



مروری بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی؛ فرآیند و کاربرد آن

قاسم فلاح دریاوارسری

فارغ التحصیل دانشگاه شهید بهشتی

نوید عامری سیاهویی

فارغ التحصیل دانشگاه شهید بهشتی

چکیده

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW¹) یکی از فرآیندهای حالت جامد است که در آن از یک ابزار در حال دوران غیر مصرفی جهت جوشکاری استفاده می‌شود. این روش جوشکاری برای اتصال انواع آلیاژهای آلومینیومی، ریخته گری، اکستروژن شده، در صنایع مختلف مانند هوافضا، کشتی سازی، ریلی و الکترونیک استفاده می‌گردد. این روش جوشکاری همچنین قابلیت اتصال مواد دیگری مانند منیزیم، تیتانیوم، مس، نیکل و آلیاژهای فولادی را نیز دارد. همچنین امکان اتصال ترکیبات نامتشابه از این مواد مانند آلومینیوم به فولاد نیز وجود دارد. FSW به عنوان یک روش جوشکاری حالت جامد، دارای مزایای زیادی نسبت به روش‌های جوشکاری قوسی سنتی است، از جمله می‌توان به عدم وجود ترک‌های سرد، تخلخل و ترک‌های جامد شدن، کاهش انقباض و تغییر شکل مواد، عدم نیاز به مواد افزودنی، فلوکس یا گاز محافظ برای آلیاژهای آلومینیومی، محیط زیستی بودن روش و عدم تولید دود، پاشمان یا تشعشع ماوراء بنفش اشاره کرد. این روش جوشکاری از تکنولوژی ماشین ابزار استفاده می‌کند که امکان اتوماسیون، تکرار پذیری بالا و کاهش نیاز به جوشکاران ماهر را فراهم می‌کند. در این پژوهش به بررسی مراحل جوشکاری FSW، محدودیت‌ها و مزایای آن، ابزار جوشکاری FSW، مناطق ایجاد شده در جوشکاری و پارامترهای جوشکاری FSW پرداخته شده است.

واژگان کلیدی: جوشکاری، اتصال، اصطکاکی اغتشاشی، FSW.

¹ Friction Stir Welding



مقدمه

جوشکاری برای سالیان سال به عنوان روشی متداول برای اتصال مواد بوده است. مطالعات نشان داده است که تمدن سومری اولین بار از جوشکاری برای اتصال ظروف مسی استفاده کرده است. پس از قرن بیستم، اهمیت جوشکاری به سرعت افزایش یافت، زیرا بر اساس قرارداد ورسای که پس از جنگ جهانی اول امضا شد، ساخت کشتی‌های سنگین‌تر از 10,000 تن برای همه کشورها ممنوع شد. در نتیجه، مهندسان آلمانی به مطالعه استفاده از روش‌های پیشرفته اتصال برای کشتی‌های جنگی پرداختند و پس از مدتی توانستند وزن کشتی‌ها را هزاران تن کاهش دهند. (Hicks, 2001) بنابراین، آلمان بدون نقض پیمان، می‌توانست کشتی‌های جنگی بزرگی بسازد در حالی که وزن آنها هنوز کمتر از 10,000 تن بود. بعدها، وزن به عنوان یک عامل مهم در طراحی و ساخت کشتی‌ها مطرح شد، اگرچه انگیزه آلمان نامناسب بود؛ این موضوع باعث ایجاد تفکری جدید در صنعت تولید شد و آن را به سطح جدیدی از تفکر ارتقا داد. با توجه به ضرورت کاهش مصرف سوخت، نیاز به طراحی و ساخت سازه‌های سبک مانند بدنه خودرو، هواپیما و پانل‌های فراساحلی نیز افزایش یافته است (Kumar & Raju, 2017; Sharma et al., 2016; Tozaki et al., 2010; Tufaro et al., 2015).

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نوعی از اتصال حالت جامد است که از یک ابزار غیر مصرفی (سخت‌تر از فلز پایه) برای اتصال دو فلز بدون ذوب آنها استفاده می‌کند (Malopheyev et al., 2016). اگرچه FSW معمولاً برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد (Silva et al., 2015; Sonne et al., 2013)، اما همچنین برای جوشکاری بسیاری از فلزات دیگر مانند آلیاژهای منیزیم (Cao & Jahazi, 2011; Chowdhury et al., 2010)، آلیاژهای تیتانیوم (Buffa et al., 2012; Kitamura et al., 2013) و ماتریس فلزی کامپوزیت‌ها استفاده شده است (Bozkurt et al., 2011; Sharifitabar & Nami, 2011). علاوه بر این، مواد مشابه یا غیر مشابه با ضخامت‌های مختلف نیز می‌توانند با این روش جوش داده شوند. باید توجه داشت که در این روش جوشکاری، نیازی به استفاده از مواد مصرفی گران قیمت مانند گازهای پوششی نیست. علاوه بر این، فرآیند می‌تواند خودکار و مکانیزه شود، انحراف قطعه کار کم است و خواص مکانیکی خوب است (Hasan et al., 2017). علاوه بر این، از طریق این روش، مصرف انرژی، تأثیر بر محیط زیست و هزینه‌ها کاهش می‌یابد.

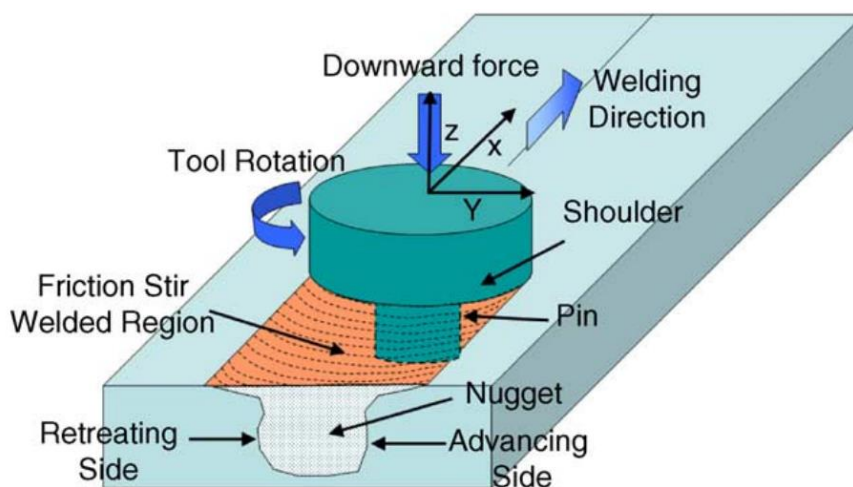
در اثر اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و تغییر شکل پلاستیک ناحیه اتصال، گرمای موضعی ایجاد می‌شود. این اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک منجر به مخلوط شدن و هم زدن مواد اطراف پین از جلو به عقب می‌شود. گرمای تولید شده توسط اصطکاک منجر به نرم شدن فلزات به خصوص در نزدیکی ابزار جوشکاری می‌شود (Klarstrom et al., 2000). این بدان معناست که در ناحیه اتصال، انرژی مکانیکی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. نقش اصلی ابزار در این روش گرم کردن قطعه کار و سپس القای جریان و محدود شدن مواد در زیر شانه است (Lee & Jung, 2004). به حداقل رسیدن ترکیبات شکننده در فصل مشترک این روش جوشکاری، می‌تواند خواص مکانیکی اتصال را بهبود بخشد.

