Archive of SID

2nd International Conference on
CIVIL ENGINEERING, ARCHITECTURE & URBAN PLANNING ELITES
15th Nov.2016 London - United Kingdom

دومین کنفرانس بین المللی
نخبگان عمران، معماری و شهرسازی
لندن - انگلستان ۲۵ آبان ماه ۱۳۹۵

مقایسه تکنیک‌های جوشکاری اصطکاکی(FSW) و فرایند ذوبی در اتصالات جوشی قاب‌های فولادی

سید هاشم خطیبی

دانشجو کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه غیر انتفاعی پارس رضوی گناباد

Hashem.kh92@yahoo.com

مهدی مختاری

دانشجو دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

محمد علی کافی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

چکیده:

جوشکاری همزن اصطکاکی(FSW) در انگلستان در سال ۱۹۹۱ به عنوان تکنولوژی اتصال، بر پایه جامد و در ابتدا برای آلیاژهای آلومینیم استفاده شده و در حال حاضر یک روش نسبتاً جدید اتصال بر پایه حالت جامد است. از آنجا که این تکنولوژی و روش اتصال در موارد خاص میتواند برای متصل کردن آلیاژهای فلزی که اتصالشان توسط روش‌های جوش ذوبی سخت است، استفاده شود; در این مقاله سعی شده دو روش جوشکاری اصطکاکی و ذوبی از لحاظ معیارهای روش اجرا و اقتصادی بودن و دیگر پارامترها با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی بررسی شوند.

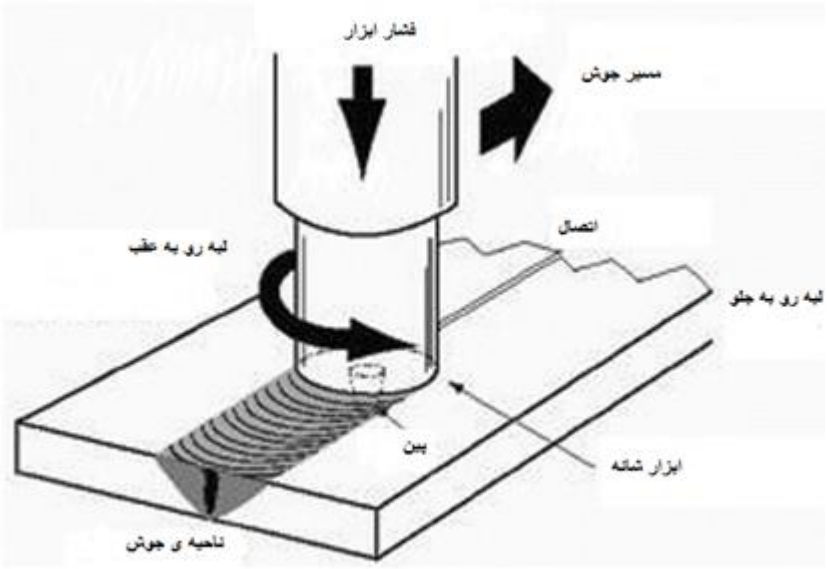
واژگان کلیدی: جوشکاری همزن اصطکاکی، اتصالات جوشی، اسکلت فلزی،جوشکاری ذوبی

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه:

جوشکاری همزن اصطکاکی[1] یک فرایند جوشکاری حالت جامد است که در موسسه تحقیقات جوش (TWI) در انگلستان توسط توماس[2] و همکاران در سال ۱۹۹۱ اختراع شد; به عنوان تکنولوژی اتصال بر پایه جامد و در ابتدا برای آلیاژهای آلومینیم استفاده می‌شد. FSW مطابق شکل ۱ یک ابزار چرخنده غیر قابل مصرف با طراحی مخصوص پین و هل‌دهنده در لبه هم مرز با ورق یا صفحه است که در طول خط اتصال حرکت داده می‌شود و اتصال انجام می‌شود.



