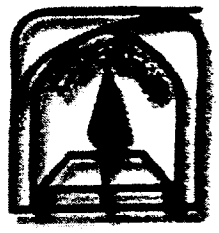

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکدهٔ فنی و مهندسی

پایان نامهٔ کارشناسی ارشد
مکانیک- طراحی کاربردی

تحلیل و ارزیابی تنشهای پسماند جوش در مخازن تحت فشار به روش اجزاء محدود

استاد راهنما:

چکیده

فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی منجر به ایجاد تغییرات پیچیده فیزیکی ومتالورژیکی درقطعه کار می شود. در این فرآیند همچنین عوامل غیر خطی کننده ماده نظیر پارامترهای وابسته به دمای جوش باعث پیچیده تر شدن بیشتر مسأله می شود. به همین جهت ارائهٔ یک مدل ریاضی دقیق حرارتی و تنشی در این شرایط بسیار مشکل است. با توجه به کاربرد وسیع مخازن تحت فشار و لوله ها در صنعت و استفاده فراوان از روشهای مختلف جوشکاری لزوم بسط دادن تحلیل تنشهای پسماند ناشی از جوش به این کاربرد مهم صنعتی بسیار اهمیت می یابد.

در این تحقیق یک تحلیل حرارتی- مکانیکی گذرای سه بعدی برای جوشکاری قوسی با گاز محافظ به روش اجزاء محدود با المانSolid برای دو هندسه یکی جوشکاری تیگ در دو حالت یک پاس و سه پاس و دیگری جوشکاری میگ در حالت یک پاس انجام شده است. به خاطر اینکه حرارت تولید شده در اثر کرنش الاستو- پلاستیک در جوشکاری نسبت به حرارت ایجاد شده توسط قوس الکتریکی ناچیز می باشد؛ لذا تحلیل حرارتی- مکانیکی به دو بخش تقسیم می شود. در بخش اول یک تحلیل انتقال حرارت گذرای سه بعدی انجام شده وتاریخچهٔ حرارتی جوش محاسبه می گردد. در بخش دوم با استفاده از نتایج دمایی بدست آمده از بخش نخست، یک تحلیل ترمو- الاستو- پلاستیک گذرای سه بعدی برای محاسبه تغییر شکلها، کرنش ها وتنش های گذرا و پسماند جوش انجام می گردد. سپس نتایج با داده های تجربی موجود مقایسه می گردد. در این پایان نامه تمامی خواص مکانیکی ماده به صورت تابعی از دما لحاظ می شوند.

از نتایج این تحقیق می توان به دقت بالاتر نتایج تحلیل سه پاس المان Solid نسبت به تحلیل تک پاس برای هندسهٔ تیگ و شرایط جوشکاری و تطابق بسیار خوب نتایج با داده های تجربی اشاره نمود. همچنین در هندسهٔ میگ نتایج المان Solid در مورد تنش محوری از المانShell به داده های تجربی نزدیکتر و در مورد تنش محیطی دورتر می باشد. علاوه براین می توان گفت روش عددی اجزاء محدود قادر به پیش بینی نتایج تنش پسماند جوشکاری می باشد.

واژگان کلیدی: تنش پسماند، جوش محیطی، روش اجزاء محدود، جوشکاری تیگ، جوشکاری میگ، چند پاس، مدل حرارتی و مکانیکی سه بعدی، ANSYS

فهرست مطالب :

