

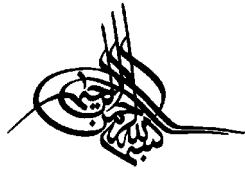
# موشکاری

فصلنامه انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران  
شماره ۱۱۲ - بهار ۱۴۰۲



مقام سوم بخش عکاسی دهمین مسابقه گرافیک و عکاسی صنعت جوش و بازرسی  
جناب آقای مهندس امیرعلی سعیدپور





- 1 بررسی تغییرات در کیفیت جوش ورق‌های پلی‌پروپیلن در روش اصطکاکی اغتشاشی با پین‌های متفاوت، بهروز اسدی بروجنی، ایوب خسروی فارسانی، محمد رزازی
- 5 جوشکاری فولادهای مقاوم به خوردگی جوی، مهندس عبدالوهاب ادب آوازه
- 11 تهیه دستور العمل ساخت، جوشکاری و بازرسی مخزن تحت فشار نیتروژن اضطراری LADLE TURRET واحد فولاد سازی، ایمان حاجیان نیا، احمد خلیلیان، سعید علیان
- 16 انجام جوشکاری تعمیری به روش تمپر بید (TBW) بر روی فولاد ASTM A516 grade 70 و مقایسه خواص آن با جوشکاری تعمیری معمولی و عملیات حرارتی شده (PWHT)، یاسر رضائی، سهیل شاتوتی
- 19 جوشکاری همزن اصطکاکی چند پاسه غیر مشابه آلیاژهای پایه آلومینیوم، محسن کوهگرد دهمیانی، محمد حسن دانشی فر، محمد امین جبار
- 26 آشنایی با الزامات استاندارد ISO 3834 الزامات کیفیتی در جوشکاری ذوبی مواد فلزی - بخش جامع - قسمت پنجم، مهندس افشین خیام
- 29 آماده‌سازی فلزات آلومینیوم قبل از جوشکاری، احمد رضا وکیلی
- 34 تأثیر شکل پین ابزار بر استحکام کششی ناحیه اتصال دو آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-T3 به ۷۰۷۵-T6 به صورت لب به لب با فرایند جوشکاری FSW، سجاد محمدی، رضا بیگی، مجید زارع زاده مهریزی
- 40 تأثیر سیم جوش بر خواص مکانیکی اتصال آلیاژهای آلومینیوم غیر مشابه جوش داده شده توسط فرایند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز محافظ، ابراهیم حسینی پناه، قاسم عظیمی رویین

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:

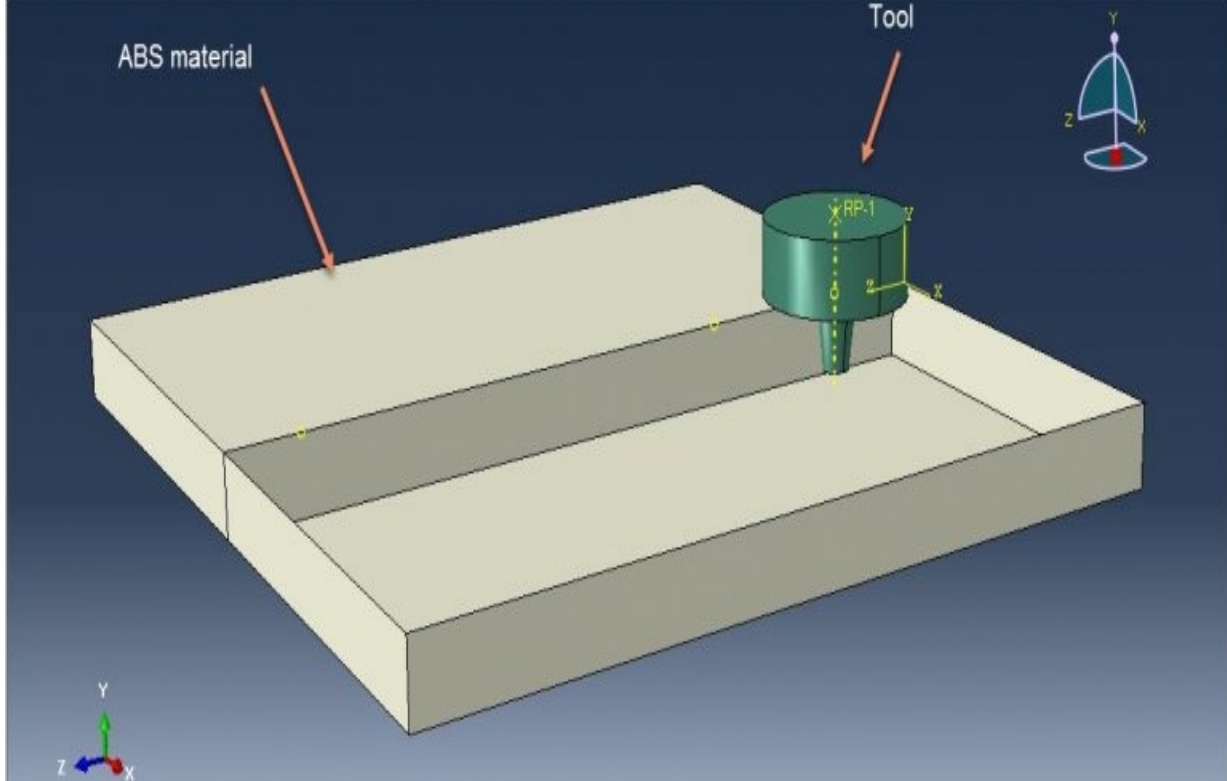
Email: info@iwnt.com

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

فصلنامه در ویرایش مقالات رسیده آزاد است

نقل نوشته‌ها با ذکر ماخذ بلامانع است.





## بررسی تغییرات در کیفیت جوش ورق‌های پلی پروپیلن در روش اصطکاکی اغتشاشی با پین‌های متفاوت

بهروز اسدی بروجنی<sup>۱</sup>، ایوب خسروی فارسانی<sup>۲</sup>، محمد رزازی<sup>۳</sup>

### چکیده

فرایند FSW به عنوان یکی از روش‌های پیشرفته جهت اتصال فلزات و پلیمرها در دهه‌ی اخیر مطرح شده که در مقایسه با سایر روش‌های جوشکاری بازده انرژی بسیار بالاتری دارد. در این تحقیق جوش پذیری ورق‌های پلی پروپیلن بوسیله‌ی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) مورد بررسی قرار گرفته که هدف از آن تعیین شرایط بهینه فرایند، جهت دستیابی به استحکام و شرایط سطحی مناسب اتصال نمونه‌ها ضمن جوشکاری است. مفهومی که در پس جوشکاری اصطکاکی نهفته است، تولید گرما در محل اتصال در اثر کار ناشی از اصطکاک و استفاده از فشار برای هدایت مواد پلیمری است. در این مقاله، برای اینکه یک کار علمی بر روی تاثیر شکل پین بر استحکام جوش صورت گرفته باشد و بهترین هندسه برای جوشکاری قطعات پلی پروپیلن بدست آید، توسط ابزارهایی با پین‌های مثلثی ساده، مثلثی شیاردار، استوانه شیاردار و مخروط شیاردار جوشکاری روی نمونه‌های دارای ابعاد یکسان انجام شد. پس از آزمایش‌های تست کششی که بر روی قطعات جوش داده شده با این ابزارها انجام گرفت ابزار مناسب‌تر جهت این فرایند انتخاب شد. ابزار ایده آل دارای پین مخروطی شیاردار و شولدر ارشمیدسی است و جهت دوران آن نیز ساعت گرد است دلیل این انتخاب بالاتر بودن تنش حد تسلیم این ابزار بوده است که مقدار آن  $344/11 \text{ Mpa}$  است.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، پلی پروپیلن، پین جوش.

### مقدمه

فرایند FSW به عنوان یکی از روش‌های پیشرفته جهت اتصال فلزات و پلیمرها در دهه‌ی اخیر مطرح شده که در مقایسه با سایر روش‌های جوشکاری بازده انرژی بسیار بالاتری دارد. در این تحقیق جوش پذیری ورق‌های پلی پروپیلن بوسیله‌ی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) مورد بررسی قرار گرفته که هدف از آن تعیین شرایط بهینه فرایند، جهت دستیابی به استحکام و شرایط سطحی مناسب اتصال نمونه‌ها ضمن جوشکاری است. مفهومی که در پس جوشکاری اصطکاکی نهفته است، تولید گرما در محل اتصال در اثر کار ناشی از اصطکاک و استفاده از فشار برای هدایت مواد پلیمری است. در تکنیک‌هایی که بر پایه روش اصطکاکی هستند گرما با

اصطکاک سطحی ایجاد می‌شود که باعث حرکت شدید ساختار ملکول‌ها در مواد در حال جوشکاری می‌شود [۱]. جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی در سال ۱۹۹۱ ابداع شد، این روش پتانسیل زیادی برای جوشکاری ترموپلاستیک‌ها دارد [۲] و [۳]. به علت ساختار هندسی پین، موادی که در اطراف پین حرکت می‌کنند به خوبی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مواد در گرمای بالا تغییر شکل زیادی می‌دهند و پس از جوشکاری ساختار نهایی و دانه‌های کریستالی هم محور و خوبی دارند و همچنین دارای خواص مکانیکی مطلوبی هستند [۴]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در دهه‌های اخیر پیشرفت زیادی در زمینه اتصالات فلزی داشته است و به آن تکنولوژی سبز می‌گویند [۵]. زیرا

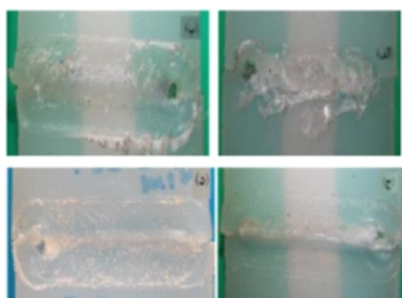


شکل ۳- تصویر چهار ابزار استفاده شده برای ارزیابی تاثیر هندسه ابزار بر کیفیت جوش (الف - مثلثی ساده، ب - مثلثی شیار دار، ج - استوانه شیاردار، د - مخروط شیاردار)

پارامترهایی که یکسان نگه داشته شدند عبارت بودند از: سرعت دورانی، سرعت خطی، زاویه کلگی و جهت دوران ابزار، که مقادیر این پارامترها به ترتیب  $400 \text{ rev/min}$ ،  $20 \text{ mm/min}$  و ساعت گرد بود. قطعات با دقت  $0.02$  میلی متر با دستگاه فرز جوشکاری شدند. سپس طبق ابعاد توصیه شده در استاندارد (ASTM-D638-02a) بریده شده و جهت انجام تست کشش آماده گردیدند [۶]. عناوین ابزارها به شرح زیر است:

الف - مثلثی ساده - مثلثی شیاردار  
ج - استوانه شیاردار  
د - مخروط شیاردار

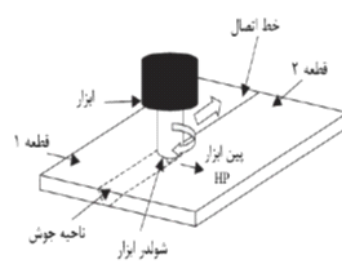
در شکل (۴)، نمای ظاهری جوش های بدست آمده مشاهده می گردد.



شکل ۴- جوش های ایجاد شده با ابزارهای مختلف الف - مثلثی ساده، ب - مثلثی شیار دار، ج - استوانه شیاردار، د - مخروط شیاردار

همان طور که مشاهده می گردد، با استفاده از ابزار (د) سطح جوش دارای شکل ظاهری نسبتاً مناسبی است، سطح جوش تمیز بوده و دارای عیوب کمتری است. دلیل ایجاد جوش بهتر با ابزار (د)، این است که سطح تماس آن با ورق های پلی پروپیلن بیشتر بوده و بنابراین به دلیل ایجاد اصطکاک بیشتر، حرارت بیشتری در محل اتصال تولید می گردد. ابزار شماره (الف)، دارای پین مثلثی است و تماس آن با قطعه کار، بیشتر در سه نقطه اتفاق می افتد. بنابراین اصطکاک کمتری ایجاد کرده و در نتیجه حرارت کمتری در محل

حداکثر بازده انرژی را دارد، هیچ آلاینده یا اثر سوء بر محیط زیست نمی گذارد و همچنین قابلیت عملکردی بالایی هم دارد و انرژی کمی مصرف می کند و در آن هیچ نوع پوشش گازی یا جریان گداخته استفاده نشده و در اتصالات آن نیز هیچ پرکننده ای استفاده نمی شود (شکل (۱)).



شکل ۱- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۱]

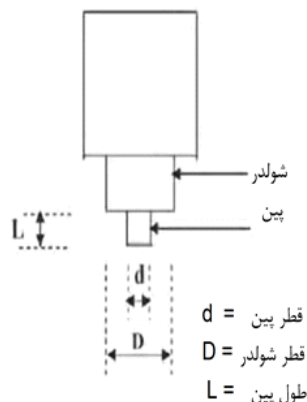
### مواد و روش پژوهش

در طراحی ابزار باید نکاتی در نظر گرفته شود (شکل (۲))، این نکات عبارتند از [2]

- قطر پین ابزار برابر است با ضخامت ورق های مورد جوشکاری یعنی:  $d=t$   
- ارتفاع پین برابر است با ضخامت ورق ها منهای  $0.2$  یا  $0.3$  میلی متر یعنی:

$$L=t-0.2 \quad \text{یا} \quad L=t-0.3$$

- قطر شولدر ابزار با سه برابر قطر پین برابر است یعنی:  $D/d=3$   
پارامترهای نام برده در نکات بالا را در شکل (۲) مشاهده می کنید.

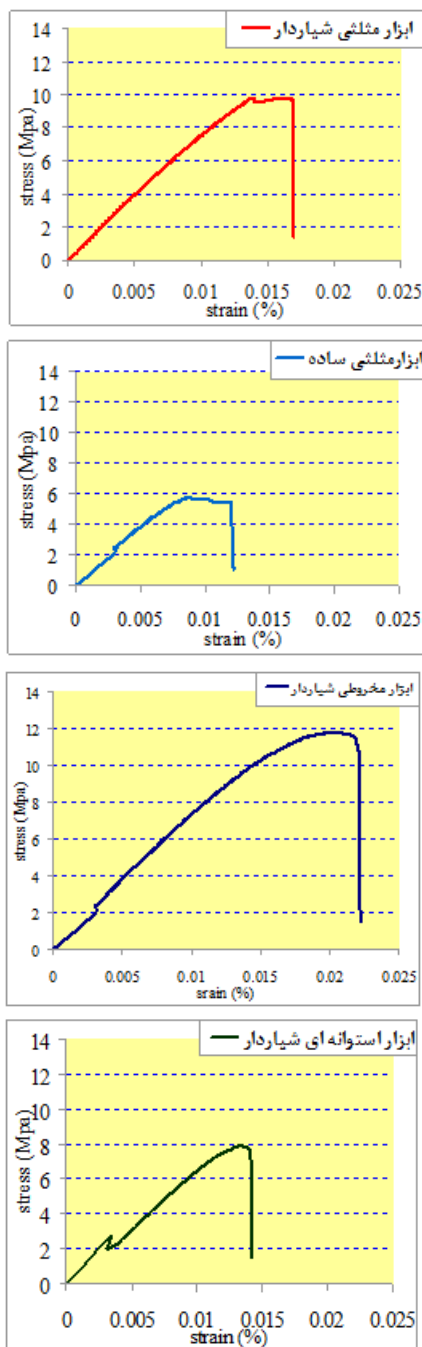


شکل ۲- نامگذاری اجزای مختلف ابزار FSW [2]

### نتایج و بحث

در این مقاله، برای اینکه یک کار علمی بر روی تاثیر هندسه ابزار بر استحکام کششی جوش صورت گرفته باشد و بهترین هندسه برای جوشکاری قطعات بدست آید، ابزارهای مختلفی ساخته شد (شکل (۳)). پس از ایجاد شیار روی شولدر و عملیات حرارتی آن ها، جوشکاری روی نمونه های دارای ابعاد یکسان با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها انجام شد.





شکل ۵- نمودار تنش- کرنش مربوط به چهار ابزار مختلف

### نتیجه گیری

در این تحقیق دو ورق پلی پروپیلن با ابعاد  $100 \times 50 \times 5$  میلی متر به صورت لب به لب به روش اصطکاکی اغتشاشی جوشکاری شد و تاثیر شکل ظاهری ابزار بر استحکام کششی قطعه در حالی که بقیه پارامترها ثابت بودند پس از جوشکاری مورد تست قرار گرفت و نتایج

اتصال ایجاد شده و اغتشاش کمتری نیز بوجود می آید. ابزار (ب) دارای پین مثلثی شیاردار است و به دلیل وجود رزوه محل اتصال را بهتر از ابزار (الف) به هم می زند. در ابزار (ج) سطح تماس از ابزارهای (الف و ب) بیشتر است، ولی به دلیل اینکه قطر پین یکنواخت و ابزار استوانه‌ای است، حتی در شکل نیز دیده می شود که خط جوش ضعیفی ایجاد شده و بیشتر مذاب به صورت له شده در درز جوش قرار گرفته است. بنابراین جوش بوجود آمده با این ابزار، از ابزار (الف) دارای کیفیت بهتری است ولی نسبت به ابزار مثلثی شیاردار شکل ناهمگون تری دارد. برای تعیین تاثیر هندسه پین بر استحکام کششی جوش، همان گونه که بیان شد، جوشکاری با چهار ابزار مختلف، در شرایطی کاملاً یکسان صورت گرفت و استحکام کششی قطعات حاصل اندازه گیری گردیدند که نمودار تنش- کرنش این قطعات در شکل (۵)، مشاهده می گردد.

به منظور مقایسه قطعات جوشکاری شده با چهار ابزار مختلف، نمودار تنش- کرنش آنها به صورت تلفیقی در شکل (۶) ارائه شده است. از شکل (۶) می توان استنباط کرد که استحکام کششی و شکل پذیری مربوط به قطعه جوشکاری شده توسط ابزار (د) از سایر نمونه ها بیشتر است. دلایلی که برای بهتر بودن شکل ظاهری قطعه جوشکاری شده با ابزار (د) ارائه شد، می تواند در مورد استحکام کششی آن نیز صدق کند. کم بودن عیوبی از قبیل تخلخل، کرم خوردگی و شکل (۷) و نداشتن حفره در محل اتصال و نبود نقاطی که باعث ایجاد تمرکز تنش در محل جوش شود به بالاتر بودن استحکام کششی نمونه (د) کمک کرده است.

استحکام کششی نمونه جوشکاری شده با ابزار شماره (الف) کمترین مقدار است. به دلیل کمتر بودن سطح تماس ابزار با قطعه کار و ایجاد حرارت ورودی کمتر، اختلاط مواد به صورت کامل صورت نگرفته و سطحی ناهموار و معیوب حاصل می شود.

عیوب دیده شده از قبیل تخلخل و کرم خوردگی در سطح جوش و احتمالاً در درون آن، می تواند دلیل مهمی برای کم بودن استحکام کششی آن محسوب گردد.

در مورد سایر نمونه ها نیز همین دلایل صادق است به طوری که هر چه نمونه جوشکاری شده دارای عیوب کمتری باشد استحکام آن نیز به مراتب بالاتر خواهد بود. بنابراین استحکام کششی نمونه های (الف، ج، ب و د) به ترتیب افزایش می یابد.

آخرین نکته باقی مانده که در بخش هندسه ظاهری ابزار بررسی می شود جهت دوران ابزار است. دو جهت دوران برای ابزار مقدور است:

الف- ساعتگرد (cw)

ب- پادساعتگرد (ccw)

چون شیار ارشمیدسی جهت دار است، جهت دوران ابزار نیز مهم است. بدین منظور عملیات جوشکاری در دو جهت دوران cw و ccw با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها انجام شد. جوش های حاصل در شکل (۸) نشان داده شده اند.

به دلیل اینکه جهت شیار ارشمیدسی موافق عقربه های ساعت است، طبیعتاً با دوران ابزار به صورت ساعت گرد، مواد بهتر انتقال یافته و سطح بهتری ایجاد می شود.

properties of bobbintool and conventional friction stir welded 7085-T7452 aluminum thick plate, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 34, No. 1, pp. 173-184, 2018

3- R. Keivani, B. Bagheri, F. Sharifi, M. Ketabchi, M. Abbasi, Effects of pin angle and preheating on temperature distribution during friction stir welding operation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, No. 9, pp. 2708-2713, 2013.

4-M.M. Moradi, H. Jamshidi Aval, R. Jamaati, Experimental investigation on the effect of friction stir welding process parameters in dissimilar joining of AA2024-T351 and AA6061-T6 aluminum alloys, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 392-402, 2016

5- Khaled, Terry, July 2005, An outsider looks at friction stir welding.

6-ASTM Standard D638-02a, Standard test method for Tensile Properties of Plastics. In: *Annual book of ASTM standard*, 2002.

#### پی نوشت

- 1- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران
- 2- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران
- 3- استادیار، مرکز تحقیقاتی مهندسی پیشرفته، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

زیر حاصل شد:

- هندسه ابزار تاثیر زیادی بر استحکام کششی و شکل ظاهری جوش ایجاد شده دارد.
- در بین ابزارهای تست شده، ابزار مثلثی ساده ضعیفترین شکل ظاهری و استحکام کششی را داراست که دلیل این امر میزان اصطکاک کم ایجاد شده بین ابزار جوشکاری و قطعه کار است.
- در بین ابزارهای تست شده، ابزار دارای پین مخروطی شیاردار و شولدر مارپیچی، بهترین شکل ظاهری و استحکام کششی را داراست که مقدار آن  $11/344 \text{ Mpa}$  است.
- جهت شیار ارشمیدسی ایجاد شده بر روی شولدر جهت دوران ابزار را معین می کند، پس زمانی که جهت شولدر موافق عقربه‌های ساعت است، طبیعتاً با دوران ابزار به صورت ساعت گرد، مواد بهتر انتقال یافته و سطح بهتری ایجاد می شود.

#### منابع

- 1- M. saeidi, N. B. Mostafa Arab and F. A. Ghasemi, 2010, "A Study of FSW Process Parameters Effects on Mechanical Properties of PP Composites", 11th Iranian Conference on Manufacturing Engineering 19-21, University of Tabriz, Tabriz-Iran, Oct.
- 2- Xu, W., Luo, Y., Zhang, W., and Fu, M., Comparative study on local and global mechanical





## جوشکاری فولادهای مقاوم به خوردگی جوی

مهندس عبدالوهاب ادب آوازه<sup>۱</sup>

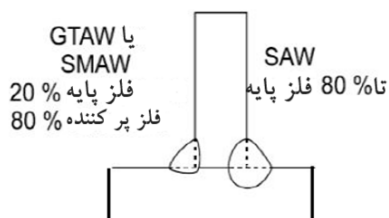
الزامات ویژه ای ارائه کرده است (جدول ۱ الی ۳).

### رقت

در جوشکاری ذوبی نسبت وزنی فلز پایه ذوب شده به کل فلز جوش را رقت (**Dilution**) می نامند. در جوشکاری فولادهای مقاوم به خوردگی جوی با ضخامت کم وقتی جوشکاری در یک پاس با الکتروود معمولی انجام می شود، عناصر آلیاژی موجود در فلز پایه به نسبت درصد رقت به جوش انتقال می یابد. مثلاً اگر درصد نیکل در فلز پایه ۰/۶۵ درصد و درصد رقت ۷۰ درصد باشد، درصد نیکل در جوش ۰/۴۵۵ خواهد شد.



جوش شیار بی بدون پخ لبه ها  
فلز پایه ۷۵ - ۸۵ %  
فلز پرکننده ۱۵ - ۲۵ %  
جوش شیار بی جناغی یکطرفه  
فلز پایه ۳۰ - ۴۰ %  
فلز پرکننده ۶۰ - ۷۰ %  
شکل ۱- سهم فلز پرکننده در جوش



شکل ۲- سهم فلز پرکننده در جوش گوشه ای سپری با توجه به فرایند جوشکاری

### مقدمه

فولادهای مقاوم به خوردگی جوی را **Weathering Steel** یا **Weather resistant Steel** یا **COR-TEN** یا **Corten** می نامند.

فولادهای مقاوم به خوردگی جوی، فولادهایی هستند که عناصر آلیاژی موجود در آن ها در هوا تشکیل لایه ای از اکسید یا زنگ بر روی سطح فولاد تشکیل می دهند که این لایه اکسیدی بسیار محکم به سطح فولاد می چسبد، بطوری که ریزش باران، وزش باد یا سایش ملایم نمی تواند آن را از سطح جدا نماید. این لایه زنگ یا اکسید به زنگار یا پتینه (**Patina**) معروف است.

پتینه روی فولادهای مقاوم به خوردگی جوی، به رنگ زنگ مانند است و جذابیت ظاهری و عتیقه نمایی دارد. این قشر مقاوم نیاز به رنگ آمیزی ندارد. مجسمه سازان و سازندگان اشیای هنری و معماران، از نظر زیبایی شناسی، بافت و رنگ از فولادهای مقاوم به خوردگی جوی استفاده می کنند. رنگ های پتینه، ظاهر یکنواخت دارند و بطور قابل ملاحظه ای سازه را قدیمی و عتیقه نشان می دهند.

### فولادهای مقاوم به خوردگی جوی

فولادهای مقاوم به خوردگی جوی، برای ساخت پلها و بعضی از سازه های فولادی به دلیل مقاومت بالای این نوع فولاد در برابر خوردگی جوی، جذابیت ظاهری و کاهش نیاز به رنگ آمیزی مورد توجه قرار گرفته است. این فولادها در تنوع وسیعی از استحکام تسلیم در محدوده از ۵۰ تا ۱۰۰ هزار پوند بر اینچ مربع و چقرمگی های متنوع تولید می شوند. کد جوشکاری پل (**AWS D1.5**) برای فولادهای مقاوم به خوردگی جوی **AASHTO M270** و **ASTM A709**

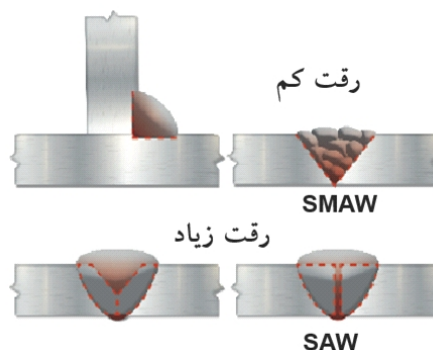
آلیاژی مورد نظر برای جوش تامین می شود.  
- اگر ضخامت فلز پایه از ۶ میلیمتر بیشتر نباشد، جوشکاری به روش SMAW ممکن است در یک پاس انجام شود و عناصر مقاومت به خوردگی کافی که برای حفاظت جوش و تامین تطابق رنگ زمینه لازم است را از فلز پایه بدست آورد.

- در جوشکاری به روش زیر پودری SAW فولاد مقاوم به خوردگی جوی تا ضخامت ۸ میلیمتر را می توان در یک پاس جوش داد و با رقیق شدن فلز پایه، عناصر مقاوم به خوردگی را برای جوش تامین نمود.

- در جوشکاری به روش تو پودری (FCAW) فولاد مقاوم به خوردگی جوشی تا ضخامت ۸ میلیمتر را می توان در یک پاس جوش داد (جوش تو پودری نسبت به جوش با الکتروود دستی نفوذ بیشتری دارد و با رقیق شدن فلز پایه، عناصر کافی مقاوم به خوردگی جوی برای جوش تامین می شود)



شکل ۴- پل Sipoonkorpi از فولاد سازگار با محیط زیست COR-TEN ساخته شده است.



شکل ۳- مثال رقت کم و رقت زیاد

**الزامات جوشکاری فولاد مقاوم به خوردگی برای پل ها**  
کد جوشکاری پل (AWS D1.5) برای جوشکاری فولادهای مقاوم به خوردگی در سازه فولادی پل، الزاماتی ارائه کرده است که به اختصار عبارتند از:

- برای فولاد لخت، رنگ آمیزی نشده ASTM A709 Gr.50W فلز پرکننده و فلز جوش باید دارای خواص مکانیکی مناسب و همخوان با فلز پایه باشد.

- فلزات پرکننده با مقاومت به خوردگی جوی عموماً مقداری نیکل، کرم یا مس دارند.

- فلزات پرکننده با مقاومت به خوردگی جوی، از فلزات پرکننده غیر مقاوم به خوردگی جوی، گران ترند. به منظور صرفه جویی در هزینه، در جوش های چند پاسی می توان لایه های داخلی را با فلز پرکننده فولاد کربنی عادی جوش داد و فقط لایه های بیرونی را با فلز پرکننده مقاوم به خوردگی جوی جوش داد. سطوح و انتهای لبه جوش باید دست کم دو لایه فلز جوش مقاوم به خوردگی داشته باشد.

- برای جوش های تک پاسه (یا یک پاسه از هر طرف) فولاد مقاوم به خوردگی جوی می توان از فلزات پرکننده غیرمقاوم به خوردگی جوشی استفاده کرد، چون با رقت (Dilution) فلز پایه، عناصر

جدول ۱ - آنالیز شیمیایی فولاد ASTM A242

| C <sub>max</sub> | Mn <sub>max</sub> | P <sub>max</sub> | S <sub>max</sub> | Cu <sub>min</sub> |
|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 0.15             | 1.00              | 0.15             | 0.05             | 0.20              |

جدول ۲ - آنالیز شیمیایی فولاد ASTM A588

|         | C    | Mn        | P    | S    | Si        | Ni                  | Cr        | Mo                  | Cu        | V         | Nb         |
|---------|------|-----------|------|------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|-----------|------------|
| Grade A | 0.19 | 0.80-1.25 | 0.03 | 0.03 | 0.30-0.65 | 0.40                | 0.40-0.65 | -                   | 0.25-0.40 | 0.02-0.10 | -          |
| Grade B | 0.20 | 0.75-1.35 | 0.03 | 0.03 | 0.15-0.50 | 0.50 <sub>max</sub> | 0.40-0.70 | -                   | 0.20-0.40 | 0.01-0.10 | -          |
| Grade K | 0.17 | 0.50-1.20 | 0.03 | 0.03 | 0.25-0.50 | 0.40 <sub>max</sub> | 0.40-0.70 | 0.10 <sub>max</sub> | -         | 0.30-0.50 | 0.005-0.05 |

آنالیز شیمیایی ASTM A709 Gr.50W نوع A و B به ترتیب با آنالیز A588 گرید A و B جدول فوق مطابقت دارد.

