

بررسی خوردگی توام با تنش جوشکاری اصطکاک اغتشاشی در ورق‌های آلومینیومی

سید محمد باقر حسینی طباطبایی^۱، محمد آزادی^۲

^۱ دانشجوی مقطع دکتری رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی جامدات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، ایران (نویسنده مسئول)

^۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

چکیده

جوشکاری اصطکاک اغتشاشی غیر هم‌جنس آلیاژهای آلومینیم به صورت لب به لب که عموماً در صنعت برای کاربردهای مختلفی از جمله صنعت کشتی سازی و ساخت بدنه و سازه کشتی ها از این اتصالات در آلیاژهای آلومینیوم استفاده می شود. در این نوشتار به صورت مطالعات کتابخانه ای و از نوع نوشتارهای مروری به بررسی رفتار خوردگی همراه با تنش اتصال بین ورق های از جنس آلیاژهای آلومینیوم سری ۵۰ و ۶۰ که با روش جوشکاری اصطکاک اغتشاشی ایجاد شده، پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد جوش سالم و با استحکام کششی بالا با هندسه پین تریفلوت یا مثلی بدست می آید. مقدار تنش کششی (مقادیر منفی در نمودارها) برای تنش پسماند عرضی (عمود بر جهت جوشکاری) نسبت به تنش پسماند طولی (در راستای جهت جوشکاری) بیشتر می باشد. این تنش کششی پسماند عرضی بر رفتار خوردگی تنش اتصال اثرگذار است.

واژه‌های کلیدی: حداکثر ۱۲ کلمه که با کاما از یکدیگر جدا شده باشند. (فونت: B Nazaini، اندازه فونت ۱۲)

۱. مقدمه

یکی از اهداف اصلی استفاده از آلیاژهای آلومینیوم با چگالی کم، کاهش وزن سازه‌ها در صنایع مختلف است [۱]. همچنین با توجه به عناصر آلیاژی موجود در این گروه از آلیاژهای غیرآهنی و یا در صورت انجام عملیات حرارتی مشخص بر روی آنها، از خواص مکانیکی بالا و مقاومت در برابر خوردگی خوبی برخوردار هستند. آلیاژهای آلومینیوم-منیزیم-سیلیسیم (گروه ۶۰۰۰) و آلومینیوم-منیزیم (گروه ۵۰۰۰) از خواص جوش پذیری خوب و مقاومت در برابر خوردگی و خوردگی تنشی خوبی برخوردار هستند. آلیاژهای آلومینیوم گروه ۶۰۰۰ دارای مقداری سیلیسیم در ترکیب خود هستند که ترکیب بین فلزی Mg_2Si را تشکیل می‌دهند و منجر به بروز پدیده پیرسختی در این گروه از آلیاژها می‌شود. در اتصال آلیاژهای آلومینیوم از روش‌های مختلف جوشکاری از جمله جوشکاری خالت جامد و از روشهای معمول جوشکاری استفاده شده است.

به علت تشکیل لایه‌های ضخیم و پیوسته ترکیبات بین فلزی ترد در جوشکاری ذوبی اتصالات غیرمشابه، اتصالات‌های ایجاد شده دارای کیفیت پایینی هستند. بعلاوه اینکه در روش‌های جوشکاری ذوبی معمول، ایجاد تنش‌های پسماند با وجود اعمال تدابیر کنترل کننده این موضوع و همچنین پروفیل جوش، از جمله عوامل تأثیرگذار بر طول عمر قطعه جوشکاری شده هستند [۴]. عیوبی مثل سوختگی کناره جوش، تخلخل گازی، ترک انجمادی، ترک گرم (به خصوص در گروه آلیاژی ۲۰۰۰ آلومینیوم)، ترک هیدروژنی، نفوذ ناقص ریشه و... در صورت استفاده از فرایندهای جوشکاری ذوبی در محل جوش به وجود می‌آیند که این عیوب در محیط خورنده منجر به کاهش عمر اتصال می‌شوند. حرارت ناشی از جوشکاری سبب بروز تغییر در اندازه دانه ها و یا رسوب بعضی از ترکیبات و فازهای بین فلزی و یا ناخالصی در مرز دانه می‌شود که همگی در کاهش مقاومت به خوردگی آلیاژ نقش بسزایی دارند. در نتیجه رابطه بین میکروساختار، رفتار شیمیایی و خوردگی تحت تنش عامل تعیین کننده‌ای است تا مکانیزم ترک خوردگی تنشی آلیاژهای جوشکاری شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تعیین شود. تاکنون دو مکانیزم تجزیه آندی و تردی هیدروژنی تعیین شده است [۱،۳]. اثر نسبی این مکانیزم بستگی به پارامترهای اصلی یعنی میکروساختار و پتانسیل شیمیایی دارد که باعث ایجاد ترک در این آلیاژ می‌شود. به دلیل وجود ترک خوردگی تنشی، بدست آوردن فاکتور تمرکز تنش از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. ترک خوردگی تنشی، حاصل برهم کنش تنش مختلف و هم افزایی تنش‌های مکانیکی و واکنش‌های خوردگی می‌باشد [۴]. وجود تنش‌های پسماند (حاصل از فرایندهای جوشکاری معمول) نیز می‌تواند در محیط‌های خاص که چنین شکستی خطر به حساب می‌آید، در ترک خوردگی تنشی موثر باشد.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۲ (FSW)، جوشکاری حالت جامد است و به دلیل اینکه فاقد بسیاری از مشکلات جوشکاری ذوبی است، روش مناسبی برای جوش آلیاژهای غیر مشابه می‌باشد. در این روش جوشکاری نیز در صورت انتخاب نادرست پارامترهای جوشکاری عیوبی در جوش ایجاد می‌شود. از جمله این عیوب، عیب تونلی شکل است که در امتداد جوش به صورت سطحی یا زیر سطحی ایجاد می‌شود. بعلاوه در صورت نیروی فورج ناکافی ابزار منجر به بروز عیب در جوش می‌شود. به همین دلیل باید سعی کرد که پارامترهای مناسبی را برای تولید جوش سالم را انتخاب کرد [۷].

این روش جوشکاری در مقایسه با سایر روش‌های معمول جوشکاری، FSW انرژی قابل توجه کمتری را مصرف می‌کند و صرفه جویی در انرژی را در پی دارد. همچنین به دلیل عدم استفاده از گاز محافظ و ماده‌ی مصرفی، FSW فرایندی سبز و دوستدار طبیعت است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط موسسه جوش انگلیس^۳ (TWI) در سال ۱۹۹۱ معرفی شده و در حال حاضر به‌طور گسترده‌ای برای جوشکاری فلزات غیرمشابه مورد استفاده قرار می‌گیرد که توسعه قابل توجهی برای ایجاد

6- Undercut

۱- Friction Stir Welding (FSW)

۲- Offset

اتصال بین فلزهای مختلف در دهه‌های اخیر داشته است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)، تا حد زیادی توانایی جوشکاری آلیاژهای سبک آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم و کامپوزیت‌ها را داراست. با استفاده از اندازه دانه بسیار ریز به دست آمده توسط این روند در قطعه جوش، بهبود در مقاومت کششی و خستگی جوش حاصل می‌شود [۷]. FSW فرایند جوشکاری حالت جامد است که اتصال در زیر نقطه ذوب مواد انجام می‌شود. بنابراین، مشکلات مربوط به انجماد، مانند ترک گرم، تخلخل و شکل‌پذیری کم منطقه ذوب جزئی شده، وجود ندارند. این روش جوشکاری مورد استفاده برای آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا به تولید اتصالات متالورژیکی سالم، بدون اعوجاج و تنش‌های باقیمانده کم که ایجاد این اتصال با روش‌های ذوبی مشکل است، بکار برده می‌شود. علاوه بر این، اتصالات غیرمشابه با ویژگی‌های مختلف متالورژی نیز می‌تواند توسط FSW تولید شوند. به همین علت، FSW به عنوان "تکنولوژی کلیدی" برای ساخت سازه‌ها در صنایع مختلف شناخته شده است.

