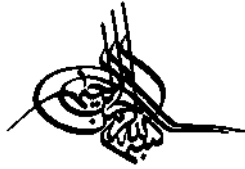


موشکاری

فصلنامه انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران
شماره ۱۱۲ - پاییز ۱۴۰۳



مقام اول بخش عکاسی دهمین مسابقه گرافیک و عکاسی صنعت جوش و بازرسی
جناب آقای مهندس علی ناصری



انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران
موسسه مرجع ملی در زمینه تکنولوژی جوشکاری و
آزمایش‌های غیرمخرب در جمهوری اسلامی ایران

مدیر مسئول: مهندس عبدالوهاب ادب آوازه

زیر نظر شورای نویسندگان

مسئول اجرایی: کمیته انتشارات

مدیر اجرایی و گرافیک: دکتر نازیلا ادب آوازه

نشانی دبیرخانه انجمن:

اصفهان - خیابان شمس آبادی - ساختمان شمس -
طبقه 4- واحد 413

تلفن: 03132240325 فاکس: 03132231765

پست الکترونیک:

Email: info@iwnt.com

فصلنامه جوشکاری نشریه ای در زمینه موضوعات و
مسائل مرتبط با جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب
است.

فصلنامه در ویرایش مقالات رسیده آزاد است

نقل نوشته ها با ذکر ماخذ بلامانع است.

- 1 بررسی اثر عملیات حرارتی پیش گرم بر جوشکاری نفوذی همجنس آلومینیوم 2024، امیر ایزدپناهی - محمدعلی باقری - علی جم پور
- 9 همجواری جوش ها، مهندس عبدالوهاب ادب آوازه
- 13 ساخت تیتانیوم متخلخل با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، شیرین وردک - سهیل شاتوتی - شهاب زنگنه
- 17 بررسی علل شکست ترد جوش مخزن کروی آلیاژ تیتانیوم جوشکاری شده با روش تیگ، یاسر وحیدشاد - امیرحسین خدابخشی - علی اصغر سلیمانی
- 26 آشنایی با الزامات استاندارد ISO 3834 الزامات کیفیتی در جوشکاری ذوبی مواد فلزی - الزامات کیفیتی جامع - قسمت سوم، مهندس افشین خیام
- 29 بررسی رفتار خوردگی فولاد 316 جوشکاری شده در آب دریا، فرزاد سلیمانی - کاظم بابایی
- 35 آزمایش آلتراسونیک با تکنیک موج هدایت شده، مسعود شاهی
- 40 بررسی و مقایسه رفتار خوردگی یکنواخت فولاد P460NH جوشکاری شده با استفاده فرایندهای جوشکاری SMAW و TIG، حسین طهماسبی منش - علیرضا نصر اصفهانی
- 44 بررسی ریزساختار اتصال آلیاژهای AA2024-T4 به AA6061-T6 به روش تیگ، علی مهدی پور آب دهلی - امیر حسین کیایی - امین عنبرزاده
- 49 بررسی اثر پارامتر فاصله همپوشانی بر خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیومی تولید شده به روش ساخت افزودنی SLM توسط تکنیک DIC، مرتضی زرنگار ابرقوئی - محمدرضا فراهانی - یاسر وحیدشاد - محمدجواد پاکروان



بررسی اثر عملیات حرارتی پیش گرم بر جوشکاری نفوذی همجنس آلومینیوم ۲۰۲۴

امیر ایزدپناهی^۱، محمدعلی باقری^۲، علی جم پور^۳

چکیده

در پژوهش حاضر تاثیر فرایند جوشکاری نفوذی و نحوه تاثیر دما بر خواص مکانیکی قطعه بررسی شد. تعدادی از قطعات تحت عملیات حرارتی در دمای T6 و در نهایت انجام جوشکاری نفوذی و با نیروی فشاری مشخص، قرار گرفتند. بررسی خواص مکانیکی با انجام آزمون استحکام کششی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از عملیات حرارتی پیش گرمایش با دمای T6 و سپس انجام فرایند جوشکاری نفوذی منجر به کاهش استحکام تسلیم نمونه می شود. همچنین استفاده از محدوده دمایی پایین تر در این فرایند نسبت به روش های حالت مایع، موجب حذف عیوب انقباضی می شود و در نتیجه باعث پایداری بیشتر و بهبود خواص فیزیکی آلومینیوم ۲۰۲۴ می شود.

کلمات کلیدی: جوشکاری نفوذی آلومینیوم، آلومینیوم ۲۰۲۴، عملیات حرارتی پیش گرم، عملیات حرارتی در T6.

مقدمه

آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل چگالی پایین، استحکام مخصوص بالا، مقاومت خوردگی مطلوب، شکل پذیری مناسب، هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، جذابیت ظاهری و باز یافت پذیری ذاتی کاربرد گسترده ای در صنایع خودروسازی و بخش هوافضا دارند [۱، ۲]. آلیاژهای سری ۲۰۰۰ به علت ایجاد استحکام بالای آنها برای مواردی که استحکام به وزن بالایی نیاز باشد مورد استفاده قرار می گیرند [۳]. این گروه به آلیاژهای آلومینیوم - مس شناخته می شوند. آلیاژهای سری ۲۰۰۰ حاوی مس به عنوان عنصر اصلی آلیاژی و اغلب با منیزیم به عنوان عنصر آلیاژی دوم همراه است. این آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر برای رسیدن به خواص بهینه نیازمند عملیات حل سازی هستند. در حالت حل سازی شده، خواص مکانیکی مشابه و حتی گاهی بهتر از فولاد کم کربن حاصل می شود. در برخی موارد پیرسازی برای تقویت هر چه بهتر خواص مکانیکی به کار می رود. در شرایط کامل سخت شده (پیرسخت شده) شکل پذیری

این آلیاژها معمولاً کمتر از سایر آلیاژها است و عملیات حرارتی های مرسوم در این آلیاژها T4 و T6 می باشد [۴، ۵، ۶]. آلیاژ Al2024 عملیات حرارتی پذیر آلومینیوم - مس به خاطر نسبت استحکام به وزن بالا و داکتیلیته مطلوب، به عنوان یک آلیاژ بسیار مهم و پر کاربرد به صورت گسترده ای در سازه های خاص مهندسی و صنایع دفاعی و هوافضا دارد [۱]. آلیاژ Al2024 محبوب ترین آلیاژ از آلیاژهای سری ۲۰۰۰ آلومینیوم بوده و بخش عمده افزایش استحکام آن به خاطر تشکیل رسوب های آلومینایی $CuAl_2$ است. [۷] عناصر آلیاژی اصلی آن مس و منیزیم است و درصد کمی منگنز و کرم دارد. هدف اصلی افزودن مس و منیزیم افزایش استحکام آلیاژ است که با رسوب فازهای این عناصر طی فرایند رسوب سختی حاصل می شود. منگنز و کرم اندازه دانه ها و تبلور مجدد آلومینیوم را در حین عملیات حرارتی هموزن و پیش گرم نمودن را کنترل می کنند. در این آلیاژ سیلیسیم و آهن به عنوان ناخالصی هستند [۸، ۹]. از محاسن این آلیاژ استحکام خیلی خوب آن پس از تمپر مناسب و ماشین کاری ساده

این آلیاژ است، از معایب این آلیاژ جوش پذیری ضعیف و ترک خوردن هنگام جوش است، علاوه بر جوش پذیری و مقاومت به خوردگی ضعیف و نیز شکل پذیری این آلیاژ نیز محدود می باشد. [۱۰، ۱۱] به دلیل جوش پذیری پایین آلیاژ سری ۲۰۰۰ در فرایندهای جوشکاری ذوبی آلومینیوم و اینکه عامل اصلی تخلخل، جذب هیدروژن است، هیدروژن حد انحلال بالایی در مذاب آلومینیوم دارد اما حد انحلال آن در آلومینیوم جامد بسیار پایین است، انحلال هیدروژن در آلومینیوم مذاب تقریباً ۸۱ برابر انحلال آن در آلومینیوم جامد است مشکلی که ناشی از گاز حل شده در فلز جوش در حین انجماد محبوس می شود، و منجر به ایجاد حباب هایی در فلز جوش انجماد یافته خواهد شد. [۱۲، ۱۳] این روش نه تنها محدودیت های روش های متداول جوشکاری ذوبی را ندارد، بلکه مزایای زیادی از جمله امکان اتصال فلزات غیر همجنس با نقاط ذوب متفاوت را دارد [۱۴].

به علت عدم حضور منبع ذوب فلز، بر روش های جوشکاری ذوبی ترجیح داده می شود و در مقایسه با فرایندهای جوشکاری ذوبی بهتر است، در مقایسه با بسیاری از روش های جوشکاری ذوبی که برای اتصال ساختاری استفاده می شوند، جوشکاری نفوذی به عنوان یک فرایند اتصال حالت جامد که مواد جوشکاری شده حالت ذوبی و ریختگی ندارند و به علت عدم حضور منبع ذوب فلز، روش جوشکاری نفوذی بر روش های جوشکاری ذوبی ترجیح داده می شود و حین فرایند جوشکاری نفوذی ماده در دمای بالا تحت تغییر شکل پلاستیک (مومسان) زیاد قرار می گیرد که این عمل منجر به تشکیل دانه های ریز هم محور تبلور مجدد یافته می شود [۱۳]. از مزایای جوشکاری نفوذی به کمتر بودن میزان تنش های حرارتی و پسماند در محل اتصال نسبت به روش های ذوبی اشاره کرد، که به دلیل دمای پایین فرایند و نبود انبساط و انقباض ناشی از ذوب و انجماد، حاصل می شود [۱۵، ۱۶]. اما در نتیجه تغییرات گرمایی کمتر از جوشکاری ذوبی، تغییرات کمی در ساختار میکروسکوپی جوش نسبت به فلز پایه رخ می دهد. اتصال نفوذی در خلأ می تواند به طور دقیق دما و زمان نگهداری را تنظیم و سپس تشکیل ترکیبات بین فلزی را کنترل نماید، در این روش متغیرهایی همچون دمای اتصال، فشار اعمالی، زمان نگهداری و میزان زبری سطح نمونه ها نقش اساسی را در تعیین میزان استحکام اتصال ایفا می کنند [۱۷، ۱۸].

یک جوشکاری موفق به شرایط حرارتی که در آن جوشکاری انجام می شود وابسته است، مهم ترین پارامتر برای موفقیت آمیز بودن عملیات جوشکاری، داشتن یک جوش محکم و یکدست است، یعنی عیوب جوش نظیر حفره ها، عیوب ریشه، حباب و غیره در جوش دیده نشود، جوشکاری در دمای پایین باعث کاهش اتصال دو قطعه به هم می شود و جوشکاری در دمای بالا منجر به افزایش بیش از حد فشار به قطعه و تغییر حالت پلاستیکی قطعه جوش می شود، بعلاوه، خواص حرارتی ماده اعم از رسانش حرارتی، گرمای ویژه و چگالی به دما وابسته هستند، با توجه به اینکه تنش و کرنش به وجود آمده در قطعه نیز تابعی از دما هستند، تخمین صحیح دما در فرایند جوشکاری اهمیت ویژه ای دارد [۱۹].

فرایندهای جوشکاری نفوذی را می توان به دو گروه جوشکاری نفوذی حالت جامد و جوشکاری نفوذی با فصل مشترک مذاب تقسیم نمود، در جوشکاری نفوذی حالت جامد، دو قطعه به صورت مستقیم در تماس با یکدیگر قرار می گیرند و در اثر عواملی نظیر دما، فشار و نفوذ متقابل اتم ها، اتصال بین آنها برقرار می شود، در جوشکاری نفوذی با فصل مشترک مذاب یک یا چند لایه در فصل مشترک اتصال قرار می گیرد، با گرم شدن فصل مشترک و نفوذ اتم ها، یک ترکیب یوتیک با نقطه ذوب پایین در فصل مشترک تشکیل می شود و با انجماد این مذاب، اتصال بین دو قطعه ایجاد می شود، باید توجه داشت که در این روش درجه حرارت پایین بوده و فلزات پایه ذوب نمی شوند [۲۰].

در فرایند جوشکاری نفوذی نیز مانند سایر فرایندهای جوشکاری، ابتدا باید سطوح متصل شونده آماده شوند، برای این منظور سطوح متصل شونده به کمک روش های مکانیکی و یا شیمیایی تا حد لزوم پرداخت و صیقل کاری می شوند و سپس عملیات چربی زدایی و اسیدشویی به کمک محلول های مناسب انجام می گیرد، فرایند تمیز کاری باید با دقت صورت گیرد و پس از انجام صحیح این عملیات است که می توان انتظار دستیابی به یک اتصال با خواص مطلوب را داشت، یک نکته مهم در فرایند جوشکاری نفوذی، انتخاب میزان زبری سطوح متصل شونده قبل از اتصال می باشد، هر چه سطوح زبرتر باشند، حفره های ایجاد شده در فصل مشترک بزرگتر بوده و حذف کردن آنها در حین فرایند مشکل تر خواهد بود، از سوی دیگر، هر چه سطح زبرتر باشد میزان تغییر شکل پلاستیک بر آمدگی ها در فصل مشترک بیشتر می شود که این امر به دفع آلودگی های سطحی کمک می کند، این نکته در جوشکاری نفوذی آلیاژهایی که قابلیت انحلال خوبی برای آلودگی های سطحی ندارند یک نکته مثبت محسوب می شود، بنابراین باید با توجه به جنس قطعات و شرایط انجام فرایند، میزان زبری سطوح را تعیین نمود [۲۱]. عوامل مختلفی بر قابلیت جوش پذیری اثر می گذارند که مهم ترین این عوامل به شرح زیر می باشند [۲۲].

-انجام عملیات سطحی مناسب و عدم حضور آلودگی در سطوح متصل شونده.

-تغییر شکل پلاستیک اجزای جوشکاری شونده: حداقل یکی از اجزا قابلیت تغییر شکل داشته باشد تا در طول فصل مشترک با اعمال فشار، تماس واقعی بین دو سطح ایجاد شود.

-درجه حرارت: پدیده نفوذ شدیداً تابع درجه حرارت می باشد و با افزایش دما سرعت نفوذ افزایش می یابد، باید توجه داشت که با افزایش درجه حرارت، نیروی فشاری باید کاهش یابد چون احتمال تابیدگی و تغییر شکل قطعات بیشتر می شود.

-نیروی فشاری: اگر فشار کم باشد سطح تماس واقعی بین دو قطعه کاهش می یابد و اگر فشار بیش از مقدار لازم باشد باعث تغییر شکل ظاهری یا پیچیدگی قطعه می شود.

-زمان: زمان حرارت دادن باید به گونه ای باشد که در ناحیه فصل مشترک، نفوذ به اندازه کافی انجام گیرد و یک حالت پایدار انجام شود و استحکام اتصال به حد مطلوبی برسد.

-توزیع مناسب تنش های حرارتی: این امر تحت تأثیر نوع، شکل و

ابعاد مواد و همچنین روش حرارت دادن قرار دارد.

-عامل دیگری که باید در نظر گرفته شود اختلاف ضریب انبساط حرارتی موادی است که باید از درجه حرارت محیط تا درجه حرارت جوشکاری در نظر گرفته شود. هر چه این اختلاف بیشتر باشد میزان تنش‌های پسماند در موضع اتصال نیز بیشتر است. این تنش‌های پسماند ممکن است باعث تسلیم نرم‌تر و یا از هم گسیختن اتصال در دمای محیط شود.

سطح جوش خورده دارای خواص فیزیکی و مکانیکی مشابه موادی اولیه است. هنگامی که جوشکاری به اتمام رسید، می‌توان تست‌هایی مانند آزمون کششی بر روی آن انجام داد. فرایند پیوند نفوذی قادر به تولید اتصالات با کیفیت بالایی است که عاری از هرگونه ناپیوستگی و تخلخل می‌باشند. به عبارت دیگر، سنباده زدن، تولید و حرارت دادن مواد پیوند نفوذی می‌تواند به ساخت قطعات پیچیده با دقت بالا کمک کند همچنین نفوذ قابل تغییر است. روش جوشکاری نفوذی می‌تواند به طور گسترده، در اتصال مواد مشابه یا غیرمشابه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در پردازش مواد کامپوزیت از اهمیت بالایی برخوردار است. این فرایند به آسانی و با هزینه اندک قابل انجام است. مواد تحت نفوذ می‌توانند تغییر شکل پلاستیک را کاهش دهند [۲۳].

مزیت بسیار مهم اتصال دهی نفوذی، کیفیت بالای اتصال است. این فرایند، به عنوان تنها فرایند شناخته شده است که خواص ذاتی و اصلی را در مواد یکپارچه اعم از اتصالات فلزی و غیرفلزی حفظ می‌نماید. با انتخاب درست متغیرهای فرایند (دما، بار فشاری و زمان) می‌توان به همان استحکام و پلاستیسیته مواد اصلی دست یافت. وقتی فرایند در خلأ انجام می‌شود، سطوح مشترک از آلودگی‌ها و اکسیداسیون حفظ می‌شوند، زیرا اکسیدهای موجود یا در مواد اصلی نفوذ می‌کنند و یا در آن حل می‌شوند. این دلیل این است که چرا فرایند جوشکاری نفوذی عاری از پیوندهای ناقص، ورود اکسیدها، ترک‌های گرم و سرد، حفره‌ها، تاب برداشتن، از دست دادن عناصر آلیاژی و غیره است. همین‌طور در مقایسه با گازهای محافظ، خلأ هیچ هزینه‌ای برای انتقال و ذخیره‌سازی ندارد. اگر لیه‌ها به خوبی با هم در تماس باشند دیگر نیازی به الکترودها، لحیم‌ها، مواد فیلر و غیره نیست بخش‌ها با قسمت‌هایی که اتصال دهی نفوذی شده‌اند معمولاً مقادیر اصلی استحکام کششی نهایی، انعطاف‌پذیری، سفتی خلأ، چقرمگی ضربه و زاویه کمانش را حفظ می‌نمایند.

پیونددهی نفوذی در زمینه‌های استحکام، انعطاف‌پذیری، سفتی و مقاومت به خوردگی که دارای کاربردهای حساس هستند مفید و مناسب می‌باشد. اتصال دهی نفوذی باعث افزایش طول عمر و کیفیت محدوده وسیعی از محصولات می‌شود و این امکان را به وجود می‌آورد که به طور اساسی ساختارهای جدید را با این روش و تکنیک ساده گسترش دهد و جایگزین مواد نادر و گران قیمت کند. مزیت اصلی اتصال دهی نفوذی، پایداری بالای خواص مکانیکی آن است. می‌توان کنترل کیفی را با انتخاب تصادفی بخش‌های کوچکی و بررسی کیفیت آنها به جای بررسی کل نمونه‌ها انجام داد. این فرایند بسیار باارزش است زیرا یک تکنیک ساده، کم‌هزینه و مطلوب و تست غیرمخرب است که می‌توان در جوشکاری مورد استفاده قرار گیرد [۲۲].

اتصال دهی نفوذی می‌تواند قطعات با اشکال بسیار پیچیده را طوری بهم جوش دهد که خواص اتصال مانند خواص مواد اصلی باشد. به این طریق می‌توانیم شکل‌هایی بسازیم که به آسانی نمی‌توانیم با فرایندهای سنتی آن را تولید نماییم و یا تولید آنها بسیار گران قیمت تمام می‌شود. ترانس ابعادی نمونه‌های تولید شده با جوشکاری نفوذی، شبیه و حتی دقیق‌تر از بخش‌های ماشین‌کاری شده است در سال‌های اخیر، تئوری اتصال دهی نفوذی گسترش یافته است و نتایج مهمی در زمینه‌ی فرایند نفوذی و شکل‌گیری پیوندهای یکپارچه بین انواع مواد غیر آلی جامد بدون آنکه تأثیری در خواص مکانیکی و فیزیکی آن بگذارد بدست آمده است [۱۵]. اتصال دهی نفوذی علاوه بر اتصال دهی مواد مشابه، می‌تواند بطور وسیع فلزات و آلیاژهای غیر مشابه را با خواص حرارتی فیزیکی مختلف اتصال دهی نماید. این فرایند می‌تواند برای جوشکاری موادی با ضخامت‌های بالا، شکل‌های پیچیده، متخلخل، الیافی و پودری استفاده شود. می‌توان برای اتصال دهی غیر فلزات (مانند شیشه‌ها) و سرب‌ها، به رساناها و امثال آنها با فلزات و نیز برای تعمیر بخش‌هایی که شکسته و ساییده شدند، استفاده شود [۲۴].

این فرایند برای عملیات حرارتی در خلأ توسعه یافته است که منجر به افزایش طول عمر و اعتبار ماشین‌آلات و ابزارها می‌شود. تحقیقات در این زمینه منجر به کشف ترکیبات چند جزئی مختلف با ترکیبی از خواص فلزات، آلیاژها و غیر فلزات شده است. اتصال دهی نفوذی فرایندی با بازدهی بالاست که به راحتی تمایل به کنترل اتوماتیک دارد. در یک عملیات با استفاده از فرایند اتصال دهی نفوذی می‌توان صدها و حتی هزاران قطعه کاری تولید شده با قالب‌گیری، نورد یا اکستروژن با شکل‌ها و با ساختارهای پیچیده را با استفاده از مواد دما بالا به هم اتصال دهی نمود. تمام این موارد این امکان را فراهم می‌سازد تا در فرایند پیوند نفوذی اتصال بطور مناسب ایجاد شود [۲۵].

متغیرهای اصلی اتصال دهی نفوذی (دما، بار فشاری، خلأ، زمان نگهداری) را می‌توان به آسانی قابل برنامه‌ریزی کرد. بعنوان یک دستورالعمل، تجهیزات برای اتصال دهی نفوذی بصورت نیمه اتوماتیک با حداقل دخالت انسانی و یا اتوماتیک بدون دخالت انسان راه‌اندازی می‌شود. درجه‌ی بالای مکانیزه بودن تجهیزات اتصال دهی نفوذی، باعث کیفیت بالا، طول عمر بالا محصولات و استانداردهای بهداشتی بالاتر محیطی می‌شود و همچنین باعث می‌شود که اتصال دهی نفوذی نسبت به فرایندهای جوشکاری سنتی بیشتر مورد توجه قرار بگیرد. مزیت بعدی اتصال دهی نفوذی، توانایی آن در اتصال دهی هر نوع قطعه‌ای با اشکال پیچیده و با مقطع عرضی پیچیده است [۲۱].

اخیراً کاربرد اتصال دهی نفوذی برای گستره محدودی از اشکال و ناحیه‌های مقاطع عرضی در نقطه اتصال مورد توجه قرار گرفته است. اتصال دهی نفوذی برای ساختن پوشش شیمیایی نقره با مس با ارتفاع ۳m و ضخامت 1/86 m، مقاومت به سایش قالب‌ها در برابر ضربه برای هسته‌های مغناطیسی موتورهای الکتریکی، ابزارهای برش و اندازه‌گیری، مجموعه‌های سرب و فریت، عناصر الاستیک ترانسفورماتور، مدول سیال، محور چرخ‌های توربین، پره‌های

توربین، لوله های متخلخل برای صنایع گازی و شیمیایی، در یچه ها، پیستون ها و بوش های سیلندر برای موتورهای احتراق داخلی درونسوز و بسیاری از محصولات دیگر کاربرد دارد. در زمینه صنایع الکتریکی، پیوند نفوذی برای ساختن ساختارهای موج آهسته در لوله های الکترونی، اتصال فویل نیکل با ضخامت ۸ میکرومتر با اجزای اصلی و اتصال فویل آلومینیوم با ضخامت ۸ میکرومتر با شبکه مس استفاده می شود. پیوندهای نفوذی دارای خلاء محکم، مقاومت حرارتی و ضد ویریه هستند. محصولات تولید شده توسط این فرایند از نظر ابعادی و شکل دارای دقت بالایی هستند. اتصال دهی نفوذی فرایندی بسیار به صرفه از لحاظ اقتصادی است که نیاز به الحبه های گران قیمت، سیم ها و الکترودهای مخصوص روانسازها و گازهای محافظ ندارد همچنین نیاز به ماشین کاری متوالی ندارد بنابراین فلز گران بهایی از بین نمی رود در محصولات تولید شده با این فرایند، افزایش وزن مانند آنچه که در جوشکاری های سنتی و معمول رخ می دهد اتفاق نمی افتد. خواص فلز در ناحیه جوش بدون تغییر می ماند بنابراین بعد از عملیات جوشکاری نفوذی نیاز به عملیات حرارتی نیست [۲۶].

مزیت دیگر اتصال دهی نفوذی، استاندارد بهداشتی بالای آن در کارکردهای محیطی است که عاری از تابش های فرابنفش، گازهای مضر، فلزات آلوده و در خاک است. اتصالات به دست آمده با اتصال دهی نفوذی مطابق نیازها و احتیاجات برای ساختار بحرانی و حساس در زمینه های استحکام، سختی، چقرمگی و مقاومت در برابر گرما و خوردگی هستند. همچنین در این فرایند تحت خلاء انجام می شود و اتصال حاصل، دارای حداقل مقدار ناخالصی است، این موضوع در مورد فلزات با فعالیت بالا هم صادق است. موفقیت یا شکست فرایند اتصال دهی نفوذی با عوامل مختلفی مشخص می شود که نیاز به نظارت مدام و تنظیمات دقیق دارد. متغیرهای اصلی این فرایند عبارتند از: دمای اتصال دهی، فشار اتصال دهی (بار فشاری) و زمان نگهداری (در طی اعمال فشار).

درجه حرارت اتصال دهی: باید ۵۰٪ تا ۷۰٪ نقطه ذوب آلومینیوم ذوب شونده در ترکیب باشد. افزایش دما به نفوذ و در طول فصل مشترک جوش کمک می کند و هم چنین شرایط را برای تغییر شکل سطح مساعد می کند (شکستن برآمدگی های سطح).

فشار اتصال دهی

فشار اتصال دهی باید به اندازه باشد که از اتصال محکم بین لبه های قطعات اطمینان حاصل شود. این فشار باید برای تغییر فرم زبری های سطح و پر کردن تمام حفره ها در ناحیه جوش کافی باشد. اگر فشار کافی نباشد، برخی از حفرات پر نمی شود و استحکام اتصال کاهش می یابد. از همه مهم تر، فشار اعمالی باعث شکسته شدن فیلم اکسیدی و ایجاد یک سطح تمیز و انجام نفوذ و به هم پیوستگی سطح می شود. وقتی فشار اتصال دهی یا دمای اتصال دهی به اندازه کافی بالا برده شود، برآمدگی ها در سطوح جفت شونده، تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می گیرند و تا زمانی که سطوح مطابق با میزان فاصله ایده آل در کنار هم قرار می گیرند، این تغییر شکل ادامه می یابد [۲۱].

-دمای نگهداری (طی اعمال فشار)

در دمای اتصال دهی معین و فشار اتصال دهی معین باید از لحاظ فیزیکی و اقتصادی، حداقل نگه داشته شود. این مقدار باید برای برقراری اتصال و انجام فرایند نفوذی کافی باشد. زمان نفوذی بیش از حد باعث باقی گذاشتن حفره ها در ناحیه جوش و حتی تغییر ترکیب شیمیایی فلزات می شود و یا منجر به تشکیل فازهای بین فلزی شکننده می شود. (وقتی فلزات غیرمشابه یا آلیاژها اتصال دهی می شوند). پارامترهای دیگر مثل: خلاء، گاز خنثی، هیدروژن و بعضی وقتی از گازهای دیگر نیز در محفظه جوش استفاده می شود [۲۶]. اتصال دهی نفوذی برای بسیاری از فلزات، آلیاژها و غیر فلزات کاربرد دارد و می تواند اتصال دهی را در ترکیبات متفاوتی انجام دهد. اغلب فلزات (مانند نیکل، مس، تیتانیوم و آلیاژهای آن و همین طور آلومینیوم و فولادها) را می توان به راحتی با این روش اتصال دهی نمود. همین طور برای فلزات دیرگذاز مولیبدن، تنگستن، تانتالیوم و نیوبیم نیز کاربرد دارد. اتصال دهی نفوذی می تواند اتصالاتی را در سرامیک ها، شیشه، گرافیک، سرامت ها با فلزات و نیمه رسانه ها ایجاد نماید. چدن می تواند با فولاد در یک سطح وسیع با این روش اتصال دهی شود. فلزات غیرمشابه و آلیاژها نظیر آلومینیوم و مس، آلومینیوم و کوارتز، آلومینیوم و آلیاژهای آلومینیوم آلیاژهایی نظیر آلیاژ سری ۲۰۰۰ به آلیاژ ۷۰۰۰ یا آلیاژهای همه سری ها در رده متفاوت می توان اتصال دهی انجام دهیم [۲۷].

جوشکاری به روش اصطکاکی اغتشاشی با یک سری عیوب منحصر به فرد همراه است. دمای ناکافی جوش به خاطر سرعت چرخش پایین یا سرعت حرکت بالا به این معنی است که فلزی که جوشکاری می شود قادر نیست تغییر شکل کافی در طول جوشکاری داشته باشد. این امر ممکن است باعث ایجاد عیوب تونلی در طول جوش شود که ممکن است روی سطح ایجاد شود. برای به دست آوردن جوش موفقیت آمیز ضروری است که مواد ابزار به اندازه کافی داغ باشند تا قادر به جریان پلاستیک کافی باشند و نیروهای اعمالی روی ابزار را کاهش دهند.

اگر مواد خیلی سرد باشند حفره ها و دیگر عیوب ممکن است در ناحیه اتصال ایجاد شوند و در موارد بحرانی تر ممکن است ابزار بشکنند. از طرف دیگر حرارت ورودی بالا ممکن است ویژگی های نهایی جوش را ضعیف کند، حتی ممکن است باعث ایجاد عیوب ذوبی در فازهای با نقطه ذوب پایین شود (مثل ترک ذوبی در جوش هایی ذوبی) [۱۳].

آلیاژهای سری ۲۰۰۰ آلومینیوم قابلیت جوش پذیری ضعیفی دارند که عموماً به خاطر مس موجود در آن است که سبب ترک گرم در ناحیه ذوب می شود و بنابراین این پروسه های جوشکاری ذوبی برای این آلیاژها خیلی مناسب نیستند و برای حل این مشکل از FSW و جوشکاری نفوذی حالت جامد استفاده می شود.

در جوشکاری نفوذی استفاده از پیچیدگی قطعات می توان تا حد ممکن کاهش داده و قطعه را به صورت یکنواخت حرارت داده می شود قطعات حرارت داده شده در دماهای مختلف می توان انجام داد از مزیت جوشکاری نفوذی قطعات بزرگ را می توان با هزینه کم به هم اتصال داد [۲۳].

مواد و روش پژوهش

از کوره آزمایشگاهی که دارای یک محفظه گرمایش عایق شده است و از آن به منظور فراوری مواد و نمونه‌ها، ذوب کردن فلزات و گرم کردن مواد استفاده می‌شود. المنت‌های آن در اطراف و یا سقف این محفظه وجود دارد که سبب شده این محفظه عایق شده بتواند دما و حرارت‌های حدود ۱۱۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کند و به همین دلیل این کوره از مواد خاصی چون سیمان نسوز، آجر نسوز و پنبه‌های نسوز ساخته شده است. متداول‌ترین نوع این کوره می‌تواند دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کند. این درجه حرارت بالا سبب شده از این کوره‌ها به منظور ذوب برخی مواد و یا فراوری مواد دیگر استفاده شود.

از آنجایی که حرارت این کوره‌ها بالا است در حین کار با آن‌ها باید توجه داشت که در آن‌ها زیاد بازماند، چرا که منجر به هدر رفتن گرما و آسیب به نسوزها می‌شود. عموماً از این کوره‌ها به منظور ساخت اشیاء و وسایل سرامیکی استفاده می‌شود. دمایی که کوره الکتریکی می‌تواند در بازه‌های زمانی طولانی مثلاً ۴ ساعت تحمل کند ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است و بیشترین دمایی که این کوره در بازه زمانی کم مثلاً ۳۰ دقیقه می‌تواند تحمل کند ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است. از این رو بهترین بازه زمانی برای دمای ۱۲۰۰ درجه این کوره ۱۰ دقیقه است. کوره‌ی الکتریکی که مورد استفاده قرار گرفته و آزمایش انجام شده کوره‌ای با ظرفیت ۷۰۰ درجه‌ای است که برای جوشکاری نفوذی آلومینیوم ۲۰۲۴ مناسب است. این کوره برقی را در شکل (۱) قابل مشاهده است.

کوره الکتریکی دارای تنظیم دما بوده و می‌بایست جهت جلوگیری از فازهای ناخواسته و تغییر در ساختار قطعات را در دمای مورد نظر قرار داد. این نوع از کوره‌ها محفظه آن دارای یک سینی مخصوص برای قراردادن قطعات در درون آن می‌باشد، جنس آن نسوز با قابلیت تحمل دمای بالا می‌باشد، که در نبود این سینی قطعاتی را که در درون این کوره قرار می‌دهیم که دچار ذوب یا حالت خمیری خواهد شد این سینی‌ها جهت سهولت در حمل قطعه و جلوگیری از تغییر شکل آن نیز بکار می‌رود. شکل (۲) نمایی از سینی کوره می‌باشد.



شکل ۱- یک کوره برقی مورد استفاده



شکل ۲- دو سینی کوره

ابتدا باید قطعات موردنظر را که برای انجام جوشکاری نفوذی در کوره قرار داده می‌شود به تعداد مساوی تقسیم شود. قطعات به دو روش مختلف برش کاری می‌شود. شمش استوانه موردنظر برای تقسیمات در شکل (۳) قابل مشاهده است. ابتدا شمش استوانه آلومینیوم ۲۰۲۴ را به اندازه ۵ میلی‌متر با ابزار کمان اره برش زده شد. شکل (۴) قطعات جدا شده را به گیره بسته و به ۱۲ قطعه مساوی تقسیم شد. قطعات تقسیم شده دارای ناهمواری می‌باشد که لازم است آن‌ها را به وسیله برای ایجاد زبری مناسب جهت جوشکاری نفوذی آماده شود. از این رو به کمک ورق سنباده ۶۰ استفاده شد. ورق سنباده را بر روی سطح گذاشته و سطح آماده سازی شد. برش کاری قطعه کارها برای انجام جوشکاری باید به وسیله روش وایر کات انجام بگیرد وایر کات دستگاهی است که به وسیله یک سیم نازک (عمدتاً ۲۵ میکرون) که در داخل مایع دی‌الکتریک (آب مقطر) قرار گرفته، روی قطعه کار برش ایجاد می‌کند. انرژی ترموالکتریک با ایجاد یک جرقه سریع بین قطعه کار و سیم باعث ذوب لحظه‌ای این نقطه می‌شود. عمل ذوب داخل یک مایع دی‌الکتریک انجام می‌گیرد. نقش دی‌الکتریک خنک کاری، شستشو و عمود نگه داشتن سیم است. جنس قطعه کار می‌تواند نرم مثل آلومینیوم، مس و برنج تا فولادهای سخت و حتی تنگستن کارباید (الماس) باشد. این جرقه قابل دیدن بوده و زمانی که آب تمیز است کنده شدن براده‌های میکرونی به وضوح دیده می‌شود. همین ویژگی است که وایر کات را منحصر به فرد می‌کند زیرا هیچ تماس فیزیکی بین سیم و قطعه کار وجود ندارد و همیشه یک فاصله (GAP) بین سیم و قطعه وجود دارد، بنابراین خطای ابزاری کم و در نتیجه دقت زیاد می‌شود [۲۸].