شکل ۱، طرح کلی از جوشکاری همزن اصطکاکی

ابزار چرخنده دو وظیفه اصلی انجام می‌دهد: ۱) حرارت‌دهی ناحیه کاری و ۲) حرکت دادن ماده برای ایجاد اتصال. حرارت از طریق اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و تغییر شکل پلاستیک بین قطعه کار ایجاد می‌شود. حرارت ناحیه ایجاد شده باعث نرم شدن ماده در اطراف پین و مجموعه ابزار چرخنده و انتقال‌دهنده برای حرکت ماده از جلوی پین به عقب آن می‌شود. نتیجه این فرایند، اتصال بر پایه جامد است. به دلیل ویژگی‌های شکل‌های مختلف ابزار، حرکت ماده در اطراف پین می‌تواند کاملا پیچیده باشد. در طول فرایند FSW ، ماده در دماهای بالا به شدت تغییر فرم پلاستیک متحمل می‌شود. نتیجه حاصل شده تبلور مجدد نرم دانه‌ها است. میکرو ساختار نرم در جوشکاری همزن اصطکاکی باعث ایجاد خواص مکانیکی خوب می‌شود.(Messlr 2004) در یک دهه اخیر FSW به عنوان پر اهمیت‌ترین توسعه و پیشرفت در زمینه اتصال فلزات مطرح شده است و یک تکنولوژی سبز به دلیل بازده انرژی زیاد، عدم آسیب رساندن به محیط زیست و تطبیق‌پذیری آن معرفی شده است. با مقایسه این روش با روش‌های معمولی اتصال فلزات، FSW به طور قابل ملاحظه‌ای از انرژی کمتری استفاده می‌کند. در این روش از پوشش گاز و یا مایع استفاده نمی‌شود، لذا آسیبی به محیط زیست وارد نمی‌کند. در این روش برای اتصال از هیچ فلز پرکننده‌ای استفاده نمی‌شود؛ لذا در آلیاژهای آلومینیم نیازی به نگرانی بابت سازگاری با کامپوزیت وجود ندارد. این روش هنگامی مطلوب است که آلیاژهای آلومینیم و کامپوزیت‌ها را می توان به راحتی اتصال کرد. در مقایسه با روش معمولی جوش اصطکاکی (که برای قطعات کوچک با تقارن مرکزی که قابلت چرخش داشته و هر دو قطعه خلاف هم می چرخند، استفاده می‌شود)، FSW می‌تواند برای

[1] Friction Stir Welding (FSW)
[2] Tomas

www.SID.ir

انواع مختلفی از اتصال‌ها نظیر اتصالات لبه‌ای، رویی، لبه‌ای T، پرکننده و مغزی استفاده شود. خلاصه‌ای از مهمترین ویژگی‌های FSW در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱، مهمترین ویژگی‌های FSW

مزایای انرژی	مزایای محیطی	مزایای متالورژیکی
		- فرآیندهای بر پایه جامد
	- بدون نیاز به محافظت گازی	- شکست کم قطعه کار
-بهبود کاربرد مواد باعث کاهش وزن می‌شود	- بدون نیاز به تمیزکاری سطحی	- ثبات اندازه خوب و قابلیت تکرار
-به اندازه ۲/۵٪ از انرژی لیزری لازم است	- حذف خراش‌های زاید	- عدم هدر رفتن اجزای آلیاژی
	- حذف محلول‌ها	- خواص متالورژیکی عالی در ناحیه اتصال
-کاهش مصرف سوخت در کاربردهای وسایل سبک هوافضا، اتومبیل و کشتی	- نیاز به پاک کردن چربی‌ها	- میکرو ساختار نرم
	-حفظ مواد مصرفی مانند: سیم یا گازهای دیگر	- نبود ترک
		- جایگزینی چندگانه قطعات

اخیراً فرایند همزن اصطکاکی توسط Mishra به عنوان ابزاری کلی برای اصلاح میکروساختاری بر اساس قوانین پایه‌ای و اساسی FSW توسعه پیدا کرده است. در این حالت، یک ابزار چرخنده در قسمت یک پارچه قطعه کار برای اصلاح موضعی میکروساختار و برای بالا بردن ویژگی‌های خاصی قرار داده می‌شود. برای مثال، با FSP خاصیت سوپرپلاستیسیته با سرعت کرنش زیاد در آلیاژهای تجاری بدست می‌آید. با این حال از تکنولوژی FSP برای تولید سطوح کامپوزیتی در زیرلایه‌های آلیاژی، همگن‌سازی آلیاژها در متالورژی پودر، بهبود و اصلاح میکروساختار در کامپوزیت‌های پایه فلزی و بهبود خواص در آلیاژهای ریختگی استفاده می‌شود. (W. M. Thomas et al 1991)

FSW/FSP به عنوان مؤثرترین روش اتصال بر پایه حالت جامد معرفی شده است. برای این منظور مدت کوتاهی بعد از اختراع آن، کاربردهای وسیعی از FSW به اثبات رسید.