یکی از موادی که مصرف بالایی در صنایع دریایی (کشتی سازی)، هوایی و ... کاربرد دارد، آلیاژهای آلومینیوم می‌باشد. برآورده کردن نیازهایی خاص همچون استحکام بالا و مقاومت در برابر آسیب‌های مختلف (همچون خوردگی، فرسایش و ...) توسط قطعات ساخته شده از آلیاژهای آلومینیوم گوناگون سبب علاقه به استفاده هر چه بیشتر از این گروه از فلزات غیرآهنی شده است. در کنار آن هزینه ساخت کم و وزن کم آنها نیز این مسئله را با اهمیت می‌کند. با این وجود، به علت قابلیت جوش‌پذیری محدود این آلیاژها، امکان جایگزینی اتصالات جوش داده شده به روش ذوبی این آلیاژها کمی با مشکل روبه‌رو است.

تفاوت میان استحکام و مقاومت به خوردگی فلزات مختلف در اتصالات غیرمشابه باعث بروز مشکلاتی می‌شود. با انتخاب پارامترهای جوشکاری بهینه و در صورت امکان انجام عملیات حرارتی پس از جوش، می‌تواند به عنوان راه حل ممکن برای از بین بردن مناطق کم استحکام در منطقه جوش باشد، که منجر به بهبود عملکرد جوش می‌شود. با این حال، مسئله اصلی مقاومت به خوردگی در اتصالات جوش اصطکاکی اغتشاشی غیر مشابه است. به طور کلی پذیرفته شده است که رفتار خوردگی اتصالات غیرمشابه اساساً به اختلاف پتانسیل ایجاد شده توسط تفاوت بین ترکیب شیمیایی فلزات پایه بستگی دارد. هنوز مشخص نیست که فرایند FSW چگونه بر رفتار خوردگی اتصالات غیرمشابه تأثیر می‌گذارد. تا کنون، مطالعات بسیار کمی درباره رفتار خوردگی اتصالات غیرمشابه FSW وجود دارد. تحقیقات قبلی تنها بر روی رفتار خوردگی ناحیه مرکزی جوش (nugget) و یا مقاومت در برابر خوردگی تنشی اتصالات مذکور پرداخته‌اند. ریزساختار عاملی مهم و تعیین کننده در رقم زدن رفتار این آلیاژ به خوردگی است. بنابراین مشخصات ریزساختاری دقیقی برای روشن کردن مکانیسم خوردگی مورد نیاز است.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باعث تغییرات ریزساختار اولیه شده و بر رفتار خوردگی تأثیرگذار است. در شرایط واقعی، سازه بدنه یک شناور بصورت همزمان در معرض بار مکانیکی ناشی از ضربات امواج آب و خوردگی ناشی از آب دریا است. در حضور محیط خورنده، بار مکانیکی وارد شده به اتصال که ناشی از تنش‌های باقی مانده تولید شده در طی FSW است یا بار وارده در سرویس می‌باشد، می‌تواند منجر به کاهش مقاومت در برابر خوردگی و در نهایت منجر به یک شکست خطرناک و ناگهانی شود. به همین دلیل اتصال غیرمشابه آلیاژهای آلومینیوم می‌بایست در برابر این گونه بارگذاری‌ها مقاوم باشند. بنابراین با توجه به مطالب بالا، سوال کلی که در این پژوهش در پی پاسخ بدان هستیم این است که رفتار خوردگی خستگی در اتصال غیر هم جنس آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۸۳ و ۶۰۶۱ چگونه هست؟

۲. آلیاژ آلومینیوم سری ۶۰

آلیاژهای آلومینیوم عملیات حرارتی پذیر حاوی مقادیری عناصر آلیاژی محلول در خود هستند که مقدار این عناصر آلیاژی بیش از حد حلالیت آنها در حالت جامد است. محلول جامد در دماهای بالا تشکیل شده و ممکن است به دلیل سرعت سرد شدن بسیار بالا در حالت فوق اشباع باقیمانده و منجر به کاهش تشکیل رسوبات شود. فرایند رسوب‌دهی ذرات ریز در دمای اتاق یا دمای بالا کنترل می‌شود و پس از آن به منظور بهبود خواص مکانیکی کوئنچ می‌شود [۶]. استحکام بخشی از طریق رسوب دهی در آلیاژهای آلومینیوم عموماً به دلیل تشکیل فازهای رسوبی است که از لحاظ ترمودینامیکی پایدار هستند. در این پژوهش از آلیاژ آلومینیوم رسوب سخت شونده (گروه ۶xxx) Al-Mg-Si-Cu با نام AA6061 استفاده شده است. خواص

مکانیکی بالا در این گروه از آلیاژهای آلومینیم به دلیل وجود فاز Mg_2Si (β) می باشد. در این گروه از آلیاژها معمولاً مقداری هم مس وجود دارد که رسوبات پیچیده تری را به وجود می آورد. مقدار مس و نسبت منیزیم به سیلیسیم در نوع رسوباتی که به وجود می آیند تاثیرگذار هستند. رسوبات در حضور مس به صورت ورقه ای و لایه شکل (β) هستند.

۳. آلیاژ آلومینیم سری ۵۰

این گروه از آلیاژهای آلومینیم دارای عنصر آلیاژی منیزیم است. از آلیاژ ۵۰۸۳ به دلیل مقاومت به خوردگی عالی عمدتاً در صنایع دریایی، ساختمانی و خودرو سازی استفاده می شود [۲۳]. ترکیبات بین فلزی آلومینیم و منیزیم به صورت پراکنده در مرزخانه های این آلیاژ وجود دارد و این امر آنها را به خوردگی تحت تنش حساس می کند. جوشکاری به صورت حالت مایع منجر به افزایش این ترکیبات بین فلزی شده و پیوستگی آنها در مرز دانه را نیز افزایش می دهد و بالطبع در این شرایط حساسیت به خوردگی تحت تنش افزایش می یابد [۲]. انجام اتصال در حالت جامد به دلیل عدم ایجاد فاز مایع این منجر به این حساسیت نمی شود. افزایش مقدار منیزیم در این گروه از آلیاژهای آلومینیم سبب افزایش ایجاد لایه های پیوسته از ترکیبات بین فلزی ترد آلومینیم-منیزیم می شود که حساسیت به خوردگی تحت تنش را افزایش می دهد. تغییرات ریزساختاری در طی جوشکاری حالت مایع تا منطقه متأثر از حرارت حساسیت به خوردگی در این آلیاژها را نشان می دهد [۳]. ایجاد تنش های کششی اغلب مربوط به فرآیند ساخت، نحوه عملیات حرارتی شرایط بارگذاری و ... است. در مورد ترک ناشی از خوردگی کششی نیز نقش فرآیند ساخت بسیار پررنگ است. یکی از محتمل ترین نواحی ایجاد ترک ناشی از خوردگی، موضع جوش است. قابل ذکر است که تنش پسماند در ناحیه جوش از نوع کششی است و تنش کششی از مهم ترین عوامل اشاعه ترک در قطعات است. بنابراین چند راه برای کاهش تنش پسماند حاصل از جوشکاری و در نتیجه کاهش میزان ترک ناشی خوردگی وجود دارد. اولین راه حل استفاده از انواع جوش هایی است که حرارت و بالطبع تنش پسماند کمتری در قطعه ایجاد می کنند. یکی از انواع این جوش ها، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. راه دیگر برای کاهش تنش های پسماند حاصل از جوشکاری، ایجاد تنش های فشاری در قطعه با استفاده از ساچمه زنی و ... است.