شکل ۳- شمش استوانه آلومینیوم ۲۰۲۴

شدن فشار به قطعه بالایی می‌آورد و قطعه بالایی به قطعه خمیری پایینی که ایجاد شده فشرده می‌شود و قطعه بالایی به قطعه پایینی می‌چسبد و اتصال ایجاد می‌شود فشرده‌گی اگر در درون کوره در دمای بالا برداشته شود و برداشتن قطعه از کوره زود هنگام قطعه از حالت مناسب خود خارج شده و شکل اولیه خود را از دست می‌دهد و باید توجه ویژه‌ای به آن داشت که کوره کاملاً سرد شود، قطعات را برای آزمایش در دما زمان برای انجام عملیات حرارتی قطعات سیکل عملیات حرارتی خود را گذرانند که در جدول (۱) قابل مشاهده است، این جدول قطعات عملیات حرارتی شده و مدت زمان را به ما نشان می‌دهد.

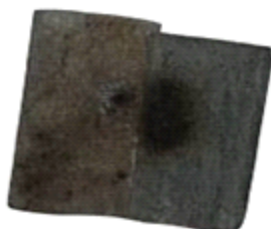
جدول ۱- مشخصات سیکل عملیات حرارتی پیش گرم

نام نمونه	دما (سانتی‌گراد)	زمان (دقیقه)	نوع خنک کاری انجام شده
A	۴۹۳ بعد ۱۹۰	۱۲۰ بعد ۴۸۰	در دمای اتاق خنک کاری شد

پس از انجام عملیات حرارتی پیش گرم روی نمونه A با مشخصات جدول (۱)، این نمونه و نمونه B (عملیات حرارتی نشده است) را مطابق با دما و وزنه مندرج در جدول (۲) بمنظور انجام جوشکاری نفوذی داخل کوره قرار داده شد (شکل ۷).

جدول ۲- مشخصات جوشکاری نفوذی انجام شده

نام نمونه	دما (سانتی‌گراد)	زمان (دقیقه)	وزنه (کیلوگرم)
A, B	۶۶۵	۱۰	۱۰۷۲۴

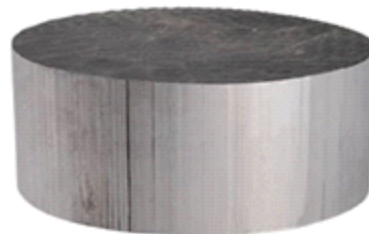


شکل ۷- نمونه A بعد از عملیات حرارتی و سپس جوشکاری



شکل ۸- نمونه B پس از جوشکاری

برای انجام پژوهش از دستگاه کشش تک جهته **Zwick/Roell Z250** که در شکل (۹) نشان داده شده است برای انجام تست کشش استفاده شد، با استفاده از این آزمایش می‌توان خواص مکانیکی مواد مانند ضریب ارتجاعی (مدول الاستیک)، تنش تسلیم، کرنش تسلیم و غیره را تعیین نمود.

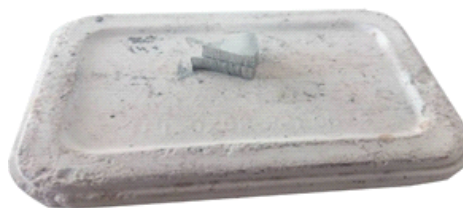


شکل ۴- قطعات برش خورده نمونه

برای برشکاری قطعات میلگرد را در ابعاد 10×10 و به طول ۴۰ میلی‌متر در می‌آوریم تا قطعات از حالت استوانه‌ای خارج شوند تا برای انجام آزمایش مناسب باشند، که در شکل (۵) قابل مشاهده است، این شکل نیز برای انجام آزمایش مناسب نمی‌باشد باید قطعات به ابعاد کوچکتر تقسیم شود تا به توان آنها را برای انجام آزمایش‌های بیشتر و راحتی قرارگیری بهتر در کوره الکتریکی آزمایشگاهی به طول ۱۰ میلی‌متر برش زده تا آماده برای انجام آزمایش شوند، قطعات برش کاری شده به واسطه وایرکات زبری مناسب و مدنظر ما را ندارد به همین دلیل باید برای ایجاد زبری مناسب از سنباده ۶۰ استفاده شد تا زبری مناسب ایجاد شود، شکل (۶) قطعات آماده شد.



شکل ۵- قطعات برش داده شده با وایرکات



شکل ۶- قطعات آماده شده روی سینی کوره

همانگونه که در شکل (۶) دیده می‌شود قطعات بر روی یکدیگر قرار می‌گیرند که برای جوشکاری نفوذی باید قطعات را روی هم گذاشت و برای ایجاد اتصال نیاز به نیرویی مناسب هستیم که از بالا به سمت پایین که فشار به قطعات آزمایش می‌باشد تا جوشکاری انجام شود فشار باعث به هم چسبندگی قطعات می‌شود فشار در هنگامی که قطعات روی هم قرار دارند و در درون کوره هستند کوره باعث ایجاد خمیری شدن قطعات اتصال شده و این اتصال نیاز به فشار قابل توجه یا میزان مورد نیاز برای انجام آزمایش می‌باشد وزنه هنگام خمیری

همچنین با محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش می توان میزان چقرمگی شکست را تعیین نمود. برای انجام آزمون، قطعات (A,B) به وسیله کوره به هم جوش داده شده است به کمک این دستگاه میزان استحکام و تنش تسلیم مورد آزمون قرار می گیرد در این آزمایش به علت کوچک بودن قطعات از ابعاد فک دستگاه از فک جانبی ساخته شده (شکل ۱۰) با ابعاد طول دسته به اندازه ۱۰ cm و اندازه دهانه فک ۲۰ mm است، برای تنظیم فک دست ساز با فک دستگاه باید دست ساز به گونه ای ساخته می شد که که قطعه با گیره دستگاه قابل تنظیم باشد در درون فک دست ساز قرار گیرد فک در شکل (۱۰) قابل مشاهده هست. برای انجام آزمایشات ابتدا قطعات به فک کمکی بسته شد و بعد محکم کردن قطعات، آن را به فک دستگاه که یک سمت دیگر قطعه است جوش داده شده بود وصل می کنیم سرعت میزان کشش قطعات تنظیم و آزمایش انجام شد.



شکل ۹- دستگاه کشش تک جهته آزمون کشش

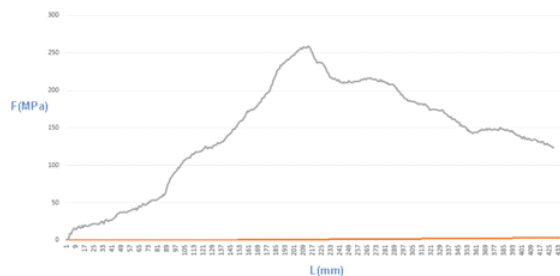


شکل ۱۰- فک جانبی ساخته شده

نتایج و بحث

برای انجام آزمایشات ابتدا قطعات را به فک دست جانبی متصل و بعد محکم کردن، آن را به فک دستگاه که یک سمت دیگر قطعه است جوش داده شده بود وصل می شود، سرعت میزان کشش قطعات با سرعت ۰/۱ در دقیقه تنظیم شد و آزمایش طبق داده های استخراج

شده زیر برای دو نمونه A و B انجام شد. ماحصل آزمون کشش برای نمونه B در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود حداکثر نیروی وارده به این قطعه ۲۵۹۰۶۷ MPa هست. در تغییر طول ۰/۸۹mm-۰/۰۱mm قطعه با نیروی وارده ۶۰ MPa به قطعه ناحیه الاستیک میباشد. و از ناحیه ۰/۸۹mm تا ناحیه ۱/۸۵mm قطعه به مقدار ۲۰۰ MPa نیروی وارد شده است که قطعه به استحکام تسلیم رسیده است. و تا ناحیه ۲/۰۹mm قطعه به استحکام نهایی رسیده است و به مقدار ۲۶۹ MPa نیرو وارد شده و از این ناحیه به بعد قطعه به ناحیه گلوپی رسیده. و در ناحیه ۰/۴۳۳mm قطعه دچار شکست شده است. عواملی که می تواند بر روی خواص کششی تأثیرگذار باشد، اندازه دانه، میزان کرویت، مورفولوژی رسوبات و حفرات موجود در مرز دانه ها می باشد این نمونه بیشترین اندازه دانه را دارد. [۲۹]



شکل ۱۱- آزمون کشش برای نمونه B

ماحصل آزمون کشش برای نمونه A در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود حداکثر نیروی وارده به قطعه ۱۳۰۰۰۷ MPa بود، که در نیروی ۲۰ MPa تا ۸۰ MPa دندان دندان هایی به وجود آمده است و از ناحیه ۱۶ mm تا ۶۱ mm که تغییر طول به وجود آمده است قطعه در ناحیه حد تناسب (ناحیه الاستیک) می باشد. و از ناحیه ۶۶ mm تا ناحیه ۷۱ mm به مقدار ۱۲۰ MPa نیرو وارد شده به قطعه در حد تسلیم خود رسیده است و در ناحیه ۷۱ mm تا ۸۱ mm قطعه دچار تنش ماکسیمم شده است و نیروی وارده بر آن ۱۳۰ MPa است. و از ناحیه ۸۶ mm تا ۱۲۶ mm قطعه از ۱۳۰ MPa به ۸۰ MPa نیرو دچار کاهش شده است. و از ناحیه ۱۲۶ mm تا ۱۳۱ mm قطعه به میزان ۱۱۰ MPa تنش افزایش پیدا کرده دچار افت شدید شده است و از ناحیه ۱۳۱ mm تا ناحیه ۲۳۶ mm قطعه دچار شکست شده و قطعه دندان های ریزی که نشان دهنده مقاومت های خیلی کوتاه است، اعمال عملیات حرارت T6 قبل از فرایند جوشکاری انرژی ذخیره شده را افزایش می دهد زیرا همانطور که سایر محققین گزارش دادند، منجر به افزایش سرعت نفوذ و رشد شده و با افزایش نرخ رشد سرعت نفوذ Cu افزایش می یابد [۳۰].

آلیاژ مورد مطالعه یک آلیاژ پیر سخت شونده که منشأ ایجاد تنش های پسماند در ساختار هستند خود را به عنوان سدی محکم در برابر لغزش نابجایی ها عمل می کنند. رشد رسوب ها در طی فرایند رسوب سختی در دمای پایین موجب محدود ساختن لغزش نابجایی ها و

precipitation. *Acta Materialia*, 2007. 55(17): p. 5822-5832.

12-Matrukanitz, R., Selection and weldability of heat-treatable aluminum alloys. *ASM Handbook-Welding, Brazing and Soldering*, 1990. 6: p. 528-536.

13-Shih, H.-C., N.-J. Ho, and J. Huang, Precipitation behaviors in Al-Cu-Mg and 2024 aluminum alloys. *Metallurgical and materials transactions A*, 1996. 27(9): p. 2479-2494.

14-Nourouzi, S., M. Shakeri, and M. Habibnia, Frictions stir welding of dissimilar metal Al 5050 Aluminum alloy to AISI304 stainless steel. 2013.

15- Kundu, S. and S. Chatterjee, Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni interlayer. *Materials characterization*, 2008. 59(5): p. 631-637.

16-Shang, J., et al., Effect of joining temperature on microstructure and properties of diffusion bonded Mg/Al joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012. 22(8): p. 1961-1966.

17-Yilmaz, O. and H. Celik, Electrical and thermal properties of the interface at diffusion-bonded and soldered 304 stainless steel and copper bimetal. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. 141(1): p. 67-76.

18-Kundu, S. and S. Chatterjee, Diffusion bonding between commercially pure titanium and microduplex stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2008. 480(1-2): p. 316-322.

19-Gould, J.E. and Z. Feng, Heat flow model for friction stir welding of aluminum alloys. *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, 1998. 7(2): p. 185-194.

20-Atasoy, E. and N. Kahraman, Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer. *Materials characterization*, 2008. 59(10): p. 1481-1490.

21-Schleisiek, K., et al., Diffusion welding parameters and mechanical properties of martensitic chromium steels. *Journal of nuclear materials*, 2000. 283: p. 1196-1200.

22-Derby, B. and E. Wallach, Diffusion bonding: development of theoretical model. *Metal Science*, 1984. 18(9): p. 427-431.

23-Jamaati, R. and M.R. Toroghinejad, Manufacturing of high-strength aluminum/alumina composite by accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*, 2010. 527(16-17): p. 4146-4151.

24- Satyanarayana, V., G.M. Reddy, and T. Mohandas, Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005. 160(2): p. 128-137.

25-Kolhe, K.P. and C. Datta, Prediction of microstructure and mechanical properties of multipass SAW. *Journal of materials processing technology*, 2008. 197(1-3): p. 241-249.

26-Kazakov, N.F., Diffusion bonding of materials. 2013: Elsevier.

27- Barrena, M., L. Matesanz, and J.G. de Salazar, Al₂O₃/Ti₆Al₄V diffusion bonding joints using Ag-Cu interlayer. *Materials Characterization*, 2009. 60(11): p. 1263-1267.

28-Dekeyser, W.L., Geometrical accuracy of wire-EDM. *Proc. of ISEM-9*, 1989, 1989: p. 226-232.

پی نوشت

- 1- گروه مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران
- 2- دانشجوی کارشناسی تکنولوژی جوشکاری، دانشگاه فنی و حرفه ای
- 3- گروه مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران

مانع از رهاسازی تنش پسماند می شوند؛ به تدریج استحکام کششی و سختی کاهش می یابد [۳۱].



شکل ۱۲- آزمون کشش برای نمونه A

بطور کلی می توان گفت که در مورد جوشکاری نفوذی با افزایش دمای اتصال دهی در یک زمان ثابت شاهد افزایش سطح مورد اتصال و امتزاج بیشتر دو فلز و البته از طرفی افزایش میزان آخال ها و ناپیوستگی ها در فصل مشترک جوش افزایش می یابد [۳۲].

منابع

- 1- بررسی تجربی رفتار سخت شوندگی و تاثیر تعداد سیکل پیش رچتینگ بر عمر خستگی قطعات جوشکاری شده آلومینیوم ۲۰۲۴، امینی و سایرین، دومین کنفرانس بین المللی و سومین همایش ملی کاربرد فناوری های نوین در علوم مهندسی، ۲۰۱۶
- 2- Liu, L., D. Ren, and F. Liu, A review of dissimilar welding techniques for magnesium alloys to aluminum alloys. *Materials*, 2014. 7(5): p. 3735-3757.
- 3- Davis, J.R., *Aluminum and aluminum alloys*. 1993: ASM international.
- 4- Rhodes, C., et al., Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. *Scripta materialia*, 1997. 36(1): p. 69-75.
- 5- McLean, E., *Aluminum. Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 1965. 9: p. 978-998.
- 6- Properties, A., *Selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials*, vol. 2. ASM International, Materials, Park, OH, 1990.
- 7- ع. راس-تکدار، جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن. جهاد دانشگاهی، واحد اصفهان، ۱۳۹۱
- 8- Engdahl, T., et al., Investigation of fine scale precipitates in Al-Zn-Mg alloys after various heat treatments. *Materials Science and Engineering: A*, 2002. 327(1): p. 59-64.
- 9- Reis, D.A., et al. Effect of artificial aging on the mechanical properties of an aerospace aluminum alloy 2024. in *Defect and Diffusion Forum*. 2012. Trans Tech Publ.
- 10- Totten, G.E. and D.S. MacKenzie, *Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy Production and Materials Manufacturing*. 2003: CRC press.
- 11- Cheng, S., et al., Optimizing the strength and ductility of fine structured 2024 Al alloy by nano



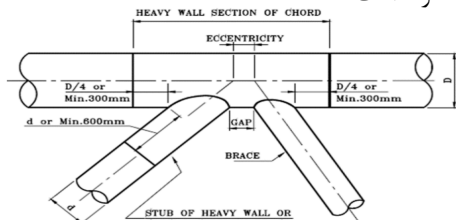
همجواری جوش‌ها

مهندس عبدالوهاب ادب آوازه^۱



شکل ۱- همجواری جوش‌ها در لوله کشی

کد **DNVGL-ST-0126** (سازه‌های تکیه‌گاهی توربین بادی)، کمینه فاصله بین دو جوش محیطی همجواری را ۳۰۰ میلی‌متر برای لوله‌های با قطر خارجی کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر پیشنهاد کرده است و اظهار می‌کند که این کمینه فاصله براساس تجربه عملی ارایه شده است. فاصله‌های کوتاه‌تر ممکن است مناسب باشد، اما نیاز به بررسی و اثبات از نظر مقاومت ضربه‌ای و فاکتور تمرکز تنش دارد. استاندارد نروژی **NORSOK N-400** (طراحی سازه‌های فلزی) برای اتصالات سازه‌های دریایی، کمینه فاصله سر جوش اصلی لوله را با جوش انشعاب مایل، یک چهارم قطر و کمینه ۳۰۰ میلی‌متر ارائه کرده است و همچنین فاصله سر جوش لوله انشعاب را از جوش انشعاب لوله اصلی معادل قطر لوله انشعاب و کمینه ۶۰۰ میلی‌متر پیشنهاد کرده است.



شکل ۲- همجواری جوش در سازه‌های دریایی

مقدمه

جوشکاری برای اتصال دادن قطعات (ساده تا مرکب و پیچیده) از جنس‌های مختلف (فولادی تا آلیاژهای پیشرفته) در کاربری‌های متفاوت (استاتیک و دینامیک) و شرایط کاری و آب و هوایی متفاوت (اتمسفریک تا تحت فشار، خشکی و دریایی) روشی به‌گزین است.

در جوشکاری قطعات مختلف به یکدیگر در یک مجموعه مهندسی، گاهی درز جوش‌ها در مجاورت و نزدیکی هم قرار می‌گیرند، در مواردی دیگر، جوش تقویتی دور در یچه ایجاد شده در مخازن به جوش‌های طولی یا حلقه‌ای نزدیک می‌شوند یا حتی برخورد می‌کنند. در لوله‌کشی‌ها نیز علاوه بر نزدیکی دوسر جوش محیطی، جوش تقویتی دور لوله انشعاب به جوش‌های دیگر لوله‌کشی نزدیک می‌شود.

در خط لوله نیز گاهی به دلایل مختلف از جمله تعمیر مکرر یک سر جوش لوله یا بریدن کامل یک سر جوش لوله و ایجاد فاصله، نیاز به جایگزین کردن لوله کوتاهی بین آنها می‌باشد که نیاز به تعیین کمینه طول آن می‌باشد. نگهداری کمینه فاصله مجاز بین جوش‌های همجواری همیشه موضوع گفت‌وگو بین مهندسان طراحی، مهندسان جوش/بازرسان جوش و مهندسان پیمانکاری بوده است. در این مقاله همجواری با نزدیکی جوش‌ها از استانداردها یا مشخصات فنی پروژه‌ها و پژوهش‌های انجام شده ارائه می‌شود.

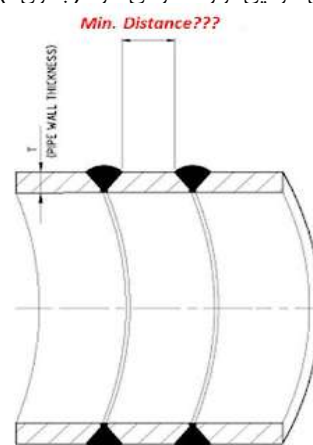
همجواری جوش‌ها در لوله‌کشی

هدف از رعایت کمینه فاصله همجواری جوش‌ها، نداشتن هم پوشانی منطقه تأثیر حرارت جوش‌ها و افزون نشدن تنش پسماند بین آنها می‌باشد.

BS2633 (جوشکاری قوسی کلاس I لوله کشی های فولاد فریتی)
فاصله پنجه تا پنجه جوش های لب بلب مجاور حتی المقدور باید کمتر از چهار برابر ضخامت اسمی لوله نباشد.

BS 4515 (مشخصات جوشکاری خط لوله فولادی در خشکی و دریا)
فاصله همجواری پنجه تا پنجه جوش های لب بلب نباید از چهار برابر ضخامت لوله کمتر باشد.

BS 2971 (جوشکاری قوسی کلاس II لوله کشی های فولاد کربنی برای انتقال سیالات)
اگر فاکتورهای طراحی طوری هستند که از برخورد بیش از دو درز جوش نمی توان پرهیز کرد، احتیاط های مناسب که در نظر گرفته می شود باید بین طرفین قرار داد توافق شود (جدول ۱).



شکل ۳- فاصله پنجه تا پنجه دو جوش لب بلب لوله

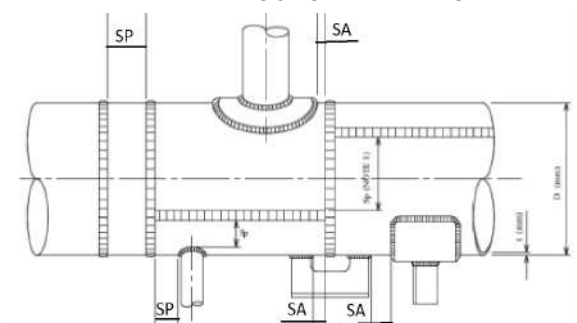
IPS-C-PI-240(2)
استاندارد اجرایی برای سیستم لوله کشی داخل کارخانه در لوله های با قطر اسمی ۳۰۰ میلیمتر به پایین، فاصله لبه های دو جوش محیطی لب به لب باید حداقل ۵۰ میلیمتر بوده و از چهار برابر ضخامت اسمی لوله نباید بهم نزدیکتر باشد. برای لوله های بزرگتر از قطر اسمی ۳۰۰ میلیمتر، حداقل فاصله مجاز دو جوش ۱۰۰ میلیمتر می باشد.

ASME B31.1
این استاندارد لوله کشی نیروگاه در مورد چند دریچه موجود در لوله کشی اشاره می کند که ترجیح داده می شود که دریچه های انشعابی طوری فاصله داده شوند که تقویتی آن ها همپوشانی پیدا

نکند.
در صورتی که فاصله کمتری لازم باشد الزامات زیر برآورده شود:
- دو دریچه یا بیشتر باید با یک تقویتی یکپارچه تقویت شوند که استحکام تقویتی همانند استحکام معادل تقویتی های جداگانه داشته باشد.
- وقتی بیش از دو دریچه مجاور با یک تقویتی یکپارچه انجام شود، فاصله بین مرکز تا مرکز دو دریچه از یک و نیم برابر قطر میانگین آنها کمتر نباشد.

مشخصات فنی پروژه ها

در مشخصات فنی یک پروژه، فاصله بین دو جوش تحت فشار، $2t$ یا کمینه ۴۰ میلیمتر است که در شکل (۴) با SP نشان داده شده است. فاصله بین جوش ملحقات لوله کشی با جوش های دیگر، $2t$ یا کمینه ۴۰ میلیمتر است که در شکل SA نشان داده شده است. درز جوش طولی لوله های متصل شونده به یکدیگر نباید در یک راستا باشند و کمینه فاصله آن ها ۱۵۰ میلیمتر عنوان شده است.



شکل ۴- جدایش بین جوش ها

در مشخصات فنی پروژه لوله کشی دیگری، فاصله درز جوش لوله انشعاب از درز جوش محیطی و درز جوش طولی لوله اصلی را L نشان داده اند (شکل ۵). L باید سه برابر ضخامت لوله اصلی باشد اما نیازی نیست که از ۱۰۰ میلیمتر بیشتر باشد. فاصله محیطی بین دو درز جوش طولی اصلی را با $L1$ نشان داده اند. $L1$ باید پنج برابر ضخامت لوله اصلی یا بیشتر باشد.



شکل ۵- فاصله درز جوش لوله انشعاب از درز جوش های لوله اصلی

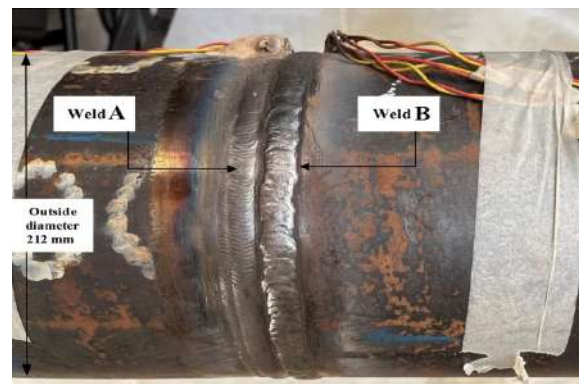
جدول ۱- کمینه فاصله بین پنجه جوش ها

ملاحظات	قابل اعمال	کمیته فاصله بین پنجه جوش ها	استاندارد
$t =$ ضخامت اسمی لوله	لوله کشی فولاد فریتی	$4t$	BS 2633:1987
$t =$ ضخامت لوله	خط لوله های فولاد کربن - منگنز	$4t$	BS 4515:2009
-	لوله کشی فولاد کربنی	با توافق طرفین	BS 2971:1991
$T =$ ضخامت طراحی	مخازن تحت فشار	$4e$ یا ۱۰۰ میلیمتر هر کدام بزرگتر است	PD 5500:2012
با اشاره به چپ و راست بودن جوش های طولی			

در پروژه لوله کشی دیگری برای همجواری جوش WPS نوشتند و فاصله پنجه تا پنجه دو جوش لب بلب را پنج، ده و پانزده میلیمتر در نظر گرفتند و از نمونه های جوش داده شده WPQR تهیه کردند. برای تهیه WPQR آزمایش های غیر مخرب و مخرب به شرح زیر را انجام دادند:

- بازرسی چشمی
- رادیوگرافی - آزمایش ماکرو
- آزمایش کشش عرضی
- آزمایش خمش عرضی
- آزمایش ضربه
- سختی سنجی

نتایج بازرسی چشمی و رادیوگرافی هر دو جوش (A, B شکل ۶) قابل قبول بودند. نتایج سختی سنجی برای فاصله نزدیک ۵ میلیمتری، سختی بالاتری را نشان داد اما مقدار سختی هنوز در محدوده قابل قبول قرار داشت.



شکل ۶- همجواری جوش ها در نمونه ای که به عنوان قسمتی از پروژه پژوهشی PhD در دانشگاه استوانجر کشور نروژ انجام شده است.

نتایج آزمایش ضربه برای فاصله نزدیک ۵ میلیمتر، انرژی کمتری نسبت به فواصل ۱۰ و ۱۵ میلیمتری نشان داد که حاصل افزایش سختی و ممانعت بالا می باشد.

نتایج آزمایش ماکرو رضایتبخش بود. استحکام کششی همجواری ۵ میلیمتری، قدری کمتر از استحکام کششی مربوط به همجواری ۱۰ و ۱۵ میلیمتری بود. نتایج آزمایش خمش هم رضایتبخش بود.

INSO 8888

استاندارد ملی ایران با عنوان "لوله های فولادی مورد استفاده در خطوط لوله - ویژگی ها" راجع به همجواری جوش ها در ساخت لوله به موارد زیر اشاره دارد:

- جوش های انتهای کلاف / ورق نباید در لوله های با درز جوش طولی وجود داشته باشد.
- برای لوله های ساخته شده با درز جوش مارپیچی، نقطه اتصال جوش های انتهای کلاف / ورق و درز جوش های مارپیچی باید دست کم ۳۰۰ میلیمتر از انتهای لوله فاصله داشته باشد.
- در صورت توافق جوش های انتهای ورق / کلاف در لوله با درز

مارپیچی می تواند در دو انتهای لوله وجود داشته باشد که در این صورت دست کم باید از نظر پیرامونی ۱۵۰ میلیمتر بین جوش مارپیچ اصلی و جوش انتهایی فاصله وجود داشته باشد.

IGS-C-PL-100(2)

"مشخصات فنی اجرا و راه اندازی خطوط انتقال گاز فشار قوی" در مورد مجاورت جوش ها موارد زیر را اشاره کرده است:

- لوله ها باید به طریقی قرار داده شوند که انتهای جوش های طولی آن ها با یکدیگر هم راستا نبوده و کمینه فاصله ای معادل ۱۰ برابر ضخامت جدار لوله نسبت به یکدیگر خارج از راستا باشند.
- وجود یک جوش محیطی در محدوده ۱۵۰ میلیمتری یک تکیه گاه مجاز نمی باشد.

- کمینه فاصله دو سر جوش محیطی یک برابر ترجیحا "یک و نیم برابر قطر لوله و برای قطر چهار اینچ و کمتر کمینه فاصله دو جوش محیطی ۱۵ سانتیمتر باشد.

- تبدیل ها، سه راهی ها و زانو های استاندارد که ابعاد آن ها متناسب با ابعاد لوله ها می باشد و دارای پخ لازم هستند باید طبق نقشه به طور لب به لب به لوله ها جوش داده شوند. کیفیت جوشکاری این اتصالات مشابه جوشکاری خطوط لوله اصلی می باشد. جوشکاری اتصالات به یکدیگر و اتصالات به شیرها بلامانع است، ولی ترجیحا "بهتر است که فاصله دو جوش متوالی به میزان حداقل یک برابر قطر لوله حفظ شود". چنانچه جوش معیوبی که باید بریده شود در محل Tie-In طول خط لوله باشد، لازم است یک قطعه از لوله کمینه ۱/۵ برابر قطر لوله بریده شود و با یک قطعه لوله جدید جایگزین و جوشکاری شود.

همجواری جوش تقویتی دریچه های مخزن ذخیره

برای اتصال نازل ها و منهول به بدنه مخزن ذخیره لازم است دریچه های دایره ای روی بدنه مخزن بریده شود. با ایجاد سوراخ های دایره ای، بدنه مخزن ضعیف می شود و برای این منظور از ورق تقویتی استفاده می شود.

استاندارد API 650 برای ورق تقویتی دور نازل یا منهول، دو شکل RTR و LTR در نظر گرفته است. نوع معمول ورق تقویتی به سه صورت دایره ای شکل یا Diamond یا ورق توکار ضخیم شده اجرا می شود.

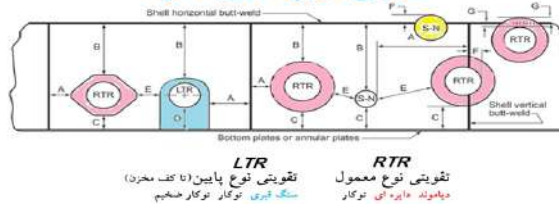
نوع ورق تقویتی LTR به سه صورت سنگ قبری و یا ورق توکار یا ورق توکار ضخیم شده است که تا کف مخزن ادامه دارد. دریچه های با اندازه کوچک که نیاز به تقویت ندارند یا بدنه تقویت یکپارچه دارد، از نوع S-N محسوب می شوند.

همجواری جوش تقویتی دریچه های مخزن تحت فشار

طبق ASME Section VIII Division 1 برای همجواری جوش تقویتی دریچه های مخزن تحت فشار موارد زیر مطرح است:

طبق UG-39 در مورد دریچه های چندتایی که هیچیک از آن ها، قطرشان از نصف قطر عدسی بیشتر نباشد و قطر میانگین دو دریچه مجاور از یک چهارم قطر عدسی بیشتر باشد، می توان هر دریچه را بطور جداگانه تقویت کرد.

تقویتی دریچه های مخزن

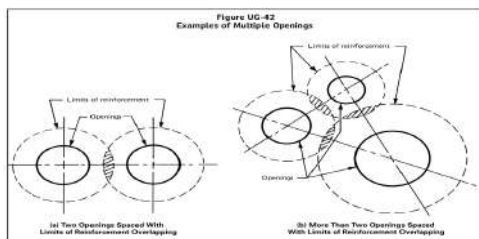


شکل ۷- جوش تقویتی دریچه های مخزن ذخیره

جدول ۲- فاصله جوش تقویتی دریچه های مخزن ذخیره

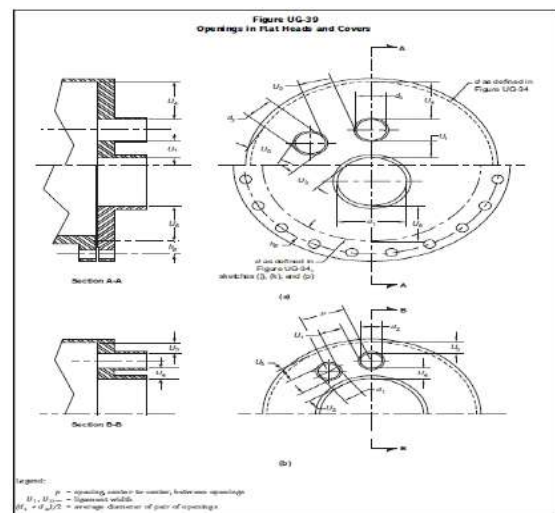
Variables		Reference	Minimum Dimension Between Weld Toes or Weld Centerline (Notes 1, 2, 3, and 4)						
Shell t	Condition	Para-graph Number	A	B	C	D (5 only)	E	F (6)	G (6)
$t \leq 13 \text{ mm}$ ($t \leq 1/2 \text{ in.}$)	As welded or PWHT	5.7.3.2	150 mm (6 in.)	75 mm (3 in.)			75 mm (3 in.)		
		5.7.3.3			75 mm (3 in.)				
		5.7.3.3				Table 5.6a and Table 5.6b		Lesser of $8r$ or $1/2 t$	$8r$
		5.7.3.4							
$t > 13 \text{ mm}$ ($t > 1/2 \text{ in.}$)	As Welded	5.7.3.1 a	$8W$ or 250 mm (10 in.)	$8W$ or 250 mm (10 in.)			$8W$ or 150 mm (6 in.)		
		5.7.3.1 b							
		5.7.3.3			$8W$ or 250 mm (10 in.)	Table 5.6a and Table 5.6b		Lesser of $8r$ or $1/2 t$	$8r$
		5.7.3.4			75 mm (3 in.) for S-N				
$t > 13 \text{ mm}$ ($t > 1/2 \text{ in.}$)	PWHT	5.7.3.2	150 mm (6 in.)	75 mm (3 in.) or $(2^{1/2} t)$			75 mm (3 in.) or $(2^{1/2} t)$		
		5.7.3.3			75 mm (3 in.) or $(2^{1/2} t)$ for S-N	Table 5.6a and Table 5.6b		Lesser of $8r$ or $1/2 t$	$8r$
		5.7.3.3							
		5.7.3.4							

NOTE 1 If two requirements are given, the minimum spacing is the greater value, unless otherwise noted.
 NOTE 2 Weld spacings are measured to the toe of a fillet weld, the centerline of an insert or thickened insert plate butt-weld, or the centerline of a shell butt-weld.
 NOTE 3 t = shell nominal thickness; r = radius of opening.
 NOTE 4 W = the largest weld size around the periphery of the fitting(s); for fillet welds the leg length along the tank shell, for butt welds the thickness of the insert plate at the weld joint.
 NOTE 5 D = spacing distance established by minimum elevation for low-type reinforced openings from Table 5.6a and Table 5.6b, column 9.
 NOTE 6 Purchaser option to allow shell openings to be located in horizontal or vertical shell butt-welds. See Figure 5.9.



