

کاهش تنش پسماند جوش به کمک سیم جوش دما پایین

محمد قاسمی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی قم

جهان تقی‌زاده*
استادیار گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی قم
taghizadeh@qut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۰۴

چکیده

تاکنون روش‌های متعددی برای کمینه‌کردن تغییر شکل‌های جوش و تنش‌های پسماند آن ارائه شده است. یک روش عملی و ساده که می‌تواند سبب کاهش تنش‌های پسماند جوش شود، استفاده از سیم‌های جوش با دمای پایین است. به این صورت که تغییر ماهیت مواد پرکننده می‌تواند سبب تغییر متالورژیکی در ناحیه جوش و منطقه تحت تأثیر جوش و در پی آن افزایش تنش‌های پسماند انقباضی روی خط جوش گردد. بنابراین با ایجاد ترکیبات شیمیایی مناسب برای سیم‌های جوش، کاهش چشمگیری در تغییر شکل‌های ناشی از جوشکاری ایجاد خواهد شد. این مقاله بر اهمیت استفاده از انواع سیم جوش با مواد مختلف جهت کمینه‌کردن تنش‌های پسماند و اعوجاج‌های ناشی از آن در جوشکاری با استفاده از تحلیل عددی الاستوپلاستیک تمرکز دارد. در مدل عددی حاضر، ساختار جوش لب‌به‌لب با استفاده از سه ماده گوناگون به‌عنوان پرکننده جهت بررسی ماهیت سیم‌های جوش دما پایین بررسی شده است.



واژگان کلیدی: جوشکاری، مدلسازی، سیم جوش، تنش پسماند، تغییر شکل

۱. مقدمه

می‌شود. امروزه روش‌هایی متعددی وجود دارد که می‌توانند تنش‌های پسماند و اعوجاج^۴ ناشی از جوشکاری را کمینه کنند و می‌توان از آنها در مرحله قبل، حین و بعد از ساخت استفاده کرد [۲]. از میان متغیرهای مرتبط با طراحی، می‌توان مواردی چون بهینه‌کردن نقاط اتصال جوشکاری، پیکربندی مناسب سازه به‌منظور کاهش اندازه جوش همزمان با کاربرد صفحات با ضخامت مناسب، استفاده از تقویت‌کننده‌ها^۵، هندسه مناسب و جز این‌ها را نام برد [۳].

تمام طراحان و سازندگان سازه‌ها از جمله مخازن تحت فشار^۶، فضاپیماها^۷، انواع وسائط نقلیه و جز این‌ها عمدتاً اهدافی چون کارایی بالا، وزن سبک و بهبود خاص مکانیکی سازه را دنبال می‌کنند [۱]. جوشکاری روشی مؤثر و اقتصادی برای تولید و ساخت چنین سازه‌هایی است، اما تمرکز بالای حرارت در ناحیه جوش و انبساط‌ها و انقباض‌های پی‌درپی سبب ایجاد تغییر شکل‌های ناخواسته و تنش‌های پسماند^۳ در محل اتصال ناشی از جوشکاری

جهت کاهش تغییر شکل‌های ناشی از جوش در حین فرایند تولید مسائلی چون کنترل حرارت ورودی، سرعت حرکت الکتروود و تنظیم مراحل جوشکاری انجام شده است [۴]. پس از جوشکاری نیز عملیات تکمیلی دیگری نظیر عملیات حرارتی^۶ و تنش‌زادی‌های مکانیکی مانند ساچمه‌زنی^۷، سوزنی‌زنی^۸ و فراصوت^۹ مطرح شده است [۵]. روش مؤثر دیگر - که طی سالیان اخیر شناسایی و در این مقاله بررسی می‌شود - اصلاح مواد پرکننده سیم‌های جوش می‌باشد؛ زیرا مواد پرکننده نقش مهمی در اصلاح تنش‌های پسماند نهایی ایفا می‌کنند [۶]. ارتباط ماده پرکننده، مخصوصاً با اعوجاج زاویه‌ای که به صورت مستقیم با نیروی انقباضی عرضی که در ناحیه امتزاج^{۱۰} ایجاد می‌شود، اثبات شده است [۷-۸]. در این مقاله جهت بررسی اثر ماهیت مواد پرکننده بر تنش پسماند جوش از سه ماده پرکننده مختلف برای جوشکاری فلز پایه‌ای^{۱۱} از جنس فولاد EN 10025 [S355 (DH36)] استفاده شده است. انواع مواد پرکننده عبارت‌اند از:

۱. سیم جوش با هسته فلزی^{۱۲}
۲. سیم جوش با هسته فلاکس^{۱۳}
۳. سیم جوش با هسته فلاکس به همراه پرکننده‌های پایه نیکلی^{۱۴}

۲. پیش‌بینی تنش‌های پسماند و اعوجاج ناشی از آن براساس محاسبات

در این مقاله کاربرد تحلیل اجزای محدود^{۱۵} در شبیه‌سازی فرایندهای تولید مزایای بزرگی را براساس متغیرهای تجربی ارائه می‌دهد. به خصوص حرارت ورودی به فلز پایه که به طرز قابل توجهی برای سه نوع سیم جوش با هم متفاوت می‌باشد. علاوه بر این، تنش‌های پسماند ذاتی و تغییر شکل‌های اولیه خارج صفحه‌ای هم اثر مهمی بر مقدار اعوجاج خواهند داشت [۹-۱۲]. در برخی از پژوهش‌های گذشته، عواملی چون توالی^{۱۶} و موقعیت جوشکاری^{۱۷}، اندازه تقویت‌کننده‌ها و نقطه جوش‌ها^{۱۸}

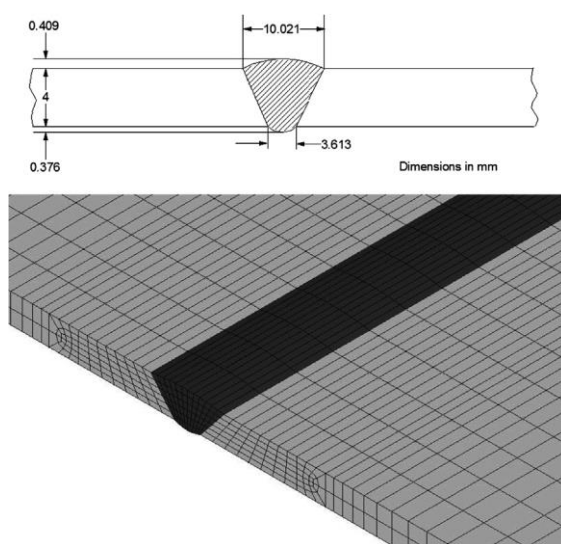
بررسی شده و بر آثار تجربی آنها روی اعوجاج و تنش پسماند جوش صحنه گذاشته شده است [۱۳-۱۶]. همچنین مدل‌های عددی جوشکاری لب‌به‌لب^{۱۹} با استفاده از این سه پرکننده که اثر متقابل حرارتی - متالورژیکی را در نظر می‌گیرد، توسعه یافته و با آزمایشات تجربی مورد تأیید قرار گرفته است.

بدیهی است ایجاد تنش پسماند در فلز جوش به علت تغییرات حجم جوش ناشی از تغییر فاز و به سبب خواص ترموفیزیکی در ناحیه امتزاج می‌باشد [۱۰]. بنابراین با ایجاد ترکیبات شیمیایی مناسب در فلز جوش، می‌توان کاهش مهمی در اعوجاج ناشی از جوشکاری را باعث شد، اگرچه باید چقرمگی^{۲۰} و ساختار جوش با استاندارد همخوانی داشته باشد. بنابراین بهترین مواد پرکننده دارای ترکیبی متعادل بوده و موادی هستند که سبب حذف تنش‌های کششی پسماند طولی در جوش شده و از این رهگذر فقط تنش‌های فشاری باقی بماند و باعث چقرمگی مناسبی گردند و از خستگی و شکست جوش جلوگیری کنند. نتیجه این مقاله نشان می‌دهد که با کاهش دمای تبدیل مارتنزیتی جوش، ناحیه تنش‌های پسماند فشاری در ناحیه تحت تأثیر حرارت گسترش می‌یابد. اگرچه افزایش مانتزیت می‌تواند به طور قابل توجهی سبب کاهش چقرمگی جوش شود که البته منجر به شکست ساختار جوش می‌شود. این مقاله بر اهمیت استفاده از پرکننده‌هایی با مواد مختلف، با هدف کمینه کردن اعوجاج‌های ناشی از جوش تمرکز دارد.