۴. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۴ (TWD) روش جوشکاری حالت جامدی است که در سال ۱۹۹۱ میلادی توسط انجمن جوشکاری انگلستان اختراع و گسترش یافت [۷]. با توجه به مشکلاتی که جوشکاری آلیاژهای آلومینیم و فلزات غیر همجنس با روش های جوشکاری ذوبی به همراه دارند و عیوب ناشی از روش های معمول جوشکاری شامل ترک انجمادی، تخلخل و اعوجاج ناشی از تنش های باقی مانده در قطعه جوش می باشد، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سال های اخیر بسیار مورد توجه و استفاده قرار گرفته است [۱۱]. این روش ابتدا برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیومی که به روش های معمول جوشکاری قابل جوشکاری نیستند یا به سختی جوش داده می شوند به کار برده شده است و سپس برای دیگر مواد و اتصالات غیرمشابه نیز بکار برده شد. البته این دست از آلیاژها به روش جوشکاری مقاومتی^۵ نیز قابل جوشکاری اند که به خاطر تشکیل اکسید مقاوم روی سطح، نیازمند عملیات تمیزکاری سطحی می باشند که به نوبه خود هزینه بر و زمان بر است. به دلیل حرارت ورودی کم در جوشکاری حالت جامد، عیوب ذکر شده برای روش های معمول در این روش دیده نمی شوند و جوش از استحکام خوبی برخوردار است [۷].

۵. اثر حرارت ورودی

در گذشته از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصالات مشابه و امروزه از این روش برای آلیاژهای غیر همجنس استفاده می شود. همچنین در سالهای گذشته بررسی ها در رابطه با ایجاد اتصال بین آلیاژهای آلومینیم-آلومینیم، آلومینیم-منیزیم و بسیاری از ترکیبات دیگر مثل برنج، مس، فولاد کم کربن، فولاد زنگ نزن و تیتانیوم انجام گرفته است [۱۲].

1-The Welding Institute

2-Resistance Welding

در اکثر تحقیقات قبلی انجام شده بر روی اتصال غیر مشابه آلیاژها به روش جوشکاری حالت جامد به تشکیل ترکیبات بین فلزی و تاثیر آن بر روی استحکام اتصال اشاره شده است. وجود ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده Al_3Mg_2 و $Al_{12}Mg_{17}$ در آلیاژهای غیر عملیات حرارتی پذیر و رسوبات Mg_2Si در آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر که کاهش دهنده خواص مکانیکی اتصال هستند در آلیاژهای آلومینیم مشاهده شده است.

در کنار همه‌ی این‌ها هندسه پین ابزار، سرعت چرخش ابزار و سرعت پیشروی در میزان حرارت تولیدی و جریان یافتن مواد مؤثر است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده وسعت منطقه تغییر شکل داده در دو سمت خط مرکزی جوش متفاوت است [۱۶]. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در سمت پیشرونده دما بیشتر است و این سبب می‌شود تا جریان مواد و تغییر شکل پلاستیک بیشتری را در این منطقه داشته باشیم و منطقه تغییر شکل داده‌شده در مقایسه با سمت پسرونده وسیع‌تر باشد.

۶. نحوه قرارگیری آلیاژها بر کیفیت اتصال غیرمشابه

نحوه قرار گیری آلیاژها جهت انجام جوشکاری در بدست آوردن جوش با کیفیت مناسب تاثیر گذار است. بر اساس مطالعات انجام شده، نشان داده شده است که ماده‌ای که در دمای بالا استحکام بیشتری دارد باید در سمت پیشرونده قرار گیرد تا موجب افزایش خواص مکانیکی در اتصالات غیر مشابه شود. دما در قسمت پیشرونده جوش دارای بیشترین میزان است، که بالاترین سرعت تغییر شکل را نیز در این منطقه داریم. همچنین براساس پیشنهاد جرارد و ارستروم، آلیاژ با بیشترین دمای سالیدوس باید در قسمت پیشرونده قرار گیرد، این کار نه فقط به خاطر بهبود کیفیت اتصال بلکه به منظور از بین بردن حفرات و عیوب داخلی که ممکن است در خلاف اینطور ایجاد شوند، انجام می‌شود. [۱۳]

محققین به این نتیجه رسیدند که خواص اتصال ایجاد شده بیشتر وابستگی شدیدی به آلیاژی که در قسمت پسرونده قرار می‌گیرد دارد. به این دلیل که منطقه اغتشاشی در قسمت پسرونده ماهیتی فشرده دارد. از طرف دیگر محققانی نشان دادند که جریان یافتن مواد و کیفیت اتصال، صرف نظر از نحوه قرار گیری آلیاژها در هنگام جوشکاری، بیشتر به شرایط فرایند و اثرات آنها بر حرارت ورودی و دمای منطقه جوش وابسته است. یکی از روش‌ها برای بهبود و جلوگیری از کاهش استحکام در اتصال-های غیرمشابه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، کنترل پلانچ ابزار به درون قطعات در حال جوشکاری است. مقداری که پین ابزار به درون قطعات در حال جوشکاری وارد می‌شود به چگونگی جریان مواد در حین جوشکاری کمک می‌کند. همچنین بر استحکام اتصال نیز تاثیر گذار است [۷].

۷. عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی فرآیند FSW

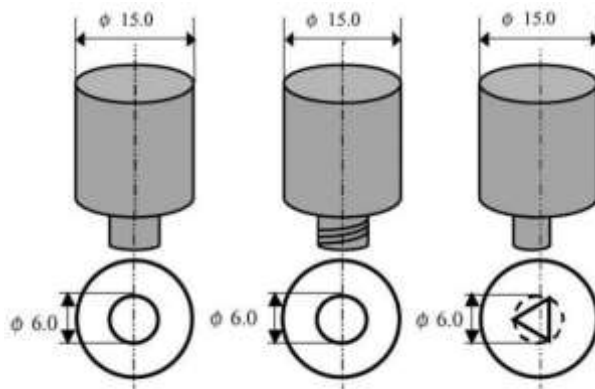
هندسه ابزار

هندسه ابزار نقش مهمی در سیلان مواد ایفا می‌کند و در کنار آن میزان سرعت انتقالی ابزار (سرعت جوشکاری) را مشخص می‌کند. همچنین هندسه ابزار تعیین کننده عرض منطقه جوش نیز می‌باشد. با افزایش مطالعات در زمینه سیلان ماده، هندسه ابزار توسعه روزافزونی پیدا کرده است. تغییرات عنوان شده به کاهش نیروی جوشکاری، سیلان آسان‌تر مواد در حالت پلاستیک و افزایش فصل مشترک پین و مواد در نرم شده و در نتیجه منجر به افزایش حرارت ورودی به قطعه کار می‌شود [۱۹].

