Archive of SID

بررسی تاثیر هندسه ابزار بر خواص مکانیکی و شکل گیری عیوب رایج در اتصال لبه روی هم آلیاژهای آلومینیوم در فرآیند جوشکاری هم زن اصطکاکی

محمدرضا نادری[۱]*، محمدعلی صفرخانیان[۲]، امیرحسین کوکبی[۳]، امین عبداله‌زاده[۴]

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مواد، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، مجلسی، اصفهان، ایران

۳- استاد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۴- دکترا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

*Mohammadreza.k2006@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۵)

چکیده

در این پژوهش، اثر هندسه ابزار برخواص مکانیکی و ریز ساختار جوش هم زن اصطکاکی آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ که به دو صورت آنیل شده و کار سرد شده مورد استفاده قرار گرفته اند، بررسی شد. نمونه ها با سه پین مخروطی ناقص، مخروطی ناقص با سه شیار عمودی (تری فلوت) و مخروطی ناقص پله دار (با سرعت های دورانی ۶۵۰ و ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت جوشکاری ۲۵ و ۵۰ میلی متر بر دقیقه) جوشکاری شدند. سپس، این نمونه ها تحت آزمون های کشش برشی و ریز سختی سنجی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که ابزاری مناسب است که سیلان بهتری ایجاد کند، به نحوی که بتواند عیوب رایج در اتصال لبه روی هم را بهینه کند. بر این اساس، پین تری فلوت را می توان به عنوان ابزار بهینه در نظر گرفت، زیرا نمونه های جوشکاری شده با این پین دارای بالاترین نیروی شکست بوده و نیرویی بیش از ۲۰۰۰۰ نیوتن را تحمل کرده اند که این میزان نیرو از استحکام کششی ورق آلومینیوم ۵۴۵۶ آنیل شده بیشتر است و به همین دلیل نمونه ها از سمت این فلز پایه دچار شکست شده اند.

واژه‌های کلیدی:

فرآیند جوشکاری هم زن اصطکاکی ، آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶، اتصال لبه روی هم، هندسه ابزار.

۱- مقدمه

فرآیند جوشکاری هم زن اصطکاکی در سال ۱۹۹۱ در موسسه جوشکاری انگلستان به عنوان یک روش حالت جامد اختراع شد و در ابتدا برای آلیاژهای آلومینیوم بکار گرفته شد. مزایای ویژه این فرآیند سبب استفاده گسترده آن در صنعت شده است، به گونه ای که پس از معرفی این روش به عنوان فرآیند تولیدی جهت اتصال دهی آلیاژهای سبک مانند آلومینیوم، نسبت تقاضا به عرضه محصولات پایه، همانند ورق و شمش، به شدت افزایش یافته و حتی منجر به افزایش قیمت آلومینیوم شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

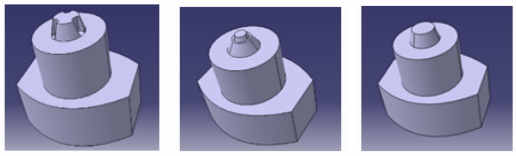
طبق پیش بینی کارشناسان، در دهه آتی این فرآیند جایگزین بسیاری از فرآیندهای جوشکاری ذوبی و حتی مقاومتی در صنعت خواهد شد. این فرآیند یکی از تجاری ترین و با صرفه ترین فرآیند جوشکاری در صنایع هوایی است که در سال های اخیر اختراع شده است، لذا شرکت های بزرگ تولیدی حجم بالایی از بودجه های تحقیقاتی خود را جهت بررسی این فرآیند به دانشگاه ها سرازیر کرده اند[۱-۴].

جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیوم به دلیل ساختار دندریتی، امکان ایجاد ترک گرم و تخلخل در ناحیه ذوب همواره با افت خواص مکانیکی در ناحیه اتصال مواجه بوده است اما از آنجایی که این فرآیند یک فرآیند حالت جامد است، مشکلات رایج در جوشکاری فرآیندهای ذوبی را ندارد، بدین جهت برخی این فرآیند را جوش دهنده جوش ناپذیرها نامیده اند[۵-۷].

این فرآیند نقش کلیدی در اتصال آلیاژهای آلومینیوم گروه ۲۰۰۰، ۵۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۷۰۰۰ و همچنین آلیاژهای مس، منیزیم، تیتانیم و فولاد دارد[۸-۱۰]. اگرچه دمای قطعات در این فرآیند بالا می‌رود ولی به نقطه ذوب نمی‌رسد، بنابراین جوش از سلامت بالایی برخوردار می‌باشد[۱۱-۱۳]. این فرآیند در صنایعی مانند هوافضا، کشتی سازی، خودرو، ساخت مخازن تحت فشار، ساخت لکوموتیو، واگن ها و لوله ها به کار گرفته می‌شود[۵]. هندسه ابزار از جمله کلیدی ترین و محرمانه ترین موارد در طراحی و توسعه جوشکاری هم زن اصطکاکی است، به طوری که بسیاری از محققین مایل به افشای اطلاعات ابزاری خود نیستند. هندسه ابزار و تقابل ابزار- مواد، انرژی ورودی به جوش (گرمای ورودی یا نیروی اصطکاکی) را تعیین می کند که این امر تاثیر مستقیم بر مشخصات جوش مانند تنش باقیمانده، خواص مکانیکی و عملکرد خستگی دارد.

