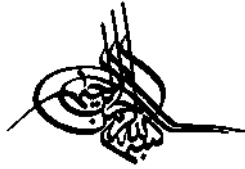


موشک‌سازی

فصلنامه انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران
شماره ۱۰۹ - زمستان ۱۴۰۲



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



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

مدیر مسئول: مهندس عبدالوهاب ادب آوازه

زیر نظر شورای نویسندگان

مسئول اجرایی: کمیته انتشارات

مدیر اجرایی و گرافیک: دکتر نازیلا ادب آوازه

نشانی دبیرخانه انجمن:

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

تلفن: 03132240325 فاکس: 03132231765

پست الکترونیک:

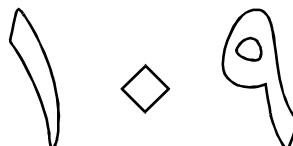
[Email: info@iwnt.com](mailto:info@iwnt.com)

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

فصلنامه در ویرایش مقالات رسیده آزاد است

نقل نوشته ها با ذکر ماخذ بلامانع است.

- 1 بررسی ریزساختار و استحکام TLP دمای پایین در اتصال آلیاژهای AA2024-T4 به AA6061-T6 با استفاده از لایه واسط Sn-2.4Bi، امین عنبرزاده - حامد ثابت - عبدالرضا گرانمایه ارومیه
- 6 تأیید صلاحیت ساخت افزایشی با جوشکاری قوسی سیمی، مهندس عبدالوهاب ادب آوازه
- 11 ساخت قطعات آلیاژ اینکونل 625 به روش ساخت افزایشی قوسی با الکتروود فلزی و گاز محافظ (GMA-WAAM)، ابوالفضل صفرزاده - مهدی شفیعی آفرانی - محمود شریفی تبار
- 17 تهیه دستورالعمل و عملیات جوشکاری سوپراستراکچر قاب بالا و پایین سقف کوره قوس الکتریکی واحد فولاد سازی، ایمان حاجیان نیا - فضل روانگرد - عباس عباسیان - غلامرضا طلا اشرفی - حسین نادر بیگی - پژمان روناسی
- 22 اندازه گیری گلوبی موثر در جوش های شیاری، مهندس احمدرضا وکیلی
- 26 جوشکاری فولاد G-X 14 CrCoMo 13-10 با استفاده از فیلر ریختگی هم جنس به روش قوس با الکتروود تنگستن و گاز محافظ آرگون و بررسی میکرو ترک های ناحیه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت، داود عباسی - حسن نکویی - امیر مهدی شبانی - پژمان مللی - حمید فراهانی
- 31 تشریح الزامات استاندارد ISO 45001 - قسمت پایانی، مهندس افشین خیام
- 33 بررسی افزایش استحکام الکتروود، با رویکرد کاهش عملیات در سینگ در تغییر عناصر آلیاژی الکتروود مورد استفاده در تولید بدنه خودروی پارس تندر، حسین زارع محمودی - علیرضا دلگشائی - عبدالله یزدانی
- 37 ارزیابی خواص ریز ساختاری روکش کاری لیزری اینکونل 625 روی فولاد ASTM A575 با استفاده از لیزر فیبری، محمد هادی ذاکری - علیرضا نصر اصفهانی - سید مسعود برکت
- 43 تاثیر پارامترهای لحیم کاری سخت بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال ساندویچی فولاد زنگ نزن، معصومه خیاط - بهروز بیدختی
- 47 تاثیر دما بر ریز ساختار اتصال نفوذی چند لایه فولاد زنگ نزن، مهیار مهران - بهروز بیدختی





بررسی ریزساختار و استحکام TLP دمای پایین در اتصال آلیاژهای Sn-2.4Bi به AA2024-T4 با استفاده از لایه واسط AA6061-T6

امین عنبرزاده^۱، حامد ثابت^۲، عبدالرضا گرانیامیه ارومیه^۳

چکیده

در این تحقیق آلیاژهای AA6061-T6 و AA2024-T4 به روش فاز مایع گذرا به یکدیگر لحیم نرم شدند. ورق لایه واسط Sn-Bi با ضخامت ۵۰ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفت. سطوح فلزات پایه با سمباده کاربید سیلیسیم با مش ۸۰ آماده سازی سطحی شدند. سطوح آلیاژهای فلز پایه و لایه واسط پیش از مونتاژ به مدت ۱۰ دقیقه با امواج اولتراسونیک با فرکانس ۳۵ کیلوهرتز در محلول استون در دمای محیط پاکسازی سطحی شدند. نمونه ها در محیط کوره اتمسفر کنترل با فشار ۲ اتمسفر گاز آرگون و با سرعت گرمایش ۵ درجه سانتیگراد بر دقیقه به دمای ۲۵۳ درجه سانتیگراد رسیدند؛ سپس به مدت ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۱۰ در دمای ۲۵۳ درجه سانتیگراد نگهداری شدند و پس از آن تدمای محیط در در کوره سرد شدند. استحکام لحیم نرم حاصل پس از ۲۱۰ دقیقه برای لایه واسط با ضخامت ۷۰ میکرومتر ۱۲/۳ مگاپاسکال بدست آمد. محل اتصال با میکروسکپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. عنصر بیسموت به صورت همگن در فلزات پایه نفوذ کرد. عنصر مس در مرز دانه های آلومینیوم تجمع نکرد. عناصر مس و منیزیم به مراتب بیشتر از آلومینیوم در لایه واسط نفوذ کردند.

کلمات کلیدی: فاز مایع گذرا، لحیم کاری نرم، پیوند نفوذی، آلیاژهای هوافضا.

مقدمه

اتصال آلیاژهای ناهمسان از نظر دستیابی به نسبت استحکام به وزن بهتر همواره در صنایع خودروهای الکتریکی و هوافضا مورد توجه بوده است [۱]. آلیاژ AA2024 آلیاژی است با ۴ درصد وزنی مس و چگالی ۲/۷ گرم بر سانتی متر مکعب است که مقاومت به خوردگی مطلوب و قابلیت رسوب سخت پذیری دارد [۲]. استحکام تسلیم آلیاژ AA2024-O، 75 مگاپاسکال و استحکام آلیاژ رسوب سخت شده آن AA2024-T4 معادل ۳۲۴ مگاپاسکال است [۳]. دمای سالیدوس AA2024-T4، ۵۰۲ درجه سانتیگراد و دمای انحلال رسوبات این آلیاژ ۲۵۶ درجه سانتیگراد است [۴ و ۲]. دمای انحلال پایین رسوبات استحکام بخش، اصلی ترین عاملی است که اتصال نفوذی این آلیاژ را محدود کرده و راه را برای تحقیقات بیشتر در دمایی کمتر ۲۵۶ درجه سانتیگراد باز گذاشته است. پیش از این استفاده از لایه واسط مس به ضخامت ۲۲ میکرومتر برای

ایجاد اتصال نفوذی Al7075 به Ti-6Al-4V با روش فاز مایع گذرا، توسط Al. Hazza و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش بعد از ۳۰ دقیقه حداکثر استحکام ۱۹/۵ مگاپاسکال بدست آمد [۱]. بعد همین تیم تحقیقاتی لایه واسط Sn-3.6Ag-1Cu را مورد بررسی قرار داد [۵]. فرایند فاز مایع گذرا برای اتصال آلیاژهای Al7075 به Ti-6Al-4V با لایه واسط های از جنس Sn-4Ag-3.5Bi و 10Zn-3.5Bi با ضخامت ۵۰ میکرومتر توسط M.S Kenevisi و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت که به ترتیب برای این آلیاژهای لایه واسط حداکثر استحکام ۳۰ مگاپاسکال و ۳۶ مگاپاسکال را حاصل کرد [۶ و ۷]. پیوند نفوذی AA2024 به Ti-6Al-4V با لایه واسط متناوب Cu/Sn/Cu در محیط خلاء در دمای ۵۱۰ درجه سانتیگراد حداکثر استحکام ۳۷ مگاپاسکال را حاصل کرد [۸]. Samavatian و همکارانش در محیط خلاء و در دمای ۵۱۰ درجه سانتیگراد، آلیاژ لایه واسط

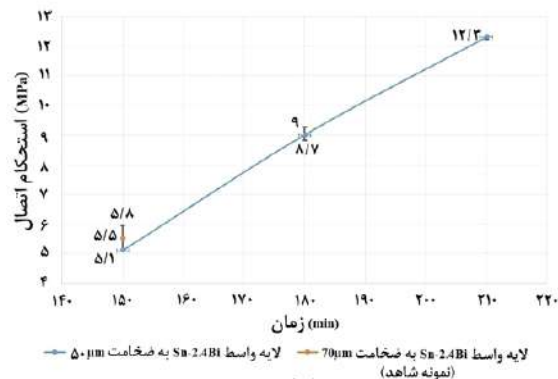
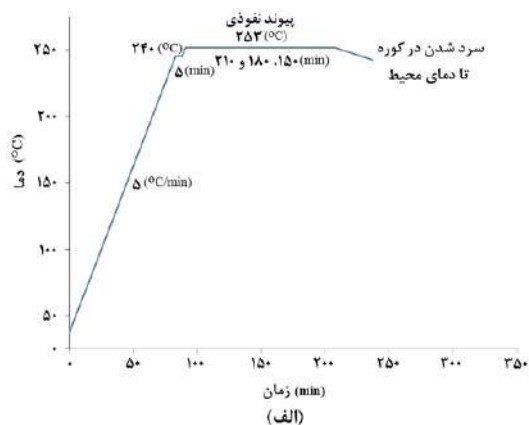
هر کدام با دوبار تکرار انجام شد. سطح مقطع اتصال با محلول شامل ۱/۵ میلی لیتر HCl ، ۵/۵ میلی لیتر NH_3 ، ۱ میلی لیتر HF و ۹۵ میلی لیتر آب مقطر حکاکی شد. میکروساختار توسط میکروسکپ الکترونی مدل **Seron AIS2300C** مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلزات پایه.

ردیف	موقعیت سنجی	عدد سنجی (HB)			معیار پایش عدد سنجی (HB)	نویسجات
		نقطه 1	نقطه 2	نقطه 3		
1	منطقه (قبل از عملیات حرارتی)	171	174	171	---	---
2	منطقه (بعد از عملیات حرارتی)	127	129	133	---	---

روش ساخت نمونه شاهد

تمام مراحل ساخت نمونه های شاهد از برش زدن تا عملیات حرارتی مشابه نمونه های اصلی است. در مجموع دو نمونه شاهد یکی برای بررسی ساختار و دیگری برای بررسی استحکام تهیه شد. ضخامت لایه واسط در نمونه های شاهد ۷۰ میکرومتر و جنس لایه واسط مشابه آزمایشات اصلی **Sn-2.4Bi** انتخاب شد. نمونه شاهد اول برای مقایسه استحکام با نمونه های اصلی به مدت ۱۵۰ دقیقه در دمای ۲۵۳ درجه سانتیگراد و با شرایط مشابه با نمونه های اصلی تست استحکام برشی تهیه شد. نمونه متالوگرافی با شرایط کاملاً مشابه اما به مدت ۲۱۰ دقیقه در کوره در دمای ۲۵۳ درجه سانتیگراد نگهداری شد.



شکل ۱- الف - سیکل حرارتی ب - استحکام نمونه ها.

Cu-22Zn را برای اتصال **Al2024** به **Ti-6Al-4V** مورد استفاده قرار دادند که بعد از مدت یک ساعت حداکثر استحکام ۳۷ مگاپاسکال برای آن بدست آمد [۹]. فرایند فاز مایع گذرای مرحله ای برای اتصال آلیاژهای **Al2024** به **Ti-6Al-4V** با لایه واسط **Sn-5.3Ag-4.2Bi** بعنوان لایه واسط، با ضخامت ۵۰ میکرومتر و با دمای مرحله دوم ۴۵۳ درجه سانتیگراد نیز بررسی شده است که استحکام ۶۲ مگاپاسکال را حاصل کرده است [۱۰]. استحکام مطلوب در تحقیقات قبلی به دو عامل مهم و اساسی باز می گردد. اول این نکته که شرایط فلزات پایه امکان تحمل حرارتی به مراتب بیشتر از دمای ۲۵۶ درجه سانتیگراد را داشتند و این افزایش دما امکان دستیابی به نرخ نفوذ اتمی سریع تر را فراهم می کند. دومین عامل این است که سمت دیگر این اتصال ها یک آلیاژ حاوی تیتانیوم بود که نفوذ این عنصر به درون لایه واسط خود به استحکام این اتصال ها می افزود. حال آن که در آلیاژ رسوب سخت شده **AA2024-T4** امکان افزایش دما تا بیش از ۲۵۶ درجه سانتیگراد وجود ندارد و برای طراحی سخت ترین شرایط ممکن، آلیاژ **AA6061-T6** بعنوان فلز پایه سمت مقابل آن انتخاب شده است. آلیاژ **AA6061** با داشتن عنصر مس کمتر نسبت به **AA2024** نمی تواند منبع قابل اتکایی برای ورود مس به لایه واسط تلقی شود. حال آنکه نفوذ عنصر مس به درون لایه واسط اثر استحکام بخش دارد. با اینکه آلیاژ **AA2024-T4** استحکام بیشتری نسبت به **AA7075** دارد اما بخاطر دمای پایین انحلال رسوبات به شدت استفاده از آن در صنایع هوافضا و خودروهایی الکتریکی محدود و بعضاً حذف شده است. کاربرد سازه های متصل شده به روش پیوند نفوذی برای آلیاژ **AA2024-O** که تحمل حرارتی بالاتر دارد از آن بیشتر است. لذا بر آن شدیم تا برای رفع این مشکل گامی هر چند آغازین برداریم.

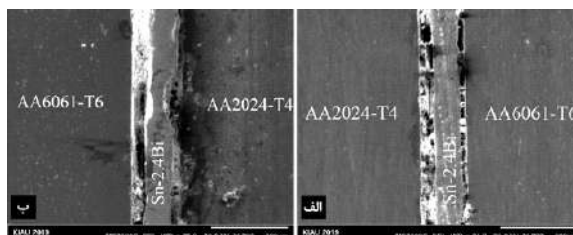
فرایند آزمایش

روش ساخت نمونه های اصلی

ترکیب شیمیایی فلزات پایه در جدول (۱) آمده است. آزمایشات اصلی برای ورق **Sn-2.4Bi** انجام شده است اما ضخامت ۷۰ میکرومتری از همین آلیاژ برای ساخت نمونه های شاهد و مقایسه نتایج نیز تهیه شده است. استحکام کششی آلیاژ لایه واسط ساخته شده **Sn-2.4Bi** بطور میانگین ۳۷ مگاپاسکال است. دمای لیکوئیدوس آن در محیط گاز آرگون با فشار ۲ اتمسفر حدود ۸۸ درجه سانتیگراد و دمای سالییدوس آن حدود ۲۱۸ درجه سانتیگراد بر اساس آزمایش آنالیز خواص گرمایی به روش سنسجش گرمایی تفاضلی (در گرم کردن) بدست آمد. فلزات پایه برای ساخت نمونه تست کشش به ابعاد $3 \times 32 \times 130$ میلیمتر و برای ساخت نمونه های متالوگرافی در ابعاد $3 \times 25 \times 16$ میلیمتر برش زده شد. سطوح فلزات پایه با سمباده کاربید سیلیسیم با مش ۸۰ آماده سازی سطحی شدند. سطوح آلیاژهای فلز پایه و لایه واسط پیش از مونتاژ به مدت ۱۰ دقیقه با امواج اولتراسونیک با فرکانس ۳۵ کیلوهرتز در محلول استون در دمای محیط پاکسازی سطحی شدند. سیکل عملیات حرارتی مورد استفاده در شکل ۱ ارائه شده است. آزمایش در دمای ۲۵۳ درجه سانتیگراد برای زمان های ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۱۰ دقیقه و برای

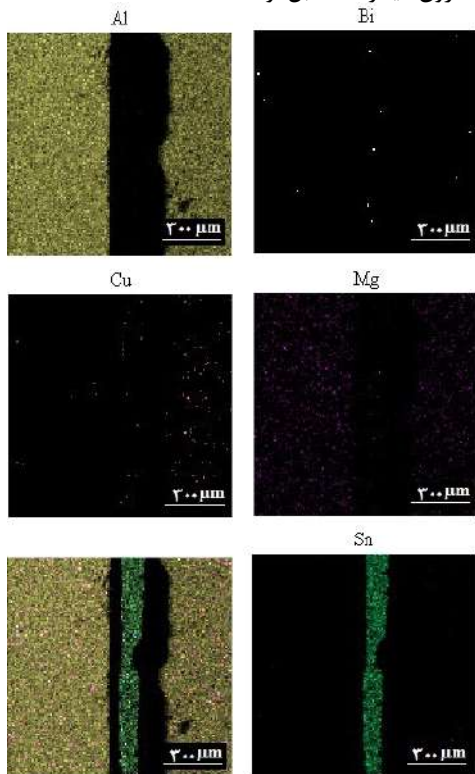
- نتایج آزمایش ها و بحث

شکل (۲)، میکروساختار محل اتصال را برای نمونه اصلی و شاهد بعد ۲۱۰ دقیقه ماندن در دمای ۲۵۳ درجه سانتیگراد نشان می دهد. نقشه توزیع عناصر برای همین نمونه ها در شکل (۳ و ۴) ارائه شده است.

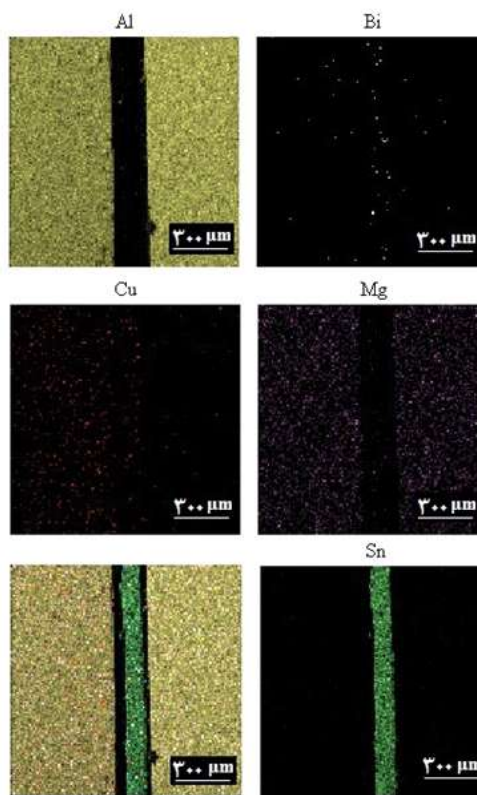


شکل ۲- الف - لایه واسط ۵۰ میکرومتر، ب - لایه واسط ۷۰ میکرومتر.

پایه به درون لایه واسط قابل توجه است.



شکل ۴- نقشه توزیع عناصر - ضخامت لایه واسط ۷۰ میکرومتر.

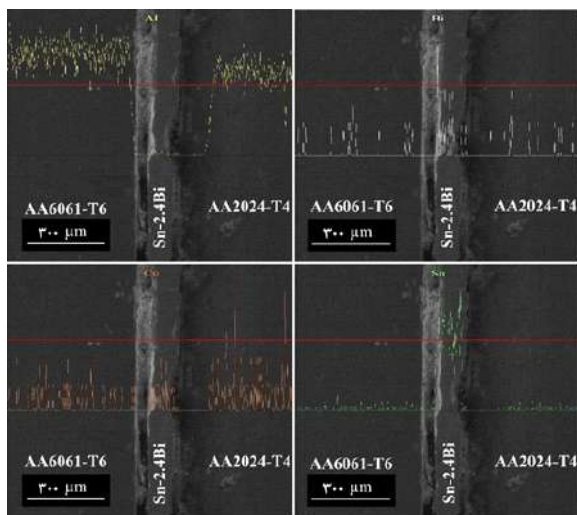


شکل ۳- نقشه توزیع عناصر - ضخامت لایه واسط ۵۰ میکرومتر.