عنوان ..... صفحه

۱.مقدمه ومعرفی ۱

۲.مقدمه ای بر جوشکاری و اصول حرارتی جوشکاری با قوس الکتریکی ۵

۱،۲.تعریف جوش ۵

۱،۱،۲.برتریهای روش جوشکاری نسبت به پرچ ۵

۲،۱،۲.مشکلات روش جوشکاری ۶

۳،۱،۲.عوامل مهم در موفقیت فرآیند جوشکاری ۷

۴،۱،۲.رده بندی فرآیندهای جوشکاری ۷

۲،۲.تقسیم بندی روشهای جوشکاری ۸

۳،۲.انواع روشهای جوشکاری قوس الکتریکی ۱۰

۱،۳،۲. اصول فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ ۱۱

۲،۳،۲.جوشکاری با قوس الکتریکی و الکترود فلزی ۱۳

۳،۳،۲.جوشکاری تنگستن با گاز ۱۴

۴،۲.بیان مدل ریاضی حرارت وارد شده به منطقهٔ جوشکاری ۱۹

۵،۲.مشخصات جریان حرارت در جوشکاری قوسی ۲۳

۱،۵،۲.عوامل مؤثر ۲۳

۲،۵،۲.حالتهای شبه ساکن و غیر ساکن ۲۴

۳،۵،۲.عوامل مؤثر بر نرخ خنک کاری منطقهٔ متأثر از حرارت ۲۴

۴،۵،۲. پرهیز از خرابی احتمالی جوش ۲۵

۳. تنشهای پسماند و روشهای اندازه گیری آن ۲۶

۱،۳. تنش پسماند ۲۶

۲،۳.انواع تنشهای پسماند ۲۷

۳،۳. عوامل ایجادکنندهٔ تنش های پسماند ۲۹

۴،۳.تغییر شکلهای جوشکاری ۳۲

۳،۴،۱.دلایل تنشها و تغییر شکلهای جوشکاری ۳۳
۳،۴،۲.رشد تنش طولی در حین فرآیند جوشکاری ۳۵
۳،۴،۳.رشد تنش عرضی در حین فرآیند جوشکاری..... ۴۰
۳،۵. روابط اساسی برای یک میدان تنش پسماند صفحه ای دو بعدی ۴۱
۳،۶.تنش های جوشی پسماند و تنش های عکس العملی ۴۳
۳،۷. حرکت فلز در زمان جوشکاری ۴۳
۳،۸ روش های تجربی برای اندازه گیری تنش های پسماند در قطعات مهندسی ۴۵
۳،۸،۱.راهنمای انتخاب روش ۴۷
۳،۸،۲.معرفی روشهای مختلف ۵۰
۳،۹. اهمیت روش های عددی در تحلیل تنش های پسماند ۵۷
۳،۱۰. راههای کاهش تنش پسماند ۵۷
۴.مدل ترمومکانیکی جوش و بررسی پارامترهای مؤثر در آن ۵۸
۴،۱.تاریخچه ۵۸
۴،۲.بررسی اثر فیلدهای مختلف مؤثر در جوشکاری ۶۰
۴،۳. مدل ترمومکانیکی فرآیند جوشکاری ۶۴
۴،۳،۱. بررسی تفصیلی این روشها ۶۵
۴،۳،۲. مدلهای مرسوم جوش محیطی ۶۵
۴،۳،۳. پارامترهای مهم در مدلسازی ۶۶
۴،۳،۴. تقارن دورانی در جوشهای محیطی ۶۸
۴،۴. بررسی اثر ترتیب جوشکاری در جوشهای چند پاس ۶۸
۴،۵. تئوری آنالیز کرنش ذاتی ۷۲
۴،۶. روش کرنش ویژه ۷۳
۴،۷.تخمین تنش پسماند ۷۴
۵.مدل المان محدود جوش ۷۶
۵،۱.فرمول بندی المان محدود جوش ۷۶
۵،۱،۱.آنالیز المان محدود برای فیلد حرارتی ۷۷

۵،۱،۲.آنالیز المان محدود برای فیلد مکانیکی ۸۰
۵،۱،۳.مدل کردن عملکرد مکانیکی ماده ۸۴
۵،۱،۴.فرمولاسیون کرنش بزرگ ۸۴
۵،۱،۵. پلاستیسیته ۸۵
۵،۱،۶. قانون نرخ کرنش Brust ۸۷
۵،۱،۷.بررسی اثر پلاستیسیتهٔ انتقالی ۸۹
۵،۱،۸ چند رابطهٔ تجربی مربوط به آنالیز حرارتی ۹۲
۵،۱،۹. افزودن مادهٔ پر کنندهٔ جوشکاری ۹۲
۵،۱،۹،۱.روش تولد المان ۹۳
۵،۱،۹،۲.روش حرکت المان ۹۴
۵،۲.چند ویژگی نرم افزار ANSYS ، استفاده شده در این تحقیق ۹۸
۵،۲،۱.تولد و مرگ المان ۹۸
۵،۲،۲. اطلاعات اصلی مربوط به آنالیز غیر خطی ۹۹
۵،۲،۳.آنالیز میدان کوپله ۱۰۲
۵،۲،۴.جمع بندی دقیق روابط تنش-کرنش افزایشی در نرم افزار ۱۰۳
۵،۳. مدل حرارتی ۱۰۴
۵،۳،۱.هندسهٔ تیگ ۱۰۴
۵،۳،۲.هندسهٔ میگ ۱۰۵
۵،۳،۳. انتخاب المان حرارتی و مدل المان محدود ۱۰۶
۵،۳،۴. محاسبات مربوط به مدل حرارتی تیگ ۱۰۸
۵،۳،۵. محاسبات مربوط به مدل حرارتی میگ ۱۱۰
۵،۳،۶. شرایط مرزی حرارتی ۱۱۲
۵،۴. مدل مکانیکی ۱۱۲
۵،۴،۱.انتخاب المان سازه ای و مدل المان محدود ۱۱۲
۵،۴،۲. خواص مکانیکی ماده در آنالیز تیگ ۱۱۲
۵،۴،۳. خواص مکانیکی ماده در آنالیز میگ ۱۱۵
۵،۴،۴. اعمال تاریخچهٔ دمایی در مدل مکانیکی ۱۱۷