۲- روش تحقیق

ورق هایی که در این تحقیق مورد استفاده قرارگرفتند، از جنس آلومینیوم ۵۴۵۶ به صورت کار سرد شده و آنیل شده و همچنین با ضخامت متفاوت بودند که به صورت طرح اتصال لبه روی هم (با سرعت های دورانی ۶۵۰ و ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت های پیشروی ۵۰ و ۲۵ میلیمتر بر دقیقه) تحت جوشکاری قرارگرفتند. سه شکل پین بکار رفته در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. هر سه پین رزوه دار بودند و قطر شانه[۱] بکار رفته برای هر سه پین ۲۰ میلی متر بوده است.



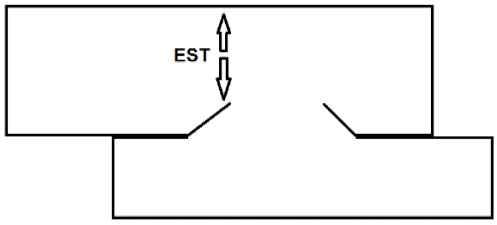
شکل (۱): طرح پین بکار رفته از چپ به راست (مخروطی ناقص- مخروطی ناقص پله دار – تری فلوت)

جهت مطالعه سطح مقطع جوش به صورت ماکرو و میکرو، یک برش عرضی به صورت عمود بر جهت جوشکاری به قطعات جوشکاری شده زده شد و سطح مقطع جوش پولیش و اچ گردید و مطالعات ریز ساختاری با میکروسکوپ های نوری و الکترونی بر روی نمونه ها انجام شد. سپس، میزان ضخامت موثر ورق[۲](EST) و عرض موثر مرکز جوش با استفاده از نرم افزار SIS اندازه گیری شد تا اثرات میزان عیوب هوک و نقص پیوند تماسی بر روی استحکام جوش مورد مطالعه قرار گیرند. شکل۲ میزان ضخامت موثر ورق اندازه گیری شده را به صورت طرح واره نشان می دهد. منظور از عرض موثر مرکز جوش بخشی از دکمه جوش است که تغییر شکل پلاستیک در فصل مشترک دو ورق در آن قسمت به خوبی صورت گرفته است و در نتیجه نقص پیوند تماسی[۳] در آن ناحیه دیده نمی شود. ضخامت موثر ورق نیز، کوچکترین فاصله بین فصل مشترک اتصال نیافته و بالای ورق بالایی (پائین ورق پائینی) می باشد. عیب هوک نیز هنگامی که فصل مشترک اتصال به سمت ورق بالایی اختلاط پیدا کند دیده می شود. بعد از جوشکاری، نمونه ها برای انجام تست کشش برشی براساس استاندارد AWS D17.3 تهیه شدند و تحت آزمون مکانیکی کشش برشی قرار گرفتند. در انتها، از

www.SID.ir

Archive of SID

نمونه های جوشکاری شده آزمون ریزسختی سنجی گرفته شد و سختی نواحی مختلف جوش مورد بررسی قرار گرفت.



شکل (۲): شماتیک ضخامت موثر ورق اندازه گیری شده با استفاده از نرم افزارSIS

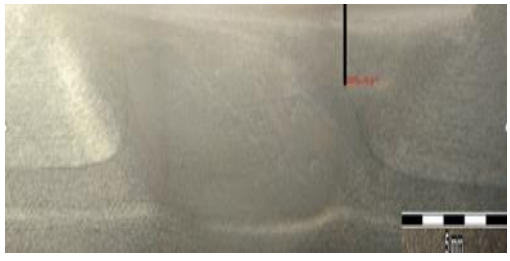
۳- نتایج و بحث

عیب هوک و نقص پیوند تماسی از عیوب رایج در فرآیند جوشکاری هم زن اصطکاکی و در اتصال لبه روی هم، محسوب می‌شوند. این دو عیب تاثیرات زیادی بر روی استحکام جوش می‌گذارند. عیب هوک هنگامی که فصل مشترک اتصال به سمت ورق بالایی و پائینی اختلاط پیدا کند، دیده می‌شود. به وجود آمدن چنین شکافی خواص مکانیکی را از طریق ایجاد مکان مستعد برای شروع ترک کاهش می‌دهد و سبب شکست پیش از موعد جوش می‌گردد. نقص پیوند تماسی باقی مانده فیلم اکسیدی موجود بر سطح قطعه کار می‌باشد که به علت تغییر شکل ناکافی در فصل مشترک دو ورق، شکسته نشده و در دکمه جوش باقیمانده است.

ارتفاع عیب هوک، هم تراز با متغیر ضخامت موثر ورق است، از آنجا که در این پژوهش سیلان عمودی مواد در دکمه جوش به سمت بالا می باشد، پس می توان ضخامت موثر ورق را از طریق کم کردن ارتفاع عیب هوک از ضخامت کل ورق بالایی به دست آورد. هرچه یک پین بیشتر قادر به کنترل این دو عیب در این فرآیند باشد، آن پین مناسب تر خواهد بود و نمونه های جوشکاری شده با آن، از استحکام بالاتری برخوردار خواهند بود.