با توجه به نقشه های توزیع عناصر در شکل (۳ و ۴)، عنصر منیزیم نیز از فلزات پایه به درون آلیاژ لایه واسط نفوذ کرده است. از آنجایی که در این دما نفوذ عناصر مس و منیزیم از فلزات پایه به آلیاژ لایه واسط به مقدار قابل توجه بیشتر از نفوذ عناصر لایه واسط به فلزات پایه است، لایه واسط شروع به ضخیم شدن کرده است. با توجه به نقشه های توزیع عناصر و همچنین شکل (۳)، واضح است که با کاهش ضخامت لایه واسط از ۷۰ میکرومتر به ۵۰ میکرومتر، میزان امتزاج بیشتر و مرز بین لایه واسط و فلزات پایه نازک تر شده است. این مساله به این ریشه باز می گردد که با کاهش ضخامت لایه واسط، فاصله ای که عناصر مس و منگنز برای رسیدن به غلظت یکنواخت طی می کنند کمتر می شود.

بنابراین با کاهش ضخامت لایه واسط، میزان امتزاج و نفوذ اتمی بیشتر و یقیناً استحکام افزایش می یابد. افزایش ضخامت لایه واسط زمانی در فرایند فاز مایع گذرا اتفاق می افتد که میزان نفوذ عناصر از فلزات پایه به آلیاژ لایه واسط بیشتر از میزان نفوذ عناصر از آلیاژ واسط به سمت فلزات پایه باشد. این چنین حالتی عمدتاً در دماهایی کمتر از دمای تبلور مجدد فلزات پایه و یا دماهای انحلال رسوبات اتفاق می افتد. لازم به ذکر است که برعکس این حالت، در دماهای بالا که نفوذ اتمی شدت می یابد لایه واسط شروع به نازک شدن و در واقع انحلال در فلزات پایه می کند که در آن صورت فرایند از حالت لحیم کاری خارج و به سمت جوش شدن پیش می رود. در دماهای

اسکن خطی چهار عنصر آلومینیم، قلع، مس و بیسموت نیز برای همین مقاطع اتصال در شکل های (۵ و ۶) آمده است. با توجه به نقشه های توزیع عناصر و اسکن های خطی، عنصر بیسموت توانسته است از لایه واسط به درون فلزات پایه نفوذ کند. نقش این عنصر در آلیاژ لایه واسط بهبود ترشوندگی اتصال، جلوگیری از ایجاد آفت قلع و همچنین بهبود استحکام لایه واسط از طریق ایجاد محلول جامد است. عنصر آلومینیم و همچنین قلع، نفوذ متقابل را به صورت محسوس در این دما نشان نمی دهند. اما نفوذ عنصر مس از فلزات



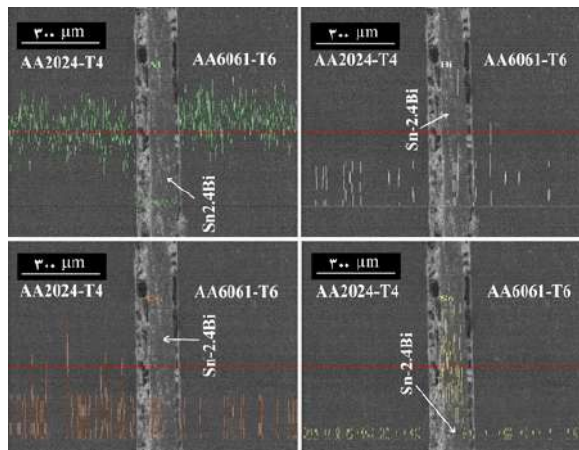
شکل ۶- آنالیز عنصری خطی - ضخامت لایه واسط ۷۰ میکرومتر.

- با افزایش زمان فرایند، میزان امتزاج و در نتیجه استحکام اتصال افزایش می یابد، حداکثر استحکام ۱۲/۳ مگاپاسکال برای آلیاژ لایه واسط به ضخامت ۵۰ میکرومتر بعد از ۲۱۰ دقیقه بدست آمد (استحکام آلیاژ لایه واسط انتخاب شده ۳۷ مگاپاسکال است).
- دمای فرایند فاز مایع گذرا برای ایجاد لحیم نرم ۲۵۳ درجه سانتیگراد انتخاب و اجرا شد (دمای انحلال رسوبات در آلیاژ AA2024-T4 معادل ۲۵۶ درجه سانتیگراد است). این مورد در جلوگیری انحلال رسوبات و تجمع عنصر مس در مرز دانه های آلومینیم و همچنین کاهش استحکام فزات پایه نقش اساسی دارد.

منابع

- 1-A.Alhazaa, T.I.Khan, I.Haq. "Transient liquid phase (TLP) bonding of Al7075 to Ti-6Al-4V alloy", *Materials Characterization*, 2010, 61: 312-317. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.12.014>
- 2-Aerospace Specification Metals Inc (ASM), "ASM Material Data Sheet", 1987, 800 398-4345. Aluminum 2024-O. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2024O>.
- 3-ASTM- Designation: B209M-14, "Standard Specification for Aluminum and Aluminum", Alloy Sheet and Plate (Metric), 2014. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=B209M>
- 4-Aerospace Specification Metals Inc (ASM), "ASM Material Data Sheet", 1987, 800 398-4345. Aluminum 6061-O. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061O>.
- 5-A.N. Alhazaa, T.I. Khan. "Diffusion bonding of Al7075 to Ti-6Al-4V using Cu coatings and Sn-3.6Ag-1Cu interlayers", *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 494: 351-358. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.01.037>
- 6-M.S.Kenevisi, S.M.Mousavi Khoie. "A study on the effect of bonding time on the properties of Al7075 to Ti-6Al-4V diffusion bonded joint", *Materials Letters*, 2012, 76: 144-146.

بالا تر از ۲۵۶ درجه سانتیگراد عنصر مس در مرز دانه های آلومینیم شروع به تجمع می کند که با توجه به انتخاب صحیح دمای فرایند، نقشه های توزیع عناصر این مورد را نشان نمی دهد (تجمع عنصر مس در مرز دانه های آلومینیم منجر به تشکیل فاز تتا ترد و پیوسته در مرز دانه آلومینیم می شود که عاملی برای ایجاد ترک مرز دانه ای است). با توجه به توزیع عناصر و آنالیز خطی بدست آمده وجود دو ترکیب بین فلزی $Mg_{45}Al_{40}Ag_{15}$ و Cu_6Sn_5 در لایه واسط بسیار محتمل است اما بطور یقین نمی توانیم وجود این رسوبات را تایید کنیم. با افزایش زمان اتصال، استحکام اتصال افزایش یافته است و میزان خطای اندازه گیری استحکام کاهش. به گونه ای که استحکام دو نمونه تهیه شده در زمان ۲۱۰ دقیقه با ضخامت ۵۰ میکرومتر بسیار نزدیک به هم و حدود ۱۲/۳ مگاپاسکال حاصل شده است. در زمان ۱۵۰ دقیقه استحکام نمونه شاهد با ضخامت ۷۰ میکرومتر در بازه خطای نمونه های اصلی قرار گرفته است. حال آنکه با توجه به شرایط نفوذ اتمی بطور معمول باید استحکام آن کمتر از نمونه های با لایه واسط ۵۰ میکرومتر باشد و با افزایش زمان فرایند این مورد محسوس تر خواهد شد. بنابراین زمان ۱۵۰ دقیقه هنوز برای بروز اختلاف جدی در استحکام کافی نیست و نتیجه نزدیک بودن استحکام اتصال نمونه های با لایه واسط ۵۰ و ۷۰ میکرومتر برای زمان های فرایند بیشتر قابل تعمیم نیست. وجود مرز به مراتب عریض تر میان لایه واسط و فلزات پایه در نمونه شاهد با ضخامت لایه واسط ۷۰ میکرومتر بعد از ۲۱۰ دقیقه، نسبت به نمونه اصلی در همین زمان (شکل ۳ و ۴) درستی این تحلیل را نشان می دهد.



شکل ۵- آنالیز عنصری خطی - ضخامت لایه واسط ۵۰ میکرومتر.

جمع بندی نتایج

- عنصر بیسموت از آلیاژ لایه واسط به صورت همگن به درون فلزات پایه نفوذ کرده است اما نفوذ عنصر قلع به درون فلزات پایه در این دما قابل توجه نیست.
- نفوذ عناصر مس و منیزیم از فلزات پایه به درون آلیاژ لایه واسط، نسبت به نفوذ ناچیز آلومینیم به درون لایه واسط، قابل توجه است.
- با کاهش ضخامت لایه واسط از ۷۰ میکرومتر به ۵۰ میکرومتر میزان امتزاج، پیوستگی و استحکام اتصال بهبود می یابد.

Metals Society of China, 2015, 25: 770-775.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63662-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63662-7)
10-Amin Anbarzadeh, Hamed Sabet, Mehrdad Abbasi, "Effects of Successive- Stage Transient Liquid Phase (S-TLP) on Microstructure and mechanical properties of Al2024 to Ti-6Al-4V joint", Materials Letters, 1 September 2016- 178: 280-283.
[Http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2016.04.071](http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2016.04.071)

بی نوشت

- 1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
2- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
3- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

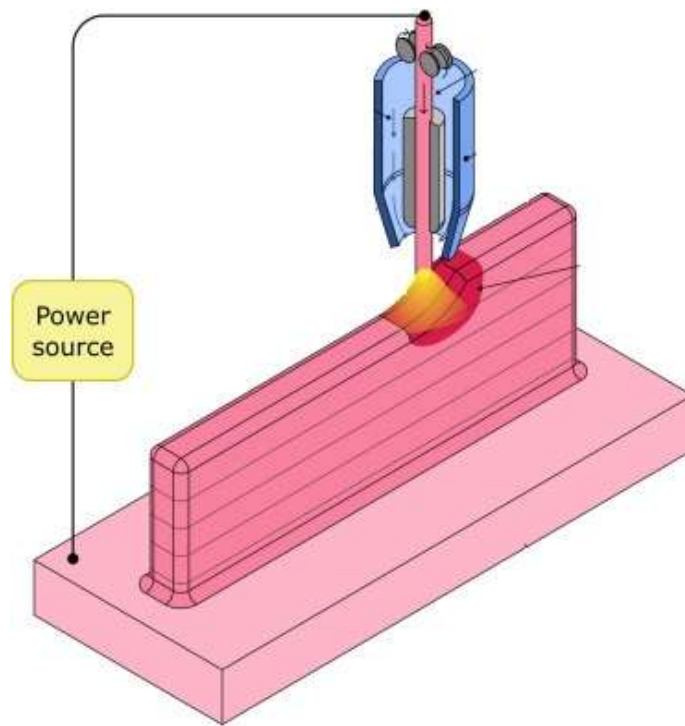
7-M.S.Kenevisi, S.M.Mousavi Khoie. "An investigation on microstructure and mechanical properties of Al7075 to Ti-6Al-4V Transient Liquid Phase (TLP) bonded joint", Materials and Design, 2012, 38: 19-25.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.046>

8-Majid Samavatian, Ayoub Halvae, Ahmad Ali Amadeh, Alireza Khodabandeh- "An investigation on microstructure evolution and mechanical properties during liquid state diffusion bonding of Al2024 to Ti-6Al-4V". Materials Characterization, 2014, 98: 113-118.

<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.10.018>

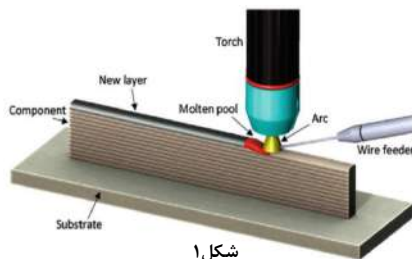
9-Majid Samavatian, Ayoub Halvae, Ahmad Ali Amadeh, Alireza Khodabandeh "Transient liquid phase bonding of Al 2024 to Ti-6Al-4V alloy using Cu-Zn interlayer", Transactions of Nonferrous



تایید صلاحیت ساخت افزایشی با جوشکاری قوسی سیمی

مهندس عبدالوهاب ادب آوازه^۱

بسزایی دارد یعنی نیاز به اپراتور ماهر می باشد.



شکل ۱

فرایندهای جوشکاری برای WAAM

روش ساخت افزایشی قوسی سیمی هنوز هم یک موضوع داغ است و تا بحال هیچ طبقه بندی رسمی برای WAAM ارایه نشده است. برای ساخت قطعات فولادی زنگ نزن روش های زیر متداول است:

- WAAM بر پایه جوشکاری قوسی فلزی گاز محافظ (GMAW)
- WAAM بر پایه جوشکاری قوسی تنگستنی گاز محافظ (GTAW)
- WAAM بر پایه جوشکاری قوسی پلاسمایی (PAW)

اپراتور جوشکاری با توجه به الزامات، فرایند جوشکاری را انتخاب می کند. به عنوان مثال، اگر بالا بودن نرخ رسوب مورد نظر باشد، فرایند GMAW نسبت به GTAW انتخاب بهتری است (فرایند GTAW دارای پایداری و کیفیت خوب است اما نرخ رسوب آن کم است).

اگر قوس الکتریکی با چگالی انرژی خیلی بالا مورد نظر باشد، در آن صورت PAW انتخاب خوبی است (فرایند PAW دارای سرعت حرکت افزوده و کیفیت خوب رسوب جوش به همراه پیچیدگی کمتر

مقدمه

در سال های اخیر، ساخت افزایشی به ویژه برای ساخت مدل قطعات و پیش نمونه، مورد توجه خاص در این صنایع ساخت قرار گرفته است. در این نوشته تایید صلاحیت ساخت افزایشی بر پایه جوشکاری موسوم به ساخت افزایشی قوسی سیمی (WAAM) معرفی می شود.

فناوری ساخت افزایشی قوسی سیمی (WAAM)

WAAM یک فناوری ساخت افزایشی تحت رسوب نشانی مسقیم انرژی می باشد. منابع رسوب نشانی مستقیم مانند لیزر، قوس الکتریکی و باریکه الکترونی، برای ذوب فلزات به شکل پودر یا سیم فلزی استفاده می شوند.

ساخت افزایشی قوسی سیمی، یکی از تکنیک های رسوب نشانی مستقیم انرژی محسوب می شود.

WAAM از یک فرایند جوشکاری قوسی مناسب با استفاده از سیم جوش استفاده می کند و اکنون یکی از سریع ترین و رو به رشدترین حوزه پژوهشی در ساخت قطعات مهندسی است.

WAAM عموماً از همه منابع تغذیه فرایندهای جوشکاری قوسی که قابلیت اتوماسیون و رباتیزاسیون دارند، برای رسوب دادن قطعات فلزی به شکل سه بعدی استفاده می کند.

نمونه ای از WAAM در شکل (۱) برای ساخت یک قطعه از جنس فولاد نزن را نشان می دهد.

شرح WAAM بسیار ساده است اما در اصل، انجام آن یک فرایند ساده نیست. در این فرایند برای انتخاب پارامترهای جوشکاری نسبت به خود اجرای جوشکاری، دقت بیشتری لازم است زیرا تاثیر پارامترهای انتخاب شده بر کیفیت و شکل قطعه ساخته شده تاثیر

قطعه جوشی می باشد).

WAAM یک فرایند ساخت بر پایه جوشکاری است که برای پرینت سه بعدی قطعات فلزی بکار می رود. **WAAM** برای تعمیر قطعات فلزی نیز استفاده می شود. جوشکاری قوسی پلاسمایی (**PAW**) یکی از بهترین فرایندها رسوب نشانی برای رویه کاری یا روکشکاری است که برای ساخت افزایشی قوسی سیمی هم استفاده می شود. جوشکاری قوسی فلزی گاز محافظ (**GMAW**) یک فرایند جوشکاری معروف است که سال ها برای رویه کاری و روکشکاری مورد استفاده قرار گرفته است و برای ساخت افزایشی قوسی سیمی (**WAAM**) نیز مناسب است. جوشکاری قوسی تنگستنی گاز محافظ (**GTAW**) به جوشکاری **TIG** نیز معروف است. در فرایند جوشکاری **TIG** فلز پرکننده، جدای از ورودی انرژی حرارتی می باشد یعنی قوس را الکتروود تنگستنی می زند ولی سیم پرکننده فقط با گرمای حاصله از قوس، ذوب می شود و بنابراین امکان استفاده بیش از یک سیم آن را برای **WAAM** بسیار مناسب می سازد. با **TIG** پالسی نیز می توان حوضچه مذاب شکلی برای ساخت افزایشی فراهم کرد. به هر حال **GTAW**، انتخاب خوبی برای آینده نزدیک جوشکاری افزایشی خواهد بود. جوشکاری قوسی زیرپودری (**SAW**) از طرفی با دارا بودن نرخ رسوب خیلی بالا و پیچیدگی خیلی کم و قابلیت اتوماسیون برای ساخت افزایشی می تواند فرایند خوبی باشد، اما از طرف دیگر استفاده از روش **SAW** در همه حالت ها (افقی، عمودی، سقفی) مقدور نیست و این موضوع برای استفاده از **SAW** در ساخت افزایشی، محدودیت ایجاد می کند.

پارامترهای جوشکاری WAAM

بسیاری از خواص مکانیکی، حرارتی و متالورژیکی ساخت افزایشی باتوجه به پارامترهای هر یک از فرایندهای جوشکاری، متفاوت است. این تفاوت می تواند از مواد زیرلایه، سیم جوش، فرایندهای جوشکاری، متغیرهای فرایند جوشکاری، گاز محافظ و سیستم اتوماسیون حرکتی ناشی شود.

- جنس فلز زیر لایه

جنس فلز زیر لایه در **WAAM** اهمیت زیادی دارد زیرا قابلیت تر کردن مهره جوش رسوب داده شده به ترکیب شیمیایی ماده زیر لایه که روی آن مهره های جوش رسوب داده می شود وابسته است.

اگر مواد زیر لایه با جنس قطعه ای که ساخته می شود، غیر مشابه باشد، رسوب نشانی مهره جوش روی زیر لایه غیر مشابه بسیار دشوار خواهد بود. وقتی روی زیر لایه، رسوب جوش از جنس دیگری نشانه شود، عمل رقیق شدن (**Dilution**) برای اولین لایه رسوب جوش پیش می آید که باید بررسی شود که ماده زیر لایه مقاومت کافی در مقابل پیچیدگی جوش دارد و ضخامت آن کافی است یا خیر؟

- سیم جوش

محرك سیم جوش مورد استفاده برای ساخت افزایشی **WAAM**،

همان جنبه های فناوری فرایند جوشکاری مربوطه است. اندازه و تعداد سیم جوش مورد تغذیه به قوس الکتریکی به همراه پارامترهای فرایند جوشکاری مربوطه بر ویژگی های اجرایی مانند نرخ رسوب و رفتار انتقال حرارت در حوضچه جوش بطور مشخصی تاثیر گذارند و ممکن است موجب پیدایش عیوب جوش مانند ذوب ناقص شوند. عیوب موجود در سطح سیم جوش مثل تغییرات در قطر، ترک و خراش ممکن است موجب ایجاد تخلخل در جوش رسوب داده شده شوند. هر چه کیفیت سیم جوش بهتر باشد، احتمال ایجاد تخلخل در جوش کمتر است.

-فرایندهای جوشکاری

فرایند جوشکاری با توجه به قابلیت اجرایی و جنبه اقتصادی برای **WAAM** انتخاب می شود. از میان فرایندهای متعدد جوشکاری قوسی، فرایندهای جوشکاری قوسی فلزی گاز محافظ (**GMAW**)، فرایند جوشکاری قوسی تنگستنی گاز محافظ (**GTAW**) و جوشکاری قوسی پلاسمایی (**PAM**) بیشترین کاربرد را برای ساخت افزایشی فلزات دارند.

-متغیرهای فرایند جوشکاری

هر فرایند جوشکاری متغیرهای خاص خود را دارد. متغیرهای فرایند جوشکاری، تعیین کننده کیفیت نهایی قطعه ساخته شده با **WAAM** هستند. بنابراین توجه کلیدی برای انتخاب فرایند جوشکاری و پارامترهای فرایند انتخاب شده ضروری است. پارامترهای متغیرهای فرایند جوشکاری عبارتند از: جریان و ولتاژ جوشکاری، ولتاژمدار باز، نرخ تغذیه سیم جوش، فاصله نوک الکتروود تا زیر لایه و ...