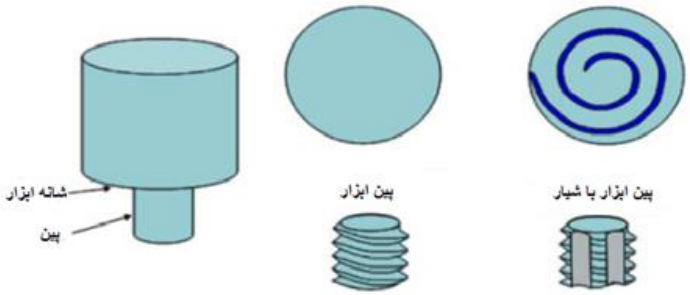
۲. تجهیزات اجرای فرایند:

هندسه ابزار یکی از مهمترین جنبه‌های مؤثر در توسعه فرایند بوده است. این پارامتر یک نقش حساس و مهم در حرکت ماده و کنترل سرعت حرکت دارد. ابزار FSW شامل یک پین/میخ و یک حرکت‌دهنده پین که در شکل ۲ نشان داده شده است. این ابزارها دو وظیفه مهم برعهده دارند: الف) حرارت‌دهی محلی و ب) حرکت ماده. در مرحله اول فرو بردن ابزار، گرما در اثر اصطکاک میان پین و قطعه کار ایجاد می‌شود. مقداری گرمای اضافی در اثر تغییرشکل ماده ایجاد می‌شود. ابزار تا وقتی که حرکت‌دهنده با قطعه کار تماس پیدا کند فرو برده می‌شود. اصطکاک بین حرکت‌دهنده و قطعه کار بخش قابل توجهی از گرما را ایجاد می‌کند. اندازه پین و حرکت‌دهنده در مقدار گرمای ایجاد شده مؤثر است که ویژگی‌های طرح به این اندازه مهم نیستند. همچنین

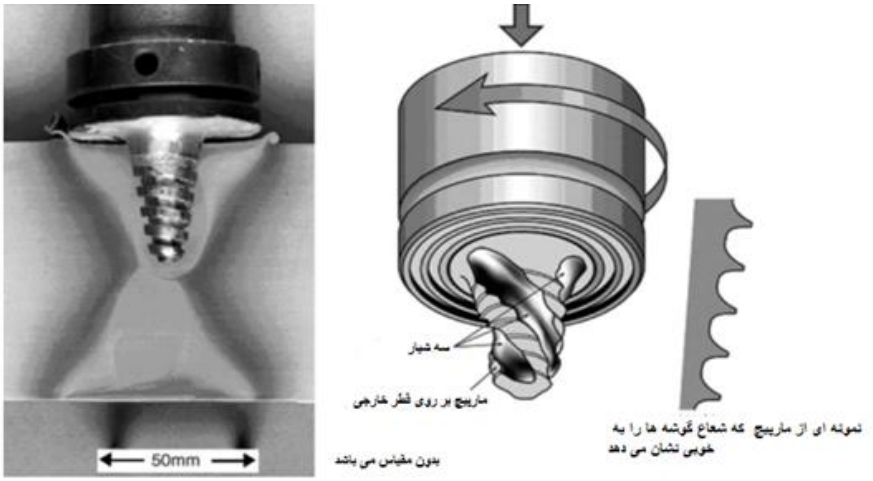
www.SID.ir

حرکت‌دهنده باید گرمای تولید شده از ماده را حفظ کند. وظیفه دوم ابزار، همزدن و حرکت ماده است. یکپارچگی خواص و میکروساختار مثل فشار فرایند بارگذاری تابع طرح و شکل ابزار است. معمولاً از حرکت‌دهنده مقعر و پین استوانه‌ای پیچ‌دار استفاده می‌شود.