کنترل و بهینه کردن عیب هوک به این معناست که در اتصال لبه روی هم با ضخامت های متفاوت بر خلاف اتصال سر به سر، وجود هوک به میزانی که بتواند باعث یکسان شدن ضخامت موثر دو ورق شود، می‌تواند باعث بهبود خواص مکانیکی شود. در واقع این میزان هوک بهینه باعث افزایش ضخامت ورق پائینی (که قبل از جوشکاری ضخامت کمتری داشته است) و کاهش ضخامت ورق بالایی (که قبل از جوشکاری ضخامت بیشتری داشته است) می شود و در نتیجه، سطح مقطعی از جوش که تنش کششی وارده را باید تحمل کند، در هر دو ورق یکسان خواهد شد.

در این پژوهش، مجموع ضخامت ورق بالایی و پائینی که تحت جوشکاری قرار گرفته، حدود ۷,۵ میلی متر است. بنابراین EST ایده آل در این حالت نصف این ضخامت یعنی ۳,۷۵ میلی متر است. ارتفاع هوک در نمونه های جوشکاری شده با پین مخروطی ناقص زیاد است، زیرا مواد تغییر شکل یافته به کمک رزوه ها که عامل اصلی سیلان عمودی هستند، به سمت بالا کشیده می‌شوند. این ارتفاع هوک زیاد، سبب نازک شدن بیش از حد ورق بالایی و در نتیجه کاهش سطح تحمل بار اعمالی می‌گردد. بنابراین در نمونه های جوشکاری شده با این پین، شکست از فلز جوش رخ می دهد. شکل ۳ درشت ساختار یکی از نمونه های جوشکاری شده با این پین را نشان می‌دهد.



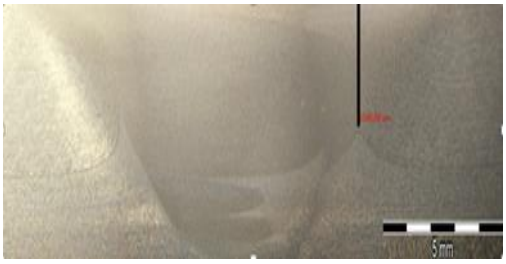
شکل (۳): درشت ساختار نمونه جوشکاری شده با پین مخروطی ناقص

در نمونه های جوشکاری شده با پین مخروطی ناقص پله دار، دو الگوی سیلان مشاهده می گردد. در حرارت های ورودی بالا[1] (سرعت دورانی بالا و سرعت جوشکاری پائین)، وجود پله در فصل مشترک دو ورق، باعث کاهش سیلان عمودی ماده و به تبع آن کاهش ارتفاع هوک شده است ولی همچنان میزان EST به حد مطلوب نرسیده است و برای رسیدن به حد مطلوب، نیاز

www.SID.ir

Archive of SID

به کاهش بیشتر سیلان عمودی ماده به سمت بالا است. در نتیجه، در این حالت شکست نمونه از فلز جوش رخ داده است. در واقع وجود پله، پیوستگی رزوه ها که عامل اصلی سیلان عمودی مواد به سمت بالا هستند را متوقف می‌کند. شکل ۴ درشت ساختار این نمونه جوشکاری شده تحت سرعت دورانی ۶۵۰ دور بر دقیقه و سرعت جوشکاری ۲۵ میلی متر بر دقیقه را نشان می‌دهد.



شکل (۴): درشت ساختار نمونه جوشکاری شده با پین مخروطی ناقص پله دار در حرارت ورودی بالا

میزان ضخامت موثر ورق در این شکل با خط مشکی رنگ مشخص گردیده است. در حرارت های ورودی پائین، میزان نقص پیوند تماسی زیاد بوده و شکست (جدایش) از فصل مشترک دو ورق[1] رخ داده است. شکل ۵ درشت ساختار این نمونه جوشکاری شده که در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت جوشکاری ۵۰ میلی متر بر دقیقه را نشان می‌دهد که نقص پیوند تماسی در فصل مشترک دو ورق به صورت یک منحنی مشکی رنگ نشان داده شده است. به طور کلی جریان گرمای اصطکاکی فاکتور بسیار مهمی در جوشکاری هم زن اصطکاکی است، به دلیل اینکه ریز ساختار دکمه جوش به شدت تحت تاثیر گرمای اصطکاک می باشد. دو مکانیزم برای جریان گرمای اصطکاکی در حین این فرآیند وجود دارد[۱۴]:

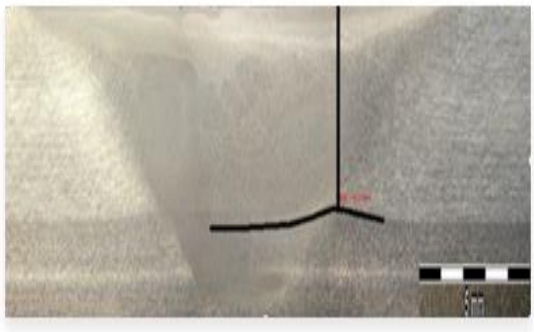
۱- جریان گرمایی اصطکاکی ناشی از شانه ابزار