برای دستیابی به قطعات ساخته شده بدون عیب، اپراتور باید در انتخاب ترکیبی متغیرهای فرایند جوشکاری و محدوده های مشخص شده هر پارامتر انتخاب شده، توجه دقیق داشته باشد.

-گاز محافظ

هدف از استفاده از گاز محافظ در جوشکاری بر پایه **WAAM**، محافظت فلز مذاب حین جوشکاری در مقابل عناصر جو محیط است. یک نرخ جریان (دبی) قابل قبول گاز محافظ برای پوشش دادن رسوب جوش داغ در **WAAM** برای دور کردن گازهای اتمسفری (اکسیژن، نیتروژن و ...) و جلوگیری از تشکیل اکسید، نیتريد و ایجاد تخلخل در جوش است.

چنانچه نرخ جریان گاز محافظ خیلی زیاد باشد، ممکن است موجب کاهش نفوذ جوش شود. گازهای محافظ که برای این کار استفاده شده اند عبارتند از: آرگون، دی اکسید کربن، هلیوم، نیتروژن، هیدروژن و مخلوطی از این گازها.

-سیستم اتوماسیون

برای **WAAM** حائز اهمیت است. هماهنگی حرکت در جهت محورهای مختصات (محورهای **X** و **Y** و **Z**)، بازوی روباتیک و

جدول ۱-P.No-فلز پایه

Base Metal P-Numbers (Cont'd)

Spec. No.	Designation, Type, or Grade	UNS No.	Minimum Specified Tensile, ksi (MPa)	Welding				Nominal Composition	Typical Product Form	Nominal Thickness Limits, in. (mm)
				P-No.	Group No.	ISO 15608 Group	Brazing P-No.			
SFA-5.9	ER2594	S32750	110 (760)	10H	1	10.2	...	25Cr-7Ni-4Mo	Weld metal	...
SFA-5.9	ER347	S34780	75 (515)	8	1	8.2	...	20Cr-10Ni-Mn-Nb	Weld metal	...
SFA-5.9	ER347Si	S34788	75 (515)	8	1	8.2	...	20Cr-10Ni-Mn-Nb	Weld metal	...
SFA-5.9	ER2209	S39209	100 (690)	10H	1	10.1	...	22Cr-8Ni-Mo	Weld metal	...
SFA-5.9	ER2353	S39553	110 (760)	10H	1	10.2	...	25Cr-5Ni-3Mo	Weld metal	...
SFA-5.9	ER409	S40900	65 (450)	7	1	7.1	...	11Cr	Weld metal	...
SFA-5.9	ER409Nb	S40940	65 (450)	7	1	7.1	...	11Cr-Nb	Weld metal	...
SFA-5.9	ER410	S41080	75 (515)	6	1	7.2	...	12Cr	Weld metal	...
SFA-5.9	ER410NiMo	S41086	110 (760)	6	4	7.2	...	12Cr-4Ni-Mo	Weld metal	...
SFA-5.9	ER430	S43080	65 (450)	7	2	7.1	...	16Cr	Weld metal	...
SFA-5.9	ER2307	S82371	100 (690)	10H	1	10.2	...	24Cr-8Ni	Weld metal	...
SFA-5.18	ER70S-8	...	70 (485)	1	2	1.3	...	C-Mn-Si	Weld metal	...
SFA-5.18	ER70S-2	K10726	70 (485)	1	2	1.3	...	C-Mn-Si	Weld metal	...
SFA-5.18	ER70S-3	K11022	70 (485)	1	2	1.3	...	C-Mn-Si	Weld metal	...
SFA-5.18	ER70S-7	K11125	70 (485)	1	2	1.3	...	C-Mn-Si	Weld metal	...
SFA-5.18	ER70S-4	K11132	70 (485)	1	2	1.3	...	C-Mn-Si	Weld metal	...
SFA-5.18	ER70S-6	K11140	70 (485)	1	2	1.3	...	C-Mn-Si	Weld metal	...
SFA-5.28	ER70S-Ni4	...	70 (485)	9C	1	9.2	...	CMn-4.5Ni	Weld metal	...
SFA-5.28	ER80S-B2Mn	...	80 (550)	4	1	5.1	...	1Cr-0.5Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER80S-B2Si	...	80 (550)	4	1	5.1	...	1Cr-0.5Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER90S-B3Mn	...	90 (620)	5A	1	5.2	...	2.25Cr-1Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER90S-B3MnSi	...	90 (620)	5A	1	5.2	...	2.25Cr-1Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER90S-B3Si	...	90 (620)	5A	1	5.2	...	2.25Cr-1Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER100S-M7	...	100 (690)	11B	3	...	...	0.9Ni-0.3Cr-0.5Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER110S-M6	...	110 (760)	11B	3	...	...	1.5Ni-0.3Cr-0.5Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER120S-M8	...	120 (825)	11B	3	...	...	2.1Ni-0.3Cr-0.5Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER100S-1	K10882	100 (690)	11B	3	...	...	1.8Ni-0.5Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER80S-D2	K10945	80 (550)	3	2	...	...	C-0.5Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER90S-D2	K10945	90 (620)	3	2	...	...	C-0.5Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER70S-A1	K11235	75 (515)	3	2	1.3	...	C-0.5Mo	Weld metal	...
SFA-5.28	ER80S-Ni1	K11260	80 (550)	1	3	9.1	...	C-Mn-0.8Ni	Weld metal	...

فرایندهای جوشکاری WAAM بخاطر جوش پذیریشان و استحکام زیاد دردمای بالا محبوبیت زیادی دارند. آلیاژ پایه نیکل در هوا فضا، پتروشیمی و صنایع دریایی بخاطر استحکام استثنایی و مقاومت در مقابل اکسیداسیون در محدوده های دمایی بالا بطور وسیعی استفاده می شوند.

-تایید صلاحیت جوشکاری افزایشی سیمی

ASME SEC.IX در آخرین تجدید نظر خود که در اول جولای سال ۲۰۲۳ میلادی منتشر شده برای نخستین بار تایید صلاحیت جوشکاری افزایشی سیمی را به بخش تایید صلاحیت جوشکاری (QW) اضافه کرده است. در این بخش متغیرهای تایید صلاحیت دستورالعمل جوشکاری افزایشی سیمی، آزمایش نمونه ها و معیار پذیرش جوشکاری افزایشی سیمی و متغیرهای جوشکاری ارائه شده است. در این استاندارد، جوشکاری افزایشی (Wire-Additive Welding)، رسوب نشانی فلز جوش با استفاده از فرایند جوشکاری و فلز پرکننده سیمی برای ایجاد قطعه جدید به طور جداگانه یا اتصال به قطعه موجود تعریف شده است.

مقررات WPS برای جوشکاری افزایشی سیمی با مقررات WPS برای جوشکاری اتصالات، جوشکاری تعمیری، جوشکاری روبه کاری یا جوشکاری ترمیمی فرق دارد. زیرا در جوشکاری افزایشی، تمام یا قسمت عمده قطعه ساخته شده از جوش است. برای تایید صلاحیت

ماینپولاتور، برای تامین شکل مطلوب قطعه ساخته شده بسیار مهم است. تکرار پذیری دقیق در چنین حرکت هایی، موجب دستیابی به قطعات جوش داده شده با هندسه و خواص فیزیکی مطلوب خواهد شد.

اگر سیستم حرکتی دقیق نباشد، ممکن است نیاز به کارهای پس فرایندی زیاد داشته باشد.

فلزات و آلیاژهای ساخت افزایشی قوسی سیمی

فرایند های WAAM از سیم جوش های قرقره ای موجود که توسط صنایع جوش بصورت فلزات و آلیاژهای مختلف، تولید می شوند. و در بازار موجودند استفاده می کنند. انتخاب مواد برای فرایند WAAM بر اساس الزامات کاربردی انجام می شود. برای مثال مواد ترجیحی برای صنایع خودرو، هوا فضا و ... متفاوت است. برای پوشش دادن به الزامات کاربردی WAAM موارد زیر در دسترسند:

-آلیاژهای پایه نیکل

- آلیاژهای آلومینیوم

- آلیاژهای کروم

- آلیاژهای تیتانیوم

-آلیاژهای فولاد زنگ نزن

-سایر فلزات خالص

از میان مواد نامبرده شده، آلیاژهای پایه نیکل برای ساخت با

جدول ۲- حدود پهنای لایه تایید صلاحیت

پهنای تایید صلاحیت شده لایه (mm)		جوش تایید صلاحیت WPS	
بیشینه	کمینه	پهنای لایه نمونه آزمایش	تعداد پاس در هر لایه
۱۹	نامحدود	-	۱
۵۰W	W	-	۸ تا ۳
نامحدود	۱۹	مساوی یا بیشتر از ۵۰	بیشتر از ۸

جدول ۳- متغیرهای جوشکاری افزایشی (WPS-GMAW)

Wire-Additive Welding Variables Procedure Specifications (WPS) — Gas Metal-Arc Welding (GMAW)

Paragraph	Brief of Variables	Essential		Nonessential
		With Integrated Backing	Without Integrated Backing	
QW-403 Base Metals	.5 ϕ Group number	X		
	.9 t Pass > 1/2 in. (13 mm)	X		
	.36 W limits	X	X	
QW-404 Filler Metals	.4 ϕ F-Number	X	X	
	.5 ϕ A-Number	X	X	
	.6 ϕ Diameter			X
	.12 ϕ Classification	X	X	
	.23 ϕ Filler metal product form	X	X	
	.24 \pm or ϕ Supplemental	X	X	
QW-406 Preheat	.27 ϕ Alloy elements	X	X	
	.2 ϕ Preheat maint.			X
QW-407 PWHT	.12 ϕ Interpass	X	X	
	.1 ϕ PWHT	X	X	
QW-408 Gas	.2 ϕ PWHT (T&T range)	X	X	
	.1 \pm Trail or ϕ comp.			X
	.2 ϕ Single, mixture, or %	X	X	
	.3 ϕ Flow rate			X
	.5 \pm or ϕ Backing flow			X
QW-409 Electrical Characteristics	.10 - Trail or ϕ comp.	X	X	
	.2 ϕ Transfer mode	X	X	
	.4 ϕ Current or polarity	X	X	
	.8 ϕ I&E range			X
QW-410 Technique	.31 ϕ Heat input	X	X	
	.3 ϕ Orifice, cup, or nozzle size			X
	.5 ϕ Method cleaning			X
	.7 ϕ Oscillation			X
	.8 ϕ Tube-work distance			X
	.10 ϕ Single to multiple electrodes	X	X	
	.15 ϕ Electrode spacing	X	X	
.26 \pm Peening			X	

Legend:

+ Addition > Increase or greater than ↑ Uphill ← Forehand ϕ Change
 - Deletion < Decrease or less than ↓ Downhill → Backhand

تولید مانند ریخته گری، آهنگری، نورد می باشد. این استاندارد فلز پایه را با P-No و Group-No ارائه کرده و در جدول QW/QB-422 درج کرده است.

برای جوشکاری افزایشی سیمی، چون فلز پایه همان فلز جوش است، در جدول QW/QB-422 برای جوشکاری افزایشی برای فلز پایه همان مشخصات سیم جوش مورد استفاده را ارائه کرده است. به عنوان مثال برای سیم جوش فولاد زنگ نزن استنیتی ER308 و P-No.8، SFA-5.9 و Group-No را شکل محصول را

جوشکاری افزایشی سیمی، نرخ سرد شدن مورد استفاده در تولید، حائز اهمیت است و همچنین تایید صلاحیت نازکترین و ضخیم ترین مقطع ساخت افزایشی لازم است.

در آزمایش نمونه‌های تایید صلاحیت جوشکاری افزایشی سیمی، در مواردی از معیار پذیرش قسمت (QW) همانند جوشکاری اتصال (پیروی می شود و در بعضی موارد از معیار پذیرش بر مبنای مشخصات مواد مربوطه تبعیت می شود. مشخصات مواد مربوط به ساخت افزایشی سیمی اغلب همان مشخصات مواد به شکل دیگر

دیواره) لازم است (حدود پهنای لاله تایید صلاحیت جوشکاری افزایش در جدول (۲) ارائه شده است. اپراتورهای جوشکاری افزایشی سیمی باید طبق مقرارت برای فرایند جوشکاری مورد استفاده تایید صلاحیت شوند. نمونه ای از متغیرهای WPS جوشکاری افزایشی سیمی برای فرایند GMAW در جدول (۳) ارائه شده است.

منابع

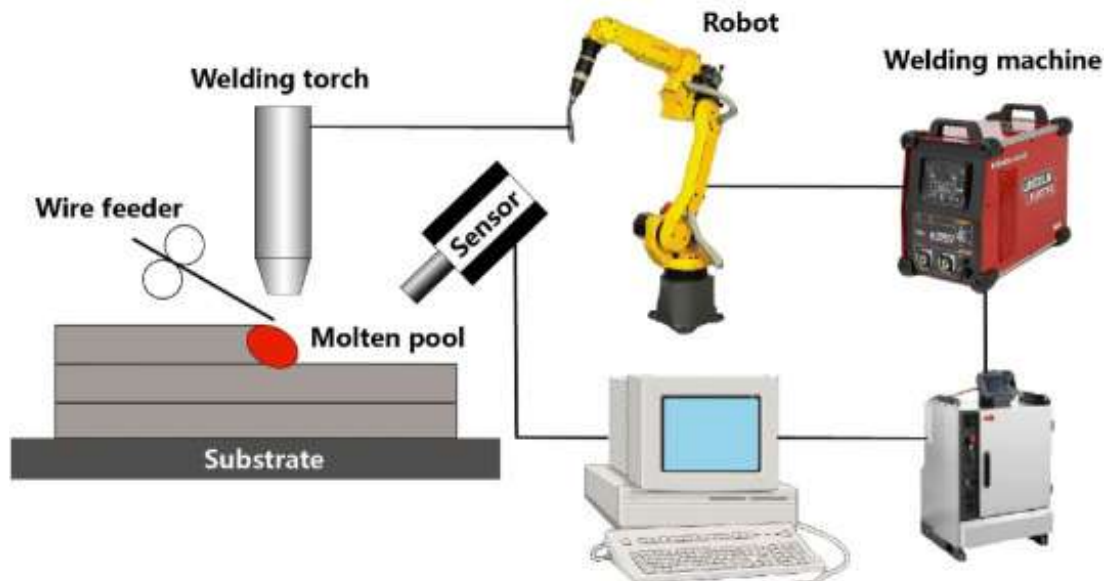
-Welding Based Additive Manufacturing: Fundamentals
Maruthasalam Sowrirajan, Selvaraj Vijayan and
Munvsamy Arulary
-ASME Section IX-Welding, Brazing and fusing
qualification

پی نوشت

1-انجمن جوشکاری و آزمایش های غیرمخرب ایران

فلز جوش ارائه داده است. برای سیم جوش فولاد کربنی SFA-5.18 ER70S-6، P_No.1 و Group-No.2 و شکل محصول را فلز جوش ارائه کرده است. مقررات تایید صلاحیت جوشکاری افزایشی، همانند مقررات تایید صلاحیت جوشکاری معمولی می باشد اما در صورت وجود مغایرت، مقررات تایید صلاحیت جوشکاری افزایشی، غالب است. WPS جوشکاری افزایشی سیمی با دستورالعمل چندگانه، تایید صلاحیت می شود:

- تایید صلاحیت در کمترین نرخ سرد شدن که ترکیبی از بالاترین ورودی حرارت و بالاترین دمای بین پاسی است.
- تایید صلاحیت در بیشترین نرخ سرد شدن که ترکیبی از پایین ترین ورودی حرارت و پایین ترین دمای بین پاسی است.
این تایید صلاحیت ها برای هر دو حد نهایی پهنای لایه (ضخامت



ساخت قطعات آلیاژ اینکونل ۶۲۵ به روش ساخت افزایشی قوسی با الکتروود فلزی و گاز محافظ (GMA-WAAM)

ابوالفضل صفرزاده^۱، مهدی شفیعی آفارانی^۲، محمود شریفی تبار^۳

چکیده

ساخت افزایشی به عنوان روشی برای تولید قطعات به صورت لایه به لایه از روی مدل سه بعدی تعریف می شود. این روش تولید در مقابل روش های کاهشی همچون ماشین کاری مطرح می شود. یکی از مکانیزم های نوین ساخت در زیرشاخه ساخت افزایشی قوس و فلز، فرایند ساخت افزایشی با الکتروود فلزی و گاز محافظ (GMA-WAAM) است. در مکانیزم WAAM چون لایه های سازنده قطعات به وسیله جوشکاری روی هم و یا کنار هم قرار می گیرند، لذا جوش پذیری، امکان تولید و پارامترهای بهینه فرایند برای آلیاژهای مختلف متفاوت است. در این پژوهش ابتدا امکان استفاده از آلیاژ اینکونل ۶۲۵ برای روش GMA-WAAM و در ادامه خواص مکانیکی و ریزساختار قطعات تولیدی بررسی شد. برای به دست آوردن پارامترهای بهینه، تعداد ۱۸ پارامتر با متغیرهای مختلف (شدت جریان، سرعت جوشکاری و سرعت تغذیه سیم) استفاده شد؛ که پس از بازرسی چشمی جوش ها، یک جوش به عنوان پارامتر بهینه انتخاب شد. در مرحله بعد دیواره های مستطیل شکل با پارامتر انتخابی تولید و نمونه های آزمون متالوگرافی، سختی و کشش از آن ها استخراج شد. نتایج نشان داد که ساختار دیواره اینکونل ۶۲۵ تولید شده، دارای دندریت های پایه نیکل همراه رسوبات بین دندریتی است. خواص کششی این آلیاژ نیز نزدیک به آلیاژ مشابه ریخته گری شده بود و سطح شکست آن نیز از نوع شکست نرم بود. میزان سختی نیز در دو راستای جوشکاری (محور X) و راستای تولید (محور Z) نزدیک به هم و مشابه اعداد سختی به دست آمده برای قطعات تولیدی آلیاژ اینکونل ۶۲۵ با دیگر روش ها بود.

کلمات کلیدی: ساخت افزایشی، اینکونل ۶۲۵، WAAM، ریزساختار، خواص مکانیکی، DED.