مفهوم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی طراحی خاصی از ابزاری است که از ساقه^۲، شانه^۳ و پین^۴ تشکیل شده است. پین را می‌توان در فصل مشترک دو فلز که بصورت لب به لب کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، قرار داد و سپس در امتداد خط اتصال به جلو چرخاند. ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مزایایی دارد که از جمله این مزایا می‌توان به گرم کردن سطوح قطعه کار، ایجاد تغییر شکل پلاستیک، هم زدن و اختلاط مواد در اطراف پین برای ایجاد اتصال، جریان مواد و محدود کردن حرارت زیر

² Shank³ Shoulder⁴ Pin



شانه اشاره کرد (Zhang et al., 2012). تصویر شماتیکی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (Mishra & Ma, 2005) در شکل 1 نشان داده شده است. برخی از آلیاژهای دو فلز به دلیل استحکام ضعیف اتصال و تغییرات متالورژیکی نمی‌توانند با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با موفقیت به یکدیگر متصل شوند. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ویژگی‌های بسیار بیشتری نسبت به سایر روش‌های مرسوم دارد. این ویژگی‌ها شامل عدم اتلاف مواد، سازگاری با محیط زیست، خواص مکانیکی خوب، آلودگی کم و تکنیک‌های اتصال همه جانبه بین مواد مشابه و غیرمشابه است که جوشکاری آنها دشوار است. در ادامه به مزایای بیشتری از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اشاره خواهد شد (Www et al., 2008).



شکل 1: تصویر شماتیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

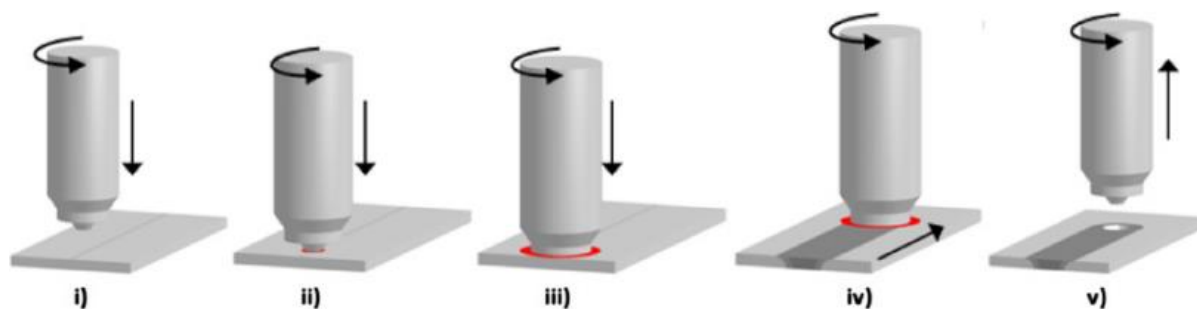
مراحل جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

بطور کلی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در پنج مرحله انجام می‌شود: غوطه‌وری^۵، سکونت^۶، جوشکاری، سکونت و کشیدن^۷ (شکل 2). ابزار به آرامی وارد فصل مشترک دو فلز می‌شود، تا زمانی که شانه با سطح بالایی قطعه کار تماس پیدا کند. سپس ابزار توسط دستگاه مجبور می‌شود تا تماس بین شانه و سطح ورق را حفظ کند. این نیروی رو به پایین باعث ایجاد گرمای اصطکاک بین شانه، پین و قطعه کار می‌شود که تقریباً به 80٪ نقطه ذوب می‌رسد. همچنین یک نیروی جانبی توسط دستگاه در امتداد جهت جوش اعمال می‌شود تا زمانی که ابزار به انتهای اتصال برسد. نیروی جانبی اعمال شده، تعیین کننده سرعت حرکت ابزار یا سرعت جوشکاری است. در برخی از شرایط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، هیچ ناحیه آزادی در انتهای اتصال وجود ندارد، بنابراین می‌توان پین را در حالی که هنوز در حال چرخش است خارج کرد. با کشیدن ابزار به این روش، حفره ایجاد می‌شود که به عنوان یک نقص در کاربردهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در نظر گرفته می‌شود (شکل 3) (Lohwasser & Chen, 2009; Sivashanmugam et al., 2010).

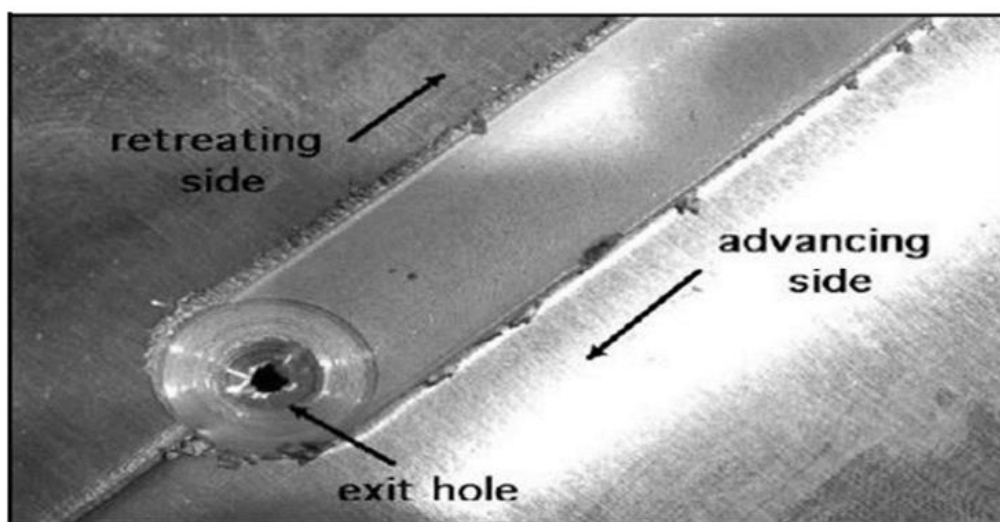
⁵ Plunging

⁶ Dwelling

⁷ Pulling



شکل 2: تصویر شماتیک مراحل جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (Farias et al., 2013)