ابزارهای مختلفی برای ایجاد آسان‌تر سیلان مواد مختلف طراحی شده است. ابزار با پین رزوه‌دار سیلان بیشتری نسبت به ابزارهای استوانه‌ای بدون رزوه با قطر برابر ایجاد می‌کند. همچنین نیروی جوشکاری در این حالت کاهش یافته، سیلان مواد راحت‌تر صورت می‌گیرد و کیفیت جوش‌ها افزایش می‌یابد. جوشکاری با پین‌های رزوه‌دار باعث افزایش سرعت جوشکاری به میزان بیش از ۱۰۰٪، کاهش نیروی پلانچ اعمالی به میزان ۵۶٪ و عریض شدن منطقه جوش و در نهایت کاهش محدودیت ضخامت می‌شود [۲۲].

درگر محققین [۱۴] اثر هندسه پین و قطر شانه ابزار را بر کیفیت منطقه FSP شده آلیاژ آلومینیوم AA6061 مورد بررسی قرار داده و برای این کار از ۵ نوع هندسه ابزار (استوانه ای ساده، استوانه ای رزوه دار، مخروطی، مثلثی و مربعی) و با قطر شولدرهای متفاوتی برابر با ۱۵، ۱۸ و ۲۱ میلی متر استفاده کردند. نتایج پژوهش نشان می دهد که از میان ۵ پین به کار رفته، پین مربعی و مثلثی ناحیه FSP بدون عیب ایجاد می کند. پژوهشگران تاثیر هندسه ابزار بر خواص جوش FSW را مورد بررسی قرار دادند. طرح پین های به کار رفته در شکل زیر نشان داده شده است. در این پژوهش از سه آلیاژ متفاوت استفاده شد و نتایج نشان داد که برای آلیاژ Al1050-H24 که استحکام تسلیم پایینی، انجام جوشکاری با سرعت پیشروی ۷۰۰/۱۰۰ و سرعت چرخش ابزار ۱۵۰۰-۶۰۰ rpm و استفاده از پین استوانه ای بدون رزوه بهترین خواص مکانیکی را ایجاد می کند [۱۹].

همچنین به منظور جوشکاری آلیاژ Al6061-T6 که مقاومت به تغییر شکل نسبتاً پایینی دارد، با وجود اینکه متغیرهای جوشکاری مطابق با آلیاژ ۱۰۵۰ انتخاب شد، مشاهده شد که شکل پین تاثیر عمده ای در خواص مکانیکی و ریزساختار ندارد. از طرفی جوشکاری آلیاژ Al5083 که مقاومت به تغییر شکل نسبتاً بالایی دارد، قابلیت جوشکاری، مقدار زیادی به سرعت چرخش ابزار وابسته است و در سرعت چرخش بالا (۱۵۰۰ rpm) در صورت استفاده از پین مثلثی بهترین نتیجه حاصل می شود. همچنین برای سرعت چرخش متوسط ۸۰۰ rpm پین استوانه ای بهترین نتیجه را داشته و در سرعت چرخش پایین ۶۰۰ rpm هندسه پین تاثیری بر خواص جوش ندارد.



شکل ۱ شماتیک پین های استفاده شده [۱۵]

در بررسی که محققین بر روی تاثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و هندسه ابزار که شامل ابزار استوانه ای رزوه دار و سه گوش بر روی خواص خستگی اتصال غیر مشابه آلیاژهای آلومینیم ۶۰۶۱ و ۷۰۷۵ انجام دادند، تاثیر رزوه های پین ابزار بر خواص مکانیکی اتصال مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۴].

راست گرد و یا چپ گرد بودن رزوه پین ابزار جوشکاری با ثابت در نظر گرفتن جهت چرخش ابزار (ساعتگرد) بر کیفیت و خواص مکانیکی اتصال ایجاد شده موثر می باشد. در صورتی که جهت چرخش ابزار جوشکاری به صورت ساعتگرد باشد، می بایست که رزوه ها به صورت چپ گرد بر روی پین ایجاد شود تا عمل فورج و برقراری اتصال به خوبی انجام شود.

۸. مقاومت در برابر خوردگی

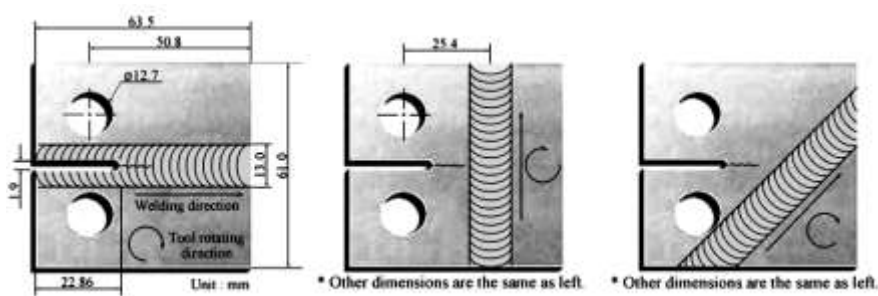
یکی از بارزترین خصوصیات هر سازه دریایی مقاومت سازه نسبت به خوردگی است. بویژه در آب دریا اهمیت این موضوع بیشتر خواهد شد. به همین منظور برای نمونه نرخ خوردگی فولاد ساده کربنی در آب شیرین ۰.۰۵-۰.۱ mm/yr و در آب دریا ۰.۲-۰.۱ mm/yr است [۴]. اما مشکل اصلی در بحث خوردگی این فلز، خوردگی الکتروشیمیایی است که سازنده را ملزم به پوشش دهی سطح سازه به منظور استفاده در آب دریا می کند که موجب افزایش هزینه ساخت می شود.

از مهمترین پدیده‌های مخرب ناشی از خوردگی میتوان به ترک ناشی از خوردگی تنش اشاره کرد. در این پدیده ماده‌ای که رفتاری تغییر شکل پذیر دارد به دلیل خوردگی و وارد آمدن تنش کششی به طور هم زمان، منجر به تغییر رفتار و وقوع شکست ترد می‌شود. بحث تنش‌های کششی اغلب مربوط به فرآیند ساخت، نحوه عملیات حرارتی، شرایط بارگذاری و ... است.