مقدمه

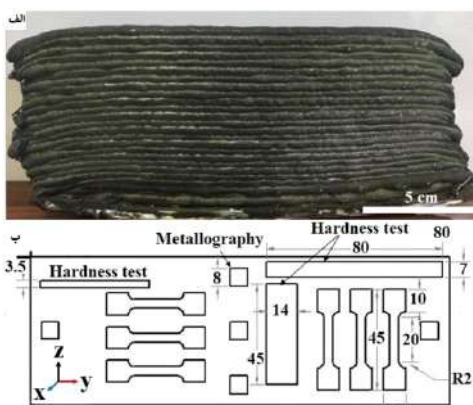
امروزه ساخت افزایشی فلزی به عنوان یک روش ساخت دلچسب و منحصر بفرد برای تولید قطعات و نمونه های اولیه معرفی شده است. در این فرایند، منابع انرژی قوی مختلفی همچون لیزر، پرتو الکترونی و قوس الکتریکی برای رسوب دهی فلز مذاب به صورت لایه به لایه برای تولید قطعات مورد نظر به کار می رود. در روش ساخت افزایشی قوس و سیم (WAAM)، قوس الکتریکی و سیم به ترتیب به عنوان منبع حرارت و مواد مصرفی مورد استفاده قرار می گیرند. جوشکاری قوسی گاز- فلز (GMAW)، جوشکاری قوسی پلاسمایی (PAW) و جوشکاری قوسی تنگستن- گاز (GTAW)، روش های عمده ای هستند که در این فرایند استفاده می شوند. مزایای اصلی فرایند

جوشکاری برای MAM نرخ رسوب بالا، توانایی تولید قطعات بزرگ و میزان سرمایه اولیه پایین است. اگرچه نمونه های تولیدی دارای سطح ناصاف و دقت ابعادی پایین است، ولی حرارت ورودی بالای این فرایند می تواند رشد دانه ها و همچنین تشکیل فازهای مضر که خواص مکانیکی را تهدید می کند را کنترل کند. بنابراین لازم است که یک ارتباط بین پارامترهای فرایند MAM و ریزساختار و خواص قطعات پیدا کنیم. در این خصوص محققین زیادی سعی داشته اند که ارتباطی منطقی بین پارامترهای مختلف روش MAM و ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای مختلف مهندسی همچون Ti-6Al-4V و فولاد زنگ نزن، آلیاژهای پایه نیکل، آلیاژهای آلومینیوم و غیره پیدا کنند. در بین این فلزات، آلیاژ اینکونل ۶۲۵ در

MIG-303C) استفاده شد. در ابتدا تک پاس هایی با پارامترهای مختلف جوشکاری شامل جریان جوشکاری A ۷۰-۱۱۰، سرعت جوشکاری $۴/۶-۳/۳$ میلی متر بر ثانیه و نرخ تغذیه سیم $۹/۹-۱۱/۵$ متر بر ثانیه جوشکاری شد. شرایط جوشکاری مناسب با بازرسی چشمی جوش ها برای رسیدن به یک پاس جوش یکنواخت و بدون نقص انجام شد. در ادامه دیواره هایی در ابعاد طولی ۲۰۰ میلی متر و ارتفاع ۷۰ میلی متر با ۲۷ پاس رفت و برگشتی جوش، تولید شد؛ که پارامترهای جوشکاری آن در جدول (۲) ارائه شده است. جریان گاز آرگون نیز ۱۵ لیتر بر دقیقه تنظیم شده بود. ه پاس جوشکاری در خلاف جهت پاس قبلی خود انجام شد و بین هر پاس زمان ۳ دقیقه فاصله زمانی در نظر گرفته شد تا حداکثر دمای بین پاسی به ۱۵۰ درجه سانتی گراد برسد. تصویر دیواره در شکل (۱- الف) نمایش داده شده است. بعلاوه یک دیواره با ۶ پاس رفت و برگشتی برای بررسی ریزساختار آلیاژ اینکونل ۶۲۵ تولید شده، ساخته شد.

-خواص

ساختار دیواره ها با پراش اشعه ایکس با لامپ $Cu_{K\alpha}$ مورد بررسی قرار گرفت. ریزساختار دیواره ها در نقاط مختلف با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی مجهز به آنالیز انرژی طیف برگشتی مشاهده و بررسی شد. نمونه های متالوگرافی با درجه الماس ۱ میکرومتر پولیش شدند. برای آشکار شدن ریزساختار نمونه های استخراج شده از دیواره در محلول تیروکسید کروم ($90ml H_2O, 10 gr CrO_3$) به مدت ۲۰ ثانیه الکترواچ شدند. خواص مکانیکی با استحکام کششی دمای اتاق، در دو جهت جوشکاری (محور X) و راستای تولید (محور Z) بررسی شد. مکان و ابعاد نمونه های کشش در نمای شماتیک ارائه شده در شکل (۱-ب)، نشان داده شده است.



شکل ۱- الف تصویر یکی از دیواره های ساخته شده به روش GMA-WAAM، ب- شماتیک نمونه های استخراج شده از برای انجام آزمون های متالوگرافی، کشش و سختی

به دلیل سایز کوچک دیواره ها، ۶ نمونه تست کشش کوچک از هر دیواره استخراج شد، که سه تای آن ها در جهت جوشکاری و

MAM توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این فلز یک آلیاژ استحکام یافته محلول جامد دما بالا است که کاربردهای خاصی در هوافضا و صنایع دریایی دارد. قبلا مطرح شد که خواص اینکونل ۶۲۵ شدیداً به نوع فرایند **MAM** وابسته است. خواص کششی آلیاژ اینکونل ۶۲۵ ساخته شده به روش همجوشی بستر پودر با لیزر (**LPBF**) بین $۹۰۰-۱۰۴۰$ **Mpa** است، درحالی که استحکام کششی قطعات تولید شده اینکونل ۶۲۵ با فرایندهای جوشکاری همچون **GTAW** و **PAW** کمتر بوده و به مقدار ۸۰۰ **MPa** است. فرایند **GMAW** یک کاندید مناسب برای **MAM** است، زیرا نرخ رسوب بسیار بالا و قابلیت اتوماتیک کردن دارد و همچنین محافظت خوبی از فلز جوشکاری با گاز محافظ صورت می گیرد. تاکنون مطالعات زیادی با تمرکز بر بررسی خواص آلیاژهای تولید شده به روش ساخت افزایشی با **GMAW** صورت گرفته است. هرچند کمبود اطلاعات در مورد خواص اینکونل ۶۲۵ تولید شده با این روش وجود دارد. اخیراً، یانگ و همکارانش تاثیر سرعت حرکت تورچ بر ریزساختار و خواص مکانیکی اینکونل ۶۲۵ تولید شده به روش ساخت افزایشی قوسی سیم - انتقال فلز سرد (**CMT- WAAM**) مورد بررسی قرار دادند. آن ها نشان دادند که به جز استحکام کششی نهایی، باقی خواص مکانیکی نسبت به آلیاژ تولیدی با روش ریختگی، تقویت شده است. با اینکه تفاوت ناچیزی بین دو روش **CMT- WAAM** و **GMAW** وجود دارد؛ در روش **CMT- WAAM** تمام حرارت تولید شده به صورت تغذیه پالسی در حوضچه جوش کنترل شده است، این اتفاق باعث می شود که حرارت ورودی که می تواند روی خواص نهایی روی قطعه تولید شده تاثیر داشته باشد را، کاهش دهد. بنابراین خواص قطعه آلیاژ اینکونل ۶۲۵ تولید شده با روش ساخت افزایشی با الکتروود فلزی و گاز محافظ **GMA- WAAM** با قطعات تولیدی این آلیاژ به روش **CMT- WAAM** متفاوت است. در این تحقیق هدف ساخت قطعاتی از جنس آلیاژ اینکونل ۶۲۵ به روش **GMA- WAAM** و بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار آن است.

مواد و روش پژوهش

-مواد

به منظور ساخت دیواره های اینکونل ۶۲۵ به روش **WAAM** سیم جوش $Ni-Cr-Mo_3$ با قطر $۰/۸$ میلی متر از شرکت **ESAB** خریداری شد. زیرلایه مورد استفاده قطعه ای از فولاد زنگ نزن $۳۰۴L$ سمباده خورده، در ابعاد $۲۵۰*۲۰*۴$ میلی متر بود. ترکیب شیمیایی سیم تغذیه شده (**ESAB**) و زیرلایه که با طیف سنج نوری (**Oxford**) اندازه گیری شده بود به همراه ترکیب شیمیایی اینکونل ۶۲۵ طبق استاندارد **ASTM B443** به دست آمده بود، در جدول (۱) ارائه شده است. بعلاوه از گاز آرگون با خلوص $۹۹/۹۹\%$ برای محافظت فلز جوش از اکسید شدن حین جوشکاری استفاده شد.

- شرایط تولید

برای جوشکاری لایه به لایه فلز جوشکاری با قطبیت جریان مستقیم الکتروود مثبت (**DCEP**) از دستگاه **(JOSHAS) GMAW**-

جدول ۱- ترکیب شیمیایی الکتروود بدون زیرکونیوم

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	Fe	V	S	P	Ref
Inconel 625 wire	<0.1	<0.5	<0.5	21.5	Bal.	<0.5	0.5	0.4	0.4	0.2	---	---	---	ESAB
304L SS substrate	0.02	0.3	1.5	18.4	8.2	0.1	0.3	0.1	---	Bal.	0.1	0.01	0.03	---
Inconel 625	<0.1	<0.5	<0.5	20.0-23.0	>58	8.0-10.0	---	---	---	<5.0	---	---	---	ASTM B443

گردیدان دمایی را پیروی می کنند. [۳۴ و ۳۵]. این باعث می شود که یک دانه با جهت ترجیحی در قطعه تولیدی ایجاد شود و نتیجتاً ناهمسانگردی در خواص مکانیکی ایجاد شود. شکل (۲-الف) یک تصویر ماکروگرافی نوری از دیواره ۱٫۶ سانتی متری که از ۶ پاس رفت و برگشتی ساخته شده است را نشان می دهد. لایه ها به خوبی مشخص هستند و در این تصویر می تون آن ها را به خوبی تشخیص داد. دیواره جوشکاری شده کاملاً سالم و عاری از تخلخل است. تصاویر میکروگرافی نوری فلز جوشکاری شده از نقاط مختلف دیواره، در شکل (۲-الف تا ی) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۲-ب) مشخص است، یک اتصال خوب و واضح بین فلز جوش و زیرلایه فولاد زنگ نزن ۳۰۴L وجود دارد. ریزساختار فلز جوش در نزدیکی فصل مشترک شامل دانه های سلولی و دندریتی با بازوهای ثانویه خیلی ریز است. بیشتر دندریت ها به صورت ترجیحی و در راستای محور Z عمود بر سطح مشترک زیرلایه است، رشد کرده اند. با وجود رشد اپیتکسیال برخی دانه های بین لایه ها که در شکل (۲-ج و ۲-و) مشخص است، تغییرات شدیدی در ساختار دانه در فصل مشترک لایه ها وجود دارد، که به احتمال زیاد به خاطر ذوب دانه های قبلی در اثر رسوب دادن پاس جدید و انجماد مجدد آن است. با افزایش ارتفاع دیواره، فاصله بازوهای ثانویه دندریتی (SDAS) از حدود ۶ میکرومتر در نزدیکی فصل مشترک، به حدود ۱۵ میکرومتر افزایش یافته است. ساختار انجمادی به سرعت انجماد (R)، شیب حرارتی (G)، ترکیب مذاب و غیره وابسته است. به خوبی قابل درک است که نوع ساختار دانه، با نسبت G/R تعیین می شود. در حالی که اندازه ساختار انجمادی با حاصل G.R کنترل می شود [۳۵]. مورفولوژی ساختار انجمادی با کاهش نسبت G/R، از ستونی به دندریتی تغییر می کند. بعلاوه سرعت انجماد بالاتر باعث ریزتر شدن ریزساختار می شود [۳۵]. با رسوب لایه های اول، زیرلایه به عنوان یک خنک کننده عمل می کند که باعث افزایش شیب دمایی و سرعت سرد شدن می شود. بنابراین دانه های ستونی ریز نزدیک زیرلایه تشکیل شده است. در حالی که تراکم دمایی در لایه های بالاتر باعث کاهش شیب دمایی و سرعت سرد شدن شده است؛ که به نوبه خود، ساختار دانه ها را از ستونی به دندریتی تغییر داده است و به طور قابل ملاحظه ای SDAS را افزایش داده است.

برای تولید یک قطعه مناسب به روش GMA-WAAM، فلز جوش روی لایه فلز انجماد یافته جوشکاری شده است. بنابراین حرارت پاس بعدی می تواند ریزساختار پاس قبلی را تغییر دهد. تصویر (۴) به ترتیب تصاویر FESEM منطقه حرارت دیده (مجدد) و لایه رسوب داده شده را نشان می دهد. در هر دو منطقه، برخی از فازهای ثانویه با کنتراست رنگ روشن در مناطق بین دندریتی

سه تایی دیگر در جهت تولید بودند. سپس میانگین مقدار سه نمونه در هر جهت گزارش شدند. اندازه نمونه های استخراج شده مشابه مقاله وانگ و همکارانش [۲۹] است. این آزمون با دستگاه تست کشش (GOTECH, Taiwan) با سرعت حرکت پیشانی 5 میلی متر بر دقیقه انجام شد. از طرفی تست سختی سنجی ویکرز (INNOVATEST) نیز با بار ۵۰۰ گرم برای ۱۰ ثانیه صورت گرفت تا تغییرات سختی در راستای محور X و Z مورد بررسی قرار گیرند. برای هر جهت تعداد ۲۰ نقطه سختی گرفته شد و میانگین آن ها برای هر جهت گزارش شد.

جدول ۲- پارامترهای فرایند GMA-WAAM

Welding parameter	value
Welding current (A)	100
Welding voltage (V)	18
Welding speed (mm/s)	4.6
Argon gas flow rate (l/min)	15
Wire feed rate (m/s)	158
Welding heat input (J/mm)	386

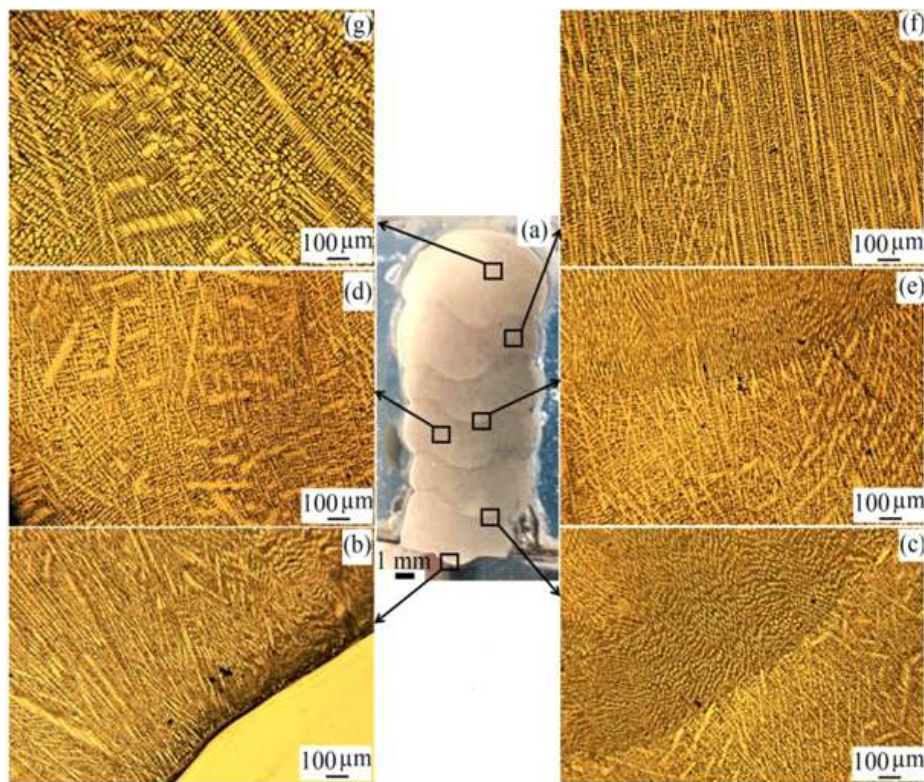
نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی و آنالیز فازی

حرارت ورودی بالای فرایند GMAW می تواند برخی از عناصر آلیاژی را تبخیر کند و ترکیب شیمیایی فلز جوشکاری شده را تغییر دهد. بنابراین ترکیب شیمیایی نمونه تولید شده با طیف سنج نوری تعیین شد، که Cr % 2/22، Mo % 3/9، Nb % 7/3، Ti % 17/0، Fe % 18/0، Si % 05/0، Co % 06/0، Al % 05/0، C % 02/0، V % 02/0، و باقی آن نیکل بود (گزارشات بر اساس درصد وزنی است). که ترکیب به دست آمده با ترکیب اینکونل ۶۲۵ ارائه شده در استاندارد ASTM B443، کاملاً مطابقت دارد؛ این داده ها در جدول (۱) ارائه شده است. الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) مربوط به دیواره تولید شده است. محلول جامد پایه نیکل (۱۰۱۶-۰۰۰۰۳) با ساختار کریستالی FCC، تنها فازی بود که مشاهده شد.

بررسی ریزساختار

در روش های ساخت افزایشی فلزی مانند WAAM، یک بخش مطلوب فرایند، همپوشانی فلز جوش به شکل لایه به لایه است، این در حالی است که ساختار انجمادی، اندازه دانه و جهت گیری دانه، وابستگی شدیدی به مکان لایه جوشکاری شده نسبت به زیرلایه و همچنین نحوه رویش لایه ها دارد [۲۹ و ۳۳]. بر اساس تئوری انجماد فلزات جوشکاری، بیشتر دانه ها رشدی ستونی به سمت حوضچه جوش مشترک دارند، زیرا آن ها مسیر جریان حرارتی با بیشترین

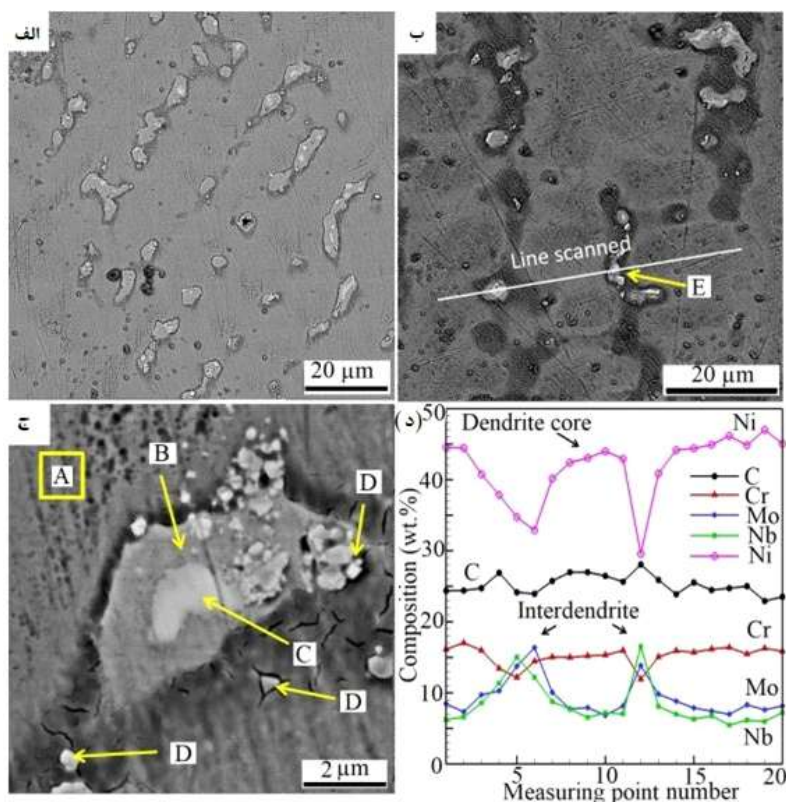


شکل ۲- الف- تصویر ماکروگرافی یک دیواره ۶ پاسه ب تا ی- تصاویر میکروسکوپ نوری از نقاط مختلف دیواره

جدول (۳) ارائه شده است (تمام مقادیر برحسب درصد است). به دلیل محدودیت ابزاری EDS برای اندازه گیری کمی عناصر روشن، غلظت کربن گزارش نشده است. زمینه یک محلول جامد پایه نیکل شامل Cr ، Nb ، Mo و Fe است. فازهای ثانویه که با مرفولوژی و کنتراست رنگی متفاوت در تصاویر FESEM ظاهر شده اند، در شکل (۳-ج) ارائه شده اند. برخی ذرات سفید و ریز با شکل منظم که با D مشخص شده اند، علاوه بر آن در بعضی نواحی فازهای روشن نامنظم (نقطه C) با فازهای خاکستری روشن (نقطه B) احاطه شده اند. ذرات روشنی (که با D مشخص شده اند) که غنی از Nb ، Mo و Ti هستند، کاربرد Ti ، Mo ، Nb (C) می باشند. در نقاط B و C غلظت Nb و Mo بیشتر از زمینه (نقطه A) است. ژو و همکارانش طی تحقیقات گسترده، نوع فازهای ثانویه تشکیل شده طی فرایند ساخت افزایشی قوس پلاسما آلیاز اینکونل ۶۲۵ را توسط آنالیز EDS و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، مورد بررسی قرار دادند. آن ها نشان دادند که فازهای بین فلزی مانند فاز لاوه، کاربیدهای MC و $\delta\text{-Ni}_3\text{Nb}$ در ساختار نمونه جوشکاری شده، تشکیل شده است. فاز لاوه یک ساختار A_2B دارد که در آن A: Ni ، Cr ، Fe و Ti ، Nb ، Mo ، Ti می باشند. بر اساس این تحقیقات، انجماد آلیاز با تغییر شکل $\gamma \rightarrow \text{L}$ شروع می شود که عناصر Mo ، C ، Ti و Nb را به مرز دانه مذاب می راند. سپس کاربرد MC با تغییر شکل $\text{L} \rightarrow \gamma + \text{mc}$ یعنی واکنش یوتکتیک تشکیل شده است؛ و در نهایت باقی مایع با واکنش یوتکتیک سه تایی

فازهای ثانویه با کنتراست رنگ روشن در مناطق بین دندریتی تشکیل شده است. اندازه و کسر حجمی متوسط ذرات ثانویه در لایه بالایی توسط نرم افزار Image J اندازه گیری شد که به ترتیب ۶/۷ میکرومتر و ۳/۰٪ بود. در حالی که هردو آن ها به صورت جداگانه در منطقه حرارت دیده تا ۸/۴ میکرومتر و ۳/۷٪ افزایش داشته اند. کسر حجمی محاسبه شده ذرات ثانویه کمتر از آستانه تشخیص ابزار اندازه گیری XRD، یعنی ۵٪ بود. ضمناً به نظر می رسد که افزایش ناچیز اندازه و کسر حجمی ذرات با حرارت بعدی در منطقه حرارت دیده شده، اتفاق افتاده است. تغییر در مورفولوژی و کسر حجمی فازهای ثانویه با افزایش ارتفاع دیوار طی فرایند ساخت افزایشی قوسی تنگستن- گاز آلیاز اینکونل ۶۲۵ توسط وانگ و همکارانش گزارش شده است.