۲- گرمای اصطکاکی ناشی از پین

البته بایستی در نظر داشت که گرمای اصطکاک حاصل از پین در مقابل گرمای ناشی از شانه ابزار قابل صرفنظر است. گرمای اصطکاکی در حین این فرآیند از طریق رابطه (۱) به دست می آید:

$$Q=4/3\Pi^2\ \mu w\ D^3\ P \qquad (۱)$$

که در آن μ ضریب اصطکاک، w سرعت دورانی، P نیروی فورج و D قطر شانه ابزار می باشد. از آنجا که خود ابزار در حین فرآیند در حال حرکت است، می توان گرمای اصطکاکی را در واحد سرعت جوشکاری به صورت Q/V به دست آورد. به همین دلیل بایستی w نیز به W/V مبدل گردد. بنابراین در هر شکل پین ثابت، با افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت خطی، گرمای ورودی فرآیند افزایش و به تبع آن سیلان ماده نیز بیشتر می شود. به طور کلی، علت طراحی پله روی پین این بوده است که این پله نقش شانه را ایفا کند ولی نتایج نشان می‌دهد که وجود پله روی پین، حداقل در ابعادی که در این پژوهش طراحی شده است، نتوانسته است که نقش شانه را ایفا کند و سبب افزایش اختلاط مواد در فصل مشترک دو ورق شود و این عدم توانایی در اختلاط مواد، در حرارت های ورودی پائین که تغییر شکل پلاستیک مواد کاهش یافته و به تبع آن سیلان نیز کمتر شده است، تاثیر مخرب خود را بیشتر نشان داده و در نتیجه در این حالت جدایش از فصل مشترک دو ورق رخ داده است.



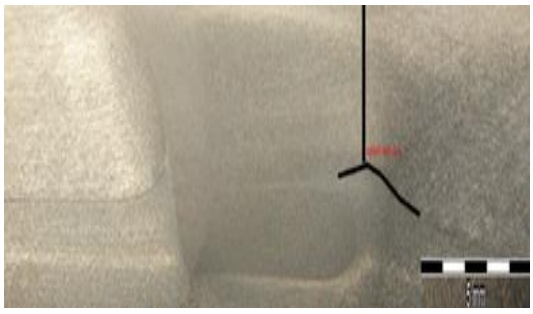
شکل (۵): درشت ساختار نمونه جوشکاری شده با پین مخروطی ناقص پله دار در حرارت ورودی پائین

در نمونه های جوشکاری شده با پین تری فلوت، وجود شیار باعث کاهش بیش تر سیلان عمودی شده و به تبع آن ارتفاع

www.SID.ir

Archive of SID

هوک نیز کاهش یافته است. در نتیجه ضخامت موثر دو ورق به یکدیگر نزدیک شده است. از طرفی، وجود شیار اختلاط مواد را بهبود داده و باعث کاهش قابل توجه نقص پیوند تماسی شده است. بنابراین نمونه های جوشکاری شده با این پین، در همه سرعت های دورانی و پیشروی به کار رفته در این پژوهش، از فلز پایه دچار شکست شده اند. همانطور که در شکل ۶ مشخص است، ضخامت موثر دو ورق در این حالت به EST ایده آل یعنی ۳,۷۵ میلی متر (نصف ضخامت مجموع دو ورق) بسیار نزدیک است و از طرفی طول نقص پیوند تماسی در حدی نیست که سبب شکست از فصل مشترک دو ورق شود. نکته حائز اهمیت در این است که با انجام تست تکرارپذیری با استفاده از این پین تری فلوت، مجددا نمونه ها از فلز پایه دچار شکست شده اند و این آزمایش نشان می دهد که نتایج خوب اولیه اتفاقی نبوده و این پین قادر است تا اتصالات مستحکمی را ایجاد نماید. با بررسی درشت ساختار هر یک از این نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ نوری، محل احتمالی شکست نمونه ها قابل پیش بینی بود. با بازرسی چشمی از نمونه ها پس از آزمون کشش برشی، تطابق کاملی بین محل شکست نمونه ها در واقعیت با پیش بینی های صورت گرفته از طریق بررسی های ریزساختاری نمونه های جوشکاری شده دیده شد.



شکل (۶): درشت ساختار نمونه جوشکاری شده با پین تری فلوت

در اتصال لبه روی هم و در صورتی که ضخامت ورق ها متفاوت باشد، براساس چگونگی ترکیب ورق ها و جهت چرخش پین (سمت پس رونده و پیش رونده جوش)، می توان چهار وضعیت مختلف از نحوه قرارگرفتن ورق ها بر روی هم را متصور شد. از آنجایی که فرآیند جوشکاری هم زن اصطکاکی فرآیندی نامتقارن است و خواص مکانیکی و نحوه سیلان مواد در دو سمت پیش رونده و پس رونده کاملا متفاوت هستند، بنابراین متناسب با نیاز وکاربرد صنعتی، بایستی موقعیت هندسی بهینه انتخاب گردد[۱۵].