۹. خوردگی تنش در اتصالات فرآیند FSW

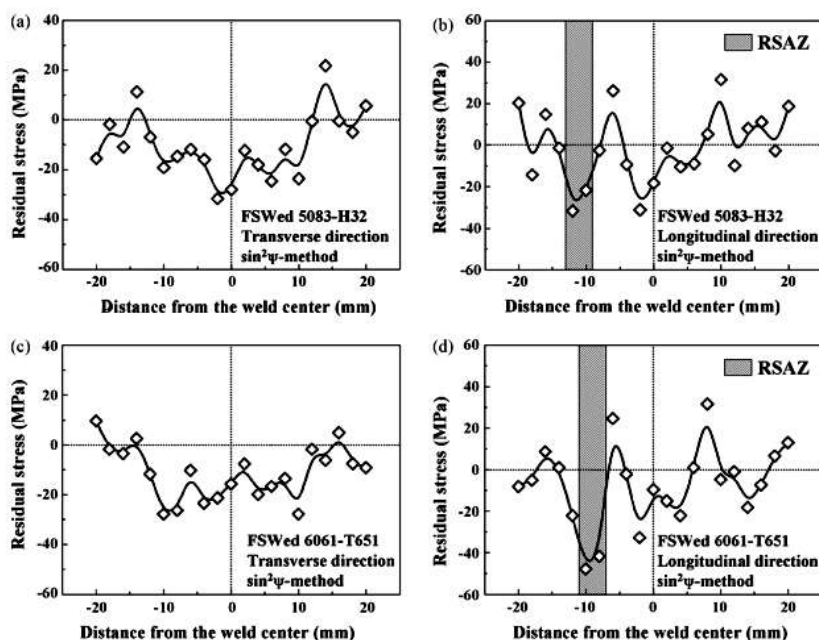
بر خلاف نیاز بخش عملی استفاده از اتصالات جوش اصطکاکی اغتشاشی غیرمشابه آلایه‌های آلومینیم تحت سرویس در شرایط بروز تنش همراه با خوردگی، مطالعات به نسبت کمتری در این زمینه و بررسی رفتار خوردگی تنش این دست از اتصالات انجام شده است. این نکته نیز باید در نظر گرفته شود که در اتصالات FSW با توجه به اینکه در مرکز جوش ریزساختار ریز وجود دارد که بهبود خواص مکانیکی را به دنبال دارد، اما وجود تنش پسماند درون جوش برای مقاومت در برابر خوردگی تنش مناسب نیست [۲۷].

محققین به اندازه‌گیری سرعت رشد ترک خستگی برای آلایه‌های آلومینیم ۵۰۸۳-H32 و ۶۰۶۱-T651 که کارد فراوانی در صنایع حمل و نقل و کشتی رانی دارد، پرداختند. اندازه‌گیری سرعت رشد ترک خستگی در موازات منطقه تبلور مجدد یافته دینامیکی با ΔK های مختلف به ترتیب در نسبت R های مختلف ۰٫۱ و ۰٫۸ و یا در التی دیگر تهیه نمونه جهت انجام آزمایش عمود و یا با زاویه‌ای ۴۵ درجه نسبت به ناحیه تبلور مجدد یافته دینامیکی در نسبت $R=0.1$ انجام شده است [۲۸]. شماتیکی از نحوه تهیه نمونه‌های آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ شماتیکی از نحوه آماده سازی نمونه ها نسبت به ناحیه تبلور مجدد دینامیکی یافته با شرایط مختلف.

نتایج پژوهش این محققین نشان می‌دهد که نتایج رشد ترک خستگی در آلایه‌های آلومینیم به ریزساختار و میزان تنش پسماند موجود در اتصال بستگی دارد. میزان تنش پسماند عرضی و طولی برای اتصالات غیرمشابه ۵۰۸۳-H32 و ۶۰۶۱-T651 در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل مقدار تنش کششی (مقادیر منفی در نمودارها) برای تنش پسماند عرضی (عمود بر جهت جوشکاری) نسبت به تنش پسماند طولی (در راستای جهت جوشکاری) بیشتر می‌باشد. این تنش کششی پسماند عرضی بر رفتار خوردگی تنشی اتصال اثرگذار است [۲۹].



شکل ۳ تغییرات تنش پسماند برای جوش مشابه آلیاژهای ۵۰۸۳-H32 و ۶۰۶۲۱-T651، (a) تنش پسماند عرضی در جوش ۵۰۸۳-H32، (b) تنش پسماند طولی در جوش ۵۰۸۳-H32، (c) تنش پسماند عرضی در جوش ۶۰۶۲۱-T651، (d) تنش پسماند طولی در جوش ۶۰۶۲۱-T651

نتایج این پژوهش نشان داد که سرعت رشد ترک خستگی در نمونه‌های آلیاژهای آلومینیم ۵۰۸۳ و ۶۰۶۱ جوش داده شده به روش FSW در ناحیه تبلور مجدد دینامیکی یافته به طور قابل توجهی در هر دو $R=0.1$ و $R=0.8$ به ازای ΔK های مختلف کمتر از فلز پایه است. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بر اثر اصلاح اندازه دانه ها و ایجاد تنش پسماند فشاری در قطعه جوشکاری شده، سبب کاهش شکست خستگی داخل دانه ای در این آلیاژها می‌شود.

محققین در پژوهشی به بررسی رفتار خستگی اتصالا غیر هم جنس آلیاژهای آلومینیم ۵۰۸۳-H111 و ۶۰۸۲-T651 با ابزاری شمال پین مخروط ناقص و با سرعت چرخش ابزار برابر با ۱۲۵۰ rpm و سرعت پیشروی برابر با ۶۴۰۰۰/۰۰۰۰ پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اتصال مذکور از بازدهی اتصالی برابر با ۶۵٪ برخوردار است. آنها نشان دادند که میزان تغییرات پروفیل میکروسختی در طول اتصال مذکور به حرارت ورودی به جوش وابسته است [۲۶].

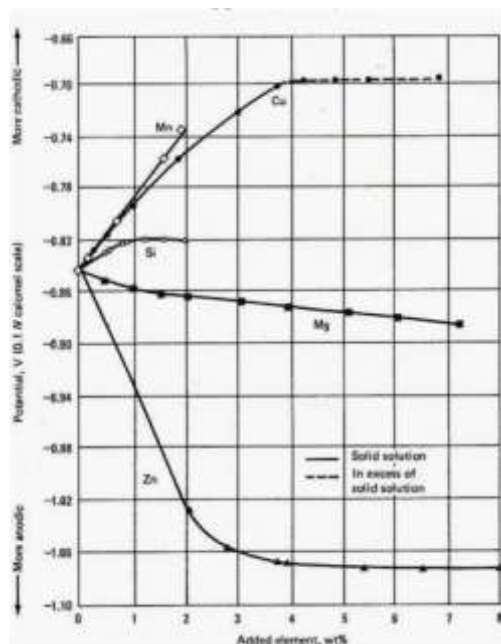
پژوهشگرانی به تعیین حساسیت به ترک خوردگی تنشی در اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیم ۷۰۲۰ در محلول سدیم کلراید نسبت به آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ که کاربرد فراوانی در صنایع کشتی‌سازی دارند، پرداخته است. ترک خوردگی تنشی را با انجام آزمون با سرعت کرنش کم (SSRT) در سرعت‌های 10^{-3} تا 10^{-7} مطابق با EN ISO 7539-7 صورت می‌پذیرد. میروسلاو آزمون SSRT را بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بدون ترک پولیش شده و تمییز در محیط‌های محلول آب نمک ۳،۵٪ و هوا و با سرعت کرنشی برابر با $\dot{\epsilon} = 1.6 \times 10^{-6} S^{-1}$ تا تخریب کامل نمونه‌های آزمون انجام داد. همچنین به میروسلاو به منظور بررسی نتایج حاصل از نمونه های FSW، نمونه‌هایی را نیز با روش MIG تهیه کرده و نتایج ایندو را با هم مقایسه نموده است [۲۷].