شکل 3: تصویر حفرة ایجاد شده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (Sivashanmugam et al., 2010)

در طول جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، حداکثر دما به 0/8 دمای ذوب می‌رسد. این فرآیند از نوع "حالت جامد" نامیده می‌شود. از آنجایی که دما در طول این فرآیند زیر نقطه ذوب باقی می‌ماند، می‌توان مضرات تنش پسماند و انقباض را کاهش داد. دمای ایجاد شده توسط اصطکاک بین ابزار و قطعه کار به نوع ماده جوش داده بستگی دارد. همچنین هندسه ابزار بر نرخ تولید گرما از طریق گشتاور و نیروی محوری تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، مواد ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باید شامل مقادیر مناسبی از پارامترهایی نظیر چقرمگی شکست، استحکام، هدایت حرارتی، ضریب انبساط حرارتی و واکنش‌پذیری مواد ابزار با اکسیژن باشند (Mishra & Ma, 2005).

محدودیت‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیز دارای محدودیت‌های مختلفی می‌باشد که این محدودیت‌ها می‌توانند بر روی کاربردهای این نوع جوشکاری تأثیر بگذارد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:



- 1- بستن قطعات کار برای جلوگیری از دور شدن اتصال و ایجاد نیرو برای این فرآیند بسیار ضروری است. این شرط، کاربردهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای اتصالات جوش با هندسه‌های خاص محدود می‌کند.
- 2- هنگامی که ابزار در پایان فرآیند جوشکاری بلند می‌شود، سوراخی ایجاد می‌شود که در اکثر کاربردهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نامطلوب است.
- 3- در صورت سرعت چرخش کم، دمای جوش به اندازه کافی بالا نرفته و این امر باعث می‌شود تا فلز پایه نتواند تغییر شکل گسترده را در طول فرآیند جوشکاری تحمل کند.
- 4- پارامترهای جوش بر خواص اتصال تأثیر می‌گذارد. فشار کم فورج، زمان اصطکاک کوتاه و فشار اصطکاک کم باعث ضعیف شدن اتصال جوش و ایجاد فضای خالی می‌شود.
- 5- افزایش سرعت حرکت منجر به ایجاد سوراخ در عمق جوش می‌شود. به دلیل جریان ناکافی مواد در قسمت پایین اتصال، اندازه سوراخ با افزایش سرعت حرکت افزایش می‌یابد. علاوه بر این، تشکیل حفره عمدتاً به نسبت سرعت چرخش به سرعت حرکت بستگی دارد. گرمای تولید شده در سطح مشترک بین شانه ابزار و قطعه کار بیشتر از پین و قطعه کار است (Muralimohan et al., 2014; Pervaiz et al., 2014).

مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

همچنین این نوع جوشکاری دارای مزایای قابل توجهی می‌باشد که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- 1- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ایجاد دانه‌های ریز، خواص ریزساختار را بهبود می‌بخشد و خواص مکانیکی بسیار خوبی برای ناحیه جوش مانند استحکام کششی، سختی، خمش و خستگی در مقایسه با سایر فرآیندهای جوشکاری فراهم می‌کند. بازده جوش بسته به مواد می‌تواند به 70-96٪ برسد. گاهی اوقات، اگر طول ناحیه جوش کوتاه‌تر باشد، بازده به 100٪ می‌رسد.

در تحقیقات متعددی بهبود خواص مکانیکی از جمله سختی و استحکام کششی در آلیاژهای متفاوتی دیده شده است. مطابق با نتایج سانگ^۸ (Song & Nakata, 2010)، ساتو^۹ (Sato et al., 2008) و احمد^{۱۰} (Ahmed et al., 2013) بیشترین سختی در مناطق مرکزی حاصل شده است. آنها بیان کردند که هرچه سرعت جوشکاری کمتر باشد، گرمای ورودی

⁸ K.H. Song

⁹ Y.S. Sato

¹⁰ M. M. Z. Ahmed



بیشتری ایجاد می شود که ممکن است سبب افزایش اندازه دانه در ناحیه اغتشاش^{۱۱} گردد. در نتیجه اصلاح و بهبود اندازه دانه در این ناحیه به عنوان عامل اصلی افزایش سختی این ناحیه در نظر گرفته شده است.

2- مواد مشابه یا غیرمشابه با فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بدون ذوب به یکدیگر متصل می شوند. با توجه به اینکه در ناحیه اتصال، ذوب فلز پایه رخ نمی دهد، لذا این روش احتمال بروز برخی از عیوب معمول که در سایر روش های متداول ایجاد می شوند، مانند تخلخل، ترک و انقباض حین انجماد و اعوجاج را به حداقل می رساند.

3- در این فرآیند، گازهای محافظ، تخلخل، پاشش یا دود وجود ندارد و نیازی به مواد پرکننده نیست.

4- در مقایسه با سایر روش ها، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به توان کمتری جهت ایجاد یک اتصال مطلوب نیاز دارد. این انرژی صرفا برای چرخاندن ابزار و اعمال نیروی ایجاد کننده گرمای اصطکاک مصرف می شود.

5- عدم وجود بخار و مواد سمی و همچنین عدم ایجاد احتراق، از مواردی است که امنیت بالای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را به همراه دارد. همچنین در این روش هیچگونه پاشش مواد، شعله و یا اشعه ماورا بنفش در طول فرآیند ایجاد نمی شود و سازگار با محیط زیست است.