ماتسوموتو در تحقیقات خود، تفاوت در نحوه قرارگرفتن ورق ضخیم یا نازکتر را به عنوان ورق بالایی مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیقات او نشان می‌دهد که استحکام اتصال در هنگامی که ورق ضخیم تر بالا قرار گیرد، بیشتر است[۱۶].

در این پژوهش نیز ورق با ضخامت بیشتر به عنوان ورق بالایی در نظر گرفته شده است. بنابراین بر این اساس دو موقعیت هندسی متفاوت وجود دارد:

۱- آزمون کشش برشی از سمت پیش رونده

۲- آزمون کشش برشی از سمت پس رونده

این نامگذاری بر اساس ورق بالایی که ضخامت بیشتری دارد صورت گرفته است به این صورت که اگر سمت پیش رونده ورق بالایی توسط دستگاه کشش کشیده شود، کشش برشی از سمت پیش رونده و اگر سمت پس رونده ورق بالایی توسط دستگاه کشیده شود به آن کشش برشی از سمت پس رونده می-گویند.

نیروی شکست در این آزمون با توجه به نوع کشش برش می-تواند متفاوت باشد به گونه ای که محققینی که بر روی اتصال لبه روی هم با ضخامت یکسان کار کرده اند، بیان کرده اند که نیروی شکست آزمون کشش برشی از سمت پیش رونده، دو برابر نیروی شکست آزمون کشش برشی از سمت پس رونده است[۱۷]. اما نشان داده شده است هنگامی که ضخامت ورق ها متفاوت باشند، نیروی شکست آزمون کشش برشی از سمت پس رونده بیشتر از نیروی شکست آزمون کشش برشی از سمت پیش رونده است[۱۵].

به همین دلیل در این پژوهش موقعیت هندسی دو ورق به گونه ای انتخاب گردید تا آزمون کشش از سمت پس رونده صورت گیرد. با توجه به موقعیت هندسی ورق ها در این آزمون، مقدار

www.SID.ir

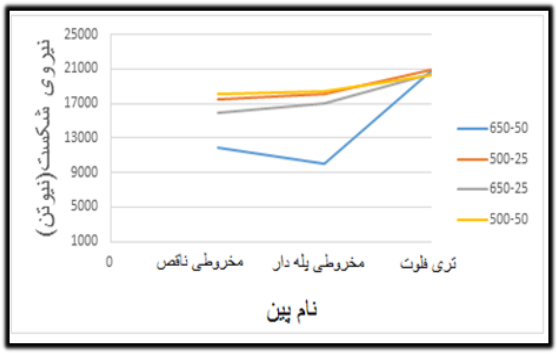
Archive of SID

تنش کششی در ورق های بالایی و پایینی، از یک مقدار حداکثر در سمتی که تحت کشش می باشد تا مقدار صفر در سمت دیگر، قابل تغییر است.

در یک آزمون کشش برشی لبه روی هم، مقداری تنش کششی اضافی در انتهای لبه های تحت بار ایجاد می شود و در مقابل مقداری تنش فشاری نیز در دو سمتی که تحت بار نمی‌باشند، تولید می‌شود. بنابراین براساس نمودار توزیع تنش نظری می‌توان بیان کرد که در آزمون کشش برشی از سمت پیش رونده، سمت پس رونده در ورق پائینی و سمت پیش رونده ورق بالایی و در آزمون کشش برشی از سمت پس رونده، سمت پیش رونده ورق پائینی و سمت پس رونده ورق بالایی، نقاط بحرانی هستند و حداکثر میزان تنش را تحمل می‌کنند.

در آزمون کشش برشی از سمت پس رونده همان طور که اشاره شد، سمت پس رونده ورق بالایی و سمت پیش رونده ورق پائینی نقاط بحرانی هستند و وجود عیوبی مانند عیب تونلی، عیب هوک و نقص پیوند تماسی در این دو ناحیه باعث کاهش خواص مکانیکی و در نهایت شکست نمونه می‌شود. به طور کلی، عوامل دیگری همچون اندازه دانه، توزیع و اندازه ذرات استحکام بخش در دکمه جوش، حضور ناخالصی ها و ترکیبات بین فلزی می‌توانند بر روی خواص مکانیکی جوش تاثیرگذار باشند، اما به نظر می‌رسد که در اتصال لبه روی هم ورق های با ضخامت متفاوت، خواص مکانیکی بیشتر تحت تاثیر عیوب و نحوه سیلان مواد در دکمه جوش است. به گونه ای که اگرچه در این پژوهش با تغییر سرعت دورانی و پیشروی، اصولا متالورژی فیزیکی نمونه ها نیز با تغییراتی همراه است، ولی پارامتر تاثیرگذار بر نتایج آزمون کشش برشی، وجود و اندازه عیوب تشکیل شده در دکمه جوش می‌باشد.

شکل شماره ۷ نیروی شکست بر حسب شکل پین را در آزمون کشش برشی از سمت پس رونده در سرعت های دورانی و پیشروی مختلف نشان می‌دهد. در این نمودارها تاثیر هر یک از پین ها به صورت کمی بر روی استحکام اتصال مشخص شده است. با مقایسه میزان نیروی های شکست می توان دریافت که نمونه های جوشکاری شده با پین تری فلوت در همه سرعت های دورانی و خطی بکار رفته در این پژوهش، دارای بالاترین استحکام هستند.