نتایج نشان می‌دهد که آلیاژ آلومینیم ۷۰۲۰ نسبت به آلیاژ ۵۰۸۳ در محیط محلول آب نمک مقاومت بیشتری در برابر خوردگی تحت تنش از خود نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که تفاوتی میان نتایج بدست آمده از نمونه‌های FSW در محیط محلول آب نمک و هوا وجود ندارد. تنها تفاوت برای این دو نمونه کاهش ۲،۷٪ ازدیاد طول آلیاژ ۷۰۲۰ آزمایش شده در محلول آب نمک نسبت به نمونه آزمایش شده در هوا می‌باشد. بعلاوه اینکه کمترین کاهش در کاهش سطح مقطع و انرژی شکست ($KE = 0.77\%$) در نمونه‌های آزمون FSW بست آمده است. بر عکس تفاوت زیادی بین نتایج در محیط‌های مختلف برای نمونه‌های جوش MIG وجود دارد. بیشترین مقاومت در برابر ترک خوردگی تنشی برای آلیاژهای ۷۰۲۰ و ۵۰۸۳ جوشکاری شده به روش FSW بدست می‌آید. همچنین برای آلیاژ ۵۰۸۳ جوشکاری شده به روش FSW، تفاوتی در مقدار ازدیاد طول آن در محیط آب نمک و هوا وجود ندارد. در صورتیکه برای همین آلیاژ جوشکاری شده به روش MIG، اختلاف ۰،۷٪ در مقدار ازدیاد طول نمونه‌های آن مشاهده می‌شود. برای آلیاژ ۷۰۲۰ نیز، مقاومت در برابر ترک خوردگی تنشی در صورت جوشکاری با FSW خیلی بیشتر از روش MIG می‌باشد.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با تغییر شکل پلاستیکی در دمای بالا همراه می‌باشد بنابراین امکان تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه جوش وجود دارد [۱۹] تبلور مجدد دینامیکی ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم به دلیل دارا بودن انرژی نقص در چیده شدن بالا از نوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته می‌باشد [۴، ۷]. بررسی اثر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر دانه‌های تبلور مجدد دینامیکی به وسیله پژوهشگران متعددی بررسی شده است. بررسی های دیگر محققین مشخص کرد که هندسه پین با تاثیرگذاری بر حرارت ورودی جوشکاری سبب تغییر در اندازه دانه‌های ناحیه جوش و اطراف ناحیه جوش می‌شود [۲۴].

۱۰. تاثیر عناصر آلیاژی بر پتانسیل خوردگی آلیاژهای آلومینیم

رفتار خوردگی در آلیاژهای آلومینیم وابسته به عناصر آلیاژی افزوده شده به آن است. در محلول جامد موجود ر آلیاژ آلومینیم، عناصر موجود در محلول جامد تعیین کننده پتانسیل خوردگی آلیاژ است. اضافه کردن عناصر آلیاژی غیر فعال نسبت به خود آلومینیم به آلیاژ آلومینیم سبب افزایش پتانسیل خوردگی آلیاژ می شود و برعکس، اضافه کردن عناصر فعال تر از آلومینیم به آلیاژ سبب کاهش پتانسیل خوردگی آلیاژ می شود. شکل ۴ تاثیر افزودن عناصر آلیاژی اصلی به آلومینیم بر رفتار خوردگی آنرا نشان می دهد [۲۳]



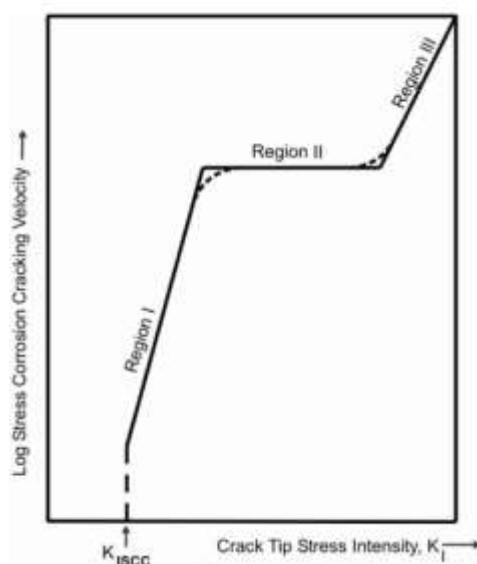
شکل ۴ پتانسیل خوردگی اندازه گیری شده در محلولی با شرایط $53\text{ g/l NaCl} + 3\text{ g/l H}_2\text{O}_2$ در دما 25°C و سرعت همزدن 200 rpm در محیط های مختلف را نشان می دهد [۲۴].

جدول ۱ پتانسیل خوردگی ترکیبات موجود در آلیاژ آلومینیم

Second phase	Corrosion potential (mV _{SCE})	Environment	Aeration
Si	-170	53 g/l NaCl + 3 g/l H ₂ O ₂	Open to air
Al ₂ Ni	-430	53 g/l NaCl + 3 g/l H ₂ O ₂	Open to air
Al ₂ Cu	-440	53 g/l NaCl + 3 g/l H ₂ O ₂	Open to air
Al ₃ Cu	-760	1.0 M NaCl	N ₂ sparged
Al ₃ Fe	-650	0.1 M NaCl	Air sparged
Al ₆ Mn	-760	53 g/l NaCl + 3 g/l H ₂ O ₂	Open to air
Al ₂ MgCu	-890	1.0 M NaCl	Open to air
Al ₂ MgCu	-910	53 g/l NaCl + 3 g/l H ₂ O ₂	Open to air
MgZn ₂	-960	53 g/l NaCl + 3 g/l H ₂ O ₂	Open to air
Al ₃ Mg ₂	-1150	53 g/l NaCl + 3 g/l H ₂ O ₂	Open to air
Al ₆ (FeMn)Si	-1200	0.1 M NaOH	Deaerated
Al ₈ Mg ₅	-1050	1.0 M NaCl	N ₂ Sparged

۱۱. ترک خوردگی تنش

شکست یک آلیاژ که با قرارگرفتن همزمان در یک محیط خورنده و تحت تنش‌های کششی استاتیکی رخ می‌دهد را ترک خوردگی تنش (Stress corrosion cracking (SCC)) می‌نامند [۱۸]. مطالعاتی زیادی بر روی SCC در آلیاژهای استحام بالای آلومینیوم انجام شده است که همگی نشان می‌دهد که این شکست به صورت بین دانه ای در این آلیاژها رخ می‌دهد [۲۲]. در نهایت، دو نظریه اساسی به این منظور ارائه شده است. اولین تئوری بیان می‌کند که SCC مناطق مرزی دانه‌ای تحت محیط خورنده و حاوی تنش به صورت ناحیه‌های انحلال یافته آندی عمل می‌کنند. نظریه دوم بیان می‌کند که به دلیل ورود عناصر ناخالصی (معمولاً هیدروژن اتمی) به داخل آلیاژ، ایجاد تردی و کاهش شکل پذیری رخ می‌دهد و سبب شکست بین دانه ای می‌شود [۲۵]. تعیین چقرمگی شکست (K_{IC}) و مکانیزم رشد ترک خوردگی تنش اینطور بیان می‌شود که بر روی نمونه‌ای ترک ایجاد شده و آزمون SCC انجام و مقدار چقرمگی شکست حاصل می‌شود. شکل ۵ نشان می‌دهد که سرعت رشد ترک تابعی از فکتور شدت تنش (K) در نوک ترک است.