جدول ۳ - آنالیز شیمیایی فولاد ASTM A847

| C <sub>max</sub> | Mn <sub>max</sub> | P <sub>max</sub> | S     | Cu   | Ni     | Si   | Cr   |
|------------------|-------------------|------------------|-------|------|--------|------|------|
| 0.20             | 1.35              | 0.04             | 0.035 | 0.20 | اعلامی | 0.50 | 0.50 |

جدول ۴- الزامات فلز پرکننده برای فولادهای A709B Gr.50B W و GR.HPS 50W

| فرایند جوشکاری | استاندارد فلز پرکننده | الکترودهای تایید شده                                                                                      |
|----------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SMAW           | AWS A5.5              | تمام الکترودهایی که فلز جوشی رسوب می دهند که با آنالیز C1, C1L, C2, C2L, C3, W1, W2 مطابقت دارند .        |
| SAW            | AWS A5.23             | تمام ترکیب های الکتروود بودر که فلز جوشی رسوب می دهند که با آنالیز Ni1, Ni2, Ni3, Ni4 یا W مطابقت دارند . |
| FCAW           | AWS A5.29             | تمام الکترودهایی که فلز جوشی رسوب می دهند که با آنالیز Ni1, Ni2, Ni3, Ni4 یا W مطابقت دارند .             |
| GMAW           | AWS A5.28             | تمام الکترودهایی که فلز جوشی رسوب می دهند که با آنالیز Ni1, Ni2, Ni3 یا W2 مطابقت دارند .                 |



شکل 5 - طولی ترین پل کشور فنلاند در Tervola در سال 1975 میلادی از فولاد مقاوم به خوردگی جوی ساخته شده است.

از فولاد مقاوم به خوردگی جوی اشاره دارند و به روش های جوشکاری مناسب با محیط های سرویسی مختلف برای این فولادها می پردازند . مقدار استحکام کششی این فولادها از  $50000 \text{ PSI}$  تا  $100000 \text{ PSI}$  متغیر است و چقرمگی شیاری متفاوت دارند. این فولادها در شرایط آب وهوایی و محیطی عادی تا شرایط خوردگی ملایم نیاز به رنگ آمیزی ندارند و دست کم ۱۰۰ تا ۱۲۰ سال و حتی بیشتر دریل ها دوام دارند. ضخامتی از فلز پایه را که می توان در یک پاس یا یک پاس از هر طرف جوش داد بسته به فرایند جوشکاری، مشخص شده است ( $\text{SMAW} = 6 \text{ میلیمتر}$ ،  $\text{SAW} = 8 \text{ میلیمتر}$ ،  $\text{FCAW} = 8 \text{ میلیمتر}$ ).

#### الف - فلز پرکننده فولاد کربنی

جوشکاری فلز پایه ———— ضخامت کم که در یک پاس (یا یک پاس از هر طرف) انجام می شود، آنالیز جوش، ترکیبی از آنالیز فلز پایه و فلز پرکننده است و عناصر آلیاژی مقاوم به خوردگی موجود در جوش کافی بنظر می رسد بنابراین فلز پایه مقاوم به خوردگی جوی که به

#### انتخاب فلز پرکننده

برای انتخاب فلز پرکننده مناسب فولادهای مقاوم به خوردگی جوش، عوامل متعددی باید در نظر گرفته شود .  
 - الزامات مشخصات فنی پروژه یا کد جوشکاری مربوطه  
 - مقدار استحکام کششی و چقرمگی؟  
 - محیطی که سازه جوش داده شده در آنجا نصب می شود؟  
 - آیا سازه جوش داده شده، رنگ آمیزی می شود؟  
 - هندسه اتصال و اندازه جوش لازم؟  
 - آیا تطابق رنگ زمینه مطلوب است؟  
 علاوه بر الزامات طراحی، صلاحیتهای کدها و مشخصات فنی نیز باید در جوشکاری ساخت و نصب مراعات شوند .

#### دو کد متداول در این زمینه عبارتند از:

**AWS D1.1** - کد جوشکاری اسکلت فولادی  
**AWS D1.5** - کد جوشکاری پل این دو کد مستقیماً به استفاده



جوش های کوچک نیاز دارند

بافلز پرکننده فولاد کربنی به شرح زیر می توان جوش داد.

-الکتروود روکش قلبیایی کم هیدروژن **E7018** برای فرایند **SMAW**

-سیم جوش **ER70S-3/6** برای فرایند **GMAW**

-الکتروود توپودری **E71T** برای فرایند **FCAW**

گران تر است ، سیم جوش ها و الکتروودهای مقاوم به خوردگی جوی در جداول ( ۵ تا ۸ ) ارائه شده اند.

### ج- فلز پرکننده برای تطابق زمینه رنگ

پس از گذشت زمان کافی، تمام جوش ها نهایتا بدون توجه به اینکه از فلز پرکننده فولاد کربنی یا کم آلیاژ استفاده کرده اند، نهایتا پتینه ویژه خود را خواهند داشت. در اوایل، جوش های روی فولاد مقاوم به خوردگی بخاطر کنتراست بین رنگ قهوه ای مات فلز پایه و رنگ خاکستری براق فلز جوش، جلوه متفاوت دارند. در بعضی کاربردها مثل مجسمه هایا بعضی از سازه های معماری دارای جوش، از دید عموم تطابق بسافت و رنگ فلز پایه و فلز جوش مورد نظر است. یکنواختی رنگ فلز پایه و جوش را "تطابق زمینه رنگ" می گویند. فلزات پرکننده فولاد کم آلیاژ با شناسه "**W**" نوعا برای این کاربرد استفاده می شوند، این فلزات پرکننده می توانند تشکیل پتینه ای بدهند که خیلی زود تطابق زمینه رنگ را فراهم کنند. برای جوش های کوچک با رقت زیاد نیز احتمال پیدایش نسبتا سریع تطابق زمینه رنگ وجود دارد .

### ب- فلز پرکننده فولاد کم آلیاژ

درجوش های بزرگ چند پاسه، درصد رقت قابل توجهی بدست نمی آید و نمی توان عناصر آلیاژی مورد نظر برای جوش را از رقت فلز پایه بدست آورد، بنابراین فلزپرکننده باید همان عناصر آلیاژی مورد نظر را داشته باشد.

فلز پرکننده فولاد کم آلیاژ با استحکام کششی و تسلیمی بالاتر از فلزات پرکننده فولاد کربنی در دسترسند که اجازه می دهند جوش با خواص همخوان فلز پایه تولید شود. یکی از عناصر آلیاژی مقاوم به خوردگی جوی، نیکل است که متداول ترین شناسه برای سیم جوش ها **Ni<sub>1</sub>**و برای الکتروودهای روکش دار **C<sub>3</sub>** می باشد. هرچه درصد نیکل بیشتر باشد، قیمت آن سیم جوش یا الکتروود،

جدول ۵- آنالیز شیمیایی جوش الکتروود های روکشدار مناسب برای SMAW از AWS A5.5

| AWS Classifications         |           | UNS    | C    | Mn        | Si        | P     | S     | Ni        | Cr        | Mo   |
|-----------------------------|-----------|--------|------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|------|
| A5.5                        | A5.5M     | Number |      |           |           |       |       |           |           |      |
| Nickel Steel Electrodes     |           |        |      |           |           |       |       |           |           |      |
| E8016-C1                    | E5516-C1  | W22016 | 0.12 | 1.25      | 0.60      | 0.03  | 0.03  | 2.00-2.75 | —         | —    |
| E9016-C1                    | E6216-C1  | —      | 0.12 | 0.60-1.20 | 0.80      | 0.03  | 0.03  | 2.00-2.75 | —         | 0.30 |
| E8018-C1                    | E5518-C1  | W22018 | 0.12 | 1.25      | 0.80      | 0.03  | 0.03  | 2.00-2.75 | —         | —    |
| E7015-C1L                   | E4915-C1L | W22115 | 0.05 | 1.25      | 0.50      | 0.03  | 0.03  | 2.00-2.75 | —         | —    |
| E7016-C1L                   | E4916-C1L | W22116 | 0.05 | 1.25      | 0.50      | 0.03  | 0.03  | 2.00-2.75 | —         | —    |
| E7018-C1L                   | E4918-C1L | W22118 | 0.05 | 1.25      | 0.50      | 0.03  | 0.03  | 2.00-2.75 | —         | —    |
| E8016-C2                    | E5516-C2  | W23016 | 0.12 | 1.25      | 0.60      | 0.03  | 0.03  | 3.00-3.75 | —         | —    |
| E8018-C2                    | E5518-C2  | W23018 | 0.12 | 1.25      | 0.80      | 0.03  | 0.03  | 3.00-3.75 | —         | —    |
| E7015-C2L                   | E4915-C2L | W23115 | 0.05 | 1.25      | 0.50      | 0.03  | 0.03  | 3.00-3.75 | —         | —    |
| E7016-C2L                   | E4916-C2L | W23116 | 0.05 | 1.25      | 0.50      | 0.03  | 0.03  | 3.00-3.75 | —         | —    |
| E7018-C2L                   | E4918-C2L | W23118 | 0.05 | 1.25      | 0.50      | 0.03  | 0.03  | 3.00-3.75 | —         | —    |
| E8016-C3                    | E5516-C3  | W21016 | 0.12 | 0.40-1.25 | 0.80      | 0.03  | 0.03  | 0.80-1.10 | 0.15      | 0.35 |
| E8018-C3                    | E5518-C3  | W21018 | 0.12 | 0.40-1.25 | 0.80      | 0.03  | 0.03  | 0.80-1.10 | 0.15      | 0.35 |
| E7018-C3L                   | E4918-C3L | W20918 | 0.08 | 0.40-1.40 | 0.50      | 0.03  | 0.03  | 0.80-1.10 | 0.15      | 0.35 |
| E8016-C4                    | E5516-C4  | W21916 | 0.10 | 1.25      | 0.60      | 0.03  | 0.03  | 1.10-2.00 | —         | —    |
| E8018-C4                    | E5518-C4  | W21918 | 0.10 | 1.25      | 0.80      | 0.03  | 0.03  | 1.10-2.00 | —         | —    |
| E9015-C5L                   | E6215-C5L | W25018 | 0.05 | 0.40-1.00 | 0.50      | 0.03  | 0.03  | 6.00-7.25 | —         | —    |
| Weathering Steel Electrodes |           |        |      |           |           |       |       |           |           |      |
| E7018-W1                    | E4918-W1  | W20018 | 0.12 | 0.40-0.70 | 0.40-0.70 | 0.025 | 0.025 | 0.20-0.40 | 0.15-0.30 | —    |
| E8018-W2                    | E5518-W2  | W20118 | 0.12 | 0.50-1.30 | 0.35-0.80 | 0.03  | 0.03  | 0.40-0.80 | 0.45-0.70 | —    |

جدول ۶ - آنالیز شیمیایی جوش فلز پرکننده مناسب برای SAW از AWS A5.23

| Chemical Composition Requirements for Weld Metal |            |                |      |      |       |       |      |           |           |      |                   |
|--------------------------------------------------|------------|----------------|------|------|-------|-------|------|-----------|-----------|------|-------------------|
| Weld Metal Designation                           | UNS Number | Weight Percent |      |      |       |       |      |           |           |      |                   |
|                                                  |            | C              | Mn   | Si   | S     | P     | Cr   | Ni        | Mo        | Cu   | Other             |
| Ni1                                              | W21040     | 0.12           | 1.60 | 0.80 | 0.025 | 0.030 | 0.15 | 0.75–1.10 | 0.35      | 0.35 | Ti + V + Zr: 0.05 |
| Ni2                                              | W22040     | 0.12           | 1.60 | 0.80 | 0.025 | 0.030 | —    | 2.00–2.90 | —         | 0.35 | —                 |
| Ni3                                              | W23040     | 0.12           | 1.60 | 0.80 | 0.025 | 0.030 | 0.15 | 2.80–3.80 | —         | 0.35 | —                 |
| Ni4                                              | W21250     | 0.14           | 1.60 | 0.80 | 0.025 | 0.030 | —    | 1.40–2.10 | 0.10–0.35 | 0.35 | —                 |
| Ni5                                              | W21042     | 0.12           | 1.60 | 0.80 | 0.025 | 0.030 | —    | 0.70–1.10 | 0.10–0.35 | 0.35 | —                 |
| Ni6                                              | W21042     | 0.14           | 1.60 | 0.80 | 0.025 | 0.030 | —    | 0.70–1.10 | 0.10–0.35 | 0.35 | —                 |

جدول ۷ - آنالیز شیمیایی جوش الکتروود های توپودری مناسب برای FCAW از AWS A529

| Weld Metal Composition Requirements |            |                  |      |      |       |       |           |      |      |      |                  |    |
|-------------------------------------|------------|------------------|------|------|-------|-------|-----------|------|------|------|------------------|----|
| Weld Metal Composition Designator   | UNS Number | (Weight Percent) |      |      |       |       |           |      |      |      |                  |    |
|                                     |            | C                | Mn   | Si   | S     | P     | Ni        | Cr   | Mo   | V    | Al               | Cu |
| Nickel Steel Electrodes             |            |                  |      |      |       |       |           |      |      |      |                  |    |
| Ni1                                 | W2103X     | 0.12             | 1.75 | 0.80 | 0.030 | 0.030 | 0.80–1.10 | 0.15 | 0.35 | 0.05 | 1.8 <sup>f</sup> | —  |
| Ni2                                 | W2203X     | 0.12             | 1.50 | 0.80 | 0.030 | 0.030 | 1.75–2.75 | —    | —    | —    | 1.8 <sup>f</sup> | —  |
| Ni3                                 | W2303X     | 0.12             | 1.50 | 0.80 | 0.030 | 0.030 | 2.75–3.75 | —    | —    | —    | 1.8 <sup>f</sup> | —  |

جدول ۸ - آنالیز شیمیایی سیم جوش های مناسب برای GMAW از AWS A 5.28

| AWS Classification <sup>c</sup>  |           | UNS <sup>d</sup> Number | Weight Percent |           |           |       |       |           |      |      |      |    |    |    |                 |
|----------------------------------|-----------|-------------------------|----------------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|------|------|------|----|----|----|-----------------|
| A5.28                            | A5.28M    |                         | C              | Mn        | Si        | P     | S     | Ni        | Cr   | Mo   | V    | Ti | Zr | Al | Cu <sup>e</sup> |
| Nickel Steel Electrodes and Rods |           |                         |                |           |           |       |       |           |      |      |      |    |    |    |                 |
| ER80S-Ni1                        | ER55S-Ni1 | K11260                  | 0.12           | 1.25      | 0.40-0.80 | 0.025 | 0.025 | 0.80-1.10 | 0.15 | 0.35 | 0.05 | —  | —  | —  | 0.35            |
| ER80S-Ni2                        | ER55S-Ni2 | K21240                  | 0.12           | 1.25      | 0.40-0.80 | 0.025 | 0.025 | 2.00-2.75 | —    | —    | —    | —  | —  | —  | 0.35            |
| ER80S-Ni3                        | ER55S-Ni3 | K31240                  | 0.12           | 1.25      | 0.20-0.80 | 0.025 | 0.025 | 3.00-3.75 | —    | —    | —    | —  | —  | —  | 0.35            |
| ER70S-Ni4                        | ER49S-Ni4 | —                       | 0.10           | 0.40-1.40 | 0.50      | 0.025 | 0.025 | 4.00-4.75 | 0.15 | 0.35 | 0.05 | —  | —  | —  | 0.35            |

خوردگی جوی به رنگ آمیزی نیاز ندارد. اجزای پل ساخته شده از فولاد کربنی عادی نیاز به رنگ آمیزی دارند. هنگام نصب، رنگ اجزای رنگ آمیزی شده، ممکن است آسیب ببینند و بعد از نصب نیاز به لکه گیری یا تعمیر رنگ داشته باشند. زمان کل ساخت و نصب پل فولادی مقاوم به خوردگی جوی از زمان کل ساخت و نصب پل فولاد کربنی رنگ آمیزی شده کوتاه تر است. فولاد مقاوم به خوردگی جوی، با ذرات میکروپلاستیک رنگ، محیط زیست را آلوده نمی کند و سازگار با محیط زیست است. استفاده از فولاد مقاوم به خوردگی جوی برای روکار ساختمان و تاسیسات زیربنایی مقرون به صرفه است.



شکل ۶ - انتخاب فولاد سازگار با محیط زیست COR-TEN برای نمای این ساختمان در شهر Oulu

### نقش فسفر در فولادهای مقاوم به خوردگی جوی

فولادهای مقاوم به خوردگی جوی بسته به عناصر آلیاژی و استحکامشان برای کاربردهای متفاوت مناسبند. عناصر آلیاژی این فولادها، مقدار کمی از مس، کرم، نیکل و سیلیسیم است در بعضی از فولادهای مقاوم به خوردگی جوی، از فسفر استفاده می شود. نقش فسفر در این فولادها، تامین مقاومت به خوردگی بهتر است، اما چقرمگی ضربه ای و خواص جوشکاری را قدری ضعیف تر می کند. به این دلیل فولادهای مقاوم به خوردگی جوی فسفوری مثل

### کاربرد فولادهای مقاوم به خوردگی جوی

در فولادهای مقاوم به خوردگی جوی، تشکیل لایه پتینه حائز اهمیت است. لایه پتینه بلافاصله تشکیل نمی شود. تشکیل لایه پتینه نیاز به چرخه تر شدن و خشک شدن دارد، یعنی برای تشکیل پتینه باران و آفتاب تناوبی لازم است. تر شدن و خشک شدن تناوبی سبب واکنش شیمیایی روی سطح فولادی می شود و لایه پتینه را بوجود می آورد. چون این عمل بر مبنای پدیده طبیعی صورت می گیرد، لایه پتینه را لایه محافظ طبیعی می نامند. تشکیل لایه پتینه معمولاً بیشتر از شش ماه طول می کشد، اما با بعضی عملیات سطحی این زمان را می توان خیلی کوتاه کرد. فولاد مقاوم به خوردگی جوی، برای محیط های با رطوبت زیاد یا شرایط خشک مانند صحرا یا بصورت غرق در آب مناسب نیست.

قسمتهای مدفون بصورت فولاد مقاوم به خوردگی جوی یا باید همانند فولادهای معمولی پوشش داده شوند یا برای جبران خوردگی ضخامت اضافی برایش در نظر گرفته شود. لایه پتینه تحمل نمک و شوری ندارد و بنابراین فولاد مقاوم به خوردگی جوی برای استفاده در کنار دریا و یا هر جاکه درصد نمک زیاد است، مناسب نیست. در مقاطع جاده ای با درصد نمک معتدل، می توان از فولاد مقاوم به خوردگی جوی برای پل ها استفاده کرد. بطور مثال سازه ساخته شده از فولاد مقاوم به خوردگی جوی که نیاز به رنگ آمیزی نداشته باشد، در فاصله یک کیلومتری از دریای با آب خیلی شور مجاز است. نمک دار بودن هوا و میزان مجاز آن را می توان از اطلاعات وزارت راه و شهرسازی بدست آورد. نمک دار بودن دریای بالتیک بقدری کم است که استفاده از پل ساخته شده فولاد مقاوم به خوردگی جوی در کنار آن مجاز است.

### هزینه و جنبه های زیست محیطی

هزینه ساخت پل فولادی مقاوم به خوردگی جوی با هزینه ساخت پل فولاد کربنی عادی عمدتاً یکی است. پل ساخته شده از فولاد مقاوم به

**-Guidance on the Welding of Weathering Steels Blue Scope.**

**-Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, AWS A5.5.**

**-Specification for Low-Alloy and High Manganese Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding, AWS A5.23.**

**-Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding, AWS A5.28.**

**-Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding, AWS A5.29.**

**-Structural Welding Code - Steel, AWS D1.1.**

**-Bridge Welding Code, AWS D1.5.**

**-Standard Specification for Structural Steel for Bridges ASTM A709.**

**-Standard Specification for High-Strength, Low-Alloy Structural Steel, ASTM A242.**

**-Standard Specification for High Strength Low-Alloy Structural Steel, up to 50ksi Minimum Yield Point, With Atmospheric Corrosion Resistance, ASTM A588.**

**-Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless High-Strength, Low-Alloy Structural Tubing With Improved Atmospheric Corrosion Resistance, ASTM A847.**

**-Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled and Cold-Rolled, With Atmospheric Corrosion Resistance, ASTM A606.**

.....

پی نوشت

1-انجمن جوشکاری و آزمایش های غیر مخرب ایران

**CORTENA** را برای کاربردهای زیباشناسی، نظیر نماها و کارهای هنری استفاده می کنند. ورق های فولاد مقاوم به خوردگی فسفری ضخامت یک تا دو میلیمتر دارند و مقاومت به خوردگی جوی بهتری ارائه می دهند. فولادهای مقاوم به خوردگی جوی غیر فسفری، چقرمگی ضربه ای و خواص جوشکاری عالی دارند و برای اسکلت فلزی سازه های باربر استفاده می شوند.



شکل ۷ - تیر برق انتقال نیرو در Torne River Valley (Torinijokilaakso) از فولاد مقاوم به خوردگی جوی ساخته شده است.

منابع

**-Weld for the outdoors : Welding Corten Steel, Hobart Brothers.**





## تهیه دستور العمل ساخت، جوشکاری و بازرسی مخزن تحت فشار نیتروژن اضطراری LADLE TURRET واحد فولاد سازی

ایمان حاجیان نیا<sup>۱</sup>، احمد خلیلیان<sup>۲</sup>، سعید علیان<sup>۳</sup>

### چکیده

در این تحقیق از ورق ASTM A516 Grade 70 با ضخامت ۱۶ میلیمتر برای ساخت مخزن تحت فشار نیتروژن اضطراری برای حرکت LADLE TURRET استفاده شد. برای ایجاد اتصال بین فلزات پایه مونتاژ انجام شد و به منظور انجام عملیات جوشکاری ذوبی لازم بود تا در ابتدا ورق ها را از یک طرف مطابق با طرح مناسب اتصال آماده سازی شود. بدین منظور برای اتصال لب به لب با شیار V شکل آماده سازی شدند. صحت پخش سازی و عدم وجود ترک در نمونه های تهیه شده با آزمایش مایع نافذ مورد بررسی قرار گرفت. جهت بازرسی جوش بر اساس پارامتر های مورد نیاز برای جوشکاری دستور العملی تهیه و تنظیم شد و در این تحقیق میزان حرارت ورودی حدود  $0/9 \text{ kJ/mm}$  در نظر گرفته شد. پارامتر های جوشکاری به گونه ای انتخاب شد که ضمن جلوگیری از حرارت ورودی اضافی به حوضچه مذاب، بهترین سیالیت و نفوذ پذیری حاصل شود. جهت بازرسی از عدسی و جداره مخزن از دو آزمون غیر مخرب یکی مایع نافذ جهت بررسی نفوذ جوش پشی و جوش ریشه و همچنین برای بررسی وجود عیب های مهمی از جمله عدم نفوذ و عدم ذوب ناقص از آزمون فراصوتی با پراب زاویه ای  $70^\circ$  درجه بهره برده شد. نتایج نشان داد با رعایت پارامتر های ذکر شده در دستور العمل بازرسی و همچنین حضور جوشکاران ماهر جوشی بدون عیب و با کیفیت بالا حاصل خواهد شد.

**کلمات کلیدی:** مخزن تحت فشار، عدسی مخزن، جداره مخزن، حرارت ورودی، دستور العمل بازرسی.

### مقدمه

مخازن تحت فشار محفظه های بدون نشت هستند که دارای اختلاف فشار داخلی نسبت به فشار خارجی هستند که در اغلب موارد به جز در برخی وضعیت های ایزوله، فشار داخلی بیشتر از فشار خارج است. این مخازن در ابعاد و اشکال مختلفی ساخته می شوند. انواع کوچک آنها محدوده فشار معمول بین ۱۵ بار می باشد. مخازن می تواند چند میلیمتر قطر و انواع بزرگ آنها می تواند ۵۴ متر و یا بیشتر قطر داشته باشند. سیالات درون مخازن ممکن است مانند دیگ های بخار تغییر فاز داده و یا همانند راکتور های شیمیایی دچار واکنش شوند [۱]. در بسیاری موارد مخازن تحت فشار در معرض شرایطی مرکب از فشار و دمای بالا قرار دارند و در برخی موارد حاوی مواد قابل اشتعال و یا

موارد رادیواکتیو هستند [۲]. بدلیل این شرایط کاری خاص خطرات بالقوه ای در کار با این مخازن وجود دارد که می تواند منجر به آسیب ها و سوانح بسیار شدید گردد. لذا در طراحی و ساخت این مخازن باید دقت ویژه ای اعمال گردد. برای کنترل صحت این موارد باید عملیات کنترل کیفی و بازرسی دقیقی در مراحل ساخت، برنامه ریزی و اجرا گردد.

محل نصب و کار NITROGEN BUFFER TANK 7 M3 FOR EMERGENCY DRIVE OF LADLE TURRET مخزن تحت فشار نیتروژن اضطراری برای حرکت LADLE TURRET در واقع تانکی است که در زیر LADLE TURRET قرار می گیرد و هدف از وجود این مخزن برای این است که در مواقع اضطراری که برق قطع

برق قطع می شود.

این مخزن به عنوان یک **ACCUMULATOR** عمل کرده و مانند انباره ای فنی نیتروژن تحت فشار ذخیره شده در مخزن را به سمت **LADLE TURRET** گسیل کرده و سبب چرخش آن می شود. این کار به شدت حائز اهمیت است چرا که مانع انجماد ذوب در پاتیل در هنگام قطعی برق خواهد شد. تخریب مخازن تحت فشار بدلیل پارامترهای مختلفی از جمله مشکلات مکانیکی، مسایل پروسسه و مشکل خوردگی صورت می گیرد. انجام تعمیرات این مخازن جهت بازگرداندن شرایط اولیه سیستم، برقراری ایمنی و طولانی تر کردن عمر مفید تجهیزات انجام می پذیرد [۳]. پروسسجی رویه تعمیرات مورد نیاز بایستی به دقت طراحی شده و تحت نظارت و کنترل سخت گیرانه بازرسی ذی صلاح صورت پذیرد. اگر تعمیرات درست و با دقت کافی انجام شود، می تواند از شکست زود هنگام جلوگیری کرده و باعث جلب رضایت مصرف کنندگان گردد.

### مواد و روش آزمایش

در این تحقیق از ورق **ASTMA516 Grade 70** ضخامت 16 میلیمتر استفاده شد. از آنالیز کوانتومتری جهت تعیین دقیق ترکیب شیمیایی ورق استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلز پایه در جدول (۱) ارائه شده است.

خواص مکانیکی این نوع فولاد را می توان با پرداختن به دو پارامتر تنش تسلیم و مقاومت کششی بررسی کرد. در اصل، مقاومت کششی با حداکثر استرس اندازه گیری می شود که فولاد در هنگام کشش یا کشیدن قبل از شکستن در برابر آن مقاومت می کند و تنش تسلیم حداکثر استرس است که می تواند قبل از شروع دائمی تغییر شکل اعمال شود که تقریبی از حد الاستیک فولاد است.

این نوع فولاد دارای خواص مکانیکی تنش تسلیم برابر با ۲۸۰ نیوتن بر میلیمتر مربع و مقاومت در برابر کشش ۶۲۰ نیوتن بر میلیمتر مربع می باشد.

این ماده در مقایسه با معادل کم کربن آن، دارای خاصیت عالی در شکل گیری سرد است. **ASTMA516 Grade 70** طبق دستورالعمل جوشکاری از الکتروده مخصوص **E7018** با قطر ۳٫۲۵ تا ۴ میلیمتر و با استاندارد **SFA-AWSA5.1** و همچنین از استاندارد **ASME SEC.II, Part C** و مشخصات ارائه شده از طرف سازنده استفاده شد [۵]. در تمامی موارد از سیم جوش های با قطر ۳٫۲۵ تا ۴ میلی متر جهت پاس ریشه و پاس های بعدی استفاده شد. به منظور ترکیب شیمیایی فلز پرکننده در جدول (۱) آورده شده است. انتخاب فلز پرکننده در این تحقیق علاوه بر ترکیب شیمیایی بر اساس پارامترهای دیگری مانند خواص مکانیکی حاصل، پایداری حرارتی، مقاومت به خوردگی، در دسترس بودن و هزینه ها انجام شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده مورد استفاده.

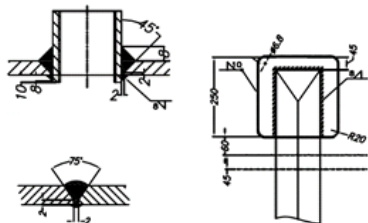
| فلز پایه           | C    | Cr  | Ni  | Mn   | Si   | Cu   | Fe   |
|--------------------|------|-----|-----|------|------|------|------|
| ASTM A516 Grade 70 | ۰/۱۵ | ۰/۳ | ۰/۵ | ۱/۱۸ | ۰/۳۵ | ۰/۱  | بقیه |
| فلز پرکننده        | C    | Cr  | Ni  | Mn   | Si   | Cu   | Fe   |
| E7018              | ۰/۱  | ۰/۲ | ۰/۳ | ۱/۶۴ | ۰/۲۵ | ۰/۱۵ | بقیه |

### آماده سازی نمونه ها و طرح اتصال

برای ایجاد اتصال بین فلزات پایه مونتاژ انجام شد. به منظور انجام عملیات جوشکاری ذوبی لازم بود تا در ابتدا ورق ها را از یک طرف مطابق با طرح مناسب اتصال آماده سازی نمود. بدین منظور برای اتصال لب به لب با شیار **V** شکل و جوش گوشه ای آماده سازی شدند. طرح اتصال مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است. صحت یخ سازی و عدم وجود ترک در نمونه های تهیه شده با آزمایش مایع نافذ مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام عملیات جوشکاری سطوح اکسید منطقه جوش و اطراف آن با سنگ دستی بر طرف شد. آلودگی ها و چربی های احتمالی موجود در سطح قطعات توسط برس سیمی و سیم جوش ها با پاک کننده حذف شد. جوشکاری با استفاده از دستگاه جوش به صورت دستی انجام شد. با توجه به جنس و ضخامت ماده دمای بین پاسی ۲۵۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد تا تنش های ناشی از انقباض و سرد شدن فلز جوش به حداقل مقدار ممکن برسد. در هر پاس مقادیر شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری اندازه گیری شد. حرارت ورودی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد [۲].

(1)

در این رابطه **I** شدت جریان، **V** ولتاژ و **S** سرعت جوشکاری است.  $\eta$  بازده قوس در این رابطه ۰/۹ در نظر گرفته شده است در این حالت حرارت ورودی (**H.I**) بر حسب ژول بر میلی متر بدست می آید [۶]. پارامترهای جوشکاری به گونه ای انتخاب شد که ضمن جلوگیری از حرارت ورودی اضافی به حوضچه مذاب، بهترین سیالیت و نفوذپذیری حاصل شود. جدول (۲) مشخصات جوشکاری نمونه ها را نشان می دهد. حرارت ورودی نقش مهمی را در تعیین ریز ساختار منطقه جوش ایفا می کند به طوری که با افزایش حرارت ورودی ممکن است باعث به وجود آمدن فازهای ترد و عیوبی مانند گرده جوش اضافی، بریدگی کناره و ذوب ناقص و نفوذ ناقص شود. با کنترل سرعت جوشکاری و آمپر از ایجاد این عیوب می توان جلوگیری نمود. در این جا با سرعت نسبتاً بالاتری از جوش های مشابه استفاده شد که علت آن کنترل دقیق رقت و دمای بین پاسی بود، در غیر این صورت احتمال ایجاد ترک های انجمادی در قطعات جوشکاری شده وجود داشت [۳].