6- هزینه های پایین این جوشکاری، محبوبیتش را در میان روش های دیگر جوشکاری چندین برابر کرده است. زیرا که ابزار مخصوص آن، بدون هیچ هزینه جانبی بر روی دستگاه فرز قرار می گیرد و همچنین با توجه به اینکه سطح حاصل از این نوع جوشکاری به سطوح حاصل از فرآیندهای ماشینکاری نزدیک است، به عملیات پرداخت کمتری نسبت به سایر روش ها نیاز دارد و در نتیجه هزینه نهایی فرآیند تولید، پایین تر خواهد بود (Fazel-Najafabadi et al., 2010; Gao et al., 2012; Ishida et al., 2015; Meshram et al., 2014).

ابزار جوش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مهمترین بخش در این نوع جوشکاری است. اگر ابزار دارای خواص عالی باشد، کیفیت ناحیه جوش بهبود می یابد. همانطور که قبلا نیز اشاره شده بود، ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از سه قسمت ساقه، شانه و پین تشکیل شده است. از جمله عملکردهای شانه می توان به اعمال فشار بر روی قطعه کار و محدود کردن مواد تغییر شکل یافته در اطراف پین اشاره کرد. شانه به دلیل اصطکاک با سطح قطعه کار فوقانی، گرما تولید می کند و باعث تغییر شکل پلاستیک می شود. نقش اصلی پین نرم کردن، تغییر شکل پلاستیک و هم زدن مواد در منطقه اغتشاش است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با طرح ها، اشکال، ابعاد و مواد ابزار خاص بسیاری از خواص مکانیکی و فیزیکی از جمله خزش، شکل پذیری، استحکام، خستگی، رفع عیوب ریخته گری، ریزساختار دانه، مقاومت در برابر خوردگی و غیره را بهبود می بخشد (Shahid et al., 2015).

¹¹ Stir Zone (SZ)



مناطق ایجاد شده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

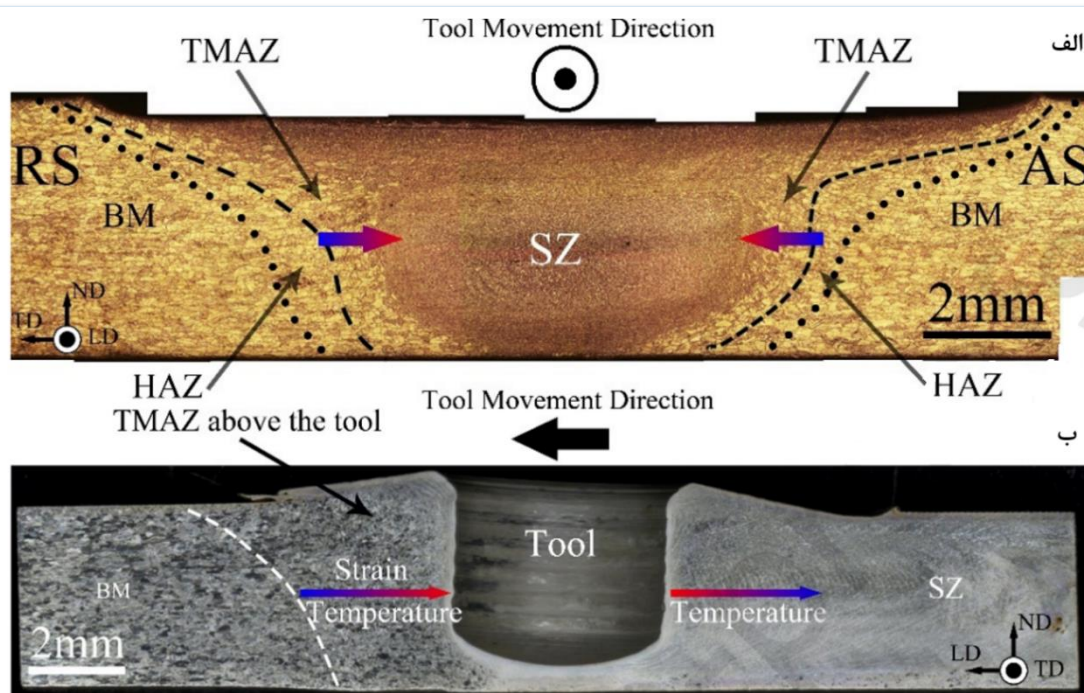
بسیاری از فعل و انفعالات پیچیده می‌تواند در طول فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی رخ دهد. این فعل و انفعالات می‌تواند پارامترهای زیادی را همانند یکپارچگی مکانیکی اتصال، پدیده تبلور مجدد دینامیکی، تغییر شکل پلاستیک و جریان مواد تحت تأثیر قرار دهد. سطح مقطع اتصال فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولاً شامل تعداد معینی از مناطق است، این مناطق عبارتند از: منطقه جوش همزده (ناحیه اغتشاش) SZ یا ناحیه ناگت^{۱۲} که در مرکز اتصال از جایی که پین عبور کرده است، می‌باشد، منطقه تحت تأثیر حرارت مکانیکی^{۱۳}، که این ناحیه در هر دو طرف ناحیه همزده میانی است، منطقه تحت تأثیر حرارت HAZ^{۱۴} که این ناحیه در مجاورت منطقه تحت تأثیر حرارت مکانیکی (TMAZ) قرار دارد و با یک چرخه حرارتی روبرو است. عبارتی همانند سایر روش‌های جوشکاری، در این روش نیز منطقه تحت تأثیر دما HAZ وجود دارد اما نه به بزرگی و شدت جوشکاری ذوبی. زیرا که در این روش ذوبی وجود نداشته و فقط به واسطه دما منطقه‌ای با این نام در فلزات اولیه ایجاد می‌شود. تمام این مناطق در شکل 4 نشان داده شده است (Heidarzadeh et al., 2021).

یکی از وسیع‌ترین موضوعات محققان در خصوص اثر پارامترهای جوشکاری شامل سرعت دورانی و سرعت خطی، هندسه ابزار و جنس مواد اولیه روی شکل و اندازه دانه‌های بوجود آمده در منطقه اغتشاش می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش گرمای ورودی به قطعه کار، رشد دانه اتفاق خواهد افتاد. چرا که براساس اصول مربوط به تبلور مجدد، با نگه داشتن زمان یا بالا بردن دما در این فرآیند، رشد دانه اتفاق خواهد افتاد و کاهش خواص مکانیکی در این منطقه شدیدتر خواهد شد. بنابراین می‌بایست با انتخاب پارامتر بهینه مخصوصاً سرعت دورانی و سرعت خطی که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود، از کاهش خواص مکانیکی در این منطقه جلوگیری کرد. محققان نشان داده‌اند با افزایش سرعت دورانی و یا کاهش سرعت پیشروی و یا افزایش نسبت سرعت دورانی به سرعت خطی، عملیات رشد دانه شروع می‌شود. بنابراین می‌بایست با پیدا کردن پارامتر ایده‌آل، به حداکثر سختی و استحکام دست یافت (Kwon et al., 2003).