شکل ۵ شماتیک چگونگی رشد ترک خوردگی تنش در ارتباط با فاکتور شدت تنش (K) در نوک ترک.

منحنی موجود در شکل سرعت رشد ترک در SCC را مشخص می‌کند و K_{ISCC} تعیین کننده آستانه لازم برای رشد ترک خوردگی تنش می‌باشد. همانطور که نمودار نشان می‌دهد شامل سه مرحله است، در مرحله اول زمانی که K بزرگتر از K_{ISCC} با افزایش فکتور شدت تنش در نوک ترک، سرعت ترک افزایش شدید و آنی دارد. در مرحله دوم، سرعت رشد ترک وابسته به چگونگی رسیدن محلول خورنده به نوک ترک است و به نوعی سرعت رشد ترک به فاکتور شدت تنش در نوک ترک وابسته است. در مرحله سوم، سرعت رشد ترک به صورت مکانیکی کنترل می‌شود و K به مقدار چقرمگی شکست (K_{IC}) نزدیک می‌شود. در مورد آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا معمولاً مناطق ۱ و ۲ مشاهده می‌شود ولی منطقه ۳ وجود ندارد [۲۶]. همچنان SCC ممکن است در تنش‌هایی برابر با تنش تسلیم آلیاژ رخ دهد. در صورتی که تنش‌ها به صورت عرضی رخ دهند، آنگاه SCC در تنش‌های کمتری روی می‌دهد. همچنین SCC می‌تواند به غیر از محیط خورنده در محیط رطوبت‌دار نیز انجام شود. به دلیل وقوع شکست که در آلیاژهای آلومینیوم به صورت بین دانه‌ای رخ می‌دهد، ریزساختار در طول مرز دانه‌ها نقش مهمی در تعیین حساسیت به SCC را بر عهده دارند. در آلیاژهای کار شده معمولاً ترک در طول مرز دانه‌ها رشد می‌کند.

در آلیاژهای نورد شده، زمانیکه تنش به صورتی عرضی و با به صورت عمود بر جهت نورد وارد شود، ترک در جهت نورد اشاعه می‌یابد.

در مورد آلیاژهای آلومینیم، SCC معمولاً در گروه ۲۰۰۰ و ۷۰۰۰ و در گروه ۵۰۰۰ برای آلیاژهایی که درصد منیزیم آنها بیشتر از ۳ درصد است، رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که SCC در گروه ۶۰۰۰ به ندرت روی می‌دهد. همچنین در گروه‌های ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ با منیزیم کمتر از ۳ درصد، SCC رخ نمی‌دهد [۲۱]

۱۲. خوردگی در اتصالات غیرمشابه FSW آلیاژهای آلومینیم

مطالعات کمی در ارتباط با رفتار خوردگی اتصالات غیر مشابه آلیاژهای آلومینیم ایجاد شده با جوشکاری اصطکاکی اغتشای انجام شده است. محققان به بررسی رفتار خوردگی اتصال غیرمشابه آلیاژهای ۲۰۲۴ و ۷۰۱۰ پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگر محیط خورنده حاوی یون کلر باشد، در شکست در ناحیه اغتشاشی و از سمت آلیاژ ۷۰۱۰ رخ داده است [۱۴].

۱۳. ریز ساختار اتصالات

ریز شدن دانه‌ها در منطقه اغتشاشی به دلیل وقوع تغییر شکل پلاستیک شدید و بروز پدیده تبلور مجدد دینامیکی شدید است. در این منطقه چگالی بالایی از نابجایی‌ها وجود دارد. بعلاوه ریز شدن دانه سبب بهبود خواص مکانیکی اتصال می‌شود. منطقه اغتشاشی تحت دمایی بالاتر از دمای تبلور مجدد و کمتر از دمای ذوب فلز قرار می‌گیرد. که تحت این حرارت و کرنش پلاستیک شدید ایجاد شده از ابزار، تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد و دانه‌هایی ریز و هم‌محور به وجود می‌آید. این اغتشاش که تبلور مجدد و ریز شدن دانه‌ها رو به دنبال دارد خود تحت تاثیر سرعت چرخش ابزار، سرعت جوشکاری و هندسه ابزار است که در تعیین میزان کرنش پلاستیک و دما تاثیرگذار هستند، قرار دارد.

در کنار آن TMAZ را داریم که تغییر شکل در آن به حدی نیست که پدیده تبلور مجدد دینامیکی رخ دهد و فقط دانه‌ها تحت تاثیر افزایش دما آن هم کمتر از دمای مرکز جوش و تغییر شکل جزیی، کمی تغییر جهت یا کشیدگی در جهت اعمال نیرو به سمت پایین ورق در آن مشاهده می‌شود.

از دلایل عدم بروز تبلور مجدد در TMAZ یکی دمای کم این منطقه نسبت به دمای تبلور مجدد است و دیگری، کم بودن میزان کرنش ایجاد شده در این منطقه نسبت به مقدار انرژی کرنشی مورد نیاز برای بروز پدیده تبلور مجدد دینامیکی است [۱۸]. حرارت ایجاد شده باعث می‌شود تا کمی ساختار نابجایی‌ها تحت تاثیر این حرارت تغییر کند و کمی رشد دانه را در این منطقه داشته باشیم. همچنین باز شدن قفل نابجایی‌ها و کاهش چگالی آنها در این منطقه نسبت به فلز پایه و رشد دانه در این منطقه باعث می‌شود تا کاهش استحکام و سختی نسبت به فلز پایه در این منطقه رخ دهد.

به علت تفاوت در حرکت چرخشی ابزار و انتقالی آن در دو سمت پیشرونده و پسرونده، منطقه TMAZ در سمت پیشرونده نسبت به سمت پسرونده مشخص‌تر است، که این موضوع در تصاویر میکروساختار از مقطع عرضی جوش‌ها قابل مشاهده است. به نوعی می‌توان گفت که منطقه TMAZ تغییر شکل ناشی از عبور ابزار را تحمل می‌کند ولی میزان گرما و کرنش پلاستیک کمتری نسبت به منطقه اغتشاش مرکز جوش متحمل می‌شوند. همچنین با توجه به مطالعات صورت گرفته از قبل نسبت ω/v به عنوان مبنایی از مقدار حرارت ورودی در طی جوشکاری تعریف می‌شود که با افزایش مقدار این کسر میزان حرارت افزایش می‌یابد و با کاهش آن حرارت ورودی کاهش می‌یابد [۱۸].

۱۴. نتیجه گیری

(۱) طبق نتایج دیگر محققین بررسی سطح مقطع عرضی جوش‌ها نشان می‌دهد به علت اینکه نزدیک به ۹۰ درصد از حرارت جوشکاری از تماس شولدر با قطعات ایجاد می‌شود، لذا با انجام جوشکاری بر روی ورق‌های آلومینیوم، تغییری در نوع سیلان مواد در جوش به چشم نمی‌خورد.