شکل ۱- طرح اتصال مورد استفاده و مشخصات.

جدول ۲- مشخصات جوشکاری نمونه ها.

| شماره پاس | جریان (آمپر) | ولتاژ (ولت) | سرعت جوشکاری (mm <sup>-1</sup> ) | گرمای ورودی (kJmm <sup>-1</sup> ) | فلز پرکننده    |
|-----------|--------------|-------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------|
|           |              |             |                                  |                                   | با جریان DC-EP |
| ۱         | ۹۰           | ۲۲          | ۱/۳                              | ۰/۹۸۱                             | E7018          |
| ۲         | ۱۰۰          | ۲۲          | ۱/۰                              | ۰/۹                               |                |
| ۳         | ۱۲۰          | ۲۲          | ۱/۰                              | ۱/۸                               |                |

## نتایج و بحث

تعریف عدسی مخزن برای ساختن یک مخزن تحت فشار یا یک تانکر ذخیره سازی سوخت، به ساخت عدسی مخزن نیاز است. عدسی مخازن تحت فشار از اجزای اصلی مخازن هستند که طراحی آن بر اساس الزامات و استانداردهای طراحی مخازن انجام می شود. برای ساخت عدسی یک مخزن روش های مختلفی وجود دارد. روش ساختن عدسی با توجه به نوع عدسی و پارامترهای دیگری قابل انتخاب است [۴]. عدسی مخزن در شکل های مختلفی ساخته و تولید می شوند که برخی از آنها عبارتند از:

- عدسی نوع a: این نمونه از عدسی ها معمولاً در سرپوش پایینی برج ها قابل استفاده هستند.
- عدسی نوع b: این نوع عدسی ها به صورت قطعه میانی در عدسی های کروی استفاده می شوند.
- عدسی نوع c: این عدسی ها به عنوان سرپوش در مخازن اتمسفری استفاده می شوند.

## انواع عدسی مخزن

- **بشقابی:** عدسی بشقابی به عدسی می گویند که شعاع آن از قطر خارجی اش بزرگتر باشد. عدسی های بشقابی بیشتر در مخازن ذخیره استفاده می شوند. در این نوع از عدسی دو نوع شعاع داریم: شعاع اصلی و شعاع گوشه ای.

- **بشقابی مطابق با کد ASME:** با کاهش میزان تنش های موضعی در گوشه ها، می توان میزان تحمل فشار را برای عدسی های بشقابی افزایش داد.

- **نیم کروی:** در میان عدسی های فرم دار عدسی های نیم کروی جزء قوی ترین ها می باشند. هزینه های فرم دادن به این عدسی ها از مدل های دیگر بالاتر می باشد. عدسی های کروی به شکل وسیعی برای تولید مخازن تحت فشار سنگین استفاده می شوند.

- **فلنجی:** این مدل از عدسی ها تخت می باشد که تغییر تدریجی در لبه های آن باعث کم شدن تنش های موضعی آن می شود. این عدسی ها از نمونه های ارزان عدسی هستند که ساخت آن ها بسیار به صرفه و اقتصادی می باشد.

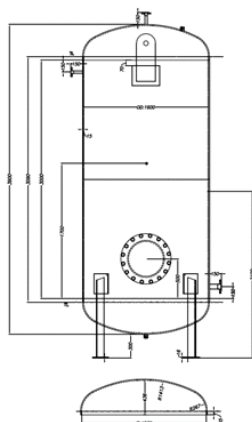
- **بیضوی مطابق با ASME, API:** این نوع از عدسی های مخزن در واقع به منظور ساخت عدسی هایی با فشار ۲۰۰ پوند مورد استفاده قرار می گیرند؛ و به دیگر عدسی ها برای این کار ترجیح داده می شوند.

- **مخروطی و شبه مخروطی:** خواص اصلی عدسی های مخروطی و شبه مخروطی تخلیه و انباشتن مواد جامد است. استفاده بیشتر در مخازن تحت فشار می باشد.

بعد از تعیین این موارد نیاز به تعیین استاندارد و تیپ عدسی است. پس از تکمیل این اطلاعات، با نرم افزار طراحی عدسی میزان گسترش و ضخامت نهایی محاسبه و مشخص می شود. پس از مشخص شدن ابعاد، گرد بری با دستگاه برش انجام می شود و در صورت نیاز به جوشکاری با دستگاه جوش زیرپودری و یا جوش آرگون و... جوشکاری می شود [۵]. سپس بعد از جوشکاری قطعه

جوش شده با تاییدیه آزمایش ها با تست های غیر مخرب به مرحله فرمینگ با دستگاه پرس عدسی مخزن ارسال می شود و با فرمینگ طبق نقشه ضخامت سنجی ارسال می شود و پس از تست و تاییدیه نهایی به انبار ارسال می شود. روش تهیه عدسی ها طبق فرمت پیشنهادی عبارت است از:

عدسی ها پس از عملیات طراحی با نرم افزار مکانیک طراحی می شود. سپس در دستگاه برش CNC عملیات برشکاری صورت می گیرد. بعد از عملیات برش کاری در صورت آلیاژ کربنی عدسی مخزن و تانکر با WPS معین جوشکاری می شود. پس از انجام جوشکاری عملیات شکل دهی سرد با قالب های مختلف فرم دهی انجام می شود و پس از شابلون گذاری و اتمام شکل دهی با دستگاه لبه زنی عملیات خم لبه عدسی انجام می شود. شکل (۲) شماتیک مخزن ذخیره تحت فشار را نشان می دهد. پس از اتمام شکل دهی سراسر سطح کار تست PT می شود و در صورت داشتن خط جوش تست رادیوگرافی نیز انجام می شود. و پس از تست ضخامت سنجی با دستگاه التراسونیک به خاطر کشش عدسی در نهایت تست ابعادی انجام می شود.



شکل ۲- شماتیک مخزن ذخیره تحت فشار



شکل ۳- عدسی مخزن تحت فشار مورد مطالعه در این تحقیق.

عملیات زیر سازی جوشکاری عموماً با پخ زنی آغاز می گردد، پخ زنی سه مدل دستی، اتومات و نیمه اتوماتیک دارد. برای ساخت تانکر تحت فشار باید از روش تمام اتوماتیک استفاده کرد. در این روش لبه ورق به میزان مشخصی بصورت شیب دار از داخل و بیرون و یا فقط از

بیرون برش می خورد تا برای آغاز جوشکاری آماده شود [۶]. در زمان رول کردن بدنه مخزن یا تانکر باید دقت داشت تا ضخامت ورق تهیه شده دچار کاهش ضخامت و یا ترک خوردگی نشود. زیرا بعد از کم شدن ضخامت و یا ایجاد ترک روی ورق پس از مونتاژ و در زمان تست مخزن تحت فشار دچار ترکیدگی خواهد شد. برای اینکه ضخامت ورق کم نشود می توان از نورد سرد یا نورد کاری عادی استفاده کرد. همچنین می توان از نورد گرم نیز استفاده کرد. برای ساخت عدسی تانکر تحت فشار می توان از سازندگان عدسی استاندارد کمک گرفت و یا عدسی را بصورت پرس و لبه زنی مونتاژ نمود. شکل ۳. عدسی مخزن تحت فشار مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می دهد.

در این موارد ورق دچار کاهش و افت ضخامت نخواهد شد. هر WPS دستورالعمل جوشکاری براساس نوع فرایندهای جوشکاری دارای اطلاعات مورد نیاز جهت انجام جوشکاری می باشد. این اطلاعات به جوشکار کمک می کند که پارامترهای مورد نیاز برای جوشکاری را تهیه و تنظیم کند و بازرس جوش نیز بر اساس اطلاعات مندرج در WPS اقدام به تأیید صلاحیت جوشکار برای انجام جوشکاری و نظارت بر روند عملیات جوشکاری می نماید. مشخصات سربزرگ فرم WPS در یک فرم WPS که مطابق با استاندارد تهیه شده است، گزارش کیفیت جوشکاری (Supporting PQR No) روش یا روش های مورد استفاده جهت جوشکاری (Welding Process) نحوه انجام فرایند جوشکاری به عنوان مثال دستی یا اتوماتیک یا نیمه اتوماتیک لازم است ذکر شود ذکر مطالبی چون نام شرکت، نام مشاور یا ناظر جوش، نام قطعه و کد پروژه و نظایر اینها در این قسمت WPS ذکر می شود. در جدول (۳) مشخصات دستورالعمل جوشکاری ارائه شده است. جهت بازرسی از عدسی و جداره مخزن از دو آزمون غیر مخرب یکی مایع نافذ جهت بررسی نفوذ جوش پستی و جوش ریشه استفاده شد و همچنین برای بررسی عدم وجود عیب های عدم نفوذ و عدم ذوب ناقص از آزمون فراصوتی با پراب زاویه ای ۷۰ درجه بهره برده شد که نتایج نشان داد با رعایت پارامترهای ذکر شده در تحقیق و همچنین حضور جوشکاران ماهر جوشی بی عیب و با کیفیت بالا حاصل خواهد شد.

جدول ۳- مندرجات فرم WPS.

|                                                             |
|-------------------------------------------------------------|
| استاندارد مورد استفاده                                      |
| نوع فرایند جوشکاری                                          |
| اطلاعات فلز پایه (جنس، ضخامت، قطر ...)                      |
| نوع فلز پرکننده (الکتروود)                                  |
| حالت یا وضعیت جوشکاری (تخت، افقی و ...)                     |
| میزان پیشگرم و دمای بین پاسی                                |
| عملیات حرارتی بعد از جوشکاری                                |
| کار... (Root Face, Gap, زاویه شیار،) طرح اتصال              |
| کاراکترهای الکتریکی (نوع جریان و قطبیت، میزان آمپراژ و ...) |
| تکنیک جوشکاری                                               |

تمامی جوش ها باید در وضعیت های تخت، افقی، عمودی و بالای سر تقسیم بندی شده و مطابق با حالتی که در سازه جوشکاری می شوند

نمونه تهیه شود. هدف از انجام آزمایش های تعیین کیفیت روش جوشکاری این است که نشان دهیم کیفیت مواد اولیه، روش و فلز جوش حاصله با آنچه در WPS خواسته شده یکسان است. اینکار توسط تهیه PQR طی مراحل زیر صورت می گیرد:

- آماده سازی و جوشکاری نمونه مناسب
- آزمایش نمونه های حاضر شده
- بازبینی نتایج و نتیجه گیری راجع به مراحل آماده سازی، جوشکاری و آزمایش های مخزن تحت فشار
- تأیید روش و مواد مورد استفاده در فرایند های جوشکاری

### نتیجه گیری

در این تحقیق از ورق ASTM A516 Grade 70 با ضخامت 16 میلیمتر برای ساخت مخزن تحت فشار نیتروژن اضطراری برای حرکت LADLE TURRET استفاده شد. برای ایجاد اتصال بین فلزات پایه مونتاژ انجام شد و به منظور انجام عملیات جوشکاری ذوبی لازم بود تا در ابتدا ورق ها را از یک طرف مطابق با طرح مناسب اتصال آماده سازی شود. بدین منظور برای اتصال لب به لب با شیار V شکل آماده سازی شدند.

در این رابطه I شدت جریان، V ولتاژ و S سرعت جوشکاری است.  $\eta$  بازده قوس در این رابطه حدود ۰/۹ در نظر گرفته شده است در این حالت حرارت ورودی (H.I) بر حسب ژول بر میلی متر بدست می آید پارامترهای جوشکاری به گونه ای انتخاب شد که ضمن جلوگیری از حرارت ورودی اضافی به حوضچه مذاب، بهترین سیالیت و نفوذپذیری حاصل شود. پارامترهای جوشکاری به گونه ای انتخاب شد که ضمن جلوگیری از حرارت ورودی اضافی به حوضچه مذاب، بهترین سیالیت و نفوذپذیری حاصل شود. و کاهش ضخامت عدسی در محدوده استاندارد بود.

جهت بازرسی از عدسی و جداره مخزن از دو آزمون غیر مخرب یکی مایع نافذ جهت بررسی نفوذ جوش پستی و جوش ریشه استفاده شد و همچنین برای بررسی عدم وجود عیب های عدم نفوذ و عدم ذوب ناقص از آزمون فراصوتی با پراب زاویه ای ۷۰ درجه بهره برده شد که نتایج نشان داد با رعایت پارامترهای ذکر شده در تحقیق و همچنین حضور جوشکاران ماهر جوشی بدون عیب و با کیفیت بالا حاصل خواهد شد.

### منابع

- 1-Maziasz, P.J., Swindeman, R.W., Shingledecker, J.P., Improving High-Temperature Performance of Austenitic Stainless Steels for Advanced Microturbine Recuparators, The Institute for Materials, Minerals and Mining, pp. 1057-1073, 2003.
- 2-Rajasekhar, K., Harendranath, C.S., Raman, R., Kulkarni, S.D., Microstructural evolution during solidification of austenitic stainless steel weld metals: A color metallographic and electron microprobe analysis study, Materials Characterization, 2, 38, pp. 53-65, 1997.
- 3[Sireesha, M., Shaju, K., Shankar, V., Sundaresan, S., A comparative evaluation of welding consumables for dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and Alloy 800, Journal of Nuclear Materials, 1, 279, pp. 65-76, 2000.



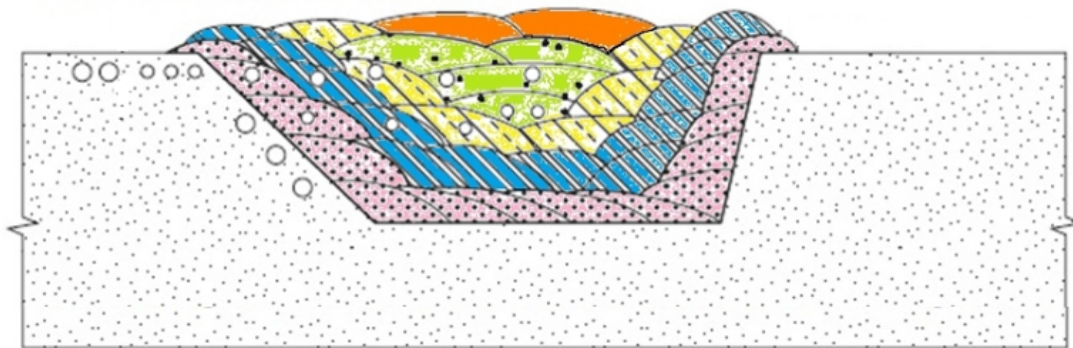
[illegible]

پی نوشت

- 1- دکتر، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران و شرکت مهندسی فولاد مبارکه
- 2- مدیر پروژه های فولاد چهار محال بختیاری شرکت مهندسی فولاد مبارکه
- 3- شرکت مهندسی فولاد مبارکه

-Hsuang Lo., Wen-Ta Tsai., Effect of heat treatment on the precipitation and pitting corrosion behavior of 347 SS weld overlay, *Materials Science and Engineering*,1, 335, pp.137-143, 2003.

- Betrabet, H. S., Clark, W. A. T., The Application of Analytical Electron Microscopy to Improving the Sensitization Resistance of Type 304 Stainless Steels, Cambridge Journals Online, pp.183-191, 2004. [6] Ikawa, H., Nakao, Y., Nishimoto, K., Study on The Knife Line Attack Phenomenon in Stabilized Austenitic



## انجام جوشکاری تعمیری به روش تمپر بید (TBW) بر روی فولاد ASTM A516 grade 70 و مقایسه خواص آن با جوشکاری تعمیری معمولی و عملیات حرارتی شده (PWHT)

یاسر رضائی<sup>۱</sup>، سهیل شاتوتی<sup>۲</sup>

### چکیده

فولاد ASTM A516 grade 70 از خانواده فولادهای ساده کربنی کم آلیاژ استحکام بالا است. فرایند جوشکاری انقباض منطقه دویی جوش و مقاومت فلز پایه در مقابل این انقباض، تنش کششی پسماند در قطعه ایجاد می کند. از این رو قطعات جوشکاری شده جهت حذف یا کاهش این تنش پسماند مورد عملیات حرارتی تنش زدایی (PWHT) قرار گیرند. نظر به اینکه در بررسی های انجام شده جوشکاری تعمیری به روش تمپر بید به هدف جوشکاری (welding) یا جوشکاری تعمیری (repair welding) و در فلزاتی غیر از فولاد A516 صورت گرفته است این پروژه قصد دارد جوشکاری تعمیری پلیت های از جنس فولاد ASTM A516 grade 70 به روش تمپر بید (TBW)، از طریق فرایند جوشکاری دستی با قوس الکتریکی (SMAW) و بر اساس WPS موجود را به صورت مرحله ای (repeat repair welding) تا چهار مرحله تکرار کند و نتایج حاصل از آن با روش های تعمیری معمولی و جوشکاری تعمیری تنش زدایی شده مقایسه، تغییرات خواص مکانیکی و ریزساختاری و خوردگی فولاد مزبور را مورد بررسی قرار دهد و روش مناسب تعمیری را تعیین نماید.

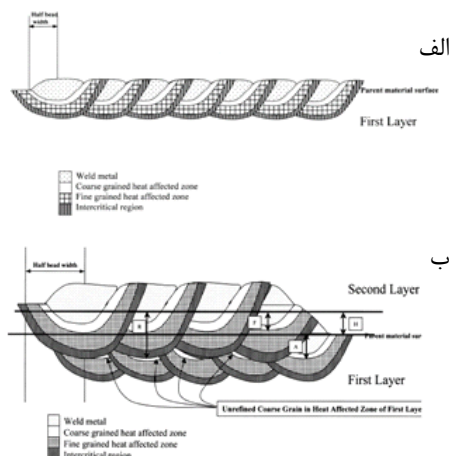
**کلمات کلیدی:** فولاد ASTM A516 grade 70، خواص مکانیکی، عملیات حرارتی تنش زدایی (PWHT)، جوشکاری تعمیری (repair welding)، روش تمپر بید (TBW).

### شرح سیستم صنعتی

فولاد ASTM A516 grade 70 از خانواده فولادهای ساده کربنی کم آلیاژ استحکام بالا است. در حال حاضر ورق فولادی A516 کاربرد بسیار زیادی در ساخت بدنه مخزن و لوله های تحت فشار و بویلرهای جوشکاری شده دارد که در صنایع نفت و گاز و پالایشگاه ها استفاده می شوند. علت آن دارا بودن همزمان استحکام و قابلیت انعطاف مطلوب، جوش پذیری مناسب، قابلیت جذب انرژی ضربه در دمای پایین است [۱].

فرایند جوشکاری انقباض منطقه دویی جوش و مقاومت فلز پایه در مقابل این انقباض، تنش کششی پسماند در قطعه ایجاد می کند. بر این اساس توصیه می شود قطعات جوشکاری شده جهت حذف یا

کاهش این تنش پسماند، افزایش خواص مکانیکی جوش و منطقه متأثر از حرارت (HAZ) مورد عملیات حرارتی تنش زدایی قرار گیرند [۲]. تنش باقی مانده معمولاً از ناتوانی ماده در برگشتن به حالت بدون تنش، بعد از تجربه کردن یک سیکل عملیات حرارتی شدید مثل جوشکاری بوجود می آید. حضور تنش پسماند و ماهیت فشاری یا کششی بودن آن، رفتار اتصال جوش حین سرویس را تحت تاثیر قرار می دهد. تنش های پسماند در موقعیت های یکسان (به طور معمول تنش فشاری) ممکن است کارایی را بالا ببرد. به عنوان مثال تنش فشاری می تواند مقاومت به ترک خوردگی تنش را بهبود بخشد. اما در بیشتر موقعیت ها، تنش پسماند کششی بوده و با اثرات منفی و زیان آوری مثل افزایش حساسیت به شکست و کاهش عمر



شکل ۱- شماتیک جوشکاری به روش تمپرید. الف- لایه اول، ب- لایه دوم

رضائی و همکاران تاثیر جوشکاری تعمیری بر تغییر ریزساختار، سختی و چقرمگی فولاد **ASTMA516 grade70** را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که سختی و چقرمگی تابعی از دفعات تعمیر است [۱۲]. رایبسنسون و همکاران در پژوهشی روش های جوشکاری تعمیری برای فولادهای کم آلیاژ فریتی که گسترش پیدا کرده اند را مورد بررسی قرار می دهد و چند روش تعمیری را تشریح و مقایسه می کند [۹]. ابراهیم و همکاران به بررسی و مقایسه دو روش لایه گذاری در جوشکاری تعمیری تمپرید و تاثیر آن بر سختی، ریزساختار و اندازه منطقه متاثر از حرارت (HAZ) پرداختند [۸]. جوشی و همکاران به بررسی تاثیر جوشکاری **TBW** و عملیات حرارتی بعد از جوشکاری (PWHT) بر خواص مکانیکی جوشکاری چند لایه بروی نمونه های فولاد کم کربن **ASTMA105** با استفاده از آزمون های ضربه و آزمون کشش پرداخته است و نتایج آن ها نشان دهنده تنش تسلیم و کششی بهتر نمونه های **TBW** نسبت به روش **PWHT** است [۱۰].

#### طرح مسئله و موضوع پژوهش

قطعات و دستگاه های که در دما یا فشار بالا در نیروگاه ها، پتروشیمی و پالایشگاه های نفت و گاز و... کار می کنند در معرض مکانیزم های مخرب بی شماری هستند. به تناسبی که این سیستم ها عمر می کنند، اجزا ممکن است از کار افتاده شوند یا برای سرویس های بیشتر براساس بررسی عمر باقی مانده قطعه، شایستگی و کارایی خوبی نشان ندهند. تصمیم بر تعمیر یا تعویض این اجزا به سمت جوشکاری تعمیری یا جوشکاری قطعه سالم به این اجزا از کار افتاده سوق می دهد. جوشکاری تعمیری و جوشکاری قطعه سالم به قطعه از کار افتاده، با تمام پیچیدگی ها در دسترسی، عملیات پس گرم و پیش گرم و بازرسی، باید در همان مکان انجام شود. همچنین وقتی که یک عیب در جوش به وسیله بعضی از تست های غیرمخرب مکان یابی و مشخص می شود، جوش باید تعمیر شود، که معمولاً از طریق سنگ زنی و حذف فلز جوش و جوشکاری مجدد (**Re-weld**) تعمیر صورت می گیرد.

خستگی در سازه های صنعتی همراه هستند [۲،۴].

عملیات حرارتی پس از جوشکاری (**PWHT**) یک تکنیک رایج مورد استفاده برای آزاد سازی تنش پسماند بعد از جوشکاری است، که در کنار هدف اولیه کاهش اثر تنش های ناشی از جوشکاری، همچنین قصد تمپر کردن ساختار متالورژی منطقه متاثر از حرارت (HAZ) را نیز دارد. انجام فرایند **PWHT** برای قطعات بزرگ در حین سرویس تا حدودی امکان پذیر نیست؛ چراکه این قطعات تحت بار مکانیکی هستند و تغییر شکل می دهند، همچنین عملیات حرارتی فرایندی زمان بر است و با صرف هزینه نیز همراه خواهد بود [۴-۷].

چند کد و دستور العمل متنوع و ویژه نیاز است که ساختار جوش قطعاتی مثل لوله های تحت فشار و مبدل های حرارتی مورد عملیات حرارتی پس از جوشکاری قرار گیرند. زمان عملیات حرارتی به نوع و ضخامت اتصال جوش بستگی دارد. دمای پیشنهاد شده برای **PWHT** بین  $580-620^{\circ}\text{C}$  برای فولادهای کم کربن و تا  $760^{\circ}\text{C}$  برای فولادهای کم آلیاژی افزایش می یابد. از طرف دیگر **PWHT** همیشه بروی خواص متریال از جمله تافنس یا چقرمگی شکست ماده جوش خورده اثر مثبت ندارد. در عملیات تنش زدایی امکان جدایش فسفر در مرز دانه فلز جوش و همچنین ایجاد رسوب سختی با عناصر نیوبیوم، وانادیم و کاربیدهای دیگر را افزایش دهد [۸].

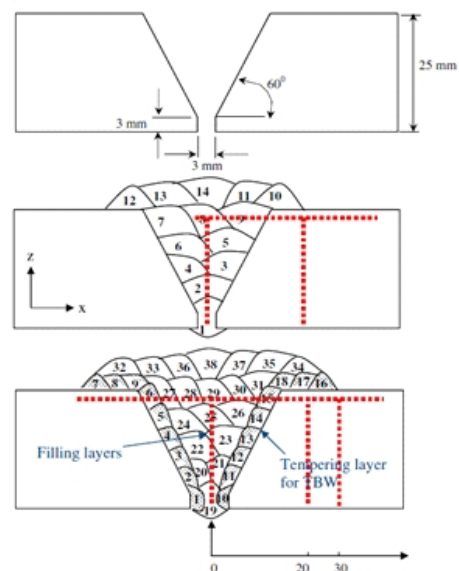
به منظور حذف عملیات حرارتی پس از جوشکاری (**PWHT**) روش های مختلفی گسترش پیدا کرده است. روش تمپر کردن مهره های متوالی در حین جوشکاری (**TBW**) بوسیله کنترل کردن نرخ گرمای ورودی بین دو لایه یا پاس جوشکاری باعث تمپر کردن منطقه متاثر از حرارت (HAZ) لایه قبلی می شود. این روش به این گونه است که لایه اول بروی فلز پایه با الکتروود به قطر  $2/5\text{ mm}$  رسوب داده می شود. انتخاب الکتروود با قطر کم سبب ایجاد یک منطقه متاثر از حرارت باریک می شود.

روی هم افتادگی  $40\%$  تا  $60\%$  بین پاس ها نیاز است. در هر لایه، جوشکاری به نحوی انجام می شود که، سطح بالایی و پایینی به صورت هموار و صافی باشد. سپس لایه دوم با الکتروود قطر بزرگتر  $3/25\text{ mm}$  تا  $4\text{ mm}$  جوش داده می شود. استفاده از الکتروود با قطر بزرگتر در جوشکاری لایه دوم و ایجاد حرارت ورود بیشتر، اصلاح اندازه دانه های درشت باقی مانده در فلز پایه را تضمین می کند، که در جوشکاری لایه اول هنوز به طور کامل اصلاح نیافته بودند. آخرین لایه خود تمپر نمی شود چرا که دیگر لایه ای روی آن قرار نمی گیرد. پس از انجام عملیات این لایه با سنگ زنی برداشته می شود (شکل ۱) [۸-۱۱].

در این روش گرمای یک پاس از حوضچه جوشکاری برای تمپر کردن ساختار متالورژیکی مهره های قبلی استفاده شود، بدین ترتیب جوش های لایه زیرین به خودی خود یک ساختار متالورژیکی بدست می آورد که بعد از **PWHT** بدست می آید. این امر در برگیرنده کنترل استحاله های متالورژیکی با بهسازی روش جوشکاری، از قبیل استفاده از اندازه های مختلف الکتروود است. مقدار خسارت و عمق متریالی که به تمپر نیاز دارند با استفاده از مهره های جوش کوچک کاهش می یابد؛ که به وسیله الکتروود با قطر کمتر و کنترل امپراژ و حرارت ورودی مناسب این امر محقق می شود [۸، ۱۱].

## مراحل کار و انتظارات از پژوهش پیشنهادی

بعد از تحقیقات و مطالعه، پلیت هایی از فولاد **A516 grade 70** تهیه و ریزساختار آن با میکروسکوپ نوری بررسی می گردد. جوشکاری نمونه ها با استفاده از روش تمپر بید (TBW) به وسیله جوشکاری قوسی با الکترود پوشش دار (SMAW)، بر اساس WPS های موجود و پارامتری های مشخص شده در استاندارد ASME انجام گرفته و چهار مرحله تکرار می شود (شکل ۲-ج). همچنین چند نمونه با روش معمولی جوشکاری مورد تعمیر قرار می گیرد، این نمونه ها جوشکاری شده جهت حذف تنش باقی مانده جوش مورد عملیات حرارتی قرار می گیرند (شکل ۲-ب). از هر پلیت جوشکاری شده نمونه های متالوگرافی، کشش، خمش و ضربه تهیه می گردد. ریزساختار فلز پایه، جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت (HAZ) با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی SEM و همچنین تعیین فاز و آنالیز تصویری با SEM/EDS و XRD مورد بررسی قرار خواهد گرفت، جهت تعیین خواص مکانیکی جوش، فلز پایه و منطقه متاثر از حرارت (HAZ). آزمون سختی سنجی، کشش، خمش و ضربه انجام می شود. جهت تعیین مقاومت به خوردگی، مناطق مختلف جوش در محیط خورنده با استفاده از آزمون های الکتروشیمیایی مورد ارزیابی قرار گیرد. اطلاعات و نتایج بدست آمده با استانداردهای مربوطه مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. این پژوهش قصد دارد به بررسی تاثیر جوشکاری تعمیری به روش تمپر بید (TBW) بر تحولات ریزساختار خواص مکانیکی و خوردگی فولاد **ASTM A516 grade 70** بپردازد. یافته های پژوهش حاکی از تعیین میزان تاثیر جوشکاری تعمیری به روش (TBW) نسبت به روش جوشکاری تعمیری رایج فولاد **ASTM A516 grade 70** و همچنین امکان حذف عملیات حرارتی بعد از جوشکاری خواهد بود.



شکل ۲- شماتیک مراحل جوشکاری. الف- آماده سازی پلیت اولیه، ب- جوشکاری تعمیری معمولی، ج- جوشکاری تعمیری به روش تمپر بید

## منابع

- 1- گزارش فنی، "بررسی تاثیر جوشکاری تعمیری بر تحولات ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد **ASTMA516 grade 70**". 1399، رضائی، یاسر، بختیاری، رضا، پالایشگاه گاز ایلام.
- 2-Zhang, C., Yang, S., and Gong, B., 2017. "Effects of post weld heat treatment (PWHT) on mechanical properties of C-Mn weld metal: Experimental observation and microstructure-based simulation". *Materials Science and Engineering, A(712)*, December, pp. 430-439.
- 3-Aloraier, A., Mazeouee, A., Price, J., 2010. "Weld repair practices without post weld heat treatment for ferritic alloys and their consequences on residual stresses: A review". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 87(4), January, pp.127-133.
- 4-Sharma, S., Maheshwari, S., 2016. "A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 1(38), December, 203-217.
- 5-Lucio, M., Gonzalez, J., Casales, M., 2009. "Effect of heat treatment on H2S corrosion of a micro-alloyed c-Mn steel". *Corrosion Science*, 51(10), June, pp. 2380-2386.
- 6-Vega, O., Hallen, J., Villagomez, A., 2008. "Effect of multiple repairs in girth welds of pipeline on the mechanical properties". *Materials Characterization*, 59(10), January, pp. 1498-1507.
- 7-AghaAli, A., Farzam, M., Golozar, M., 2013. "The effect of repeated repair welding on mechanical and corrosion properties of stainless steel 316L". *Materials and Design*, 1(54), August, pp. 331-341.
- 8-Aloraier, A., Ibrahim, R., Ghojel, J., 2004. "Elimination post-weld heat treatment in repair welding by temper bead technique: role bead sequence in metallurgical changes". *Journal of Materials Processing Technology*, 10(153), November, pp. 392-400.
- 9-Lant, T., Robinson, D., Spafford, B., 2001. "Review of weld repair procedures for low alloy steels designed minimize the risk of future cracking". *International journal of Pressure Vessels Piping*, 78 (11-12), November, pp. 813-818.
- 10-Aloraier, S., Joshi, S., Price, J., 2013. "Material properties characterization of low carbon steel using TBW and PWHT techniques in smooth-contoured and U-shaped geometries". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1(111), November, pp. 269-278.
- 11-The American Society of Mechanical Engineers(ASME). 2019. Boiler and pressure Vessel Code, Section IX.
- 12- بختیاری، رضا، رضائی، یاسر، ۱۳۹۹، "تاثیر جوشکاری تعمیری بر تغییر ریزساختار، سختی و چقرمگی فولاد **ASTMA516 grade 70**" نهمین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی مهندسی مواد و متالورژی ایران و چهاردهمین همایش ملی مشترک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن ریخته گری ایران.