۲-۱. تشریح مدل‌های محاسباتی

برای مدل کردن تنش‌های پسماند و اعوجاج‌ها، یک روش ترموالاستوپلاستیک مورد استفاده قرار گرفته است. در این رهگذر، نخست یک روش حرارتی گذرا^{۲۱} پیش‌بینی شده، پس از آن یک بار دمایی برای مدل کردن الاستوپلاستیک مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌های المان محدود هم برای جوشکاری لب‌به‌لب دو صفحه به ابعاد $۰/۲۵ \times ۰/۵$ مترمربع و ضخامت ۴ میلی‌متر مطابق شکل ۱ در نظر

می‌کند. نقطه جوش‌ها ابعادی مشابه با جوش ناحیه امتزاج دارند و در ابتدا در ساختار صفحه شرکت می‌کنند؛ اگرچه به محض شروع جرقه آنها غیرفعال شده و بعد از عملیات خنک‌کاری خواصی مشابه فلز جوشکاری و مواد پرکننده برای آنها در نظر گرفته می‌شود. میزان حرارت مازاد وارده به صفحه اثر مهمی بر تنش‌های پسماند القایی و تغییر شکل‌ها دارد و قطعاً اگر پارامترهای گوناگون جوشکاری مورد استفاده قرار گرفته باشد، روند کاهش تغییر شکل کار بسیار مشکلی خواهد بود.

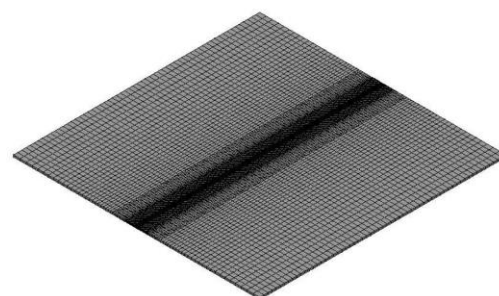
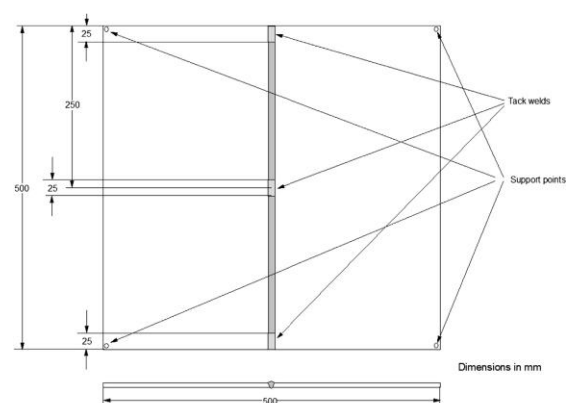


شکل ۲. ابعاد ناحیه امتزاج

۲-۲. خواص فیزیکی - حرارتی مواد

اغلب مود انتقال حرارت در صفحات فولادی جوش داده شده هدایت^{۳۲} می‌باشد. در این میان، خواص حرارتی مواد جهت کسب حالت گذرای حرارتی نیازمند ویژگی‌های خاص حرارتی از قبیل گرمای ویژه، گرمای نهان ذوب و هدایت در طول جوشکاری می‌باشد. در مدل المان محدود خواص غیرخطی حرارتی مواد به نام گذر حرارتی معرفی شدند. در این مرحله، از مدل المان محدود و به منظور مقایسه، صفحه‌ها دارای خواص حرارتی مشابه S355 [DH36] می‌باشند [۱۷]. رشد کرنش‌های دمایی^{۳۳} در حین جوشکاری سبب ایجاد تنش‌های پسماند و تغییر شکل

گرفته شده است. بازده جوشکاری - که به شدت متغیر بوده و از روشی به روش دیگر تغییر می‌کند - به ناچار به دلیل مقایسه سه نوع پرکننده، یکسان و حدود ۸۵ درصد در این روش دمایی در نظر گرفته شده است. ابعاد ناحیه امتزاج جوشکاری که در شکل ۲ نمایش داده شده، برای فیلرهای مختلف یکسان فرض شده است. بنابراین هر تغییری در ساختار جوش ناحیه امتزاج به خاطر تغییر در مقدار ماده پرکننده نخواهد بود. مطابق شکل ۱ صفحات را در چهار گوشه ثابت کرده و قبل از شروع جوشکاری اصلی به صورت نقطه‌ای تک‌خال می‌کنیم.