با افزایش تجربه و درک بیشتری از حرکت ماده هندسه ابزار به طور مؤثرتری ارزیابی می‌شود. ویژگی‌های پیچیده‌ای برای تغییر حرکت ماده، ترکیب و کاهش فشار بارگذاری افزوده می‌شود. برای مثال Whorl و MX Triflute که به وسیله TWI ابزارات را توسعه دادند در شکل ۳ نشان داده شده است.(R.S.Mishra and Z.Y.Ma 2005)



شکل ۲، طرح کلی از ابزار FSW

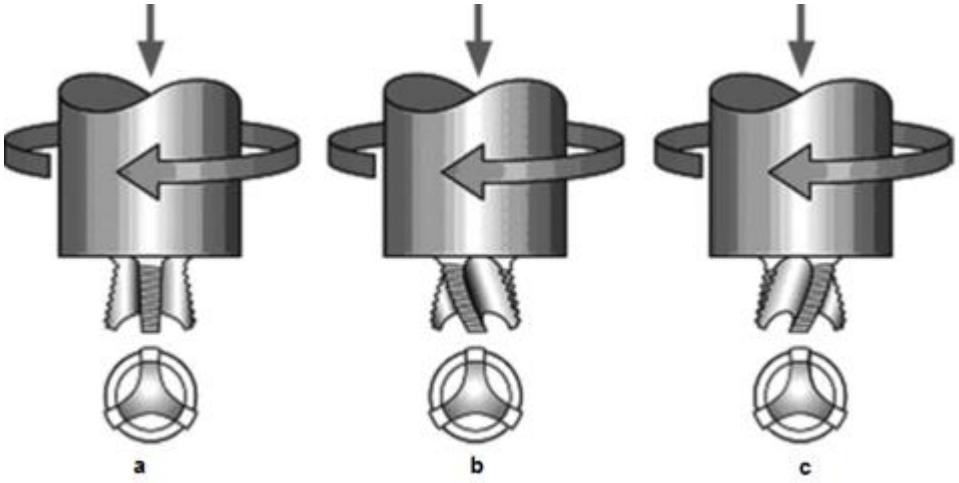


شکل ۳، ابزار توسعه یافته Whorl و MX Triflute توسط TWI

Thomas برای هر دو ابزار قسمت پین را به شکل مخروط ناقص که نسبت به ابزار استوانه ای با قطر پایه ی یکسان مقدار ماده کمی را جابجا می کند تغییر داد. مثلا Whorl مقدار ماده جابجا شده را در حدود ۶۰٪ و MX Triflute درحدود ۷۰٪ کاهش داد. ویژگی های طرح Whorl و MX Triflute باعث آ) کاهش نیروی جوشکاری ب) قابلیت جریان آسان قسمت نرم شده ماده پ) اثر سوراخ کاری آسان در قسمت پایین و ت) افزایش سطح مشترک بین پین و قسمت نرم شده از ماده، لذا باعث افزایش گرمای تولید شده می شود. می توان نشان داد که صفحات فلز با ضخامت بالای ۵۰ میلی متر را در یک دوره و با استفاده از این دو ابزار با موفقیت جوشکاری همزن اصطکاکی کرد. یک ضخامت ۷۵ میلی متر از۶۰۸۲Al-T۶ جوشکاری FSW با استفاده از ابزار Whorl در دو دوره انجام داد، که در هر دوره ۳۸ میلی متر نفوذ می کند. Thomas بزرگترین عامل تاثیرگذار به برتری پین های مارپیچی در برابر پین های استوانه ای معمولی، مقدار حجم سیلندر در طول چرخش نسبت به حجم پین های خودش است، یعنی نسبت حجم دینامیک به حجم ایستاتیک که برای فراهم کردن یک مسیر جریان کافی و مناسب مهم است. معمولا این نسبت برای پین هایی با قطر پایه ای یکسان و پین های دراز برابر۱:۱٫۱ و برای پین های استوانه ای معمولی ۱:۱٫۸ برای پین Whorl و ۱:۲٫۶ برای پین MX Triflute است (هنگامی که ضخامت صفحه جوشکاری ۲۵ میلی متر باشد).(W.M.Thomas et al 2003)