شکل ۹- تقویتی یکپارچه برای دریچه ها در مخزن تحت فشار

در این صورت فاصله بین دو دریچه مجاور ($U1, U2, U3$) از شکل (UG-39) نباید از یک چهارم قطر کوچکتر آن دو، کمتر باشد.



شکل ۸- فاصله دریچه ها از یکدیگر

وقتی دو دریچه مجاور در فاصله ای قرار بگیرند که تقویتی آن ها طبق شکل UG-42 با هم همپوشانی پیدا کنند، می توان تقویتی آن دو را یکپارچه در نظر گرفت.

- منابع
- مشخصات فنی اجرا و راه اندازی خطوط انتقال گاز فشار قوی IGS-C-PL-100(2)
 - صنعت نفت- لوله های فولادی مورد استفاده در خطوط لوله - ویژگی ها INSO 8888
 - API B650 - Welded Tanks For Oil Storage.
 - ASME B31.1- Power Piping.
 - ASME Section VIII-Division 1- Rules for Construction of Pressure Vessels.
 - BS 2633 - Class I arc welding of ferritic steel pipework for Carrying fluids.
 - BS 2971- Class II arc Welding of Carbon Steel Pipework for Carrying of fluids.
 - BS 4515 - Specification for Welding of Steel Pipelines on Land and Offshore.
 - DNVGL-ST-0126 - Support Structures for Wind turbine, DNVGL.
 - IPS-C-PI-240(2)- استاندارد اجرایی برای سیستم لوله کشی داخل کارخانه
 - NORSOK N-400 Standard- Design of Steel Structures, Norway.

پی نوشت

1-انجمن جوشکاری و آزمایش های غیرمخرب ایران

ساخت تیتانیوم متخلخل با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

شیرین وردک^۱، سهیل شاتوتی^۲، شهاب زنگنه^۳

چکیده

در این پژوهش، برای نخستین بار یک روش جدید مقرون به صرفه برای ساخت داربست تیتانیوم متخلخل برای کاربردهای ایمپلنت معرفی شده است. نخست صفحات تیتانیوم و روی به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) به هم متصل شدند. سپس روی زدایی، بوسیله غوطه وری نمونه های متصل شده در محلول اسید کلریدریک (HCl) انجام شد. نتایج نشان داد که پس از آلیاژ زدایی یک ساختار تیتانیوم متخلخل با مورفولوژی باز و به هم پیوسته با موفقیت ساخته شد.

کلمات کلیدی: مواد متخلخل؛ بیومواد؛ خوردگی...

مقدمه

توسعه داربست های تیتانیوم متخلخل در دهه گذشته به یک موضوع مورد علاقه در علم پزشکی تبدیل شده است، زیرا آن ها با موفقیت مشکل عدم تطابق مدول یانگ بین بافت استخوان میزبان و ایمپلنت های تیتانیوم را حل می کنند. این عدم تطابق باعث ایجاد "سپر تنشی" می شود که باعث بافت مردگی و تغییر شکل بافت استخوانی پیرامون ایمپلنت می شود و در نهایت به شکست ایمپلنت می انجامد. در حالی که ساختارهای متخلخل به هم پیوسته می توانند مدول یانگ را کاهش داده و از تغییر شکل جلوگیری کنند [۱-۳]. افزون بر این، با رشد یک بافت استخوانی جدید بر روی سطوح داخلی داربست متخلخل، می توان به اتصال مکانیکی میان ایمپلنت و بافت استخوان میزبان دست یافت که به پایداری زیاد ایمپلنت می انجامد [۴].

تاکنون روش های گوناگونی با هدف تولید داربست های تیتانیوم متخلخل مانند ذوب لیزری انتخابی معرفی شده اند [۱-۳]. فضا ساز [۵-۶] و چاپ سه بعدی [۷-۸]. برخلاف پتانسیل بالای فرایند در ساخت سازه ها، دستگاه گران قیمت آن مشکلات مالی ایجاد کرده و

کاربرد آن را محدود می کند. افزون بر این، معایب دیگری مانند استفاده از تجهیزات نکه دارنده که نهایتاً منجر به توسعه سطوح نامطلوب می شود. لازم به ذکر است که فرایند پیچیده طراحی که نیاز به دانش ویژه دارد یکی دیگر از مشکلات است. یکی از روش هایی که می توان به آسانی برای تولید ساختارهای متخلخل سه بعدی یا انواع نانو متخلخل استفاده کرد، آلیاژ زدایی است که با انحلال الکتروشیمیایی فعال ترین فلز از سیستم های فلزی دوتایی یا سه تایی انجام می شود [۹]. آلیاژسازی، حذف انتخابی فعال ترین فلز است و به عنوان خوردگی گالوانیکی یا دو فلزی دسته بندی می شود [۱۰-۹]. حذف روی از برنج ها (آلیاژهای Cu-Zn) متداول ترین نوع آلیاژسازی است که به آن روی زدایی می گویند.

ساختارهای فلزی نانومتخلخل طلا، نقره، مس، نیکل، کبالت و پالادیم با روش های گوناگونی ساخته می شوند، اما آلیاژ زدایی شیمیایی و الکتروشیمیایی قادر به تولید ساختارهای نانومتخلخل با تخلخل های متصل است [۱۱]. تاکنون، آلیاژسازی سیستم های فلزی گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. Au-Ag، Au-Pt، Au-Pt-Ag، Al-Ag، Cu-Mn، Ag-Au، Ag-Au-Pt و

تیتانیوم-روی را پیش و پس از فرایند آلیاژ زدایی نشان می دهد. همان گونه که تصاویر نقشه توزیع عنصری نشان می دهد، شکل (3-ج)، ساختار TMAZ از عناصر تیتانیوم و روی تشکیل شده است که به طور یکنواخت توزیع شده اند (نقاط زرد نشان دهنده مناطق غنی از روی هستند، در حالی که نقاط ارغوانی مناطق غنی از تیتانیوم را نشان می دهند). ریزساختار ناحیه اتصال Ti-Zn پس از آلیاژ زدایی با محلول HCl در شکل (3-ب) نشان داده شده است.



شکل ۲- ماکرو ساختار اتصال جوش داده شده Ti/Zn

مشاهده می شود که پس از آلیاژ زدایی، یک ساختار تیتانیوم متخلخل با تخلخل های به هم پیوسته تشکیل شده است. بر اساس اندازه گیری های دقیق، اندازه تخلخل ها از ۰/۱ تا ۱/۸ μm متغیر است. نقشه عنصری نمایش داده شده در شکل (3-د) توزیع یکنواخت عنصر تیتانیوم (که در اینجا با نقاط بنفش نشان داده شده است) را از طریق حذف عنصر روی از طریق روش آلیاژ زدایی نشان می دهد. افزون بر این، مقایسه الگوهای EDS ناحیه جوش داده شده پیش و پس از آلیاژ زدایی (شکل 3-ه و 3-ی) نشان می دهد که کاهش قابل توجه شدت پیک روی پس از فرایند آلیاژ زدایی وجود دارد. به این معنی که غلظت قابل توجهی Zn از نمونه اولیه حذف شده است. نتایج EDS کاهش غلظت روی را از ۴۲/۲ به ۰/۲ درصد وزنی تعیین کرد. توزیع اندازه تخلخل ها نیز از طریق تصاویر SEM برآورد شده است.

شکل (3-و) یک نمودار ستونی با توزیع نرمال اندازه تخلخل ها را نشان می دهد. می توان نتیجه گرفت که در حالی که اندازه تخلخل ها کمتر از ۱/۸ μm است، قطر یک چهارم آن ها بین ۰/۶ تا ۰/۸ μm متغیر است.

شکل (۴) الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) را پیش و پس از آلیاژ زدایی نشان می دهد. پیک های پراش شده در زوایای $36/4^\circ$ ، $43/3^\circ$ و 39° درجه متعلق به صفحات (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱) و (۱۰۱) روی hcp هستند و سایر پیک های پراش شده در زوایای $35/1^\circ$ ، $38/5^\circ$ ، $40/2^\circ$ و 53° به ترتیب با صفحات کریستالی (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱) و (۱۰۲) تیتانیوم hcp هم خوانی دارند. در این پژوهش برای شناسایی فاز و تحلیل پیک از نرم افزار High score plus استفاده شد. برای فرایند ماکرو اچ از محلولی حاوی اسیدهای HCl و HF استفاده شد. افزون بر این، برای مطالعه مورفولوژی سطح و نقشه های عنصری، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM، Tescan Mira3-XMU) همراه با طیف سنج پراش پرتو ایکس (EDS) استفاده شد. الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه ها پس از آلیاژ زدایی نشان می دهد که پیک های مربوط به روی به طور کامل حذف شده است و تنها پیک های مربوط به تیتانیوم باقی مانده است.

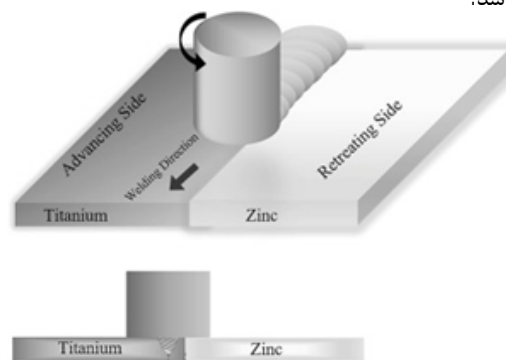
نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش، ساختار متخلخل Ti از طریق روی زدایی نمونه

هم چنین گزارش شده است که عوامل ویژه ای مانند ترکیب شیمیایی آلیاژ، نوع و غلظت الکترولیت، پتانسیل سلول الکترودشیمیایی، زمان غوطه وری به طور قابل توجهی بر اندازه تخلخل ها تأثیر می گذارد [۱۲-۱۳]. به دلیل مقرون به صرفه بودن و ساده بودن، آلیاژ زدایی به محققان این امکان را می دهد که یک فلز متخلخل را با کم ترین امکانات موجود ایجاد کنند، با این حال، دست یابی به شکل مطلوب نیازمند تلاش زیاد محققان است. هم چنین تیتانیوم و روی مهم ترین جنبه چالش برانگیز این پژوهش بود. از آن جایی که تفاوت میان نقطه ذوب روی و تیتانیوم به طور قابل توجهی زیاد است (به ترتیب $419/5^\circ\text{C}$ و 1668°C) که دشواری فرایند ترکیب را افزایش می دهد. هدف از این مطالعه معرفی یک روش جدید مقرون به صرفه از طریق آلیاژ زدایی برای ساخت داربست تیتانیوم متخلخل است که یک مورفولوژی باز و به هم پیوسته را تشکیل می دهد. بنابراین، این فرایند نو می تواند گزینه مناسب را برای نسل بعدی داربست های مدرن معرفی کند.

مواد و روش پژوهش

صفحات تیتانیوم و روی موجود در بازار با ابعاد $10 \times 10 \times 6 \text{ mm}$ با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جوش داده شدند. شماتیک فرایند FSW در شکل (۱) نشان داده شده است. به منظور جوشکاری از ابزار کاربرد تنگستن استفاده شد و قطر شانه ابزار، طول پین و نوک پین به ترتیب ۱۶، ۳ و ۵ mm در نظر گرفته شد. سرعت چرخش پین در این پژوهش ۹۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. افست در نظر گرفته شده پین برابر با ۵ mm است. آلیاژ زدایی در این تحقیق با غوطه وری نمونه ها در محلول ۳۷/۵ درصد HCl انجام شد. شناسایی فاز با پراش اشعه ایکس با پراش $\text{Cu-K}\alpha$ ($1/54^\circ$) انجام شد.



شکل ۱- طرح واره ای از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد استفاده در این پژوهش

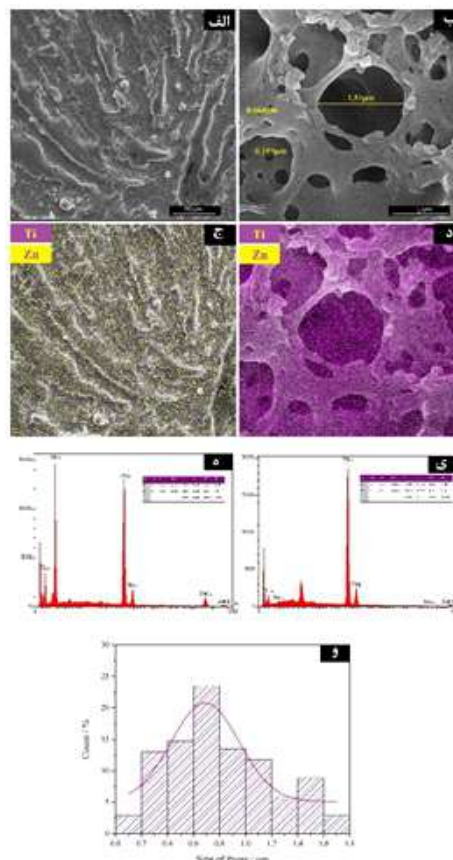
نتایج و بحث

شکل (۲) ساختار ماکرو جوش تیتانیوم-روی را نشان می دهد. منطقه اختلاط، منطقه تحت تأثیر حرارت مکانیکی و منطقه تحت تأثیر حرارت به طور مشخص نشان داده شده است. شکل (3-الف و 3-ب) تصاویر FE-SEM از ناحیه جوش اصطکاکی اغتشاشی

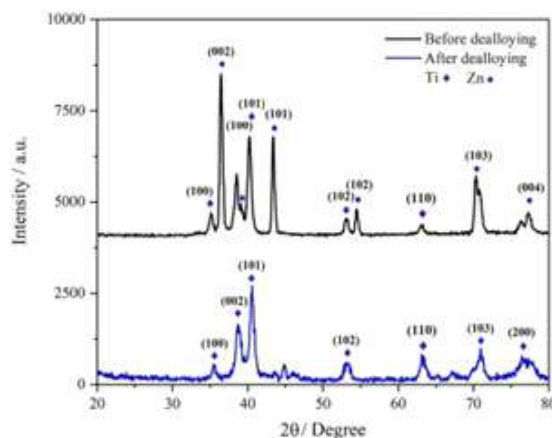
هزینه های مورد نیاز طراحی و عملکرد دستگاه ها را مانند آن چه در روش SLM مورد نیاز است کاهش دهد، بلکه یک ابزار ساده را نیز ارائه می دهد. نتایج نشان داد که این یک روش بالقوه برای ساخت ساختار Ti متخلخل با مورفولوژی باز و به هم پیوسته است.

منابع

- 1- Yu, G., Li, Z., Li, S., Zhang, Q., Hua, Y., Liu, H., Wang, X., 2020. "The select of internal architecture for porous Ti alloy scaffold: A compromise between mechanical properties and permeability". *Materials & Design*, 192, July, pp. 108754.
- 2-Aghajanian, A. H., Bigham, A., Khodaei, M., Kelishadi, S. H., 2019. "Porous titanium scaffold coated using forsterite/poly-3-hydroxybutyrate composite for bone tissue engineering". *Surface and Coatings Technology*, 378, November, pp. 124942.
- 3-Ouyang, P., Dong, H., He, X., Cai, X., Wang, Y., Li, J., Jin, Z., 2019. "Hydromechanical mechanism behind the effect of pore size of porous titanium scaffolds on osteoblast response and bone ingrowth". *Materials & Design*, 183, December, pp. 108151.
- 4-Arifvianto, B., Leeftang, M. A., Zhou, J., 2016. "Characterization of the porous structures of the green body and sintered biomedical titanium scaffolds with micro-computed tomography". *Materials Characterization*, 121, November, pp. 48-60.
- 5-Arifvianto, B., Leeftang, M. A., Zhou, J., 2017. "Diametral compression behavior of biomedical titanium scaffolds with open, interconnected pores prepared with the space holder method". *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 68, April, pp. 144-154.
- 6-Khodaei, M., Valanezhad, A., Watanabe, I., Yousefi, R., 2017. "Surface and mechanical properties of modified porous titanium scaffold". *Surface and Coatings Technology*, 315, April, pp. 61-66.
- 7- He, P., Zhang, H., Li, Y., Ren, M., Xiang, J., Zhang, Z., Yang, S., 2020. "1alpha,25-Dihydroxyvitamin D3-loaded hierarchical titanium scaffold enhanced early osseointegration". *Materials Science and Engineering: C*, 109, April, pp. 110551.
- 8-Vlad, M. D., Aguado, E. F., Gonzalez, S. G., Ivanov, I. C., indilar, E. V., Poat, I., Lpez, J. L., 2020. "Novel titanium-apatite hybrid scaffolds with spongy bone-like micro architecture intended for spinal application: In vitro and in vivo study". *Materials Science and Engineering: C*, 110, May, pp. 110658.
- 9-Yang, L., 2021. *Techniques for Corrosion Monitoring*. Woodhead Publishing, England.
- 10-Coker, A. K., 2013. *Ludwig's applied process design for chemical and petrochemical plants*. gulf professional publishing, New York.
- 11-Ben Mbarek, W., Pineda, E., Escoda, L., Suol, J. J., Khitouni, M., 2018. "Dealloying of Cu-Mg-Ca Alloys". *Metals*, 8(11), November, pp. 919.
- 12-Lu, X., Bischoff, E., Spolenak, R., Balk, T. J., 2007. "Investigation of dealloying in Au-Ag thin films by quantitative electron probe microanalysis". *Scripta Materialia*, 56(7), April, pp. 557-560.
- 13- Xu, C., Wang, R., Chen, M., Zhang, Y., Ding, Y., 2010. "Dealloying to nanoporous Au/Pt alloys and their structure sensitive electrocatalytic properties". *Physical*



شکل ۳- تصاویر SEM از نمونه ها الف- پیش و ب- پس از آلیاژ زدایی، توزیع عنصری نمونه همراه با آنالیز EDS ج و ه- پیش و د و ی- پس از آلیاژ زدایی، و- یک نمودار ستونی با توزیع نرمال اندازه تخلخل ها.



شکل ۴- الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه های آماده شده پیش و پس از آلیاژ زدایی

Ti-Zn جوش اصطکاکی اغتشاشی ساخته شد. با توجه به همه روش هایی که پیش تر معرفی شده اند، FSW نه تنها می تواند

16-Zhang, X. M., Li, Y. X., Zhang, H. W., Yuan, L. I. U., 2015. "Evolution of porous structure with dealloying corrosion on Gasar Cu-Mn alloy". Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25(4), April, pp. 1200-1205.

.....

پی نوشت

- 1- کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان؛
- 2- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان؛
- 3- استادیار گروه مهندسی مواد و نساجی، دانشکده فنی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

Chemistry Chemical Physics, 12(1), October, pp. 239-246.

14-Ye, X. L., Lu, N., Li, X. J., Du, K., Tan, J., Jin, H. J., 2014. "Primary and secondary dealloying of Au (Pt)-Ag: structural and compositional evolutions, and volume shrinkage". Journal of The Electrochemical Society, 161(12), Number, pp. C517.

15-Song, T., Gao, Y., Zhang, Z., Zhai, Q., 2011. "Dealloying behavior of rapidly solidified Al-Ag alloys to prepare nanoporous Ag in inorganic and organic acidic media". CrystEngComm, 13(23), August, pp. 7058-7067.



بررسی علل شکست تُرد جوش مخزن کروی آلیاژ تیتانیوم جوشکاری شده با روش تیگ

یاسر وحیدشاد^۱، امیرحسین خدابخشی^۲، علی اصغر سلیمانی^۳

چکیده

در این تحقیق، علت شکست تُرد خط جوش اصلی مخزن کروی ساخته شده از آلیاژ **Ti-6Al-4V**، مورد بررسی قرار می گیرد. برای ساخت مخزن تحت فشار، دو عدد نیم کره آلیاژ تیتانیوم **Ti-6Al-4V** با روش جوشکاری قوس تنگستن با گاز خنثی به یکدیگر جوشکاری شده اند. به دلیل حساسیت جوشکاری تیتانیوم نسبت به عناصر اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن و کربن و حل شدن این عناصر به صورت بین نشینی، مناطق حوضچه جوش، دنباله و پشت خط جوش بوسیله گاز آرگون با خلوص بالا (5N)، محافظت موضعی می شود. محافظت نامناسب منطقه جوش و نیز حرارت ورودی بیش از اندازه، باعث عدم محافظت کافی و ترکیب این عناصر با تیتانیوم شده و منجر به تشکیل ترکیب های تُرد در منطقه جوش می شود. بررسی های شکست نگاری با میکروسکوپ نوری انجام شد. نتایج نشان می دهد که شکست منطقه جوش به دلیل عدم محافظت کافی از اتمسفر هوای اطراف بوده که باعث تشکیل فاز تُرد α case و یک لایه اکسیدی نازک در منطقه جوش شده است. در فشارهای بالای داخل مخزن و در حضور تنش های پسماند، ترک در این لایه تُرد اکسیدی تشکیل شده و در فاز پایدار α case با سرعت بالایی رشد کرده و منجر به شکست تُرد می شود.

کلمات کلیدی: آلیاژ تیتانیوم، جوشکاری تنگستن با گاز خنثی، مخزن، اکسید تیتانیوم، شکست تُرد.

مقدمه

روش های جوشکاری ذوبی متفاوتی برای ایجاد اتصال در تیتانیوم و آلیاژهای تیتانیوم بکار برده می شود. فناوری جوشکاری تیتانیوم از پیچیدگی های خاص خود برخوردار است. به این دلیل که در دماهای بالای 500°C و بخصوص در مرحله ذوب شدن، به شدت در مقابل گازهای اتمسفر مانند اکسیژن، هیدروژن، نیتروژن و کربن بسیار حساس است و منجر به ایجاد تردی در منطقه جوش و منطقه متأثر از حرارت می شود. جوشکاری قوس تنگستن با گاز محافظ (GTAW) یک روش معمول و اقتصادی برای جوشکاری انواع فلزات می باشد که با استفاده از تجهیزات محافظت گاز آرگون به صورت موضعی می توان از آن برای جوشکاری فلزات فعال مانند تیتانیوم استفاده کرد [۱]. تیتانیوم فلزی، استحکام و مقاومت به خوردگی

بالایی دارد که چگالی آن برابر با 4.54 gr/cm^3 است و دمای ذوب آن نزدیک به 1660°C است. استحکام تسلیم آلیاژ تیتانیوم دو فاز **Ti-6Al-4V** حداقل 827 MPa است که می توان با آلیاژی کردن و انجام عملیات حرارتی، آن را به بیش از 1200 MPa رساند که این مقدار استحکام با استحکام فولادها برابر بوده و با توجه به چگالی تیتانیوم که تقریباً برابر ۵۵ درصد چگالی آهن است در نتیجه نسبت استحکام به وزن بالاتری نسبت به آهن و آلیاژهای آن دارد. علاوه بر این با توجه به این که تیتانیوم می تواند خواص مکانیکی خود را تا دمای نزدیک به 500°C حفظ کند، بنابراین جزء مواد مهندسی نسبتاً مقاوم، در دماهای بالا محسوب می شود [۸-۲]. با گسترش نیاز صنعت به آلیاژهای تیتانیوم، روش های اتصال این آلیاژها نیز توسعه پیدا کردند. این گروه از آلیاژها را می توان به وسیله

روش‌های ذوبی متداول مانند فرایندهایی قوس تنگستن با گاز محافظ (GTAW) [۹-۱۰]، جوشکاری قوس فلزی با گاز محافظ (GMAW) [11] قوس پلاسما (PAW) [12]، پرتو لیزر (LBW) [13] و پرتو الکترونی (EBW) [14] و جوشکاری نیمه جامد اصطکاکی اغتشاشی [۱۵] جوشکاری کرد، جوشکاری فلز تیتانیوم به دلیل تمایل شدید به اکسید شدن، پیچیدگی‌ها و دشواری‌هایی را برای طراحان ایجاد می‌کند. راه‌حل برای پیشگیری اولیه، محافظت فلز جوش و مناطق تحت تاثیر حرارت از تماس با محیط اطراف و یا هرگونه آلاینده در حین ذوب شدن، انجماد، و خنک شدن منطقه جوش ذوبی می‌باشد. بنابراین برای غلبه بر آلودگی و جذب گاز، نیاز به استفاده از محیط جوشکاری خلا، محفظه گاز خنثی و یا محافظت موضعی می‌باشد. همچنین محیط جوشکاری آلیاژهای تیتانیوم باید عاری از هرگونه آلودگی چربی، گرد و غبار، براده‌های آهن و رطوبت باشد. علاوه بر آلودگی‌های محیطی که موجب کاهش چقرمگی منطقه جوش می‌شود، رشد بیش از حد دانه‌های β اولیه در فلز جوش و همچنین در منطقه متأثر از حرارت، باعث افت خواص مکانیکی می‌شود [۱۸-۱۶]. در سال‌های اخیر جوشکاری آلیاژهای تیتانیوم مورد توجه قرار گرفته است و تحقیقات زیادی در مورد تأثیر روش‌های مختلف جوشکاری و مقایسه خواص مکانیکی و ریزساختار حاصل از فرایندهای مختلف به‌ویژه برای آلیاژ **Ti-6Al-4V** و تیتانیوم خالص تجاری صورت گرفته است. تحقیقات نشان داده است که استفاده از منابع حرارتی با انرژی متمرکز مانند پرتو لیزر برای جوشکاری ورق‌هایی با ضخامت کم، به دلیل حجم کم مذاب تشکیل شده و افزایش سرعت سرد شدن، موجب کاهش شدید جذب اکسیژن و همچنین جلوگیری از رشد بیش از حد دانه‌های بتای اولیه می‌شود [۲۰-۱۹]. همچنین تحقیقات نشان داد که جوشکاری پرتو الکترونی برای جوشکاری ورق‌های آلیاژهای تیتانیوم به دلیل محیط خلا و حرارت ورودی بسیار کم، در مقایسه با روش‌های دیگر جوشکاری، مناسب تر می‌باشد [۱۹]. علاوه بر روش‌های ذوبی، آلیاژهای تیتانیوم را می‌توان از طریق روش حلال نیمه جامد، مانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی FSW با کیفیت بسیار مناسب جوشکاری کرد [۲۰]. گزارش شده است که پس از جوشکاری تیتانیوم خالص تجاری، ریزساختار منطقه فلز جوش شامل دانه‌های بزرگ فاز β اولیه یا β استحاله یافته می‌باشد که خطوط باریک و موازی فاز β به صورت کلونی‌هایی از صفحات با جهت گیری‌های کریستالی مشابه، در داخل دانه‌های اولیه β تشکیل می‌شود [۲۱]. همانطور که می‌دانیم اکسیژن به عنوان یک عنصر پایدارکننده فاز β محسوب می‌شود. در صورت حل شدن اکسیژن در ساختار تیتانیوم، لایه α case به صورت یک لایه پیوسته و مداوم در میکروسکوپ نوری برای تیتانیوم قابل مشاهده است. این لایه با رنگ روشن پیوسته تری نسبت به ریزساختار آلیاژ در قسمت عمیق تر قطعه، قابل مشاهده است که نشان دهنده ریزساختار غالب α در آن می‌باشد [۲۲-۲۳]. همانطور که ذکر شد به دلیل تمایل تیتانیوم به واکنش شیمیایی در دمای بالا، در حین انجام فرایندهای دما بالا از جمله جوشکاری، آلیاژهای

تیتانیوم به سادگی گازهای مضر (مانند گازهای اکسیژن، هیدروژن و نیتروژن) را جذب می‌کند و مشکلاتی زیادی مانند خواص مکانیکی پایین، ترد شدن و ساختار ناپایدار ممکن است به وجود آید. بنابراین اتصال این آلیاژها نیازمند به استفاده از روش‌های جوشکاری در خلأ مانند جوشکاری با پرتو الکترونی و یا استفاده از تجهیزات و ابزار مخصوص محافظت دمش موضعی گاز آرگون، مانند محفظه گاز آرگون و یا استفاده از دنباله و پشت بند گاز محافظ می‌باشد [۲۴]. امروزه میزان استفاده از این آلیاژها به صورت سازه‌های جوشکاری شده به قدری افزایش یافته است که پس از آلیاژهای آهنی و آلومینیوم بیشترین کاربرد را در صنایع فضایی، هوافضا، نفت، گاز و پتروشیمی به خود اختصاص داده است. با استفاده از روش‌های جوشکاری ذوبی می‌توان به خواص مکانیکی فلز پایه دست یافت. اما به دلیل رشد دانه‌ها در حین جوشکاری، کاهش نرمی و یا انعطاف‌پذیری در برخی از موارد اجتناب‌ناپذیر است. درعین حال عدم کنترل شرایط جوشکاری باعث کاهش چقرمگی و مقاومت به خوردگی جوش می‌شود. اما با اعمال عملیات حرارتی پس از جوشکاری می‌توان تا حدی به ساختاری با خواص مکانیکی مطلوب، دست پیدا کرد. عدم ورود اکسیژن به حوضچه مذاب یکی از اصلی‌ترین عوامل استحکام مناسب همراه با انعطاف‌پذیری و عدم ترد شدن منطقه جوش می‌باشد. در این تحقیق به اثر ورود اکسیژن به مذاب جوشکاری بر روی خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ و علل شکست ترد آن می‌پردازیم.

روش تحقیق

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق از ورق تیتانیوم با ضخامت **mm ۱/۵** تهیه گردید. آزمون شیمیایی انجام شده نشان داد که ورق مورد استفاده از جنس آلیاژ تیتانیوم **Ti-6Al-4V** می‌باشد. نتایج آزمون شیمیایی در جدول (۱) آمده است. ورق‌های مورد نیاز برای جوشکاری با ابعاد **mm ۱/۵ * ۱۵ * ۳۰** از ورق‌های اولیه تهیه گردید. لبه‌های ورق‌های بریده شده به صورت اتصال لب به لب با پخ 30 درجه و با فاصله **mm ۱/۶** از هم در نظر گرفته شد. قبل از فرایند جوشکاری به منظور از بین بردن لایه‌های اکسیدی و براده‌های فلزی، محل اتصال به وسیله برس سیمی استینلس استیل، تمیز شد. برای از بین بردن چربی‌ها و آلودگی‌های محیطی، محل پخ زده شده، توسط استون چربی‌زدایی گردید. از گاز آرگون ۹۹/۹۹۹ به عنوان گاز محافظ تورچ استفاده شد. به دلیل انجام جوشکاری در محیط معمولی استفاده از گاز محافظ به صورت دنباله، درست بعد از تورچ جوشکاری، برای جلوگیری از جذب اکسیژن و نیتروژن اتمسفر محیط بوسیله گرده جوش، الزامی است. شکل (۱) تصویری از دنباله گاز آرگون طراحی شده را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از پیچیدگی حاصل از جوشکاری و همچنین محافظت از قسمت ریشه جوش یک فیکسچر مخصوص برای جوشکاری ورق‌ها طراحی و ساخته شد (شکل ۱). اتصال دو قطعه، با فرایند جوشکاری قوس تنگستن با گاز محافظ و در طی دو لایه (پاس) انجام شد. الکتروند غیرمصرفی از جنس تنگستن-توریم با ضخامت **mm 2/4** انتخاب گردید.

وبا چند نقطه جوش، در محل خود ثابت نگه داشته شدند در حالی که سیستم طراحی شده برای محافظت از ریشه جوش دقیقاً در زیر خط جوش قرار گرفته شد (شکل ۳).

پس از مونتاژ دو نیم کره، فرایند جوشکاری مطابق با عوامل ذکر شده در جدول (۱) انجام شد. لازم به ذکر است قبل رسیدن به محل نقطه جوش ها، جوشکاری متوقف شده و نقطه جوش ها از طریق سنگ انگشتی فلزی، برداشته شد.

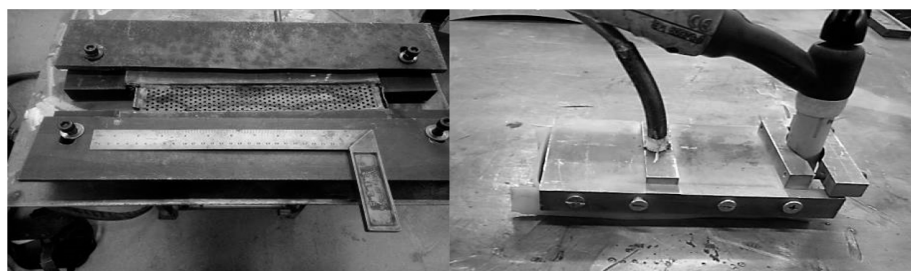
آزمون غیرمخرب

انجام آزمون غیرمخرب پس از جوشکاری در قالب آزمون رادیوگرافی مطابق با استاندارد **ASME Sec. VIII** صورت گرفت. گزارش رادیوگرافی اولیه (شکل ۴) نشان دهنده وجود عیوبی مانند تخلخل گازی، عدم نفوذ، عدم ذوب دیواره و آخال تنگستن می باشد. پس از شناسایی محل عیوب، بررسی های اولیه در خصوص جوشکاری ترمیمی انجام شد. در ابتدا محل عیوب از طریق سنگ انگشتی فلزی کاملاً خالی می شود و پس از تمیزکاری، برای انجام جوشکاری ترمیمی آماده می شود. عیوب جوشکاری بعد از سه بار تعمیر رفع شده و با آزمون رادیوگرافی تایید شدند. لازم به ذکر است تعدادی تخلخل گازی در خط جوش باقی مانده که با در نظر گرفتن حدود مجاز برای عیوب در استاندارد، حضور این تخلخل های گازی بلامانع است.