۵،۴،۵. اعمال دمای برش ۱۱۷
۶،۴،۵. شرایط مرزی مکانیکی ۱۱۸
۷،۴،۵. فرضهای روش المان محدود ۱۱۸
۸،۴،۵. توضیحات کلی دربارهٔ فرآیند حل مسأله ۱۱۹
۶. نتایج مدل المان محدود ۱۲۰
۱،۶.نتایج مدلهای حرارتی ۱۲۰
۱،۱،۶.نتایج مدل حرارتی تک پاس تیگ ۱۲۰
۲،۱،۶.نتایج مدل حرارتی سه پاس تیگ ۱۲۵
۳،۱،۶.نتایج مدل حرارتی میگ ۱۳۰
۲،۶.نتایج مدلهای مکانیکی ۱۳۱
۱،۲،۶.نتایج مدل مکانیکی تک پاس تیگ ۱۳۱
۱،۱،۲،۶. مشخصه های تغییر شکل ۱۳۱
۲،۱،۲،۶. تنشها و کرنشهای گذرا ۱۳۲
۳،۱،۲،۶. تنش پسماند ۱۳۷
۲،۲،۶.نتایج مدل مکانیکی سه پاس تیگ ۱۴۲
۳،۲،۶.نتایج مدل مکانیکی میگ ۱۴۷
۳،۶.مقایسهٔ نتایج با روشهای تجربی و نتیجه گیری ۱۵۱
۱،۳،۶.مدل تیگ ۱۵۱
۲،۳،۶.مدل میگ ۱۶۶
۴،۶. خلاصهٔ نتایج و پیشنهادات ۱۷۰
۱،۴،۶. نتایج حرارتی ۱۷۰
۲،۴،۶. نتایج مکانیکی ۱۷۲
۳،۴،۶. پیشنهادات ۱۷۵
فهرست مراجع ۱۷۶
ضمیمه ۱۸۰

۱.مقدمه و معرفی:

جوشکاری به طور وسیعی در صنایع مختلفی مثل هوا و فضا،ساخت کشتی،هسته ای ، پل سازی و ماشین سازی به کار می رود. جوشکاری محیطی لوله ها نیز کاربردهای عملی بسیار زیادی دارد مثل سیستمهای لوله کشی رآکتور بویلر آب ، سیستم لوله کشی انتقال نفت و سیستم لوله کشی بخار[۱].

فرآیند جوشکاری منجر به توزیع غیر یکنواختی از درجه حرارت می شود ، که با کرنشهای حرارتی وتغییر شکلهای پلاستیک محلی همراه است. تنشهای پسماند حاصل شده سبب مسائل مهمی چون شکست و کاهش مقاومت کمانشی سازه می شود[۲]. برای گسترش تکنولوژی جوشکاری، فهم بهتر پدیدهٔ پیچیدهٔ ترمومکانیکی در حین جوشکاری لازم است.این درک می تواند با استفاده از شبیه سازی کامپیوتر به صورت بهینه صورت گیرد[۳].

هنگام طراحی سازهٔ جوشی می بایست پارامترهای طراحی و ساخت از قبیل ضخامت ورق، طرح اتصال، شرایط جوشکاری، ترتیب جوشکاری و روش جوشکاری را به نحوی تغییر داد که اثرات زیان آور عیوب جوشکاری از جمله تنش های پسماند به میزان قابل قبولی کاهش یابد. نائل شدن به این هدف در مرحلهٔ اولیهٔ طراحی خیلی بهتر از مواجهه با مشکلات آتی در مرحلهٔ ساخت است. برای این منظور، انجام حداقل دو نوع آنالیز ضروری است :

۱) آنالیز تنشهای حرارتی گذرا، تنشهای پسماند و انحراف جوش

۲) آنالیز اثرات تنشهای حرارتی، تنشهای پسماند و انحراف بر روی کارکرد (سرویس دهی) سازه های جوشی.