www.SID.ir

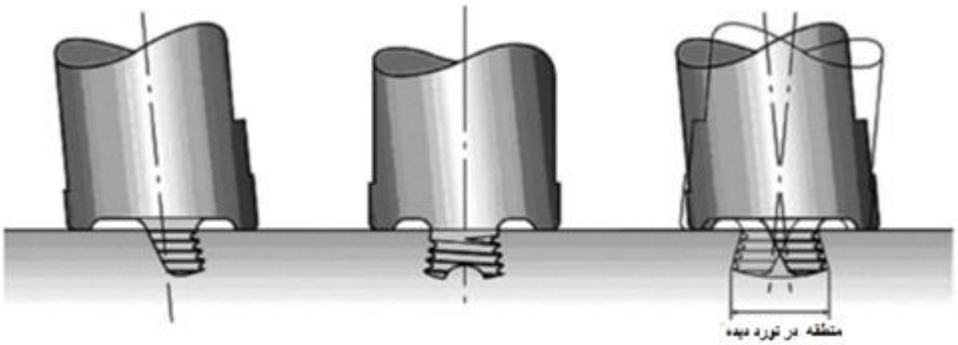
برای جوشکاری رویهم، پین استوانه ای پیچ دار معمولی در قسمت بالای صفحه باعث نرم شدگی زیاد می شود که به طور عمده خاصیت خم شدن را کاهش می دهد. با این حال برای این نوع جوشکاری، پهنای سطوح مشترک جوش و زاویه ای که بریدگی با لبه جوش برخورد کرده و برای کارهایی که شکست موضوعی اهمیت دارد، مهم است. اخیرا دو نوع هندسه پین-Flared Trifute با شیار های راهنما (شکل ۴) و A-skew با محور پینی که ابتدا به آرامی شیبدار بوده و سپس تا محور ماشین تراش (شکل ۵) برای افزایش کیفیت جوشکاری رویهم توسعه یافته اند. ویژگی های طرح Flared-Trifute و A-skew باعث a) افزایش نسبت بین حجم سیلندر و حجم ایستاتیک از پین که مسیر جریان اطراف و زیر را بهبود می دهد b) پهن کردن ناحیه جوش در طول شیار راهنما در پین Flared-Trifute و حرکت مایل در پین A-skew c) فراهم کردن حرکت ترکیبی پیشرفته و بهبود یافته برای اکسیدهای چند تکه و پراکنده شده در سطوح مشترک جوش d) فراهم شدن یک حرکت اوربیتالی آهنگری در ریشه جوش در طول حرکت مایل، که باعث بهبود کیفیت جوشکاری در این ناحیه می شود.



شکل ۴، ابزارات Flared-Triflute که در موسسه جوش TWI توسعه یافته است: a) شیار های بی اثر b) شیار های چپ گرد c)

شیار های راست گرد

با مقایسه نسبت به پین پیچ دار معمولی، پین های Flared-Trifute و A-skew باعث: a) بالای ۱۰۰٪ بهبود در سرعت جوشکاری b) در حدود ۲۰٪ کاهش در نیروی محوری c) به طور موثر پهن شدگی ناحیه جوش و d) کاهش در ضخامت صفحه بالایی با فاکتور >۴.(J.A.Harter 1999)



شکل ۵، ابزار A-skew که در TWI توسعه یافته است. a) دید از جانب b) دید از روبرو c) ناحیه کج شده که توسط حرکت کج احاطه شده است

www.SID.ir

از طرف دیگر، پین Flared-Trifute زاویه چرخش ترک در صفحات روی هم افتاده و یا سطوح مشترک جوش را به طور قابل توجهی کاهش می دهد، در حالیکه پین A-skew یک کاهش اندکی در ناحیه خارجی صفحات رویهم افتاده و یا سطوح مشترک جوش ایجاد می کند، که برای بهبود خاصیت اتصالات FSW مفید است. Thomas وDolby پیشنهاد دادن که پین های Flared-Trifute و A-skew برای جوش روی هم افتاده، T شکل و جوش های مشابه که سطوح مشترک اتصال به محور ماشین عمود است، مفید است. (L.Dubourg et al 2010)

با این حال شکل های مختلف حرکت دهنده در TWI طراحی شده اند تا مواد و شرایط مختلف با هم متناسب باشند.

توجه به مهمترین اثرات شکل ابزار در حرکت ماده به طور اساسی بین حرکت ماده و نتایج میکروساختاری از انواع جوش با هر ابزار بستگی دارد. یک نیاز اساسی این است که برای طرح ابزار، بدنه سیستماتیک توسعه پیدا کند. محاسبات ابزارات شامل آنالیز اجزای محدود، می تواند در مجسم سازی حرکت ماده و نیروهای محوری استفاده شود.