شکل (۷): نیروی شکست بر حسب شکل پین در سرعت های دورانی و پیشروی مختلف

نیروی شکست در این نمونه ها بیشتر از ۲۰۰۰۰ نیوتن است که این مقدار بیشتر از استحکام کششی فلز پایه است. افزایش نیروی شکست در نمونه های جوشکاری شده با پین مخروطی ناقص پله دار در حرارت های ورودی پائین نسبت به نمونه های جوشکاری شده با پین مخروطی ساده، نشان دهنده این واقعیت است که عیب هوک نقش تخریبی بیشتری نسبت به نقص پیوند تماسی دارد، زیرا عیب هوک را می‌توان یک ترک تقریبا عمود بر فصل مشترک دو ورق دانست و در نتیجه در آزمون کشش برشی یک تنش نرمال به آن وارد می‌شود و این ترک با سرعت بیشتری رشد خواهد کرد، در حالی که نقص پیوند تماسی تقریبا یک ترک موازی نیروی اعمالی است و تنش وارده به آن از نوع برشی خواهد بود. علت اینکه در نمونه های جوشکاری شده با پین مخروطی ناقص در حرارت های ورودی بالا، شکست از فلز پایه رخ نداده است به این دلیل است که EST بهبود یافته است ولی این میزان EST همچنان به حد مطلوب نرسیده است تا انتظار داشت که شکست از فلز پایه رخ دهد. در نتیجه در این حالت نیز شکست از فلز جوش به وقوع پیوسته است ولی در مقایسه با نمونه هایی که با پین مخروطی ساده جوشکاری شده

www.SID.ir

Archive of SID

اند و دارای ارتفاع هوک زیادی هستند، نیروی شکست بهبود چشمگیری داشته است.

اشکال ۸ تا ۱۰ محل شکست نمونه های جوشکاری شده با سه پین مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. همانطور که در این اشکال هم مشخص است، سه نوع شکست را می توان برای این نمونه ها در نظر گرفت. در صورتی که تاثیر تخریبی عیب هوک زیاد باشد (حتی با وجود نقص پیوند تماسی) این عامل سبب شکست نمونه از ناحیه مرکز جوش می شود در حالی که اگر میزان نقص پیوند تماسی زیاد باشد، یک جدایش در فصل مشترک دو ورق به وجود خواهند آمد. اگرچه این شکست هم در ناحیه دکمه جوش رخ می‌دهد اما ماهیت این دو نوع شکست اساسا با هم متفاوت است. در نهایت، اگر میزان این دو عیب در حد غیر مخرب باشد (نه اینکه وجود نداشته باشند) شکست از فلز پایه رخ می‌دهد. علاوه بر خواص مکانیکی، تاثیرات متالورژیکی که پین ها بر روی ریز ساختار جوش و نواحی اطراف آن ایجاد می‌کنند، نیز متفاوت است. زیرا هندسه ابزار به عنوان یک متغیر فرآیند FSW مانند دیگر متغیرهای فرآیند بر روی حرارت ورودی و در نتیجه ریز ساختار تاثیر مستقیم دارد. این عامل تاثیر خود را به وضوح در ریز ساختار و همچنین نتایج حاصل از آزمون ریز سختی سنجی نشان می‌دهد.

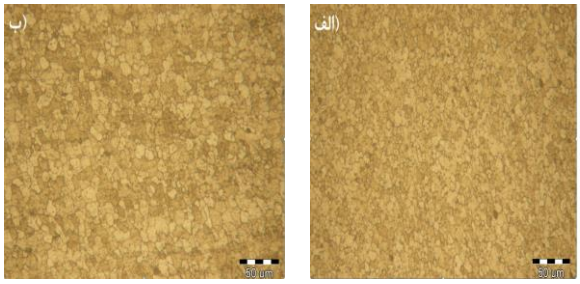
شکل (۸): محل شکست نمونه جوشکاری شده با ارتفاع هوک زیاد

شکل (۹): محل شکست نمونه جوشکاری شده با طول نقص پیوند تماسی زیاد

شکل (۱۰): محل شکست نمونه جوشکاری شده با ارتفاع هوک بهینه و طول نقص پیوند تماسی مناسب

شکل ۱۱ ریزساختار سطح مقطع عرضی دکمه جوش را برای نمونه های جوشکاری شده با پین مخروطی ساده و تری فلوت و با ترکیب پارامتر (۶۵۰rpm – ۵۰mm/min) نشان می‌دهد.

همانطور که مشخص است، هندسه ابزار بر روی اندازه دانه، همگن و هم محور بودن آن تاثیر مستقیم دارد. اولین تفاوت مشاهده شده در شکل ۱۰، تفاوت اندازه دانه هاست. به نظر می-رسد که بیشتر بودن سیلان مواد در پین مخروطی نسبت به پین تری فلوت باعث ریز تر شدن دانه ها در این نمونه نسبت به نمونه جوشکاری شده با پین تری فلوت شده است.