¹² Nugget zone (NZ)

¹³ Thermo Mechanically Affected Zone (TMAZ)

¹⁴ Heat-Affected Zone



شکل 4: شکل نواحی مختلف ایجاد شده در اثر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (الف) مقطع معمولی و (ب) مقطع

طولی (Heidarzadeh et al., 2021)

پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

عوامل مختلفی بر روی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تاثیر گذار هستند که از جمله آن ها می توان به سرعت چرخشی، سرعت جوشکاری، زاویه شیب، نیروی محوری، عمق نفوذ پین درون قطعه کار و هندسه ابزار اشاره کرد که در ادامه به بررسی آن ها خواهیم پرداخت.

در مقالات متعددی به بررسی سرعت دروانی (چرخشی) و تاثیر آن بر خواص مکانیکی و ریزساختار پرداخته شده است. اوزدمیر^{۱۵} (Özdemir, 2005) از جمله محققانی بود که به بررسی اتصال فولاد ننگزن آستنیتی 304L و فولاد 4340 با فرآیند جوشکاری اصطکاکی در پنج سرعت چرخشی مختلف پرداخته است. سپس عملکرد اتصالات جوش اصطکاکی را مورد مطالعه قرار داد و تأثیرات سرعت چرخش بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش داده شده را بررسی کرد. اطلاعات و پارامترهای مورد استفاده در تحقیق اوزدمیر مطابق جدول زیر آورده شده است.

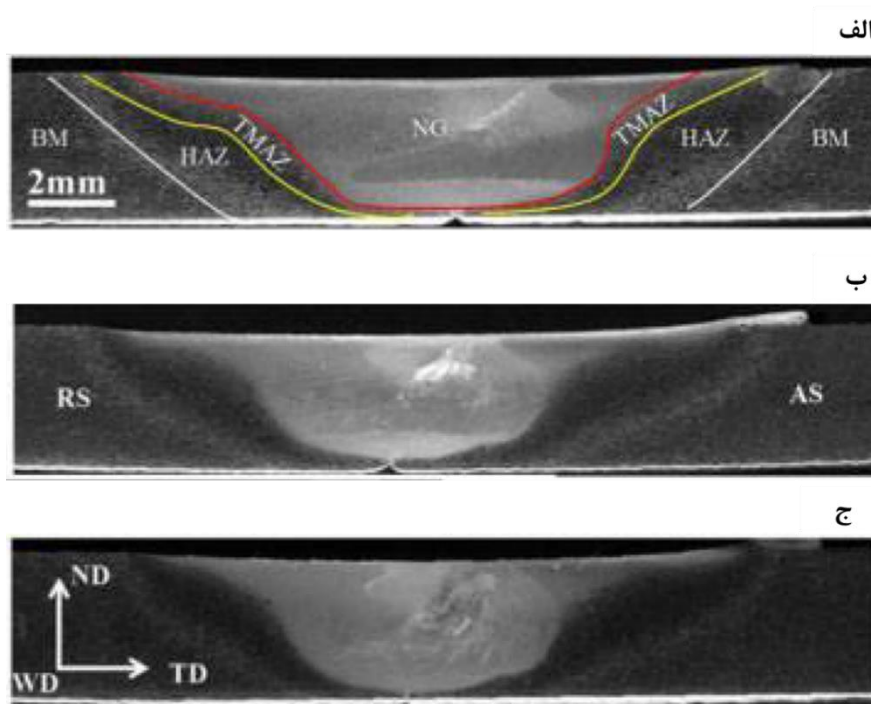


جدول 1: پارامترهای استفاده شده در پژوهش اوزدمیر (Özdemir, 2005)

نمونه	سرعت چرخشی (rpm)	فشار اصطكاك (MPa)	فشار فورج (MPa)	زمان اصطكاك (S)	زمان فورج (S)
1	1500	40	60	5	10
2	1700	40	60	5	10
3	2000	40	60	5	10
4	2300	40	60	5	10
5	2500	40	60	5	10

مطابق با نتایج حاصل شده بیان شد هر چهار ناحیه مختلفی که در اثر جوشکاری اصطكاكی اغتشاشی ایجاد می شود، در اتصال این دو فولاد در تمام شرایط مذکور ایجاد گشت و تأثیر سرعت چرخشی بر روی مناطق اغتشاش (SZ) و متأثر از حرارت مکانیکی (TMAZ) بیشتر از سایر مناطق نمایان شد و عرض و هندسه این مناطق تغییر نمود. با افزایش سرعت چرخشی گرمای موضعی در فصل مشترک بیشتر شده که سبب می شود در مدت زمان کوتاهی دمای بالایی ایجاد شود. بعبارتی با افزایش سرعت چرخشی مدت زمان لازم برای دستیابی به دمای حداکثر کاهش یافته و گرما به سرعت جذب ناحیه مجاور می شود و شیب نرخ سرمایش تندتر می گردد. در نتیجه ریزساختاری کاملاً مارتنزیتی در مناطق مذکور ایجاد می گردد. همچنین در اثر افزایش دمای فصل مشترک، مقدار جرم بیشتری به منطقه خارج از فصل مشترک منتقل می شود و عرض ناحیه TMAZ باریک تر می گردد. همچنین براساس نتایج ریزسختی حاصل شده از نواحی مختلف گزارش شده است که تغییر شکل پلاستیک بالا در منطقه TMAZ سبب کاهش شدید اندازه دانه و افزایش سختی در این ناحیه شده است. بعبارتی با افزایش سرعت چرخشی از 1500 rpm تا 2500 rpm، مقدار سختی از 500 HV تا 700 HV تغییر کرد (Özdemir, 2005).