با توجه به مطالب فوق، استفاده از روش های عددی و مخصوصاً روش اجزاء محدود جهت تخمین تنش های پسماند ضروری به نظر می رسد. در این رابطه موارد زیر قابل بررسی است :

۱) آنالیز میدان دمای گذرا و غیر یکنواخت جوش

۲) آنالیز تنشهای پسماند و انحراف جوش

۳) کاهش دادن میزان تنشهای پسماند و انحراف جوش

۴) اثرات جوش بر روی مقاومت

در این تحقیق فقط موارد (۱) و (۲) بررسی می شوند.

تنشهای پسماند در یک جزء یا سازه توسط کرنشهای دائمی داخلی ناسازگار ایجاد می شوند.آنها ممکن است در هر مرحله از سیکل عمر سازه از شروع تولید ماده تا تحویل نهایی ایجاد و یا تغییر نماید. جوشکاری یکی از مهمترین دلایل تنشهای پسماند است. تنشهای پسماند کششی بزرگی که اندازهٔ حداکثر آن تا مقاومت تسلیم مادهٔ اتصال داده شده را در بر می گیرد، توسط یک تنش پسماند فشاری در نقطه ای دیگر از سازه متعادل می شود[۴].

تنشهای پسماند کششی مضر هستند چون منشأ آغاز و رشد ترکهای خستگی هستند و جوشکاریها اغلب به صورت ویژه به خستگی به دلیل وجود تمرکز تنش که از جمله نقایص جوشکاری است ، حساس هستند.علاوه بر این در منطقهٔ جوش تنشهای پسماند به محدودهٔ تنشهای اعمال شدهٔ سازه افزوده می گردد که منجر به افزایش محدودهٔ تنش فعال و نهایتاً باز کردن ترکها می گردد. بنابر این نرخ رشد ترک به طور قابل ملاحظه ای در جوشها افزایش می یابد.تنشهای پسماند فشاری عموما سودمند هستند ولی سبب کاهش بار کمانشی می گردند. همچنین تنشهای پسماند غشایی ممکن است بر پاسخ دینامیکی اثر بگذارد به عنوان مثال در سازه های با ضخامت کم تنشهای پسماند غشایی فرکانسهای تشدید و شکل مودهای ارتعاشی را تغییر خواهند داد[۵].

تنشهای پسماند ایجاد شده توسط جوشکاری ممکن است عملکرد مکانیکی کل سازه را به چندین طریق تحت تاثیر قرار دهد.وقتی حساسیت موضعی برای رشد ترک در منطقهٔ متأثر از حرارت[۱] در نزدیکی جوش اهمیت می یابد، مهم است که تخمین خوبی از میدان تنش پسماند در این منطقه داشت.توسعهٔ سریع سخت افزار کامپیوتر و نرم افزارهای المان محدود، شبیه سازی عددی ایجاد تنش پسماند را تسهیل کرده است.همچنین واضح است که قابلیت نرم افزارهای امروزی چه در دمای بالا و چه در هنگام سرمایش و انتقال فازهای حالت جامد نسبت به دانش موجود خواص فولاد بیشتر است. بنابراین درک بهتر خواص ماده در طول این انتقال فازها برای تخمین نسبتاً خوب تنشهای پسماند در مادهٔ جوش و منطقهٔ متأثر از حرارت مورد نیاز است. اندازهٔ تنشهای پسماند نزدیک جوش به مقدار زیادی به مدلسازی انتقال فاز ماده بستگی دارد[۶].

طبیعت پیچیدهٔ فرآیند جوشکاری منجر به مشکلات فراوان در مدل کردن و آنالیز کردن با روشهای عددی می گردد. این پیچیدگیها عبارتند از خواص حرارتی و مکانیکی متغیر با درجه حرارت،انتقال حرارت گذرا با شرایط مرزی پیچیده ، منابع حرارتی متحرک ،تغییرات و انتقال فازها ، شرایط پیچیدهٔ تنشهای پسماند و مشکلاتی در اندازه گیریهای تجربی در دمای بالا. در مجموع بیشتر مشکلات

---

[۱] HAZ

جوشکاری مسائل کوپل شده از شاخه های مختلف مهندسی است. به عنوان مثال جریان سیال،ترمودینامیک،الکترو مغناطیس،توان الکتریکی و علم مواد همگی در مطالعهٔ حوضچهٔ مذاب جوش مورد نیاز است.به دلایل فوق استفاده از روش عددی احتیاط و دقت زیادی را طلب می کند[۷].