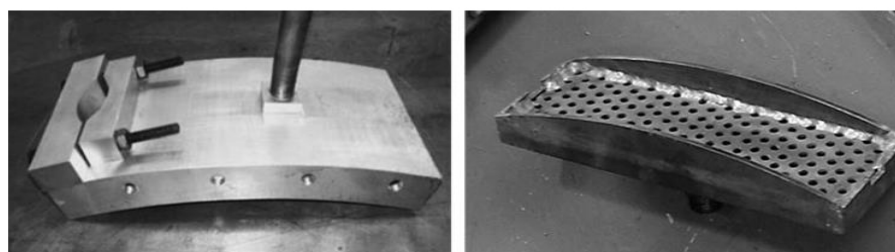
سیم جوش مورد استفاده از جنس تیتانیوم گرید ۵ و با ضخامت **mm ۱/۶** می باشد. بعد از انجام آزمون تاییدیه روش جوشکاری (PQR) با استفاده از ورق تیتانیوم گرید ۵، یک مخزن ساخته شده از جنس تیتانیوم گرید ۵ با دستورالعمل تایید شده جوشکاری (WPS) (جدول ۲) شد. نتایج آزمون های غیرمخرب و مخرب نمونه در حالت جوشکاری شده و بدون هرگونه عملیات حرارتی نیز در جدول (۲) نشان داده شده است. به منظور سهولت در انجام جوشکاری خط جوش اصلی مخزنی کروی از یک میز چرخنده برای نگهداری و درعین حال چرخش مخزن استفاده شد. این دستگاه امکان چرخش ساعتگرد و پادساعتگرد مخزن با سرعت قابل کنترل را فراهم می کند. علاوه بر این مخزن در حین چرخش امکان تغییر زاویه نسبت به خط افق تا ۹۰ درجه را دارد. از آنجایی که حفاظت از منطقه جوش باید از منطقه ریشه جوش (داخل مخزن) و گرده جوش (پوسته بیرونی مخزن) انجام گیرد بنابراین دو قطعه آلومینیومی با انحناء بیرونی و داخلی مخزن طراحی و ساخته شد. این دو قطعه به ترتیب وظیفه محافظت از گرده جوش (بلافاصله بعد از انجام جوشکاری) و ریشه جوش را دارد و به تورچ جوشکاری متصل می شود. تصویر این قطعه در شکل (۲) نشان داده شده است. در ابتدا فلنج نازل در محل مورد نظر بر روی یک نیم کره قرار گرفت و در ابتدا فلنج نازل به بدنه متصل گردید (شکل ۳). پس از اتصال فلنج نازل، خط جوش اصلی از محل قطر کره در جای مورد نظر قرار گرفت

جدول ۱- ترکیب شیمیایی تیتانیوم خالص تجاری مورد استفاده در این تحقیق.

عنصر	Ti	Al	V	O	Fe	Cu
درصد وزنی	پایه	۶/۳	۴/۵	-	۰/۰۵	۰/۰۲



شکل ۱- قطعه دنباله (تصویر راست) و پشت بند (تصویر چپ) طراحی شده برای محافظت از گرده بیرونی و پشت جوش.



شکل ۲- تصاویر قطعه محافظت دنباله (بالا) و پشت (پایین) طراحی شده برای محافظت از سطح بیرونی و ریشه جوش. جدول ۲- شرایط جوشکاری مخزن کروی جداره نازک

نتایج و بحث

در این قسمت به منظور بررسی علل شکست ترد، در اثر فشار هیدرواستاتیک داخل مخزن در فشار کمتر از فشار طراحی (bar65)، آزمون بررسی شکست نگاری را انجام می دهیم تا منشأ و علت شکست مشخص شود.

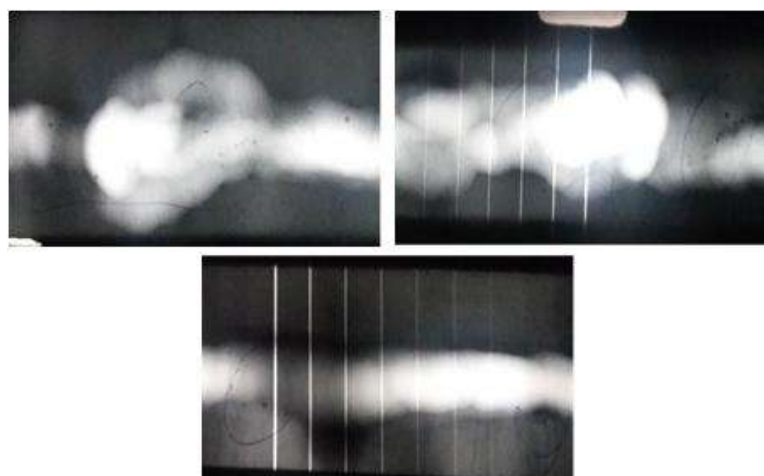
شکست نگاری

برای بررسی منشأ شکست و نقطه آغاز شکست ابتدا محل شکست در مخزن را به صورت چشمی مورد مطالعه قرار می دهیم. با دنبال کردن ترک های رشد یافته باقی مانده بر روی مخزن و با حرکت در

فشار آزمون تاییدی هیدرواستاتیک مطابق با پیش بینی های انجام شده در حین طراحی مخزن برابر با bar65 محاسبه گردید. شرایط آزمون هیدرواستاتیک مطابق با استاندارد ASME Sec IX انتخاب شد. از آب به عنوان سیال مورد نظر برای اعمال فشار استفاده شد. اعمال فشار هیدرواستاتیک به صورت تدریجی و در هر مرحله به اندازه bar20 افزایش فشار پیش بینی گردید. در هر مرحله پس از افزایش فشار، ۱۰ تا ۲۰ ثانیه زمان نگه داری در فشار در نظر گرفته شد. فشار مخزن تا عدد bar62 بالا رفت ولی به صورت ناگهانی و در اثر شکست در ناحیه جوش، مخزن به دو قسمت شکسته شده است (شکل ۵).



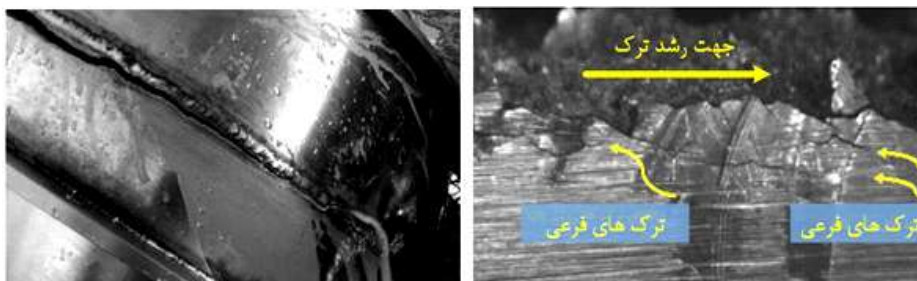
شکل ۳- الف - مونتاژ فلنج نازل و جوشکاری فلنج نازل در مرحله اول (بالا سمت راست) جفت کردن دو نیم کره در کنار هم آماده سازی قبل از جوشکاری (بالا سمت چپ) و انجام فرایند جوشکاری (پایین) آزمون هیدرواستاتیک



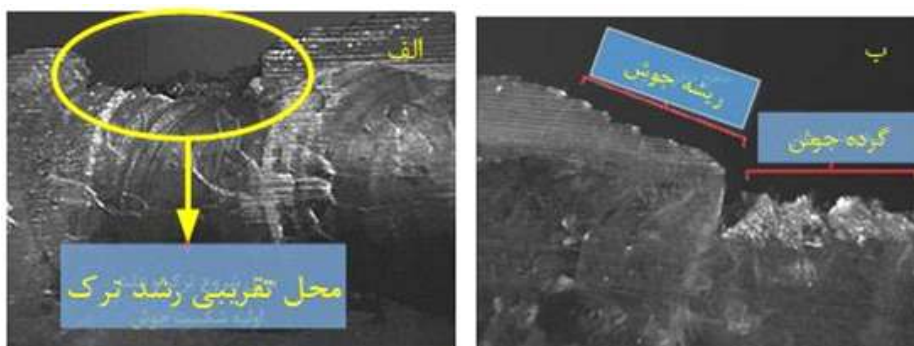
شکل ۴- تصویر آزمون رادیوگرافی قسمتی از خط جوش مخزن تحت فشار آلایژ تیتانیوم Ti-6Al-4V که نیاز به جوشکاری تعمیری دارد.



شکل ۵- مخزن آماده آزمون هیدرواستاتیک و نمودار آزمون هیدرواستاتیک



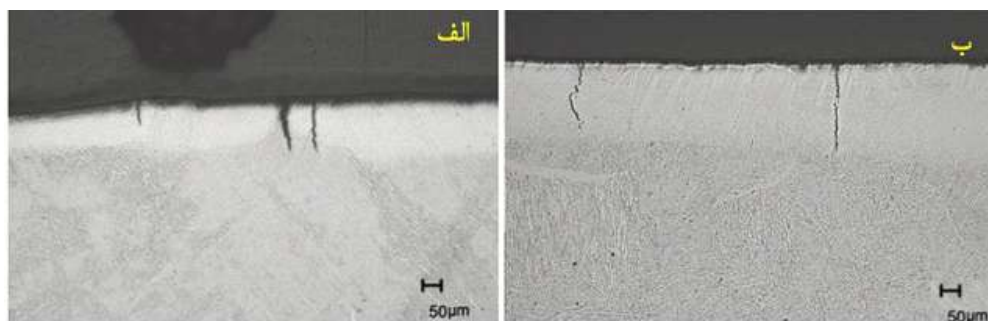
شکل ۶- محل سطح شکست مخزن کروی.



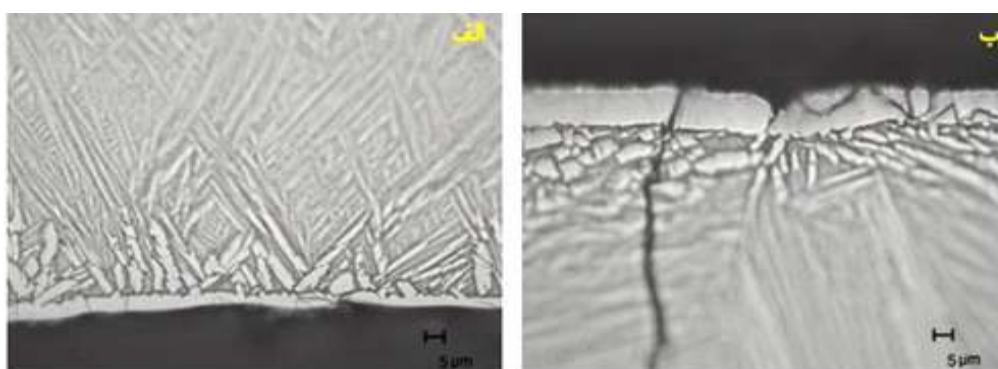
شکل ۷- الف - شروع شکست از منطقه جوش تعمیری ب - مسیر رشد ترک از داخل و بیرون خط جوش

از هر دو سطح داخلی و خارجی اتفاق افتاده و به سمت مرکز ورق پیشروی نموده است (شکل ۷-ب). پس از پیدا کردن منشأ ترک، محدوده اطراف آن برشکاری شده و سطح منطقه جوش در این ناحیه متالوگرافی شد. در بررسی نتایج متالوگرافی مشخص شد، هنگامی که تیتانیوم در معرض اکسیژن در دمای بالاتر از 500°C قرار گرفته و محافظت به خوبی انجام نشده است، اکسیژن به راحتی جذب حوضچه جوش و مناطق اطراف جوش با دمای بالای 500°C شده است. همچنین اکسیژن پایدار کننده فاز α می باشد که منجر به تشکیل فاز α غنی از اکسیژن در مناطق سطحی جوش می شود. ورود اتم های اکسیژن باعث افزایش استحکام و کاهش چقرمگی فاز α غنی از اکسیژن می شود.

جهت مخالف این ترک ها می توان منشأ و نقطه آغازین ترک را پیدا کرد (شکل ۶). سپس با بررسی متالوگرافی، منطقه شروع ترک، علت رشد و شکست ناشی از آن را بدست آورد. به منظور فرایند متالوگرافی پس از پولیش مقطع مورد نظر، آن را با محلول کرول به مدت ۷-۱۰ ثانیه غوطه ور می کنیم. محلول کرول مورد استفاده شامل ۳cc اسید Hf ، ۶cc اسید HNO_3 و ۱۰۰ cc آب می باشد. پس از بررسی و یافتن منشأ ترک مشخص شد که شکست در مخزن تیتانیومی از منطقه جوش و در محلی که چندین بار جوشکاری تعمیری انجام شده، اتفاق افتاده است (شکل ۷-الف). در بررسی سطح شکست، عیوبی مانند حفرات گازی که باعث تمرکز تنش گردد، مشاهده نشد. همچنین مشاهدات نشان می دهد که رشد ترک



شکل ۸- الف - منطقه ترد شده یا منطقه فاز α پایدار شده با اکسیژن (منطقه سفید رنگ حاوی ترک) در منطقه جوش ب - منطقه تحت تاثیر حرارت (HAZ).



شکل ۹- تصویر ترکهای ریز در داخل لایه متراکم از α پایدار شده به وسیله اکسیژن الف - در سطح خارجی جوش ب - در سطح داخلی جوش.



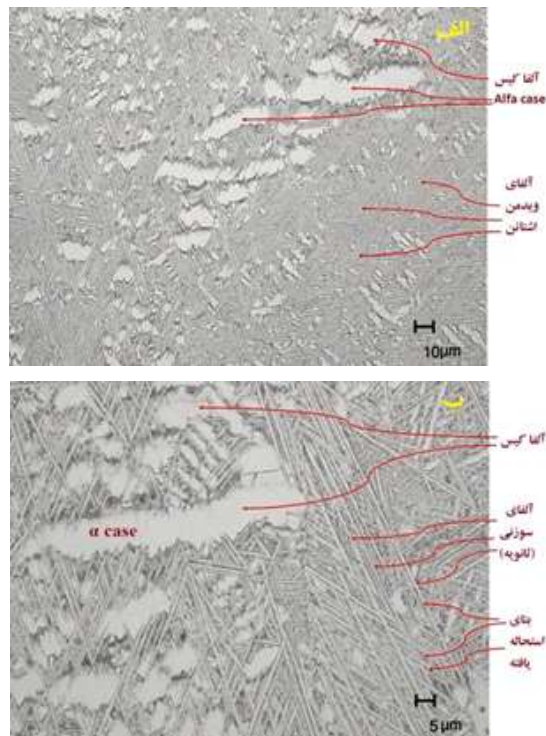
شکل ۱۰- تصویر تشکیل لایه سفید و ترد α پایدار شده به وسیله اکسیژن در سطح خارجی و لایه بسیار نازک اکسید تیتانیوم

بزرگنمایی های بزرگ تر با اندازه تقریبی کمتر از $1 \mu m$ نیز مشاهده می شود. این لایه اکسید تیتانیوم با وجود خیلی نازک بودن به دلیل ذات سرامیکی، بسیار ترد می باشد و در حقیقت نقطه شروع ترک ها از این ناحیه می باشد.

ساختار فلز پایه از دانه های هم محور α در زمینه β تبدیل شده تشکیل شده است که شامل فاز سوزنی و درشت شکل (۱۰). تصویر تشکیل لایه سفید و ترد α پایدار شده به وسیله اکسیژن در سطح خارجی و لایه بسیار نازک اکسید تیتانیوم می باشد (شکل ۱۱). ساختار سبکی ویدمن اشتاتن که که متشکل از فاز بتای محصور شده با فاز آلفا (آلفای ثانویه) است که بعد از سرد شدن از دمایی در

اگر میزان آلودگی از حد معینی تجاوز نماید باعث ترک خوردن قطعه، به دلیل ترد بودن سطح جوش و وجود تنش های پسماند ایجاد شده در هنگام جوشکاری، می شود. چون میزان نفوذ اکسیژن در منطقه تعمیری جوش بیشتر بوده، سبب تردی بیشتر منطقه جوش (شکل ۸-الف) و منطقه تحت تاثیر حرارت (HAZ) (شکل ۸-ب) گردیده است که به دلیل وجود تنش (تنش ناشی از آزمون هیدرواستاتیک همراه با تنش پسماند ناشی از جوشکاری) در قطعه، ترک های ریز در فاز α غنی از اکسیژن تشکیل شده و در هنگام اعمال فشار، ترک ها رشد نموده و منجر به شکست مخزن گردیده است (شکل ۹ و ۱۰). وجود یک لایه اکسید تیتانیوم نیز در

۱۰ μm می باشد. در زیر این لایه متراکم، فاز α به صورت سوزنی رشد نموده است. تشکیل این منطقه نیز که ضخامت آن حدود ۰/۱۵ mm می رسد به دلیل نفوذ اکسیژن بوده و باعث ترد و شکننده شدن آن می شود (شکل ۱۳).

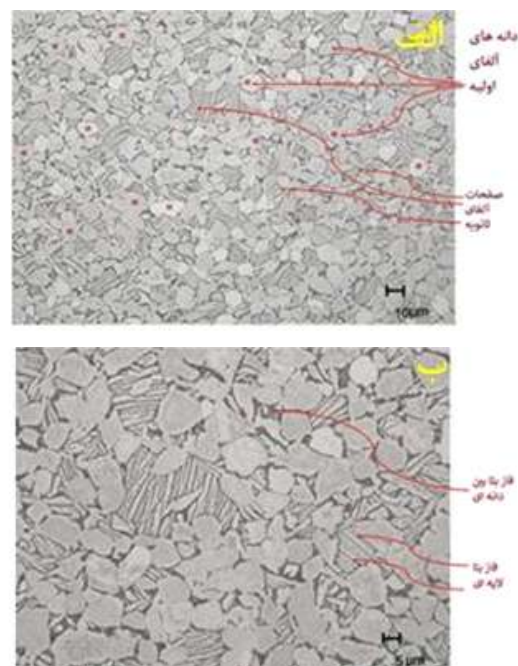


شکل ۱۲- الف - ساختار منطقه جوش از فاز α و β تبدیل شده که شامل فاز سوزنی و درشت α می باشد تشکیل شده است. ب - ساختار جوش در بزرگنمایی بالاتر.



شکل ۱۳- ساختار منطقه HAZ از β اولیه تبدیل شده به فاز α سوزنی محصور شده با β.

محدوده تقریبی ۹۰۰ °C و با سرعت سرد شدن در هوا از ساختار بتای تبدیل شده، بدست می آید. همچنین مشاهده ساختار فاز آلفای اولیه نشان می دهد که دمای شکل دهی نیم کره ها، بالاتر از دمای انتقال تبدیل فاز آلفا به بتا، نرفته است. زیرا اگر دما بالاتر از ۹۸۰ °C (دمای انتقال) برود همه ساختار به صورت سبیدی در می آید. پس وجود فاز آلفای اولیه نشان دهنده این امر است که دمای شکل دهی گرم نیم کره ها، کمتر از دمای تبدیل بتا می باشد.



شکل ۱۱- الف - ساختار فلز پایه از دانه های هم محور α در زمینه β تبدیل شده که شامل فاز سوزنی و درشت α می باشد تشکیل شده است. ب - ساختار فلز پایه در بزرگنمایی بالاتر.

ساختار منطقه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت عمدتاً از β تبدیل شده به ساختار ویدمن اشتاتن که شامل α سوزنی (لایه ای یا تیغه ای) محصور شده با فاز β می باشد، تشکیل گردیده است (شکل ۱۲). زیرا دمای این منطقه بالاتر از دمای تبدیل فاز α به β شده و در برگشت فاز β به صورت لایه لایه به دو فاز α ثانویه و β استحاله یافته می شود. اندازه دانه های β اولیه در منطقه تحت تاثیر حرارت نزدیک به جوش بزرگتر از منطقه تحت تاثیر حرارت نزدیک به فلز پایه است.

در کنار ساختار ویدمن اشتاتن در نزدیک سطح جوش، فاز α case نیز به صورت جزیره هایی جدا از هم ولی با مقادیر نسبتاً زیاد وجود دارد (شکل ۱۰ و ۱۱). همچنین فاز α case یک فاز آلفای غنی از اکسیژن و بسیار ترد می باشد که در اثر انحلال بالای اکسیژن و به علت عدم محافظت مناسب در هنگام جوشکاری تشکیل می شود. در سطوح خارجی منطقه جوش و HAZ لایه متراکم از فاز α پایدار شده به وسیله اکسیژن مشاهده می شود. ضخامت این لایه حداکثر

کارشناس آزمایشگاه متالوگرافی پژوهشکده سامانه های حمل و نقل پژوهشگاه فضایی، که کمک شایانی در این تحقیق انجام داده اند.

منابع

- 1- خدابخشی ا.، وحیدشادی. و اکبری باصری م. "تأثیر همزمان شدت جریان و دبی گاز محافظ بر خواص مکانیکی منطقه جوش تیتانیوم خالص تجاری"، پنجمین کنفرانس مهندسی مواد و متالورژی و دهمین کنفرانس مشترک انجمن مهندسين متالورژی ایران و انجمن علمی ریخته گری، دانشگاه شیراز، (۱۳۹۵).
- 2-Niinomi M., "Mechanical properties of biomedical titanium alloys" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 243, pp. 231-236, (1998).
- 3-Nakagawa M., Matsuya S, Udoh K. "Corrosion behavior of pure titanium and titanium alloys in fluoride-containing solutions" *Dental Materials Journal*, Vol. 20, pp. 305-314, (2001).
- 4-Handbook, Metals. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials." ASM International. Materials Park, pp. 1770-1780, Vol. 2 (1990).
- 5-Gould, J. E., Becker D., Williams J. C., "Microstructural characterization of titanium weldments." *Physical Metallurgy of Metal Joining*, pp. 199-221, (1980).
- 6-Donachie M. J. Titanium: a technical guide. ASM international, Chapter 3, pp. 13-25, (2000).
- 7-Handbook, A. S. M. "Heat treating, vol. 4." ASM International, Materials Park, pp. 2034-2070, (1991).
- 8-Lütjering G., James C. W., "Engineering materials and processes: titanium", 175-198, (2007).
- 9-Short A. B., "Gas tungsten arc welding of azb titanium alloys: a review", Vol. 25, pp. 309-324, (2009).
- 10-Qi Y., Deng J., Hong Q., Zeng L., "Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 280, pp. 177-181, (2000).
- 11-Balasubramanian T. S., Balakrishnan M., Balasubramanian V., Muthumanickam M. A., "Influence of welding processes on microstructure, tensile and impact properties of Ti-6Al-4V alloy joints", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, pp. 1253-1262, (2011).
- 12-Wu C. S., Wang L., Ren W. J. , Zhang X. Y., "Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling", *Journal of Manufacturing Processes* Vol. 16, pp. 74-85, (2014).
- 13-Akman E., Demir A., Canel T., S?nmazçelik T., "Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 21, pp. 3705-3713, (2009).
- 14-Wang S., Wu X., "Investigation on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy joints with electron beam welding", *Materials & Design*, Vol. 36, pp. 663-670, (2012).
- 15-Gangwar K., Ramulu M., "Friction stir welding of titanium alloys: A review", *Materials & Design*, Vol. 141, pp. 230-255, (2018).
- 16-Baerslack III W. A., Gerken J. M., Cross C., Hanson J., Liu P. S., Moneses J. C., Schley J.,

همچنین بررسی ماکروسکوپی مقاطع تهیه شده رشد دانه ها در منطقه جوش تعمیری را نشان می دهد که به دلیل قرار گرفتن منطقه جوش در معرض حرارت بالا و دوره ای جوش تعمیری صورت گرفته است (شکل ۱۴-الف). رشد دانه ها سبب کاهش استحکام و چقرمگی منطقه جوش گردیده است. رشد دانه ها در مناطق تعمیری، بزرگ تر از مناطق جوش داده شده غیر تعمیری است (شکل ۱۳-ب). همچنین از مناطق مختلف نمونه شکست خورده جوشکاری شده، میکروسختی به عمل آمده و نتایج به شرح زیر می باشد. نتایج سختی نشان می دهد سختی سطح در اثر حل شدن اکسیژن، بالاتر از سختی مغز جوش و یا منطقه تحت تاثیر حرارت در مقایسه با سختی تیتانیوم اولیه شکل داده شده می باشد (شکل ۱۵).



شکل ۱۴- تصویر رشد دانه ها در الف - منطقه جوشکاری تعمیری قطعه نسبت به ب - منطقه جوشکاری اولیه.



شکل ۱۵- تصویر اندازه دانه ها در قطعه، در منطقه ای که تحت تاثیر حرارت ناشی از تعمیر جوش قرار نگرفته است.

نتیجه گیری

شکست ترد در مخزن جوشکاری شده آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به علت حل شدن بیش از حد اکسیژن در حوضچه مذاب و منطقه متأثر از حرارت جوشکاری، اتفاق افتاده است. نتایج آزمون تاییدیه جوشکاری نیز پس از نمونه های کشش این اتفاق را ثابت می کند زیرا نمونه های کشش با وجود استحکام بالا، انعطاف پذیری و ازدیاد طول کمتر از ۱ درصد داشته است و این ازدیاد طول کم در اثر عدم محافظت مناسب در برابر اکسیژن هوا، برای حوضچه ذوب جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت بوده است. این انعطاف پذیری خیلی کم خود را در فشارهای بالا و نزدیک فشار طراحی نشان می دهد و تشکیل ترک ها در لایه اکسیدی سطحی جوش به دلیل ذات ترد اکسید سرامیکی و انعطاف پذیری کم فاز α منطقه جوش و اطراف آن، باعث رشد سریع ترک شده و شکست ترد را ایجاد می کند.

سپاسگزاری

با تشکر و قدردانی از جناب آقای مهندس فریدون طوسی نژاد

Rashidi M., "Microstructural characterization and formation of ?? martensite phase in Ti-6Al-4V alloy butt joints produced by friction stir and gas tungsten arc welding processes." *Materials & Design*, Vol. 47, pp. 143-150, (2013).

22- Gaddam R., Sefer B., Perderson R., Antti M-L, "Study of alpha case depth in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo and Ti-6Al-4V" *IOP Conf. series: Materials Science and Engineering*, Vol. 48, pp. 012002, (2013).

23-Handbook, A. S. M. "Metallography and Microstructures, vol. 9." *ASM International, Materials Park*, pp. 837-991, (1985).

24-Yunlian Q., Deng J., Hong Q. Liying Z., "Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 280, pp. 177-181, (2000).

پی نوشت

- 1- استادیار، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران
- 2- محقق، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران
- 3- محقق، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران

Showalter L., "Titanium and titanium alloys" *Welding Handbook*, Vol. 4, pp. 488-540, (1998).

17-Kearns, W. H. "Titanium, Zirconium, Hafnium, Tantalum, and Columbium." In *Welding Handbook*, Chapter 10. pp. 433-487. *Macmillan Education UK*, (1983).

18-Mishra S., DebRoy T., "Measurements and Monte Carlo simulation of grain growth in the heat-affected zone of Ti-6Al-4V welds." *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 1183-1192, (2004).

19-Balasubramanian T. S., Balakrishnan M., Balasubramanian V. Manickam, M. A., "Effect of welding processes on joint characteristics of Ti-6Al-4V alloy." *Science and Technology of Welding and Joining*, (2013).

20-Wang R. R., Welsch G. E., "Joining titanium materials with tungsten inert gas welding, laser welding, and infrared brazing." *The Journal of prosthetic dentistry*, Vol. 74, pp. 521-530, (1995).

21-Esmaily M., Mortazavi S. N., Todehfalah P.,



آشنایی با الزامات استاندارد 3834 الزامات کیفیتی در جوشکاری ذوبی مواد فلزی - الزامات کیفیتی جامع - قسمت سوم

مهندس افشین خیام

گروه‌ها از فولادها تا آلومینیوم‌ها، استنلس استیل‌ها و ... ضخامت هم به این شکل است یعنی اگر می‌خواهید از ضخامت مشخص تست بگیرید.

استاندارد توی محدوده‌ای از ضخامت‌ها تایید صلاحیت می‌کند قطر هم به همین شکل است پس این نکات باعث می‌شود، کار ما خیلی راحت شود پس ما مطابق استاندارد نمونه‌هایی را آماده می‌کنیم حتماً باید یک WPS تایید شده در اختیار جوشکار قرار دهیم، و از او می‌خواهیم با این WPS تایید شده و دستگاه جوشکاری کالیبره شده که ما کاملاً به صحت عملکردش اطمینان داریم، ازش می‌خواهیم با این WPS و با این دستگاه روی این Sample (هم مواد و سیم جوشش مورد تایید است) ما تمامی مجهول‌ها را مشخص کرده ایم و فقط یک مجهول داریم و آن تایید صلاحیت جوشکار است. Sample را جوشکاری می‌کند و مطابق همین استاندارد جداولش که مشخص کرده است آزمون‌های لازم را انجام می‌دهیم.

می‌تواند آزمایش‌های چشمی (VT) باشد تست خمش، آزمایش‌های غیرمخرب (NDT) مثل رادیوگرافی، آلتراسونیک، تست PT و MT تست‌ها کاملاً شفاف تعریف شده است تست را می‌گیریم و نتایجش را ارزیابی می‌کنیم، اگر نتایج ارزیابی شده مطابق با آن شاخص‌هایی که در همین استاندارد هست، مورد تایید قرار بگیرد در حد پذیرش باشد، آن جوشکار تایید صلاحیت می‌شود، این جوشکار تا سه سال تایید صلاحیت می‌شود، به شرط اینکه هر ۶ ماه مورد رصد قرار بگیرد.

1- جوشکار باید در ۶ ماه گذشته کار جوشکاری را مطابق با شرایط فنی تایید شده خودش انجام داده باشد.

2- باید در این ۶ ماه دچار نقص عضو نشده باشد یا بیماری که عملکرد جسمی آنرا تحت تاثیر قرار بدهد و نتواند آن عملکرد کیفی سابق را به اجرا درآورد.

بند ۷- پرسنل جوشکاری (Welding Personnel)

بند ۷ یکی از مهمترین و تاثیرگذارترین بندهای استاندارد ISO 3834 در مباحث کیفیتی است.

-سازنده باید براساس الزامات تعیین شده، به تعداد کافی پرسنل با صلاحیت برای طرح‌ریزی، اجرا و نظارت بر تولید به روش جوشکاری در اختیار داشته باشد.

-جوشکارها و اپراتورهای جوشکاری باید از طریق یک آزمون مناسب از لحاظ کیفی ارزیابی و تایید شده باشند.

1- جوشکارها (Welders)

تست جوشکار برای جوشکاری‌های ذوبی براساس استاندارد ISO 9606 انجام می‌شود. قسمت اول این استاندارد به فولادها اختصاص دارد. در این استاندارد موازین مهمی که باید در یک آزمون رعایت شود مشخص شده است. همچنین محدوده تحت پوشش برای هریک از متغیرهای آزمون نیز گفته شده است. پس از انجام آزمون باید در مورد قبول یا رد شدن فرد آزمون دهنده اظهار نظر کرد. این کار بر اساس استاندارد ISO 5817 انجام می‌شود. برطبق این استاندارد برای آزمون تایید صلاحیت جوشکار نمونه‌هایی (Sample) هایی را آماده کنید که ابعاد آن برای جوش لب به لب (Butt Weld) و یا برای جوش گوشه‌ای (Fillet Weld) و یا جوش لوله (Pipe Weld) با ابعاد مشخص نمونه‌هایی را آماده می‌کنیم. و اینکه جنسشان چه باشد، ضخامتشان چه باشد مثلاً از جوشکار برروی ورق فولادی (St) تست مهارت می‌گیرند و آن جوشکار اگر قبول شود نه فقط روی آن جنس مشخص تایید صلاحیت شده است بلکه روی گروهی از متریال‌ها تایید صلاحیت می‌شود. که این گروه بندی در استاندارد ISO 15608 به شکل شفاف مشخص شده است مثلاً ۱۰ گروه مواد گروه ۱ هستند، ۰۲ گروه مواد گروه ۲ هستند.

3- باید در این ۶ ماه عاملی که کیفیت کار بازرس را تحت تاثیر قرار داده باشد را از خودش نشان ندهد مثلاً "تعداد تعمیرات جوش (Repair) ها را زیاد نداده باشد. عیوب جوش زیاد در کارش دیده نشده باشد. بعد از اینکه تایید صلاحیت جوشکار را انجام شد مشخصاً "گواهینامه ای صادر می شود. مطابق استانداردهای مختلف فرمت مشخصی دارد. شرط تایید را در آن ذکر می کنید ما چه نمونه ای (Sample) را تست کردیم. محدوده تائید به چه شکل است. چه آزمون هایی را انجام دادید. سوابق آن آزمون ها باید پیوست این گواهینامه باشد. اگر تست رادیوگرافی کردید باید فیلم ها، گزارش ها (Report)، اگر تست خمش کردید. گزارش آزمایشگاه باید پیوست شود. اگر این سوابق نباشد. اگر آن نمونه تستی نباشد. آن گواهینامه هیچ کاربردی ندارد. و مثل پول بدون پشتوانه می ماند. پشتوانه این گواهینامه سوابق آن می شود. نمونه تست باید موجود باشد. با همه اینها، با وجود این گواهینامه، انسان یک موجود خطا پذیر است انتظار اینکه به یک جوشکار گواهینامه جوشکاری دادید آن دیگر خطا نکند یک خیال کاملاً واهی است. گواهینامه ها به این معنی نیست که هیچگونه خطایی وجود ندارد. اینها فقط تضمین کننده کیفیت هستند. پس لزوم بازرسی ها، لزوم کنترل ها همچنان حس می شود.

2- اپراتورهای جوشکاری (Welding Operators)

این نفرت بیشتر تنظیم کننده (Setter) هستند. اینها نقش مهارتی شان آنقدر مهم نیست. این نفرت باید نحوه کار با دستگاه را بلد باشند. باید توانایی اجرایی دستورالعمل ها را بلد باشند. باید بتوانند دستگاه را تنظیم کنند. قطعه را مونتاژ کنند. اصلاً "استانداردی که برای تایید صلاحیت اپراتور استفاده می شود. متفاوت از استاندارد تایید صلاحیت جوشکارها است. بیشتر در اختیار این افراد دستورالعمل مربوطه، دستگاه جوشکاری و دو قطعه را قرار می دهند که بهم مونتاژ کنند. که باید دستگاه را روشن کند با توجه به دستورالعمل دستگاه را راه اندازی (Setup) کند و جوشکاری کند. و قطعه ای سالم به شما تحویل بدهد.