۳. پارامترهای جوشکاری:

برای FSW، دو پارامتر بسیار مهم هستند: سرعت چرخش ابزار (در جهت حرکت عقربه های ساعت و یا خلاف جهت) و سرعت حرکت ابزار (در طول خط اتصال). حرکت چرخشی ابزار باعث همزدن و ترکیب ماده در اطراف پین چرخنده و حرکت انتقالی ابزار باعث حرکت ماده همزده شده از جلو به عقب پین و نهایتا اتمام فرآیند می شود. سرعت حرکت زیاد بدلیل گرمای اصطکاک زیاد و مقدار همزدن و ترکیب زیاد، باعث افزایش دما می شود. با این حال باید توجه شود که جفت اصطکاک بین سطح ابزار و قطعه کار کنترل کننده گرماست. بنابراین یک افزایش گرمای یکنوخت با افزایش سرعت چرخش ابزار را نباید به عنوان ضریب اصکاک در سطح انتظار داشت که با افزایش سرعت چرخش بیشتر خواهد شد.

در پژوهشی صفدریان به بررسی تاثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی بر روی شکل پذیری ورق های ترکیبی آلومینیوم پرداخت که نتایج نشان میدهد که نوع ابزار جوشکاری تاثیر زیادی در کیفیت جوش دارد، طوریکه افزایش سرعت دورانی ابزار سبب افزایش کیفیت جوش و خاصیت شکل پذیری ورق ترکیبی میشود.

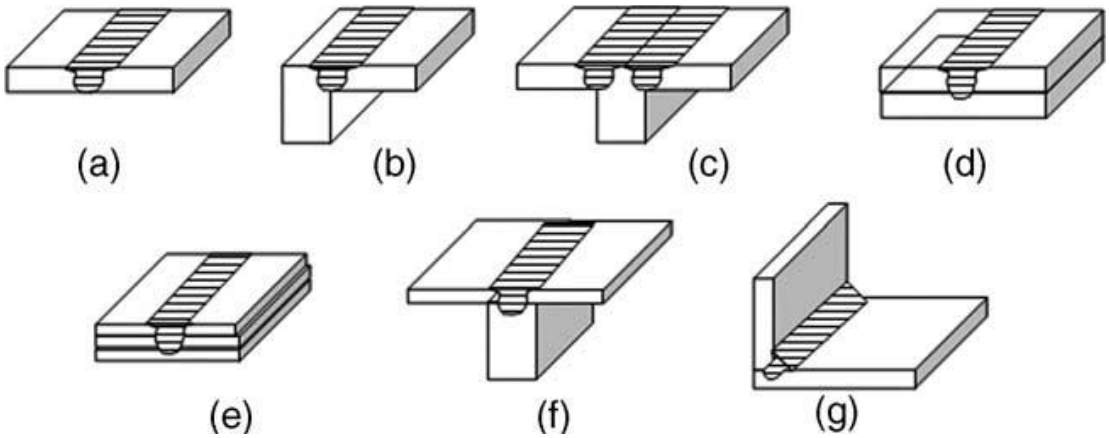
در مجموع درباره سرعت چرخش ابزار و سرعت حرکت، پارامتر مهم دیگر زاویه محور و یا شیب ابزار نسبت به سطح قطعه کار است. یک شیب مناسب از محور به سوی مسیری تمایل دارد که حرکت دهنده ابزار توسط پین پیچ دار ماده به طور موثر از جلو به سمت عقب پین حرکت می کند. با این حال عمق جاسازی شده از پین در درون قطعه کار برای تولید جوش دقیق با ابزار حرکت دهنده نرم، مهم است. عمق فروبرده شده از ابزار وابسته به ارتفاع پین است. هنگامی که ارتفاع فروبرده شده کم باشد، ابزار حرکت دهنده نمی تواند با مرکز سطح قطعه ارتباط داشته باشد. پس، حرکت دهنده در حال چرخش ماده همزده شده را از جلو به عقب پین به طور موثر نمی تواند حرکت دهد، درنتیجه جوش با خط کانال داخلی و یا با سطح شیار دار ایجاد می شود. هنگامی که عمق فروبرده شده عمیق باشد، ابزار فروبرده شده حرکت دهنده درون قطعه کار نور اضافی ایجاد می کند. در این مورد به طور موثر یک جوش به شکل مقعر ایجاد می شود، که به سمت اشیای اطراف در صفحات جوش هدایت می شود. باید به آن توجه شود که توسعه های اخیر درباره یافته های گذشته در مورد ابزار حرکت دهنده، به علم FSW با شیب ابزار ۰ درجه امکان می دهد. برخی از ابزارها برای اتصالات خمیده ترجیح داده می شود.(Smith Iain J 2008)

در پژوهشی امینی و همکاران به بررسی موقعیت محور پین ابزار نسبت به محور شانه ابزار در فرایند جوشکاری اصطکاکی بر روی آلمینیوم ۵۰۸۳ پرداختند که نتایج نشان میدهد که ابزار با پین خارج از محور تاثیر بیشتری بر کاهش نیروهای عمودی و جوشکاری(بین ۵۰ تا ۷۰ درصد) نسبت به ابزار با پین هم محور با محور شانه ابزار داشته است.