در پژوهشی توسط احمد و همکارانش (Ahmed et al., 2013) به بررسی اثر سرعت جوشکاری اصطكاكی اغتشاشی برخواص مکانیکی اینکونل 617 پرداخته شد. آلیاژ اینکونل 617 در سرعت چرخشی ثابت 400 mm/min و سه سرعت جوشکاری متفاوت 30 mm/min، 50 mm/min و 80 mm/min تحت جوشکاری اصطكاكی اغتشاشی قرار گرفتند. ناحیه های مختلف ایجاد شده در عملیات جوشکاری اصطكاكی اغتشاشی در شکل 5 آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، منطقه NG شکل معمولی جوش هایی را دارد که با استفاده از ابزارهای مخروطی FSW با یک ناحیه وسیع در بالا به دلیل اثر شانه ای و ناحیه باریک در نزدیکی پایه جوش به دلیل باریک شدن پروب ابزار تولید می شود.



شکل 5: تصاویر میکروسکوپ نوری از منطقه جوش تحت سرعت‌های جوشکاری (الف). 30 mm/min. (ب). 50 mm/min. و (ج) 80mm/min (Ahmed et al., 2013).

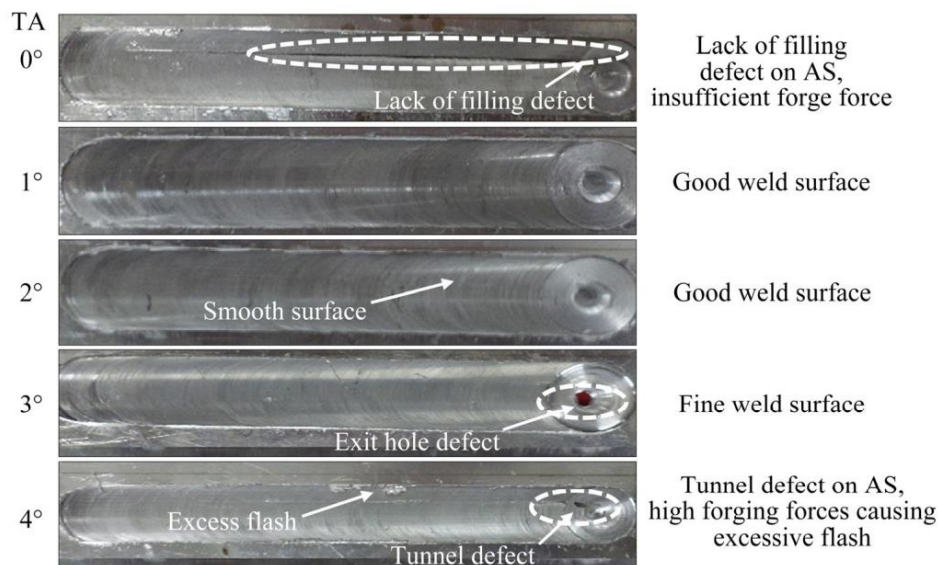
راجندران و همکارانش^{۱۶} (RAJENDRAN et al., 2019) زاویه شیب ابزار که یکی از پارامترهای مهم فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است را بررسی کردند و مطالعات خود را بر روی آلیاژ آلومینیوم AA2014-T6 انجام دادند. در پژوهش آنها زاویه شیب ابزار بین 0° تا 4° با افزایش 1 درجه‌ای متغیر بود و سایر پارامترهای جوشکاری ثابت در نظر گرفته شده بود که در جدول زیر آورده شده است. شکل 6 سطح اتصالات جوش داده شده در زاویه‌های ابزار مختلف (0° تا 4°) را نشان می‌دهد.

¹⁶ C. Rajendran et al.



جدول 2: پارامترهای مورد استفاده

Process parameter	Value
Tool rotational speed/(r·min ⁻¹)	900
Welding speed/(mm·min ⁻¹)	90
Tool shoulder diameter/mm	18
Tool pin diameter/mm	6
Tool tilt angle/(°)	0, 1, 2, 3 and 4
Pin type	Left hand threaded taper cylindrical pin
Shoulder concavity/(°)	1



شکل 6: تصاویر سطح جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی تحت زاویه ابزارهای متفاوت (RAJENDRAN et al., 2019).

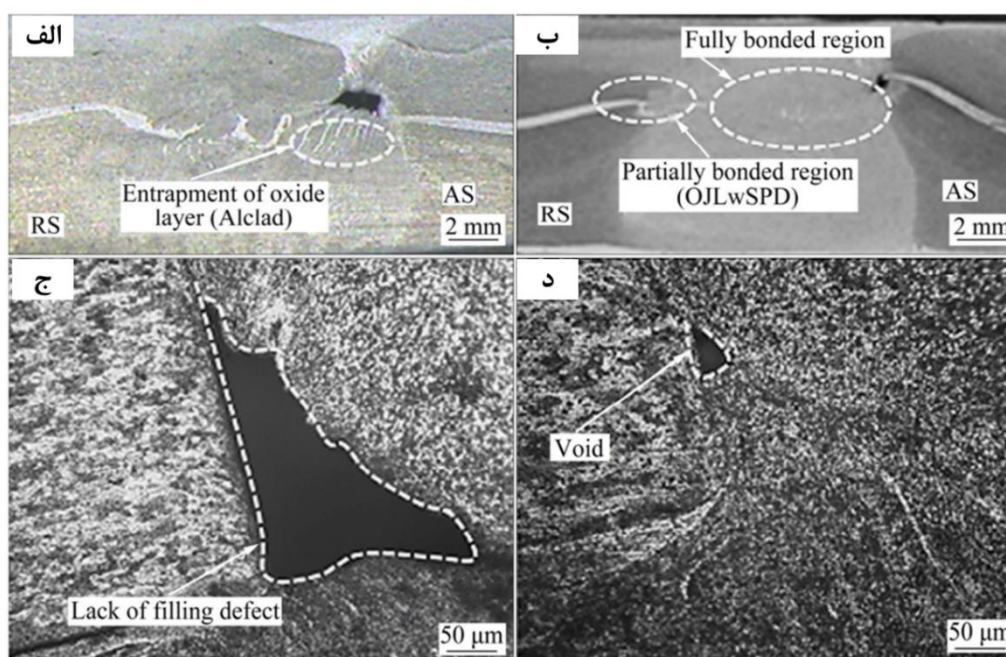
ظاهر سطح اتصالات جوش داده شده با درجات بین 0° تا 3° باعث ایجاد سطحی بدون نقص و صاف می‌شود. امواج ریز و درشت در قسمت خارجی (سطح بالایی) جوش مشاهده می‌شود. اثر تکان دادن مکانیکی ناشی از عدم تعادل حالت تنش ماده پلاستیکی شده در طی تغییر نیروی محوری زاویه ابزار مسئول تشکیل امواج درشت است (Bozkurt et al., 2013). فرآیندی که می‌تواند اثر زاویه ابزار را بر اتصال جوشکاری اصطکاکی بیان کند، گرمای اصطکاکی ایجاد شده توسط لغزش شانه ابزار در برابر قطعه کار است که باعث تبدیل مواد سرد^{۱۷} به مواد تغییر شکل پلاستیک یافته^{۱۸} می‌شود. اتصالات با استفاده از تمام طول