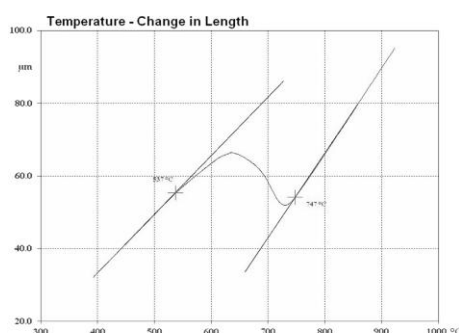


شکل ۱. نمایی از مونتاژ جوش لب‌به‌لب و مدل المان محدود

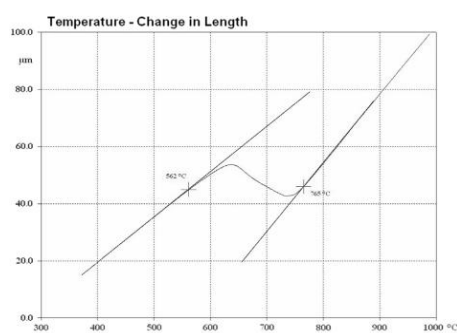
در این مدل، استفاده از المان ایجاد و قطع دما و تکنیک کاهش دما برای مدل‌سازی تا وقتی که زمان ورود جرقه جوشکاری تا خنک‌کاری، در ناحیه امتزاج فعال نگشته، استفاده می‌گردد. در این حالت فرض می‌شود که مواد جوشکاری در حین فاز حرارت‌دهی در هیچ انبساط حرارتی شرکت نمی‌کنند، اما یک انقباض دمایی را در حین فاز خنک‌کاری در دمای زیر ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تجربه

می‌شود. این کرنش‌های دمایی علاوه بر حرارت گذرا به خصوصیات ترموفیزیکی مواد هم وابسته‌اند. به‌خصوص ضرایب انبساط شامل هر تغییر حجمی است که به‌خاطر تغییر فاز اتفاق می‌افتد و این مسئله به‌شدت بر افزایش تنش‌های پسماند تأثیر می‌گذارد. برای احراز ضرایب انبساط ترکیبات ماده جوش در هر سه نوع سیم جوش و فلز پایه آزمون‌های دیلاتومتری^{۲۴} انجام شد. نتایج فلزات جوشکاری گوناگون در حین فاز خنک‌کاری در حالتی که با حالت دمایی گذرا مواجه است در شکل ۳ نمایش داده شده است. دمایی شروع و اتمام انتقال برای سیم‌های جوشکاری مختلف با مقاومت تسلیم در دمایی اتاق در جدول ۱ آورده شده است. اهمیت این جدول از این حیث می‌باشد که پیش‌بینی موفق تنش‌های پسماند و اعوجاج، تنش‌های

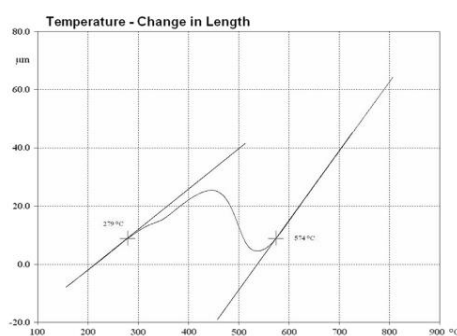
تسلیم، مدول یانگ و مدول پلاستیک به‌صورت تابعی از دما و به‌دنبال آن تابعی از نوع ریزساختار مربوط به فاز می‌باشد. نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهد که MC و FC به مارتنزیت تغییر فاز نمی‌دهد. در حالت جوشکاری دمایی انتقال LT نسبتاً پایین می‌باشد. اگرچه مواد ضریب انبساط فازهای بینیت^{۲۵}، پرلیت^{۲۶} و فریت^{۲۷} دارند و نشان‌دهنده مقدار کمی تغییر فاز مارتنزیتی می‌باشند. آزمون‌های دیلاتومتری ایده‌ای را در رابطه با ضریب انبساط با توجه به دما در شکل ۴ نشان می‌دهد که برای مواد مختلف جوشکاری و فلز پایه گوناگون ارائه شده است و در روش‌های محاسباتی مختلف می‌تواند مورد استفاده واقع شود و راه‌گشای استخراج جداولی مانند جدول ۱ در مواد مختلف باشد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۳. نتایج آزمون دیلاتومتری روی مواد پرکننده مختلف