بیشتر اهمیت دارد ببینند توانمندی تسلط ایشان روی این دستگاه به چه شکل است حتی باید بخشی از موارد فنی و تئوریکال را هم نسبت به جوشکار بیشتر بدانند و همچنین مقداری باید از سیستم نت و نگهداری دستگاه هم بلد باشند. که در استاندارد ISO 14732 توصیه کرده است حتی اگر امکان دارد آزمون تئوری هم از اپراتورها بگیرد. به اپراتورها هم گواهینامه داده می شود. دقیقاً شبیه گواهینامه ای که به جوشکارها می دادیم. با همان مدت زمان مشخص و با همان شرایط ۶ ماه باید رصد شود. فقط تفاوت هایی که اینجا وجود دارد. مثلاً "به طور مثال چون اپراتورها معمولاً" برای دستگاه های جوشکاری اتوماتیک هستند. با دستگاه مشابه با برند متفاوت باید تایید صلاحیت برای آن دستگاه را هم بدهید. اگر این دستگاه جایجا شود و تغییر مکان بدهد باید دوباره از اپراتور تایید صلاحیت گرفته شود. دستگاه تعمیر می شود و کالیبره می شود دوباره باید از اپراتور تست بگیرد. و شرایطش سختگیرانه تر نسبت به

تایید صلاحیت جوشکار هست. پشتوانه این گواهینامه است باید :

1- قطعه آزمون
2- سوابق آزمون از همه وجودش در تست جوشکار و گواهینامه جوشکار الزامی است. و در پارت ۲ استاندارد ISO 3834 که بحث و تمرکز آن روی سوابق است حتماً باید این سوابق قابل ارائه باشد. در خصوص اپراتورهای جوشکاری هم به همین شکل است.

3- هماهنگ کننده جوشکاری (Welding Coordinator)

سازنده باید پرسنل هماهنگ کننده جوش در اختیار داشته باشد. این افراد با دارا بودن مسئولیت در خصوص فعالیتهای مرتبط با کیفیت، باید اختیار کافی برای اجرای حرفه ای را داشته باشند. وظایف و مسئولیتهای چنین افرادی باید به طور شفاف تعریف شده باشد. اینقدر نقش هماهنگ کننده جوشکاری مهم است که برای آن استاندارد تدوین شده است که در مورد مسئولیتهای و اختیارات هماهنگ کننده جوشکاری بحث می کند. استاندارد ISO 14731 مربوط به هماهنگ کننده جوشکاری است که به مسئولیتهای و اختیارات (Job Discription) و دانش فنی هماهنگ کننده جوشکاری می پردازد. استاندارد بزرگی نیست ولی نکات جالبی دارد. هماهنگ کننده جوشکاری باید :

1- دانش فنی آن مورد تایید باشد. هم دانش فنی پایه (Basic) و هم دانش فنی تخصصی، باید علوم جوشکاری را به شکل جامع (در حد Basic) مسلط باشد. باید کلیات (مثل : کلیات فرایندهای جوشکاری، متریال، طراحی، ساخت، بازرسی و ...) را بداند اما باید تخصصش در حوزه کاری سازمان باید کاملاً تخصصی باشد. باید یک مرجع علمی در سازمان باشد که هر کس در خصوص موارد جوشکاری سؤال یا نقطه نظر و یا ابهامی داشت بتواند با این فرد مشکلس را حل کند. توصیه می شود این شخص مهندس بین المللی جوش باشد. هر چند استاندارد به شکل شفاف به مدرک آکادمیک و کوتاه مدت خاصی اشاره نکرده است ولی توصیه می شود هماهنگ کننده جوش مدرک مهندسی بین المللی جوش (IWE) داشته باشد.

2- باید اختیارات لازم به آن داده شود. انتظار می رود مدیر ارشد سازمان طی یک حکم واقعی (مهم پشتوانه عملی است که به این حکم هویت می دهد) تمامی اختیارات لازم جهت تصمیم گیری در حوزه جوش را فارغ از سلسله مراتب های مدیریتی شرکت به هماهنگ کننده جوش بدهد. به عنوان مثال اگر هماهنگ کننده جوشکاری به عنوان یک کارشناس جزء در واحد فنی و مهندسی مشغول به کار باشد که یک مدیر و یک معاونت دارد و در نهایت مدیر ارشد است. این شخص باید بتواند بدون واسطه در خصوص مباحث و موضوعات جوش با مدیریت ارشد ارتباط بگیرد. و اگر لازم باشد بتواند خط تولید را متوقف کند و اگر لازم باشد خریدی انجام شود و تصمیمی در حوزه جوش گرفته شود بلاواسطه با مدیرعامل ارتباط بگیرد. و اینکار را انجام بدهد در سازمان هایی که اینگونه استقرار سیستم های مدیریتی باور مدیر ارشد نیست دست و پای بیخود نباید زد. این کار را بگذارید کنار و این کار در این سازمان انجام نمی شود.

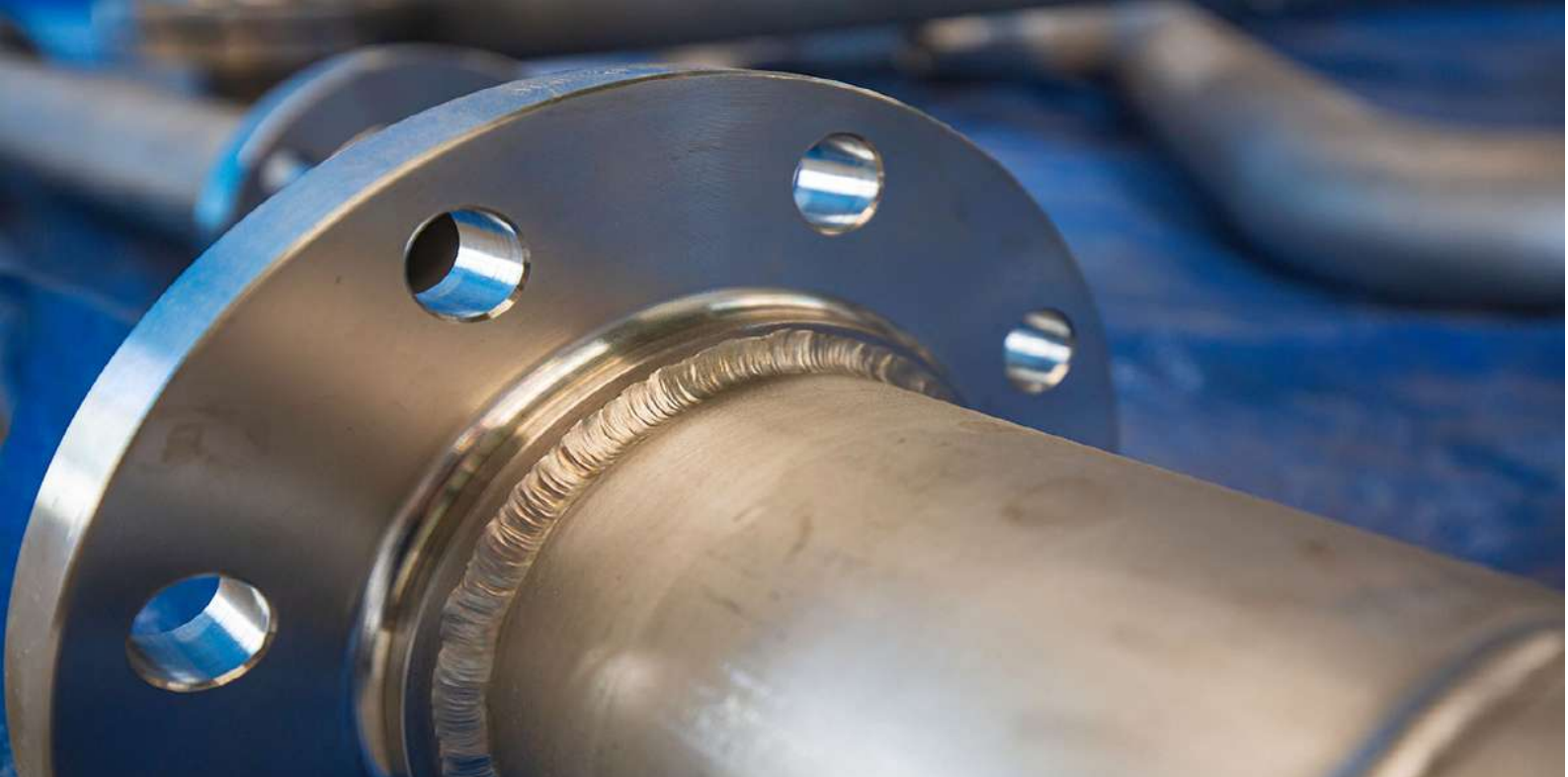
- هماهنگ کننده جوش را در سازمان چگونه انتخاب کنیم؟
 غیر از دانش فنی که گفته شد این شخص باید وجهه‌ها و شخصیت‌های مدیریتی خاصی، در آن وجود داشته باشد. توانایی مدیریت کردن داشته باشد. نه اینکه تنها عنوان شغلی اش مدیر باشد. بتواند آدم‌ها را به هم وصل کند. باید شخص کاریزما تیکی باشد. باید وقتی در سازمان صحبت می‌کند حرفش در رو داشته باشد. انسان‌های بی‌هویت، انسان‌های ضعیف، انسان‌هایی که حتی توانایی صحبت کردن و مدیریت کردن را ندارند. به درد این شغل نمی‌خورند. این شغل صرفاً "یک شغل دانشی نیست یک شغل مدیریتی - دانشی است.

انتظار می‌رود این شخص سابقه زمانی خوبی را در این کارخانه سپری کرده باشد. به چم و خم کار با سیستم‌ها و روش‌ها آشنا باشد. هماهنگ کننده جوشکاری یک نفر است اما استاندارد این مجوز را می‌دهد که شما از هماهنگ کنندگان جوشکاری متعددی استفاده کنید وقتی تعداد سوله‌های تولید افزایش پیدا می‌کند. وقتی یک اسکوپ میدانی علاوه بر این مناطق مختلف دیگری هم وجود دارد. شما می‌توانید به هماهنگ کنندگان جوشکاری تعدد بدهید. یک هماهنگ کننده جوشکاری مسئول

(Responsible Welding Coordinator) می‌گذارید و مثلاً "می‌توانید حوزه تجهیزات را بسپارید به یک هماهنگ کننده جوش دیگر که زیرمجموعه آن باشد. و حوزه **WPS، PQR** و مباحث فنی را بسپارید به یک شخص دیگر و تفویض کنید و ایشان هم در ممیزی‌ها پاسخگو باشند. پس ما یک هماهنگ کننده جوشکاری مسئول داریم و تعدادی هماهنگ کننده جوش که می‌توانند زیر مجموعه اینها کار کنند. از طرف مدیریت ارشد باید برای تمامی اینها حکم زده شود و باید به این حکم هم معتقد باشد. این افراد می‌توانند در بازه‌های زمانی مشخص هماهنگ کنندگان را ارزیابی کنند و دور هم جمع شوند و جلساتی را داشته باشند. که ما به این جلسات کمیته‌های اجرایی جوشکاری می‌گوئیم و صورتجلسه‌هایی را تهیه می‌کنند. و بعد در جلسات بازنگری مدیریت با حضور مدیریت ارشد موارد را مطرح کنند و اگر منابعی لازم است برای رسیدن به کیفیت در حوزه کیفیت جوش در آنجا تعیین شود و مجوز مدیریت ارشد اخذ شود.

پی‌نوشت

- مدیر تضمین کیفیت شرکت ناظران یکتا



بررسی رفتار خوردگی فولاد ۳۱۶ جوشکاری شده در آب دریا

فرزاد سلیمانی^۱، کاظم بابایی^۲

چکیده

مکانیزم های مقاومت به خوردگی در فولاد زنگ نزن با لایه پسیو ارتباط تنگاتنگی دارد و در واقع فولادهای زنگ نزن مقاومت به خوردگی را مدیون لایه پسیو نازک روی سطح هستند. لایه پسیو مانعی فیزیکی میان فولاد و محیط خورنده ایجاد کرده و ضخامتی به اندازه ۲۰ تا ۳۰ انگستروم از جنس اکسید کروم هیدراته دارد که به شدت چسبناک بوده و در برابر حمله های شیمیایی مقاوم است.

کلمات کلیدی: خوردگی، مقاومت، آلیاژ، جوشکاری.

مقدمه

فولاد زنگ نزن که با نام **Inox Steel** نیز شناخته می شود، آلیاژی ترکیبی از آهن و حداقل ۱۰/۵ درصد کروم است. این آلیاژ یک لایه نازک اکسیدی روی سطح فولاد ایجاد می کند که به عنوان لایه غیرفعال شناخته می شود. دلیل استفاده از این آلیاژ، جلوگیری از خوردگی سطح فولاد است، چراکه با افزایش مقدار کروم می توان مقاومت بیشتری در برابر خوردگی به دست آورد. مقاومت بالای این نوع فلز در برابر خوردگی یا زنگ زدگی به دلیل ترکیبات کروم آن است که معمولاً بین ۱۲ تا ۲۰ درصد است. هم چنین این لایه دارای ترکیبات دیگر مانند مقادیر مختلف کربن، سیلیسیم و منگنز است. عناصر دیگری مانند نیکل و مولیبدن ممکن است برای انتقال سایر خواص مفید مانند قابلیت شکل گیری و افزایش مقاومت در برابر خوردگی به این ترکیب اضافه شوند. بنابراین، ترکیبات مختلفی از فولاد زنگ نزن با مقادیر مختلف کروم و مولیبدن و متناسب با محیط زیست وجود دارد.

مقاومت فولادهای زنگ نزن در برابر خوردگی، این نوع از فولادها را به عنوان یک ماده ایده آل برای بسیاری از کاربردها، مخصوصاً جاهایی که مقاومت در برابر خوردگی لازم باشد، معرفی کرده است.

- مواد و روش های پژوهش

توسعه و کاربرد فولاد زنگ نزن بیش از یک دوره زمانی ۱۰۰ ساله رخ داد و بر اساس دستاوردهای افراد متعدد بود. در سال ۱۸۲۱، متالورژیست فرانسوی، "**Pierre Berthier**" کشف کرد که آلیاژهای آهن-کروم در برابر برخی اسیدها مقاوم هستند. نمونه های **Berthier** ترکیب مناسبی از کربن و کروم مورد نیاز برای ایجاد خواص مطلوب آلیاژهای انواع فولاد زنگ نزن امروزی را شامل نشد. سپس، در سال ۱۸۷۵، یک فرانسوی به نام **Brustlein** اهمیت سطوح بسیار کم کربن را به رسمیت شناخت. نکته قابل توجه در تاریخچه استنلس استیل این بود که تخصص کافی برای دستیابی به این ترکیب شیمیایی در آن زمان وجود نداشت.

این محدودیت در اواخر دهه ۱۸۹۰ توسط هانس گلدشمیت آلمانی، که فرایند تولید کروم بدون کربن را توسعه داده بود، برداشته شد. بعد از گذشت دو دهه، چندین محقق مستقل، توسعه فولاد زنگ نزن در شرایط آزمایشگاهی را رقم زدند. لوئیس گیلبرت فرانسوی پژوهشهای اولیه درباره ترکیبات آلیاژی را که امروزه به عنوان گریدهای ۴۴۶، ۴۲۰، ۴۱۰ و ۴۴۰ شناخته می شود را منتشر کرد. همچنین او یک مطالعه دقیق از ساختار متالورژی اولیه برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی را منتشر کرد.

در انگلستان و فرانسه، **Portevin** مطالعاتی را که روی آلیاژ انجام داده بود را منتشر کرد. این آلیاژ امروزه به عنوان فولاد زنگ نزن 430 در نظر گرفته شده است. همزمان، در ایالات متحده، کریستین دانتیزن و فردریک بکت نیز در جهت توسعه فولاد زنگ نزن فریتی مشغول به کار بودند. در سال ۱۹۱۱، فیلیپ مونارتز از آلمان، رابطه بین محتوای کروم و مقاومت در برابر خوردگی را ثبت کرد. علاوه بر این، بسیاری از دانشمندان دیگر نیز وجود داشتند که در این زمینه نتایجی را منتشر کردند.

- فاز سیگما در فولاد زنگ نزن

فاز سیگما، یک ترکیب بین فلزی در فولادهای زنگ نزن است که به طور چشمگیری داکتیلیته و چقرمگی آن ها را کاهش می دهد و فولادهای زنگ نزن را در معرض خوردگی تنشی یا SCC و سایر انواع خوردگی قرار می دهد. وجود فاز سیگما یکی از دلایل شکست خزشی ترد در جوش های آستنیتی است. هنگامی که فلز جوش از دمای ۱۸۰۰ درجه فارنهایت (۹۸۰ درجه سانتی گراد) تا ۱۰۰۰ درجه فارنهایت (۵۳۵ درجه سانتی گراد) سرد می شود، نرخ سرمایش باید نسبتاً سریع باشد تا از تشکیل فاز سیگما جلوگیری شود. جلوگیری از طولانی شدن زمان سرمایش در این محدوده دمایی معمولاً به ایجاد فلز جوش با مقدار کم فاز سیگما ختم می شود که مشکلی ایجاد نمی کند. همانند شرایطی که در حساس شدن وجود دارد، رسوب فازهای بین فلزی می تواند با آنیل حل سازی خنثی شود. در نوع جدیدتر فولادهای زنگ نزن آستنیتی که سوپر آستنیتی نام دارند، آلیاژسازی با نیتروژن تشکیل فاز سیگما را به تاخیر می اندازد و تولید ورق های ضخیم تر را ممکن می کند. آلیاژهای زنگ نزن مقاومت بسیار خوبی در برابر اسید نیتریک در تمام غلظت و دما ها از خود نشان می دهند. تیپ ۳۰۴ به طور گسترده در کارخانه های اسید نیتریک مورد استفاده قرار می گیرد. برای جابجایی اسید سولفوریک بدون استفاده از ممانعت کننده ها به طور محدود از فولاد زنگ نزن ۳۱۶ استفاده می شود. در حالی که تیپ ۳۰۴ در آب های شور بهترین مورد استفاده قرار می گیرد، تیپ ۳۱۶ در آب های شور مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از تیپ ۳۱۶ در آب های شور نتایج متفاوتی را داشته است. در شرایطی که لوله های کنداسور با آب دریا خنک می شوند، استفاده از این ماده به شرطی مناسب است که لوله ها به شکل منظم حین کار تمیز شوند. اگر چه عناصر آلیاژی تیپ ۳۱۶ در برابر آب دریای راکد به شدت به حفره دار شدن و خوردگی شیاری حساس هستند. که این پدیده به دلیل از بین رفتن لایه پسیو با یون های کلراید در آب های راکد یا

کند ایجاد می شود.

به طور کلی، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون فولادهای زنگ نزن با افزایش کروم، افزایش می یابد و این مواد در طیف گسترده ای از محیط های خوردنده در صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می گیرند. این مواد به خوردگی یکنواخت، سایش و خوردگی سایشی و pH محلول بالا مقاوم هستند. اگر چه در شرایط ویژه ای فولادهای زنگ نزن در معرض خوردگی های موضعی قرار می گیرند.

- حفره دار شدن فولاد زنگ نزن

مقاومت به خوردگی فولاد های زنگ نزن به پایداری و حفظ یکنواختی لایه پسیو روی سطح در معرض خوردگی وابسته است. پایداری لایه پسیو برای مقاومت در برابر حفره دار شدن با درصد کروم و مولیبدن در فولاد زنگ نزن مشخص می شود. عنصر دیگری که مقاومت در برابر حفره دار شدن را افزایش می دهد، نیتروژن است. افزودن نیتروژن نسبت به مولیبدن ارزان تر است.

شکست لایه پسیو به دلیل وجود نقص در این لایه، آسیب های مکانیکی، عدم یکنواختی در سطح فلز مانند ناخالصی ها، پوسته های سطحی، رسوبات، فاز ثانویه و حضور یون های کلرید در محیط رخ می دهد. معمولاً درصد بالای یون های کلرید لایه پسیو را از بین می برد. شدت حمله به درصد کلر، اسیدیته، pH و حضور اکسیژن یا سایر اکسید کننده ها بستگی دارد.

فاکتورهای مرتبط با جوشکاری، مانند ناخالصی ها، فازهای ثانویه، اختلاف ترکیب در یک فاز، حساس شدن، قوس انفاقی، قطره جوش، غیر یکنواختی ترکیب موضعی در فلز به عنوان محل های مستعد برای آغاز حفره دار شدن مطرح هستند. در ریز ساختار ناخالصی های محل های مهم برای آغاز حفره دار شدن هستند. فریت دلتا و فاز سیگما نیز حفره دار شدن را تقویت می کند.

عدد مقاومت به حفره دار شدن

مقاومت به حفره دار شدن با افزایش درصد کروم افزایش می یابد، اما افزودن مولیبدن به فولاد زنگ نزن مانند نوع 316 (18%Cr, 12%Ni, 2.5% Mo) اثر بیشتری دارد. افزودن نیتروژن هم در افزایش مقاومت به حفره دار شدن موثر است و به همین دلیل جمع آثار کروم، نیتروژن و مولیبدن به عنوان معیاری برای سنجش مقاومت در برابر حفره دار شدن فولاد زنگ نزن مورد استفاده قرار می گیرد. نام این معیار عدد شاخص حفره دار شدن یا عدد معادل مقاومت به حفره دار شدن (PRE_N) است. شاخص حفره دار شدن عبارت است از:

$$PRE_N = Cr\% + 3.3Mo\% + 16N\%$$

رده بندی فلزات مختلف بر اساس مقاومت به خوردگی در جدول (۱) ارائه شده است. علاوه بر شرایط سطح و حضور رسوبات و یون های کلر، حفره دار شدن معمولاً تحت تاثیر دمای محیط هم هست. برای یک گرید فولاد زنگ نزن دمای خاصی وجود دارد که در آن حفره دار شدن آغاز می شود و به آن دمای بحرانی حفره دار شدن یا CPT می گویند. بنابراین باید گریدی را انتخاب کرد که در دمای کاری در معرض حفره دار شدن قرار نگیرد. دمای CPT می تواند برای بررسی

با ASTM 48A در فریک کلراید ($10\% \text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) و در مخلوط اسیدی کلریدها و سولفات ها ($4\% \text{NaCl} + 1\% \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 0.01\text{M HCL}$) مشخص می شود. تست های آزمایشگاهی برای بررسی رفتار حفره دار شدن بر اساس تست های الکتروشیمیایی صورت می گیرد. مقاومت در برابر حفره دار شدن به وسیله فولادهای زنگ نزن آستنیتی با درصد بالاتر کروم و مولیبدن مانند تیپ های ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۱۷ بدست می آید. از طرف دیگر، می توان از مواد جایگزین مانند آلیاژهای پایه نیکل (مانند اینکونل ۶۲۵، هاسستلوی G-3) یا فولادهای خاص مانند ۳۱۷LM، Jessop 700 و آلیاژ Al-6x، تیتانیوم، مس - نیکل و آلیاژهای نیکل - مس استفاده کرد.

خوردگی شیار فولاد زنگ نزن

شیارها که در شرایط اتصال فلز به فلز، گسکت و رسوبات خوردگی به وجود می آیند، دسترسی به اکسیژن را محدود می کنند و منجر به خوردگی شیار می شوند. برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی، فاکتورهای زیادی سبب آغاز خوردگی شیار و رشد آن می شوند که عبارتند از:

- فاکتورهای هندسی: نوع شیار (فلز به فلز، فلز به غیر فلز)، عرض و عمق شیار، نسبت مساحت سطحی خارجی به داخلی.
- فاکتورهای محیطی: درصد اکسیژن، pH، درصد کلرید، دما، تلاطم، نفوذ و همرفت، محلول شیار و عوامل بیولوژیکی.
- عوامل الکتروشیمیایی: محلول فلزی، کاهش اکسیژن، ایجاد هیدروژن.
- فاکتورهای متالورژیکی: ناخالصی های ترکیب آلیاژ، ویژگی های لایه پسیو.

برای کاهش اثر خوردگی شیار باید تا حد امکان از ایجاد شیارها جلوگیری کرد، این مشکل را می توان با حفظ یکنواخت سرعت جریان در مبدل حرارتی و استفاده از گریدهای فولاد با کرم و مولیبدن بالاتر که در برابر خوردگی شیار مقاوم تر هستند، بهبود داد. فولادهای زنگ نزن آستنیتی با مقادیر بیشتر مولیبدن مانند 904L، ۳۱۶L و SMO ۲۵۴، گریدهای فرتی مانند 18Cr-2Mo و فولادهای دوپلکس مانند ۲۲۰۵ مقاومت زیادی در برابر خوردگی شیار نشان می دهند.

جدول ۱- دمای بحرانی حفره دار شدن

عدد مقاومت به حفره دار شدن برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی					
مقادیر مورد نیاز برای محاسبه PRE _N					
آلیاژ	نامگذاری UNS	Cr	Mo	N	PRE _N
L3۰۴۳۰۴	۳۰۴۰۳/۳۰۴۰۵	۱۸	۰.۰	-	۱۸.۰
L3۱۶۳۱۶	۳۰۶۰۳/۳۰۶۰۵	۱۶.۵	۲.۱	-	۲۳.۴
۳۱۷	۳۰۷۰۵	۱۸.۵	۳.۱	۰.۰۶	۲۹.۷
XN۶AL-		۲۰.۵	۶.۳	۰.۲۳	۴۷.۹

برای یک گرید مشخص فولاد زنگ نزن، خوردگی شیار تحت تاثیر دمای محیط نیز هست. بالای دمای بحرانی، خوردگی شیار آغاز می شود و در دمای پایین تر از دمای بحرانی خوردگی شیار آغاز نمی شود. بنابراین انتخاب گرید فولادی که در معرض خوردگی شیار قرار نگیرد، امکان پذیر است به شرطی که دمای محیط شیمیایی از مقادیر بحرانی تجاوز نکند. مقادیر CCCT یا دمای بحرانی خوردگی شیار از طریق استاندارد ASTM G-48B در کلرید فریک (محلول ۶ درصد FeCl_3 برای شیارهای ۷۲ ساعته) به دست می آید.

مقایسه خوردگی شیار و حفره دار شدن در فولاد زنگ نزن

مکانیزم گسترش حفره و خوردگی شیار مشابه هستند اگرچه مکانیزم آغاز آن ها متفاوت است. خوردگی شیار برای آغاز به شرایط خورنده شدید نیاز ندارد. فولادی که به حفره دار شدن در یک محلول خاص مقاوم است ممکن است در همان محلول دچار خوردگی شیار شود. با کنترل معیارهای متالورژیکی موثر بر بهبود مقاومت به حفره دار شدن می توان مقاومت به خوردگی شیار را نیز بهبود داد. اگر از حضور سولفیدهای منگنز جلوگیری شود مقاومت به حفره دار شدن و خوردگی شیار نیز بهبود می یابد. سه راه ممکن برای کاهش ناخالصی سولفید منگنز:

- کاهش درصد منگنز به مقدار کمتر از حد حلالیت MnS
- کاهش درصد گوگرد به پایین تر از حد حلالیت MnS
- افزودن عناصر آلیاژی مانند تیتانیوم و زیر کونیم که سولفیدهای قوی تر و سودمند تری را ایجاد می کنند.

خوردگی تنشی فولاد زنگ نزن

فولاد های زنگ نزن آستنیتی در معرض خوردگی تنشی قرار دارند. پاره ای از شرایط محیطی در خوردگی تنشی موثرند اما می توان آن ها را به دو دسته بر اساس گسترش ترک دانه ای و مرز دانه ای تقسیم بندی کرد. خوردگی تنشی مرز دانه ای در محیط های با یون کلرید و یون های هیدروکسید ایجاد می شود. ترک های دانه ای در محیط های آبی رخ می دهد اما به ایجاد نواحی حساس وابسته است. مهم ترین محیط هایی که منجر به ایجاد خوردگی تنشی در فولادهای زنگ نزن می شود، عبارت است از:

- محلول های کلریدی
- محلول های سود سوزآور
- اسید پلی تیونیک
- تنش هایی که در مقادیر کمتر آن ها خوردگی تنشی رخ نمی دهد به خوبی مشخص شده اند اما باید مقدار آن کم تر در نظر گرفته شود زیرا تنش های باقی مانده جوش اغلب بسیار بالا هستند.
- خوردگی تنشی کلرید در فولادهای زنگ نزن

معمولا خوردگی تنشی کلرید در فولاد زنگ نزن آستنیتی به صورت مرز دانه ای و منشعب شده است. فاکتورهایی که سرعت و شدت ترک را تحت تاثیر قرار می دهند، مقدار کلرید، مقدار اکسیژن، دما، مقدار تنش و pH محلول های آبی هستند. به طور کلی، برای این که

خوردگی تنش‌ی کلریدی در فولادهای زنگ‌زن رخ دهد غلظت کلرید باید 30ppm یا بیشتر باشد و اگر این غلظت در حدود 20ppm باشد معمولاً شرایط خورنده نیست. اگر چه در حالتی که مقدار اندکی کلرید وجود دارد، ممکن است تمرکز غلظت به صورت موضعی رخ داده و منجر به ایجاد ترک شود. با طراحی مناسب به عنوان مثال طراحی یک دریچه برای ایجاد جریان می‌توان از ایجاد مناطق با غلظت بالای کلرید جلوگیری کرد. بیشتر تخریب‌های ناشی از خوردگی تنش‌ی بالای 170 درجه فارنهایت (75 درجه سانتی‌گراد) و 120 درجه فارنهایت (50 درجه سانتی‌گراد) معمولاً به عنوان حد آستانه برای خوردگی تنش‌ی به کار می‌رود.

خوردگی تنش‌ی سود سوز آور

خوردگی تنش‌ی سود سوز آور در فولادهای زنگ‌زن در دماهای بالاتر از 120 درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. در دماهای بالاتر، از انواع جدیدتر فولادهای زنگ‌زن فریتی، نیکل و آلیاژهایی با درصد بالای نیکل به عنوان جایگزین برای فولاد زنگ‌زن آستنیتی در اواپراتور سوز آور استفاده می‌شود.

- اثر درصد نیکل بر خوردگی تنش‌ی

اثر درصد نیکل بر خوردگی تنش‌ی فولاد زنگ‌زن آستنیتی با استفاده از منحنی کاپسون مورد بررسی قرار می‌گیرد که در نمودار مقابل نمایش داده شده است. شکل مقابل نشان می‌دهد ماکزیمم گرایش فولاد زنگ‌زن به خوردگی تنش‌ی با درصد نیکل در محدوده 8 تا 12 درصد ایجاد می‌شود که در فولادهای آستنیتی استاندارد 302، 304 و 316 دیده می‌شود.

کاهش نیکل از این مقدار منجر به بهبود رفتار خوردگی تنش‌ی می‌شود، اما این تغییر با جایگزینی آستنیت با فریت دلتا در ریزساختار همراه می‌شود. با افزایش درصد نیکل، مقاومت به خوردگی تنش‌ی تا 45-42 درصد نیکل بهبود می‌یابد، تا جایی که عملاً آلیاژ در برابر خوردگی تنش‌ی ایمن می‌شود. که این شرایط در آلیاژ 825، آلیاژ G و آلیاژ 625 دیده می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که آلیاژهایی با درصد نیکل بیش از 22 درصد به ندرت دچار خوردگی تنش‌ی می‌شوند و این شامل آلیاژهای 904، آلیاژ 28 و آلیاژ 20 می‌شود. این مواد در بسیاری از کاربردهای صنعتی که با یون‌های کلرید سر و کار دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند.

خوردگی تنش‌ی فولادهای زنگ‌زن آستنیتی جوشکاری شده

سطح فولادهای زنگ‌زن آستنیتی درگیر تنش‌های کششی است که در هنگام ساخت یا در اثر اعمال تنش خارجی به وجود آمده‌اند و می‌توانند در محلول‌های کلریدی منجر به شکست مرز دانه‌ای شوند. اتصالات جوشکاری شده به دلایل زیر مستعد خوردگی تنش‌ی هستند:

- فرایند جوشکاری، تنش کششی باقی‌مانده‌ای را در منطقه جوش باقی‌می‌گذارد مگر اینکه عملیات تنش‌زدایی موثری پس از جوشکاری انجام گیرد.

- معمولاً تمرکز تنش وجود دارد
- سیکل‌های حرارتی ممکن است ریز ساختار حساس شده ایجاد کند

عملیات حرارتی تنش‌زدایی می‌تواند یک راه حل جایگزین برای جلوگیری از خوردگی تنش‌ی باشد. در این رابطه عملیات حرارتی حل‌سازی کامل در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد ممکن است مورد نیاز نباشد اما آنیل پایدار سازی در دمای 870 تا 950 درجه سانتی‌گراد معمولاً برای قطعات جوشکاری شده که در صنعت پتروشیمی به کار می‌روند برای جلوگیری از خوردگی اسید پلی تیونیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- خوردگی تنش‌ی اسید پلی تیونیک (PASCC): خوردگی بین دانه‌ای معمولاً بر اثر برخورد اسید پلی تیونیک و مواد حساس شده ایجاد می‌شود و چنین شرایطی می‌تواند در برخی از تجهیزات پالایشگاه به خصوص در هنگامی خاموشی وجود داشته باشد. خوردگی PASCC به حضور ماده حساس شده، اکسیژن، آب، تنش کششی و پوسته‌های سولفید آهن نیاز دارد. اسید پلی تیونیک می‌تواند به سرعت در زمان خاموشی در اثر اندرکنش سولفید با رطوبت و اکسیژن تشکیل شود. گریدهای معمولی فولاد زنگ‌زن مانند تیپ 304 و 316 و آلیاژ اینکولوی 800 می‌توانند در حین جوشکاری حساس شوند. پوسته‌های سولفیدی در حین کار و اکسیژن و آب نیز هنگام خاموشی به این سیستم اضافه می‌شوند. راه حل‌هایی که برای کنترل خوردگی PASCC شامل موارد زیر می‌شود:

- پاکسازی نیتروژنی اجزا یا تجهیزاتی که در معرض اتمسفر قرار دارند.

- خنثی کردن اسید با شستشوی آمونیاک یا سود.

- استفاده از مواد پایدار شده برای ساخت مبدل‌های حرارتی.

گزارش شده که حتی فولادهای زنگ‌زن پایدار شده مانند 321 و 347 هم در معرض خوردگی PASCC قرار می‌گیرند مگر آنکه به شکل مناسب تحت عملیات حرارتی قرار گیرند.