¹⁷ Cold Material

¹⁸ Plasticized Material



ورق و به دلیل فورج مواد تغییر شکل پلاستیک یافته که باعث ایجاد جوش می‌شود، ساخته می‌شوند. بنابراین، اتصال از طریق فورج مواد تغییر شکل پلاستیک یافته در خط اتصال و در پشت ابزار از سمت پیشروی به سمت عقب نشینی ایجاد می‌شود. در نتیجه کاهش زاویه ابزار، جریان مواد ناکافی در SZ ایجاد می‌کند و جوش ایجاد نمی‌شود (شکل 7- الف و ج). با افزایش زاویه ابزار، مواد پردازش^{۱۹} شده به راحتی در رابط ابزار- قطعه کار فرار می‌کنند. بنابراین، عدم یکپارچگی در ناحیه جوش رخ می‌دهد که منجر به ایجاد حفره‌ها می‌شود (شکل 7- د).



شکل 7: تصاویر ریزساختار اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده تحت زاویه های ابزار الف) 1°، ب) 4° درجه و تصاویر منطقه اغتشاش در زاویه ابزار ج) 1° و د) 4° (RAJENDRAN et al., 2019)



بحث و نتیجه گیری

فناوری جوشکاری اصطکاکی اغشاری از زمان پیدایش، موهبتی برای پیشرفت صنعت بوده است. با وجود سابقه کوتاه، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده است. جوشکاری اصطکاکی اغشاری (FSW) به عنوان روشی با صرفه اقتصادی و جایگزین مناسبی برای اتصال مواد با هدایت حرارتی بالا که جوشکاری آنها با روش های ذوبکاری رایج دشوار است، شناخته شده است. این روش می‌تواند به طور بالقوه برای جوشکاری آلیاژهای تیتانیوم و سایر مواد متعددی مورد استفاده قرار گیرد. درک این فرآیند در کاهش عیوب و بهبود یکنواختی خواص جوش و در عین حال گسترش کاربرد FSW به آلیاژهای مهندسی جدید مفید بوده است. این روش جوشکاری فرصت پیشرفت زیادی دارد و میتوان با مطالعات مختلف به بهبود و بهینه سازی پارامتر های موثر بر آن برای استفاده بیشتر در صنایع مختلف کمک کرد.



منابع

- Ahmed, M. M. Z., Wynne, B. P., & Martin, J. P. (2013). Effect of friction stir welding speed on mechanical properties and microstructure of nickel based super alloy Inconel 718. *Science and Technology of Welding and Joining*, 18(8), 680–687. <https://doi.org/10.1179/1362171813Y.00000000156>
- Bozkurt, Y., Salman, S., & Çam, G. (2013). Effect of welding parameters on lap shear tensile properties of dissimilar friction stir spot welded AA 5754-H22/2024-T3 joints. *Science and Technology of Welding and Joining*, 18(4), 337–345. <https://doi.org/10.1179/1362171813Y.00000000111>
- Bozkurt, Y., Uzun, H., & Salman, S. (2011). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded particulate reinforced AA2124/SiC/25p-T4 composite. *Journal of Composite Materials*, 45(21), 2237–2245. <https://doi.org/10.1177/0021998311401067>
- Buffa, G., Fratini, L., & Micari, F. (2012). Mechanical and microstructural properties prediction by artificial neural networks in FSW processes of dual phase titanium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 14(3), 289–296. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.10.007>
- Cao, X., & Jahazi, M. (2011). Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy. *Materials & Design*, 32(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.048>
- Chowdhury, S. M., Chen, D. L., Bhole, S. D., & Cao, X. (2010). Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch. *Materials Science and Engineering: A*, 527(21–22), 6064–6075. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.06.012>
- Farias, A., Batalha, G. F., Prados, E. F., Magnabosco, R., & Delijaicov, S. (2013). Tool wear evaluations in friction stir processing of commercial titanium Ti–6Al–4V. *Wear*, 302(1–2), 1327–1333. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.10.025>
- Fazel-Najafabadi, M., Kashani-Bozorg, S. F., & Zarei-Hanzaki, A. (2010). Joining of CP-Ti to 304 stainless steel using friction stir welding technique. *Materials & Design*, 31(10), 4800–4807. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.003>
- Gao, Y., Tsumura, T., & Nakata, K. (2012). Dissimilar welding of titanium alloys to steels. *Trans. JWRI*, 41(2), 7–12.
- Hasan, A. F., Bennett, C. J., Shipway, P. H., Cater, S., & Martin, J. (2017). A numerical methodology for predicting tool wear in Friction Stir Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 241, 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.11.009>
- Heidarzadeh, A., Mironov, S., Kaibyshev, R., Çam, G., Simar, A., Gerlich, A., Khodabakhshi, F., Mostafaei, A., Field, D. P., Robson, J. D., Deschamps, A., & Withers, P. J. (2021). Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. *Progress in Materials Science*, 117, 100752. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100752>
- Hicks, J. G. (John G.). (2001). *Welded design : theory and practice*. Abington Pub.