الف) MC and DH36 weld material

ب) FC and DH36 weld material

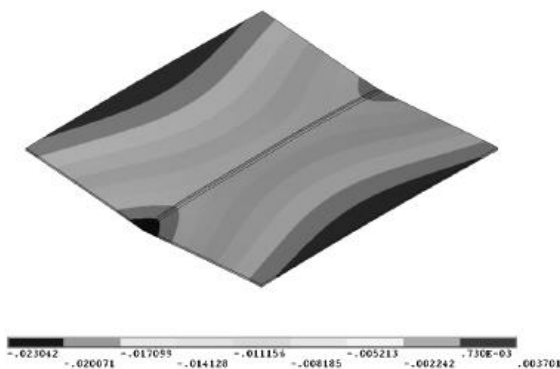
ج) LT and DH36 weld material

جدول ۳. تغییر دمای شروع و اتمام برای فلز جوش مختلف

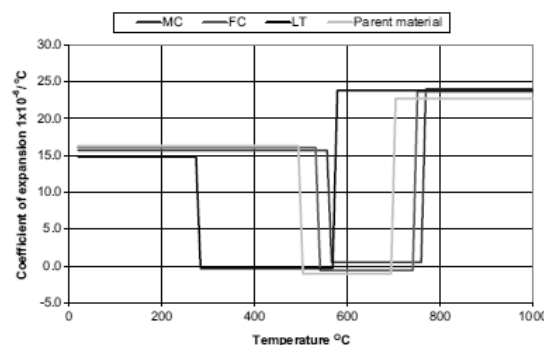
با مقاومت تسلیم در دمای اتاق

فلز جوش	دمای شروع (سانتی‌گراد)	دمای اتمام (سانتی‌گراد)	مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)
DH36 & MC	۷۶۵	۵۶۲	۴۱۸
DH36 & FC	۷۴۷	۵۳۷	۴۷۱
DH36 & LT	۵۷۴	۲۷۹	۵۰۰
DH36	۷۰۰	۵۱۵	۳۵۴

شد، پس از تغییر شکل نهایتاً به شکل زین اسب - که در شکل ۵ نمایش داده شده - درخواهد آمد. قابل ذکر است که هر سه سیم جوش مطالعه شده باعث افزایش چنین تغییر شکل‌هایی می‌شوند.



شکل ۵. تغییر شکل جوش لب‌به‌لب در صفحات با طول کوتاه



شکل ۴. ضریب انبساط سیم جوش‌ها در دمای مختلف

۳-۱. پیش‌بینی تغییر شکل‌های خارج از صفحه و تنش‌های پسماند

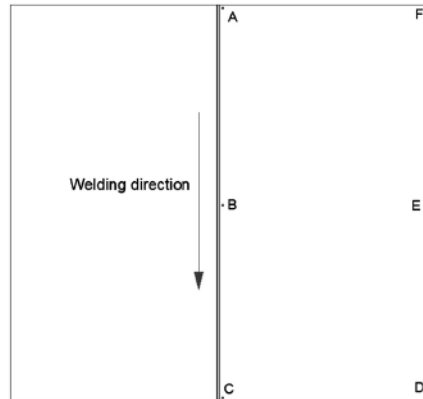
حقیقتاً تهیه یک نمودار جامع و مقایسه تغییر شکل‌های خارج از صفحه به‌نبال نوع سیم جوش کار مشکلی است. از طرفی، بررسی اختلاف بین بیشینه و کمینه تغییر شکل‌های خارج صفحه‌ای نمی‌تواند به‌طور کامل نشان‌دهنده سازوکارهای مختلف تغییر شکل و یا منجر به تعریف راهکاری برای کاهش تغییر شکل شود. بنابراین روش‌های خاصی برای اندازه‌گیری تغییر شکل زاویه‌ای و خمش طولی به‌طور مجزا مورد نیاز است. برای این منظور شناسایی اعوجاج خارج صفحه در شش نقطه مورد نیاز است و این قضیه در شکل ۶ نمایش داده شده است. خمش طولی با تعیین انحنای سه نقطه A، B و C روی خط جوش و در وسط صفحه و سه نقطه D، E و F در لبه‌های صفحه جهت اعوجاج زاویه‌ای قرار داده شده است. به‌هنگام استفاده از سیم جوش‌های LT با وجود کم‌بودن اختلاف‌ها در تغییر شکل‌های خارج صفحه، کاهش چشمگیری در خمش طولی اتفاق می‌افتد. به‌دلیل اهمیت موضوع، تنش‌های طولی پسماند در مقطع و لایه میانی برای سیم