پیش گرمایش و یا سرمایش برای برخی از فرآیند های FSW نیز می تواند مهم باشد. برای ماده با نقطه ذوب بالا مانند تیتانیم یا فولاد و یا هدایت گرمایی بالا مانند مس، گرمای حاصل از اصطکاک و همزدن برای ایجاد تغییرپلاستیک و یا نرمی در ماده در اطراف ابزار در حال چرخش ممکن است کافی نباشد. بنابراین، برای ایجاد عیوب ممتد/جوش آزاد مشکل است. در این موارد، پیش گرمایش یا استفاده از منابع گرمادهنده اضافی می تواند برای حرکت ماده کمک کند. از سوی دیگر، مواد با نقطه ذوب

www.SID.ir

پایین مانند آلومینیم یا منیزیم، سرمایش می تواند برای کاهش رشد اضافی دانه های تبلور مجدد یافته و انحلال رسوبات مقاوم در اطراف ناحیه همزده، استفاده شود.



شکل ۷، انواع اتصالات در a FSW) لبه مربع ای b) گوشه ای c) گوشه ای d T) اتصال رویهم e) اتصال رویهم چند تکه f) Tشکل g) اتصال پرکننده

۴. کارآمدی این تکنیک در اتصالات ساختمان بوسیله ی تحلیل سلسله مراتبیAHP(Analytical Hierarchy process):

جهت وصل کردن یک یا چند قطعه در ساختمانهای فولادی نیاز به یک قطعه رابطی می باشد که دو قطعه بتوانند توسط جوش به هم متصل شوند که این قطعه رابط همان انواع اتصالات است.

انواع اتصالات در ساختمانهای فلزی به شرح زیر است:

۱- انواع اتصالات تیر به ستون.

۲- ا نواع اتصالات پای ستون.

۳- اتصال دو تیرآهن به هم و تولید ستون یا تیر دوبل.

۴- اتصالات بادبندها به ستونها و تیرها.

در تمام اتصالات ذکر شده می توان دو فرآیند ذوبی و اصطکاکی با در نظر گرفتن پارامتر های زیر مقایسه کرد.