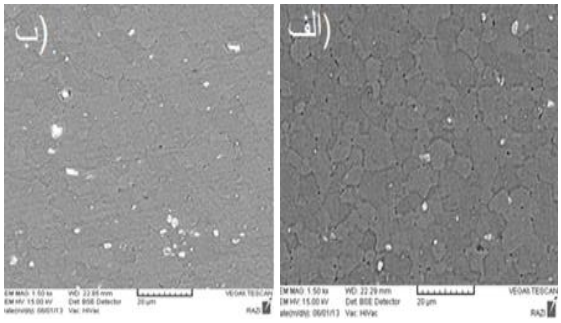
شکل (۱۱): ریز ساختار سطح مقطع عرضی جوش نمونه جوشکاری شده با ترکیب متغیر (۶۵۰rpm – ۵۰mm/min): (الف): با پین مخروطی و (ب): با پین تری فلوت

توانایی هریک از این پین ها نیز در تکه تکه کردن رسوبات و پخش آنها در دکمه جوش متفاوت است. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از دکمه جوش نشان می‌دهد که پین تری فلوت در تکه تکه کردن رسوبات و پخش همگن آنها در مرکز جوش موفق تر از پین های دیگر عمل کرده است. شکل۱۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی دکمه جوش حاصل از

www.SID.ir

Archive of SID

نمونه های جوشکاری شده با پین مخروطی ناقص و تری فلوت را نشان می‌دهد. تجزیه شمیایی نقطه ای از رسوبات نشان می دهدکه همانند رسوبات فلزپایه، این رسوبات نیز حاوی آلومینیوم، منگنز، منیزیم و آهن می باشد که Fondoa و همکارانش[۱۸] بیان کرده اند که این رسوبات $Al_6(Mn,Fe)$ هستند.



شکل (۱۲): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با کنتراست الکترون های برگشتی از سطح مقطع جوش: (الف): نمونه جوشکاری شده با پین تری فلوت و (ب): نمونه جوشکاری شده با پین مخروطی ناقص

معادله هال-پچ رابطه بین سختی و اندازه دانه را به این صورت بیان می کند:

$$H_V=H_0+K_H d^{-1/2} \qquad (۲)$$

تفاوت در اندازه دانه ها در شکل ۱۲ نیز باعث تفاوت در اندازه عدد سختی این دو نمونه شده است.Etter وهمکارانش [۱۹] معتقدند که مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی تابعی از ریزساختار اولیه فلز پایه است به گونه ای که بیان کرده اند برای آلیاژ آلومینیوم ۵۲۵۱ با شرایطH۱۴ تبلور مجدد دینامیکی پیوسته رخ داده است در حالی که برای همین ورق در شرایط آنیل تبلور مجدد دینامیکی هندسی مکانیزم غالب شکل گیری دانه ها در مرکز جوش است. از آنجا که در این پژوهش یک ورق کارسرد شدهH۳۲۱ به یک ورق آنیل جوش داده شده است، تعیین مکانیزم دقیق تبلور مجدد دینامیکی در دکمه جوش کار بسیار پیچیده ای است که بایستی در پژوهش های بعدی به آن پرداخته شود. نتایج سختی سنجی از دکمه جوش نشان می‌دهد که سختی این ناحیه در پین مخروطی در حدود ۹۸ ویکرز و در پین تری فلوت حدود ۹۵ ویکرز است. در واقع کاهش میزان اختلاط عمودی ماده که ناشی از کاهش تعداد رزوه های موجود بر روی پین تری فلوت نسبت به پین مخروطی ناقص است، سبب شده است که عملیات ترمومکانیکی کمتری بر روی فلز پایه صورت گیرد. در نتیجه فلز پایه کرنش کمتری را تحمل می‌کند و این عامل باعث کاهش سختی دکمه جوش در نمونه جوشکاری شده با پین تری فلوت نسبت به مخروطی شده است.

۴- نتیجه گیری

بررسی های مکانیکی و متالورژیکی از دکمه جوش و نواحی مختلف آن نشان می‌دهد که:

۱- وجود شیار و پله بر روی پین، باعث کاهش سیلان ماده به سمت بالا وکاهش ارتفاع هوک شده است.

۲- وجود پله در فصل مشترک دو ورق نه تنها باعث کاهش نقص پیوند تماسی نشده است بلکه شرایط را بدتر هم کرده است. علت این می تواند باشد که به علت عرض کم پله، این پله نتوانسته است که نقش شانه را در فصل مشترک دو ورق ایفا کند و باعث افزایش تغییر شکل پلاستیک ناشی از اصطکاک بین شانه و مواد شود.

۳- در اتصال لبه روی هم بر خلاف اتصال سر به سر، وجود عیب هوک تا حدی که بتواند باعث یکسان شدن ضخامت ورق بالایی و پائینی شود، مناسب است. زیرا در این شرایط، سطح تحمل بار اعمالی در هر دو ورق جوشکاری شده یکسان خواهد شد.

۴- هندسه ابزار به عنوان یک متغیر مهم در فرآیند جوشکاری هم زن اصطکاکی، بر روی سیلان مواد، شکل گیری عیوب جوش و در نهایت استحکام نمونه جوشکاری شده تاثیر مستقیم دارد.