۳. نتایج عمومی

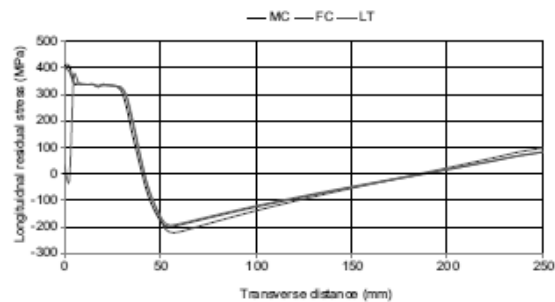
طبیعت تغییر شکل خارج از صفحه درونی به‌دلیل جوشکاری، نتیجه عوامل مهمی چون کرنش‌های دمایی طولی و عرضی می‌باشند. انقباض عرضی، که در ناحیه جوش رخ می‌دهد، سبب افزایش در تغییر شکل و اعوجاج زاویه‌ای می‌شود و به‌شدت به مقدار ماده و اندازه ناحیه امتزاج وابسته است. از طرف دیگر، تنش‌های طولی وابسته به دما به‌دلیل عدم تطابق در دمای گذرا توسعه و به‌دنبال آن کرنش‌ها افزایش می‌یابند. نتیجه این مقاله نشان می‌دهد که بیشینه دمای به‌دست آمده در راستای عرضی خط جوش سبب افزایش نیروی انقباض می‌شود. در نتیجه تغییر شکل زاویه‌ای، این نیروی انقباض طولی عموماً در پایین و بالای محور خنثی صفحه عمل می‌کند و نهایتاً باعث خمش صفحه می‌شود [۱۸-۱۹]. بنابراین عمل متقابل این دو تنش دمایی باعث افزایش تغییر شکل‌های خارج صفحه‌ای می‌شود. جوش لب‌به‌لب در صفحات با طول کوتاه، از قبیل آنچه در این مقاله مورد بررسی واقع



جوش‌های مختلف احراز و در شکل ۷ نمایش داده شده است. این نکته گواهی بر این مدعاست که دمای پایین انتقال در سیم جوش‌های LT سبب افزایش در تنش‌های طولی پسماند فشاری در ناحیه جوشکاری می‌شود که نهایتاً به کاهش در نیروهای انقباضی می‌انجامد.



شکل ۶. نقاط اعوجاج



شکل ۷. پیش‌بینی تنش پسماند محوری

به ازای سیم جوش‌های مختلف

۳-۲. نتایج آزمون‌های سختی و ضربه

برای آزمایش ضربه با شیار دو دسته استاندارد وجود دارد. در ایالات متحده آمریکا و اروپا نمونه‌های شاری ۲۸ متداول‌تر است؛ حال آنکه در بریتانیا نمونه ایزود^{۲۹} به کار می‌رود. روش استفاده شده در این مقاله، نمونه شاری مطابق استاندارد اروپا EN875:1995 و در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نمونه شاری دارای سطح مقطع مربع شکل به ابعاد ۱۰×۱۰ میلی‌متر مربع دارای یک شیار V شکل با زاویه ۴۵ درجه و به عمق ۲ میلی‌متر و شعاع

۰/۲۵ میلی‌متر است. نمونه آزمایش به صورت افقی روی تکیه‌گاه قرار گرفته و بار توسط ضربه یک پاندول در حال نوسان به پشت شیار با سرعت حدود ۴/۸ متر بر ثانیه وارد سرعت می‌شود. اما در این مقاله آزمایش تعیین سختی جوش‌های مورد نظر به طریق ویکرز^{۳۰} انجام گرفت. در این آزمایش از یک دندانۀ الماسه کوچک، به شکل هرم مربع‌القاعده استفاده می‌گردد که زاویه نوک آن ۱۳۶ درجه و بار وارده از ۵ تا ۱۲۰ کیلوگرم با تقسیمات ۵ کیلوگرمی می‌تواند تغییر نماید. در جدول ۲ نتایج تست‌های سختی و ضربه برای مواد پرکننده مختلف جوشکاری نشان داده شده‌اند. همچنین نشان داده شده است که ترکیبات ریزساختار LT نسبت به FC و MC در جهت کاهش چقرمگی و افزایش سختی متفاوت می‌باشد. به عبارتی، دلایل کاهش چقرمگی و افزایش سختی ناشی از مارتنزیت و وجود نیکل بیشتر در مواد پرکننده LT می‌باشد.