برای بررسی توزیع عناصر آلیازی در ریزساختار، اسکن خطی EDS در راستای خط نشان داده شده در تصویر (۳-ب)، گرفته شد؛ که در شکل (۳-د) توضیحات آن ارائه شده است. مشخص شد که اکثر عناصر آلیازی به طور غیر یکنواخت و با تفکیک شدید توزیع شده اند. هسته دندریت از برخی عناصر مانند Ni و Cr غنی است، در حالی که در مناطق بین دندریتی عناصر Nb ، Mo و C وجود دارد. بنابراین به نظر می رسد که جدایش عناصر به مناطق بین دندریتی منجر به تشکیل فازهای ثانویه شده است. تصاویر میکروگرافی فازهای ثانویه در شکل (۳-ج) نشان داده شده است. علاوه بر این، ترکیب شیمیایی این فازها و فاز زمینه با آنالیز EDS از نظر کمی اندازه گیری و در



شکل ۳- تصویر FESEM مربوط به دیواره اینکونل ۶۲۵ تولید شده به روش GMA-WAAM
الف - منطقه مجدد حرارت دیده، ب - چند پاس جوشکاری

جدول ۳- مقادیر کمی ترکیبات شیمیایی مربوط به چند فاز متنوع حاصل از آنالیز EDS

Analyzed point	Chemical composition (at.%)					
	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	Ti
A	25.1	2.6	60.4	4.6	7.3	---
B	23.0	0.5	58.3	8.6	9.6	---
C	19.0	1.5	43.8	20.4	15.3	---
D	12.3	0.9	26.1	48.4	9.2	3.1
E	21.7	0.3	47.6	16.8	13.6	---

- بررسی خواص مکانیکی

خواص کششی مربوط به دیواره اینکونل ۶۲۵ تولید شده به روش GMA-WAAM و آلیاژهای مشابه ساخته شده به دیگر روش های WAAM و همچنین یک نمونه ریختگی را نشان می دهد. هر دو تنش تسلیم و تنش کششی نمونه جوشکاری شده در جهت جوشکاری (TD) (راستای محور X) نسبت به راستای تولید BD (راستای محور Z) بیشتر است؛ در حالی که ازدیاد طول آن ها تقریباً مشابه یکدیگر بود. به علاوه استحکام کششی و ازدیاد طول آلیاژ در جهت تولید (BD)، نزدیک به خواص آلیاژ ریختگی بود؛ که به احتمال زیاد به دلیل ساختار دانه ریز به دست آمده به خاطر نرخ سرد شدن بالای این روش در مقایسه با روش ریخته گری است.

خواص مکانیکی قطعات اینکونل ۶۲۵ تولید شده در این پروژه با قطعات آلیاژ یکسان تولید شده با دیگر روش های WAAM مانند

$\delta + \text{Laves} + \gamma + \text{L}$ جامد می شود. علاوه بر این، ژو و همکارانش نشان دادند که فاز δ در مناطق بالایی دیواره و در مناطقی که دوباره حرارت دیده، نسبت به نواحی نزدیک به فصل مشترک، بیشتر تشکیل شده است. بنابراین آن ها نتیجه گرفتند که افزایش حرارت ورودی در فرایند ساخت، عناصر آلیاژی را در مناطق بین دندریتی متراکم می کند و شرایط را برای تشکیل فاز $\delta\text{-Ni}_3\text{Nb}$ فراهم می کند. همچنین حرارت مجدد، منجر به انحلال فاز لاوه و رسوب δ حین سرد شدن بعدی شده است [۱۷]. ژو و همکارانش [۲۹]، در گزارشی مشابه که تحت عنوان ساخت افزایشی قوسی تنگستن - گاز ارائه شده بود، تشکیل فاز لاوه را تایید کردند. همانطور که در جدول (۳) ارائه شده است، فاز براق مشخص شده با C دارای (Ni+Cr+Fe, %64.3) و (Nb+Mo+Ti, %35.7) است که با ساختار A₂B مربوط به فاز لاوه مطابقت دارد. نقطه E که در شکل (۳-ب) مشخص شده، ترکیبی مشابه با ترکیبی که در جدول (۳) ارائه شده است، دارد. از طرف دیگر فازهای خاکستری روشن که با فاز لاوه احاطه شده اند دارای (Ni+Cr+Fe, %81.8) و (Nb+Mo+Ti, %18.2) است که مشابه ترکیب فاز $\delta\text{-(Ni,Cr,Fe)}_3\text{(Nb,Mo)}$ است. بنابراین نتیجه می شود که علاوه بر محلول جامد پایه نیکل، کاربید MC، فاز لاوه و فاز δ در ساختار دیواره جوشکاری شده، تشکیل شده است.

گرفته اند. ترکیب شیمیایی ذرات و زمینه که با آنالیز نیمه کمی EDS به دست آمده است، در جدول (۴) ارائه شده اند. ذرات با غلظت بالای کربن و عناصر تشکیل دهنده کاربید مانند Ti و Nb را می توان به عنوان فاز کاربید MC تخمین زد، در حالی که زمینه یک محلول جامد پایه نیکل است که غلظت بالایی از Cr دارد. پیش از این نشان داده شد که دندریت ها عمدتاً در راستای محور Z رشد می کنند. برای نمونه ای در راستای محور X بارگذاری شده، تنش کششی عمود بر جهت رشد دندریت ها اعمال شده است. در نتیجه، دیمپل ها از ذرات ثانویه ای که در راستای محور دندریت ها وجود داشته اند، آغاز شده اند.

جدول ۴- ترکیبات شیمیایی به دست آمده با آنالیز EDS مربوط به نقاط مشخص شده در شکل ۵

Analyzed point	Chemical composition (wt.%)						
	C	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	Ti
A	21.0	4.0	---	11.8	62.7	---	0.5
B	---	22.5	---	64.5	4.2	8.6	0.2
C	30.5	10.3	0.3	25.9	31.6	16.1	1.4

بررسی سختی

همانطور که بیان شد، آزمون سختی در دو جهت X و Z صورت گرفت. میانگین اعداد به دست آمده از این آزمون سختی را در راستای جوشکاری ۲۳۰ ویکرز و در راستای تولید ۲۶۰ ویکرز نشان داد. با توجه به نتایج به دست آمده میزان سختی در دو راستای تولید و راستای جوشکاری میزان سختی نزدیک به هم بوده است. این مقادیر نزدیک به سختی قطعات تولیدی مشابه با دیگر روش های ساخت است و دیگر محققان نیز در تحقیقات خود به نتایج مشابهی دست یافته اند. فوجیشیما و همکارانش در تحقیقاتی مقدار سختی دیواره تولیدی از جنس اینکونل ۶۲۵ رسوب داده شده به روش DED را در ارتفاعات و فواصل مختلف مورد بررسی قرار دادند، نتایج حاصل از این تحقیق اینگونه ارائه شد که مقدار سختی در پاس های پایین و نزدیک زیرلایه نزدیک به ۱۰ درصد کمتر از مقدار سختی در پاس های بالایی است؛ که دلیل آن را سریع سرد شدن پاس های اول بیان کرده اند.

نتیجه گیری

در این مقاله، ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه های از آلیاژ اینکونل ۶۲۵ تولید شده به روش ساخت افزایشی GMA-WAAM بررسی شد. در این راستا ابتدا پارامتر بهینه فرایند به دست آمد و سپس آزمون های مختلفی از قبیل آزمون کشش، سختی سنجی و بررسی متالوگرافی انجام شد.

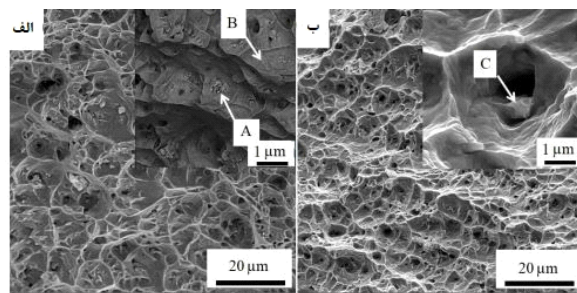
پی نوشت

دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده شهید نیکبخت، گروه مهندسی مواد و متالورژی

PAW و GTAW، CMT- GMAW و قابل مقایسه است. در حالی که مقدار زیاد طول در نمونه ساخته شده با فرایند LPBF به نسبت اینکونل ۶۲۵ تولید شده در این پژوهش، به طور قابل ملاحظه ای بیشتر بود. خواص مکانیکی قطعات عمدتاً به ریزساختار سطح شکست آن ها وابسته است. در فرایندهای جوشکاری قوسی، سرعت سرد شدن تقریباً مشابه است و در نتیجه ریزساختار خواص مکانیکی مشابهی حاصل می شود. در صورتی که سرعت سرد شدن در روش LPBF خیلی بالاست و این اتفاق نه تنها مقادیر جداسازی حین انجماد را کاهش می دهد، بلکه منجر به تشکیل دندریت های خیلی ریز شده است. در نتیجه استحکام کششی آلیاژ تولید شده به روش LPBF نسبت به آلیاژ تولید شده با فرایندهای جوشکاری قوسی، به مقدار قابل ملاحظه ای بیشتر بود. با این وجود تشکیل منافذ، شکل پذیری آلیاژ تولید شده با روش LPBF را کاهش می دهد.

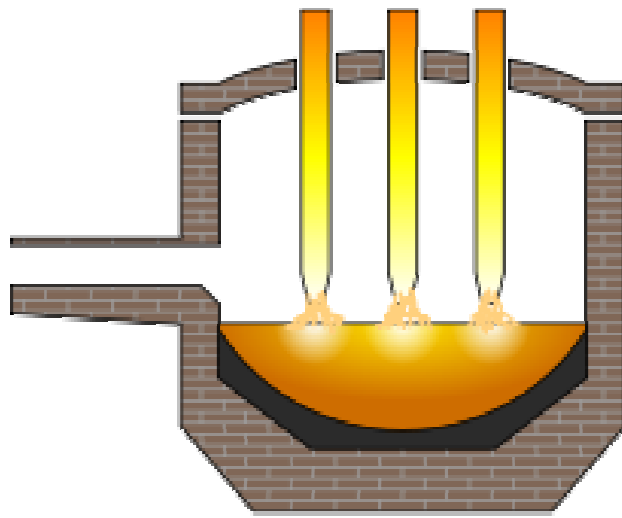
بررسی سطح شکست

سطح شکست نمونه های تست کشش با FESEM، برای پیدا کردن مکانیزم شکست مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر FESEM با بزرگنمایی های مختلف که از سطح شکست نمونه های مختلف در جهت جوشکاری (محور X) و راستای تولید (محور Z) تهیه شده است، در شکل (۴) نشان داده شده اند. علی رغم وجود برخی دیمپل های بزرگ، تقریباً توزیع یکنواختی از دیمپل های ریز وجود دارد که نوع شکست نرم را برای هر دو نمونه در راستای جوشکاری و جهت تولید تایید می کند؛ که به ترتیب در شکل (۴-الف و ۴-ب) نشان داده شده است.



شکل ۴- تصاویر FESEM مربوط به سطح شکست نمونه های آزمون کشش
الف- سطح شکست نمونه در آزمون کشش راستای Z
ب- سطح شکست نمونه در آزمون کشش راستای X

برای نمونه های آزمایش شده در جهت تولید، دیمپل هایی در راستای خطوط موازی شکل گرفته اند. تصاویر ریزساختار با بزرگنمایی بیشتر با روش تصویربرداری الکترون برگشتی (BSE) تهیه شده اند، که در شکل (۴-الف) ارائه شده است. این تصویر نشان می دهد که دیمپل ها از برخی ذرات ثانویه (نقطه A) که نسبت به زمینه (نقطه B) کنتراست رنگی روشن تری دارد، نشأت



تهیه دستورالعمل و عملیات جوشکاری سوپر استراکچر قاب بالا و پایین سقف کوره قوس الکتریکی واحد فولاد سازی

ایمان حاجیان نیا^{1,2}، افضل روانگرد³، عباس عباسیان⁴، غلامرضا طلاشرفی²، حسین نادر بیگی²، پژمان روناسی⁵

چکیده

در این تحقیق از ورق CEN ISO/TR 15608 در ضخامت ۲۵ تا ۴۰ میلیمتر استفاده شد تا به وسیله انواع جوش گوشه ای و شیار ای این مقطع پیچیده برای سوپر استراکچر قاب بالا و پایین سقف کوره قوس الکتریکی واحد فولاد سازی با کیفیت مطلوب و بدون پیچیدگی و با دستورالعمل مخصوص جوشکاری شود. در جوشکاری مقاطع سنگین، عدم پیچیدگی و ترک خوردگی یک موضوع مهم است که نیاز به کنترل فلزات پایه، مواد جوش، پیش گرمایش و عوامل دیگر دارد. از آنالیز کوانتومتری برای تعیین دقیق ترکیب شیمیایی ورق استفاده شد. طبق دستورالعمل تهیه شده جوشکاری از الکتروود مخصوص E7018-1 H4R با قطر ۳،۲۵ تا ۴ میلیمتر استفاده گردید 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. تقلیل سطح تنش های پسماند حاصل از جوشکاری در اتصال و ایجاد سهولت برای خروج هیدروژن از اهم کار بود. که با کنترل دمای پیشگرم و بین پاسی تامین شد. در نهایت قطعه جوشکاری شده پس از نقشه برداری ابعادی برای عدم پیچیدگی با دقت ۰/۲ میلیمتر کامل و تحویل داده شد و در همه مراحل آزمون غیر مخرب برای ارزیابی و کیفیت و سلامت جوش ها انجام شد.

کلمات کلیدی: پیش گرم، دستورالعمل جوشکاری، فلز پر کننده E7018-1 H4R، پیچیدگی.

مقدمه

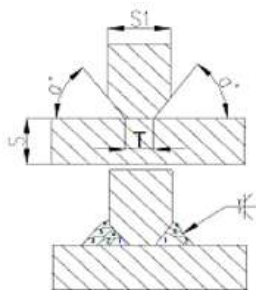
چالش های جوشکاری در ورق های فولادی ضخیم و با طراحی و کاربرد خاص بسیار حایز اهمیت است. زیرا برای جوشکاری مقاطع سنگین، عدم پیچیدگی و ترک خوردگی یک موضوع مهم است که نیاز به کنترل فلزات پایه، مواد جوش، پیش گرمایش و عوامل دیگر دارد. در کار با ورق فولادی، ترک خوردگی به ندرت مشکل ساز است. با این حال، در استفاده از ورق فولادی با ابعاد پیچیده علاوه بر تمایل مذاب به ذوب فلز پایه، مشکل بالقوه پیچیدگی است. کمانش، پیچ و تاب و پیچش، چالش های مداوم هستند. با این حال، راه حل نسبتاً ساده است، کوچک نگه داشتن اندازه جوش و ایجاد جوش با بیشترین سرعت ممکن (که این کار با پایین ترین سطح حرارت ورودی صورت می گیرد). فولادهای سنگین یا ورق های فولادی می توانند با جوش گوشه ای به هم متصل شوند. ولی اساس طراحی برای

دو مورد متفاوت است، برای جوش های گوشه ای موجود در انجمن جوشکاری آمریکا D1.1، گلوبی به عنوان المان کنترل کننده فرض می شود و ظرفیت اتصال تا حدی وابسته به مقاومت فلز جوش رسوب کننده دارد. در مورد ورق های فولادی، D1.3 فرض می کند که ظرفیت اتصال با مقاومت ورق فولاد تعیین می شود. به عنوان یک نتیجه، مقاومت ورق فولادی است که در محاسبات طراحی استفاده می شود نه مقاومت فلز جوش رسوب کننده، لذا کار کمی پیچیده خواهد شد [۱].

ورق فولادی مورد استفاده در این پژوهش با استحکام کششی بالا و محتوای کربن کم می باشد. از مشخصات ورق مورد استفاده CEN ISO/TR 15608 نورد شده به استحکام کششی و سختی خوب، قابلیت انعطاف پذیری قابل توجه و قابلیت پردازش بسیار خوب می توان اشاره کرد. این ورق در سازه هایی که فرایند جوشکاری

انتخاب فلزات پرکننده در این تحقیق علاوه بر ترکیب شیمیایی براساس پارامترهای دیگری مانند خواص مکانیکی حاصل، پایداری حرارتی، مقاومت به خوردگی، در دسترس بودن و هزینه‌ها انجام شد [۳].

برای ایجاد اتصال بین فلزات پایه مونتاژ انجام شد. به منظور انجام عملیات جوشکاری ذوبی لازم بود تا در ابتدا ورق‌ها 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 پخش سازی و عدم وجود ترک در نمونه‌های 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. آلودگی‌ها و چربی‌های احتمالی موجود در سطح قطعات توسط برس سیمی و سیم جوش‌ها با پاک کننده حذف شد. شکل (۲)، سوپراستراکچر قاب بالا و پایین سقف کوره قوس الکتریکی واحد فولاد سازی در حالت مونتاژ شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرح اتصال مورد استفاده و مشخصات.



شکل ۲- سوپراستراکچر قاب بالا و پایین سقف کوره قوس الکتریکی واحد فولاد سازی

جوشکاری با استفاده از دستگاه جوش گام الکتریک مدل **Pars-EL 631** به صورت دستی انجام شد. دمای پیش گرم با توجه به جنس و ضخامت ماده ۱۰۰ و دمای بین پاسی ۲۵۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد تا تنش‌های 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

در آن دخیل است بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که خاصیت ارتجاعی این ورق به دلیل وجود عنصر آلیاژی منگنز است. میدانیم برای واحد فولاد سازی داشتن ابعاد در حد مجاز برای بارهای دینامیکی بینهایت حیاتی است و لذا برای حصول این امر باید متریال مورد نظر دارای دستورات عملی ویژه باشد چرا که با توجه به پیچیده بودن و ضخامت جوش‌ها ممکن است پیچیدگی و یا حتی ترک به وجود آید. جهت جوشکاری باید تمهیدات خاصی را از جمله عملیات پیش گرم و کنترل دمای بین پاسی در نظر گرفت. به این منظور در این مطالعه موردی متریال پایه پس از مونتاژ و فیکس شدن با طراحی خاص، به وسیله بهترین جوشکاران و با نظارت صد درصدی و نگارش دستورالعمل مرتبط جوشکاری گردید. هدف از این عملیات ایجاد شرایط ایده‌آل قطعه جوشکاری شده بود. در ادامه به تهیه متریال مونتاژ و و چگونگی اعمال دستورالعمل جوشکاری و کنترل دماهای مختلف در قطعه پرداخته شده است و در نهایت صحت همه مراحل جوشکاری با چند مرحله آزمون غیر مخرب تایید شده است.