پیش بینی تنشهای پسماند بوسیله مدلسازی عددی جوشکاری و دیگر روشهای تولید در سالهای اخیر در تحقیقات مخازن تحت فشار و لوله کشی به سرعت افزایش یافته است. مدلسازی جوشکاری از نظر تکنولوژی و محاسباتی در حال رشد است و ساده سازی و ایده آل سازی خواص ماده، پارامترهای فرآیند و هندسه، اجتناب ناپذیر است.مدلسازی عددی یک وسیلهٔ قدرتمند برای پیش بینی تنش پسماند است ولی سنجش درستی آن با نتایج تجربی لازم است[۵].

مشخص گردیده است که پروسه های موجود برای ارزیابی صحت سازه در اکثر موارد قادر به پیش بینی اثرات تنشهای پسماند است و در برخی موارد نیز قادر به تخمین اثرات تنشهای پسماند بر عملکرد سازه نیست.

به دلیل ضخامت نسبتاً زیاد لوله ها در بعضی صنایع جوشکاری محیطی در چند پاس صورت می گیرد. این امر پیش بینی شکل تنشهای پسماند وخصوصاً تغییرات شکل آنها در طول ضخامت را مشکل می کند. هنگام ارزیابی خطر رشد بعضی عیوب از جمله درزهای سطحی در سیستم لوله کشی تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری نقش بیشتری در میدان تنش مجموع نسبت به عوامل دیگری مثل فشار داخلی، گرادیانهای درجه حرارت و نیروهای واکنش تکیه گاهی ایفا می کنند. پس تخمین خوب مقدار میدان تنش پسماند مورد نیاز است. همچنین میدان تنش ناشی از جوشکاری ممکن است برای ارزیابی ریسک شکست استاتیک در سیستم لوله ها شامل مواد دارای خاصیت شکست ترد، اهمیت زیادی داشته باشد. مثلاً تنش پسماند کششی بزرگ محوری در منطقهٔ متأثر از حرارت در سطح داخلی لوله های فولاد ضد زنگ یکی از سه فاکتور اثر گذار در ترکهای خوردگی تنشی درون دانه ای[۱] می باشد. عوامل دیگر، حساسیت ماده و سیال دارای مقدار اکسیژن بالا گذرنده از درون لوله می باشد. با این وجود شکل تنشهای پسماند جوشکاری بستگی به چند فاکتور مثل قیود مکانیکی، نسبت ضخامت دیواره به قطر لوله، حرارت ورودی ،تعداد پاسهای جوشکاری و ترتیب و توالی پاسها دارد[۸].

تنشهای پسماند ممکن است با روشهای غیر مخرب مثل پراش اشعهٔ ایکس ، پراش نوترون، روشهای مغناطیسی و آلتراسونیک اندازه گیری شوند؛یا با روشهای مخرب موضعی مثل سوراخکاری و رینگ

---

[۱] IGSCC

هسته و روشهای سوراخ عمیق و یا با روشهای قطعه قطعه کردن مثل خارج کردن بلوکها، چاک دادن قاچ کردن و یا لایه لایه کردن. در انتخاب روش اندازه گیری بهینه باید تحلیل حجمی، ماده، هندسه و دسترسی را در نظر گرفت[۵].

فصول بعدی پایان نامه را می توان به صورت زیر خلاصه نمود :

در فصل دوم مقدمه ای بر مبحث جوشکاری و اصول جوشکاری با قوس الکتریکی بیان می گردد.

فصل سوم به تنشهای پسماند و مکانیزم ایجاد تنشهای پسماند در جوش می پردازد و روشهای متداول اندازه گیری آن را بیان می کند.

در فصل چهارم مدل ترمومکانیکی جوش به همراه تاریخچه ای از محققین و روشهای مختلف محاسبهٔ تنش پسماند بیان می شود.

در فصل پنجم مدل المان محدود استفاده شده در تحقیق و فرمول بندی آن و ویژگیهای نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق از جمله روشهای حل مسائل غیر خطی و حرارتی گذرا و روشهای افزودن مادهٔ پر کننده بیان می شود و بالاخره در فصل ششم نتایج به دست آمده از مدلهای اجزاء محدود ارائه می شود و نتایج عددی با داده های تجربی مقایسه می شود.