جدول ۲. نتایج آزمون سختی و چقرمگی

انواع مواد پرکننده فلز جوش

سیم جوش	MC	FC	LT
شارپی	۱۹	۲۰	۱۲
ویکرز	۲۰۲	۲۰۶	۲۲۷

۴. نتیجه‌گیری

این مقاله نشان داد که استفاده از سیم جوش‌های پایه نیکلی سبب افزایش تشکیل مارتنزیت شده، همچنین دمای نسبتاً پایین تغییر فاز سبب افزایش فلز جوش در ناحیه امتزاج شده و در نهایت مجموعه انبساط حرارتی به‌خاطر تغییر فاز در دماهای پایین‌تر می‌باشد. بنابراین توسعه تنش‌های پسماند انقباضی طولی در ناحیه جوش محصول این واقعیت است. البته تحلیل‌های بیشتری نیاز است تا بتوان اثر سیم جوش‌های با پایه نیکل و کروم را در تنش‌های پسماند و تغییر شکل‌ها را به‌صراحت بیان کرد. انتظار می‌رود که کروم سبب کاهش بیشتر در دمای تغییر فاز شده، بتواند به طرز مؤثری سبب کاهش تغییر شکل‌های

خارج صفحه‌ای بشود. البته باید مراقب بود که چقرمگی فلز جوش در محدوده ایمن قرار بگیرد. مهم‌ترین نتایجی که از این مقاله استخراج می‌شود شامل موارد ذیل است:

۱. اختلاف تغییر شکل‌های خارج صفحه‌ای فلز جوش ناشی از پرکننده‌های LT, FC و MC در فلز پایه DH36 اندک بود، با اینکه تنش‌های پسماند درون فلز جوش بسیار متفاوت بود. به‌ویژه در LT تنش‌های پسماند فشاری طولی اختلاف معناداری با سایرین داشت.
۲. استفاده از فرایندهای جوشکاری با دمای تغییر فاز پایین قابلیت بالایی در کاهش نیروهای انقباضی طولی را خواهد داشت.

۳. میزان اعوجاج زاویه‌ای با استفاده از سیم جوش‌های مورد بحث فرق زیادی ندارد؛ اما به‌نظر می‌رسد به‌کمک ابعاد ناحیه فلز جوش می‌توان تغییر شکل زاویه‌ای را کنترل کرد. علاوه بر این استحکام تسلیم بالا سبب افزایش در انقباض‌های عرضی - که در نتیجه افزایش در تغییر شکل‌های زاویه‌ای است - را باعث می‌شود.

۴. کاربرد سیم جوش با دمای تغییر فاز پایین می‌تواند به‌طرز مؤثری سبب تغییر در تنش‌های پسماند درونی و تغییر شکل‌ها شود. اما باید مراقب بود که فلز جوش دارای سختی و چقرمگی متعادلی می‌باشد.