- روش‌های مناسب برای غلبه بر این شکل خوردگی به خوبی در NACE RP-01-70 مطرح شده‌اند.

تست‌های آزمایشگاهی برای تعیین خوردگی تنش‌ی فولاد زنگ‌زن

حساسیت آلیاژها به خوردگی تنش‌ی کلریدی با انجام تست آزمایشگاهی بر اساس ASTM636 یا با مرتبط کردن نرخ گسترش ترک به شدت تنش در نوک ترک و خوردگی اسید پلی تیونیک در آزمایش خوردگی بر اساس ASTM G 35 انجام می‌گیرد.

- ارزیابی حساس شدن فولاد زنگ‌زن آستنیتی به PASCC: روش فعال کردن مجدد الکتروشیمیایی پتانسیوسینتیک می‌تواند در حین بازرسی برای ارزیابی درجه حساس شدن فولاد زنگ‌زن آستنیتی در آب دما بالا مورد استفاده قرار گیرد.

روش‌های جلوگیری از خوردگی تنش‌ی فولادهای زنگ‌زن از روش‌های معمولی برای غلبه بر خوردگی تنش‌ی فولادهای زنگ‌زن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- استفاده از مواد جایگزین که مقاومت بیشتری در برابر خوردگی تنش‌ی کلریدی دارند. از نمونه‌های رایج آن می‌توان به تیپ ۴۳۰ فریتی جدید، سـوپر فریتی مانند **E-Brite، Sea-Cure** و غیره، فولاد دپلکس زنگ زن، تیتانیوم و آلیاژهای آستنیتی با مقدار بالاتر نیکل اشاره کرد. فولادهای فریتی نسبت به خوردگی تنش‌ی با **SCC** ایمن بوده یا کمتر در معرض حمله خوردگی تنش‌ی قرار می‌گیرند. می‌توان از تیپ‌های ۳۰۴ و ۳۱۶L که در معرض خوردگی تنش‌ی قرار می‌گیرند نیز استفاده کرد به شرطی که احتیاط لازم انجام گرفته و یکی یا چند عامل ایجاد خوردگی تنش‌ی که اغلب تنش باقی‌مانده، محیط کلریدی یا دما هستند، حذف شود.

- استفاده از روش **safe ending**: در مبدل‌های حرارتی عمودی با استفاده از فرایندی به نام **safe ending** بر خوردگی تنش‌ی غلبه می‌شود. این فرایند شامل استفاده از جوش لب به لب قطعات کوتاهی از مواد مقاوم به فولاد زنگ زن آستنیتی در مناطقی است که در معرض خوردگی تنش‌ی قرار دارند.

- اگر فضای مرده‌ای وجود داشته باشد (چاه هوایی) که در آن کلریدها در اثر تر و خشک شدن مداوم تجمع کنند آنگاه لوله در معرض خوردگی تنش‌ی قرار خواهد گرفت. این مشکل می‌تواند با تهویه هوا در منطقه مرده یا فلود کردن تمام سطح لوله برطرف شود. - لوله‌های بی‌متالیک

ورق فولاد زنگ زن ۳۱۷

آلیاژ ۳۱۷ یک فولاد زنگ زن آستنیتی کروم-نیکل است که دارای مقاومت عالی در برابر خوردگی است. ورق فولاد زنگ زن ۳۱۷ حاوی مولیبدن (0/2-1)، نیکل (کمتر از ۲)، کروم (۱۴-۱۲) و کربن (حدود ۰/۱-۱) است. از بین فولادهای زنگ زن سری ۳۰۰، آلیاژ ۳۱۷ مقاوم‌ترین در برابر خوردگی است و دارای بالاترین خاصیت مقاومت کششی و خزشی در دمای بالا است. مقاومت در برابر اکسیداسیون ۳۱۷ کویل فولاد زنگ زن در دمای بالا تا ۱۵۰۰ درجه فارنهایت مفید است. محتوای مولیبدن بالا دارای مقاومت برتر در برابر سوراخ شدن آلیاژ است. فولاد زنگ زن ۳۱۷ صفحه، کویل و ورق کاربردهای خود را در صنایع مختلف مانند صنایع فرآوری گاز، صنایع پتروشیمی، صنایع فرآوری مواد غذایی، نفت پیدا می‌کند. صنایع گاز، صنایع کود، صنایع قند، صنایع قند، صنایع تولید برق و غیره.

داده‌های ساخت

آلیاژ ۳۱۷L را می‌توان به راحتی با روشهای استاندارد ساخت کارگاهی جوش داده و پردازش کرد.

شکل‌گیری سرد

این آلیاژ کاملاً شکل پذیر است و به راحتی شکل می‌گیرد. افزودن مولیبدن و نیتروژن نشان می‌دهد که در مقایسه با گریدهای استاندارد ۳۰۴/۳۰۴L تجهیزات پردازش قوی‌تری لازم است.

تشکیل داغ

دمای کار ۱۶۵۲ - ۲۱۰۲ درجه فارنهایت (۹۰۰ - ۱۱۵۰ درجه

سانتی گراد) برای فرایندهای کاری گرم توصیه می‌شود. این آلیاژ زیر دمای ۱۷۴۲ درجه فارنهایت (۹۵۰ درجه سانتی گراد) کار نشود. اگر دمای شکل دهی نهایی به زیر این آستانه برسد.

جدول ۲- مشخصات ورق فولاد زنگ زن ۳۱۷

استانداردها	ASTM A240 / ASME SA240
اندازه	" 4 1/4"
دانه	۵ تا ۱۵۰ میلی متر
ضخامت	۰.۰۴۰ تا ۱.۰۰ میلی متر
سختی	برم، سخت، نیمه سخت، یک چهارم سخت، فتر سخت و غیره
تمام کنید	ورق نورد گرم (HR)، ورق نورد سرد (CR)، 2B، 2D، 8) BA NO (SATIN) یا روکش پلاستیکی
فرم	کویل، فویل، رول، ورق ساده، ورق شیم، ورق سوراخ دار، صفحه شطرنجی، نوار، تخت، خالی (دایره)، حلقه (فلنج)

استاندارد	WERKSTOFF NR.	UNS	JIS
SS 317	1.4449	S31700	SUS 317

جدول ۳- ورق فولاد زنگ زن ۳۱۷ ترکیب شیمیایی

N	ی	مو	Cr	S	P	سی	من	C	مقطع تحصیلی
-	11-14	3-4	18-20	حداکثر ۰.۰۳	حداکثر ۰.۰۴۰	حداکثر ۱	حداکثر ۲	حداکثر ۰.۰۸	317
PRENI									
ترکیب (درصد وزن)									
آلیاژ									
فولاد زنگ زن ۳۰۴									
فولاد زنگ زن ۳۱۶									
فولاد زنگ زن ۳۱۷L									
SSC-6MO									

جمع بندی

امروزه بیش از ۱۵۰ نوع از فولاد زنگ زن وجود دارد، که معمولاً پانزده مورد استفاده می‌شود. در سال ۲۰۱۰، تولید ناخالص داخلی فولاد زنگ زن در جهان به میزان ۳۰/۷ میلیون تن رسید. فولاد فریتی و آستنیتی بیش از ۹۵٪ از اینها را تشکیل می‌دهد. حدود ۴٪ از فولاد زنگ زن مربوط به فولاد سخت شونده و مارتریتی است. در حال حاضر فولاد زنگ زن داپلکس کمتر از ۱٪ از تولید فولاد زنگ زن را تشکیل می‌دهد. در حالت کلی انتظار می‌رود که استنلس استیل داپلکس مقدار قابل ملاحظه‌ای از تولید در آینده را به خود اختصاص دهد. در طول دهه گذشته، تولید داپلکس ۱۰۰٪ افزایش یافته است. طبق تاریخچه استنلس استیل، این ماده تنها حدود ۱۰۰ سال وجود داشته است. جالب است بدانید رشد آن بالاترین مقدار در بین مواد دیگر در جهان بوده است. در طول ۳ دهه گذشته، این مقطع حدود ۶٪ نرخ رشد سالیانه را به طور متوسط داشته است.

منابع

- ۱- سروپ کالپاکجیان، استیون آر، اشמיד؛ مترجم محمد کاظم بشارتی گیوی (۱۳۸۹)، "مهندسی تولید و فناوری"، انتشارات دانشگاه تهران
- ۲- بهزاد آهنگری، "شناسایی و مقابله با پدیده خوردگی در خطوط لوله فولادی انتقال و شبکه‌های توزیع نفت و گاز"، انتشارات ناقوس

3- جان لیپولد، دامیان کوتکی؛ مترجم امیر خاکزاد. "متالورژی و جوشکاری فولادهای زنگ نزن" انتشارات طراح
4- مسعود یوسفی، حجت‌اله زیادی، کلاتر نیستانکی (۱۳۹۲). فرهنگ نامه تخصصی متالورژی، انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید

رجایی

پی‌نوشت

- 1- عضو هیئت علمی دانشگاه پیام نور
2- انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیر مخرب ایران



آزمایش آلتراسونیک با تکنیک موج هدایت شده

مسعود شاهی

حضور عیب می باشد، ولی اطلاعات جزئی تر در مورد ریخت عیوب را بطور کمی نمی دهد. بنابراین در رویه بازرسی استفاده از آزمایشات هدایت شده برای نشان دادن موقعیت ها حائز اهمیت است و سپس اقدامات بعدی با سایر بازرسی های مرسوم بروی محل های شناسایی شده انجام می شود. این ترکیب برای دادن گزارش دهی حد آستانه مفید می باشد، امواج هدایت شده پوشش کاملی از لوله را در محدوده آزمایش فراهم می نماید، و همه موقعیت ها را برای آگاهی از جزئیات که بوسیله سایر بازرسی ها ضروری است مشخص می نماید بعبارت دیگر GW احتمال آشکارسازی را بالا می برد و بازرسی از هر محل را با ارزیابی صحیح شناسایی می کند.

اصول آزمایش موج هدایت شده

شکل لوله برای هدایت انرژی موج مورد استفاده قرار می گیرد، پراکندگی موج را کاهش و محدوده بازرسی را افزایش می دهد.

امواج هدایت شده و ترانسیدوسرها

امواج هدایت شده اموجی است که انتشار آن با شکل ساختاری یا مرزی هدایت می شود. ساختار جهت موج را هدایت می کند در حالی که خواص مواد، سرعت، تنش ها و جابجا شدن ها را تعیین می نماید. کارکرد امواج هدایت شده در بین ساختار بطوری است که می تواند مسافتی را بدون پراکندگی طی کند که این مزیت اصلی این روش می باشد.

در لوله ها، هندسه موج هدایت شده بوسیله قطر خارجی و ضخامت دیواره لوله تعیین می شود شکل یک منحنی های گروه سرعت موج انتشار یافته برای لوله با قطر خارجی اسمی ۱۵۲ میلیمتر (۶ اینچ)

مقدمه ای بر اسکن دور برد با بهره گیری از امواج هدایت شده

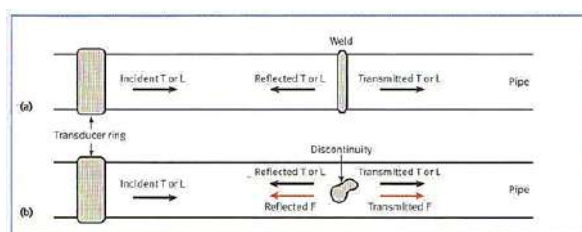
آزمایش موج هدایت شده در حال حاضر روش خوبی برای بازرسی خط لوله می باشد در این روش بطور موفقیت آمیزی امواج تنشی مکانیکی در امتداد دیواره لوله هدایت می شود که می تواند مسافت طولانی را طی کند. بنابراین بطور سریع اسکن نزدیک به صد درصد پوشش داده شده فراهم می شود، ترانسیدوسر موج را به موقعیت انتخاب شده بروی خط ارسال می کند و سپس اکو برگشتی از بدنه یا عیب را دریافت می کند زمان رسیدن اکوها بیانگر فاصله انعکاس دهنده ها تا ترانسیدوسر می باشد در یک مرحله آزمایش فاصله ای به اندازه ۵۰ متر یا بیشتر پوشش داده می شود.

امروزه بازرسی موج هدایت شده طویل برای آشکارسازی خوردگی بروی خطوط لوله بالای زمین مورد استفاده قرار می گیرد چنین خطوطی بوسیله روش های مرسوم بازرسی می شود اما مزیت استفاده از موج هدایت شده افزایش سرعت بازرسی و اطمینان از سطح پوشش دهی در حدود صد درصد می باشد. با بهبود تجارب این روش برای کاربردهایی با پیچیدگی بیشتر توسعه یافت، شامل تقاطع خطوط با جاده ها، خطوط لوله دفنی، خطوط لوله زیر دریا، خطوط لوله پوشش شده و هندسه های پیچیده که در بعضی از این موارد جایگزین دیگری وجود ندارد بنابراین استفاده از موج هدایت شده از هزینه هایی نظیر خاکبرداری برای جستجو و بررسی جلوگیری می کند.

آزمایش موج هدایت شده بعنوان ابزار اسکن

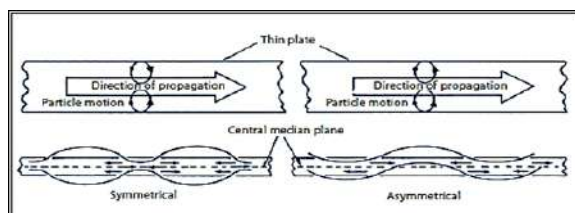
نقش مرسوم آزمایش هدایت شده امروزه اسکن نمودن است. اکوهای برگشتی از عیوب که بوسیله دستگاه دریافت شده است نشان دهنده

محوری نیز متقارن است (یعنی، فقط شامل مد بر خوردی) بعبارت دیگر، سیگنال انعکاس یافته از الگوی نامتقارن محوری شامل دو قسمت متقارن و نامتقارن محوری است و این رفتار می تواند بیان کننده قابلیت آشکارسازی عیوب در جوش ها باشد. جوش لب به لب متقارن محوری نباید موج مارپیچی را منعکس کند، بنابراین عیوب در جوش عدم تقارن را ایجاد می کند و باعث انعکاس موج به شکل مارپیچی می شود.



شکل ۲- مدهای انعکاسی a - مدمتقارن انعکاس و انتقال از یک وضعیت با تقارن محوری b - انتقال، انعکاس و تبدیل مد از یک وضعیت نامتقارن محوری (جایی که T امواج پیچشی و L امواج طولی و F امواج مارپیچی است)

برای این دلیل هر دو موج مارپیچی و پیچشی قابل اندازه گیری می باشد و اطلاعات بصورت کامل فراهم می شود. قابلیت امواج هدایت شده از همان قوانین گوناگون امواج bulk تبعیت می کند با امواج هدایت شده امکان پیدا کردن عیوب با عمق های کمتر از یک طول موج وجود دارد استحکام انعکاس امواج از هر وضعیت رابطه مستقیم با مساحت تغییر سطح مقطع لوله نسبت به وضعیت محوری بعدی خود دارد. همچنین اندازه طول عیوب بر قابلیت انعکاس تاثیر گذار است، مجموع رفتار بواسطه اثر تداخل بین انعکاس ها از شروع تا ته عیب می باشد. با جاروب فرکانس استفاده شده بوسیله دستگاه امکان ندیدن عیوب غیر ممکن است و بوسیله ارتباط فرکانسی تمام بازه فرکانسی قابل استفاده است، بازرس GW می تواند فرکانس نمایش داده شده از نتایج را بطور پیوسته در حین آنالیز دیتاها تغییر دهد و زمانی که دامنه عیب حداکثر می شود طبقه بندی را انجام دهد در شکل (۳) شماتیک موج متقارن و نامتقارن نشان داده می شود



شکل ۳- شماتیک موج متقارن و نامتقارن

میرایی صوت (استهلاک)

یکی از مزیت های GW طی نمودن مسیری طولانی بدون کاهش قابل توجهی از انرژی می باشد و میرایی به دلیل عوامل ذیل می باشد:

- میرایی ذاتی مواد
- کاهش انرژی صوت از لوله به درون موادی که به آن متصل است (برای مثال، ماسه یا گل از لوله دفن شده باشد)

رده ۴۰ لوله فولادی نشان داده شده است گروه سرعت یعنی سرعت دسته موج برای مثال **pulsed** یا **tone burst** و مقدار سرعت در GW مهم می باشد. برای همه اهداف کاربردی، حصول موفقیت آمیز امواج هدایت شده برای آزمایش غیر مخرب ضروری است:

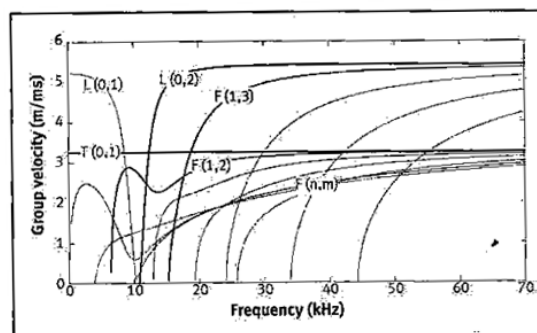
- خلوص مد انتقال و دریافت بوسیله انتخاب مدهای ویژه موج هدایت شده

- مدهای تولید شده متفرق نشوند.

- تمام سطح مقطع دیواره لوله با صوت جاروب شود.

- سیگنال های دریافتی از هر جهت متمایز باشد.

بطور معمول سازندگان تجهیزات GW از تکنیک تبدیل کننده های (ترانسادیوسرهای) پیزوالکتریک استفاده می کنند. همچنین جایگزین هایی نظیر ترانسادیوسر های الکترومغناطیس و الکترومغناطیسی آکوستیکی نیز وجود دارد. البته تکنیک پیزوالکتریک معمولاً بواسطه استحکام و کیفیت سیگنال دریافتی مطلوبتر است گذشته از این بواسطه فرکانس پایین اپراتوری و طراحی مناسب پروب، تبدیل کننده های پیزوالکتریک بطور ساده با بدنه لوله کوپل می شوند. کوپل حاصل شده با این تکنیک بدون هر گونه عامل کوپلینگ و با حداقل شرایط آماده سازی سطح (نظیر برطرف نمودن رنگ، پوسته های خوردگی و ...) پایدار و نتایج خوبی تکرار می شود.



شکل ۴- منحنی ها در گروه سرعت های انتشار یافته برای لوله ۶ اینچ رده ۴۰

آشکارسازی عیوب

آزمایش GW عموماً بصورت پالس اکو می باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است موج تولید شده با پروب در امتداد لوله انتشار می یابد و انعکاس نسبی از هر محلی که تغییری در سطح مقطع لوله وجود داشته باشد بدست می آورد چنین محل هایی شامل وضعیت های مناسب نظیر جوش های لب به لب، و از عیوبی نظیر قسمت های خوردگی انعکاس بدست آید و سیگنال های انعکاس یافته دریافتی از هر محل ثبت می شود. لوله در خط طولی تقارن محوری دارد بدلیل اینکه شکل لوله بطور محیطی یکنواخت است لذا خط تقارن حفظ می شود که به آن تقارن محوری گفته می شود. به الگویی از لوله که خط تقارن را قطع نماید (نظیر عیوب، نشستی ها و منافذ) عدم تقارن محوری گفته می شود.

شکل (۲) نشان می دهد که سیگنال انعکاس یافته از الگوی تقارن



شکل ۴- مثالی از وضع قرار گرفتن دستگاه آزمایش امواج هدایت شده، که نشان دهنده نصب رینگ قابل تنظیم بروی لوله

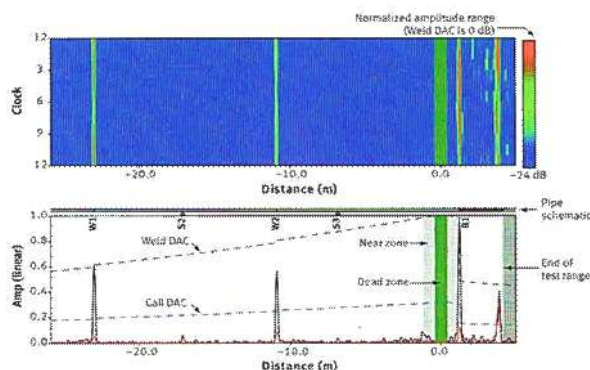
کیفیت داده ها

کیفیت داده های بدست آمده در حین آزمایش به شدت تاثیر پذیر از دستگاه و تنظیمات صحیح آن می باشد بنابراین توصیه می شود از عملکرد صحیح و تنظیم درست اطمینان حاصل شود. موارد نیاز برای بازدید از دستگاه GW به شرح ذیل است:

- بررسی توان پروب
- بررسی استحکام کوپلینگ پروب - بررسی کابل پروب
- بررسی سخت افزار دستگاه و درجه حرارت - کنترل نسبت سیگنال به نویز
- نتایج این بازدیدها به همراه داده ها باید ثبت شود، هر گونه خطا توسط نرم افزار دستگاه پیغام هشدار می دهد و دیدن داده بلوکه می شود و آنالیز باید توسط پرسنل دارای گواهینامه انجام شود.

ارائه نتایج

شکل (۵) نتایجی از لوله با وضعیت متقارن (برای مثال، جوش) و نامتقارن (برای مثال، نگه دارنده) را نشان می دهد نتایج آزمایش GW عموماً با دو الگوی بالا C-SCAN از نمای بالا (لوله نورد نشده) و الگوی پایینی نمایش A-SCAN نمایش داده می شود.



شکل ۵- مثال نتایج a-نمایش نمای بالای لوله از نوع C-scan و b- ردیابی نتیجه از نوع A-scan. جوش های W1 و W2 از وضعیت تقارن محوری واز نوع احاطه شده پیرامون محیط لوله، در جایی که نگه دارنده S2 نامتقارن محوری است که در موقعیت ساعت شش قرار دارد. B1. تو رفتگی قرار گرفته شده نزدیک حلقه پروب و در جهت مثبت. منظور از DAC تصحیح دامنه بر حسب فاصله.

- پراش از هر چیزی که تغییرات موضعی بروی لوله ایجاد شده باشد (نظیر تغییرات در هندسه، مواد چسبیده شده بروی لوله، زبری و...))

انتخاب مد

- ابتدا در اواسط سال ۱۹۹۰ از روش GW با استفاده از امواج طولی استفاده شد بعد از آن سریعاً تصدیق شد که مد پیچشی نسبت به مد طولی ارجحیت دارد و کاربرد آن بنا بر دلایل ذیل توسعه یافت:
- مد پیچشی فقط به دو ردیف پروب نیاز دارد (برای مد طولی چهار ردیف لازم است)
- مد پیچشی تمام بازه فرکانسی را منتشر می کند و بطور کامل متفرق نمی شود.
- نسبت سیگنال به نویز مد پیچشی بالاتر از مد طولی است لذا حساسیت بیشتری دارد.
- مد پیچشی نسبت به ویسکوزیته مایع درون لوله غیر حساس است.
- دو مد طولی در حین آزمایش انتشار می یابد لذا نشانه های کاذبی ایجاد می شود ولی مد پیچشی این مشکل را ندارد.

اجرای آزمایش موج هدایت شده (Guided Wave)

دستگاه GW نتایج آزمایش را بصورت A-Scan ارائه می کند، نشان دادن فاصله در امتداد طولی لوله و C-Scan نمای لوله نورد نشده (نمای بالای لوله) را نمایش می دهد.

اطلاعات مورد نیاز قبل از آزمایش

لازم است کارفرما اطلاعات لازم در خصوص وضعیت آزمایش را اعلام نماید، نظیر ساینز، دسترسی محلی، چیدمان، انواع نگه دارنده ها و جداکننده ها، عایق گذاری، پوشش ها، آستری، رسوبات، درجه حرارت، وضعیت نرمال، عیوب شایع و پوشش دهی مورد نیاز و هر گونه اطلاعات در مورد تاریخچه خط لوله برای مثال عیوب پیدا شده در گذشته، نقشه ها و هر آیتم سودمند دیگر، آماده سازی سایت و لوله لازم است. که این شامل دسترسی بطور ایمن به محل آزمایش است، برای مثال خاک برداری یا نصب داربست و یا کندن عایق و پوشش برای اجازه دادن نصب حلقه پروب بروی لوله، بازرس GW باید قبل از شروع کار مشورت و رایزنی های لازم برای انجام بهینه آزمایش را انجام دهد.

اجرای آزمایش

شکل (۴) استقرار تجهیزات آزمایش را نشان می دهد. عموماً دستگاه ها دارای باتری و پرتابل می باشد همچنین مقاومت لازم برای استفاده در سایت را دارند. دستگاه به حلقه پروب، که بروی لوله نصب است از طریق دو عدد کابل متصل می باشد و آزمایش بوسیله نرم افزار نصب شده بروی کامپیوتر پرتابل کنترل می شود که بوسیله کابل USB به دستگاه که در مجاورت لوله می باشد متصل است. تنظیم دستگاه GW و شبکه داده ها در عرض چند دقیقه انجام می شود.

ردیابی نتیجه A-scan

در روش مرسوم مشاهده داده، دامنه های دریافتی از هر دو موج هدایت شده پیچشی و مارپیچی با نسبت فاصله از حلقه پروب دیده می شود در الگوی پایین شکل (۴)، دامنه انعکاس یافته نتیجه ای از فاصله با مد پیچشی متقارن بوسیله منحنی سیاه نمایش داده شده و مد مارپیچی نامتقارن بوسیله منحنی آبی رنگ نمایش داده شده است. در هر دو طرف حلقه پروب منطقه کوچکی بنام ناحیه مرده وجود دارد جایی که آنالیز غیر ممکن است که با رنگ سبز در شکل نشان داده شده است ناحیه مرده با ناحیه نزدیک احاطه شده است، جایی که دامنه هایی از امواج هدایت شده دریافتی کوتاهتر از نشانه های پیش بینی شده است که با رنگ خاکستری نمایش داده می شود تمهیدات ویژه ای در کاهش طول این ناحیه مورد استفاده قرار می گیرد برای مثال، هنگامی که سطح مقطع کوچکی از لوله آزمایش شود.

نمایش از نمای بالای لوله C-SCAN

بعضی از سازندگان سیستم های آزمایش موج هدایت شده را ارتقاء داده اند بطوری که قابلیت فرام کردن هر دو نمایش A-SCAN و C-SCAN را دارد. نمایش C-SCAN تصویر دو بعدی دامنه انعکاس یافته نسبت به موقعیت محیطی و فاصله از حلقه پروب را ارائه می دهد. حتی موقعیت عیوب را بصورت دقیق مشخص می نماید بویژه در جهت های محیطی برای مثال، نگه دارنده در کف لوله از عیب در همین موقعیت محوری و در بالای لوله قابل متمایز است که این اطلاعات از نتایج A-SCAN به تنهایی قابل حصول نمی باشد.

کالیبراسیون

دامنه سیگنال هدایت شده با فاصله در امتداد لوله کاهش می یابد و با کالیبراسیون اجازه داده می شود با اندازه گیری ساختار لوله بطور دقیق این کاهش دامنه برآورد شود.

کالیبراسیون دامنه

مکانیزم های مختلفی باعث کاهش دامنه سیگنال در زمان طی شدن در یک مسیر وجود دارد و هدف از منحنی دامنه براساس فاصله (DAC) تصحیح کاهش دامنه است. با مراجعه به شکل (۵) دو سطح منحنی نشان داده می شود، DAC جوش به رنگ سیاه و Call DAC به رنگ آبی، بروی منحنی ها بطور مجزا ترکیبی از تنزل نمایی و افت آنی دیده می شود. جوش ها بعنوان مرجع برای تهیه منحنی های DAC استفاده می شود لذا دامنه کالیبره می شود. بعضی از تکنیک های کالیبراسیون پیشرفته ای توسط سازندگان پیشنهاد می گردد مانند تکنیک کالیبراسیون مطلق، کالیبراسیون توسط اندازه گیری ابعاد جوش یا کالیبراسیون از اندازه گیری خروجی حلقه پروب.

کالیبراسیون فاصله

نرم افزار بطور فرضی سرعت موج پیچشی در فولاد (برابر با سرعت موج عرضی) را تعیین می کند و به اندازه کافی دقیق می باشد اگر لوله

در درجه حرارت بالا باشد سرعت موج پیچشی کاهش می یابد و در هنگام کالیبراسیون برای محاسبه دقیق موقعیت، خطا می دهد برای تصحیح بدست آوردن فاصله از متر برای اندازه گیری استفاده می شود و فاصله مقیاس بندی می گردد بطوری که محل واقعی محاسبه و منطبق شود.

نسبت سیگنال به نویز

سیگنال به نویز که همان نسبت دامنه سیگنال به سطح نویز برای اندازه گیری کیفیت آزمایش غیر مخرب استفاده می شود برای تعیین حد آستانه (Threshold) بالاترین نسبت سیگنال به نویز، بالاترین احتمال آشکارسازی و کمترین عامل وقوع نشانه های کاذب را ایجاد می کند برای آزمایش GW جهت یافتن خوردگی با کاهش ۶ درصد ضخامت دیواره حداقل نسبت سیگنال به نویز باید 32 دسی بل باشد. برای بهترین تعادل بین حساسیت آشکارسازی و حداقل نشانه کاذب آستانه ۶ دسی بل بالاتر ایجاد شود (یعنی دو برابر دامنه سطح نویز) تا نشانه های کاذب به منحنی DAC بر خورد نکنند.

تفسیر نتایج

تفسیر داده ها بخش مهمی از آزمایش GW می باشد با هر روش آزمایش غیر مخرب، موفقیت تفسیر وابستگی زیادی به آموزش صحیح و میزان تجربه بازرس دارد و این موضوع برای آزمایش GW نیز مصداق دارد. در ابتدای آزمایش باید محل همه جوش، فلنج و نگهدارنده ها مشخص شود، و همه ی نشانه های بالاتر از منحنی Call DAC باید بررسی شود همچنین همه نشانه های بالاتر از حد آستانه، اگر پایین تر از منحنی Call DAC باشد نیز باید بررسی شود.

بازرسی ثانویه

بزرگی بازرسی ثانویه از محل نشانه ها بوسیله نیاز مندی های گزارش تعیین می شود. مطابق اصول فنی، در حقیقت بازرسی ثانویه بخشی از بازرسی GW نیست - توجه، برای مثال، مقرر است بازرسی موج هدایت شده و بازرسی ثانویه با دو رویه جداگانه تعیین می شود. بهر حال آزمایش GW به همراه بازرسی ثانویه اثر بخش می شود.

مثال های کاربردی

آزمایش موج هدایت شده کاربردهای وسیعی دارد، بیشترین اثربخشی را دارد و رنج وسیعی را نسبت به سایر روش های آزمایش غیر مخرب پوشش می دهد.

اسکن سریع دور برد

یکی از مزایای اصلی GW رنج وسیع پوشش بازرسی خطوط لوله است که بدست می آید و این بواسطه قابلیت اسکن دوربرد از لوله در یک مرحله بازرسی می باشد. خط لوله گاز ۵۰۸ میلیمتر (۲۰ اینچ) در یک مرحله آزمایش حدود ۲۳۰ متر قابل بازرسی می باشد ۱۰۰ متر در جهت منفی و ۱۳۰ متر در جهت مثبت محور طولی، نتایج عدم

جوش‌های محیطی را نیز نشان می‌دهد.

خوردگی در زیر اتصالات عایقی

شیوع اشکال خوردگی در زیر اتصالات عایقی یکی از کاربردهای اولیه برای توسعه GW بود بخش کوتاهی از اتصال عایقی (تقریباً ۱ متر) از لوله برای نصب پروب حلقوی لازم است آزاد باشد که از این محل چندین متر از هر طرف قابلیت دسترسی برای شناسایی وجود خوردگی در زیر اتصال وجود دارد به همین دلیل اهمیت به کارگیری و تضمین یکپارچگی را نسبت به سایر تکنیک‌های مرسوم برای بازرسی این نوع از خوردگی را دارد (برای مثال تکنیک‌های رادیوگرافی) که می‌تواند سطوح ایجاد خطا شود زیرا بازرسی از تمام سطح مقطع امکان پذیر نمی‌باشد.

لوله درجه حرارت بالا

بعضی از سازندگان تجهیزاتی تولید می‌کنند که برای بازرسی لوله تحت درجه حرارت بالا طراحی شده است (تا دمای ۳۵۰ درجه

سانتیگراد) برای مثال حلقه پروب نسوز که تا ۲۰۳ متر را در دمای ۲۴۰ درجه سانتیگراد قابلیت بازرسی دارد. سطوح خورده شده شناسایی و با بازرسی ثانویه با دیگر تکنیک‌ها بازرسی می‌شود.

نتیجه‌گیری

آزمایش راهنمایی شده بهترین روش برای بازرسی خطوط لوله می‌باشد لازم است به خاطر داشته باشیم که این روش اسکن باید برای آشکارسازی، تعیین محل و طبقه‌بندی عیوب انجام می‌شود و بازرسی‌های ثانویه به همراه دیگر تکنیک‌های غیر مخرب کمی، برای اندازه‌گیری و ساینینگ دقیق عیوب باید انجام شود استفاده از روش موج هدایت شده از صرف هزینه‌های زیاد برای جستجو و بررسی می‌کاهد و وضع قرارگیری دستگاه و بدست آوردن اطلاعات در مدت زمان چند دقیقه انجام می‌شود.

