در شبیه سازی فرایندهای جوشکاری از قانون کارسختی سینماتیک استفاده شود چراکه الیافی از ماده که حین گرمادهی فشرده می‌شوند در حین سرمایش کشیده خواهند شد و بالعکس.

قانون جریان

$$d\epsilon_{ij}^P = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (\text{الف-۱۶})$$

در این رابطه $d\lambda$ ضریب پلاستیک جسم و f تابع سطح تسلیم است. با توجه به اینکه کرنشهای ایجاد شده در فرایند جوشکاری می‌تواند در اثر گرادیان دمای داخل جسم و یا استحالتهای فازی ماده طی فرایند ایجاد شود، در بررسی این پدیده نرخ کرنش در تغییر شکل ماده به اجزای الاستیک، پلاستیک، گرمایی و استحالتهای تقسیم می‌شود.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^P + d\epsilon_{ij}^{th} + d\epsilon_{ij}^{tr} + d\epsilon_{ij}^{tp} \quad (\text{الف-۱۷})$$

در این رابطه $d\epsilon$ کل کرنش، $d\epsilon_{ij}^P$ کرنش پلاستیک، $d\epsilon_{ij}^{th}$ کرنش گرمایی، $d\epsilon_{ij}^{tr}$ کرنش حاصل از استحالته و $d\epsilon_{ij}^{tp}$ کرنش پلاستیک استحالتهای^{۱۴} ایجاد شده در جسم است بنابراین به کمک قانون هوک رابطه نرخ تنش ایجاد شده و نرخ کرنشهای الاستیک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl} d\epsilon_{kl}^e = C_{ijkl} (d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^P - d\epsilon_{kl}^{th} - d\epsilon_{kl}^{tr} - d\epsilon_{kl}^{tp}) \quad (\text{الف-۱۸})$$

به کمک رابطه الف-۱۶ و استفاده از رابطه سطح تسلیم می‌توان نوشت:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^P = \dot{\epsilon}^P \frac{3}{2\bar{\sigma}} (S_{ij} - \alpha_{ij}) \quad (\text{الف-۱۹})$$

$\dot{\epsilon}^P$ نرخ کرنش پلاستیک مؤثر جسم است که به عنوان معیاری از اندازه‌ی تانسور نرخ کرنش پلاستیک جسم است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\epsilon}^P = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^P \dot{\epsilon}_{ij}^P} \quad (\text{الف-۲۰})$$

کرنشهای گرمایی ناشی از انبساط و انقباض جسم نیز از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$d\epsilon_{ij}^{th} = \alpha \delta_{ij} dT \quad (\text{الف-۲۱})$$

در این رابطه α ضریب انبساط گرمای طولی ماده و T دمای جسم است.

در زمان ایجاد استحالته فازی، کرنشهای ایجاد شده در جسم در اثر پدیده استحالته فازی را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد. قسمت اول مربوط به کرنشهای پلاستیک میکروسکوپی ایجاد شده در قطعه است که کرنش پلاستیک استحالتهای نامیده می‌شود و

رابطه آن به صورت:

$$d\varepsilon_{ij}^{tp} = 3\kappa(1-z)s_{ij}dz \quad (\text{الف-۲۲})$$

توسط گرینود^{۱۵} و جانسون^{۱۶} ارائه شده است [۲۳]. قسمت دوم، کرنشهای حجمی ایجاد شده در جسم در اثر استحاله فازی است که کرنش حاصل از استحاله نامیده می شود و به صورت کرنش دائمی در جسم ایجاد می شود و از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$d\varepsilon_{ij}^{tr} = \beta_{a \rightarrow b}^T \delta_{ij} dz \quad (\text{الف-۲۳})$$

در این رابطه $\beta_{a \rightarrow b}^T$ کرنش حجمی ناشی از استحاله بوده که برای استحاله مارتنزیتی تقریباً برابر ۰/۰۴۶ و برای استحاله پرلیتی ۰/۰۰۷ است. پارامتر z درصد حجمی فاز ایجاد شده است که برای استحاله مارتنزیتی توسط معادله ارائه شده توسط کویستین^{۱۷} و ماربورگر^{۱۸} به صورت زیر قابل محاسبه است [۲۴].

$$z = 1 - \exp[-\eta(M_s - T)] \quad (\text{الف-۲۴})$$

در رابطه فوق M_s دمای آغاز تشکیل مارتنزیت و T دمای قطعه است. مقدار η نیز برای اکثر فولادها برابر با $۰/۰۱ \text{ K}^{-1}$ است [۲۵].
نمو کرنشهای به دست آمده از روابط فوق نیز باید روابط همسازی و پیوستگی جسم را ارضا کند. بنابراین به کمک روابط فوق تنشها و اعوجاج ایجاد شده در فرایند جوشکاری قابل محاسبه اند.