۵. مأخذ

- [1] Spicknall MH, R. Kumar, T.D. Huang, Dimensional management in shipbuilding: a case study from the Northrup Grumman ship systems lightweight structures project. *J Ship Prod* 2005; 21:209-18.
- [2] Mikami, Y., Y. Morikage, M. Mochizuki, M. Toyoda, Angular distortion of fillet welded T joint using low transformation temperature welding wire. *Sci Technol Welding Joining* 2009, 14:97-105.
- [3] Bhadeshia H., Modeling the microstructural development in weld heat affected zones. In: Proc. of an Int. Conf. on trends in welding technology, Gatlinburg Tennessee USA, 1989.
- [4] Henwood C, Bibby MJ, Goldak JA, Watt DF. Coupled transient heat transfer microstructure weld computations. *Acta Metal* 1988, 36:3037-46.
- [5] Masubuchi K. Recent M.I.T. Research on residual stresses and distortion in welded structures. *J Ship Prod* 1993, 9:137-45.
- [7] Conrardy C, Dull R. Control of distortion in thin section panels. *J Ship Prod* 1997, 13:83-92.
- [8] Camilleri D, Gray TGF, Nash D. Mitigation of welding distortion and residual stresses via cryogenic CO2 cooling-numerical and experimental investigation. In: 17th international conference and tutorial workshop-computer technology in welding and manufacturing (Cranfield, UK) 2008.
- [9] Michaleris P, Sun X. Finite element analysis of thermal tensioning techniques mitigating weld buckling distortion. *Welding J* 1997:451.
- [10] Camilleri D, Comlekci T, Gray TGF. Computational prediction of out-of-plane welding distortion and experimental investigation. *J Strain Anal Eng Des* 2005, 40:161-76.
- [11] Okerblom NO. The calculations of deformations of welded metal structures. London: Her Majesty's Stationery Office; 1958.



- [12] Goldak J, Akhlanghi M. Computational welding mechanics. Springer; 2005.
- [13] Camilleri D, Gray TGF. Optimization of welded lightweight multiple-stiffener plate structures to minimise unwanted shape distortion. *Welding & Cutting* 2006, 5:320-7.
- [14] Camilleri D, Comlekci T, Gray TGF. Thermal distortion of stiffened plate due to fillet welds computational and experimental investigation. *J Therm Stresses* 2006, 29:111-37.
- [15] Camilleri D, Comlekci T, Gray TGF. Design support tool for prediction of welding distortion in multiply stiffened plate structures: experimental and computational investigation. *J Ship Prod* 2005, 21:219-34.
- [16] Camilleri D, McPherson N, Gray TGF. Procedural tacking fabrication influences on welding distortion. In: Proc. of the Int. Conf IIW (Singapore) 2009.
- [17] LeeCK, Candy J, TanCPH. Measurement and finite element analysis of temperature distribution in arc welding process. *Int J Comput Appl Technol* 2004; 21:171-7.
- [18] Camilleri D, Mollicone P, Gray TGF. Alternative simulation techniques for distortion of thin plate due to fillet-welded stiffeners. *Modelling Simul Mater Sci Eng* 2006; 14:1307-27.
- [19] Camilleri D, Gray TGF. Computationally efficient welding distortion simulation techniques. *Model Simul Mater Sci Eng* 2005; 13:1365-82.

پی نوشت

1. Pressure vessel
2. Aerospace
3. Residual stress
4. Distortion
5. Stiffeners
6. Heat Treatmnt
7. Shot Peening
8. Needle Peening
9. Ultrasonic Impact Tratmt (UIT)
10. Fusion
11. Base Metal
12. Metal Core (MC=EN758:T46 4 MM1)
13. Flux Core (FC=EN758:T42 2 PM1 H5)
14. LT
15. Finite Element
16. Welding Sequences
17. Welding Position
18. Tack Welding
19. Butt Welding
20. Toughness
21. Thermal Transients
22. Conduction
23. Thermal Strains
24. Dilatometry Tests
25. Bainite

26. Pearlite
27. Ferritic
28. Charpy Test
29. Izod Test
30. Vickers Hardness Test



شرکت ایتراک

مهندسی و ساخت تجهیزات صنایع ایران

طراحی و ساخت تجهیزات صنایع :

به ویژه برای:

- صنایع غذایی و دارویی
- صنایع شیمیایی و پتروشیمی
- تجهیزات کشتارگاهها و صنایع جنبی گوشت
- سیستم‌های انتقال مواد
- تجهیزات خطوط رنگ کارخانه‌ها
- کوره‌های زباله‌سوز و لاشه سوز
- مخازن تحت فشار و راکتورها
- سازه‌های صنعتی و انواع گریتنک با گالوانیزه گرم

تهران - خیابان ظفر - خیابان نصیری - بلوار سیما جنوبی - شماره ۱۶

صندوق پستی ۱۱۳۶ - ۱۹۳۹۵

تلفن: ۰۲۲۶۰۷۴۲ - ۲۲۲۶۲۸۲۹ تلفکس: ۰۲۲۶۰۹۹۰

web site: www.itrac-co.com

E-mail: info@itrac-co.com