## پی نوشت

- 1- کرمانشاه ایران، دانشگاه رازی کرمانشاه
- 2- اصفهان ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان





## جوشکاری همزن اصطکاکی چند پاسه غیر مشابه آلیاژهای پایه آلومینیوم

محسن کوهگرد دهمیانی<sup>۱</sup>، محمد حسن دانشی فر<sup>۲</sup>، محمد امین جبار<sup>۳</sup>

### چکیده

در پژوهش حاضر اثر پاس دوم جوشکاری همزن اصطکاکی بر ساختار و خواص مکانیکی جوش‌های غیر مشابه آلیاژهای پایه آلومینیوم مطالعه شد. برای این منظور از دو آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیم و آلومینیوم - منیزیم به عنوان فلز پایه استفاده گردید. ریزساختار فلز پایه‌ها و منطقه همزده نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مطالعه شد. خواص مکانیکی جوش‌ها و فلز پایه‌ها با آزمون کشش بررسی و مقایسه گردید. بر اساس نتایج مشخص شد که اعمال پاس دوم منجر به تغییر اختلاط فلز پایه‌ها از اختلاط مکانیکی به اختلاط شیمیایی گردیده و در نتیجه مکانیزم اتصال از قفل مکانیکی به پیوند متالورژیکی تغییر یافته است. در نتیجه این تغییر در مکانیزم اختلاط، خواص کششی نمونه‌های جوش دوپاسه نسبت به تک پاسه بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته به طوریکه تنش شکست آن از  $60/6 \pm 113/7$  مگاپاسکال (۸۸٪ درصد) و کرنش شکست آن از ۲ به ۴ درصد (۱۰۰٪ درصد) افزایش یافته است. بر اساس این نتایج، اعمال پاس دوم اثرات مثبت چشم‌گیری بر ساختار و خواص مکانیکی و در نتیجه کیفیت اتصال دارد.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری همزن اصطکاکی، جوشکاری غیر مشابه، جوشکاری چند پاسه، آلیاژهای آلومینیوم، ریزساختار.

### مقدمه

آلومینیوم پس از اکسیژن و سیلیسیم فراوان‌ترین عنصر در سطح زمین و پس از آهن پرمصرف‌ترین عنصر در صنایع مختلف می‌باشد. خواص منحصر به فرد آلومینیوم و آلیاژهای آن شامل وزن مخصوص پایین، نسبت استحکام به وزن بالا، هدایت الکتریکی و حرارتی زیاد و شکل‌پذیری خوب سبب شده تا از آن در صنایع گوناگون و برای ساخت انواع قطعات استفاده گردد [۱]. عناصر آلیاژی اصلی در آلومینیوم شامل مس، منیزیم، سیلیسیم، روی و منگنز است. در این بین، سیلیسیم پرکاربردترین عنصر آلیاژی در آلیاژهای ریختگی آلومینیوم است. عنصر منیزیم نیز یکی از عناصر آلیاژی اصلی است که هم در آلیاژهای ریختگی و هم در آلیاژهای کارشده استفاده می‌شود. آلیاژهای آلومینیوم - منیزیم نسبت به آلیاژهای آلومینیوم -

سیلیسیم قابلیت ریخته‌گری ضعیف‌تری دارند، پس جوشکاری آن‌ها به روش ذوب دشوار است. جوشکاری همزن اصطکاکی یک فرایند نوین جوشکاری حالت جامد است که توسط موسسه جوشکاری بریتانیا (TWI) در سال ۱۹۹۱ ابداع گردید [۲]. این روش در ابتدا برای جوشکاری فلزات سبک ابداع شد اما امروزه برای انواع مواد مهندسی فلزی شامل آلومینیوم [۳]، مس [۴]، منیزیم [۵]، فولاد [۶]، تیتانیوم [۷]، نیکل [۸]، همچنین مواد پلیمری [۹] و کامپوزیتی [۱۰] استفاده می‌شود. علت استفاده روز افزون از این روش، پایین بودن مصرف انرژی، عدم تولید آلودگی، عدم نیاز به گاز محافظ و چندکاربرد بودن آن است [۱۱]. در این روش جوشکاری، یک ابزار چرخان غیر مصرفی وارد قطعه کار شده و با حرکت در مسیر درز اتصال فرایند اتصال‌دهی انجام می‌شود. منشاء حرارت در این

روش اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک شدید فلز پایه است. با ورود ابزار چرخان به درون قطعه کار به خاطر اصطکاک و تغییر شکل شدید فلز پایه، دما افزایش یافته و فلز پایه در مجاورت ابزار نرم و خمیری می‌شود. این مواد خمیری در اثر حرکت چرخشی و انتقالی ابزار در اطراف آن سیلان یافته و اختلاط دو فلز پایه رخ می‌دهد. پس در این روش اتصال دهی در زیر دمای ذوب و در حالت جامد رخ می‌دهد. یکی از کاربردهای اصلی FSW، جوشکاری غیر مشابه می‌باشد. با توجه به عدم ذوب شدن در این روش، بسیاری از مشکلات روش‌های ذوبی در اتصال دهی قطعات غیر مشابه، وجود نداشته و اتصال دهی با کیفیت بالاتری انجام می‌گیرد. در نتیجه از FSW به طور گسترده‌ای برای جوشکاری غیر مشابه انواع آلیاژهای فلزی شامل آلومینیوم - آلومینیوم [۱۲]، آلومینیوم - مس [۱۳]، آلومینیوم - منیزیم [۱۴] و آلومینیوم - فولاد [۱۵] استفاده شده است. یکی از مشکلات اصلی در جوشکاری غیر مشابه (در همه انواع جوشکاری) عدم امتزاج فلز پایه‌ها با یکدیگر و شکل‌گیری ترکیب‌های بین فلزی ترد و شکننده می‌باشد که در روش FSW نیز به عنوان یکی از مشکلات اصلی جوشکاری مطرح می‌باشد [۱۶]. اغلب جوش‌های تولید شده با این روش به صورت تک پایه هستند و گزارش‌های محدودی در مورد جوشکاری چند پایه به روش FSW گزارش شده است [۱۷-۲۱]. به ویژه گزارش‌های محدودتری در مورد FSW چند پایه غیر مشابه موجود است [۲۲، ۲۳].

بر اساس مطالب بالا، مشخص است که علی‌رغم تحقیقات گسترده در زمینه جوشکاری همزن اصطکاکی فلزات مشابه و غیر مشابه تحقیقات محدودی روی جوشکاری چند پایه غیر مشابه انجام گرفته است [۲۲، ۲۳] و شناختن ابعاد مختلف موضوع نیاز به مطالعات گسترده‌تر و عمیق‌تری دارد. پس هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثر پاس دوم بر ساختار و خواص مکانیکی جوش‌های غیر مشابه آلیاژهای پایه آلومینیوم است. برای این منظور از دو آلیاژ پایه آلومینیوم شامل آلومینیوم - منیزیم و آلومینیوم - سیلیسیم ریختگی استفاده شد. با توجه به حلالیت محدود سیلیسیم در زمینه آلومینیوم، می‌توان از ذرات سیلیسیم به عنوان ردیاب برای مطالعه کیفیت سیلان فلز جوش استفاده نمود.

## مواد و روش پژوهش

### مواد اولیه

در پژوهش حاضر اثر پاس دوم بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های غیر مشابه دو آلیاژ آلومینیوم - منیزیم و آلومینیوم - سیلیسیم به یکدیگر به روش FSW بررسی گردید. برای این منظور آلیاژهای مورد نظر به شکل ورق‌های با ابعاد تقریبی (طول × عرض × ضخامت)  $200 \times 100 \times 1.0$  میلی‌متر در یک قالب فلزی Y شکل ریخته‌گری شد. آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیم مورد استفاده، آلیاژ نزدیک یوتکتیک (با ترکیب ۵/۱۲ درصد سیلیسیم و ۲/۰ درصد منیزیم) و آلیاژ آلومینیوم - منیزیم حاوی ۱۰ درصد منیزیم است که هر دو کارگاه تولید شدند. این ورق‌ها سپس برش خورده و به ابعاد (طول × عرض × ضخامت)  $400 \times 100 \times 1.0$  میلی‌متر رسیدند. لبه‌های جوشکاری شونده با دستگاه فرز،

ماشین‌کاری شده تا کاملاً صاف و گونیا شوند.

### - جوشکاری

از فولاد ابزار گرم‌کار DIN 1.2344 (H13) برای ساخت ابزار جوشکاری استفاده شد. ابزار شامل یک پین مخروط ناقص با قطرهای کوچک و بزرگ به ترتیب ۴ و ۶ میلی‌متر و ارتفاع ۴ میلی‌متر و شانه استوانه‌ای به قطر ۱۶ میلی‌متر بود. سطح شانه به صورت مقعر با زاویه ۵ درجه تراشکاری گردید. برای جوشکاری از یک دستگاه فرز مدل FP4M ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز استفاده شد. برای جوشکاری، ورق‌ها با استفاده از روبند روی یک ورق فولادی (به عنوان ورق پشت‌بند) روی میز دستگاه بسته شده و موقعیت ابزار روی درز اتصال تنظیم گردید و دو جوش یک و دو پایه روی نمونه‌ها انجام شد. سایر پارامترها عبارتند از سرعت چرخش ابزار ۱۲۵۰ دور در دقیقه، سرعت پیش‌روی ابزار ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، زاویه کج شدن ابزار ۲ درجه، عمق فروروی ابزار ۴/۲ میلی‌متر و مقدار انحراف از مرکز صفر که برای کلیه جوش‌ها ثابت در نظر گرفته شد. در تمام پاس‌های جوشکاری، آلیاژ آلومینیوم - منیزیم در لبه پیش‌رو ابزار و آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیم در لبه پس‌رو قرار گرفت. در نمونه‌های دو پایه، در هر دو پاس جوشکاری در یک جهت انجام شد.

### - مطالعه ریزساختار

ریز ساختار نمونه‌ها از مقطع عرضی جوش بررسی شد. برای این منظور از همه جوش‌ها از یک محل یکسان نمونه عرضی بریده شد و به وسیله روش‌های رایج آماده‌سازی نمونه متالوگرافی، برای بررسی با میکروسکوپ نوری و الکترونی آماده گردید. برای بررسی ریز ساختار، نمونه‌ها در محلول حک‌کاری کالر (با ترکیب ۹۵ میلی‌لیتر آب دیونیزه، ۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک، یک میلی‌لیتر اسید هیدروفلوریک و ۱/۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک) به مدت ۱۵ ثانیه حک شد. بررسی ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری GX51 ساخت شرکت Olympus انجام گرفت. برای بررسی دقیق‌تر وضعیت فازها و ترکیب منطقه جوش، نمونه‌های متالوگرافی به وسیله میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی Sigma 300-HV ساخت شرکت Zeiss مجهز به آشکارساز EDS اکسفورد مطالعه گردید.

### - مطالعه خواص مکانیکی

خواص کششی نمونه‌های جوشکاری شده، با استفاده از نمونه‌های تخت، مطابق با استاندارد ASTM E8 بررسی گردید. آزمون کشش در دمای محیط و با سرعت کشش یک میلی‌متر بر دقیقه به وسیله دستگاه مدل Z250 ساخت شرکت Zwick/Roell انجام گرفت. نمونه آزمون کشش در جهت عمود بر جهت جوشکاری، با استفاده از وایرکات تهیه شد.

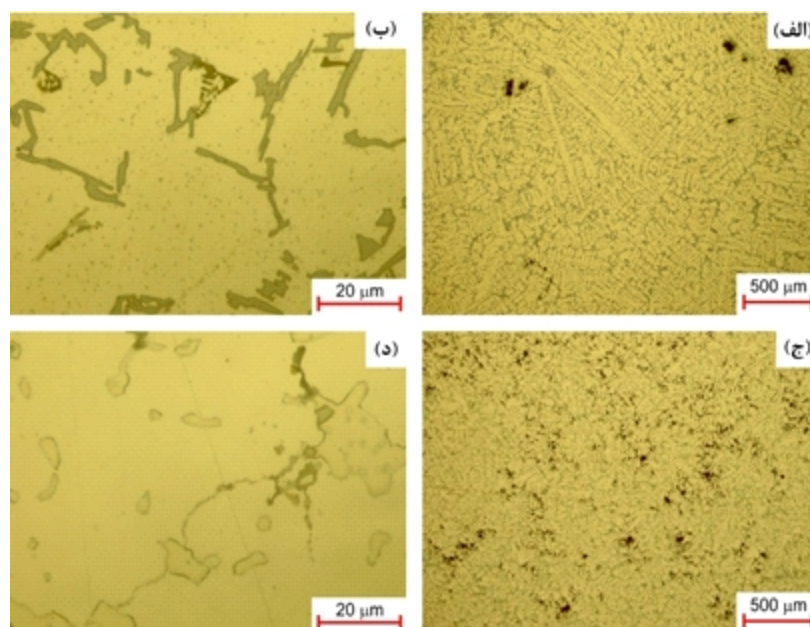
### نتایج و بحث

ساختار فلز پایه‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر در شکل (۱) در بزرگ‌نمایی‌های مختلف آمده است. مطابق این شکل می‌توان دید که ساختار آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیم ساختار رایج ریختگی این آلیاژها

شامل زمینه فاز آلفا آلومینیوم اولیه که تیغه‌های درشت و اصلاح نشده سیلیسیم درون آن به طور اتفاقی توزیع شده‌اند، می‌باشد. طبق شکل (۱-الف) که در بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر است و کلیت ساختار را نشان می‌دهد، به غیر از ساختار دندریتی حفره‌های بزرگی نیز در ساختار مشاهده می‌شود که در حین ریخته‌گری و انجماد ورق شکل گرفته‌اند. بر اساس شکل (۱-ب) فازهای استخوان ماهی که در اثر حضور ناخالصی‌هایی نظیر آهن شکل می‌گیرد، نیز در ساختار دیده می‌شود. ساختار آلیاژ آلومینیوم - منیزیم، بر اساس شکل (۱-ج) و (۱-د)، نشان‌دهنده ساختار ریختگی دندریتی دو فازی شامل زمینه آلومینیوم - منیزیم و فاز ثانویه بین دندریتی است. در این آلیاژ نیز به غیر از دو فاز اصلی که بخش عمده ریزساختار را تشکیل می‌دهند، فازهای تیره رنگی در ساختار مشاهده می‌شود که در اثر وجود ناخالصی‌ها در ساختار شکل گرفته‌اند. البته کسر حجمی این فازهای متاثر از ناخالصی‌ها در هر دو آلیاژ ناچیز است. مطابق شکل (۱-ج) ساختار آلیاژ آلومینیوم - منیزیم نیز حاوی حفره‌های ریختگی است که توزیع آنها در ورق ریختگی بسیار غیر یکنواخت است. مقدار حفره‌ها در آلیاژ آلومینیوم - منیزیم بیشتر از آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیم است که به طور عمده به قابلیت ریختگی ضعیف‌تر این آلیاژها نسبت به آلیاژهای آلومینیوم - سیلیسیم مربوط است. این آلیاژها دامنه انجماد طولانی‌تری دارند که به انجماد خمیری منجر شده و در نتیجه بیشتر به شکل‌گیری حفره‌ها، به ویژه حفره‌های انقباضی، حساس هستند.

تصاویر میکروسکوپ نوری از ساختار مرکز منطقه همزده در شکل (۲) و شکل (۳) دیده می‌شود. مطابق این شکل‌ها، سه ناحیه در ساختار دیده می‌شود که شامل ناحیه اول به رنگ روشن و تقریباً عاری از فاز ثانویه، ناحیه دوم به رنگ روشن و حاوی فازهای ثانویه و

ناحیه سوم به رنگ تیره است. بر اساس شکل (۲-الف)، در نمونه یک پاسبه، قسمت عمده ساختار از نواحی اول و دوم تشکیل شده و ناحیه سوم به طور بسیار محدودی در ساختار دیده می‌شود. در نمونه دو پاسبه اما بر اساس شکل (۳-الف) مقدار ناحیه سوم به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و مقدار ناحیه اولیه کاهش چشم‌گیری داشته است. بر اساس ساختار نمونه دو پاسبه می‌توان دید که در ناحیه سوم، به غیر از فازهای ثانویه درشت که به طور عمده ذرات سیلیسمی هستند، فازهای ثانویه بسیار ریزی نیز دیده می‌شوند. همچنین ناحیه اول که تقریباً عاری از رسوب است، ساختاری تک‌فاز با دانه‌بندی بسیار ریز (متوسط اندازه دانه کمتر از ۱۰ میکرون) دارد. نتایج آزمون‌های تعیین نقشه شیمیایی از دکه جوش نمونه یک پاسبه در بزرگ‌نمایی‌های مختلف در شکل (۴) آمده است. هدف از بزرگ‌نمایی‌های مختلف بررسی مقدار اختلاط دو فلز پایه در ابعاد مختلف است. در شکل (۴-الف)، نتیجه تعیین نقشه ترکیب شیمیایی در بزرگ‌نمایی بسیار پایین آمده است. نتایج نقشه شیمیایی، تصویر بسیار واضح‌تری از میزان اختلاط در مقایسه با تصاویر نوری یا SEM نشان می‌دهد. بر اساس تصویر مربوط به توزیع منیزیم دیده می‌شود که اختلاطی بین دو فلز پایه رخ نداده و دو فلز پایه با فصل مشترک مشخصی از هم جدا هستند. در منطقه روشن دیده می‌شود که مقدار منیزیم در منطقه همزده بسیار رقیق بوده و مشابه فلز پایه آلومینیوم سیلیسیم توزیع شده است. منیزیم موجود در فلز پایه آلومینیوم - سیلیسیم از ابتدا در این فلز پایه وجود داشته و در اثر جوشکاری، منیزیمی از فلز پایه آلومینیوم - منیزیم به آلومینیوم - سیلیسیم منتقل نشده است. در این منطقه سیلیسیم توزیع یکنواختی دارد. در منطقه تیره اما منیزیم توزیع یکنواختی مشابه فلز پایه آلومینیوم - منیزیم دارد و این منطقه تقریباً خالی از سیلیسیم است.



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ نوری ساختار فلزهای پایه در بزرگ‌نمایی‌های مختلف.



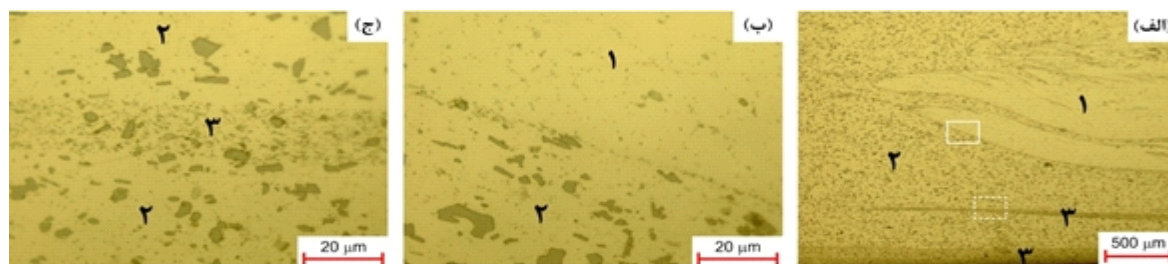
SEM نیز مشابه تصاویر نوری، ۳ ناحیه وجود دارد که در شکل (5-ب) نام گذاری شده اند. برای روشن شدن ماهیت هر یک از نواحی از آزمون های EDS در SEM استفاده شده که در ادامه ارایه می شود.

برای اندازه گیری کمی غلظت عناصر در منطقه همزده در نمونه دوپاسه، از آزمون EDS مطابق شکل (۶) استفاده گردید. برای تعیین ترکیب شیمیایی میانگین نواحی مختلف منطقه همزده، از آزمون EDS منطقه ای مطابق شکل (۶-الف) استفاده شد. برای اندازه گیری ترکیب شیمیایی فازها، از آزمون EDS نقطه ای، مطابق شکل (۶-ب) استفاده گردید. نتایج این آزمون های EDS در جدول (۱) دیده می شود. بر اساس نتایج آزمون منطقه ای مشخص می شود که طیف ۱ (مربوط به ناحیه دوم)، ترکیبی بسیار نزدیک به فلز پایه آلومینیوم - سیلیسیم، طیف ۲ (مربوط به ناحیه اول)، ترکیبی مشابه فلز پایه آلومینیوم - منیزیم و طیف ۳ (مربوط به ناحیه سوم) ترکیبی بین دو فلز پایه دارد. آزمون های EDS نقطه ای، طیف های ۴ تا ۷، به ترتیب از زمینه ناحیه دوم، زمینه ناحیه اول، زمینه ناحیه سوم و فاز ثانویه سیاه رنگ در ناحیه سوم انجام گرفته است. بر اساس نتایج این آزمون ها مشخص است که طیف ۴ ترکیبی شبیه زمینه فلز پایه آلومینیوم - سیلیسیم، طیف ۵ ترکیبی ترکیب مشابه فلز پایه آلومینیوم منیزیم، طیف ۶ ترکیبی بین فلز پایه آلومینیوم منیزیم و آلومینیوم - سیلیسیم و فاز ثانویه سیاه رنگ نیز حاوی آلومینیوم، منیزیم و سیلیسیم است. تعیین دقیق فاز ثانویه سیاه رنگ با آزمون های فعلی امکان پذیر نیست اما می توان گفت یک ترکیب بین فلزی پیچیده از آلومینیوم، سیلیسیم و منیزیم است. بر این اساس می توان نتیجه گرفت ناحیه اول (متشکل از آلومینیوم و سیلیسیم) فلز پایه آلومینیوم - سیلیسیم، ناحیه دوم (متشکل از

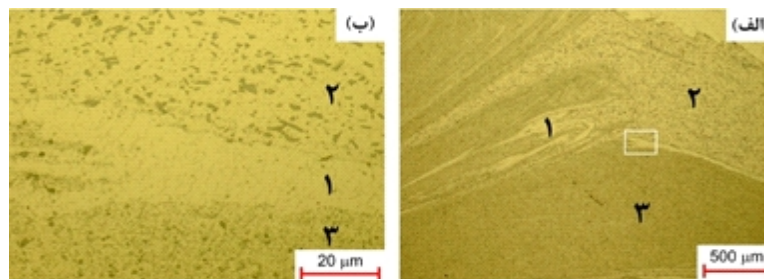
این نتیجه در شکل (۴-ب)، در بزرگ نمایی بالاتر، دیده می شود. این نقشه ترکیب شیمیایی در مرز مناطق تیره (سمت راست تصویر) و روشن (سمت چپ تصویر) گرفته شده و مشخص است که در منطقه تیره منیزیم قابل توجهی وجود دارد و تقریباً عاری از سیلیسیم است و در منطقه روشن غلظت بسیار پایینی از منیزیم وجود داشته و حاوی سیلیسیم است. توزیع سیلیسیم در این منطقه بیشتر به صورت ذرات مجزا است و در زمینه سیلیسیم چندان وجود ندارد. پس می توان نتیجه گیری کلی داشت که ناحیه تیره (ناحیه اول) متأثر از فلز پایه آلومینیوم - منیزیم و منطقه روشن (ناحیه دوم) تحت تاثیر فلز پایه آلومینیوم - سیلیسیم است.

بر اساس شکل (۴) مشخص است که دو فلز پایه به صورت مکانیکی با هم مخلوط شده اند و نفوذ اتمی بسیار محدودی، فقط در فصل مشترک دو ناحیه مجاور رخ داده است. بر این اساس می توان گفت در نمونه یک پاسه عامل اصلی ایجاد پیوند اختلاط و قفل مکانیکی بین دو فلز پایه است و نفوذ بسیار محدود بین دو فلز پایه به شکل گیری پیوند متالورژیکی و پیوستگی فصل مشترک کمک نموده است. در نمونه تک پاسه ناحیه سوم به طور بسیار محدودی شکل گرفته است و می توان نتیجه گرفت که در نمونه تک پاسه، اتصال با اختلاط و ایجاد قفل مکانیکی دو فلز پایه آلومینیوم - منیزیم (ناحیه اول) و آلومینیوم - سیلیسیم (ناحیه دوم) به وجود آمده است. منطقه سوم در نمونه دو پاسه مورد بررسی قرار می گیرد.

تصاویر SEM از منطقه همزده نمونه دو پاسه در شکل (۵) آمده است. بر اساس شکل (۵-الف)، دو منطقه در ساختار وجود دارد: منطقه روشن حاوی ذرات سفید رنگ و منطقه تیره. بر اساس شکل (5-ب) منطقه تیره خود شامل دو ناحیه است: ناحیه عاری از فاز ثانویه و ناحیه حاوی فازهای ثانویه عمدتاً سیاه رنگ. پس در تصاویر



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری نشان دهنده ساختار منطقه همزده نمونه یک پاسه. الف - مرکز منطقه همزده، ب - تصویر مربع خط پر در تصویر الف در بزرگ نمایی بالاتر، ج - تصویر مربع خط چین در تصویر الف در بزرگ نمایی بالاتر.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از منطقه همزده نمونه دو پاسه. الف - مرکز منطقه همزده، ب - تصویر مربع نشان داده شده در تصویر الف در بزرگ نمایی بالاتر.

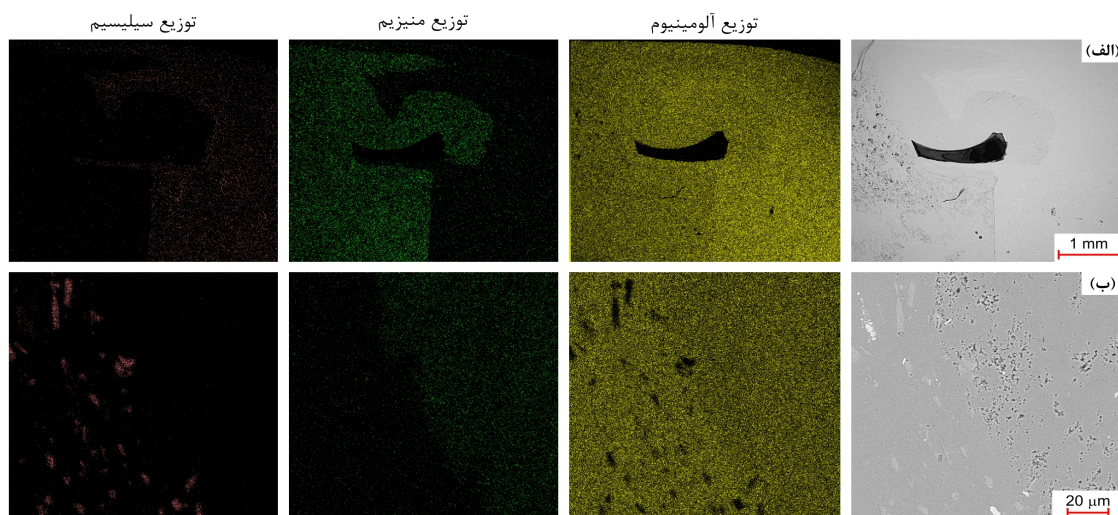


با توجه به اینکه نمونه تک پاسه به طور عمده از مناطق اول و دوم تشکیل شده و نمونه دو پاسه به طور عمده از منطقه دوم و سوم تشکیل شده است می توان نتیجه گیری نمود که در نمونه اول مکانیزم اتصال اصلی اختلاط و ایجاد قفل مکانیکی بین فلز پایه ها بوده و نفوذ اتمی بسیار محدود، فقط در فصل مشترک نواحی، برای تولید پیوند متالورژیکی رخ داده است. اما در نمونه دو پاسه به غیر اختلاط و قفل مکانیکی، نفوذ اتمی گسترده ای رخ داده (ناحیه سوم بسیار وسیع) به طوریکه مکانیزم اصلی اتصال پیوند متالورژیکی فلز پایه ها می باشد.

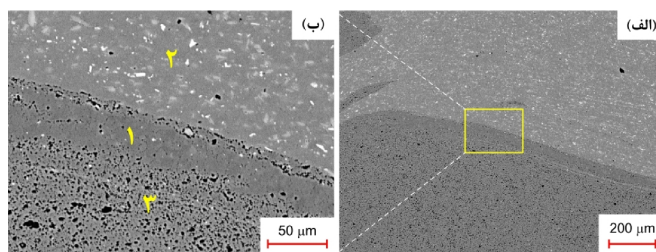
#### -خواص کششی

منحنی های تنش - کرنش حاصله از آزمون کشش در شکل (۷) آمده است. بر اساس این نتایج دیده می شود که استحکام جوش ها از استحکام هر دو فلز پایه کمتر است. اما با افزایش تعداد پاس های جوشکاری به دو پاس، خواص کششی جوش افزایش قابل ملاحظه ای یافته به طوریکه استحکام شکست آن از ۶۰/۶ به ۱۱۳/۷ مگاپاسکال (۸۸٪ درصد افزایش) و کرنش شکست آن از ۲ به ۴ درصد (۱۰۰٪ درصد افزایش) رسیده اند. نمونه دو پاسه که نتایج آزمون کشش آن بهتر است تقریباً به ۶۰ درصد استحکام فلز پایه آلومینیوم - سیلیسیم (فلز پایه ضعیف تر) و ۵۱ درصد انعطاف پذیری

آلومینیوم و منیزیم) فلز پایه آلومینیوم - منیزیم و ناحیه سوم (متشکل از آلومینیوم، منیزیم و سیلیسیم) ترکیب دو فلز پایه است. ناحیه اول، فلز پایه آلومینیوم - منیزیم است که در اثر حرارت ناشی از جوشکاری فاز ثانویه آن حل شده و به صورت تک فاز در آمده است. ناحیه دوم، فاز پایه آلومینیوم - سیلیسیم است که در اثر فرایند جوشکاری تیغه های درشت سیلیسیم آن شکسته و حالت بلوکی پیدا کرده اند. در این دو ناحیه، فلز پایه ها در یکدیگر نفوذ (در مقیاس اتمی) نداشته اند و شکل گیری آنها فقط ناشی از اختلاط و همزدگی مکانیکی است. در منطقه سوم اما هم ذرات خرد شده سیلیسیم دیده می شود و هم در زمینه آن مقدار قابل ملاحظه ای منیزیم وجود دارد. شکل گیری فاز سیاه رنگ در این منطقه نیز نشان از واکنش عناصر آلومینیوم، سیلیسیم و منیزیم دارد و اثبات می کند در این منطقه به غیر از اختلاط مکانیکی، نفوذ اتمی نیز نقش به سزایی داشته و یک پیوند متالورژیکی قوی به وجود آمده است. وضعیت قرار گیری این نواحی در منطقه همزده، وضعیت پیچیده سیلان مواد در حین FSW را نشان می دهد که بخش هایی از فلز پایه ها با ساختار اصلاح شده (نواحی اول و دوم) و فقط به صورت مکانیکی با هم مخلوط شده اند و بخش هایی کاملاً به صورت شیمیایی با هم مخلوط شده اند به طوریکه ذرات سیلیسیم در زمینه رقیق شده آلومینیوم - منیزیم قرار گرفته اند (ناحیه سوم).