مواد و روش پژوهش

در این تحقیق از ورق **CEN ISO/TR 15608** در ضخامت ۲۵ تا ۴۰ میلیمتر استفاده شد. از آنالیز کوانتومتری جهت تعیین دقیق ترکیب شیمیایی ورق استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلزات پایه در جدول (۱) ارائه شده است. خواص مکانیکی این نوع فولاد را می‌توان با پرداختن به دو پارامتر تنش تسلیم و مقاومت کششی بررسی کرد. در اصل، مقاومت کششی با حداکثر استرس اندازه گیری می‌شود که فولاد در هنگام کشش یا کشیدن قبل از شکستن در برابر آن مقاومت می‌کند و تنش تسلیم حداکثر استرس است که می‌تواند 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 ۳۵۵ نیوتن بر میلیمتر مربع و مقاومت در برابر کشش ۶۳۰ نیوتن بر میلیمتر مربع می‌باشد. این ماده در مقایسه با معادل کم کربن آن، دارای خاصیت عالی در شکل‌گیری سرد است.

CEN ISO/TR 15608 طبق دستورالعمل جوشکاری نگارش شده از الکتروود مخصوص **E7018-1 H4R** با قطر ۳،۲۵ تا ۴ میلیمتر و با استاندارد **SFA- AWS A5.1** و همچنین از استاندارد **ASME SEC.II, Part C** و مشخصات ارائه شده از طرف سازنده استفاده شد [۲]. در تمامی موارد از سیم جوش‌های با قطر ۳،۲۵ تا ۴ میلی‌متر جهت پاس ریشه و پاس‌های بعدی استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلز پرکننده در جدول (۱) آورده شده است.

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

فلز پایه	C	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	Fe
CEN ISO/TR 15608	۰/۲	۰/۳	۰/۵	۱/۵۸	۰/۵	۰/۱	بقیه
فلز پرکننده	C	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	Fe
E7018-1 H4R	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۱/۶۴	۰/۷	۰/۱۵	بقیه

ورودی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد [۲].

$$H.I = \frac{\eta.I.V}{s} \quad (1)$$

در این رابطه **I** شدت جریان، **V** ولتاژ و **S** سرعت جوشکاری است. η بازده قوس در این رابطه ۰/۸ 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 گونه‌ای انتخاب شد که ضمن جلوگیری از حرارت ورودی اضافی به حوضچه مذاب، بهترین سیالیت و نفوذپذیری حاصل شود.

جدول (۲) مشخصات جوشکاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. حرارت ورودی نقش مهمی را در تعیین ریز ساختار منطقه جوش ایفا می‌کند به طوری که با افزایش حرارت ورودی ممکن است باعث به وجود آمدن فازهای ترد و عیوبی مانند گرده جوش اضافی، بریدگی کنار و ذوب ناقص و نفوذ ناقص شود. با کنترل سرعت جوشکاری و آمپر از ایجاد این عیوب می‌توان جلوگیری نمود. در این جا با سرعت نسبتاً بالاتری از جوش‌های مشابه استفاده شد که علت آن کنترل دقیق رقت و دمای بین پاسی بود، در غیر این صورت احتمال ایجاد ترک‌های انجمادی در قطعات جوشکاری شده وجود داشت [۳].

جدول ۲- مشخصات جوشکاری نمونه‌ها.

فلز پرکننده یا جریان DC-EP	پارامترهای جوشکاری			
	شماره پاس	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	سرعت جوشکاری (mm^{-1})
E7018-1 H4R	۱	۱۰۰	۲۲	۱/۱
	۲	۱۰۰	۲۲	۱/۰
	۳	۱۵۰	۲۳	۱/۱

نتایج و بحث

در این مقاله موضوع اصلی عدم بیچیدگی و کنترل گرم شدن و تغییر دمای سریع در فلز پایه است. پس از اینکه یک پاس جوشکاری انجام شد ممکن است که قطعه دمایش بیفتد، باید برای جلوگیری از این موضوع همواره درجه حرارت بین پاسی را کنترل کنیم. برای جوش‌های چندپاسه جهت یکسان بودن خواص مکانیکی و شرایط برای کلیه پاس‌ها درجه حرارت بین پاسی باید کنترل شود. درجه حرارت پیش گرم معمولاً یکسان بوده و به جنس و ضخامت قطعه و حرارت داده شده بوسیله پروسه جوشکاری بستگی دارد. هدف اصلی از اعمال پیشگرم، کاهش نرخ سرد شدن (**Cooling Rate**) فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت است که اثرات ذیل را در پی خواهد داشت:

- ایجاد ساختاری با خواص مکانیکی (استحکام، انعطاف پذیری و چقرمگی) مطلوب
- تقلیل سطح تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری در اتصال
- ایجاد سهولت جهت خروج هیدروژن
- جهت تعیین لزوم یا عدم لزوم اعمال پیشگرم باید مواردی همچون

الزامات استاندارد، ضخامت، ترکیب شیمیایی و حساسیت به ترک خوردگی فلز پایه، قطر و نوع ماده پرکننده و نیز دما و رطوبت محیط کاری مورد ملاحظه قرار گیرد. به عنوان نمونه هنگام جوشکاری در محیط سرد و یا مرطوب، در غیاب هر نوع الزام استاندارد دیگری، دمای پیشگرمی حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد توصیه می‌شود. همچنین فولادهای ساده کربنی به ویژه در ضخامت‌های بیش از یک اینچ حساس به رخداد ترک سرد هستند، لذا جوشکاری این گروه از فولادها می‌بایست به همراه پیشگرمی متناسب با میزان کربن معادل و ضخامت فلز پایه توصیه می‌گردد. لازم به ذکر است که دمای پیش گرم مذکور در استانداردها و نظامنامه‌های جوشکاری بیانگر حداقل دمای قطعه کار پیش از اعمال منبع حرارت جوشکاری قوسی می‌باشد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که بسته به شرایط ممکن است دمای واقعی پیشگرم بالاتر مقادیر مندرج در استاندارد در نظر گرفته شده و اعمال گردد. به عنوان مثال جهت جوشکاری اتصالاتی با سطح قیود بالا، بهتر است دمای پیشگرمی بالاتر از آن درجه حرارت مندرج در استاندارد مورد استفاده قرار گیرد. برای فولادهای با ترکیب مشخص، دمای پیش گرمی را می‌توان بر اساس معادل کربن (**CE**) طبق معادله تجربی زیر محاسبه نمود. طبق جدول (۳) می‌توان دمای پیش گرمی را با محاسبه **CE** بدست آورد [۴].

جدول ۳- دمای پیش گرمی با محاسبه CE.

کربن معادل (%)	دمای پیش گرمی
تا ۰/۴۵	پیش گرمی اختیاری میباشد
۰/۴۵ تا ۰/۶	۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه فارنهایت
بالای ۰/۶	۴۰۰ تا ۷۰۰ درجه فارنهایت

مشخص شد افزایش درصد کربن و عناصر آلیاژی و ضخامت قطعه باعث افزایش درجه حرارت بین پاسی می‌شود. جلوگیری از تشکیل و تمرکز تنش در منطقه جوش تشکیل و تجمع تنش‌ها چه در فلز پایه و چه در منطقه جوش زیان بار است چرا که با تغییر فاز فلز شدت بارهای مکانیکی و بارهای خستگی زیاد می‌شود این امر سبب تشکیل فازهای شکننده می‌شود. علت اصلی این اشکال نیز تغییر دما و ورود ناگهانی آن به منطقه جوش یا فلز است.

جلوگیری از تمرکز و ترک‌های ناشی از وجود هیدروژن که در الکتروود مورد استفاده آمده است نیز مورد اهمیت است زیرا در الکتروود **E7018-1 H4R** که **H₄R** یک تعیین کننده مکمل اختیاری است. اساساً عدد بعد از **H** سطح هیدروژن را می‌گوید و **R** به معنای مقاومت در رطوبت است. هیدروژن موجود در ترکیب منطقه جوش در اثر رطوبت گاهی ممکن است در سطح یا داخل فلز پایه، در روکش الکتروود و یا محیط وجود داشته باشد، رطوبت در اثر دمای ایجاد شده عالی و بسیار زیاد در منطقه جوش گیر افتاده و موجب ایجاد ترک‌های سرد هیدروژنی با تنش‌های ناشی از آن می‌شود. این عوامل ممکن است در زمانی کوتاه یا بلند مدت نمایان شود که در هر صورت اثرات مخربی را به جا خواهد گذاشت. امکان دادن خروج به هیدروژن جذب شده در فلز پایه به چگونگی تشکیل اختلال مرتبط است و با فرصتی که در ابتدای پیش گرم به هیدروژن داده

می شود کم سطح قطعه نزدیک شده و از آن خارج می شود. آماده سازی برای مونتاژ به شرح زیر بود. یخ های جوشکاری انجام گرفت و ماشین کاری روی قاب ها انجام شد و سپس ولتاژ با پیچ و مهره های فیکسچر محکم شدند. قاب اصلی از موارد زیر تشکیل شده است قاب فوقانی به وزن ۳۵ تن و قاب پایین وزن ۱۸ تن بود که همگی بایستی جوشکاری و ماشین کاری شوند. ماشین کاری را روی قاب بالا و روی قاب پایین انجام شده بود. در قاب فوقانی ما اطراف اتصال را ماشینکاری کردیم تا یک سطح صاف بدست آوریم روی قاب پایین سطح بالای یخ ها را ماشینکاری کردیم تا یک سطح صاف بدست آوریم و چهار صفحه را روی قاب پایین اضافه و جوش دادیم چهار سوراخ پیچ فیکسچر را با مهره متصل کردیم. همچنین ماشینکاری مشابه برای یخ زنی در قاب بالایی این سوراخ ها برای مونتاژ قاب بالا و پایین لازم بود در شکل (۲) قسمتهای مختلف این سازه سوپر استراکچر مشاهده می شود. برای مونتاژ قاب بالایی را روی زمین قرار دادیم و قاب پایین را بر روی قاب فوقانی در موقعیت عمودی قرار دادیم قبل از مونتاژ یخ ها را از اکسید و چربی پاک کرده و تمیز کردیم. به دلیل اهمیت و پیچیدگی جوشکاری طبق دستورالعمل باید طی ۱ تا ۲ روز جوشکاری به اتمام برسد که بنظر در عمل امری محال است. قبل از مرحله جوشکاری، ناحیه اختصاص داده شده به جوشکاری را در دمای ۱۰۰-۱۲۰ درجه سانتیگراد پیش گرم کردیم در شکل ۴ انجام کنترل دمای پیش گرم و بین پاسی طبق دستورالعمل توسط ترمومتر لیزری نمایش داده شده است. در این پژوهش مراحل انجام کار با توجه به حجم کار هشت روز برای جوشکاری صرف شد. روز اول مونتاژ چک شد مهره بند ها که با پیچ و مهره متصل بود بررسی شد ولی برای اطمینان بیشتر یک سری مهره بند اضافه شد و جوش کاری شد. الکترودهای مورد استفاده از نوع پایه با محتوای هیدروژن کم (H5) از همان طبقه بندی هستند در WPS نشان داده شده است استفاده از الکترودهای تولید قدیمی (جعبه های باز) مجاز نیست در هنگام جوشکاری الکترودها باید در کوره های گرم کننده مناسب و در دمای ۱۱۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد گرم شوند پس از جوشکاری، برای جوشکاری داخلی و خارجی به صورت صد درصد بازرسی چشمی و مغناطیسی باید با توجه به مرجع بر روی جوش ها انجام شود استانداردهای (AWS D1.1) و سپس پیچ و مهره ها پس از جوشکاری برداشته شد [۶].

جوشکاری توسط دو جوشکار و به صورت ضربدری پنج سانتی انجام شد و همزمان در هر ضلع انجام گرفت و تک خال ها برای فیکس شدن جوش دادند. سپس نقشه برداری انجام شد و مشخص شد که قطعه در سر جای خود است و بر اساس دستورالعمل جوشکاری از داخل قطعه جوشکاری انجام شد و روی جوشکاری دو نفر انجام شد. جوشکاری داخل قطعه حدود ۶۰ درصد انجام شد و بعد بیرون قطعه جوشکاری شد. سپس برای اینکه دمای بین پاسی بالا نرود دمای قطعه را مدام با ترمومتر بازرسی میکردیم و هر روز توسط نقشه برداری قطعه بازرسی شد تا بتوان ترانس حدود ۲/۰ میلیمتر بدست آورد. شکل (۳) فیکس شدن قطعه کار توسط تک زنی لچکی ها و ساپورت ها جهت شروع جوشکاری را ارائه می دهد. خاطر

نشان می شود که پاس ریشه انجام شده از داخل قطعه با آزمون PT ارزیابی شد و سپس پاس های بعدی پس از پیش گرم انجام گرفت. سپس تست MT برای اطلاع از عدم ایجاد ترک انجام شد. با تمامی محدودیت ها و با عنایت به دقت در اجرا در نهایت جوشی با کیفیت و مناسب برای ادامه کار و نصب سازه حجیم و پر اهمیت حاصل شد.

نتیجه گیری

در این تحقیق از ورق CEN ISO/TR 15608 در ضخامت ۲۵ تا ۴۰ میلیمتر استفاده شد تا به وسیله انواع جوش گوشه ای و شیاری این مقطع پیچیده برای سوپر استراکچر قاب بالا و پایین سقف کوره قوس الکتریکی واحد فولاد سازی با کیفیت مطلوب و بدون پیچیدگی و توسط دستورالعمل مخصوص جوشکاری شود. پس از محاسبات مختلف فنی، جوشکاری مطابق با دستورالعمل نگارش شده انجام شود.



شکل ۳- فیکس شدن قطعه کار توسط تک زنی لچکی ها و ساپورت ها جهت شروع جوشکاری.



شکل ۴- انجام کنترل دمای پیش گرم و بین پاسی طبق دستورالعمل توسط ترمومتر لیزری.

مقطع را در دو ورق در دمای ۱۰۰-۱۲۰ درجه سانتیگراد پیش گرم شد و الکترودهای مورد استفاده E7018-1 H4R در نظر گرفته شده در دمای ۱۱۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد گرم شوند. طبق دستورالعمل تهیه شده جوشکاری از الکترودهای مخصوص E7018-1 H4R با قطر ۳،۲۵ تا ۴ میلیمتر استفاده گردید که علت آن کنترل دقیق رقت و دمای بین پاسی بود، در غیر این صورت

کیفیت و سلامت جوش ها انجام شد.

منابع

- 1-Maziasz, P.J., Swindeman, R.W., Shingledecker, J.P., Improving High-Temperature Performance of Austenitic Stainless Steels for Advanced Microturbine Recuperators, The Institute for Materials, Minerals and Mining, pp. 1057-1073, 2003.
- 2-Rajasekhar, K., Harendranath, C.S., Raman, R., Kulkarn, 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.
- 4-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.
- 5- 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 Stainless Steels, 1975, Volume 44, Issue 9, P. 755-762.

پی نوشت

- 1-دکتر مهندسی مواد متالورژی دانشگاه صنعتی اصفهان
- 2-شرکت مهندسی فولاد مبارکه
- 3-دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده شهید مهاجر، دانشگاه فنی حرفه ای استان اصفهان، ایران
- 4-دپارتمان مهندسی متالورژی، دانشکده شهید مهاجر، دانشگاه فنی حرفه ای استان اصفهان، ایران
- 5- کارشناس ارشد شرکت مهندسی پارس محک اسپادانا



شکل ۵- انجام آزمون مایع نافذ برای پاس ریشه و سپس آزمون ذرات مغناطیسی در اتمام عملیات جوشکاری.

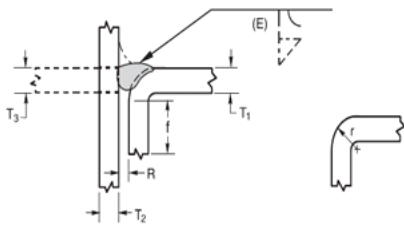
احتمال ایجاد ترک های انجمادی در قطعات جوشکاری شده وجود داشت. تقلیل سطح تنش های پسماند حاصل از جوشکاری در اتصال و ایجاد سهولت جهت خروج هیدروژن از اهم کار بود. نکته اساسی برای عدم ایجاد عیوب پس از جوش، روش جوشکاری بود که به صورت ضربدری و با دو جوشکار مقابل هم انجام گرفت و همچنین پس از جوشکاری حدود ۶۰ درصد قطعه از داخل جهت جوشکاری قسمت بیرونی اقدام شد. در نهایت قطعه جوشکاری شده پس از نقشه برداری ابعادی برای عدم پیچیدگی با دقت ۰/۲ میلیمتر تحویل داده شد و در همه مراحل آزمون غیرمخرب مایعات نافذ و ذرات مغناطیسی جهت ارزیابی و



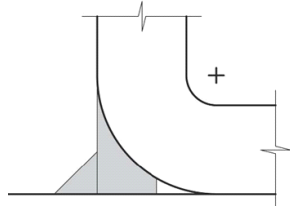
اندازه گیری گلویی مؤثر در جوش های شیاری

مهندس احمد رضا وکیلی

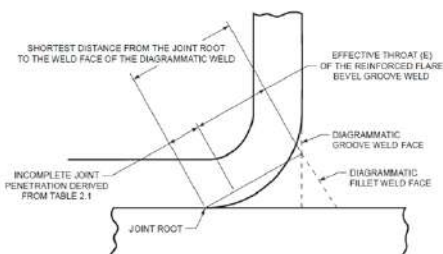
تقویتی نیز به صورت خط چین نیز نشان داده شده است.



شکل ۱- اتصال گلویی مؤثر جوش شیاری نیم جناقی لبه گرد
AWS D1.1 - Fig. 3.2



شکل ۲- اتصال گلویی مؤثر جوش شیاری نیم جناقی لبه گرد



شکل ۳- اتصال گلویی مؤثر جوش شیاری نیم جناقی لبه گرد
مرجع: AWS D1.1 - Annex A - Fig.A.6

با توجه به اینکه کد AWS D1.1 تحدد جوش را برای گلویی مؤثر

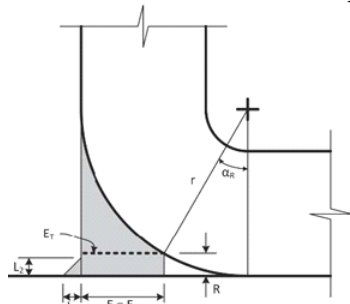
یک روش قابل برنامه ریزی که کمینه گلویی مؤثر کل، ترکیبی از جوش شیاری با پخ منحنی به اضافه جوش گوشه ای تقویتی در یک اتصال سپری شکل را تعیین می کند.

استفاده از جوش های شیاری نیم جناقی لبه گرد و اتصال سپری شکل برای سازه های فولادی با استفاده از مقاطع ساخته شده توخالی رایج است. این نوع جوش ها بر اساس بیشینه گلویی مؤثر مجاز، که در کد جوشکاری سازه های فولادی مربوط به انجمن جوشکاری آمریکا (AWS D1.1/D1.1M:2015)، مشخص شده است، مورد تأیید می باشند. این جزئیات جوش، یک اتصال جوشی از قبل تأیید صلاحیت شده توسط AWS با مشخصات دستورالعمل جوشکاری (WPS) تثبیت شده و استحکام جوش قابل پیش بینی را ارائه می دهد. در مواردی خاص، ممکن است گلویی مؤثر یک جوش شیاری با پخ منحنی، الزامات استحکام لازم برای اتصال جوش داده شده را برآورده ننماید. در این موارد میتوان از اتصال سپری شکل با جوش شیاری و پخ منحنی را به همراه جوش گوشه ای تقویتی اجرا کرد. همانطور که در کد AWS D1.1 ذکر شده است، "جوش گوشه ای تقویتی، گلویی مؤثر ترکیبی از جوش نفوذی جزئی (PJP) در اتصال شیاری نیم جناقی لبه گرد و جوش گوشه ای که باید کوتاه ترین فاصله از ریشه اتصال تا سطح جوش از جوش نموداری، منهای کسر نفوذ ناقص اتصال باشد (شکل های ۱ الی ۳). با توجه به هندسه تا حدودی پیچیده این ترکیب جوش، کوتاه ترین فاصله از ریشه جوش تا سطح جوش ممکن است بلافاصله مشخص نباشد و به راحتی قابل اندازه گیری نباشد. هدف این مطلب ارائه یک روش فرمولی برای تعیین گلویی مؤثر چنین اتصالی است.