(۲) هندسه پین تاثیر زیادی بر روی سیلان مواد را خواهد داشت.

- (۳) نتایج مطالعات نشان داد که در میان هندسه پین‌های به کار برده شده در پژوهش‌های مختلف، نتایج آزمون کشش برای جوش‌های ایجاد شده با هندسه پین تریفلوت بیشتر از جوش‌های ایجاد شده با هندسه پین استوانه‌ای است.
- (۴) سطح شکست در پژوهش‌های مختلف در جوش‌های اصطکاکی آلومینیوم حاوی دیمپل‌های ریز و درشت است که شکست به صورت بین دانه‌ای و نرم رخ داده است.
- (۵) راست گرد و یا چپ گرد بودن رزوه پین ابزار جوشکاری با ثابت در نظر گرفتن جهت چرخش ابزار (ساعتگرد) بر کیفیت و خواص مکانیکی اتصال ایجاد شده موثر می باشد. در صورتی که جهت چرخش ابزار جوشکاری به صورت ساعتگرد باشد، می بایست که رزوه‌ها به صورت چپ گرد بر روی پین ایجاد شود تا عمل فورج و برقراری اتصال به خوبی انجام شود.
- (۶) مقدار تنش کششی (مقادیر منفی در نمودارها) برای تنش پسماند عرضی (عمود بر جهت جوشکاری) نسبت به تنش پسماند طولی (در راستای جهت جوشکاری) بیشتر می باشد. این تنش کششی پسماند عرضی بر رفتار خوردگی تنش‌ی اتصال اثرگذار است.

منابع و مراجع

1. Mathers, "The welding of aluminium and its alloys. Woodhead publishing limited. Sbington hall", Abington Cambridge CB1 6AH, ISBN, Vol. 1 pp. 85573-567 9, 2000.
2. Metals Handbook, 9th Ed., Corrosion Vol. 13, Metals Park, OH, ASM Int. 1987.
3. Kutz, M., "Handbook of Materials Selection," 2002
4. Localized Corrosion and Stress Corrosion Cracking Resistance of Friction Stir Welded Aluminum Alloy 5454
5. Rattana Borrisutthekul, Yukio Miyashita, Yoshiharu Mutoh, "Dissimilar material laser welding between magnesium alloy 6061 and aluminum alloy A5052-O", Science and Technology of Advanced Materials, 199-204, 2005.
6. Panteli, J.D. Robson, I. Brough, P.B. Prangnell, "The effect of high strain rate deformation on intermetallic reaction during ultrasonic welding aluminium to magnesium", Materials Science & Engineering A, 556, 31-42, 2012.
7. Mishra, R.S., Ma, Z.Y. "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering, R 50, 1-78, 2005.
8. Dubourg, L., Merati, A., Jahazi, M., "Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin", Materials and Design, 31, 3324-3330, 2010.
9. Fersini, D., Pirondi, A., "Analysis and modelling of fatigue failure of friction stir welded aluminum alloy single-lap joints", Engineering Fracture Mechanics, 75, 790-803, 2008.
10. Mofid, M.A., Abdollah-zadeh, A., Malek Ghaini, F., "The effect of water cooling during dissimilar friction stir welding of Al alloy to Mg alloy", Materials and Design, 36, 161-167, 2012.
11. Sarsilmaz, F., Ozdemir, N., Kırık, I., "Evaluation of microstructure and fatigue

- properties of dissimilar AA7075/AA6061 joints produced by friction stir welding”, Kovove Mater, 50, 259–268, 2012.
۱۲. Sato, Y., Park, S., Michiuchi, M., Kokawa, H. “Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys”, Scripta Materialia, 50, 1233–1236, ۲۰۰۴.
۱۳. William F. Smith; structure and properties of Engineering material, 1987.
۱۴. Chen, Y.C., Nakata, K., “Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys”, Scripta Materialia, 58, 433–436, 2008.
۱۵. H. Fujii et al. “ Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys”. Materials Science and Engineering A 419 (2006) 25–31, 2005 .
۱۶. Cavaliere, P., Panella, F., “Effect of tool position on the fatigue properties of dissimilar 2024-7075 sheets joined by friction stir welding”, materials processing technology, 206, 249–255, 2008.
۱۷. D’Urso, G., Giardini, C., “The influence of process parameters and tool geometry on mechanical properties of friction stir welded aluminum lap joints”, Material Forming, ۳, ۱۰۱۱–۱۰۱۴, ۲۰۱۰.
۱۸. H. Bisadi, A. Tavakoli, M. Tour Sangsaraki, K. Tour Sangsaraki, “The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints”, Materials and Design, 43, 80–88, 2013.
۱۹. R. Nandan, T. Debroy, H. K. D. H. Bhadeshia, “Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties”, Progress in Materials Science, 53, 980-1023, 2008.
۲۰. P. Bahemmat, M.K. Besharati Givi, K. Reshad Seighalani, “The Influence of Welding Speed on Microhardness and Microstructure in Dissimilar Friction Stir Welded of AA6061-T6 and AA7071-T6”, The International Institute of Welding (IIW) Congress Welding & Joining, 397-402, 2009.
۲۱. Honarbakhsh-Raouf, H.R. Ghazvinloo, N. Shadfar, “Influence of Friction Stir Welding Variables on Hardness, UTS and Yield Strength of Joints Produced in SSM Cast A356 Aluminum Alloy”, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, ۳۰۱۰–۳۰۱۵, ۲۰۱۰.
۲۲. Hajjari, E.; Divandari, M.; Razavi, S.H.; Emami, S.M.; Homma, T.; Kamado, S. Dissimilar joining of Al Mg light metals by compound casting process. J. Mater. Sci, ۴۶, ۶۴۹۱–۶۴۹۹, ۲۰۱۱.
۲۳. -Y.M. Hwang, Z.W. Kang, Y.C. Chiou, H.H. Hsu, "Experimental study on Temperature Distributions within the
۲۴. Work piece During Friction Stir Welding of Aluminum alloys". International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48, pp778-787, 2008.
۲۵. P. Cavaliere, F. Panella, "Effect of Tool Position on the Fatigue Properties of Dissimilar 2024-7075 Sheets joined by friction stir welding". Journal of Materials Processing Technology, 206, pp249-255, 2008.

۲۶. P. Cavaliere, R. Nobile, F. Panella, W. Squillace, A." Mechanical and Microstructural Behavior of 2024-7075
۲۷. Aluminum alloy Sheets Joined by Friction Stir Welding". International Journal of Machine Tools and Manufactur , pp588-594, 2006.
۲۸. K. Elangovan, V. Balasubramanian, "Influences of Pin Profile and Rotational Speed of the Tool on the Formation of Friction Stir Processing Zone in AA2219 Aluminum alloy". Materials Science and Engineering A, 459, pp7-18, ۲۰۰۷,
۲۹. C. Jonckheere, B. D. Meester, A. Denquin & A. Simar, "Torque, temperature and hardening precipitation evolution in dissimilar friction stir welds between 6061-T6 and 2014-T6 aluminum alloys" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, pp. 826-837, 2013.