شکل ۴- نقشه ترکیب شیمیایی نمونه تک پاسه. الف - بزرگنمایی پایین و ب - بزرگنمایی بالا.

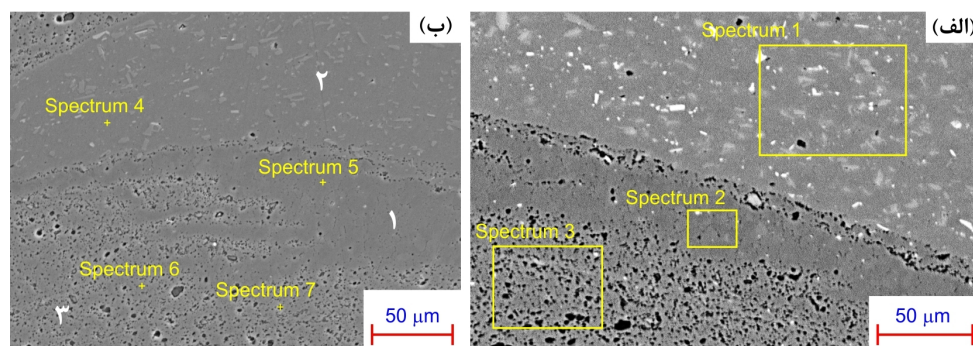


شکل ۵- تصاویر SEM از منطقه همزده نمونه دو پاسه الف - بزرگنمایی پایین و ب - مستطیل نشان داده شده در الف.

که تغییر شکل پلاستیک داده‌اند. شکست‌نگاری جوش فقط برای نمونه دو پایه انجام شد (شکل ۸-ج) و مشخص گردید که سطح شکست آن تا حد زیادی شبیه ناحیه دوم سطح شکست فلز پایه آلومینیوم - منیزیم است اما مناطق شکست نرم آن کاهش یافته است.

این نتایج تطابق خوبی با نتایج ریزساختار ارایه شده در بخش قبل دارد. می‌توان دید که با بهبود اختلاط مکانیکی و شیمیایی فلز پایه‌ها در نمونه دو پایه نسبت به نمونه تک پایه، استحکام و انعطاف‌پذیری جوش‌ها افزایش چشم‌گیری داشته و نزدیک به دو برابر شده‌اند و می‌توان نتیجه گرفت اعمال پاس دوم جوشکاری اثر مثبت قابل ملاحظه‌ای بر خواص کششی جوش‌ها داشته است. همچنین بر اساس این نتایج می‌توان ادعا نمود با افزایش تعداد پاس‌ها امکان بهبود بیشتر خواص مکانیکی جوش وجود دارد تا خواص جوش هر چه بیشتر به خواص فلز پایه نزدیک شود.

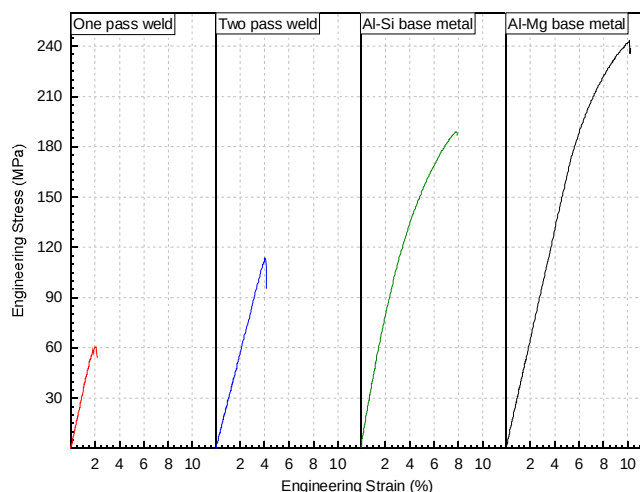
آن می‌رسد. البته همچنان اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین خواص کششی جوش‌ها و فلز پایه‌ها وجود دارد. بررسی چشمی نمونه‌های آزمون کشش نشان می‌دهد که هر دو نمونه از منطقه جوش و نزدیک به فلز پایه آلومینیوم - منیزیم شکسته‌اند. نتایج شکست‌نگاری نمونه‌های کشش در شکل (۸) ارایه شده است. سطح شکست نمونه فلز پایه آلومینیوم - منیزیم، (شکل ۸-الف) شامل دو منطقه است. منطقه اول منطقه‌ای است که بیشتر آن از مناطق رخ‌دار تشکیل شده که نشان‌دهنده ماهیت شکست ترد در این مناطق است. منطقه دوم، مناطقی هستند که مورفولوژی گلوبولار داشته و بخشی از این مناطق را مناطق تغییر شکل داده (مناطق حاوی دیپل) تشکیل می‌دهد که نشان‌دهنده ماهیت شکست نرم در این مناطق می‌باشد. تصویر سطح شکست فلز پایه آلومینیوم - سیلیسیم در شکل (۸-ب) دیده می‌شود. سطح شکست این نمونه فقط حاوی مناطقی است که به طور عمده رخ‌دار دارد. در سطوح رخ‌دار نیز مناطق سفید رنگ، مناطقی هستند



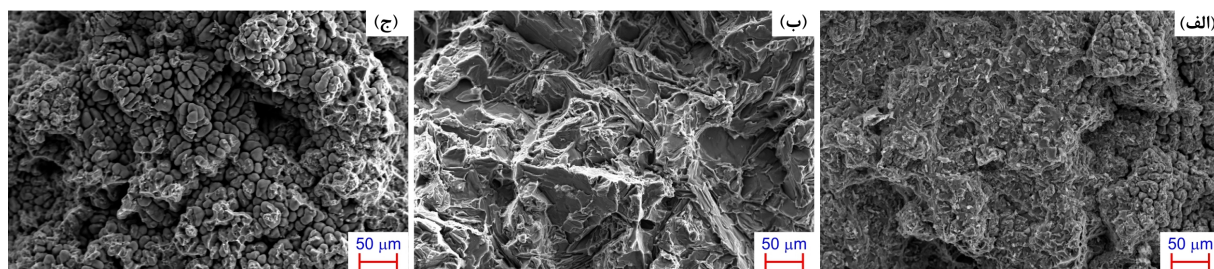
شکل ۶- تصویر SEM نشان‌دهنده محل آزمون‌های EDS الف - منطقه‌ای و ب - نقطه‌ای در نمونه دو پایه.

جدول ۱- نتایج آزمون‌های EDS ناحیه‌ای نشان‌داده شده در شکل (۶)

| عنصر      | طیف ۱ | طیف ۲ | طیف ۳ | طیف ۴ | طیف ۵ | طیف ۶ | طیف ۷ |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| آلومینیوم | ۸۹/۷  | ۹۰    | ۹۲/۶  | ۹۹/۱  | ۸۹/۹  | ۹۲/۵  | ۸۴/۱  |
| سیلیسیم   | ۱۰/۲  | ۰/۰   | ۲/۴   | ۰/۸   | -     | ۰/۵   | ۱۰/۸  |
| منیزیم    | ۰/۱   | ۱۰    | ۴/۹   | ۰/۱   | ۱۰/۱  | ۶/۰   | ۵/۱   |



شکل ۷- منحنی‌های تنش - کرنش مهندسی نمونه‌های جوشکاری شده در مقایسه با فلز پایه‌ها.



شکل ۸- تصاویر SEM از سطح شکست الف - فلز پایه آلومینیوم - منیزیم، ب - آلومینیوم - سیلیسیم و ج - جوش دو پایه.

### نتیجه گیری و جمع بندی

در پژوهش حاضر اثر پاس دوم جوشکاری همزن اصطکاکی بر ساختار و خواص مکانیکی جوش‌های همزن اصطکاکی غیر مشابه آلیاژهای پایه آلومینیوم مطالعه گردید که مهمترین نتایج آن به شرح زیر است. با افزایش پاس‌های جوشکاری از یک به دو پاس، کیفیت اختلاط دو فلز پایه در منطقه همزده جوش بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است به طوری که مکانیزم اتصال از تشکیل قفل مکانیکی به پیوند متالورژیکی تغییر کرده است. در اثر این تغییر در ساختار خواص کششی جوش دوپاسه نسبت به جوش تک‌پاسه بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته و استحکام آن از ۶۰/۶ به ۱۱۳/۷ مگاپاسکال (۸۸ درصد) و کرنش شکست آن از ۲ به ۴ درصد (۱۰۰ درصد) افزایش یافته است. پس می‌توان گفت اعمال پاس دوم جوشکاری اثر مثبتی بر کیفیت اختلاط، خواص مکانیکی و در نتیجه کیفیت اتصال دارد.

### مراجع

- 1-Polmear IJ, Light Alloys, Butterworth-Heinemann, MA USA, 4th ed., 2006.
- 2-Thomas WM, Nicholas ED, et al., GB Patent application no. 9125978.8, 1991.
- 3-D. Jacquin, G. Guillemot, J Mater Process Technol 288 (2021) 116706.
- 4-P. Nagabharam, D. Srikanth Rao, et al., Mater Today Proc 5(2018) 1264-1270.
- 5-K. Singh, G. Singh, H. Singh, J Magnes Alloy 6 (2018) 292-298.
- 6-Q. Wu, M. Li, Y. Guo, J. Shan, H. Wan, Y. Chang, Nucl Mater Energy 25 (2020) 100804.
- 7-P.M. Mashinini, I. Dinaharan, et al., Mater Charact 139 (2018) 328-336.
- 8-M. Shamanian, A. Mirzaei, J. Kangazian, J.A. Szpunar, J Manuf Process 55 (2020) 66-77.
- 9-H.A. Derazkola, A. Eyvazian, A. Simchi, Mater.

### پی نوشت

- 1-کارشناس ارشد مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد و پلیمر، دانشگاه حکیم سبزواری
- 2-استادیار، گروه مهندسی مواد و پلیمر، دانشگاه حکیم سبزواری
- 3-استادیار، گروه مهندسی مواد و پلیمر، دانشگاه حکیم سبزواری





## آشنایی با الزامات استاندارد 3834 الزامات کیفیتی در جوشکاری ذوبی مواد فلزی - بخش جامع - قسمت پنجم

مهندس افشین خیام

عنوان مثال اگر در تولید دارید با الکتروود قلیایی کار می کنید و الکتروودهای قلیایی را باید قبل از استفاده خشک کنید و باید آن در کوره الکتروود خشک کن مادر (Oven) خشک شود. در دمای مشخص ( $350^{\circ}\text{C}$ ) و در زمان مشخص (بین ۲-۱ ساعت) باید قرار بگیرد تا رطوبت آن از بین برود. اگر شرکت کوره خشک کن مادر (Welding Electrode Drying Ovens) نداشته باشد فقط آون های کوچک (نگهدارنده) داشته باشد عدم انطباق است چون این آون ها دما را بین  $90-100^{\circ}\text{C}$  نگه می دارند و باعث خشک شدن رطوبت الکتروودها نمی شوند.

و اگر ورق فولادی را جوشکاری می کنید که باید در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  پیش گرم کنید. که باید تجهیز برای اندازه گیری دما وجود داشته باشد (مثل: گچ حرارتی، ترمومتر لیزری و ...) وقتی دارید جوش می دهید دمای پیش گرم را نباید اندازه گیری کنید. هر تجهیز که لازم است باید در خط تولید موجود باشد.

### 9-2- توضیح تجهیزات تولید

سازنده باید لیستی از تجهیزات ضروری مورد استفاده برای تولید را نگهداری نماید. این لیست باید مشخصاتی از تجهیزات اصلی که برای هر ارزیاب از ظرفیت و توانایی کارگاه ضروری هستند را مشخص نماید نظیر:

- بیشینه ظرفیت جراثیل ها،
- اندازه اجزایی که کارگاه قادر به بکارگرفتن آنهاست،
- ابعاد و بیشینه دمای کوره های مورد استفاده برای عملیات حرارتی پس از جوشکاری،
- ظرفیت غلطک ها و دستگاه های خمکاری و برشکاری،
- برای دیگر تجهیزات نیاز به تعیین تعداد تقریبی کل هر مجموعه از تجهیزات می باشد (مثلاً "تعداد کل منابع قدرت Power source ها برای فرایندهای مختلف) این بند استاندارد لیستی از تجهیزات

### 9-1- تجهیزات (Equipment)

این بند از استاندارد یکی از بندهای بسیار مهم و تاثیر گذار در کیفیت جوشکاری است اگر قرار باشد عیبی در جوشکاری رخ دهد سه تا منبع (منشاء) را نباید فراموش کنیم:

- 1- یا ایراد از جوشکار است
- 2- یا ایراد از دستورالعمل های کاری است و کسبی که این دستورالعمل ها را نوشته است
- 3- یا ایراد از تجهیزات است. که در این بند از استاندارد یکی از این موارد سه گانه یعنی تجهیزات (Machines) مورد بحث قرار می گیرد. این بند استاندارد شامل پنج زیربند زیر می باشد:

### 9-1-1- تجهیزات تولید و آزمایش

تجهیزات زیر باید در هنگام لزوم در دسترس باشند:

- منابع قدرت (Power source) و سایر ماشین ها،
- تجهیزات آماده سازی اتصال و سطح، و برای برشکاری، شامل برشکاری حرارتی،
- تجهیزات پیش گرمایش و عملیات حرارتی بعد از جوشکاری شامل شاخص درجه حرارت،
- قیدها و بست ها،
- جراثیل ها و تجهیزات جابجایی مورد استفاده برای تولید،
- تجهیزات حفاظت فردی و سایر تجهیزات ایمنی، که به صورت مستقیم وابسته به فرایند کاربردی ساخت می باشد.
- کوره ها، گرمکن ها و سایر تجهیزات مورد استفاده برای آمایش مواد مصرفی جوشکاری،
- تجهیزات برای تمیزکاری سطح،
- تجهیزات آمایش مخرب و غیر مخرب.

این بند از استاندارد صراحتاً می گوید باید هر آنچه که در تولید یک محصول به تجهیز نیاز داریم باید آن تجهیز در دسترس باشد. به



به همراه توصیف آن تجهیز را می‌خواهد.

### 9-3- تناسب تجهیزات

تجهیزات باید برای کارکردهای مورد نظر مناسب باشند. یادآوری - در این بند کیفیت تجهیزات جوشکاری و گرمادهی ملاک نیست. به عنوان مثال در شرکتی که جوش آلومینیوم با روش تیگ (TIG) انجام می‌دهد، همانطور که می‌دانید در جوشکاری تیگ (TIG) آلومینیوم بهتر است دستگاه جوشکاری جریان متناوب (AC) باشد. با دستگاه جوشکاری تیگ (TIG) جریان مستقیم (DC) نمی‌شود جوشکاری آلومینیوم را بطور دلخواه انجام داد اصلاً با جریان DCEN (جریان مستقیم الکترو منفی) نمی‌شود و با جریان DCEP (جریان مستقیم الکترو مثبت) هم خسارات زیادی به انبر و تنگستن وارد می‌شود. و اگر شرکتی فقط دستگاه جوشکاری تیگ (TIG) با جریان مستقیم (DC) داشته باشد نمی‌تواند جوشکاری آلومینیوم را بخوبی انجام دهد یعنی دستگاه را دارد ولی تناسب ندارد. پس تجهیزات علاوه بر اینکه باید وجود داشته باشند باید تناسب هم داشته باشند.

### 9-4- تجهیزات جدید

پس از نصب یک دستگاه جدید یا نصب مجدد یک دستگاه، باید آزمون‌های مناسب روی دستگاه انجام شود. این آزمون‌ها باید عملکرد صحیح دستگاه را تایید نمایند. این فعالیت باید هرکجا که لازم باشد، مطابق استانداردهای مناسب انجام شده و مستند شود. استاندارد می‌گوید دستگاه را که می‌گیرید، (الزامی ندارد که حتماً نماینده شرکت فروشنده هم حضور داشته باشد) اما بهتر است این اتفاق بیفتد و می‌گوید: این دستگاه جدید را بایک WPS تایید صلاحیت شده و یک جوشکار تایید صلاحیت شده تست کنند ما همیشه سه مجهول داریم:

1- جوشکار

2- تجهیز

3- متد (دستورالعمل، WPS و ...)

پاشش‌های مذاب، قطع و وصلی‌های دستگاه، نوسان برق، ... را چک می‌کنند. اگر عملکرد صحیح دستگاه مطمئن شدند و خیالشان راحت شد که این دستگاه کاملاً سالم است دستگاه را تحویل می‌دهند و گارانتی آنرا مهر می‌کنند و مرخص می‌شوند. چون این مقاله در رابطه با استقرار قسمت ۲ استاندارد می‌باشد همه این موارد را باید مستندانش را داشته باشد که همه این موارد را می‌توان در قالب یک فرم ساده که شامل:

1- تاریخ

2- نام دستگاه

3- تاریخ ورود دستگاه به شرکت

4- برند دستگاه و ... اگر استانداری برای تست آن دستگاه وجود دارد باید به آن استاندارد اشاره کنید. اگر دستورالعمل مصوبی در داخل سازمان دارید به آن اشاره کنید و اگر چیزی وجود ندارد این توضیح را باید بدهید (این دستگاه با حضور نماینده شرکت، نماینده واحد

نگهداری و تعمیرات (نت)، هماهنگ کننده جوشکاری، جوشکار ... تست شد و این تست‌ها انجام شد و عملکرد صحیح دستگاه مورد تایید همه این حاضرین قرار گرفت وقتی همه حاضرین امضاء کردند مجوز ورود بسه داخل خط تولید برای این تجهیز جدید (New Equipment) می‌باشد.

### 9-5- نگهداری تجهیزات

سازنده باید طرح‌های مستند برای نگهداری تجهیزات در اختیار داشته باشد. این طرح‌ها باید اثبات کنند که پارامترها یا مشخصه‌هایی از تجهیزات که در رویه‌ها مطرح هستند، بررسی می‌شوند این طرح‌ها می‌توانند محدود به مواردی شوند که برای اطمینان از کیفیت محصول ضروری هستند. مواردی نظیر:

- وضعیت راهنماهای تجهیزات برای برشکاری حرارتی، فیکسچرهای مکانیزه و ...

- وضعیت آمپر مترها و ولت مترها، جریان سنج‌ها و ... که برای عملکرد تجهیزات جوشکاری بکار می‌روند.

- وضعیت کابل‌ها، شلنگ‌ها، رابط‌ها،

- وضعیت سیستم کنترل در تجهیزات مکانیزه و یا اتوماتیک جوشکاری،

- وضعیت وسایل اندازه‌گیری دما،

- وضعیت تغذیه کننده‌های سیم و لوله حفاظ سیم‌ها،

دستگاه جوش نیاز به نگهداری دارد و در بازه‌های زمانی مشخص لازم است که دستگاه جوش متوقف شود یکسری از آیتم‌های آن باید هر روز چک شود. اصطلاحاً به آن نت اپراتوری گفته می‌شود. که به اپراتور دستگاه سپرده می‌شود. مثلاً اپراتور دستگاه هر روز صبح که سرکار می‌آید اول یکسری آیتم‌ها را باید چک کند که شامل:

1- سیم کابل‌ها که دچار آسیب دیدگی نشده باشد.

2- کانکتورهای دستگاه

3- نشستی آب و گاز را چک کند.

4- سلامت گیج‌ها و میترهای روی ترانس دستگاه

5- گیج گاز دستگاه

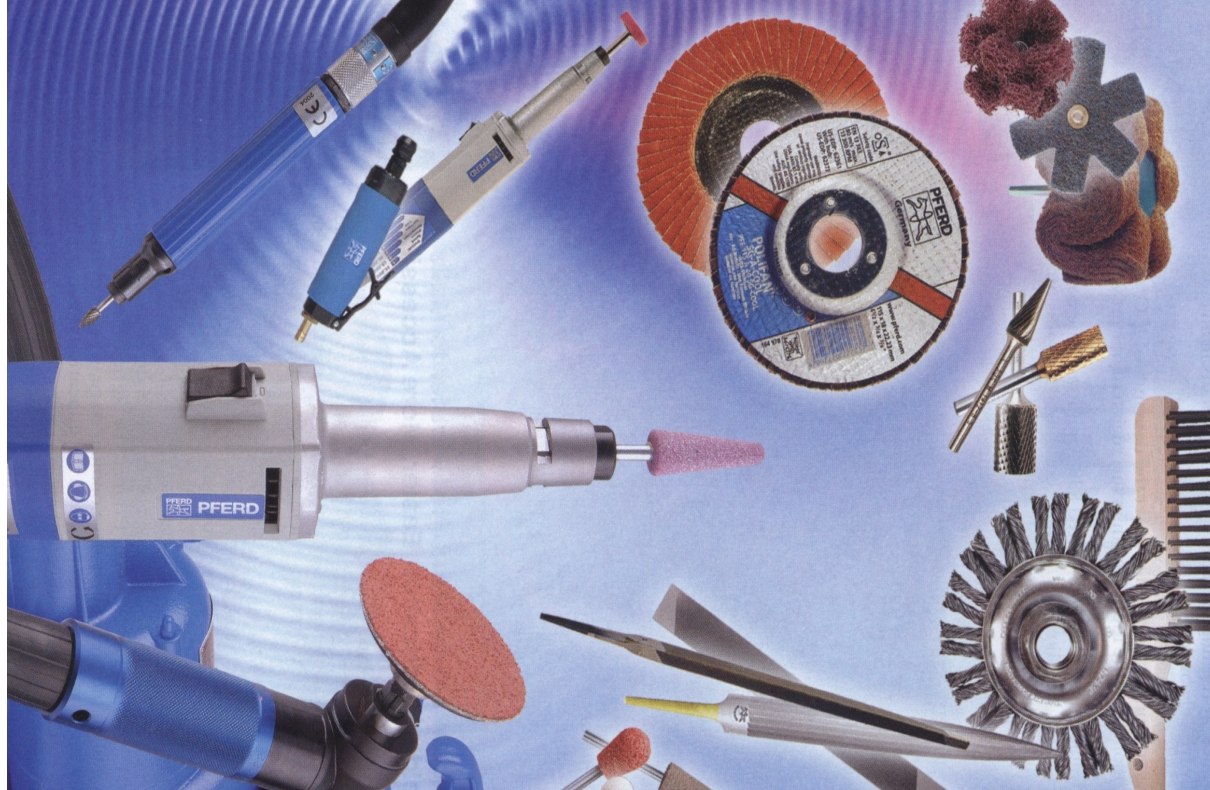
که در این زمینه اپراتور دستگاه باید یک چک لیستی داشته باشد که به صورت روزانه دستگاه را چک کند که آیتم‌ها و موارد آن یادش نرود. که هر روز موظف باشد دستگاه را چک کند. کلاً ۵ تا ۱۰ دقیقه اول روز بهتر است فقط چک آپ دستگاه‌ها انجام شود و اگر این مورد در شرکت قانون شود دیگر کسی یادش نمی‌رود. باید اپراتورهای دستگاه به اهمیت دستگاه پی ببرند که باید از آن مراقبت کنند و باید در سازمان فرهنگ سازی شود. لازم است هر ۶ ماه یکبار درب دستگاه جوشکاری باز شود. برد دستگاه یک هواگیری شود و یک باد گرفته شود. دستگاه با آمپر متر چک شود که دچار سوختگی نشده باشد. سیستم سیرکولینگ (بحث خنک کاری) دستگاه، روغن دستگاه بررسی شود. معمولاً در کاتالوگ دستگاه یکسری نکاتی را می‌گویند که دقیقاً باید رعایت کنید. شرکت‌ها و سازمان‌های بزرگ یک واحد تخصصی نگهداری و تعمیرات (نت) دارند. این وظیفه به عهده آن‌ها گذاشته شده است. نرم افزارهای تخصصی دارند. لیست

به طور سالیانه از سازنده خود دستگاه و یا سازمان‌هایی که خدمات نگهداری و تعمیرات را انجام می‌دهند بخواهیم بیایند در محل شرکت حاضر شوند و دستگاه‌های ما را نت تخصصی کنند و سوابقش را هم به ما بدهند تا ما بتوانیم برای ارائه به ممیز و یا کارفرما داشته باشیم.

بی نوشت

-مدیر تضمین کیفیت شرکت ناظران یکتا

بهشون **Hyperlink** شده است. برنامه نگهداری برای هرگروهی از دستگاه‌ها وجود دارد. به عنوان مثال: دستگاه‌های جوشکاری تیگ (TIG) برنامه شان این است که در سال (این ۶ ماهه این آیتم‌ها و سالیانه هم این آیتم‌ها چک بشود) در ممیزی‌ها هم باید هم برنامه نگهداری به ممیز نشان دهید و هم سوابق اجرای آن برنامه را باید ارائه دهید. در سازمان‌های کوچکتر متأسفانه این واحد وجود ندارد.



## آماده‌سازی فلزات آلومینیوم قبل از جوشکاری

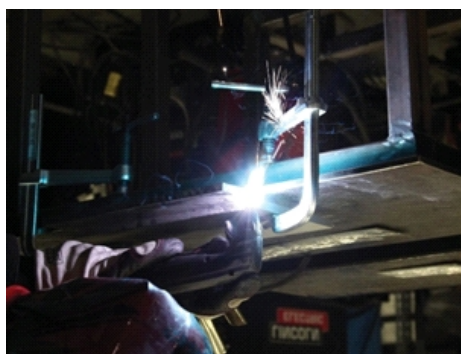
احمد رضا وکیلی

ورق‌های آلومینیومی در فضای باز ذخیره می‌شوند، باید به صورت عمودی و با فاصله در بین ورق‌ها قرار گیرند تا آب باران آزادانه از روی ورق‌ها حذف و از باقی ماندن رطوبت بر روی آن‌ها جلوگیری شود.

### فرایندهای برشکاری حرارتی

#### -برشکاری با قوس پلاسما

برشکاری با قوس پلاسما پرکاربردترین فرایند برشکاری حرارتی آلومینیوم است (شکل ۱).



شکل ۱- برشکاری پلاسما آلومینیوم با استفاده از سیستم دستی

در برشکاری ورق‌های نازک بسیار سریع عمل می‌کند، همچنین می‌تواند ورق‌های آلومینیومی با ضخامت ۶ اینچ را با سرعت آهسته‌تر برشکاری نماید. برای دستیابی به یک سطح برشکاری با کیفیت، ضخامت و سرعت حرکت باید به درستی تنظیم شود. هنگامی که سرعت حرکت برشکاری سریع‌تر از حد مطلوب باشد، کیفیت برش را

این مبحث گزینه‌های مختلف آماده‌سازی فلزات آلومینیوم قبل از جوشکاری که شامل برشکاری حرارتی، مکانیکی، حذف اکسید بر روی سطوح آلومینیوم و ناپیوستگی‌ها می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به دلیل خواص آلومینیوم، مانند نسبت استحکام به وزن، مقاومت در برابر خوردگی، فراوانی شکل خام آن (Bauxite) و سهولت نسبی ساخت آلومینیوم، برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با افزایش استفاده از فلزات آلومینیوم، نیاز به جوشکاری این فلزات با کیفیت بالا محسوس خواهد بود. این مبحث تمرکز بالایی بر روی آماده‌سازی فلزات آلومینیوم قبل از جوشکاری را دارد. با نگاهی به خواص آلومینیوم که به‌سر کیفیت جوش‌ها تأثیر می‌گذارد، مانند حلالیت بالای هیدروژن در حالت مذاب، آماده‌سازی سطح قطعات آلومینیوم قبل از جوشکاری از اهمیت زیادی برخوردار خواهد بود.

### انبارش مواد آلومینیوم

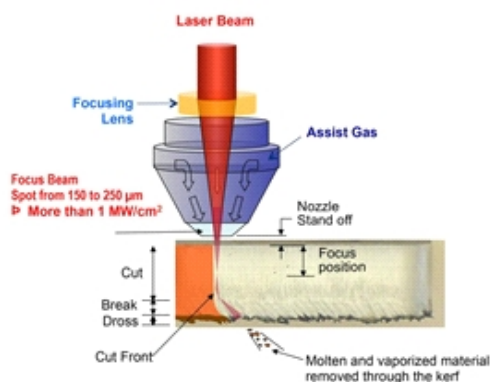
فلزات آلومینیوم به محض اینکه در معرض اکسیژن قرار می‌گیرند، بر روی سطح آن‌ها یک لایه اکسید تشکیل می‌شود. سرعت رشد اکسید به شدت به شرایط انبارش، مانند دما و رطوبت نسبی محل نگهداری بستگی دارد. اکسید آلومینیوم متخلخل است و حتی زمانی که آب با سطح آن تماس نداشته باشد می‌تواند هیدراته شود. برای جلوگیری از وارد شدن آسیب‌های ناشی از عوامل جوی بهترین روش نگهداری آن‌ها در انبار مسقف می‌باشد. البته در برخی صنایع، نگهداری ورق‌های آلومینیومی به دلیل ابعاد آن‌ها در داخل ساختمان عملی نیست و در برخی موارد نیز امکان پذیر نمی‌باشد. هنگامی که

### -سرعت مشعل

سرعت مشعل را برای مطابقت با ضخامت قطعه قابل تنظیم می‌باشد. برای بالا بردن کیفیت برشکاری ممکن است برای قطعات ضخیم‌تر سرعت کمتری لازم باشد (شکل ۳).