پی‌نوشت

- رییس بازرسی شرکت گروه صنعتی سپاهان

بررسی و مقایسه رفتار خوردگی یکنواخت فولاد P460NH جوشکاری شده با استفاده فرایندهای جوشکاری SMAW و TIG

حسین طهماسبی منش^۱، علیرضا نصر اصفهانی^۲

چکیده

فولاد میکرو آلیاژی P460NH در کاربردهایی همچون ساخت دیگهای بخار و مخازن تحت فشار استفاده می شود. برای جوشکاری این فولاد می توان از فرایندهای جوشکاری و مواد پرکننده متفاوت استفاده نمود. در این پژوهش از فرایند جوشکاری دستی با قوس الکتریکی (SMAW) با الکترود E8018-G و فرایند جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن با گاز محافظ آرگون (TIG) با سیم جوش ER80S-G استفاده شد و برای بدست آوردن پارامترهای بهینه جوشکاری، براساس استانداردهای ASME IX، جوشکاری انجام شد. آنگاه با نمونه برداری از مقطع جوش رفتار خوردگی نواحی مؤثر از حرارت، گرده جوش و فلز پایه به طور جداگانه با استفاده از آزمون پلاریزاسیون تافل در محلول ۳/۵ درصد NaCl مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی رفتار خوردگی مناطق مختلف نیز نشان داد در جوشکاری دستی با قوس الکتریکی با الکترود E8018-G، ناحیه متأثر از حرارت دارای بیشترین پتانسیل خوردگی (۰/۶۵۲ ولت) و کمترین چگالی جریان خوردگی ($1/75 \times 10^{-5}$ آمپر بر سانتی متر مربع) است. این در حالی است که فلز پایه با کمترین پتانسیل خوردگی (۰/۶۹۳ ولت) و بیشترین چگالی جریان خوردگی ($1/2 \times 10^{-5}$ آمپر بر سانتی متر مربع) نسبت به فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت قرار دارد و در جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن با گاز محافظ آرگون با سیم جوش ER80S-G، فلز جوش دارای بیشترین پتانسیل خوردگی (0/689 ولت) و کمترین چگالی جریان خوردگی ($5/4 \times 10^{-5}$ آمپر بر سانتی متر مربع) است و فلز پایه با پتانسیل خوردگی (0/693 ولت)، دارای بیشترین چگالی جریان خوردگی ($1/2 \times 10^{-5}$ آمپر بر سانتی متر مربع) نسبت به فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت است. به طور کلی با بررسی مقاومت به خوردگی دو قطعه جوشکاری شده میتوان بیان کرد که فرایند جوشکاری دستی با قوس الکتریکی با الکترود E8018-G دارای مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به فرایند جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن با گاز محافظ آرگون با سیم جوش ER80S-G است.

کلمات کلیدی: فولاد P460NH، الکترود E8018-G، سیم جوش ER80S-G، پتانسیل خوردگی، جریان خوردگی، سختی، پلاریزاسیون تافل.

مقدمه

فولاد میکرو آلیاژی P460NH از خانواده فولادهای دانه ریز می باشد.

ورق های این فولاد به علت عملکرد دما بالا، در کاربردهایی با درجه حرارت، از جمله در صنایع نفت و گاز، صنایع مواد شیمیایی، نیروگاه ها، دیگ های بخار، صنایع تولید میدل حرارتی، سیلندرهای گاز و ایستگاه آب فشار قوی استفاده می شود [۱]. خوردگی در قطعات جوشکاری شده و در منطقه جوش علیرغم استفاده از طرح اتصال مناسب، انتخاب فلز پایه و فلز پرکننده مناسب مطابق با استاندارد و رعایت تمام اصول جوشکاری، می تواند ایجاد شود [۲].

جوشکاری این فولادها باعث کاهش مقاومت به خوردگی می شود. ساختار و ترکیب شیمیایی متفاوت در منطقه جوش، فلز پایه و ناحیه متأثر از حرارت باعث ایجاد خوردگی گالوانیکی می شود. عوامل مختلفی در رفتار خوردگی منطقه جوش تأثیر گذار است. بهترین حالت پس از جوشکاری ایجاد جوشی سالم، با مقاومت به خوردگی بیشتر نسبت به فلز پایه است. فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا حاوی عناصر آلیاژی اضافی (تا مجموع ۳ تا ۴ درصد) هستند که باعث افزایش مقاومت به خوردگی می شوند [۳]. پزشکیان و همکاران تأثیر اندازه زاویه پخ را بر خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری فولاد P460NH جوشکاری شده با الکترود E8018-G مورد بررسی قرار داده اند. نتایج نشان داد استحکام جوش در نمونه جوشکاری شده با پخ ۶۰ درجه، بیشتر از فلز پایه است. همچنین با توجه به اینکه کاهش زاویه پخ می تواند موجب تشکیل ترکیبات بین فلزی در ناحیه جوش بشود، در نتیجه کاهش انرژی ضربه جوش را به دنبال خواهد داشت [۴].

رفیع زاده و همکاران نیز تأثیر میزان حرارت ورودی ناشی از جوشکاری تیگ را بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد HSLA-100 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ریزساختار ناحیه جوش شامل بینیت دانه ای، فریت سوزنی، فریت چندوجهی و مقدار کمی مارتنزیت می باشد. افزایش حرارت ورودی موجب افزایش نسبی میزان فریت سوزنی و فریت چندوجهی ناحیه جوش و افزایش قابل تأمل میزان بینیت به همراه کمی مارتنزیت خواهد شد. اندازه دانه هر دو ناحیه جوش و متأثر از حرارت نیز نسبت به فلز پایه بسیار درشت تر و خواص حاصل از عملیات ترمومکانیکی و رسوب سختی قبلی از بین رفته است. همچنین افزایش مقدار حرارت ورودی موجب شده است سختی مرکز جوش به طور نسبی کاهش و ناحیه متأثر از حرارت افزایش یابد [۵].

هیسونگ و همکاران [۶] تأثیر ریزساختار و ترکیب شیمیایی را بر رفتار الکتروشیمیایی جوش فولاد A516 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داده است که شاخه کاتدی نمودارهای پلاریزاسیون تافل

ناحیه آورده شده است.

نتایج و بحث

- بررسی خوردگی نمونه‌های جوشکاری SMAW با الکترود E8018-G

در شکل (۲) با بررسی نمودار پلاریزاسیون تافل حاصل از نواحی سه گانه فرایند جوشکاری SMAW با الکترود E8018-G، و بررسی نتایج بدست آمده از نمودار، در جدول (۴) با توجه به پتانسیل خوردگی مشاهده می‌شود که ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش نسبت به فلز پایه در موقعیت نجیب تری قرار دارند.

این در حالی است که چگالی جریان خوردگی این نواحی نسبت به فلز پایه بیشتر است، علت اختلاف در پتانسیل خوردگی و چگالی جریان خوردگی در این نواحی را می‌توان ناشی از وجود فریت سوزنی در ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش نسبت به فلز پایه دانست به طوری که با افزایش فریت سوزنی پتانسیل مثبت تری چگالی جریان خوردگی کاهش یافته است و با کاهش چگالی جریان خوردگی مقاومت پلاریزاسیون افزایش می‌یابد و مشاهده می‌شود که فلز پایه با دارا بودن کمترین فریت سوزنی مقاومت پلاریزاسیون بیشتری نسبت به ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش دارد [۹].

بررسی خوردگی نمونه‌های جوشکاری قوسی TIG با سیم جوش ER80S-G

در شکل (۳) با بررسی نمودار پلاریزاسیون تافل جوشکاری TIG با سیم جوش ER80S-G و نتایج بدست آمده از نمودار در جدول (۵) مشاهده می‌شود که با توجه به میزان پتانسیل خوردگی، فلز جوش و فلز پایه نسبت به ناحیه متأثر از حرارت در موقعیت نجیب تری قرار دارند و چگالی جریان خوردگی به ترتیب از فلز پایه به سمت فلز جوش افزایش یافته است و موجب کاهش مقاومت پلاریزاسیون شده است به طوری که فلز جوش دارای بیشترین چگالی جریان خوردگی و کمترین مقاومت پلاریزاسیون است.

نتیجه گیری و جمع بندی

با توجه نتایج حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون تافل نواحی مختلف می‌توان بیان کرد که به ترتیب فلز پایه ($6/3 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$) دارای بیشترین مقاومت پلاریزاسیون سپس فلز جوش E8018-G ($3/4 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$)، ناحیه متأثر از حرارت فرایند جوشکاری SMAW ($2/5 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$)، ناحیه متأثر از حرارت فرایند جوشکاری TIG ($2/1 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$) و در نهایت فلز جوش ER80S-G ($2/2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$) دارای کمترین میزان مقاومت پلاریزاسیون است، با توجه به شکل (۴ و ۵) مقاومت به خوردگی از بیشترین به کمترین مقدار به ترتیب زیر می‌باشد:

- فلز پایه

- فلز جوش E8018-G

- ناحیه متأثر از حرارت فرایند جوشکاری SMAW با الکترود

فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش با یکدیگر متفاوت است، در حالی که شاخه آندی آن‌ها تقریباً یکسان است، علت آن تغییر در نوع فریت در نواحی مختلف بیان شده است به طوری که در ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش، با افزایش مقادیر فریت سوزنی چگالی جریان خوردگی افزایش می‌یابد. این در حالی است که فلز پایه نسبت به ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش مقاومت پلاریزاسیون بهتری دارد.

مواد و روش پژوهش

در این پژوهش از چهار تکه ورق ۱۶ میلی متری فولاد میکروآلیاژی P460NH با ترکیب آلیاژی مطابق با جدول (۱) و ابعاد $16 \times 200 \times 6$ میلی متر برای جوشکاری دو قطعه مجزا با استفاده از دو فرایند قوس الکتریکی تنگستن با گاز محافظ آرگون (TIG) به صورت قطبیت منفی (DCSP) و قوس الکتریکی با الکترود روکشدار (SMAW) به صورت قطبیت مثبت (DCRP) استفاده شد.

آماده سازی نمونه‌ها و طرح اتصال مطابق شکل (۱) و به صورت جناقی یک طرفه (V شکل) با زاویه نهایی ۶۰ درجه، فاصله اتصال ۲/۵ میلی متر ایجاد و سپس عملیات جوشکاری با استفاده از الکترود E8018-G ساخت شرکت بوهلر و سیم جوش ER80S-G ساخت شرکت آما (جدول ۲) مطابق با پارامترهای جدول (۳) انجام شد. میزان حرارت ورودی با استفاده از رابطه ۱ قابل محاسبه است.

$$H = 60 \frac{VI}{s} \quad (1)$$

آماده سازی نمونه‌های خوردگی

برای بررسی رفتار خوردگی مناطق سه گانه در حرارت‌ها و مواد پرکننده متفاوت از آزمون پلاریزاسیون تافل استفاده شد. این آزمون طبق استاندارد ASTM G5-04 [7] با دستگاه پتانسیواستات EG & G مدل A273 انجام شد. برای انجام آزمون از محلول NaCl با غلظت ۵/۳ درصد از بازه ۲۵۰ تا -۲۵۰ میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز (EOCP) انجام شد. کلیه نمونه‌ها قبل از انجام آزمون تا شماره ۲۰۰۰ سنباده زنی و با نرخ روبش ۱ mv/sec 1 آزمون خوردگی انجام شد. یک مساحت ۰/۰۷ میلی متر مربع از آن‌ها انتخاب و نتایج به صورت نمودارهای تافل ثبت شد.

اندازه گیری مقاومت به خوردگی

برای محاسبه سرعت خوردگی نواحی مختلف در دو فرایند جوشکاری و فلزهای پرکننده متفاوت می‌توان از نمودار پلاریزاسیون تافل و با استفاده از پتانسیل خوردگی E_{corr} و چگالی جریان خوردگی I_{corr} که معرف سرعت خوردگی است، استفاده کرد و رفتار خوردگی نواحی مختلف را بررسی نمود. با استفاده از نمودارهای تافل، شیب آندی (β_a) و شیب کاتدی (β_c) محاسبه شد و با استفاده از رابطه (۲) مقاومت پلاریزاسیون (R_p) تعیین شد [۸].

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 I_{corr} (\beta_a + \beta_c)} \quad (2)$$

میزان مقاومت پلاریزاسیون برای هر ناحیه در جدول مربوط به آن

Welding Research

متالورژی، انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن علمی ریخته‌گری ایران، مرکز همایش‌های بین‌المللی شهید بهشتی - تهران، صص ۱۰-۱۳۹۳.

6-H.H, Huang. W.T, Tsai. J.T, Lee. Electrochemical behavior of the simulated heat-affected zone of A516 carbon steel in H₂S solution. Electrochimica acta, 41(7-8), pp.1191-1199. 1996.

7-American Society for Testing and Materials, Standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements, ASTM G5, 2004.

8- مارس جی فونتانا، نوبرت دی گرین، ترجمه احمد ساعتچی مهندسی خوردگی، چاپ جهاد دانشگاهی، واحد اصفهان، ۱۳۸۴.

9- K.M, Deen. R, Ahmad. I.H, Khan. Z, Farahat. Microstructural study and electrochemical behavior of low alloy steel weldment, Material and Design, Vol. 31, pp. 3051-3055, 2010.

پی‌نوشت

- 1- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان
- 2- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

E8018-G

-ناحیه متأثر از حرارت فرایند جوشکاری TIG با سیم جوش

ER80S-G

-فلز جوش ER80S-G

مراجع

1-EN Standards, Weldable Fine Grain Steels, Normalized, EN 10028-3; 1980

2-J.R .Davis, Corrosion of Weldments, ASM International, USA, 2006.

3-M, Fontana. D, Norbert. Greene. Corrosion Engineering, 1967.

4-Pezeshkian, M. Shayanfar, P. Shafaiepour, Saiedeh. Groove Angles Influence on Mechanical and Microstructural Properties of P460N Steel in SMAW. Advanced Materials Research. Vol 891-892. pp. 1551-1558, 2014.

5- رفیع زاده، ر، توحید، س، علیرضا ابراهیمی، ملانی میلانی، ج،

راضی‌نیا، ت، تأثیر حرارت ورودی ناشی از جوشکاری GTA بر

ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد HSLA-100، هشتمین

همایش مشترک و سومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مواد و

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلز پایه (فولاد P460NH) بر اساس درصد وزنی

عنصر	Fe	C	Si	Mn	Ni	P	S	CR	Mo
درصد وزنی	مابقی	۰٫۱۸۴	۰٫۴۹۴	۱٫۴۰۶	۰٫۵۷	۰٫۰۷	۰٫۰۴	۰٫۴۸	۰٫۳۰
عنصر	V	Nb	Ti	Al	Cu	Co	W	Sn	Pb
درصد وزنی	۰٫۰۹۰	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۲۷	۰٫۲۰۱	۰٫۱۴	۰٫۰۱	۰٫۱۵	۰٫۰۲

جدول ۲- ترکیب شیمیایی الکتروود (E8018-G) و سیم جوش (ER80S) مورد استفاده برای جوشکاری

فلز پرکننده	C	Si	Mn	Ni	Mo
الکتروود E8018-G (بوهرل)	۰٫۰۶	۰٫۳	۱٫۲	۰٫۸	۰٫۳۵
سیم جوش ER80S-G (اما)	۰٫۰۷	۰٫۷	۱٫۱	۰٫۹	---

جدول ۳- نحوه انتخاب پارامترهای جوشکاری با توجه به نوع مواد پرکننده

ماده مصرفی	قطر (mm)	شماره پاس	ولتاژ (V)	شدت جریان (A)	سرعت جوشکاری (cm/min)	حرارت ورودی (KJ/cm)	میانگین حرارت ورودی (KJ/cm)
E8018-G	۲٫۵	۱ (پاس ریشه)	۲۴	۱۲۰	۸	۱۶٫۲	۱۳
	۳٫۲۵	۲ (پاس پرکن)	۲۴	۱۱۰	۱۲	۱۳٫۲	
	۳٫۲۵	۳ (پاس نما)	۲۴	۱۲۰	۱۸	۹٫۶	
ER80S-G	۳٫۲۵	۱ (پاس ریشه)	۱۴	۱۲۰	۶	۱۶٫۸	۱۴٫۰۲
	۳٫۲۵	۲ (پاس پرکن)	۱۴	۱۴۰	۹	۱۳٫۰۶	
	۳٫۲۵	۳ (پاس نما)	۱۴	۱۶۰	۱۱	۱۲٫۲۱	

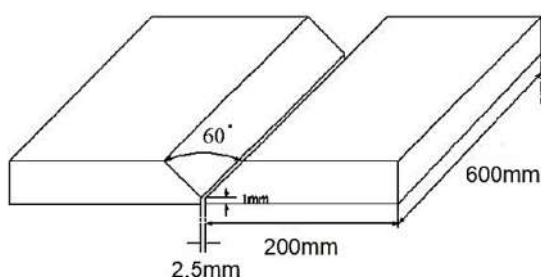
جدول ۴- نتایج حاصل از نمودار پلاریزاسیون تافل فلز جوش E8018-G و ناحیه متأثر از حرارت SMAW

نوع نمونه	چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) (A/cm ²)	پتانسیل خوردگی (E_{corr}) (V vs. SCE)	شیب آندی (β_a)	شیب کاتدی (β_c)	مقاومت پلاریزاسیون (Ω/cm^2)
فلز جوش E8018-G	1.28×10^{-5}	-۰٫۶۸۲	0.068×10^5	-0.289×10^5	3.4×10^4
ناحیه متأثر از حرارت SMAW	1.75×10^{-5}	-۰٫۶۵۲	0.085×10^5	-0.227×10^5	2.5×10^4
فلز پایه	1.2×10^{-5}	-۰٫۶۹۳	0.3623×10^5	-0.7843×10^5	3.6×10^4

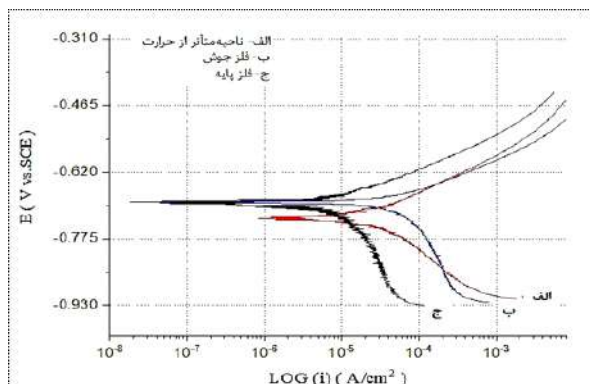
Welding Research

جدول ۵- نتایج حاصل از نمودار پلاریزاسیون نافل فلز جوش ER80S-G و ناحیه متأثر از حرارت جوشکاری TIG

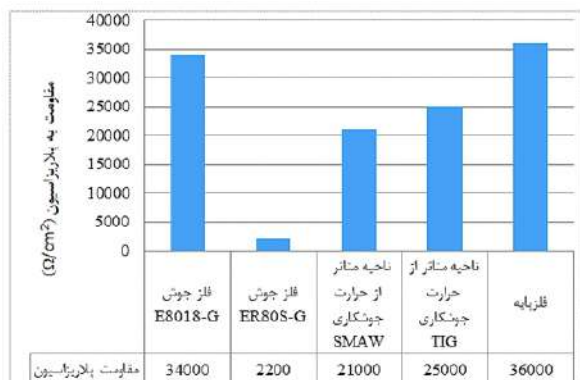
مقاومت پلاریزاسیون (Ω/cm^2)	شیب کاتدی (β_c)	شیب آنودی (β_a)	پتانسیل خوردگی (E_{corr}) (V vs.SCE)	چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) (A/cm^2)	نوع نمونه
$3,4 \times 10^4$	$-0,0289 \times 10^5$	$0,0068 \times 10^5$	-0,682	$1,28 \times 10^{-5}$	فلز جوش E8018-G
$2,5 \times 10^4$	$-0,0227 \times 10^5$	$0,0085 \times 10^5$	-0,652	$1,75 \times 10^{-5}$	ناحیه متأثر از حرارت SMAW
$3,6 \times 10^4$	$-0,07843 \times 10^5$	$0,3623 \times 10^5$	-0,693	$1,2 \times 10^{-5}$	فلز پایه



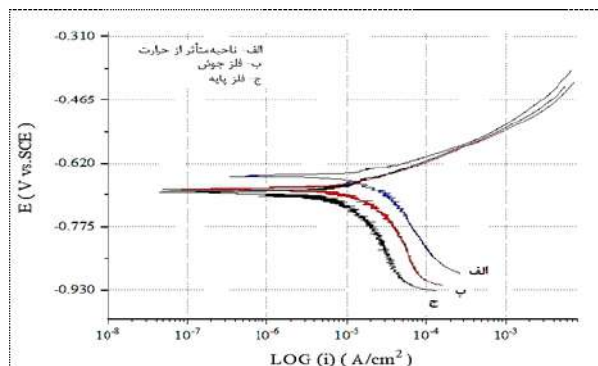
شکل ۱- شمایی از طرح اتصال جهت جوشکاری ورق فولادی P460NH.



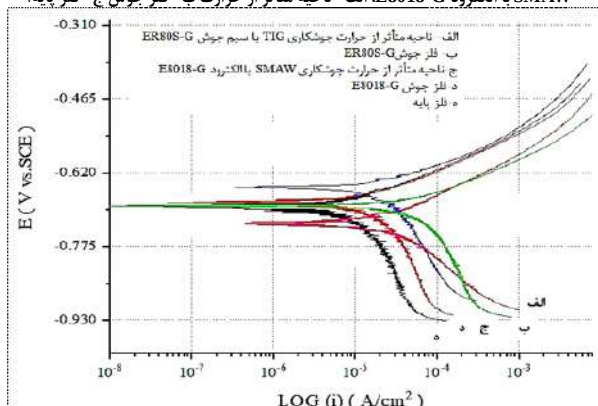
شکل ۳- نمودار پلاریزاسیون نافل جوشکاری فولاد P460NH با استفاده از فرایند جوشکاری TIG با فلز پرکننده ER80S-G الف - ناحیه متأثر از حرارت ب - فلز جوش ج - فلز پایه.



شکل ۵- مقایسه نتایج مقاومت پلاریزاسیون حاصل از نمودار پلاریزاسیون نافل فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت فرایندهای جوشکاری SMAW، TIG و ناحیه فلز پایه.



شکل ۲- نمودار پلاریزاسیون نافل جوشکاری فولاد P460NH با استفاده از فرایند جوشکاری SMAW با الکتروود E8018-G. الف - ناحیه متأثر از حرارت ب - فلز جوش ج - فلز پایه.



شکل ۴- نمودار پلاریزاسیون نافل از فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت فرایندهای جوشکاری SMAW، TIG و ناحیه فلز پایه.

بررسی ریزساختار اتصال آلیاژهای AA2024-T4 به AA6061-T6 به روش TIG

علی مهدی پور آب دهلی^۱، امیر حسین کیایی^۲، امین عنبرزاده^۳

چکیده

در این تحقیق آلیاژهای AA2024-T4 و AA6061-T6 به روش TIG به یکدیگر متصل شدند. آزمایش ها در حالت بدون فلز پرکننده و همراه با فلز پرکننده Sn-5.3Ag-4.6Bi و تحت جریان گاز آرگون 20 Lit/min بر روی قطعه کار متصل شدند. سطح مقطع اتصال با محلول شامل $5\text{ mL } 5\% \text{ HCl}$ و $1\text{ mL } 1\% \text{ HF}$ و $3\text{ mL } 3\% \text{ NH}_3$ و 95 mL آب مقطر حک کاری شد. با توجه به نتایج حاصل از تصویر برداری، استفاده از ترکیب یوتکتیک Sn-5.3Ag-4.6Bi در محل اتصال، تشکیل ترک گرم در محل اتصال را محدود می نماید. استفاده از ترکیبات حاوی عنصر Ag در محل اتصال آلیاژهای آلومینیم که حاوی عنصر Cu باشند، خطر ترد شدن مرزدانه در HAZ، به واسطه تشکیل ترکیب های شکننده را کاهش می دهد؛ در نمونه های بدون فلز پرکننده، در HAZ آلیاژ AA2024-T4، ترکیب ترد فاز Al_2Cu در مرزدانه های آلومینیم شناسایی گردید و ساختار HAZ، مستعد ترک مرزدانه ای است.

کلمات کلیدی: AA2024-T4، AA6061-T6، TIG.

مقدمه

آلیاژهای کار شده آلومینیم سری ۶XXX با روش های جوشکاری GTAW و GMAW از قابلیت جوش پذیری بالایی برخوردار می باشند. اما آلیاژهای سری ۲XXX تنها با استفاده از تمهیدات خاصی با فرایندهای GTAW، GMAW و جوشکاری لیزر قابل جوشکاری هستند و پس از جوشکاری انعطاف پذیری و استحکام آن ها به شدت کاهش پیدا می کند. با آنیل کردن، کاهش استحکام در آلیاژهای رسوب سخت پذیر، کمتر خواهد شد. در آلیاژهای آلومینیم عملیات حرارتی شده T4 و T6، افزایش حرارت ورودی، سبب کاهش استحکام می شود [۱]. با افزایش دامنه انجماد آلیاژهای آلومینیم خطر ترک گرم افزایش می یابد، برای رفع این مشکل استفاده از پرکننده های با ترکیب یوتکتیک پیشنهاد می گردد [۱]. آلیاژ AA2024 با دمای سالییدوس 502°C به علت وجود عنصر آلیاژی مس در زمینه آلومینیم نسبت به دیگر آلیاژهای کارپذیر آلومینیم دمای ذوب پایین تری دارد [۲]. همچنین خطر تشکیل ترکیب بین فلزی ترد فاز تا در مرز دانه های آلومینیم به علت غلظت بالای عنصر مس در آلیاژ AA2024 وجود دارد.

روش تحقیق

ورق AA2024-T4 و AA6061-T6 با ضخامت ۳ mm تهیه شد.

به منظور انجام آزمایش ها مطابق جدول (۱)، فلز پرکننده Sn-5.3Ag-4.6Bi ریخته گری و نورد شد. با توجه به خواص سطحی ورق قلع، لازم است تا پیش از مونتاژ فلزات پایه، با محلول استون، تمیز کاری سطحی شوند. این عمل با از بین بردن لایه اکسیدی آلومینا در سطح فلزات پایه و از بین بردن هر گونه فاز نامناسب در سطح، شامل چربی ها و ترکیبات چسبنده نامناسب، به افزایش استحکام اتصال کمک می کند.

آزمایش ها در دو حالت بدون فلز پرکننده همراه با فلز پرکننده Sn-5.3Ag-4.6Bi انجام شد. جهت انجام تصویر برداری نمونه ها، پس از مانع سرد، تا مش ۲۰۰۰ توسط سنباده SiC سنباده زنی شدند. سطح مقطع اتصال با محلول شامل $5\text{ mL } 5\% \text{ HCl}$ و $1\text{ mL } 1\% \text{ HF}$ و $3\text{ mL } 3\% \text{ NH}_3$ و 95 mL آب مقطر حکاکی شد. نمونه ها با میکروسکپ الکترونی، تحت بررسی قرار گرفتند. ولتاژ مورد استفاده در تصاویر میکروسکوپ الکترونی بسته به محل تصویربرداری ۳۰ kV انتخاب و با مود SE تصویربرداری گردید. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی AIS2300C، نقشه توزیع عناصر از محل اتصال تهیه گردید.

نتایج و بحث

شکل (۱) میکروساختار فلز جوش را برای نمونه دارای فیلر Sn-5.3Ag-4.6Bi نشان می دهد. آنالیز نقطه ای از فازهای موجود در فلز جوش در شکل (۲) ارائه شده است که نشان دهنده وجود دانه های محلول جامد آلومینیم $\text{Al}(\alpha)$ در زمینه محلول جامد قلع $\text{Sn}(\alpha)$ است. براساس بررسی ترکیب شکل گرفته در فلز جوش، مطابق شکل (۲)، میزان Cu در فلز جوش برای تشکیل ترکیب استحکام بخش Cu_5Sn کافی نیست. درصد Bi کافی برای جلوگیری از آفت قلع در محل اتصال وجود دارد [۴]. درصد فازهای موجود در شکل (۱) در شکل (۳) ارائه شده است که نشان می دهد در تصویر بررسی شده ۴۰ / ۷ درصد سطح را ذرات محلول جامد $\text{Al}(\alpha)$ تشکیل می دهند که توسط ۵۹ / ۳ درصد سطحی محلول جامد $\text{Sn}(\alpha)$ احاطه شده اند.

شکل (۴) فصل مشترک AA2024-T4 و فلز جوش، و شکل (۵) فصل مشترک AA6061-T6 و فلز جوش را نشان می دهد. شکل (۶) میکروساختار فلز جوش و HAZ فلز پایه AA2024-T4 را برای نمونه بدون فلز پرکننده نشان می دهد. HAZ در آلیاژ AA2024-T4، به علت تشکیل ترکیب Al_2Cu در مرزدانه های آلومینیم مستعد رشد ترک است (شکل ۷). در دماهای بالاتر از

T351 by controlling the welding speed and heat input. *Journal of Manufacturing Processes*, 46, 147-158.

3- مهدی پور، ع. کیایی، ا.ح. "بررسی ریزساختار اتصال آلیاژ AA2024 به آلیاژ AA6061". (پایان نامه کارشناسی، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران).

4-Plumbridge, W.J. (2007). Tin pest issues in lead-free electronic solders. *Journal of Electronic Materials*, 18 (1), 307-318.

5- mofid, M.A., Mahdavi Nejad, A. (Accepted 2021). Flame spray assisted TLP bonding of Ti alloy to Al alloy. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 263. Online.

6- Ko, D. C., Ko, D. H., Kim, J. H., Park, J. H. (2017). Development of a partition panel of an Al6061 sheet metal part for the improvement of formability and mechanical properties by hot forming quenching. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(2), 1-15.

7-Lee, T. H., Lee, Y. J., Park, K.T., Nersisyan, H.H., Jeong, H.G., Lee, J.H. (2013). Controlling Al/Cu composit diffusion layer during hydrostatic extrusion by using colloidal Ag. *Journal of Materials Processing*, 213(3), 487-494.

8-Book. Olson, D.L. (1993). ASM HANDBOOK, Volume6, Welding, Brazing, and Soldering. 297-269 and 333.

پی نوشت

- 1- دانشجوی مقطع کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران.
- 2- دانشجوی مقطع کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران
- 3- استاد مدعو، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران.

$^{\circ}\text{C}$ ۲۵۶ عنصر Cu می تواند در مرزدانه های آلومینیم شروع به تجمع کند [۵] و تشکیل فازهای ترد دهد [۶]. تجمع عنصر Cu در مرزدانه های آلومینیم منجر به تشکیل فاز تتا ترد و پیوسته در مرزدانه آلومینیم می شود که عاملی برای ایجاد ترک مرزدانه ای [۷] و ترک گرم [۸] است.

نتیجه گیری و جمع بندی

- استفاده از ترکیب یوتکتیک Sn-5.3Ag-4.6Bi در محل اتصال آلیاژ AA2024، تشکیل ترک گرم در محل اتصال را محدود می نماید.

- استفاده از ترکیبات حاوی عنصر Ag در محل اتصال آلیاژهای آلومینیم که حاوی عنصر Cu باشند، خطر ترد شدن مرزدانه در HAZ به واسطه تشکیل ترکیب های شکننده را کاهش می دهد.

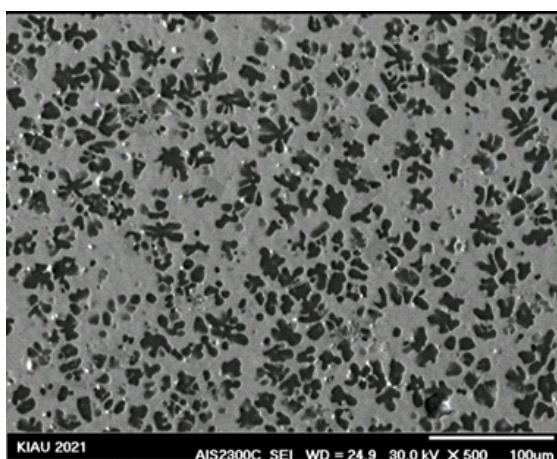
- در نمونه های بدون فلز پرکننده در HAZ آلیاژ AA2024-T4، ترکیب ترد فاز Al_2Cu در مرزدانه های آلومینیم شناسایی گردید و ساختار HAZ مستعد ترک مرزدانه ای است.

منابع

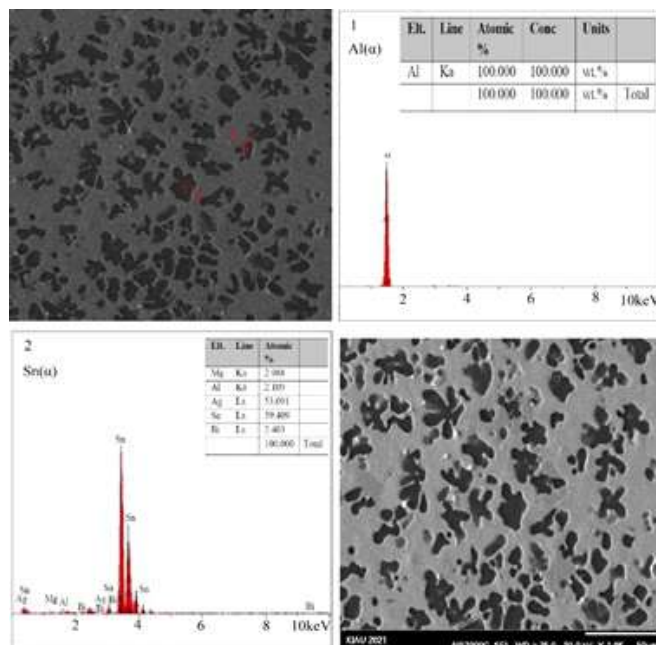
- 1- ثابت، ح. (۱۳۹۳). جوشکاری فلزات غیر آهنی، انتشارات جهان جام جم، ۲۲، ۴۴-۵۲ و ۵۴.
- 2-Hosseini, S.A., Abdollah- Zadeh, A., Naffakh Moosavy, H., Mehri, A. (2019). Elimination of hot-cracking in the electron beam welding of Aa2024

جدول ۱- شرایط اجرای آزمایش ها [۳].

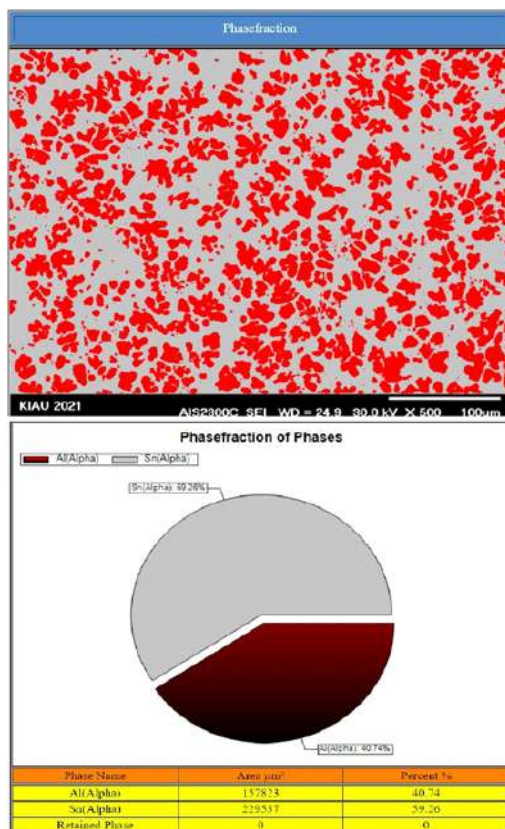
پارامترهای جوشکاری	فلز پرکننده	بدون فلز پرکننده
جریان الکتریکی	۷۰ A	۵۰ A
ولتاژ	۱۴ V	۱۲ V
سرعت جوشکاری	۶ mm/s	۹ mm/s
جریان گاز Ar	۲۰ Lit/min	۲۰ Lit/min
گاز کمکی (پشت قطعه کار)	۲۵ Lit/min	۲۵ Lit/min



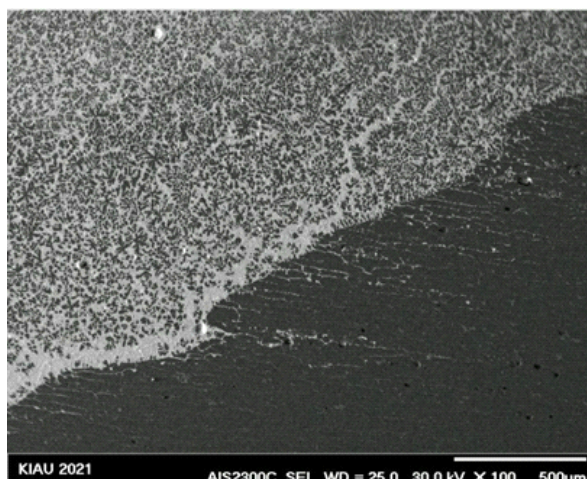
شکل ۱- تصویر SEM از فلز پرکننده در محل اتصال.