- Ishida, K., Gao, Y., Nagatsuka, K., Takahashi, M., & Nakata, K. (2015). Microstructures and mechanical properties of friction stir welded lap joints of commercially pure titanium and 304 stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 630, 172–177. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.004>
- Kitamura, K., Fujii, H., Iwata, Y., Sun, Y. S., & Morisada, Y. (2013). Flexible control of the microstructure and mechanical properties of friction stir welded Ti–6Al–4V joints. *Materials & Design* (1980-2015), 46, 348–354. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.051>
- Klarstrom, D. L., Hoback, G. L., Ishwar, V. R., & Qureshi, J. I. (2000, May 8). Rejuvenation Heat Treatment and Weld Repairability Studies of HAYNES® 230® Alloy. Volume 4: Manufacturing Materials and Metallurgy; Ceramics; Structures and Dynamics; Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education. <https://doi.org/10.1115/2000-GT-0629>
- Kumar, K. N., & Raju, P. R. (2017). Dissimilar Materials of Friction Stir Welding Overview. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 44(3), 116–122. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V44P224>
- Kwon, Y.-J., Shigematsu, I., & Saito, N. (2003). Production of Ultra-Fine Grained Aluminum Alloy using Friction Stir Process. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 44(7), 1343–1350. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.1343>
- Lee, W.-B., & Jung, S.-B. (2004). Effect of Microstructure on Mechanical Properties of Friction-Welded Joints between Ti and AISI 321 Stainless Steel. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 45(9), 2805–2811. <https://doi.org/10.2320/matertrans.45.2805>
- Lohwasser, D., & Chen, Z. (2009). *Friction stir welding: From basics to applications*. Elsevier.
- Malopheyev, S., Vysotskiy, I., Kulitskiy, V., Mironov, S., & Kaibyshev, R. (2016). Optimization of processing-microstructure-properties relationship in friction-stir welded 6061-T6 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 662, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.063>
- Meshram, M. P., Kodli, B. K., & Dey, S. R. (2014). Friction Stir Welding of Austenitic Stainless Steel by PCBN Tool and its Joint Analyses. *Procedia Materials Science*, 6, 135–139. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.016>
- Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1–2), 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
- Muralimohan, C. H., Muthupandi, V., & Sivaprasad, K. (2014). Properties of Friction Welding Titanium-stainless Steel Joints with a Nickel Interlayer. *Procedia Materials Science*, 5, 1120–1129. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.406>
- Özdemir, N. (2005). Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed. *Materials Letters*, 59(19–20), 2504–2509. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.03.034>
- Pervaiz, S., Rashid, A., Deiab, I., & Nicolescu, M. (2014). Influence of Tool Materials on Machinability of Titanium- and Nickel-Based Alloys: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(3), 219–252. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.880460>



- RAJENDRAN, C., SRINIVASAN, K., BALASUBRAMANIAN, V., BALAJI, H., & SELVARAJ, P. (2019). Effect of tool tilt angle on strength and microstructural characteristics of friction stir welded lap joints of AA2014-T6 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(9), 1824–1835. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)65090-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65090-9)
- Sato, Y. S., Arkom, P., Kokawa, H., Nelson, T. W., & Steel, R. J. (2008). Effect of microstructure on properties of friction stir welded Inconel Alloy 600. *Materials Science and Engineering: A*, 477(1–2), 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.002>
- Shahid, F., Khan, A. A., & Hameed, M. S. (2015). Mechanical and microstructural analysis of dissimilar metal welds. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 25(1), 6.
- Sharifitabar, M., & Nami, H. (2011). Microstructures of dissimilar friction stir welded joints between 2024-T4 aluminum alloy and Al/Mg2Si metal matrix cast composite. *Composites Part B: Engineering*, 42(7), 2004–2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.05.025>
- Sharma, H. K., Bhatt, K., Shah, K., & Joshi, U. (2016). Experimental Analysis of Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys AA6061 and Mg AZ31 Using Circular Butt Joint Geometry. *Procedia Technology*, 23, 566–572. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.064>
- Silva, A. C. F., Braga, D. F. O., de Figueiredo, M. A. V., & Moreira, P. M. G. P. (2015). Ultimate tensile strength optimization of different FSW aluminium alloy joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(5–8), 805–814. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6871-2>
- Sivashanmugam, M., Ravikumar, S., Kumar, T., Rao, V. S., & Muruganandam, D. (2010). A review on friction stir welding for aluminium alloys. *Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering - 2010*, 216–221. <https://doi.org/10.1109/FAME.2010.5714839>
- Song, K. H., & Nakata, K. (2010). Microstructural and mechanical properties of friction-stir-welded and post-heat-treated Inconel 718 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 505(1), 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.06.016>
- Sonne, M. R., Tutum, C. C., Hattel, J. H., Simar, A., & de Meester, B. (2013). The effect of hardening laws and thermal softening on modeling residual stresses in FSW of aluminum alloy 2024-T3. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(3), 477–486. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.11.001>
- Tozaki, Y., Uematsu, Y., & Tokaji, K. (2010). A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(6–7), 844–851. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.01.015>
- Tufaro, L. N., Manzoni, I., & Svoboda, H. G. (2015). Effect of Heat Input on AA5052 Friction Stir Welds Characteristics. *Procedia Materials Science*, 8, 914–923. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.152>
- Www, W. :, Singh Sidhu, M., & Chatha, S. S. (2008). International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Friction Stir Welding-Process and its Variables: A Review. In *Certified Journal* (Vol. 9001, Issue 12). www.ijetae.com
- Zhang, Y. N., Cao, X., Larose, S., & Wanjara, P. (2012). Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51(3), 250–261. <https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000015>



A Review of Friction Stir Welding; Process and Its Applications

Ghasem Fallah Daryavarsari

Shahid Beheshti University

Navid Ameri Siahooei

Shahid Beheshti University

Abstract

Friction Stir Welding (FSW) is a solid-state welding process that uses a non-consumable rotating tool for joining various aluminum alloys, castings, and extrusions. It is widely used in industries like aerospace, shipbuilding, railway, and electronics. Additionally, FSW can join other materials like magnesium, titanium, copper, nickel, and steel alloys, even enabling joints between dissimilar metals like aluminum and steel. Compared to traditional arc welding, FSW offers numerous advantages: no cold cracks, porosity, or solidification cracks; reduced distortion and material deformation; no need for filler materials, flux, or shielding gas for aluminum alloys; environmental friendliness; and no smoke, spatter, or ultraviolet radiation. Utilizing machine tool technology, FSW allows for automation, high repeatability, and reduced dependency on skilled welders. This study delves into the stages of FSW welding, its limitations and advantages, the FSW welding tool, the zones formed during welding, and the relevant welding parameters.

Keywords: FSW, Welding, Friction Stir, Joint