### برشکاری با پرتو لیزر

از فناوری‌های برش پرتو لیزر برای برشکاری فلزات آلومینیوم نیز استفاده می‌شود. (شکل ۴). از مزایای فرایند پرتو لیزر می‌توان به توانایی برشکاری فلزات نازک بدون ایجاد پیچیدگی، ناحیه تحت تأثیر حرارت (HAZ) کمتر و سطوح برشکاری صاف نیز اشاره کرد (شکل ۵). از معایب فرایند پرتو لیزر، ضخامت فلزات قابل برشکاری به حدود ۰/۳۸ اینچ (۱۳ میلی‌متر) محدود شده است، همچنین این فرایند مشابه فرایند برش پلاسما، عمدتاً در آلیاژهای قابل عملیات حرارتی می‌تواند منجر به ترک خوردگی شود. فرایند برش لیزر نیز گران‌تر از فرایند برش پلاسما است، این فرایند غیرقابل حمل می‌باشد و همچنین مقدار زیادی سرباره پس از برشکاری بر روی سطح زیرین ورق ایجاد می‌نماید. به دلیل بازتاب بالای فلزات آلومینیوم، برای برشکاری نیاز به استفاده از لیزرهای پر قدرت می‌باشد که این موضوع می‌تواند طول عمر لیزر را نیز کاهش دهد.



شکل ۴ - شماتیکی از برشکاری با پرتو لیزر



12mm (1/2")



6mm (1/4")



3.2mm (10ga)

شکل ۵ - سطوح برشکاری با پرتو لیزر

تحت تأثیر قرار خواهد داد. به طور معمول، برشکاری قوسی پلاسمایی با هوا را می‌توان برای ضخامت فلزات آلومینیوم تا ۱۴ اینچ استفاده کرد. برای برشکاری ورق‌های با ضخامت ۱۴ اینچ به بالا، توصیه می‌شود از گاز آرگون یا نیتروژن به عنوان گاز پلاسما برای افزایش قابلیت برشکاری استفاده نمود.

برشکاری پلاسما را می‌توان به صورت دستی یا با استفاده از میز برشکاری مکانیزه یا خودکار (CNC) انجام داد (شکل ۲).



شکل ۲ - برشکاری پلاسمایی آلومینیوم با استفاده از سیستم CNC

از معایب قوس پلاسما می‌توان به بالا بودن گرمای ورودی اشاره کرد که می‌تواند باعث ایجاد ریز ترک‌ها در محل‌های اتصال برش شود. در این مورد پیشنهاد می‌شود که ۱/۸ اینچ [۱] از لبه ورق برش شده به صورت مکانیکی جدا تا از باقی ماندن هر گونه ترک احتمالی و ناهمواری جزئی در لبه‌ها جلوگیری شود. در ادامه برای انجام برشکاری با این فرایند رعایت چند پارامتر پیشنهاد می‌شود.

### -تجهیزات و تنظیمات

اطمینان حاصل شود که از یک دستگاه برش پلاسما با قابلیت احتراق با فرکانس بالا استفاده می‌شود. آمپر دستگاه طوری تنظیم شود که با ضخامت قطعه مطابقت داشته باشد. مواد ضخیم‌تر به آمپر بیشتری نیاز دارند. برای تنظیم آمپر می‌توان از راهنمای سازنده دستگاه استفاده نمود (شکل ۳). نمونه‌ای از این راهنما را نشان می‌دهد.

| VIPER CUT 30 - MILD STEEL PARAMETERS (75 PSI) |      |                       |
|-----------------------------------------------|------|-----------------------|
| Material Thickness (mm)                       | Amps | Travel Speed (mm/min) |
| 2-3mm                                         | 26A  | 360 mm/min            |
| 5-6mm                                         | 27A  | 340 mm/min            |
| 8-10mm                                        | 30A  | 240 mm/min            |
| 12mm                                          | 30A  | 200 mm/min            |

| VIPER CUT 30 - STAINLESS STEEL/ALUMINIUM PARAMETERS (75 PSI) |      |                       |
|--------------------------------------------------------------|------|-----------------------|
| Material Thickness (mm)                                      | Amps | Travel Speed (mm/min) |
| 2-3mm                                                        | 25A  | 360 mm/min            |
| 5mm                                                          | 27A  | 300 mm/min            |
| 6mm                                                          | 30A  | 300 mm/min            |

شکل ۳ - نمونه‌ای از تنظیمات آمپر و سرعت پیشروی دستگاه برش پلاسما

### -نوع گاز

مخلوط آرگون-هیدروژن برای برشکاری فلزات آلومینیوم، به ویژه برای ضخامت‌های بالای ۱۲ میلی‌متر توصیه می‌شود. این ترکیب گاز برای بالا بردن سطح کیفیت و دقت برشکاری کمک می‌کند.

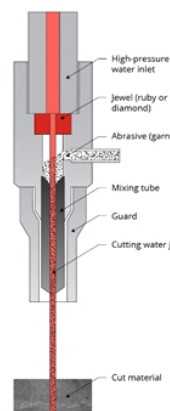


## برشکاری مکانیکی

برشکاری مکانیکی برای آماده‌سازی سطوح فلزات آلومینیوم قبل از جوشکاری بسیار قابل استفاده است. در آماده‌سازی بیشتر قطعات، فرایند بسیار کارآمد و ارزانی می‌باشد. نکته‌ای که باید به آن توجه شود این است که نسبت به برشکاری فولادها نیازمندی کمتری به روان‌کننده‌های برشکاری دارد، اما در صورت استفاده از روان‌کننده‌ها، با روش‌هایی که در قسمت "آماده‌سازی آلومینیوم قبل از جوشکاری" توضیح داده می‌شود، پاکسازی شوند.

## برشکاری پرتاب آب با فشار بالا

برشکاری با این فرایند، از آب با فشار بالا با افزودن یک گارنت ساینده استفاده می‌شود. فشار آب مصرفی می‌تواند تا ۱۰۰ کیلو پوند بر اینچ مربع (ksi) و سرعت آن می‌تواند به سرعت ۳ مایه یا 2283 مایل در ساعت برسد (شکل ۶).



شکل ۶- شماتیکی از برشکاری پرتاب آب با فشار بالا

در این فرایند دما فقط به ۱۹۳ درجه فارنهایت می‌رسد، که باعث می‌شود فلزات آلومینیوم بدون ایجاد ترک برشکاری شوند. همچنین می‌تواند فلزات آلومینیوم را تا ضخامت ۹/۲۵ اینچ برشکاری کند، با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. سرعت برش در مقایسه با فرایند برشکاری با پلاسما کندتر است. به عنوان مثال، هنگام برشکاری آلومینیوم با ضخامت ۱/۵ اینچ، سرعت پیشروی ممکن است به ۳/۸ اینچ در دقیقه کاهش یابد. علاوه بر این، سیستم‌های برشکاری این فرایند گران قیمت و غیر قابل حمل می‌باشند. در زیر به تعدادی از محاسن این فرایند اشاره شده است.

- برش دقیق آلومینیوم: برش‌های دقیق با رواداری کمتر از (0/005 ± اینچ).

- طرح‌های برش پیچیده: کمینه دهانه برش (تا ۲۰۰ میکرون).

- برش قطعات با کیفیت بالا: در صورت استفاده از ساینده مناسب و تجهیزات به روز بالاترین سطح کیفیت را ارائه خواهد داد.

- عدم نیاز به فعالیت‌های مجدد پس از برشکاری: عدم نیاز به تمیزکاری و یا سنگ‌زنی پس از برشکاری.

- تطبیق پذیری: می‌تواند فولاد زنگ‌زن، کربن، مس، برنج، تیتانیوم، کامپوزیت‌ها و تقریباً هر ماده‌ای را برشکاری نماید.

- برشکاری سرد بدون پیچیدگی حرارتی

- سرعت برشکاری و بهره‌وری بالا

## ماشینکاری

آماده‌سازی سطوح جوشکاری با روش ماشینکاری و استفاده از ابزارهای مختلفی مانند ماشین‌های فرز، دستگاه‌های مختلف تراشکاری قابل انجام خواهد بود. در این روش‌ها معمولاً جنس ابزار از نوع ترکیبات کاربید استفاده می‌شود. در این خصوص توصیه می‌شود که در هر روش ماشینکاری بدون استفاده از روان‌کننده برشکاری انجام شود.

## اره کردن

از اره نواری و مدور برای آماده‌سازی سطوح قبل از جوشکاری می‌توان استفاده کرد. برای این روش در فلزات آلومینیوم، باید از سرعت تیغه بالاتر و دندانه‌های ریزتر نسبت به برش فولادها استفاده نمود. سرعت برشکاری سطح تیغه برای اره‌های مدور با جنس ترکیبات کاربید ۳۴۰۰-۴۲۰۰ و برای اره نواری ۳۵۰۰ فوت در دقیقه توصیه می‌شود. تعداد دندانه‌های تیغه اره نواری نباید بیش از چهار دندانه در هر اینچ باشند. در صورتیکه برشکاری به وسیله اره‌های مدور انجام شود، به دلیل بالا بودن کیفیت سطح نیازی به آماده‌سازی مجدد نخواهد داشت در حالیکه اره‌های نواری معمولاً سطح خشنی را ایجاد می‌نمایند و قبل از جوشکاری نیاز به آماده‌سازی مجدد خواهد داشت (شکل ۷).



شکل ۷- نمونه تیغه‌های اره

## سنگ‌زنی و سنباده زنی

در تولید همه صفحه‌های سنگ‌زنی و سنباده از یک نمونه چسب آلی برای نگه داشتن مواد ساینده در کنار هم استفاده می‌شود (شکل ۸). که این مورد ممکن است هیدروکربن‌ها [۱] را وارد حوضچه مذاب جوش نماید و باعث تخلخل در جوش شود. برخی از تولیدکنندگان مشخص می‌کنند که صفحه‌های سنگ‌زنی یا سنباده به طور خاص برای فلزات آلومینیوم ساخته شده است که این مشخصه نشان دهنده تاثیر مثبت نوع ساینده بر روی سطوح فلز آلومینیوم خواهد بود. توصیه می‌شود با انجام آزمایش‌های مخرب ساده که در زیر ذکر شده است می‌توان مناسب بودن نوع صفحه سنگ‌زنی یا سنباده برای آماده‌سازی فلزات آلومینیوم قبل از جوشکاری را تعیین نمود.

- یک نمونه اتصال جوش گوشه‌ای با طول ۶ تا ۱۲ اینچی را با استفاده از مواد مناسب جوشکاری شود.

- نمونه جوشکاری شده را به میز کار متصل و با استفاده از چکش،

کاهش یا از بین برود. حذف روغن و گریس را می‌توان به روش‌های مختلفی به شرح زیر انجام داد. روش اول آغشته کردن یک پارچه به حلال چربی زدا انجام داد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- نمونه حلال چربی زدا

حلال، بهتر است با بیشینه غلظت مجاز و نقطه اشتعال پایین انتخاب شود که پیشنهاد می‌شود در خصوص این دو مورد با نماینده محیط زیست و ایمنی مشورت شود. روش دوم، استفاده از محلول‌های قلیایی ملایم که خاصیت چربی‌زدایی مناسبی دارند، در این روش بخشی که نیاز به چربی‌زدایی دارد را می‌توان با این محلول‌ها اسپری کرد و یا در ظرف حاوی محلول نیز غوطه‌ور کرد. از آنجایی که این پاک‌کننده‌ها معمولاً بر پایه آب هستند، شستشو و خشک کردن پس از چربی‌زدایی، حائز اهمیت خواهد بود. روش سوم، استفاده از محلول‌های تمیز کننده اسیدی برای تمیز کردن آلومینیوم می‌باشد. این محلول‌ها معمولاً موثر هستند و همچنین قابلیت حذف بیش از حد اکسیدهای موجود بر روی سطوح فلزات آلومینیوم را دارد. با این حال، با توجه به اینکه کل این محلول‌ها اسیدی و برخی نیز حاوی اسید هیدروفلوریک هستند در زمان استفاده و حذف آن‌ها باید احتیاط‌های لازم به عمل آید و پس از آن مجدداً قطعه باید قبل از جوشکاری کاملاً شسته و خشک شود. در نهایت چربی‌زدایی با هر روشی که استفاده شود، قبل از انجام هر یک از مراحل حذف اکسید که در زیر توضیح داده شده است، چربی‌زدایی بخشی که باید جوش داده شود، حائز اهمیت است. در غیر این صورت روغن و گریس با حذف اکسید پخش می‌شود و به سختی حذف خواهد شد.

### حذف اکسید

حذف لایه اکسید قبل از جوشکاری آلومینیوم به چند دلیل مختلف حائز اهمیت است [۱]. اکسید آلومینیوم در دمای بسیار بالاتر از آلومینیوم ذوب می‌شود و در صورت جوشکاری روی سطح اکسیدی که ضخامت آن بیش از حد باشد، امکان حبس اکسید در مذاب جوش خواهد بود. با توجه به اینکه سطح اکسید متخلخل است و در محیط‌های مرطوب تمایل به جذب رطوبت دارد اگر آماده‌سازی قبل از جوشکاری سطح فلز به درستی انجام نشود، منجر به ایجاد تخلخل در جوش خواهد شد. حذف اکسید نیز می‌تواند به روش‌های مختلفی انجام شود. رایج‌ترین استفاده از برس سیمی با جنس فولاد زنگ‌نزن می‌باشد (شکل ۱۱). برس مورد استفاده باید عاری از هر گونه آلودگی

مقطع جوش شکسته شود.

-سطح شکستگی جوش برای وجود عیب تخلخل مورد بررسی قرار گیرد.

-در صورتیکه در شرایط عادی فرایند جوشکاری عیب تخلخل ایجاد نمی‌شود، از صفحه سنگ‌زنی و یا سنباده‌ای که قرار است مورد آزمایش قرار گیرد قطعه جدیدی برای جوشکاری نمونه اتصال گوشه‌ای، برشکاری، سنگ‌زنی و یا سنباده زده شود. -در نهایت مراحل ۱ تا ۳ را تکرار و نتیجه مورد ارزیابی قرار گیرد.



صفحه سنباده زنی



صفحه سنگ زنی

شکل ۸- نمونه صفحات سنگ‌زنی و سنباده زنی

### فیچی کردن

فرایند فیچی کردن برای برشکاری ورق‌ها نیز مناسب است. با توجه به خشن بودن سطح آماده‌سازی و همچنین ایجاد شکاف‌های زیاد در لبه‌ها که باعث باقی ماندن روغن‌ها، گریس‌ها، آلودگی و غیره در این قسمت می‌شود، به ندرت برای آماده‌سازی قبل از جوشکاری از این فرایند استفاده می‌شود. و در صورت استفاده از این روش توصیه می‌شود بعد از برشکاری، لبه‌ها به وسیله ماشین کاری، سنگ‌زنی و یا سنباده صاف شوند.

### ساینده و مته‌های انگشتی

از ساینده و مته‌های انگشتی می‌توان برای انجام تعمیرات و شیپ‌زنی پشت محل جوشکاری استفاده کرد (شکل ۹). در این فرایند در صورتیکه از نیروی هوا برای استفاده از این ابزار استفاده می‌شود باید اطمینان حاصل شود که یک خشک‌کن بر روی خط وجود داشته باشد تا از ورود رطوبت به قطعه کار جلوگیری شود. همچنین هنگام استفاده برای تعمیرات یا شیپ‌زنی پشت محل جوشکاری، براده‌های ایجاد شده را حذف، تا از ایجاد عیب در جوش جلوگیری شود.



شکل ۹- نمونه ساینده و مته‌های انگشتی

### آماده‌سازی سطوح فلزات آلومینیوم قبل از جوشکاری

#### -روغن و گریس

به دلیل حلالیت بالای هیدروژن در حالت مذاب، توصیه می‌شود هر گونه روغن یا گریس از ناحیه جوش حذف تا احتمال هر گونه تخلخل

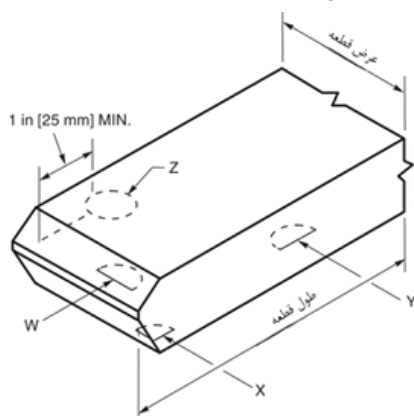
**ld** = طول ناپیوستگی (یا طول مجموع ناپیوستگی‌ها در هر مقطع عرضی)

ناپیوستگی تا عمق ۱ اینچ به وسیله شیارزنی حذف شده و در لایه‌هایی که ضخامت آن‌ها از ۱/۸ اینچ بیشتر نباشد به وسیله جوشکاری پر می‌شود.

- هنگامی که یک ناپیوستگی که بر روی لبه قطعه قابل مشاهده نیست (مانند Z در شکل ۱۲) پس از جوشکاری مشاهده شود و بیش از ۱ اینچ از لبه فاصله داشته باشد، نیازی به انجام تعمیرات نیست. اگر ناپیوستگی از لبه کمتر از ۱ اینچ باشد، باید تا فاصله ۱ اینچی از ناحیه ذوب جوش به وسیله شیارزنی حذف و به وسیله جوشکاری در لایه‌هایی که ضخامت آن‌ها از ۱/۸ اینچ بیشتر نباشد پر شود.

- اگر مساحت ناپیوستگی W، X، Y یا Z از ناحیه قید شده در بند (۲) بالا بیشتر شود، قطعه باید با نظارت و تاییدیه مهندس ناظر تعویض یا تعمیر شود. طول مجموع تعمیرات نباید از ۲۰ درصد طول لبه، تجاوز کند و در غیر اینصورت نیاز به اخذ تاییدیه از مهندس ناظر را دارد.

- انجام هر گونه تعمیرات باید بر اساس دستورالعمل تایید شده و مطابق با کد مراجع مربوطه باشد.



شکل ۱۲- ناپیوستگی‌های لبه در قطعه برشکاری شده (به موارد ۱ تا ۵ در قسمت ناپیوستگی‌ها مراجعه شود).

### نتیجه‌گیری

استفاده از دستورالعمل‌های ذکر شده مطمئناً کیفیت جوش‌های آلومینیوم را برای کسانی که به تازگی جوشکاری بر روی فلزات آلومینیوم را آغاز کرده‌اند، یا برای اشخاصی که در تولید جوش‌های قطعات آلومینیومی با کیفیت بالا مشکل دارند، افزایش می‌دهد. در نهایت مهمترین عامل برای دستیابی به یک جوش با کیفیت در فلزات آلومینیوم بدون شک تمیزکاری می‌باشد.

### مراجع

-WELDING JOURNAL / FEBRUARY 2017- BY MIKAEL D. CARRIERE  
-AWS D1.2/D1.2M:2014- Structural Welding Code Aluminum

### پی‌نوشت

رییس بازرسی فنی شرکت توسعه انرژی سپاهان ایرانیان

بوده و قبلاً روی موادی غیر از آلومینیوم استفاده نشده باشد. برس مصرفی باید نسبتاً انعطاف پذیر و با فشار کم استفاده شود تا از ایجاد زبری غیرضروری بر روی سطوح جلوگیری شود. یکی دیگر از روش‌های حذف اکسید غوطه‌ور کردن قطعه در محلول قلیایی قوی می‌باشد ولی با توجه به خورنده بودن این محلول برای جلوگیری از خوردگی سطوح، در زمان استفاده باید دقت زیادی به کار برد. در برخی از صنایع، به‌ویژه هوافضا، حذف نهایی اکسید درست قبل از مونتاژ قطعات به یکدیگر، با روش مکانیکی اقدام به حذف اکسید با استفاده از یک کاردک فولادی یا با سوهان کشی انجام می‌شود و پس از آن اتصال قطعات به یکدیگر در اسرع وقت انجام می‌شود. موارد مذکور روش‌های بسیار موثری برای حذف اکسید از سطوح آلومینیوم هستند. با این حال، آن‌ها وقت‌گیر و پرهزینه هستند و عمدتاً در صنایعی استفاده می‌شوند که تقاضا برای کیفیت بسیار بالا بر هزینه اضافی غلبه می‌کند.



شکل ۱۱- نمونه برس‌های حذف اکسید

### ناپیوستگی‌ها [۱]

حدود پذیرش و تعمیرات مورد نیاز ناپیوستگی‌های نزدیک لبه‌ها مطابق جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱- حدود پذیرش و تعمیر ناپیوستگی‌های لبه برشکاری در ورق

| حدود پذیرش و تعمیر ناپیوستگی‌های لبه برشکاری در ورق                       |                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| شرح ناپیوستگی                                                             | الزامات تعمیر ورق                                                      |
| هر ناپیوستگی به طول ۱ اینچ یا کمتر                                        | نیازی به بررسی نیست.                                                   |
| هرگونه ناپیوستگی با طول بیشتر از ۱ اینچ و بیشینه عمق ۱/۸ اینچ             | عمق ناپیوستگی باید بررسی شود.                                          |
| هرگونه ناپیوستگی با طول بیشتر از ۱ اینچ و با عمق بین ۱/۸ اینچ تا ۱/۴ اینچ | ناپیوستگی حذف شود و نیازی به جوشکاری نیست.                             |
| هرگونه ناپیوستگی به طور کامل حذف و جوشکاری شود.                           | ناپیوستگی به طور کامل حذف و جوشکاری شود.                               |
| هرگونه ناپیوستگی با طول بیشتر از ۱ اینچ و با عمق ۱/۴ اینچ تا ۱ اینچ       | مجموع طول جوشکاری نباید از ۲۰ درصد طول لبه ورق در حال تعمیر تجاوز کند. |
| هرگونه ناپیوستگی با طول بیشتر از ۱ اینچ و با عمق بیشتر از ۱ اینچ          | به موارد ۱ تا ۵ در قسمت ناپیوستگی‌ها مراجعه شود.                       |

برای ناپیوستگی‌های بیش از ۱ اینچ در طول و ۱ اینچ در عمق:  
- هنگامی که یک ناپیوستگی قابل مشاهده در لبه قطعه (مانند W، X یا Y در شکل ۱۲) قبل از جوشکاری مشاهده شود، میزان ناپیوستگی باید با آزمایش غیرمخرب UT تعیین شود.  
- ناپیوستگی قابل قبول است اگر:

$$\text{الف - } ld > 0.2W, AD \leq 0.04AP$$

$$\text{ب - } ld > 0.2W, AD \leq 0.04AP(1 - |ld - 0.2W|/W)$$

AD = مساحت ناپیوستگی = طول ناپیوستگی × عمق ناپیوستگی (یا سطح مجموع ناپیوستگی‌های متعدد)

AP = مساحت قسمت = طول قطعه × عرض قطعه

## تأثیر شکل پین ابزار بر استحکام کششی ناحیه اتصال دو آلیاژ آلومینیوم T3-2024 به T6-7075 به صورت لب به لب با فرایند جوشکاری FSW

سجاد محمدی<sup>۱</sup>، رضا بیگی<sup>۲</sup>، مجید زارع زاده مهریزی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این پژوهش به بررسی ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی سطح اتصال دو آلیاژ آلومینیوم T3-2024 و T6-7075 پرداخته شد. جوشکاری با استفاده از فرایند FSW با ابزاری از جنس فولاد گرمکار در سه شکل پین هندسه ابزار با سطح مقطع استوانه ای، مخروطی و مربعی با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۳۰ میلیمتر بر دقیقه انجام گرفت. جهت بررسی ساختار ناحیه اتصال جوش، میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی استفاده گردید. نتایج بدست آمده، ریزساختاری با اندازه دانه های کشیده شده و رشد کرده در ناحیه HAZ و اندازه دانه های بسیار ریز و باندی شکل در ناحیه اتصال دو ورق که حاوی ترکیبات بین فلزی و رسوبات گوناگون توزیع شده در سطح مقطع اتصال است را نشان می دهد. پس از تحلیل نتایج می توان دریافت، به ترتیب ابتدا سطح مقطع مخروطی، استوانه ای و مربعی شکل تأثیر گذارترین عامل بر استحکام کششی و ناحیه الاستیک سطح جوش هستند. بیشترین استحکام کششی در ناحیه اتصال جوش مربوط به پین هندسه ابزار با سطح مقطع مخروطی به دست آمد. ناحیه شکست در آزمون کشش در منطقه HAZ در آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ اتفاق افتاد.

**کلمات کلیدی:** FSW، پین هندسه ابزار، اتصال آلیاژ آلومینیوم T3-2024 و T6-7075.

### مقدمه

تقاضا برای راندمان بالاتر سوخت به منظور کاهش مصرف سوخت، استفاده از مواد سبک وزن در وسایل نقلیه ای چون اتومبیل، کشتی و هواپیما و ... باعث افزایش استفاده از ترکیب های چند ماده برای طرح های سبک وزن در سال های اخیر شده است. ترکیبات ماده ناگزیر به پیوستن خواهند بود که به دلیل ناسازگاری آن ها در طی فرایندهای جوشکاری ذوبی معمولی مورد استفاده در ساخت وسیله نقلیه، چالش های اساسی را به وجود می آورد. توجه مکرر علمی و تکنولوژی به منظور کاهش وزن و انتشار وسایل نقلیه باعث شد تا در بسیاری از کاربردها که قبلاً تحت سلطه فولاد بودند، از انتشار آلیاژهای آلومینیوم به عنوان یک فلز جایگزین با توجه به فولاد استفاده شود [۱]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) یک روش حالت جامد، جوشکاری است که پتانسیل لازم برای اتصال اجزاء مواد در موارد مختلفی که هزینه ی استفاده از بست ها، چسب ها یا پرچ ها را ممنوع می کند، فراهم می نماید. حضور

ترکیبات بین فلزی متشکل از دو آلیاژ آلومینیوم سری ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ و درشت شدن ترکیبات بین فلزی و رسوبات در مرز و سطح دانه در قسمت های مختلف قطعه جوشکاری شده با فرایند ذوبی باعث ایجاد عیوب در اتصال می شود. ترکیبات به دلیل سختی و شکنندگی زیاد به شدت خواص مکانیکی را کاهش و استحکام اتصال را پایین می آورند [۳]. حضور ترکیبات بین فلزی و رسوبات دارای یک حد بهینه هستند که همین حضور، خود موجب ایجاد اتصال و جوش مناسب است [۵].

در این پژوهش با استفاده از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، اتصال از نوع لب به لب با سه پین هندسه ابزار با سطح مقطع مختلف، سرعت چرخش و پیشروی و فشار ثابت مدنظر قرار گرفت. تست های جوشکاری بر روی ورق های آلیاژی آلومینیوم ۷۰۷۵ و ۲۰۲۴ انجام و در نهایت تست کشش و متالوگرافی در سطح مقطع اتصال جوش انجام شد. برای بررسی دقیق روش های ذکر شده، تصاویری با میکروسکوپ نوری و الکترون روبشی تهیه گردید.

### روش تحقیق

به منظور انجام این تحقیق از ورق های آلیاژ آلومینیوم T3-2024 و T6-7075 استفاده شد. ابعاد ورق ها به طول ۱۰۰ mm و عرض ۵۰ mm با ضخامت ۳ mm بطور یکسان انتخاب شد. در جدول (۱) ترکیب شیمیایی فلزهای پایه مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است.

به منظور اتصال آلیاژهای آلومینیوم T3-2024 و T6-7075 در حالت جامد از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده شده است. در این تحقیق برای جوشکاری از دستگاه فرز استفاده شد. قطعات مطابق شکل (۱) پس از آماده سازی روی صفحه دستگاه توسط گیره ها مهار شدند. آلومینیوم ۷۰۷۵ در سمت پیشرو چرخش هندسه ابزار و آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در سمت پسرو چرخش هندسه ابزار قرار گرفتند.

### هندسه پین ابزار

ابزار مخصوص فرایند، از جنس فولاد گرم کار با مشخصات ذیل در جدول (۲) و ابزارهای استفاده شده در این پژوهش، با سطح مقطع مختلف پین در شکل (۲) نشان داده شده اند. زاویه گیره نگه دارنده متنه، نسبت به حالت عمودی ۲/۵ درجه است. با اعمال نیرو، شانه ابزار به سطح آلومینیوم رسیده و اعمال نیرو متوقف می شود در این حالت، فاصله لبه پین از لبه ورق آلومینیوم در فاصله



2/8 میلی متر است. ابزار به مدت ۴۰ ثانیه به منظور گرم شدن ناحیه اتصال درجا دوران می کند و پس از آن شروع به پیشروی می نماید. پس از رسیدن ابزار به نزدیکی انتهای قطعه، پیشروی آن متوقف و بعد از ۵ ثانیه چرخش درجا بین از قطعه خارج می گردد. برای اتصال دو آلیاژ هم جنس ورق آلومینیوم به یکدیگر تنها یک پاس جوشکاری به عمق ۳ میلی متر انجام شده است.

## بررسی تصاویر ماکروسکوپی

شکل (۴) تصاویر ماکروگرافی جوش با هندسه ابزار مربعی (شکل a)، هندسه ابزار مخروطی (شکل b) و هندسه ابزار استوانه ای (شکل c) را نشان می دهد؛ که نمایانگر طرح کلی ماکروگراف های جوش به دست آمده با سه هندسه بین مختلف است. ناحیه اغتشاش جوش ایجاد شده با بین مربعی (شکل a) از نقص سوراخ و عدم وجود اتصالات در پایین ورق تشکیل شده است. ناحیه اغتشاش جوش ها، متشکل از مناطق تحت تأثیر بین و شانه ابزار، با خطوط شکسته سفید مشخص شده است. همان طور که مشاهده می شود منطقه تحت تأثیر بین از جوش ایجاد شده توسط بین مربعی بزرگتر از سایر موارد است. با تطبیق مشخصات بین و ناحیه تحت تأثیر بین، می توان دریافت که حجم متاثر از بین مربعی در شکل (a) بسیار بزرگتر از ابعاد بین است. بنابراین باید یک سطح مقطع مؤثر در نظر گرفته شود که در این حالت دایره ای با شعاع  $r = d\sqrt{2}$  است که در آن  $d$  لبه سطح مقطع پایین بین مربعی و  $r$  شعاع سطح مقطع مؤثر پایین بین می باشد. با حرکت از پایین بین به سمت شانه، ناحیه تحت تأثیر به تدریج بر شانه مسلط می شود و بین محدودیت های منطقه را تحت تأثیر قرار می دهد تا به حجم بین برسد. این تصویر بطور شماتیک در شکل (a) با یک خط قرمز پوشیده شده روی شکل (۴) نشان داده شده است.

یک نگاه از این تصاویر تفاوت آشکار بین جوش های ایجاد شده توسط بین مربعی با اتصالاتی که با بین های دایره ای و مخروطی ایجاد شده است نشان می دهد. یکی از پارامترهای مهم مورد توجه تغییرات زمانی رسیدن به دمای حداکثر است. متغیرهای سرعت دورانی علاوه بر اثر مستقیم بر روی مقدار دمای حداکثر بر زمان رسیدن به این دما نیز تأثیر دارند. حجم مواد در اطراف بین، درجه حرارت را هنگام جوش تعیین می کند که به نوبه خود ریز ساختار ناحیه جوش را تحت تأثیر قرار می دهد [۷]. حجم بین بر حجم مواد تحت اغتشاش، بوسیله بین تأثیر می گذارد [۸]. بین مربعی دارای لبه های تیز می باشد که مواد اطراف ابزار تمایل دارند به جای تغییر شکل پلاستیک، برش داده شوند [۷].