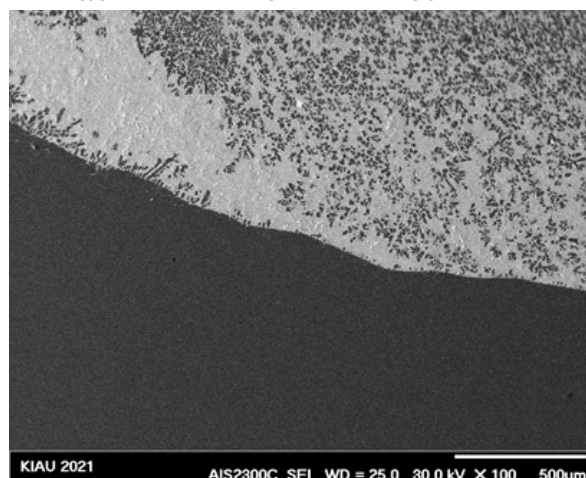
شکل ۲- آنالیز نقطه ای از فازها در فلز جوش.



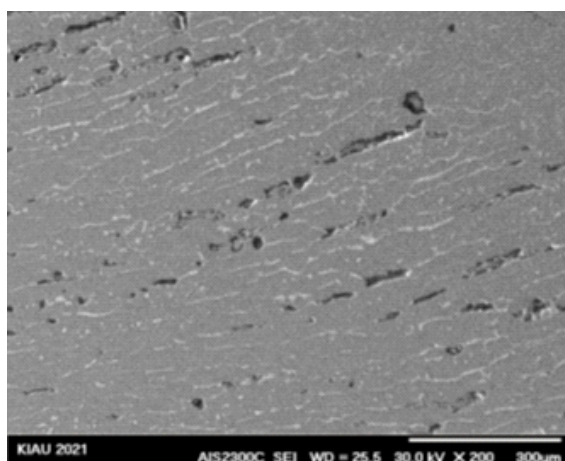
شکل ۳- درصد توزیع فازها در شکل ۱.



شکل ۴- تصویر SEM از فصل مشترک AA2024-T4 و فلز پرکننده.

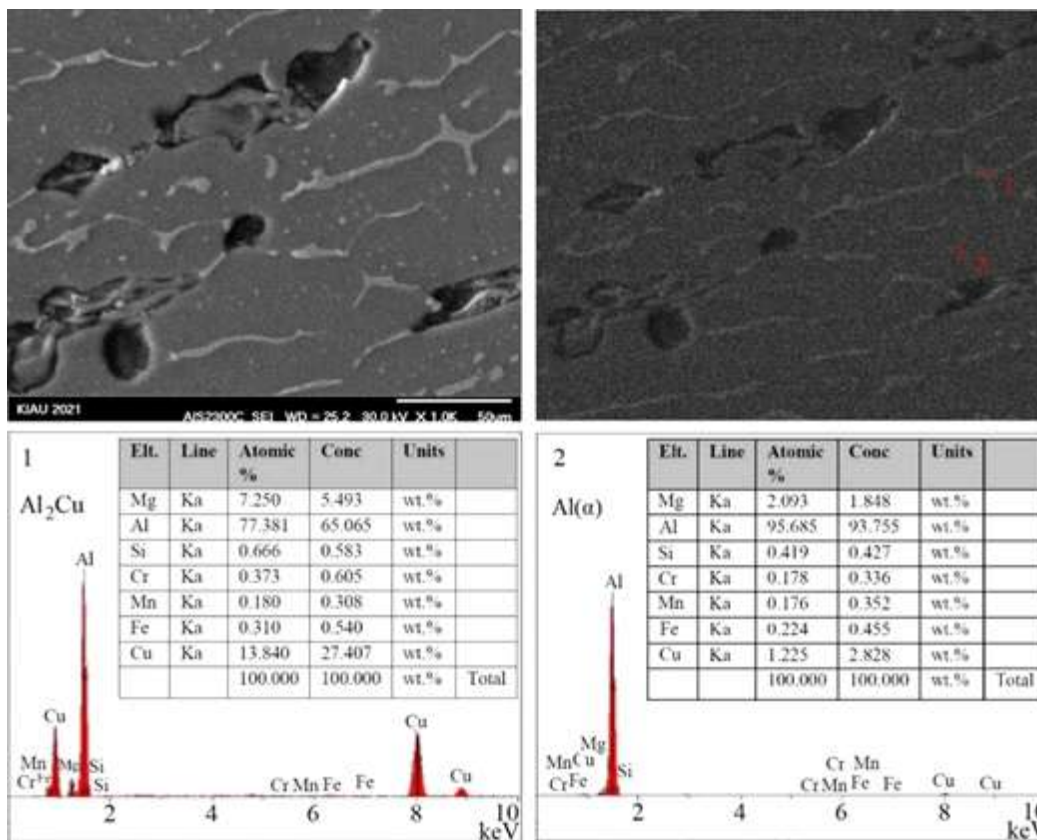


شکل ۵- تصویر SEM از فصل مشترک AA6061-T6 و فلز پرکننده.



شکل ۶- ریز ساختار فصل مشترک HAZ و فلز جوش.

Welding Research



شکل ۷- آنالیز نقطه ای از HAZ مرزدانه و داخل دانه AA2024-T4.

بررسی اثر پارامتر فاصله همپوشانی بر خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیومی تولید شده به روش ساخت افزودنی SLM توسط تکنیک DIC

مرتضی زرنگار ابرقوئی^۱، محمدرضا فراهانی^۲، یاسر وحید شاد^۳، محمدجواد پاکروان^۴

چکیده

با توجه به توسعه روزافزون روش ساخت افزودنی در ساخت و تولید، به خصوص در صنایع حساس و پیشرفته، نظیر صنایع هوافضا، صنایع نظامی و خودروسازی و استفاده متعدد این تکنیک برای تولید قطعات تیتانیومی، در این پژوهش سعی بر آن است تا نتایج حاصل از تغییرات یکی از موثرترین عوامل در فرایند تولید بر خواص مکانیکی نمونه تیتانیوم آلیاژی (Ti-Al6-4V) با تکنیک همبستگی تصاویر دیجیتالی بررسی شده ارائه گردد. بدلیل کاربرد فراوان تکنیک SLM در روش های تولید ساخت افزودنی سازه های فلزی تغییر پارامتر تولید موثر اثر همپوشانی پرتو لیزری بر خواص مکانیکی از جمله: استحکام تسلیم و نهایی، درصد ازدیاد طول قطعات تولید شده و تاثیر چگالی انرژی لیزر بر تغییرات خواص مکانیکی بررسی شده است. تکنیک استفاده شده برای استخراج خواص مکانیکی نیز همبستگی تصاویر دیجیتالی (DIC) از روش های نوری و غیر تماسی در بازرسی سطح قطعه است. با توجه به اینکه فاصله همپوشانی بیانگر میزان نفوذ دو پرتو لیزر در امتداد قطعه می باشد، عدم نفوذ آن سبب ایجاد پودر ذوب نشده باقی مانده در فرایند ساخت شده و نفوذ بیش از اندازه آن نیز موجب ایجاد حفرات گازی و در نتیجه ایجاد تخلخل در قطعه نهایی می گردد. لذا برای تولید بهینه محصول مقدار بهینه ای برای پارامتر وجود دارد.

کلمات کلیدی: برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، ساخت افزودنی، آلیاژ تیتانیوم، خواص مکانیکی، Ti-Al6-4V.

مقدمه

امروزه به کارگیری روش تولید ساخت افزایشی به دلیل، فرایند ساخت کوتاه، کاهش هزینه تولید و انعطاف پذیری فرایند در تولید قطعات پیچیده به ویژه در صنایع پیشرفته توسعه پیدا کرده است. خصوصا در زمینه های حساس و مختلفی که جنس مواد مورد استفاده به علت دشواری تولید، (نظیر فلز تیتانیوم که به دلیل انتقال حرارت بسیار پایین شرایط را برای روش های سنتی تولید با دقت و سرعت بالا مانند ماشینکاری سخت کرده است.) تیتانیوم آلیاژی به دلیل خواص مکانیکی مطلوب و مقاومت به خوردگی بالا و وزن کم کاربرد بسیار بالا در تولید قطعاتی که تحت شرایط حساس و سخت قرار دارند، در تولید به روش ساخت افزایشی مورد استفاده قرار می گیرند. از جمله روش های پر کاربرد ساخت افزایشی در صنعت می توان به روش ذوب لیزری در بستر پودر نظیر SLM اشاره کرد.

که با استفاده از منبع انرژی لیزری باعث ذوب پودر فلزی می شود و توان لیزر اندازه پودر و اثر متقابل دینامیکی بین آنها در منطقه مذاب اثرگذاری بسیار بالایی بر ساختار مواد تولید شده و خواص مکانیکی آن دارد. به همین منظور محققان زیادی به دلیل اهمیت موضوع تحقیقات گوناگونی در این زمینه انجام دادند. برین و همکاران یک نمونه تیتانیومی Ti-6Al-4V را به روش SLM تولید کردند. این نمونه مورد پردازش و عملیات حرارتی قرار گرفت و سپس آن را یکبار تحت بارگذاری یکنواخت و بار دیگر تحت بارگذاری متناوب قرار دادند. بار اعمالی به صورت محوری و خمشی بود تا رابطه میکروساختار و کرنش محلی را بررسی کنند. آنها برای ارزیابی کرنش محلی از DIC دوبعدی استفاده کردند [۱].

کارلسون و همکاران بر روی قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی EBM جهت بررسی تاثیر تغییرات در نمونه های میکرو و ماکرو آزمایش تست کشش انجام دادند و میزان کرنش آنها را از روش برهمنگاری دیجیتالی بدست آوردند. نمونه های ماکرو نتایج مشابه با پژوهش های قبلی نشان داد. تخلخل مشاهده شده در نمونه ها ناشی از اندازه دانه های پودر گزارش شده که سبب عدم ذوب مناسب و تشکیل ساختار ناهمگن شده است همچنین این نتایج در نمونه های ماکرو کمتر دیده شد [۲]. بابیو و همکارانش در همان سال روشی را برای تعیین استحکام سازه های پشتیبانی استفاده شده در فرایند ساخت افزایشی و ارزیابی مکانیزم غالب شکست در این سازه ها ارائه کردند. برای این کار یک نمونه تیتانیومی Ti-6Al-4V را به روش PBF تولید کرده و میدان جابجایی در نمونه تحت تست کشش را توسط DIC دوبعدی بدست آوردند [۱]. در سال ۲۰۱۷ یک نمونه تیتانیومی Ti-6Al-4V جهت بررسی رابطه بین ناهمسانگردی در شکل پذیری و ریزساختار را به روش LPBF تولید کرده و اثر شرایط فرایندی را بر ریزساختار و خواص کششی بررسی کردند. همچنین اثر ریزساختار، ناهمسانگردی و زبری سطح بر خواص نیز در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفته و از DIC دوبعدی برای تعیین کرنش سطحی بهره بردند [۳]. هملتون و بیلبر، به بررسی رابطه بین ریزساختار و الاستیسیته نمونه آلیاژی نیکل تیتانیوم غنی از نیکل تولید شده به روش LDED پرداختند [۴]. آنها برای ارزیابی میدان کرنش از روش همبستگی تصاویر دیجیتالی استفاده کردند. دژگان و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۷ تاثیر ضخامت، برجستگی و ریزساختار روی رفتار شکست نمونه مینیاتوری تیتانیوم Ti-6Al-4V تولید شده به روش SLM را بررسی کرده و میدان تنش را به وسیله تکنیک همبستگی تصاویر دیجیتالی به دست

شرایط آزمایشگاهی و نیاز آزمایش به محیطی ایزوله از نظر نور و ارتعاشات، و با استاندارد ASTM8 قطعه مورد استفاده تا حد امکان کوچک و در ابعاد اندازه کوچک روش LDED انتخاب و ساخته شد. در مرحله ساخت نمونه اطلاعات به گونه ای دسته بندی می شود که قطعه نهایی به لایه هایی با ضخامت بین $20-700 \mu m$ برش داده شود. و پس از عیب یابی و رفع عیوب از اطلاعات و تعیین مقادیر پارامترهای ورودی نظیر سرعت اسکن، جهت حرکت لیزر، الگوی تشکیل لایه ها، توان لیزر، شرایط محیط و دمای اتمسفر محفظه، میزان مواد مصرفی و انرژی تنظیم شده و عملیات ساخت قطعه بر روی بستری (میز) به صورت لایه لایه بدون نیاز به کنترل اوپراتور انجام می شود و با توجه به تنظیمات ورودی دستگاه شکل نهایی با حرکت لیزر بر روی بستر پودر شکل می گیرد. پس از تولید پاکسازی سطح نمونه انجام شده و الگوی تصادفی جهت انجام آزمون برهمنگاری تصاویر دیجیتالی ایجاد شد و با دستگاه تست کشش سنناتم تحت بارگذاری یکنواخت کششی قرار گرفت. آزمون برهمنگاری استفاده شده در این آزمایش دو بعدی بوده و پس از تصویر برداری یک فریم بر ثانیه از سطح نمونه حین انجام تست کشش تا شکست قطعه اطلاعات به نرم افزار انتقال یافت تا نمودار تنش و کرنش برای هر نمونه ارائه شود و تغییرات نتایج آزمایش با توجه به پارامتر متغیر دستگاه بررسی شد.

تعیین پارامترهای ورودی دستگاه SLM

رابطه نسبی بین چگالی انرژی لیزر، توان لیزر، ضخامت لایه و سرعت لیزر با پارامتر متغیر فاصله همپوشانی خطوط لیزر به صورت رابطه (۱) می باشد. لذا با افزایش توان لیزر که سبب افزایش چگالی انرژی لیزر می شود، خواص مکانیکی و متالورژیکی به طور کلی بهبود می یابد.

$$LED = \frac{P \left(\frac{J}{s} \right)}{S \left(\frac{mm}{s} \right) \times H \left(mm \right) \times T \left(mm \right)} \quad (1)$$

به همین منظور توان لیزر ثابت و مقدار بهینه $W = 280$ در نظر گرفته شد. (حداکثر توان دستگاه در حالتی که ذوب پودر به خوبی شکل بگیرد) و مشخصه های ثابت سرعت اسکن و ضخامت لایه و مشخصه متغیر ورودی دستگاه، فاصله همپوشانی پرتو لیزر انتخاب شده است. مقادیر پارامتر ورودی دستگاه با توجه به پژوهش های انجام شده در سه مقدار مختلف قرار داده شد، که در مجموع ۳ نمونه تولید شده است و جزئیات آن در جدول (۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است، پارامترهای ورودی دستگاه موثر بر تغییرات خواص مکانیکی متعدد بوده و علاوه بر پارامترهای کمی پارامترهای کیفی نیز وجود دارد، که اثرگذاری مشخصه های کمی بسیار محسوس تر می باشد.

بحث و نتیجه گیری

پس از انجام آزمایش و اندازه گیری و تبدیل جابه جایی به کرنش نمونه ها توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی با استفاده از معادلات حاکم بر رفتار مکانیکی مواد، خواص مکانیکی به صورت

آوردند [۵]. لی یانگ و همکاران تاثیر عملیات حرارتی گوناگون را بر روی قطعه Ti-6Al-4V تولید شده به روش ساخت افزایشی SLM بررسی کردند. شرایط عملیات حرارتی نیز تحت دماهای مختلف و سرمایش به مدت ۴ ساعت در دمای اتاق صورت گرفت. که نتایج کاهش استحکام تسلیم و نهایی و افزایش قابل توجه تغییر طول تحت عملیات حرارتی گزارش شده است [۶]. فرمانویر و همکاران، رفتار میکرومکانیکی و پایداری حرارتی تیتانیوم دوفازی Ti-6Al-4V تولید شده آنها میزان تغییر شکل در هر فاز را با استفاده از DIC محاسبه نمودند [۷].

ملیا و همکاران خواص مکانیکی و خوردگی نمونه تولید شده به روش DED از جنس آلیاژ Ti و Ni بررسی کرده و از DIC برای اندازه گیری میدان کرنش در نمونه تحت تست استفاده کردند [۶۳]. ویلسون وبسه، تاثیر زاویه بارگذاری و تنش چند محوره را بر شکست نمونه تیتانیومی تولیدی به روش LPBF بررسی نموده و برای اندازه گیری تغییر شکل های سطحی از تکنیک DIC استفاده کردند [۸]. کارلوسکا و همکاران تحلیل کرنش دو نمونه آلیاژی Ti-6Al-4V تولید شده به روش DMLS و روش سنتی ماشینکاری را به وسیله برهمنگاری تصاویر دیجیتالی انجام دادند. مدول یانگ محاسبه شده در روش ساخت افزایشی افزایش چشم گیری داشت.

مدول یانگ در نمونه تولید شده به روش ساخت افزایشی ۱۲٪ افزایش داشت. همچنین افزایش سختی سطح در نمونه ساخت افزایشی مشاهده شد [۹]. دروکر و همکاران بررسی مشخصه های خواص مکانیکی نمونه مشبک Ti-6Al-4V تولید شده به روش ساخت افزایشی SLM و شبیه سازی آن با روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی مورد بررسی قرار گرفت. و نتایج بدست آمده با خطای قابل قبولی نزدیک به نتایج بدست آمده از شبیه سازی بود [۱۰]. مسئله مهم در صنعت بهبود خواص مکانیکی و کیفیت قطعات تولیدی از منظر فیزیکی است، به همین منظور پایش و بررسی تغییرات آن نیازمند دقت بالا و استفاده از روش های پیشرفته و به روز است. به طور خاص، با نظارت کامل سطح با روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال می توان توزیع کرنش و جابجایی را در سطح نمونه اندازه گیری کرد و سپس مشتقات آن نظیر استحکام تسلیم و نهایی، مدول یانگ، ضریب پواسون و دیگر خواص را استخراج کرد. در این پژوهش با کمک روش DIC به بررسی پارامترهای اثرگذار فرایند تولید ساخت افزایشی SLM بر خواص مکانیکی نمونه های آلیاژ Ti-6Al-4V پرداخته شده است.

روش انجام آزمایش

قطعات تولید شده در این آزمایش از جنس آلیاژ تیتانیوم ELI Ti-6Al-4V (G23) ساخته شده و مواد اولیه پودری با توجه به روش تولید ساخت نمونه ها با دستگاه SLM مدل M100P انتخاب شده است. نمونه هایی که برای انجام آزمایش، مورد استفاده قرار گرفته است از نوع کششی طراحی و ساخته شد. با در نظر گرفتن

است. با درونیابی بین مقادیر متغیر فاصله همپوشانی می توان به خواص مکانیکی مطلوب تر دست یافت. بیشترین میزان تغییرات خواص مکانیکی مربوط به % ازدیاد طول نمونه ها بوده به گونه ای که با افزایش پارامتر فاصله همپوشانی ۴۶,۳۶% میزان % ازدیاد طول افزایش داشته است. تغییرات استحکام نهایی نمونه ها بر خلاف % ازدیاد طول درونی کاهشی داشته است، که با افزایش پارامتر فاصله همپوشانی ۸۰ μm به ۱۰۰ μm میزان درصد افزایش استحکام نهایی از ۶,۷۳% به ۲,۶۷% کاهش یافته است. به طور کلی در صورتی که انرژی حرارتی ورودی به حوضچه مذاب از مقدار مشخصی بیشتر باشد ماکزیم دمای ناحیه مذاب افزایش یافته و به دنبال آن نرخ سرد شدن زیاد می شود. در اثر افزایش نرخ سرد شدن، گازهای موجود در ناحیه مذاب فرصت خروج از آن را پیدا نکرده و باعث تشکیل حباب های گازی و افزایش تخلخل در نمونه می شوند. تنش های حرارتی باقیمانده در نمونه نیز بسیار افزایش می یابد.

جهت دستیابی به بیشینه استحکام قطعات کاهش پارامتر فاصله همپوشانی از عوامل موثر در پارامترهای ورودی دستگاه SLM ساخت افزایشی است. از دیگر پارامترهای ورودی دستگاه موثر بر خواص مکانیکی و متالورژیکی قطعات می توان به ضخامت لایه، سرعت اسکن، جهت حرکت لیزر، و توان لیزر اشاره کرد. به جز عواملی که به آن ها اشاره شد عوامل دیگری نیز بر قطعه نهایی اثر گذار هستند، مانند: الگوی ساختار بین لایه ای، جهت گیری سطح قطعه حین و زاویه حرکت لیزر ساخت اشاره کرد. هرچند تاثیر کمتری نسبت به پارامترهای ورودی دستگاه دارند.

منابع

- 1-Bobbio, L.D., et al., Characterization of the strength of support structures used in powder bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V. 2017. 14: p. 60-68.
- 2-Karlsson, J., et al., Digital image correlation analysis of local strain fields on Ti6Al4V manufactured by electron beam melting. 2014. 618: p. 456-461.
- 3-Salvati, E., et al., Eigenstrain reconstruction of residual strains in an additively manufactured and shot peened nickel superalloy compressor blade. 2017. 320: p. 335-351.
- 4-Hamilton, R.F., et al., Correlating microstructure and superelasticity of directed energy deposition additive manufactured Ni-rich NiTi alloys. 2018. 739: p. 712-722.
- 5-Dzogan, J., et al., Effects of thickness and orientation on the small scale fracture behaviour of additively manufactured Ti-6Al-4V. 2018. 143: p. 94-109.
- 6-Liang, Z., et al., The effect of heat treatment on microstructure evolution and tensile properties of selective laser melted Ti6Al4V alloy. 2019. 782: p. 1041-1048.
- 7-de Formanoir, C., et al., Micromechanical behavior and thermal stability of a dual-phase + 'titanium alloy produced by additive manufacturing. 2019. 162: p. 149-162.

ذیل استخراج گردید. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، افزایش فاصله همپوشانی در تولید نمونه سبب افزایش درصد ازدیاد طول شده است. در عین حال استحکام تسلیم و نهایی نیز کاهشی بوده است. به طور کلی با توجه به درصد ازدیاد طول مناسب و کاهش استحکام، میزان فاصله همپوشانی مقدار ۸۰ μm بهینه برای تولید است.

با توجه به مقادیر جدول (۱) برای هر نمونه و رابطه (۱) مقادیر چگالی انرژی لیزر برای نمونه ها قابل محاسبه است که در شکل (۲) نشان داده شده است. افزایش چگالی انرژی لیزر سبب افزایش استحکام نهایی قطعه شده است. از دلایل آن می توان به ذوب کامل و حوضچه مذاب یکنواخت تر اشاره کرد که از به وجود آمدن حفرات گازی ناشی از اغتشاشات در فاصله همپوشانی دو خط لیزر و یا فاصله زیاد همپوشانی خطوط لیزر که ذرات پودر ذوب نشده در ریزساختار نمونه هاست جلوگیری می کند.

میزان کاهش استحکام نهایی با افزایش میزان فاصله همپوشانی، افزایش یافته است. به صورتی که با افزایش فاصله همپوشانی از ۶۰ μm به ۸۰ μm استحکام نهایی نمونه ۶,۷۳% کاهش داشته در صورتیکه با افزایش فاصله همپوشانی از ۸۰ μm به ۱۰۰ μm تغییرات استحکام نهایی ۲,۶۷% درصد کاهش داشته است. که نشان دهنده مقدار بهینه ۸۰ μm برای فاصله همپوشانی است.

استحکام تسلیم با افزایش میزان فاصله همپوشانی، کاهش یافته است. به صورتی که با افزایش فاصله همپوشانی از ۶۰ μm به ۸۰ μm استحکام تسلیم نمونه ۱۳,۸۸% کاهش داشته در صورتیکه با افزایش فاصله همپوشانی از ۸۰ μm به ۱۰۰ μm تغییرات استحکام تسلیم ۲,۹۸% درصد افزایش داشته است. که میزان تغییرات نامحسوس بوده است.

با افزایش میزان فاصله همپوشانی % ازدیاد طول برخلاف استحکام تسلیم و نهایی افزایش یافته است. به صورتی که با افزایش فاصله همپوشانی از ۶۰ μm به ۸۰ μm % ازدیاد طول نمونه ۲۸,۱۴% افزایش داشته در همچنین با افزایش فاصله همپوشانی از ۸۰ μm به ۱۰۰ μm تغییرات استحکام نهایی ۱۸,۲۲% درصد افزایش داشته است. که میزان افزایش روند از فاصله همپوشانی ۸۰ μm به بعد روندی کاهشی داشته است و نشاندهنده مقدار بهینه فاصله همپوشانی ۸۰ μm می باشد.

جمع بندی نتایج

در این پژوهش رویکرد آن بود که تاثیر تغییرات پارامترهای ساخت افزایشی بر خواص مکانیکی محصول نهایی مورد بررسی قرار گیرد. ۳ نمونه از جنس آلیاژ تیتانیوم با تغییر پارامتر فاصله همپوشانی ساخته و برای استخراج داده ها از تکنیک DIC که یک روش نوری و غیر تماسی است استفاده شد. مقادیر بدست آمده برای خواص مکانیکی نمونه ها در جدول (۲) ارائه شده است. بررسی تغییرات خواص مکانیکی مورد آزمایش، نشان می دهد پارامتر فاصله همپوشانی در تولید قطعات ساخت افزایشی یکی از عوامل تاثیر گذار

mechanical characterization of additively manufactured Ti6Al4V lattice structures considering progressive damage. 2021. 189: p. 105986.

پی نوشت

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران
- 2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران
- 3- استادیار، پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران

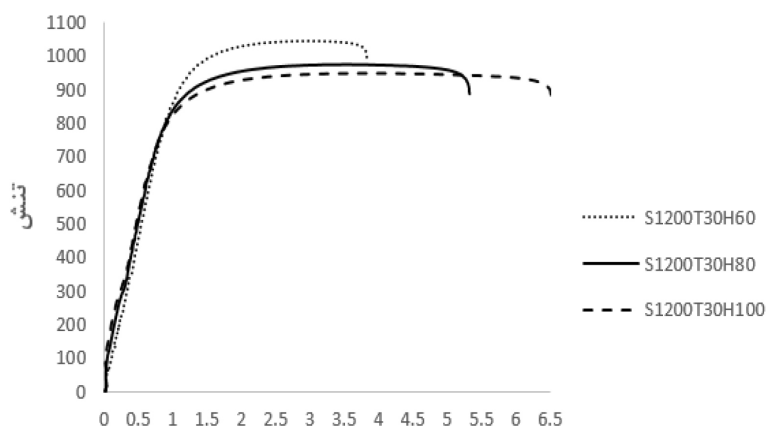
8-Wilson-Heid, A.E., A.M.J.M.S. Beese, and E. A. Fracture of laser powder bed fusion additively manufactured Ti-6Al-4V under multiaxial loading: Calibration and comparison of fracture models. 2019. 761: p. 137967.

9.-Karolewska, K., B. Ligaj, and D. Boro?ski, Strain Analysis of Ti6Al4V Titanium Alloy Samples Using Digital Image Correlation. 2020. 13(15): p. 3398.

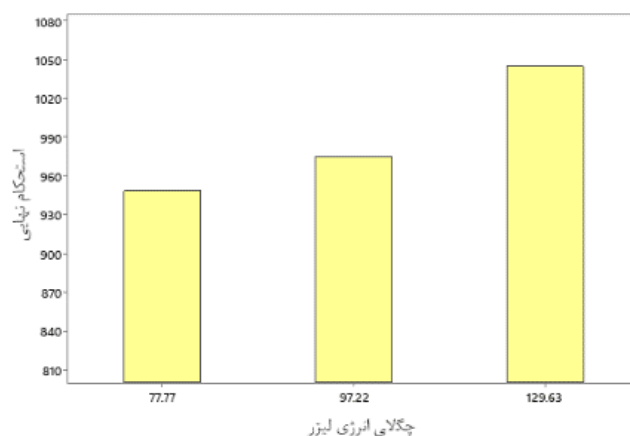
10-Drücker, S., et al., Experimental and numerical

جدول ۱- مقادیر متغیر پارامترهای ورودی دستگاه SLM برای ساخت نمونه تست کشش

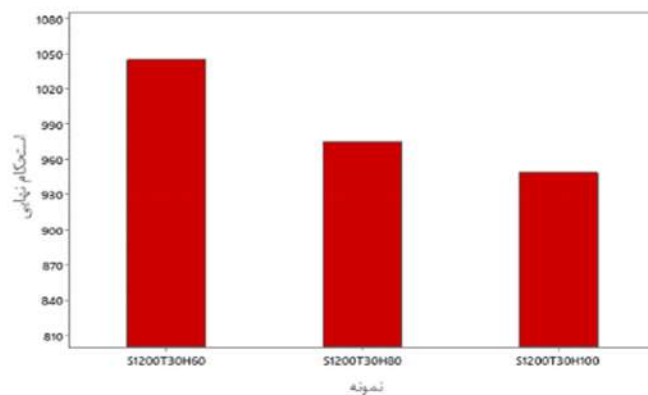
کد گذاری نمونه	سرعت لیزر (S) mm/s	ضخامت لایه μm (T)	فاصله همپوشانی μm (H)
S1200T30H60	۱۲۰۰	۳۰	۶۰
S1200T30H80	۱۲۰۰	۳۰	۸۰
S1200T30H100	۱۲۰۰	۳۰	۱۰۰



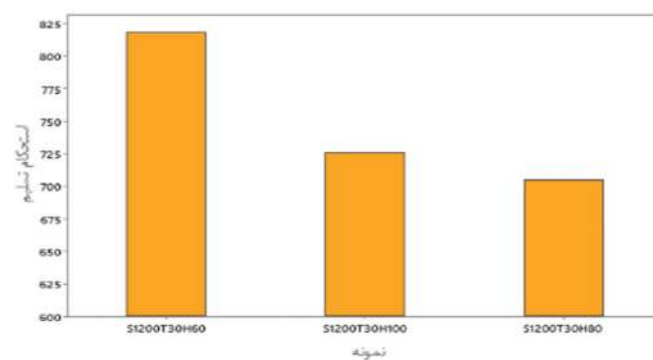
شکل ۱- نمودار تنش-گرنش نمونه ها



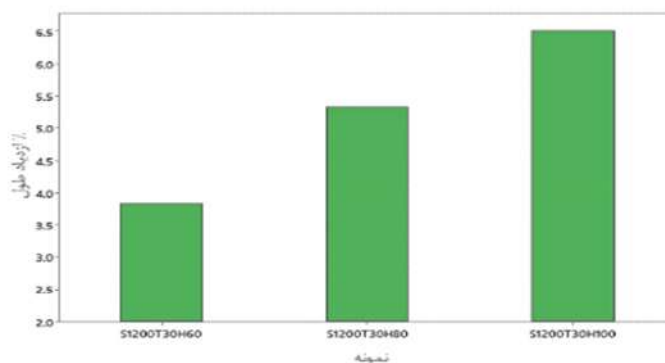
شکل ۲- تغییرات استحکام نهایی با افزایش چگالی انرژی لیزر



شکل ۳- تغییرات استحکام نهایی



شکل ۴- تغییرات استحکام تسلیم

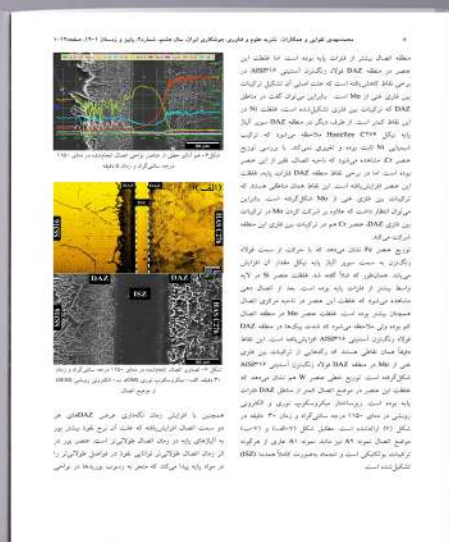


شکل ۵- تغییرات درصد ازدیاد طول نمونه

جدول ۲- نتایج آزمون کشش بدست آمده با استفاده از تکنیک برهمنگاری تصاویر دیجیتالی

نمونه	چگالی انرژی لیزر ($\frac{J}{mm^2}$)	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	(%) ازدیاد طول
S1200T30H60	۱۲۹,۶۳	۱۰۴۴,۴۴	۸۱۸,۱۳	۳,۸۲۶۰
S1200T30H80	۹۷,۲۲	۹۷۴,۲۰	۷۰۴,۶۰	۵,۳۲۴۰
S1200T30H100	۷۷,۷۷	۹۴۸,۲۰	۷۲۵,۶۰	۶,۵۱۰۰

نشریه علم و پژوهش در فناوری جوشکاری ایران



<https://jwsti.iut.ac.ir>

نشانی دبیرخانه: اصفهان - خیابان شمس آبادی - ساختمان شمس - طبقه ۴ - واحد ۴۱۳ - کد پستی ۸۱۳۴۶۵۳۳۸۱

تلف: ۰۳۱۳۲۲۴۰۳۲۵ نمابر: ۰۳۱۳۲۲۳۱۷۶۵ Email: info@iwnt.com

تارنما: www.iwnt.com سامانه عضویت: www.iwnt-membership.ir سامانه گواهینامه‌ها: <https://iwntcs.ir>