۱-از نظر روش اجرا

۲-از نظر اقتصادی

۳-از نظر پارامتر های محیط زیستی و HSE

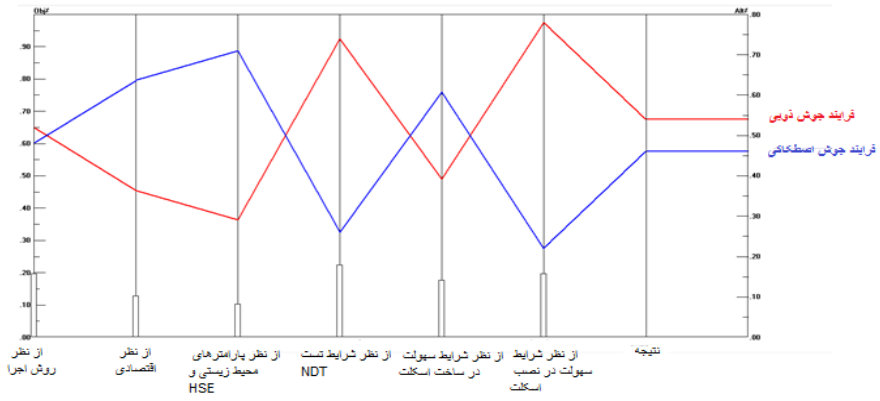
۴-از نظر شرایط تست های NDT

۵-از نظر شرایط سهولت در ساخت اسکلت

۶- از نظر شرایط سهولت در نصب اسکلت

در ادامه باید اشاره داشت که در علم تصمیم‌گیری که در آن انتخاب یک راهکار از بین راهکارهای موجود و یا اولویت بندی راهکارها مطرح است، چند سالی است که روشهای "تصمیم گیری با شاخص‌های چند گانه «MADM» جای خود را باز کرده‌اند. از این میان روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) بیش از سایر روشها در علم مدیریت مورد استفاده قرار گرفته است. فرایند تحلیل سلسله مراتبی یکی از معروفترین فنون تصمیم گیری چند منظوره است که اولین بار توسط توماس ال. ساعتی در دهه ۱۹۷۰ ابداع گردید.فرایند تحلیل سلسله مراتبی منعکس کننده رفتار طبیعی و تفکر انسانی است. .(قدسیپور،۱۳۸۱) این تکنیک، مسائل پیچیده را بر اساس آثار متقابل آنها مورد بررسی قرار می‌دهد و آنها را به شکلی ساده تبدیل کرده به حل آن می‌پردازد. در تحلیل پارامترهای AHP ساخته شده جدول ارائه می‌گردد:

www.SID.ir



شکل ۸- دو روش اصطکاکی و ذوبی با استفاده از نمودار بدست آمده از نرم افزار AHP

محدودیت هایی که جوشکاری اصطکاکی در روش اجرا نسبت به جوشکاری ذوبی دارد عبارتند از:

a) در اغلب حالات قطعات می بایست محور تقارن داشته باشند b) تنظیم قطعات و در یک خط کردن آن ها (چنانچه قطر بیشتر از ۵ سانتیمتر باشد مشکل است c) موادی که در حالت خشک به راحتی روی هم می لغزند و فورج پذیر نیستند، برای این روش مناسب نمی باشند. در واقع مقاومت به سایش در مواد مورد استفاده نباید بالا باشد d) اگر طول قطعه بیش از یک متر باشد، نیاز به تمهیداتی برای جلوگیری از تاب برداشتن قطعه است e) برای نگهداشتن قطعات نیز به نیروی زیادی نیاز داریم زیرا در حین فرایند جوشکاری، گشتاور زیادی بر قطعات اعمال می‌شود

مقایسه دو جوش از نظر اقتصادی: به دلیل جدید بودن فرآیند جوشکاری اصطکا کی اغتشاشی وانحصاری بودن آن، ممکن است فراهم کردن تجهیزات و دستگاه برای یک واحد صنعتی ، نیازمند سرمایه گذاری بالایی باشد . درایران فعلاً به دلیل هزینه بالای این روش استفاده از جوشکاری ذوبی مقرون به صرفه تر است .

بحث و نتیجه گیری:

۱- جوشکاری اصطکاکی روشی مناسب برای اتصال قطعات با مقطع دایره ای و غیر دایره ای می باشد و در جایی مورد استفاده قرار میگیرد که وجود زاویه ای دقیق بین قطعات مورد نیاز باشد.

۲- عمدتا زمانی که قطعات غیرهم جنس باشند بهتر است از جوشکاری اصطکاکی استفاده نمود.

۳- جوشکاری تلاطمی اصطکاکی نسبت به کیفیت برش لبه‌ها حساسیت زیادی ندارد، چرا که موادی که تحت عمل جوش قرار گرفته‌اند توسط ابزار به‌هم زده می‌شوند و بنابراین درزهای کوچک به خودی‌خود بسته می‌شوند، که این در بسیاری از کاربردها یک مزیت عمده تلقی می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

منابع:

Messlr jr R W,Pricciples of Welding _ Processes,Physics,Chemistry,and Metallurgy,Wiley-VCH, 2004.

W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith and C. J. Dawes: GB Patent no. 9125978·8, 1991.

R. S. Mishra and Z. Y. Ma: 'Friction stir welding and processing', Mater. Sci. Eng. R, 2005, 50R, 1–78

.W. M. Thomas, K. I. Johnson and C. S. Wiesner: 'Friction stir welding recent developments in tool and process technologies', Adv. Eng. Mater., 2003, 5, (7), 485–490.

J.A.Harter,"AFGROW Users Guide and Techical Manunal,"AFRL-VA-WP-TR 1999-3016,Air Force Research Laboraj-tory,Air vehicles Directorate (AFML/VASM),wright Patterson AFB,OH,FEB1999

. L. Dubourg, A. Merati and M. Jahazi: 'Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin', Mater. Des., 2010, 31, 3324–3330.

Smith Iain J and Lord Daniel D R,TWI Ltd _ FSW Patents _ A Stirring Story, 7 th International Symposium On Friction Stir Welding Licensees Meeting,May 2008

قدسیپور، س. ح.، (۱۳۸۱) . فرآیند تحلیل سلسله مراتبی. AHP تهران، انتشارات دانشگاه امیر کبیر.

www.SID.ir