۵- مهم ترین ویژگی نمونه هایی که از فلز پایه دچار شکست شده اند این است که اولا عیب هوک در این نمونه ها ارتفاع

www.SID.ir

Archive of SID

مناسبی دارد و ثانیا طول نقص پیوند تماسی به حدی نیست که سبب کاهش بیش از حد عرض موثر مرکز جوش شود.

۵- مراجع

[1] E. D. Nicholas, "Friction Processing Technology", TWS Report, 1999.

[۲] س. نادر، م.کثیری و م. شمعانیان، "بررسی اثر تغییرات زمان توقف ابزار در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) بر ریزساختار آلیاژ Ti-6Al-4V"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، دوره دوم، صفحه ۱۴۹ –۱۵۶، ۱۳۹۴.

[۳] ع. ناظم الرعایا و م. فاضل نجف‌آبادی، "بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد API-X65 به روش جوشکاری هم زن اصطکاکی"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، دوره چهارم، صفحه ۷۵–۸۴، ۱۳۹۴.

[۴] ک. امینی، ف. غروی، ا. چمی، م. امیرخانی و ح. قاسمی، "بررسی رفتار خوردگی مقطع جوشکاری شده آلیاژ آلومینیوم به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال هشتم، دوره چهارم، صفحه ۲۳–۳۸، ۱۳۹۳.

[5] B. Irving, "why aren't airplane welded?" , Welding journal, Vol. 76, pp. 31-41, 1997.

[۶] م. صادقی گوغری، م. کثیری و ک. امینی، "بررسی نسبت سرعت دوران به پیشروی ابزار در جوشکاری هم‌زن اصطکاکی اتصال غیر هم‌جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به تیتانیوم خالص تجاری"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، دوره سوم، صفحه ۲۵۷–۲۶۶، ۱۳۹۴.

[۷] ر. بازرگان لاری و ا. وفا،" مقایسه رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ جوش داده شده به روش FSLW و GTALW"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال دهم، دوره دوم، صفحه ۱۳۱–۱۴۲، ۱۳۹۵.

[8] "W. B, Lee, C. Y. Lee, W. S. Chang, Y. M. Yeon & S. B. Jung, "Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium", Materials Letters, Vol. 59, pp. 3315-3318, 2005.

[۹] ا. ربیعی زاده، ا. افسری، ف. ارغوانی و ف. احمدی کیسمی، "اتصال همجنس و غیر همجنس آلیاژهای آلومینوم ۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ به روش جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال دهم، دوره دوم، صفحه ۸۵–۹۵، ۱۳۹۵.

[۱۰] ف. غروی، ا. ابراهیم زاده و ع. سهیلی، "ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه رویهم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در سرعت های پیشروی متفاوت" فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال دهم، دوره دوم، صفحه ۱۱۵–۱۲۹، ۱۳۹۵.

[11] C. G. Rhodes & etc., "Effect of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075. Aluminum", Scripta Materials, Vol. 36, pp. 69-75, 1997.

[۱۲] م. صفرخانیان، م. گودرزی و س. م. بوترابی، "مکانیزم تشکیل دانه ها در منطقه ی اختلاط حین جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (FSW) و بررسی اثر سرعت دورانی ابزار و سرعت جوشکاری بر اندازه دانه ها"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد, سال ششم، دوره دوم، صفحه ۹–۱۹، ۱۳۹۱.

[۱۳] ح. آقاجانی درازکلا، م. الیاسی و م. حسین زاده، " بررسی شکل‌گیری عیوب و لایه‌های بین فلزی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیم AA1100 به فولاد A441 AISI"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد, سال نهم، دوره سوم، صفحه ۲۱۹–۲۳۳، ۱۳۹۴.

[14] T. Hiratar, T. Oguri, H. Hagino, T. Tanaka & S. Wook Chung, "Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy", Materials Science and Engineering A, pp. 344-349, 2007.

[15] H. Shirazi, S. Kheirandish & M. A. Safarkhanian, "Effect of process parameters on the macrostructure and defect formation in friction stir lap welding of AA5456 aluminum alloy", Materials Science and Engineering A, pp. 344-349, 2007.

[16] A. Matsumoto & S. Sasabe, "Investigated same metal lap joints made by FSW A5182-O and AlMg0.5Si1-T_4", Third International Symposium on Friction Stir Welding Kobe, Japan, pp. 27-28, 2001.

[17] G. Buffa, G. Campanile, L. Faratini & A. Prisco. "Friction stir welding of lap joint: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties", Materials science and Engineering, Vol. 519A , pp. 19-26, 2009.

www.SID.ir

Archive of SID

[18] R. W. Fonda, P. S. Pao, H. N. Jonesa, C. R. Fenga, B. J. Connolly & A. J. Dave, "Microstructure, mechanical properties and corrosion of friction stir welded Al 5456", Materials science and Engineering, Vol. 510A, 2009.

[19] A. L. Etter, T. Baudin, N. Fredj & R. Penelle, "Recrystallixation mechanisms in 5251 H14 and 5251 O aluminum friction stir weld", Materials science and Engineering A, pp. 94-99, 2007.

www.SID.ir