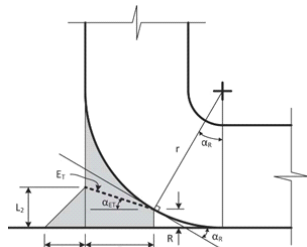
مفروضات و ملاحظات طراحی

مطابق با کد AWS D1.1 فلز پرکننده جوش به صورت محدب فراتر از سطح صاف بالای قطعه منحنی، گسترش می یابد و جوش گوشه ای

با این حال، این اعداد بلافاصله برای طراحی مفید نیست زیرا ابتدا باید E_T تعیین شود.



شکل ۴- شماتیک جوش برای وضعیت اول



شکل ۵- شماتیک جوش برای وضعیت دوم

وضعیت سوم: جوش گوشه‌ای بزرگ، کمینه خط گلوبی موثر، مجموع غیر عمود بر سطح گوشه

در وضعیت سوم، جوش گوشه‌ای به اندازه کافی بزرگ است که کمینه گلوبی موثر کل اتصال (E_T)، از بخشی در خود جوش گوشه‌ای عبور می‌کند و سطح جوش، همان سطح بیرونی جوش گوشه‌ای می‌باشد. در این حالت، زاویه جوش گوشه‌ای که α_F نامیده می‌شود، به اندازه‌ای مورب است که خط E_T نمی‌تواند بدون عبور از فلز پایه منحنی با زاویه عمود با آن قطع شود (شکل ۶)، بنابراین $\alpha_{ET} = \alpha_F$. متغیر جدید α_F دارای مقدار رابطه (۶) می‌باشد.

$$\alpha_F = \tan^{-1}(L_1 / L_2) \quad (6)$$

برای محاسبه E_T ، ابتدا یک سیستم معادلات به صورت رابطه (۷) زیر تنظیم می‌شود:

$$\begin{cases} L_3 \sin(\alpha_F) + E_T \cos(\alpha_R) = L_1 + E \\ L_3 \cos(\alpha_F) = E_T \sin(\alpha_R) + R \end{cases} \quad (7)$$

با محاسبه معادله (۷) برای E_T ، متوجه خواهیم شد که:

$$E_T = \frac{L_1 + E - R \tan(\alpha_F)}{\sin(\alpha_R) \tan(\alpha_F) + \cos(\alpha_R)} \quad (8)$$

در یک جوش گوشه‌ای با ساق‌های مساوی ($\alpha_F = \pi/4 = 45^\circ$)، معادله (۸) قابل محاسبه خواهد بود.

$$E_T = \frac{L_1 + E - R}{\sin(\alpha_R) + \cos(\alpha_R)}$$

با توجه به اینکه کد **AWS D1.1** تحذب جوش را برای گلوبی موثر آن در نظر نمی‌گیرد، اجرا اتصال شیاری نیم جناغی لبه گرد با جوش تقویتی گوشه‌ای تسهیل شده است. این تسهیل شدن به نحوی می‌باشد که پروفیل‌های جوش در هر دو قسمت شیاری نیم جناغی لبه گرد و گوشه‌ای، نیازهای **AWS** را برآورده می‌کند.

علاوه بر این با توجه به اینکه فاصله بیشتر اجازه می‌دهد گلوبی موثر تری در طول فرایند جوشکاری ایجاد شود، فاصله بین دو قطعه مونتاژ شده صفر در نظر گرفته می‌شود که این کار محافظه کارانه خواهد بود. در نهایت، روش ارائه شده در این مطلب فرض می‌کند که دو قطعه مونتاژ شده، بر یکدیگر عمود هستند.

وضعیت اول: جوش گوشه‌ای کوچکتر از اندازه معمول

اولین وضعیتی که در نظر گرفته می‌شود، وضعیتی است که در آن جوش گوشه‌ای تا حدی کوچکتر از اندازه معمول و بی اثر انجام شده است (شکل ۴). از این جوشکاری باید اجتناب شود زیرا هزینه ساخت اتصال را بدون افزودن به استحکام، بالا می‌برد.

برای تعیین اینکه آیا جوش گوشه‌ای کوچکتر از اندازه معمول است، ابتدا باید چندین پارامتر اتصال را تعیین کرد. گلوبی موثر اتصال شیاری با پخ منحنی (E)، ساق‌های جوش گوشه‌ای (L_1 و L_2) و شعاع بیرونی منحنی (R) توسط واحد مهندسی یا بر اساس فلز پایه مشخص می‌شود. با تعیین شدن این موارد، اولین کمیتی که باید تعیین شود زاویه دهانه ریشه است.

$$\alpha_R = \sin^{-1}[(r - E)/r] \quad (1)$$

از اینجا به بعد، می‌توان R ، اندازه دهانه ریشه جوش را محاسبه نمود.

$$R = r[1 - \cos(\alpha_R)] \quad (2)$$

از آنجا که ساق عمودی جوش گوشه‌ای، L_2 مشخص است، اگر $L_2 \leq R$ باشد، جوش کمتر از اندازه معمول خواهد بود و بنابراین:

$$E_T = E \quad (3)$$

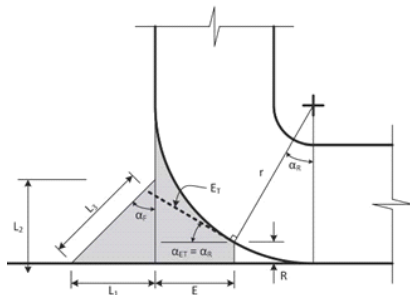
وضعیت دوم: جوش گوشه‌ای متوسط

وضعیت دوم وضعیتی است که در $E_T = E$ گوشه‌ای به اندازه کافی بزرگ باشد تا کمینه گلوبی موثر یا E_T اتصال را افزایش دهد، در عین حال به اندازه کافی کوچک است که کمینه گلوبی موثر کل، فقط از فلز جوش شیاری نیم جناغی لبه گرد می‌گذرد (شکل ۵). قابل توجه خواهد بود که زاویه اکنون برای خط مماس در ریشه جوش نشان داده شده است. مجموع کمینه گلوبی موثر در حال حاضر، خطی است که ریشه جوش را به قسمت بین پنجه بالای جوش گوشه‌ای و جوش شیاری نیم جناغی لبه گرد متصل می‌کند. مطابق با:

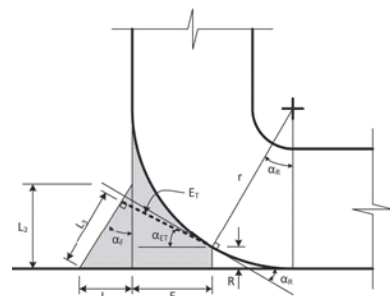
$$E_T = \sqrt{E^2 - (L_2 - R)^2} \quad (4)$$

بنابراین، می‌توان نشان داد وضعیت دوم زمانی قابل استفاده است که $R < L_2 \leq R + E \tan(\alpha_R)$ باشد. زاویه کمینه گلوبی موثر کل، زاویه بین خط E_T و صفحه افقی است و دارای مقدار:

$$\alpha_{ET} = \cos^{-1}(E/E_T) \quad (5)$$



شکل ۶- شماتیک جوش برای وضعیت سوم



شکل ۷- شماتیک جوش برای وضعیت چهارم

این موارد را می توان با سهولت نسبی در یک بسته نرم افزاری مهندسی به کمک کامپیوتر برنامه ریزی کرد و به شما اجازه می دهد تا به سرعت اندازه های جوش بهینه را بیابید و یا اگر هندسه جوش مشخص باشد، به راحتی می توان استحکام جوش را نیز تعیین کرد. با توجه به محدودیت های گلوبی موثر فعلی جوشکاری شیاری نیم جناغی لبه گرد مطابق با معادله (10) که **AWSD1.1** ممکن است برای جوشکاری قوسی الکترو دستی، جوشکاری قوسی توپودری و جوشکاری قوسی زیرپودری به صورت زیر محاسبه شود:

$$E_T = \begin{cases} \frac{5}{16} r & \text{if } L_2 \leq 0.274r \\ \sqrt{0.098r^2 + (L_2 = 0.274r)^2} & \text{if } 0.274r < L_2 \leq 0.570r \\ \frac{L_1 + \frac{5}{16} r = 0.274r \tan(\alpha_F)}{0.688 \tan(\alpha_F) + 0.726} & \text{if } L_2 < 0.570r \text{ and } \\ & \alpha_F \geq 43.43^\circ \\ [L_1 + \frac{5}{16} r = 0.274r \tan(\alpha_F)] \cos(\alpha_F) & \text{if } L_2 < 0.570r \text{ (}\alpha_R) \\ & \text{and } \alpha_F < 43.43^\circ, \end{cases} \quad (10)$$

و برای جوش گوشه ای با ساق های مساوی:

$$E_T = \begin{cases} \frac{5}{16} r & \text{if } L_1 \leq 0.274r \\ \sqrt{0.098r^2 + (L_1 = 0.274r)^2} & \text{if } 0.274r < L_1 \leq 0.570r \\ \frac{L_1 + 0.039r}{1.414} & \text{if } L_1 < 0.570r. \end{cases} \quad (11b)$$

برای جوشکاری قوسی الکتریکی تحت پوشش گاز محافظ و

وضعیت چهارم: جوش گوشه ای بزرگ، کمینه خط گلوبی موثر عمود بر سطح جوش گوشه ای

در وضعیت سوم مشاهده نمودیم، جوش گوشه ای به اندازه کافی بزرگ است که کمینه گلوبی موثر کل اتصال (E_T)، از بخشی در خود جوش گوشه ای عبور می کند و سطح جوش، همان سطح بیرونی جوش گوشه ای می باشد. با این حال، در وضعیت چهارم، α_F به اندازه کافی حاد است که خط E_T بدون عبور از فلز پایه منحنی ($\alpha_{ET} < \alpha_R$) با زاویه عمود با آن قطع می شود (شکل ۷).

توجه داشته باشید که این شرایط لزوماً نیازی به جوش گوشه ای با ساق نابرابر ندارد و اگر E کوچک باشد ممکن است ($\alpha_F \geq \pi/4 = 45^\circ$) باشد. با این حال، به یک اندازه E به طول کافی نیاز است که به جای افزایش جوش گوشه ای تقویتی، با افزایش گلوبی موثر جوش شیاری نیم جناغی لبه گرد جبران شود.

می توان نشان داد که $\alpha_{ET} = \alpha_R$ در این وضعیت به این دلیل که سطح جوش گوشه ای بر خط E_T عمود است. بنابراین، پیکربندی مجدد معادله (۸) برابر است با:

$$E_T = \frac{L_1 + E - R \tan(\alpha_F)}{\sin(\alpha_F) \tan(\alpha_F) + \cos(\alpha_F)} \quad (9)$$

که ساده می شود:

$$E_T = [L_1 + E - R \tan(\alpha_F)] \cos(\alpha_F)$$

همچنین اگر:

$$\alpha_F = \pi/4 = 45^\circ$$

$$E_T = \frac{L_1 + E - R}{\sqrt{2}}$$

نتیجه گیری

با خلاصه کردن معادلات در بخش های قبل، می توان فایلی را تولید کرد که می تواند در یک بسته نرم افزاری مهندسی به کمک رایانه برای تکرار سریع نتایج برنامه ریزی شود. بنابراین، کمینه گلوبی موثر یک جوش شیاری نیم جناغی لبه گرد با یک جوش گوشه ای تقویتی به طور کلی به عنوان:

$$E_T = \begin{cases} E & \text{if } L_2 \leq R \\ \sqrt{E^2 + (L_2 - R)^2} & \text{if } R < L_2 \leq R + E \tan(\alpha_R) \\ \frac{L_1 + E - R \tan(\alpha_F)}{\sin(\alpha_R) + \tan(\alpha_F) + \cos(\alpha_R)} & \text{and } \alpha_R \geq \alpha_F \\ [L_1 + E - R \tan(\alpha_F)] \cos(\alpha_F) & \text{if } L_2 > R + E \tan(\alpha_R) \\ & \text{and } \alpha_R < \alpha_F. \end{cases}$$

با توجه به یک جوش گوشه ای با ساق های مساوی، وضعیت بالا را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$E_T = \begin{cases} E & \text{if } L_1 \leq R \\ \sqrt{E^2 + (L_1 - R)^2} & \text{if } R < L_1 \leq R + E \tan(\alpha_R) \\ \frac{L_1 + E - R}{\sin(\alpha_R) + \cos(\alpha_R)} & \text{if } L_1 > R + E \tan(\alpha_R) \\ & \text{and } \alpha_R \geq 45^\circ \\ \frac{L_1 + E - R}{\sqrt{2}} & \text{if } L_1 > R + E \tan(\alpha_R) \\ & \text{and } \alpha_R < 45^\circ \end{cases}$$

جوشکاری جوشکاری قوسی توپودری تحت پوشش گاز محافظ، ممکن است به صورت زیر محاسبه می شود:

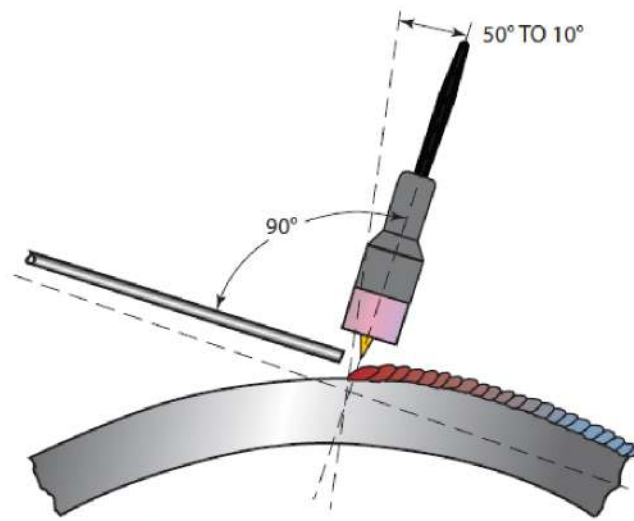
و برای یک گوشه‌ای با ساق‌های مساوی:

$$E_T = \begin{cases} \frac{5}{8}r & \text{if } L_1 \leq 0.073r \\ \sqrt{0.391r^2 + (L_1 - 0.073r)^2} & \text{if } 0.073r < L_1 \leq 0.326r \\ \frac{L_1 + 0.552r}{1.302} & \text{if } L_1 > 0.326r. \end{cases} \quad (12a)$$

$$E_T = \begin{cases} \frac{5}{8}r & \text{if } L_2 \leq 0.073r \\ \sqrt{0.391r^2 + (L_2 - 0.073r)^2} & \text{if } 0.073r < L_2 \leq 0.326r \\ \frac{L_1 + \frac{5}{8}r - 0.073r \tan \alpha_f}{0.375 \tan(\alpha_f) + 0.927} & \text{if } L_2 < 0.326r \text{ and } \alpha_f \geq 22.02^\circ \\ [L_1 + \frac{5}{8}r - 0.073r \tan(\alpha_f)] \cos(\alpha_f) & \text{if } L_2 < 0.326r \text{ and } \alpha_f < 22.02^\circ, \end{cases}$$

پی نوشت

- سرپرست کنترل کیفیت ساخت و نصب مخازن ذخیره شرکت مهندسی و ساختمان تیو انرژی



جوشکاری فولاد G-X14CrCoMo13-10 با استفاده از فیلر ریختگی هم جنس به روش قوس با الکتروود تنگستن و گاز محافظ آرگون و بررسی میکرو ترک های ناحیه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت

داود عباسی^۱، حسن نکویی^۲، امیر مهدی شبانی^۳، پژمان مللی^۴، حمید فراهانی^۵

چکیده

امروزه در صنایع گوناگون، جوشکاری تعمیراتی قطعات ریخته گری شده برای بازیابی بخش های از کار افتاده، آسیب دیده و معیوب در نظر گرفته می شود. هدف از این تحقیق، جوشکاری با روش TIG بر روی فولاد مقاوم به حرارت با کد **G-X14CrCoMo1310** مورد استفاده در توربین گازی **SGT-600** با استفاده از فیلر هم جنس تولید شده به روش ریختگی دقیق و سپس بررسی میکرو ترک های احتمالی در ساختار نواحی جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بود. همچنین سختی مناطق جوش و اطراف آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از اتصال بسیار خوب فلز جوش با زمینه بدون حضور میکرو ترک ها در نواحی اطراف آن بود.

کلمات کلیدی: فولاد **G-X14CrCoMo1310**، جوشکاری TIG، فیلر هم جنس، توربین **SGT-600**.

مقدمه

عیوب در قطعات ریختگی معمولاً جزء ماهیت آن ها بوده و چشم پوشی از این عیوب باعث ایجاد اثرات مخرب روی فعالیت های اقتصادی، صنعتی و ایمنی نیروی انسانی می شود. موفقیت در عملیات جوشکاری تعمیراتی به پارامترهای مهمی از قبیل جوش پذیری، در دسترس بودن فلز پرکننده مناسب، فرایند جوشکاری، مهارت جوشکار و به نوع عیب بستگی دارد. در نتیجه انتخاب بهترین روش جوشکاری نظیر روش جوشکاری TIG که گسترده ترین کاربرد را در فرایندهای مختلف دارد، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در مرحله بعد نیز انتخاب فلز پرکننده در اولویت دانش جوشکاری قرار دارد.

هر چند امروزه محدوده وسیعی از آلیاژهای مورد استفاده، بررسی شده و فیلرهای مرتبط با آن ها نیز در دسترس قرار دارند اما بررسی و شناخت آلیاژهای پیشرفته با کاربردهای محدود و منحصر به فرد و جوشکاری آن ها با توجه به عدم دسترسی فیلرهای منطبق با آن ها، به شدت مورد استقبال قرار گرفته است [۱-۳]. فولادهای مارتنزیتی

به طور وسیع مورد توجه بخش صنایع مختلف نفت و گاز، ساخت قطعات توربین، پره ها، یاتاقان، سوپاپ ها، مخازن تحت فشار، اجزای سازنده ابزارهای برش و... به دلیل عملکرد مکانیکی برتر و مقاومت در برابر خوردگی، که تحت شرایط دمای متفاوت کار می کنند، مورد توجه می باشد [۴-۶].

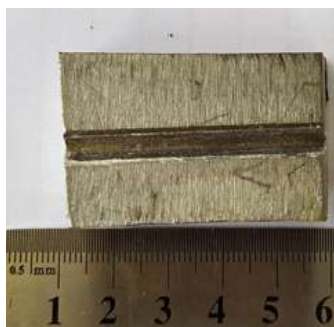
رفتار مکانیکی و عملکرد متالورژیکی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی بستگی به فرایند جوش مورد استفاده و عملیات حرارتی پس گرم نیز دارد [۷]. جوشکاری فولاد های زنگ نزن مارتنزیتی همواره به دلیل حساسیت به ترک در ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش به عنوان یک مشکل بزرگ دیده شده است که برای جلوگیری از این ترک و جوش دادن قطعات با ضخامت بالا نیاز به پیش گرم، پس گرم و فلز پرکننده مناسب می باشد [۸].