## بررسی آزمون کشش

جهت بررسی آزمون کشش نمونه های آماده سازی شده طبق استاندارد ASTM-E8 مطابق شکل (۵) به صورت عرضی در جهت جوشکاری آماده سازی شدند. نمونه ها با استفاده از دستگاه تست کشش یونیورسال دو ستونه ۲۰ تن با سرعت ۱ میلی متر بر دقیقه

مورد آزمایش قرار گرفتند.

به منظور جمع بندی میحت آزمون کشش و همچنین مقایسه بهتر بین استحکام اتصال های صورت گرفته با فرایند FSW، نمودار (۱) مقایسه بین نوع بین هندسه ابزار، در سرعت های دورانی و پیشروی ثابت به عنوان داده های آزمون انجام شده است. بیشترین استحکام کششی و الاستیک اتصال مربوط به بین مخروطی و کمترین استحکام کششی و الاستیک اتصال مربوط به بین مربعی می باشد. سطح مقطع بین مخروطی در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۳۰ میلی متر بر دقیقه دارای عملکرد مناسب بوده که علت این امر وجود حجم بیشتر بین در قسمت شولدر می باشد و باعث افزایش و اغتشاش بیشتر در ناحیه اتصال می گردد. انحلال رسوبات و ترکیبات بین فلزی ایجاد شده در ناحیه اتصال، تمرکز حرارتی بالاتر و توزیع حرارت یکنواخت تر در سطح اتصال و افت دما با شیب ملایم نسبت به دو سطح مقطع بین استوانه ای و مربعی، باعث افزایش استحکام کششی اتصال می گردد.

به منظور محاسبه حجم مؤثر بین، سطح مقطع بین در مقابل فاصله از پایین بین به اندازه ۱/۵ میلی متر از پایین به عنوان منطقه غالب بین در نظر گرفته شده و حجم مؤثر هر بین در شکل (۶) محاسبه و ارائه شده است.

شکل (۷-a) نمونه کششی اتصال با هندسه ابزار مربعی را نشان می دهد. سه ناحیه مجزا (A، B و C) در محل شکست اتصال مشاهده می شود. مسیر شکستگی در تصویر، شماتیک محل اتصال دو آلیاژ در شکل (۷-b) نشان داده شده است. شکل (۷-c) تصویر SEM از سطح شکست محل اتصال را نشان می دهد. منطقه A از آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ تشکیل شده که از منطقه اغتشاش دچار شکست شده است. ناحیه B از طریق تشکیل ساختار باندی شکل که از نقایص لایه ای دارای چگالی کم و زیاد و حفره تشکیل شده، شکست خورده است (نقص در شکل (۷-d) نشان داده شده است). این نقص ها همچنین روی سطح شکست اتصال نشان داده شده در شکل (۷-c) مشهود است. منطقه (c) از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در ناحیه اغتشاش تشکیل شده که دچار شکست شده است. استحکام و انعطاف پذیری کم ناحیه اتصال نمونه های تولید شده با بین مربعی به این نقص ها مربوط می شوند که با ساختار باندی شکل در منطقه اغتشاش همراه است. تأثیر ریز ساختار پیچیده باندی شکل در اتصال با فرایند FSW در آلیاژ آلومینیوم T3-2024 عمدتاً دارای سختی متاثر از توزیع ذرات رسوب می باشد و اندازه دانه ها در ناحیه جوش تأثیر کمتری دارد [۶].

شکستگی اتصال از عیب ریشه در ناحیه A شروع و به عنوان یک شکست پلاستیکی - برشی خالص، در منطقه اغتشاش آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در منطقه B در شکل (۷) ادامه دارد. انتشار شکست در منطقه B به دلیل مقاومت پایین تر آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ و رسوبات درشت تر است. مقاومت کم و استحکام کششی به دست آمده به این نقص ریشه نسبت داده می شود. این روند شکستگی در اتصال با هندسه ابزار استوانه ای مشاهده شد که نقص ریشه در آن

مخلوط نشده باشد جوش ها به راحتی می توانند تخلخل ایجاد کنند. علاوه بر این راندمان جوش برای اغتشاش ابزارهای فلزی باعث تسریع در سایش ابزار می شود. استفاده از حجم موثر پین با توجه به سایر مشخصات پین بیشترین دقت و اهمیت را در پیش بینی استحکام کششی دارد. شکل ظاهری و سلامت جوش از نظر خواص مکانیکی تقریباً نسبت به سرعت پیشروی جوش حساس نیست، اما به سرعت دورانی ابزار بسیار وابسته است و روند این وابستگی بسیار تحت تأثیر هندسه ابزار می باشد. صرف نظر از هندسه ابزار، نقص ریشه در سرعت چرخشی وجود دارد که در سرعت چرخشی بالاتر از بین می رود. رسوبات موجود در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در منطقه اغتشاش به طور ریز و یک دست توزیع می شوند. این امر به دلیل فشار و درجه حرارت بالاتر در سمت پیشروی است. مشخص نیست که آیا این رسوبات از شکستگی رسوباتی که قبلاً وجود داشته اند یا ناشی از محلول و پیرسختی طبیعی متعاقب آن ناشی می شود. رسوبات موجود در آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در منطقه اغتشاش درشت و غیر یکنواخت هستند. این در شرایطی است که فشار و درجه حرارت پایین در قسمت عقب نشینی کافی برای ایجاد پالایش یا حل شدن رسوبات نیست.

## منابع

- 1-Mishra R.S., " Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R 50 (2005).
- 2-P. CAVALIERE?, E. CERRI-Mechanical response of 2024-7075 aluminium alloys joined by Friction Stir Welding-JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 40(2005)3669 - 3676.
- 3-M. Ericsson, R. Sandstrom, " Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG", International Journal of Fatigue 25 (2003).
- 4-M.A. Sutton , B.Yang, A.P.Reynolds, R.Taylor "Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum", Materials Science and Engineering A323 (2002).
- 5-Liu, F., et al., A review of friction stir welding of steels: Tool, material flow, microstructure, and properties. Journal of Materials Science & Technology, 2018. 34(1): p. 39-57.
- 6- Bertrand, R., et al., Analysis of AA2XXX/AA7XXX friction stir welds. Journal of Materials Processing Technology, 2019. 271: p. 312-324.

## پی نوشت

- 1- کارشناسی ارشد مهندسی مواد- دانشگاه اراک
- 2- استادیار دانشگاه اراک
- 3- استادیار دانشگاه اراک

وجود داشت. پین هندسه ابزار مربعی نسبت به استوانه ای و مخروطی دارای کمترین میزان استحکام کششی و کرنش بوده که این امر به علت گوشه های تیز پین می باشد که بجای ایجاد ناحیه پلاستیکی - حرارتی (خمیری) باعث براده برداری از ناحیه اتصال می گردد. همچنین میزان سیلان عمودی نسبت به سیلان افقی کم بوده و یا به عبارتی میزان نفوذ و اغتشاش در ناحیه ریشه اتصال (دورترین نقطه نسبت به سطح پیشانی هندسه ابزار) کم و باعث تشکیل ساختار پیازی شکل می گردد. شکل (۸) تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM در حالت BSE از منطقه اغتشاش ناحیه اتصال که با پین استوانه ای ایجاد شده است را نشان می دهد. عدم ادغام دو ماده در ریشه اتصال در شکل (۸-a) قابل مشاهده است. این نوع نقص در اثر بی ثباتی مواد در فرایند مشاهده می شود و منجر به عدم انسجام در کل خط اتصال مشترک می گردد [۱۰]. استحکام کششی و کرنش اتصالات ایجاد شده بدون در نظر گرفتن نوع پین هندسه ابزار کمترین مقدار را دارند، این عیب را عیب ریشه می نامند. شکل (۹-a و ۹-b) نمونه کششی و شمشاتیک شکست نمونه آزمایش با هندسه ابزار پین مخروطی را نشان می دهد. شکست در حالت برشی خالص در منطقه متأثر از حرارت آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ اتفاق افتاده است که در آن ها هیچ گونه عیبی در منطقه اغتشاش مشاهده نشد.

اثرات حرارتی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ایجاد شده باعث نرم شدن، انحلال و درشت شدن رسوبات در منطقه HAZ می شود. انحلال و درشت شدن رسوبات به دلیل درجه حرارت بالاتر در اثر حجم پین و سرعت دورانی بالا تلقی می شود. از این رو نمونه جوش داده شده با پین مخروطی با عدم وجود عیب، دارای استحکام تسلیم پایین تری نسبت به دو پین استوانه ای و مربعی دارد. استفاده از ویژگی های مختلف پین و ارزیابی مدل با داده های تست و مطابقت مقادیر استحکام کششی با ماکروگراف های مربوط به جوش ها، منجر به تعریف ویژگی بارز پین شد. این ویژگی به عنوان حجم موثر پین تعیین می شود که میزان منطقه تحت تأثیر پین در منطقه اغتشاش را تعیین می کند. به عبارت دیگر در میان ویژگی های مختلف، پارامتری که می تواند از نظر جسمی میزان جریان مواد هدایت شده با پین در منطقه اغتشاش را توصیف کند، می تواند استحکام کششی را به بهترین وجه پیش بینی کند. در این مدل عوامل تعیین کننده مانند شکل گیری نقص و اثرات حرارت بر روی منطقه متأثر از حرارت به صورت ضمنی در نظر گرفته می شود تا پارامترهای بهینه برای به دست آوردن حداکثر استحکام کششی بدست آید.

## نتیجه گیری

اگر هندسه ابزار پین به اندازه کافی با آلیاژ خمیری شده آلومینیوم

# Welding Research

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلزات مورد استفاده در تحقیق

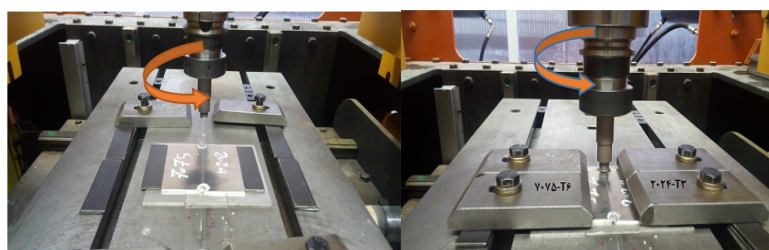
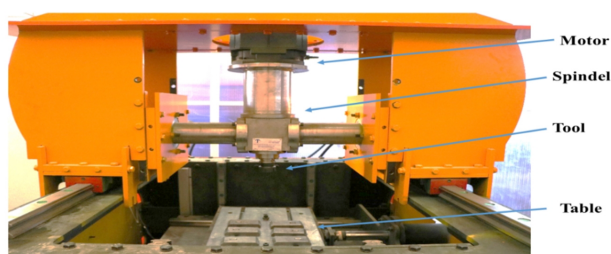
| عنصر فلزی | Al   | Si   | Fe  | Cu   | Mn   | Mg   | Cr   | Ni   | Zn   | Ti    |
|-----------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|-------|
| ۲۰۲۴-T۳   | ۹۳/۱ | /۰۹۴ | /۱  | ۴/۴۴ | /۵۳۳ | ۱/۵۵ | /۰۲  | /۰۰۸ | /۰۷۱ | /۰۴۷  |
| ۷۰۷۵-T۶   | ۸۹/۴ | /۰۸۸ | /۱۴ | ۱/۶  | /۰۴۴ | ۲/۷  | /۱۸۵ | /۰۰۴ | ۵/۷۷ | /۰۳۷۸ |

جدول ۲- ترکیب شیمیایی ابزار مورد استفاده در تحقیق

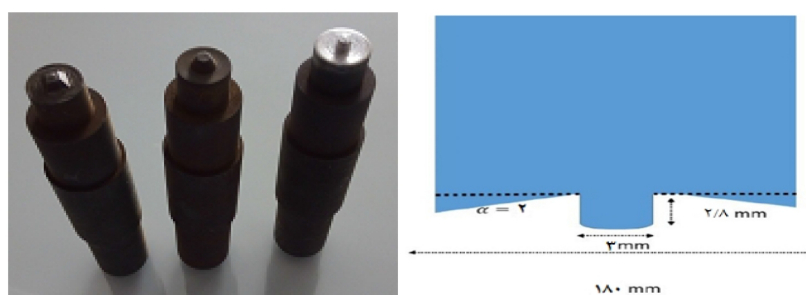
| عنصر فلزی         | C   | Si | Mn | Mo  | Cr  | V | HRC |
|-------------------|-----|----|----|-----|-----|---|-----|
| فولاد گرم کار H۱۳ | /۴۲ | ۱  | /۴ | ۱/۳ | ۵/۳ | ۱ | ۵۹  |

جدول ۳- حجم موثر پین

| پین                        | مربعی | مخروطی | استوانه ای |
|----------------------------|-------|--------|------------|
| حجم موثر پین $\text{mm}^3$ | ۲۵    | ۱۵     | ۱۰         |

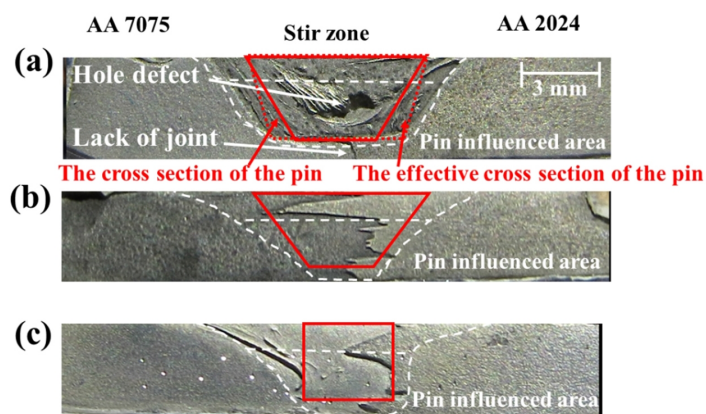


شکل ۱- فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از دستگاه فرز

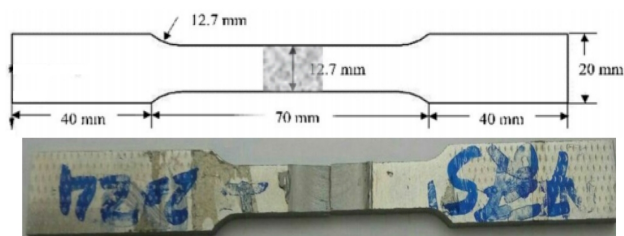


شکل ۲- هندسه و ابعاد پین ابزار مورد استفاده به صورت شماتیک در روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

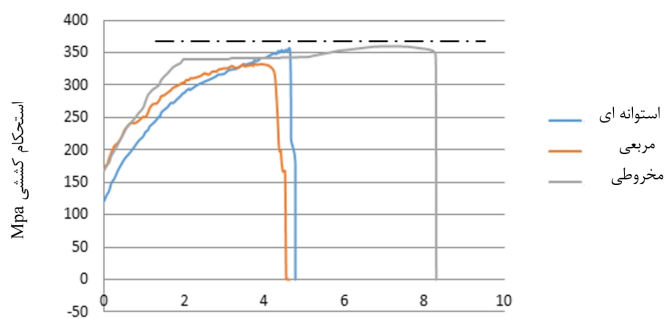
# Welding Research



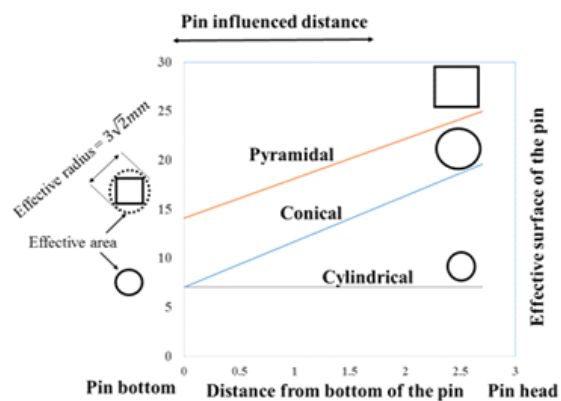
شکل ۳- تصاویر ماکروگرافهای جوش توسط سه هندسه پین مختلف



شکل ۴- قطعه نمونه سازی شده جهت تست کشش



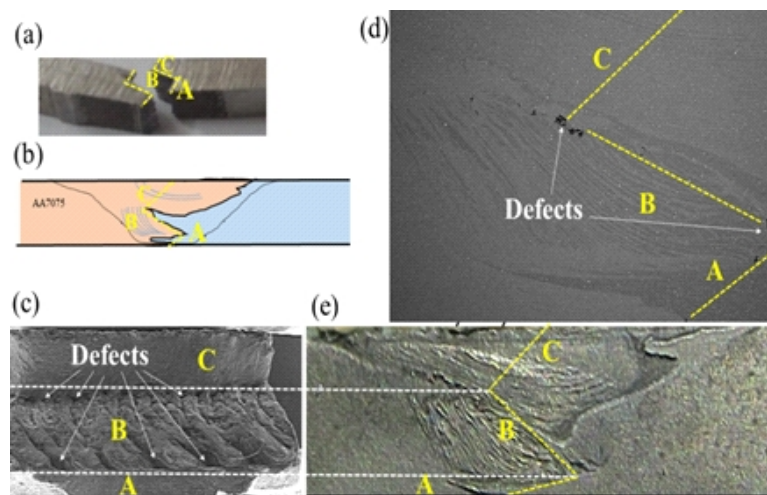
شکل ۵- تاثیر نوع هندسه ابزار بر استحکام ناحیه اتصال



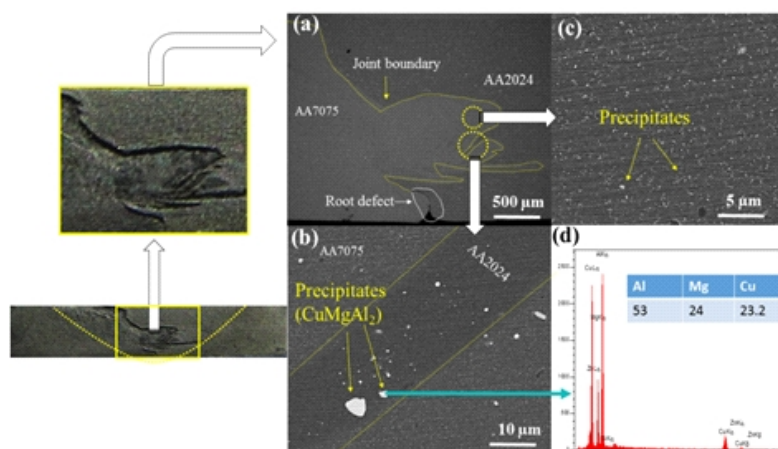
شکل ۶- محاسبه سطح موثر هر پین در مقابل فاصله از پایین پین



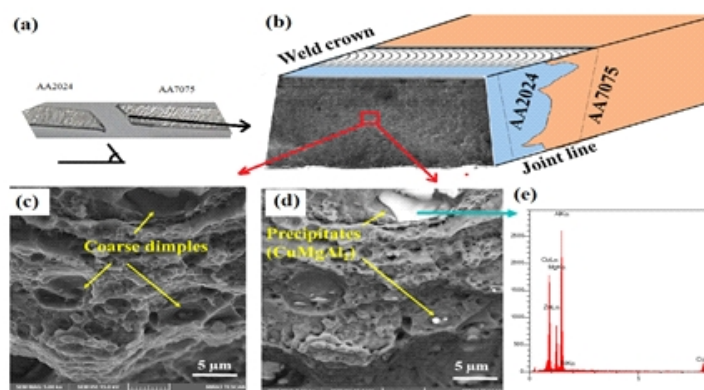
# Welding Research



شکل ۷- پین مربعی  
a- نمونه شکست تحت استحکام کششی b- شماتیک محل اتصال دو آلیاژ d و c- تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از ناحیه سطح شکست محل اتصال



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی در حالت BSE و آنالیز خطی در لایه های باندی شکل تشکیل شده و توزیع عناصر آلیاژی در محل اغتشاش ناحیه اتصال با پین استوانه ای



شکل ۹- a- نمونه کششی b- شماتیک شکست c و d- تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از سطح شکست e- آنالیز خطی

## تأثیر سیم جوش بر خواص مکانیکی اتصال آلیاژهای آلومینیوم غیر مشابه جوش داده شده با فرایند جوشکاری قوسی تنگستنی - گاز محافظ

ابراهیم حسینی پناه<sup>۱</sup>، قاسم عظیمی رویین<sup>۲</sup>

### چکیده

این مطالعه یک فلز پرکننده مناسب را برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم غیر مشابه AA6061 و AA5083 با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی تنگستنی - گاز محافظ (TIG) ارائه می کند. جوشکاری TIG جهت اتصال لب-لب آلیاژهای آلومینیوم AA6061 و AA5083 با سه سیم جوش مختلف انجام گرفت. سپس آزمایشاتی به منظور بررسی خواص مکانیکی انجام شد. اثرات فلزات پرکننده مختلف بر روی اتصالات جوشی با بررسی ظاهر جوش، سختی و استحکام آن ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مشخص شد که جوشکاری با استفاده از سیم جوش ER5356 بالاترین استحکام کششی نهایی (۱۷۵ مگاپاسکال) را در مقایسه با اتصالات ایجاد شده با سیم جوش های ER4043 و ER5183 با مقادیر استحکام کششی نهایی ۱۶۷ و ۱۶۶ مگاپاسکال، تولید می کند. می توان نتیجه گرفت که جوشکاری TIG با استفاده از پرکننده ER5356 در مقایسه با ER4043 و ER5183 منجر به ایجاد اتصال بهتری می شود.

**کلمات کلیدی:** آلیاژ آلومینیوم، جوشکاری، فلز پرکننده، خواص مکانیکی.

### مقدمه

آلومینیوم فلزی با چگالی  $2.7 \text{ g/cm}^3$  می باشد. یعنی چگالی آن حدود یک سوم فولاد است اما در عین حال، آلیاژهای آلومینیوم معمولاً دارای استحکام بالایی هستند و در واقع، نسبت استحکام به وزن بالایی دارند. با آلیاژسازی می توان استحکام را تا بیش از ۵۰ برابر افزایش داد. مقاومت به خوردگی، چکش خواری، قابلیت انعطاف پذیری، شکل پذیری، رسانایی الکتریکی و گرمایی خوب از دیگر خواص آلومینیوم می باشد. آلیاژهای آلومینیوم مبتنی بر منیزیم (سری ۵۰۰۰)، آلیاژهای غیرقابل عملیات حرارتی با استحکام متوسط، شکل پذیری بالا، مقاومت به خوردگی عالی و جوش پذیر هستند. آلیاژهای کار شده آلومینیوم/منیزیم به عنوان مواد ساختاری در کاربردهای دریایی، خودروسازی، هوا فضا و برودتی استفاده می شوند. این مواد استحکام خود را عمدتاً از طریق استحکام بخشی محلول جامد با منیزیم بدست می آورند که حلالیت قابل توجهی در حالت جامد در آلومینیوم دارد [۱]. در کاربردهایی که نیاز به استحکام متوسط تا بالا می باشد، آلیاژ Al-Mg-Si (سری ۶۰۰۰)، یکی از آلیاژهای پر کاربرد قابل عملیات

حرارتی است که ویژگی های چقرمگی خوبی نیز دارد. عناصر آلیاژی اصلی یعنی منیزیم و سیلیکون استحکام آلیاژ را از طریق رسوب سختی افزایش می دهند. این نوع آلیاژها همچنین قابلیت پیرسختی دارند و معمولاً برای ایجاد استحکام مورد نیاز در شرایط دمایی T4 (پیرسازی طبیعی) و T6 (پیرسازی مصنوعی)، عملیات حرارتی می شوند. آلیاژهای Al-Mg-Si به طور گسترده در اجزای حمل و نقل، تجهیزات ماشین آلات، محصولات تفریحی و کالاهای بادوام استفاده می شوند [۲].

یکی از پر کاربردترین و شاید مهم ترین آلیاژ سری ۵xxx، آلیاژ ۵۰۸۳ می باشد. آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ بالاترین استحکام مکانیکی را در بین آلیاژهای غیرقابل عملیات حرارتی دارد. این آلیاژ جوش پذیری مناسبی دارد و پس از جوشکاری همچنان استحکام خود را حفظ می کند. به لحاظ خواص خوردگی، آلیاژ ۵۰۸۳ مقاومت مناسبی از خود نشان می دهد و نسبت به آب دریا و محیط های شیمیایی بسیار مقاوم است. به همین دلیل از این آلیاژ ورق هایی تهیه می شود که قابلیت استفاده در بدنه کشتی ها، مخازن نگهداری مواد شیمیایی، مخازن نگهداری مواد غذایی، بدنه قطار و خودرو را دارند.

پر استحکام ترین و می توان گفت پر کاربردترین آلیاژ گروه ۶xxx، آلیاژ ۶۰۶۱ می باشد که به طور گسترده در ساخت سازه های دریایی، قاب های کامیون، لوله های توخالی، بدنه دوچرخه و واگن های قطار کاربرد دارد. این آلیاژ قابلیت ماشین کاری بالایی دارد و به راحتی به روش های TIG و فلز با گاز محافظ خنثی (MIG) جوشکاری می شود.

در حالت کلی آلیاژهای سری ۶xxx نسبت به ترک خوردن فلز جوش به خصوص هنگامی که فلز جوش غنی از فلز پایه باشد، مثلاً در پاس ریشه، حساس هستند. خوشبختانه به راحتی می توان از ترک خوردن با استفاده از سیم های پرکننده حاوی مقادیر بالای سیلیسیم مانند سیم جوش ۴۰۴۳ و یا با سیم های حاوی مقادیر زیاد تر منیزیم مانند ۵۳۵۶ جلوگیری نمود.

قطعات آلومینیومی را می توان با انواع روش ها همچون ریخته گری، پرس کاری، اکستروژن، نورد و انواع روش های ماشین کاری مانند تراشکاری، فرز کاری، برش سیم داغ، لیزر و ... تهیه نمود و این امر سبب می شود تا بتوان متناسب با خواص مکانیکی و متالورژیکی مورد نیاز، بهترین و ارزانه ترین روش برای ساخت قطعات را انتخاب نمود. با این وجود بطور کلی یکی از محدودیت های بزرگ در مورد آلیاژهای آلومینیوم، جوش پذیری کم آن ها است [۳] که منجر به ایجاد محدودیت هایی در کاربردهای صنعتی آلیاژهای آلومینیوم شده

سیم جوشی که خواص مطلوب تری را می دهد قابل شناسایی می باشد. هدف این پژوهش آن است که با استفاده از مطالعات انجام شده و انجام آزمون های آزمایشگاهی و تجربی، سیم جوشی مناسب برای جوشکاری دو آلیاژ آلومینیوم  $5083H12$  و  $6061T6$  را معرفی کند. بنابر آنچه که گفته شد، ضروری است بررسی گردد در صورتی که لازم باشد این دو آلومینیوم به یکدیگر متصل شوند، کدام یک از سیم جوش های  $5083H12$  و  $5083H12$  یا  $6061T6$  خواص مطلوب تری ایجاد خواهند کرد.

## مواد و روش پژوهش

برای انجام این تحقیق ورق های از آلیاژهای آلومینیوم  $5083H12$  و  $6061T6$  با ضخامت  $5mm$  و همچنین سیم جوش های  $ER4043$ ،  $ER5356$  و  $ER5183$  تهیه گردید، که ترکیب شیمیایی آن ها در جدول (۱) آورده شده است.

برای جوشکاری و آماده سازی نمونه ها ابتدا از هر ورق آلومینیوم سه قطعه  $100 \times 100 mm^2$  با استفاده از گیوتین برش داده شد. سپس ورق ها بر اساس استاندارد  $ASME SEC IX$  برای جوش پلیت به صورت لب به لب، مطابق شکل (۱-الف) به کمک دستگاه  $CNC$  ماشین کاری شدند. پس از خشک کردن و تمیز کردن سطوح آلومینیوم، به منظور حذف لایه اکسیدی، قطعات به مدت یک دقیقه درون محلول هیدروکسید سدیم قرار گرفتند و سپس درون محلول اسید نیتریک قرار داده شده و پس از آن با آب سرد شست و شو شدند. با توجه به آنکه طبق استاندارد، قطعات باید بلافاصله پس از چربی زدایی و تمیزکاری جوشکاری شوند و حداکثر تا ۴ ساعت تاخیر مجاز است، بلافاصله پس از تمیزکاری قطعات با سیم جوش های  $ER5356$ ،  $ER4043$  و  $ER5183$  توسط فرایند  $TIG$  جوشکاری شدند (شکل ۲). همچنین قابل ذکر است که برای رعایت شدن فاصله ۲ میلی متری دو ورق از یکدیگر (شکل ۱-الف)، از نگهدارنده های مناسب در حین جوشکاری استفاده شد تا امکان حرکت آن ها در جهات مختلف از بین برود. درز اتصال بین دو ورق با چند پاس جوش پر گردید. در اکثر مواقع، پاس ریشه از سمت پشت ورق ها دارای تخلخل می باشد که می تواند محل تمرکز تنش و شکست واقع شود؛ به همین منظور، سطح ناهموار پاس ریشه جوش در پشت ورق ها سنگ زنی شد تا همسطح ورق ها شده و تخلخل ها، منافذ گازی و ترک های آن حذف شوند. پس از سنگ زنی، به روش آزمون ذرات مغناطیسی سلامت سطح سنگ خورده پاس ریشه جوش بررسی شد. در صورت عدم وجود عیوب، پاس های بعدی انجام شد. پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده است.

قبل از بررسی خواص مکانیکی می بایست از سلامت جوش ایجاد شده اطمینان حاصل شود. برای این کار از آزمون آلتراسونیک استفاده شد. پس از اطمینان از سلامت جوش، به منظور بررسی خواص مکانیکی اتصالات ایجاد شده، آزمون کشش عرضی و آزمون سختی سنجی ویکرز بر روی نمونه ها انجام گرفت. جهت انجام آزمون کشش عرضی در مرحله اول لازم است نمونه های آزمون کشش در

است [۴]. مشکلات جوشکاری آلومینیوم را می توان به وجود اکسیدها، ضریب انتقال و ضریب انبساط حرارتی بالای آلیاژهای آلومینیوم نسبت داد. این مشکلات در مورد آلیاژهای آلومینیوم قابل عملیات حرارتی بیشتر نمایان می شود. این امر به این دلیل است که چرخه های حرارتی اعمال شده در ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش برای مکانیزم استحکام بخشی از طریق پراکنده سازی رسوبات، مضر هستند [۵]. انتخاب فلز پرکننده برای تولید اتصالات با استحکام بهینه و بدون ترک بسیار مهم است. برخلاف انتخاب سیم جوش ها برای جوشکاری فولاد، که فلز پرکننده از نظر ترکیب، مقاومت به خوردگی و ظاهر مشابه فلز پایه است، آلیاژهای آلومینیوم اغلب با فلز پرکننده ای که در تعدادی با همه این ویژگی ها با فلز پایه مشابه نیست، جوشکاری می شوند. در انتخاب سیم جوش علاوه بر انتخاب بر اساس استحکام و مقاومت به ترک خوردن، انتخاب باید شامل تشابه رنگ، مقاومت به خوردگی و پاسخ به آنادایزینگ نیز باشد.

در سال ۲۰۱۳، ورما و همکاران [۶] به بررسی اثر فلزهای پرکننده  $ER4043$  و  $ER5356$  بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژهای غیرمشابه آلومینیوم  $O-5083$  و  $T6-6061$  به روش جوشکاری  $MIG$  پرداختند. آنچه در انجام این تحقیق آزمایشگاهی با آن برخورد گردیده است تاثیر بسیار زیاد تفاوت در هدایت حرارتی فلزات پایه بر سلامت جوش بوده است. اختلاف در هدایت حرارتی فلزات پایه غیرمشابه سبب می شود، گرمای تولید شده با قوس به راحتی درون فلز پایه با هدایت حرارتی بالاتر جریان یابد و ذوب فلز پایه به خوبی انجام نگیرد. این موضوع سبب عدم همجوشی فلز جوش و فلز پایه گردیده و عیوبی همچون ترک خوردگی کناره های جوش و یا ذوب ناقص را به همراه دارد. پس از انجام آزمون های خواص مکانیکی و بررسی ریزساختار، این نتیجه بدست آمده است که سیم جوش  $ER5356$  قادر به افزایش خواص مکانیکی و بهبود ریزساختار ایجاد شده در مقایسه با سیم جوش  $ER4043$  می باشد؛ به گونه ای که بیان شده است، سیم جوش  $ER5356$  می تواند تا ۲۸ درصد استحکام کششی و تا ۶۷ درصد سختی فلز جوش را افزایش دهد. همچنین در سال ۲۰۱۴، غفارپور و همکاران [۷] به بررسی و ارزیابی اتصالات غیرمشابه در آلیاژهای آلومینیوم  $H12-5083$  و  $T6-6061$  به روش جوشکاری  $TIG$  و جوشکاری همزن اصطکاکی پرداختند. آنچه مشاهده شده این است که تغییر پارامتر گرمای ورودی جوشکاری به شدت بر روی خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی اثرگذار است. در هر دو روش با افزایش دما تا حدودی معین، استحکام کششی افزایش می یابد. اما مشاهده گردیده است که در صورتی که گرما از حد معین بالاتر رود به دلیل تشکیل فازهایی در ساختار فلز پایه، استحکام کششی کاهش می یابد.

به دلیل خواص بسیار متنوع آلیاژهای آلومینیوم، در بسیاری از مواقع لازم است جهت صرفه جویی اقتصادی، رسیدن به خواص مطلوب و ... دو آلیاژ مختلف آلومینیوم به یکدیگر اتصال یابند. هنگامی که فلزات پایه جوش با یکدیگر متفاوت باشند انتخاب سیم جوش با چالش هایی همراه است و معمولاً فقط به روش تجربی و آزمایشگاهی

جهت عرضی و عمود بر خط جوش تهیه شوند. پس از سنگ زنی نمونه‌ها، بر اساس استاندارد **ASTM E8** (شکل ۱-ب) نمونه‌های آزمون کشش عرضی از درون صفحات جوش با برش لیزر استخراج گردید (شکل ۳).

قابل ذکر است که برای هر کدام از سیم جوش‌ها، سه عدد نمونه آزمون کشش تهیه شد. آزمون‌های کشش عرضی با دستگاه کشش محوری ۵ تنی **SANTAM-STM50** در دمای اتاق و با نرخ کرنش ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. همچنین آزمون سختی سنجی ویکرز با دستگاه سختی سنج یونیورسال **WOLPERT** و در دمای محیط با نیروی ۱۰۰ نیوتون انجام گرفت.

## نتایج و بحث

برای بررسی سلامت جوش از هرگونه عیوب سطحی و غیرسطحی علاوه بر آزمون بازرسی با مایع نافذ، آزمون آلتراسونیک نیز بر روی درز اتصال جوشکاری شده، انجام گرفت. نتایج حاصل از این آزمون در شکل (۴) ارائه شده است. همانطور که در مشاهده می‌گردد، جوشکاری ورق‌ها با استفاده از سیم جوش‌های **ER4043**، **ER5356** و **ER5183** بدون عیب و کاملاً سالم می‌باشند.

آزمون کشش عرضی نمونه‌های جوشکاری شده، در دمای اتاق و با نرخ کرنش **5 mm/min** و با استفاده از دستگاه آزمون کشش محوری ۵ تن مدل **santam-stm50** انجام گرفت. در نمونه‌های جوشکاری شده به وسیله هر سه سیم جوش شکست در محل خط جوش رخ نداد و نمونه‌ها با یک فاصله از خط جوش و در منطقه متأثر از حرارت سمت **II** (سمت فلز پایه ۶۰۶۱)، دچار شکست شدند (شکل ۵). دلیل این مورد ممکن است ناشی از گرمای ورودی بیش از حد به دلیل جوشکاری چند پاسه باشد [۷].

استحکام کششی و درصد ازدیاد طول بر اساس میانگین حاصل از سه نمونه کشیده شده، در شکل ۶ ارائه شده است. همچنین نمودارهای نیرو- جابه‌جایی حاصل از آزمون کشش در شکل (۷) آورده شده است. میانگین استحکام کششی نمونه‌های حاصل از جوش‌های ایجاد شده با سیم جوش‌های **ER4043**، **ER5356** و **ER5183** به ترتیب ۱۶۷، ۱۷۵ و ۱۶۶ مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان نمود استفاده از سیم جوش **ER5356** منجر به ایجاد جوشی با استحکام کششی بالاتر می‌شود. البته قابل ذکر است که استحکام کششی هر سه نمونه نسبت به استحکام کششی هر دو فلز پایه اولیه کمتر می‌باشد. شبیه به این نتایج در تحقیقات دیگر محققین هم گزارش شده است [۷-۸]. اکثر محققین دلیل این اتفاق را از بین رفتن اثرات مکانیزم‌های استحکام‌بخشی در هر دو آلیاژ در منطقه جوش (درز اتصال) بواسطه ذوبی که در این منطقه صورت می‌گیرد، ذکر نموده‌اند که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. همچنین چند پاسه بودن فرایند جوشکاری می‌تواند منجر به درشت ساختاری شود. در واقع گرمای ورودی بیش از حد به خصوص در جوشکاری چند پاسه نه تنها منجر به اصلاح ساختار نمی‌شود بلکه درشت شدن دانه‌های دندریتی و جدایش بین دندریتی را هم به دنبال خواهد داشت [۷].

با این وجود استفاده از سیم جوش **ER5356** نسبت به دو سیم جوش دیگر استحکام کششی بالاتری را به دنبال دارد. یکی از دلایل افزایش استحکام در این نمونه می‌تواند به دلیل ریزساختار ریزتر این نمونه نسبت به دو نمونه دیگر باشد [۹]. قابل ذکر است که چندین محقق گزارش کرده‌اند که استفاده از سیم جوش **ER5356** منجر به ساختاری ریزدانه‌تر در منطقه فلز جوش می‌شود [۶، ۹ و ۱۰]. معمولاً مشخص است که اندازه دانه ریزتر، اتصال بهتری را ایجاد می‌کند. به طور کلی، دانه‌های ریز هم‌محور تمایل به بهبود خواص مکانیکی جوش به همراه کاهش ترک خوردگی انجمادی را دارند [۱۱]. بر اساس معادله هال-پچ [۱۲]، استحکام کششی مواد

فلزی نسبت معکوس با اندازه  $\sigma_0 + k d^{-1/2}$  چگین گزارش شده که استفاده از سیم جوش **ER4043** ممکن است منجر به عیب نفوذ ناقص در ریشه جوش شود [۶]. درصد ازدیاد طول از نمودارهای نیرو- جابه‌جایی محاسبه شد و یک مقدار متوسط بر اساس سه مقدار بدست آمده (برای هر سیم جوش)، گزارش شد (شکل ۶). درصد ازدیاد طول نمونه‌های حاصل از جوش‌های ایجاد شده با سیم جوش‌های **ER4043**، **ER5356** و **ER5183** به ترتیب  $4/51$  و  $4/53$  و  $4/51$  درصد می‌باشد. ازدیاد طول از طول سنججه نمونه‌های کششی محاسبه شده که شامل چندین بخش یعنی دو فلز پایه مختلف، دو تا منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش می‌باشد. هر قسمت در اثر تغییر شکل به مقدار کل ازدیاد طول نمونه کمک می‌کند. از این رو، ازدیاد طول گزارش شده، ازدیاد طول کل نمونه است و فقط برای مقایسه شکل‌پذیری نمونه‌ها استفاده می‌شود. استفاده از سیم پرکننده **ER5356** در ساخت اتصالات، درصد ازدیاد طول را تا  $5/51$  درصد افزایش داد.

آزمون سختی ویکرز در سه مکان مختلف (بالا، وسط و پایین) فلزات جوش، منطقه متأثر از حرارت سمت **I** و منطقه متأثر از حرارت سمت **II** انجام شد. مقادیر متوسط سختی برای نمونه ۱ (جوش داده شده با سیم پرکننده **ER4043**)، نمونه ۲ (جوش داده شده با سیم پرکننده **ER5356**) و نمونه ۳ (جوش داده شده با سیم پرکننده **ER5183**) در جدول (۳) نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود سختی در ناحیه فلز جوش در سه نمونه حاصل از سیم جوش‌های **ER5356**، **ER4043** و **ER5183** نسبت به بقیه مناطق کمتر می‌باشد. همانطور که قبلاً بیان شد آلیاژ **۵۰۸۳** یک آلیاژ غیرقابل عملیات حرارتی می‌باشد که از طریق کار سختی، سخت می‌شود و همچنین آلیاژ **۶۰۶۱** یک آلیاژ قابل عملیات حرارتی می‌باشد که مکانیزم استحکام‌بخشی آن از طریق رسوب‌سختی می‌باشد.

در منطقه جوش، هر دو آلیاژ ذوب شده و امتزاج دو آلیاژ صورت می‌گیرد و به واسطه این ذوب شدن اثرات مکانیزم‌های استحکام‌بخشی در هر دو آلیاژ از بین می‌رود (هم اثر کار سرد و هم اثر رسوب سختی) که این اتفاقات منجر به کاهش استحکام و سختی در منطقه جوش خواهد شد. در هر سه نمونه، منطقه متأثر از حرارت سمت **I** (سمت فلز پایه **۵۰۸۳**) نسبت به



اتصالات بهتری نسبت به ER4043 و ER5183 ایجاد می‌کند.

## تقدیر و تشکر

از شرکت سلمانیان فارس جهت حمایت مالی از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.



## مراجع

- 1-Lathabai S and Lloyd PG. The effect of scandium on the microstructure, mechanical properties and weldability of a cast Al-Mg alloy. *Acta Mater* 2002; 50: 4275-4292.
- 2-Oladele IO and Omotoyinbo JA. Evaluating the influence of ageing temperature on the mechanical properties of Al-Mg-Si alloy. *J Min Mater Character Eng* 2011; 10(14): 1285-1292.
- 3-Rajakumar S, Muralidharan C and Balasubramanian V. Predicting tensile strength, hardness and corrosion rate of friction stir welded AA6061-T6 aluminum alloy joints. *Mater Des* 2011; 32: 535-549.
- 4-Martukanitz RP. *ASM handbook - welding, brazing and soldering*. ASM Handbook Committee, 1990, pp.1782-1836.
- 5-Norman AF, Drazhner V and Prangnell PB. Effect of welding parameters on the solidification microstructure of autogenous TIG welds in an Al-Cu-Mg-Mn alloy. *Mater Sci Eng A* 1999; 259: 53-64.
- 6- Verma, R and Pandey, K and Sharma, Y, "Effect of ER4043 and ER5356 filler wire on mechanical properties and microstructure of dissimilar aluminium alloys, 5083-O and 6061-T6 joint, welded by the metal inert gas welding", *Engineering Manufacture*, 2015, Vol. 229(6) pp. 1021-1028.
- 7-Ghaffarpour, M and Kazemi, M and Mohammadi Sefat, M and Aziz, A and Dehghani, K, "Evaluation of dissimilar joints properties of 5083-H12 and 6061-T6 aluminum alloys produced by tungsten inert gas and friction stir welding", *Engineering Manufacture*, 2017, Vol. 231(3) pp 297-308.
- 8-Suri A, Prashant RSS and Raj K. Comparative study of friction stir welding and tungsten inert gas welding of pure aluminum. In: *Energy efficient technologies for sustainability (ICEETS)*, 2013, pp.929-935.
- 9-Ishak, M., Noordin, N. F. M., Razali, A. S. K., Shah, L. H. A., & Romlay, F. R. M. (2015). Effect of filler on weld metal structure of AA6061 aluminum alloy by tungsten inert gas welding. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 11, 2438.
- 10- Ishak, M., Noordin, N. F. M., & Shah, L. H. A. (2015). Feasibility study on joining dissimilar aluminum alloys AA6061 and AA7075 by tungsten inert gas (TIG). *Jurnal Teknologi*, 75(7).
- 11-Roeen, G. A., Yousefi, S. G., Emadi, R., Shooshtari, M., & Lotfian, S. (2021). Remanufacturing the AA5052 GTAW welds using friction stir processing. *Metals*, 11(5), 749.
- 12-Yu, C. Y., Kao, P. W., & Chang, C. P. (2005). Transition of tensile deformation behaviors in ultrafine-grained aluminum. *Acta Materialia*, 53(15), 4019-4028.

## پی‌نوشت

- 1- کارشناس مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان
- 2- استادیار، مرکز آموزش مهارت‌های فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان

منطقه متأثر از حرارت سمت II (سمت فلز پایه ۶۰۶۱) عدد سختی بالاتری را نشان می‌دهد و همچنین در هر سه نمونه کمترین میزان سختی متعلق به منطقه متأثر از حرارت سمت II (سمت فلز پایه ۶۰۶۱) می‌باشد. دو دلیل زیر دلیل کاهش سختی در منطقه متأثر از حرارت باشد. اول، به دلیل گرمای ورودی بالا در جوشکاری چندپایه، آنیل موضعی رخ می‌دهد و ریزساختار هر دو آلیاژ را درشت می‌کند. دوم، گرمای ورودی در فرایند TIG مکانیزم‌های سخت شدن آلیاژهای آلومینیوم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. گرمای بیش از حد تولید شده در طول فرایند جوشکاری (به خصوص اینکه جوشکاری در طی چند پاس انجام می‌شود) می‌تواند کارسختی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ و رسوب سختی آلیاژ آلومینیوم سری ۶۰۶۱ را به خطر بیندازد و سختی فلز جوش را در مقایسه با سختی آلیاژهای پایه کاهش دهد. در واقع گرمایش بیش از حد باعث می‌شود که آلیاژ ۵۰۸۳ از حالت کار سخت خارج شده و افت سختی داشته باشد. همچنین گرمایش بیش از حد باعث می‌شود انحلال و/یا درشت شدن رسوبات  $Mg_2Si$  در مورد آلیاژ ۶۰۶۱ اتفاق بیفتد. هر دو پدیده (انحلال و/یا درشت شدن رسوبات)، سختی منطقه متأثر از حرارت سمت II (سمت فلز پایه ۶۰۶۱) را کاهش داده و آن را نرم می‌کند. بنابراین می‌توان بیان کرد که گرمای ورودی بالا از طرفی منجر به حل شدن رسوبات ریز مانند  $Mg_2Si$  شده و همچنین رسوبات حل نشده درشت‌تر می‌شوند که در نتیجه کاهش استحکام کششی و سختی را در منطقه متأثر از حرارت سمت II (سمت فلز پایه ۶۰۶۱) اتصال به دنبال دارد و به همین جهت در آزمون کشش شکست در همین منطقه برای هر سه نمونه اتفاق می‌افتد. البته واضح است که برای اظهار نظر دقیق‌تر نیاز به بررسی ریزساختار در تمام مناطق جوش می‌باشد که نویسندگان این مقاله در حال انجام آن بوده و نتایج حاصل را در آینده ارائه خواهند داد.

## نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، اثر سیم‌های پرکننده مختلف مورد استفاده در فرایند جوشکاری TIG جهت اتصال آلیاژهای آلومینیوم غیرمشابه ۵۰۸۳ و ۶۰۶۱ مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس تحقیق حاضر می‌توان به نتایج زیر دست یافت. ابتدا، مشخص شد که استحکام کششی و سختی برای هر سه نمونه در مناطق مختلف جوش نسبت به هر دو فلز پایه اولیه کمتر می‌باشد. دلیل این اتفاق می‌تواند تحت تأثیر قرار گرفتن مکانیزم‌های استحکام‌بخشی هر دو آلیاژ در اثر گرمای تولید شده در طول فرایند جوشکاری (به خصوص اینکه جوشکاری در طی چند پاس انجام می‌شود) باشد. با این وجود اتصالات جوش با استفاده از پرکننده ER5356 دارای بالاترین استحکام ۱۷۵ مگاپاسکال در مقایسه با اتصالات جوش با استفاده از پرکننده‌های ER4043 و ER5183 با مقادیر ۱۶۷ و ۱۶۶ مگاپاسکال بودند. همچنین بالاترین انعطاف‌پذیری نیز مربوط به اتصال ایجاد شده با سیم جوش ER5356 می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جوشکاری TIG با استفاده از پرکننده ER5356

# Welding Research

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق و سیم جوش‌های مورد استفاده.

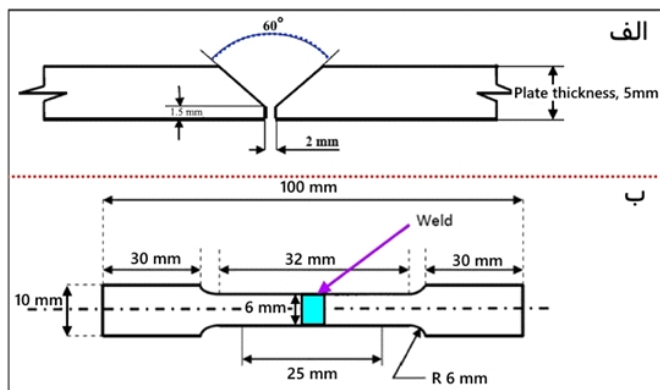
| فلز     | Al   | Si   | Cu    | Fe   | Zn   | Cr    | Mg   | Mn   | Ti    |
|---------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
| 5083 O  | پایه | ۰/۰۷ | ۰/۰۱۵ | ۰/۱۳ | ۰/۰۴ | ۰/۰۴۱ | ۴/۶۵ | ۰/۸۷ | ۰/۰۳۴ |
| 6061 T6 | پایه | ۰/۷۹ | ۰/۱۹  | ۰/۰  | ۰/۰۷ | ۰/۰۴۵ | ۰/۹۸ | ۰/۱۷ | ۰/۰۳  |
| ER 4043 | پایه | ۵/۲۵ | ۰/۳   | ۰/۸  | ۰/۱  | -     | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۲  |
| ER 5356 | پایه | ۰/۰۳ | ۰/۰۱  | ۰/۱۵ | ۰/۰۱ | ۰/۱۱  | ۴/۸۳ | ۰/۱۴ | ۰/۰۹  |
| ER 5183 | پایه | ۰/۴  | ۰/۱   | ۰/۴  | ۰/۲۵ | ۰/۱۲  | ۵/۰  | ۰/۷۵ | ۰/۰۸  |

جدول ۲- پارامترهای جوشکاری

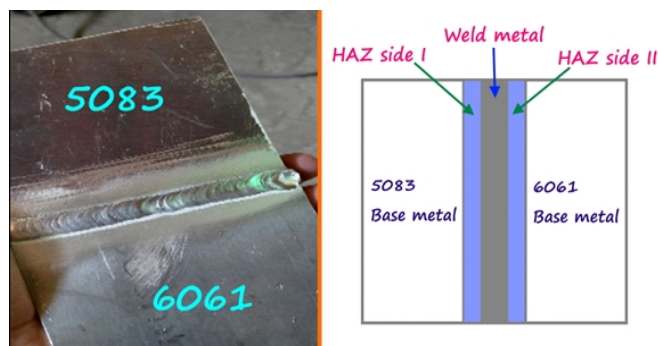
| طرح اتصال | شیار      | شدت جریان (A) | ولتاژ (V) | سرعت جوشکاری (mm/min) | سیم جوش                 | قطر سیم جوش (mm) | دبی گاز (L/min) |
|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------------------|-------------------------|------------------|-----------------|
| تخت       | V یک طرفه | ۱۶۰           | ۲۳        | ۱۸۰                   | ER5356، ER4043 و ER5183 | ۱/۲              | ۲۰              |

جدول ۳- مقادیر سختی برای مناطق مختلف نمونه‌های جوشکاری شده با سیم جوش‌های ER5356، ER4043 و ER5183.

| نمونه            | موقعیت                         | سختی |
|------------------|--------------------------------|------|
| نمونه ۱ (ER4043) | فلز جوش                        | ۶۷   |
|                  | منطقه متأثر از حرارت (Side I)  | ۸۵/۴ |
|                  | منطقه متأثر از حرارت (Side II) | ۶۵   |
|                  | فلز پایه ۵۰۸۳                  | ۹۲   |
|                  | فلز پایه ۶۰۶۱                  | ۹۷   |
| نمونه ۲ (ER5356) | فلز جوش                        | ۶۸/۱ |
|                  | منطقه متأثر از حرارت (Side I)  | ۷۹/۲ |
|                  | منطقه متأثر از حرارت (Side II) | ۶۴/۳ |
|                  | فلز پایه ۵۰۸۳                  | ۹۲   |
|                  | فلز پایه ۶۰۶۱                  | ۹۷   |
| نمونه ۳ (ER5183) | فلز جوش                        | ۶۶   |
|                  | منطقه متأثر از حرارت (Side I)  | ۷۵/۱ |
|                  | منطقه متأثر از حرارت (Side II) | ۷۰/۷ |
|                  | فلز پایه ۵۰۸۳                  | ۹۲   |
|                  | فلز پایه ۶۰۶۱                  | ۹۷   |



شکل ۱- شماتیک از الف - درز اتصال، و ب - نمونه آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM E8.



شکل ۲- تصویر شماتیک و واقعی از جوش ایجاد شده بین دو ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳.



شکل ۳- تصاویر نمونه‌های آزمون کشش عرضی جوش‌های حاصل از سه سیم جوش متفاوت.

Filler metal: ER 4043

Tested Area

200 mm

100 mm

W1

| Row | Item Name | Item No | Weld No | Length Of Test (MM) | Result | Remark                                                                                                  |
|-----|-----------|---------|---------|---------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Plate     | No1     |         | 100                 | Accept | UT Inspection has been carried out on welding area and no defect detected that the result is Acceptable |

Filler metal: ER 5356

Tested Area

200 mm

100 mm

W2

| Row | Item Name | Item No | Weld No | Length Of Test (MM) | Result | Remark                                                                                                  |
|-----|-----------|---------|---------|---------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Plate     | No1     | W2      | 100                 | Accept | UT Inspection has been carried out on welding area and no defect detected that the result is Acceptable |

Filler metal: ER 5356

Tested Area

200 mm

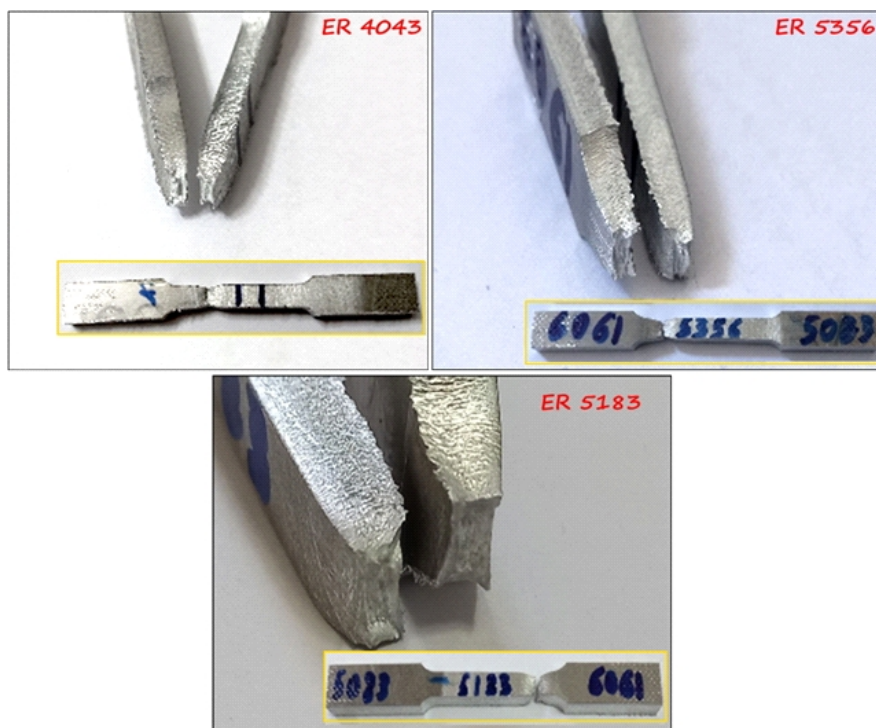
100 mm

W3

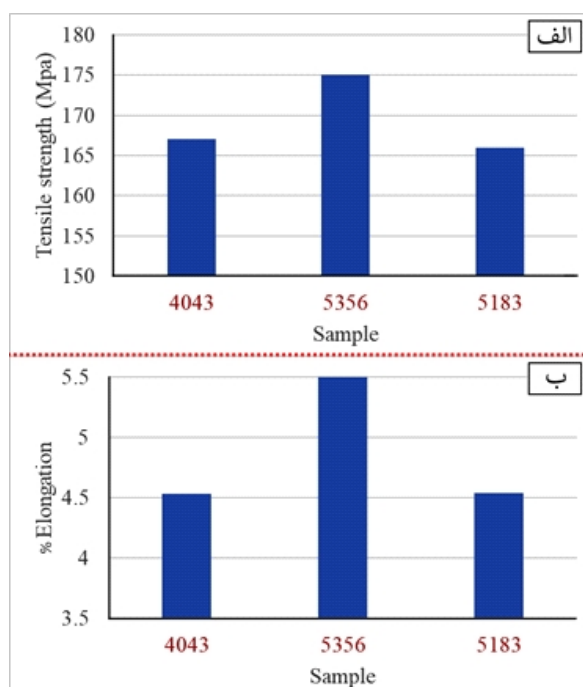
| Row | Item Name | Item No | Weld No | Length Of Test (MM) | Result | Remark                                                                                                  |
|-----|-----------|---------|---------|---------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Plate     | No1     | W3      | 100                 | Accept | UT Inspection has been carried out on welding area and no defect detected that the result is Acceptable |

شکل ۴- نتایج آزمون آلتراسون یک که نشان می‌دهد اتصالات ایجاد شده توسط سیم جوش‌های ER5356 و ER4043 بدون عیب و کاملاً سالم می‌باشند.

# Welding Research



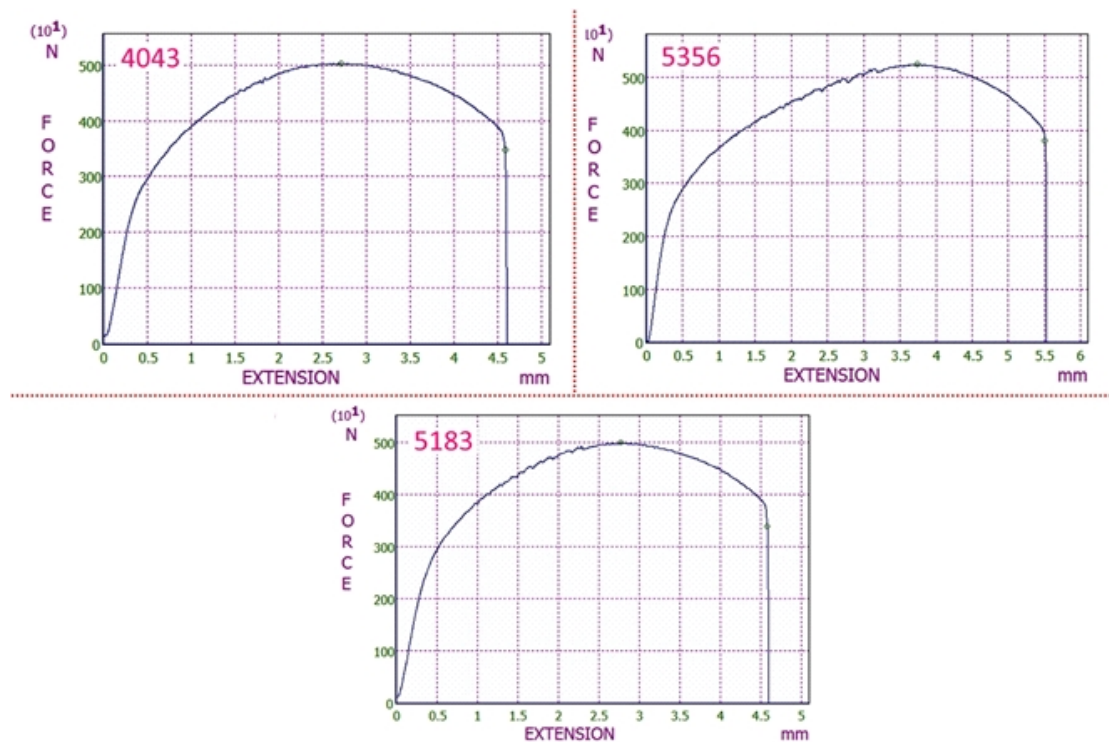
شکل ۵- مناطق گسیختگی تحت آزمون کشش محوری نمونه‌های جوشکاری شده با سیم جوش‌های ER5356، ER4043 و ER5183.



شکل ۶- نمودار ستونی الف - استحکام کششی ب - درصد ازدیاد طول نمونه‌های جوشکاری شده با سیم جوش‌های ER5356، ER4043 و ER5183.

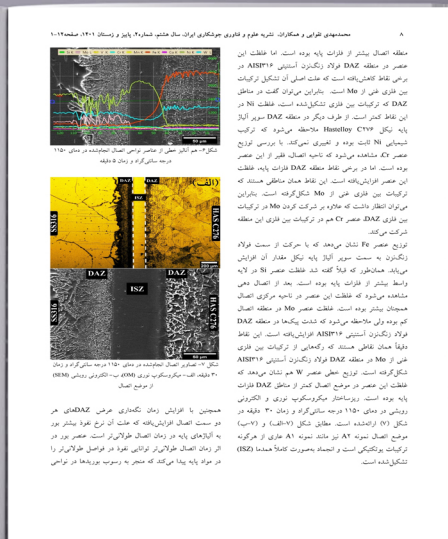


# Welding Research



شکل ۷- نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های جوشکاری شده با سیم جوش‌های ER5183 و ER4043، ER5356.

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

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

تارنما: [www.iwnt.com](http://www.iwnt.com) سامانه عضویت: [www.iwnt-membership.ir](http://www.iwnt-membership.ir) سامانه گواهینامه‌ها: <https://iwntcs.ir>