فولاد مقاوم به حرارت **G-X14CrCoMo1310** در دسته فولادهای مارتنزیتی تحت عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر می باشد. به دلیل مقادیر بالای کروم و کربال در آلیاژ فوق، مقاومت به خوردگی آن در دمای بالا قابل قبول بوده و به همین دلیل نیز در ساخت قطعات و اجزای توربین گازی **SGT-600** مورد استفاده قرار

می گیرد. روش تولید قطعات مورد استفاده با آلیاژ فوق، ریخته گری دقیق می باشد [۹]. نکته حائز اهمیت در مورد این آلیاژ، عدم وجود فلز پرکننده منطبق با آن است که جوشکاری این فولاد را بسیار پیچیده و منحصر به فرد کرده است. به همین دلیل در این پژوهش بر آن شدیم تا به بررسی جوشکاری این فولاد با استفاده از فیلهای ریخته گری شده هم جنس و به روش **TIG** بپردازیم.

مواد و روش پژوهش

در این تحقیق از فولاد مقاوم به حرارت با کد **G-X14CrCoMo13-10** تهیه شده به روش ریخته گری دقیق استفاده شده است که آنالیز شیمیایی مطابق با دستورالعمل شرکت سازنده **Mat.630650** در جدول (۱) ارایه شده است. جدول (۲) آنالیز شیمیایی قطعه جوشکاری شده و فیله مصرفی را مشخص کرده است. آنالیز شیمیایی به روش اسپکترومتری نشری انجام شده بود. فیله مصرفی به روش ریخته گری دقیق تولید و با روش **EDM** به قطر ۲/۵ میلیمتر رسید (شکل ۱). نمونه جوشکاری به طول ۵۰ میلیمتر و عرض ۳۰ میلیمتر همراه با شیار به عمق ۳ میلیمتر و عرض شیار ۶ میلیمتر بود (شکل ۲). نمونه جوشکاری و فیله مصرفی تحت شرایط جدول (۳) عملیات حرارتی گردیده و سپس عملیات جوشکاری انجام گردید.



شکل ۲. ابعاد و نمای محل جوشکاری

جدول ۴. پارامترهای جوشکاری.

%	C	Si	Mn	Cr	Mo	Co
Material & filler	0.1	0.63	0.55	13.15	0.72	9.61

پس از جوشکاری نمونه برش خورده و عملیات ماکرو اچ برای مشخص نمودن منطقه **HAZ** و اندازه دانه فلز جوش، فلز پایه و **HAZ** صورت پذیرفت. در ادامه نمونه ها برای بررسی ریزساختاری و آنالیز خطی با دستگاه **SEM** مدل **ZEISS Sigma300**، آماده شدند. از محلول اچ با ترکیب **20 ml HCL + 80 ml HNO3** برای آماده سازی نمونه ها استفاده گردید. در آخرین مرحله سختی سنجی روی نمونه در ۳ ناحیه فلز پایه، **HAZ** و فلز جوش انجام شد. دستگاه سختی سنجی ساخت کشور آلمان و شرکت **KB Pruftechnik** بود.

نتایج و بحث

- ماکرو اچ

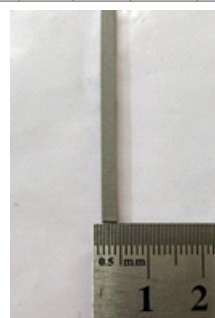
با توجه به نتایج مشخص شده در شکل (۳-الف)، عرض ناحیه تحت تاثیر حرارت ۱/۵ میلیمتر بوده و دانه بندی این ناحیه از فلز پایه و فلز جوش کوچکتر می باشد. دانه بندی فلز پایه به صورت هم محور و با اندازه ۰/۲ الی ۰/۳ میلی متر می باشد. در ناحیه جوش دانه بندی به صورت ستونی و از دیواره های حوضچه مذاب به سمت مرکز حوضچه مذاب می باشد که نشان از شیب حرارتی جوشکاری قوسی است. مرز جدایش بین منطقه متاثر از حرارت و منطقه جوش به سختی قابل تشخیص بود که دلیل این امر هم جنس بودن فلز جوش و فلز پایه است. همچنین با کنترل پارامترهای جوشکاری عرض منطقه درشت دانه **HAZ** کاهش یافته و به عنوان نواحی شروع دانه های فلز جوش مشخص می شود [۱۰]. دلیل ریز دانه بودن ناحیه تحت تاثیر حرارت نسبت به فلز پایه، ساختار ریختگی فلز پایه می باشد. ریز دانه بودن ناحیه **HAZ** باعث ایجاد مرز دانه بیشتر شده و در نتیجه به دلیل پراثرژی بودن مرزهای دانه، در فرایند ماکرو اچ باعث خوردگی بیشتر و با تیرگی مشخص می شود [۱۱].

جدول ۱- آنالیز شیمیایی مرجع مواد اولیه.

%	C	Si	Mn	Cr	Mo	Co
min	0.1	0.5	0.5	12.5	0.6	9.5
max	0.17	0.8	0.8	13.5	0.9	10.5

جدول ۲- آنالیز شیمیایی قطعه جوشکاری شده و فلز پرکننده.

%	C	Si	Mn	Cr	Mo	Co
Material & filler	0.1	0.63	0.55	13.15	0.72	9.61



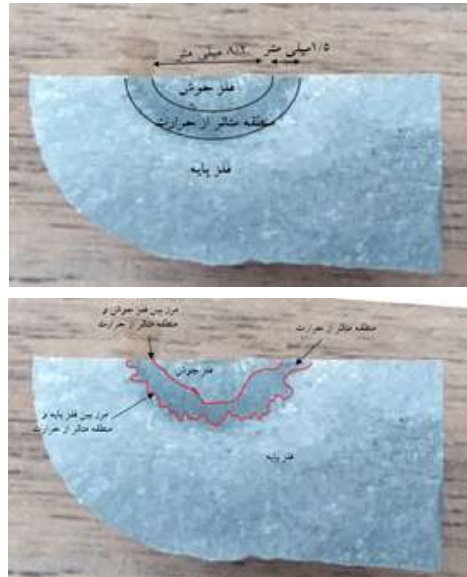
شکل ۱- فیله جوشکاری

جدول ۳- سیکل عملیات حرارتی

مرحله	دما	زمان	نحوه خنک کاری
solution	1050 ± 10 °C	6 hr	air
Hardening	900 ± 10 °C	6 hr	oil
Temper	670 ± 10 °C	6 hr	air

جوشکاری با روش **TIG** و با دستگاه جوش مدل **PROTIG 401**

مقدار کمی آمیختگی بین فلز پایه و منطقه HAZ مشخص شد که این امر منجر به عدم تشخیص مرز مستقیم بین فلز پایه با منطقه HAZ شده است. (شکل ۳-ب).



شکل ۳- تصویر مقطع ماکرو اچ
الف- عرض منطقه HAZ و ب- مرز منطقه HAZ و فلز پایه

- بررسی ریز ساختار

سه قسمت از ریز ساختار نمونه مورد بررسی قرار گرفته است.

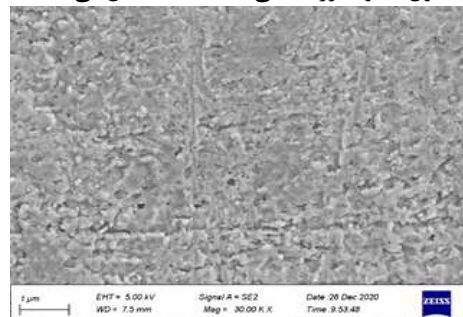
الف- فلز پایه،

ب- HAZ و

ج- فلز جوش. برای هر قسمت از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردیده است و برای آنالیز شیمیایی نیز از EDX استفاده شد.

- فلز پایه

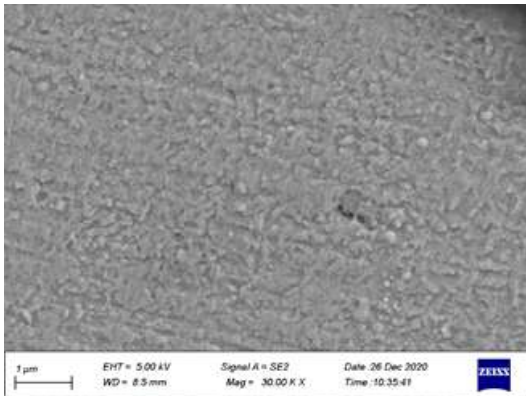
با توجه به آنالیز شیمیایی فلز پایه مشخص می شود، فلز پایه دارای ساختار زمینه ماتنزیتی تمپر شده می باشد. شکل (۴) ساختار یکنواخت مارتنزیت تمپر شده فلز پایه را پس از انجام عملیات حرارتی مطابق با جدول (۳) و با بزرگنمایی ۳۰۰۰۰ مشخص می نماید.



شکل ۴- تصویر SEM فلز پایه با بزرگنمایی ۳۰۰۰۰

- منطقه تحت تاثیر حرارت

شکل (۵) ساختار یکنواخت مارتنزیت تمپر شده HAZ را با بزرگنمایی ۳۰۰۰۰ مشخص می نماید.

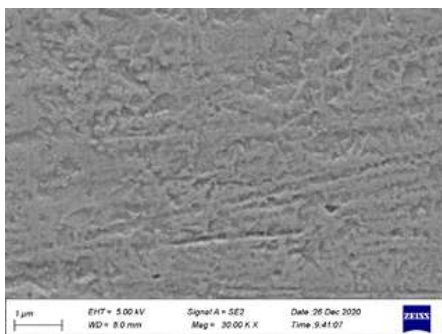


شکل ۵- تصویر SEM منطقه تحت تاثیر حرارت با بزرگنمایی ۳۰۰۰۰

با توجه به شکل (۵) کاهش محسوس در اندازه دانه نسبت به فلز پایه مشخص است که این پدیده به دلیل کنترل گرمای ورودی به قطعه می باشد. به طور معمول ناحیه HAZ از ۲ ناحیه درشت دانه و ریز دانه تشکیل شده است ولی در این تحقیق با کنترل پارامترهای موثر جوشکاری گرمای ورودی به قطعه کنترل گردید. عامل دیگر برای ریز دانه بودن ناحیه HAZ انجام فرایند جوشکاری نمونه در 2 پاس می باشد [۱۰]. کاربرد مولیبدن ایجاد شده با پراکندگی بسیار کم و به صورت اتفاقی در زمینه مارتنزیتی از دیگر موارد قابل مشاهده در تصویر فوق می باشد [۱۱]. مهمترین نکته عدم وجود هیچ گونه ترک، میکرو ترک و حفره در ناحیه تحت تاثیر حرارت است.

- منطقه جوش

شکل (۶) ساختار فلز جوش را نشان می دهد.



شکل ۶- تصویر SEM منطقه جوش با بزرگنمایی 30000

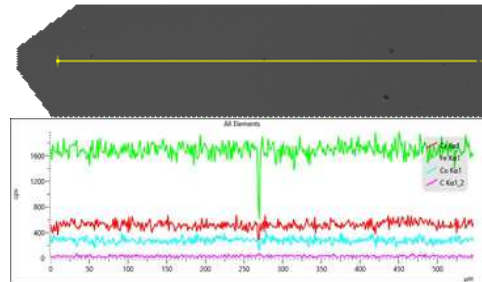
با توجه به تصویر (۶) اندازه دانه های فلز جوش افزایش داشته و از فلز پایه بزرگتر گردیده است. ساختار زمینه مارتنزیت کامل می باشد. با توجه به شکل های (۴) الی (۶) می توان دید که با حرکت از سمت فلز پایه به سمت فلز جوش به مقدار ساختار از حالت مارتنزیت تمپر

شده به مارتنزیت کامل می رسد که دلیل آن گرمای ورودی به قطعه و سرعت سرد شدن است [۱۰].

- آنالیز خطی

در جدول (۴) آنالیز خطی از سمت فلز جوش به سمت فلز پایه گرفته شده است.

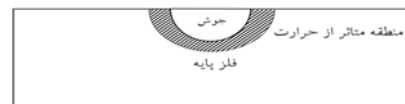
جدول ۴- آنالیز خطی از سمت فلز جوش به سمت فلز پایه.



با توجه به جدول (۴) با حرکت از سمت فلز جوش به سمت فلز پایه آنالیز شیمیایی به صورت یکنواخت حفظ می شود. با نزدیک شدن به منطقه HAZ به طرف فلز پایه پراکندگی های کاربیدی مشاهده می شود که باعث ایجاد پیک کاهشی در عناصر آلیاژی می شود و مقدار کربن در این ناحیه افزایش می یابد. به دلیل گرادیان حرارتی و سرعت سرد شدن متفاوت منطقه HAZ آخال های کاربیدی اندازه بزرگتری نسبت به فلز جوش دارند [۱۱]. آخال کاربیدی از جنس کاربید مولیبدن می باشد.

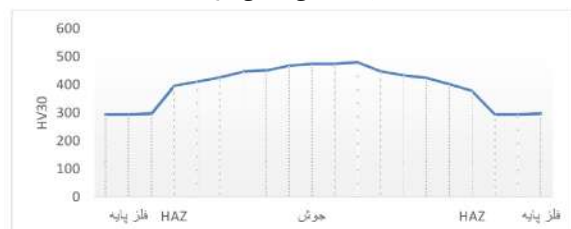
- سختی سنجی

جدول (۵) مقادیر سختی سنجی و شکل (۷) نیز مناطق مختلف نمونه جوشکاری شده که سختی سنجی روی آن انجام گرفته را مشخص می کند. سختی سنجی با معیار HV30 انجام گردید. بر اساس داده های بدست آمده از سختی سنجی مشخص می شود که پایین ترین مقدار سختی مربوط به فلز پایه می باشد. این مقدار به صورت میانگین برابر با HV30 ۲۹۳ می باشد. سختی پایین فلز پایه به دلیل عملیات حرارتی تمپر می باشد که بر روی قطعه انجام شده است.



شکل ۷. تصویر مناطق مختلف برای سختی سنجی

جدول ۵. سختی سنجی نمونه



سختی ناحیه جوش بالاترین مقدار سختی می باشد که در مرکز جوش این سختی بیشتر از نواحی نزدیک خط ذوب می باشد. مقدار سختی جوش به صورت میانگین برابر با HV30 ۴۵۱ می باشد. که حدود HV30 ۱۵۰ بیشتر از فلز پایه می باشد. سختی ناحیه تحت تاثیر حرارت به صورت میانگین برابر با HV30 ۴۰۰ می باشد که HV30 ۱۰۰ بیشتر از فلز پایه و HV30 ۵۰ کمتر از فلز جوش است. این اختلاف مقدار بین فلز پایه و HAZ به دلیل وجود ساختارهای کاربیدی و زمینه مارتنزیتی یکنواخت تر می باشد. فلز جوش بالاترین مقدار سختی را دارا می باشد. دلیل این امر ساختار مارتنزیت کامل به همراه دانه بندی بزرگتر در این ناحیه است [۱۱].

نتیجه گیری

با توجه به بحث های صورت گرفته نتایج زیر حاصل می شود:
- استفاده از فیلتر هم جنس از تغییرات عنصری و جدایش های عنصری و ساختاری در ناحیه جوش با ناحیه فلز پایه جلوگیری می کند.

- در ناحیه تحت تاثیر حرارت ساختارهای بین فلزی مشخص نشده است.

- سختی ناحیه جوش از ناحیه فلز پایه و HAZ بالاتر می باشد. با توجه به ساختار مارتنزیت کامل و بزرگ بودن دانه ها این امر طبیعی است.

- سختی ناحیه HAZ نسبت به فلز پایه به صورت شیب مثبت افزایشی بوده و به حالت پیک هایی به شیب زیاد نمی باشد.

- این روش تعمیراتی قابل استفاده در قطعات اصلی توربین می باشد.
- هیچگونه ترک، میکرو ترک و حفره ای در نواحی جوش، فلز پایه و منطقه تحت تاثیر حرارت مشخص نگردید.

با توجه به این تحقیق می توان برای جوشکاری فولاد ریخته گری با جنس G-X14CrCoMo13-10 از فیلتر ریختگی هم جنس با استفاده از پارامترهای مشخص شده استفاده کرد.

منابع

- 1-Bhaduri, A.K., Albert, S.K., Ray, S.K. et al. Recent trends in repair and refurbishing of steam turbine components. Sadhana, vol 28, pages 395-40,2003.
- 2-Lippold, J. C, "Selection of wrought austenitic stainless steels". ASM Metals Handbook, vol.6, 1993.
- 3- تجلی، ش؛ رنجیسر، خ؛ تختی، س؛ ارزیابی ریزساختار جوش تعمیراتی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۲۰ به روش GTAW اولین کنفرانس نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی، تهران، ۱۳۹۱.
- 4-Kacar, R., Baylan, o., "An Investigation of Microstructure/Property Relationships in Dissimilar Welds Between Martensitic and Austenitic Stainless Steels", Materials and Design, Vol. 25, pp. 317-329, 2004.
- 5-Xi, Yun-tao, Liu, Dao-xin, Han, Dong, "Improvement of Corrosion and Wear Resistances of AISI 420 Martensitic Stainless Steel Using Plasma Nitriding at Low Temperature", Surface & Coatings Technology, Vol. 202, pages. 277-283.

ذوب و ریخته گری مجدد بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ **G-X 14CrCoMo 1310** ریخته گری شده به روش ریخته گری دقیق، نهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مواد و متالورژی، تهران، ایران، آبان ۱۳۹۹.

10-Satish Kumar. M.P., Bala Srinivasan. P, "Corrosion Behaviour of a Thin Section Martensitic Stainless Steel GTA Weldment in Chloride Solutions", Materials Letters, Vol 62, Pages 2887-2890, June 2008.

11-Mantrala. M. K., Rao. S, Rao. K." Microstructure and Tribological Properties of Weld Deposited Co-Cr-Mo Alloy". DE GROUYER, University of Gothenburg, vol 15(2), Pages 239-241, 2015.

پی نوشت

- 1- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
- 2- دانشگاه سمنان
- 3- دانشگاه صنعتی اصفهان
- 4- دانشگاه علم و صنعت ایران
- 5- دانشگاه علم صنعت ایران

2008.

6-Singh. M, Shahi. A.S, Singh. D," Effect of weld groove volume on the mechanical and metallurgical performance of GTA welded martensitic stainless steel (AISI 410 SS) joints", Materials Today: Proceedings, Volume 28, Part 3, Pages 1580-1587, 2020.

7-Nasery Isfahany. A, Saghafian. H, Borhani. G," The effects of heat treatment on mechanical properties and corrosion behaviour of AISI 420 martensitic stainless steel", Journal of Alloys and Compounds Vol 509, Issue 9, Pages 3931-3936, 2011.

8-Huang. B, Zhang. J, Wu. Q, "Microstructure and mechanical properties of China low activation martensitic steel joint by TIG multi-pass welding with a new filler wire" Journal of Nuclear Materials, Volume 490, Pages 115-124, July 2017.

9-مللی، پ؛ دیواندری، م؛ مخدومی، ع؛ شبانی، ا.م؛ بررسی تاثیر

ISO 45001



تشریح الزامات استاندارد ISO 45001 - قسمت پایانی

مهندس افشین خیام

از یک بلندی سقوط می کند اولین کاری که باید انجام بدهیم این است که خیلی سریع به آن فرد رسیدگی کنیم. به اورژانس ببریم و یا با اورژانس تماس بگیریم. اقدامات اولیه و کمک های اولیه را انجام بدهیم. به این می گوئیم اصلاح. وقتی ماشینی و یا تجهیزاتی خراب می شود اولین کاری که باید انجام بدهیم باید آنرا تعمیر و رفع عیب کنیم و درستش کنیم که به این اصلاح می گوئیم. اقدامی که بعد از اصلاح انجام می دهیم یعنی اقدامی که به دنبال حذف علت های ریشه ای این اتفاق است را اقدام اصلاحی می گوئیم. اقدام اصلاحی در مورد مثال قبل این است که بیائیم ببینیم علت سقوط آن فرد چه بوده است؟ شاید سازمان به این نتیجه برسد که عدم وجود حفاظ باعث این اتفاق شده است و اقدام اصلاحی این است که برای آن محوطه حفاظ بکشند. پس ما یک اصلاح داریم و یک اقدام اصلاحی داریم که بین این دو تفاوت وجود دارد که متأسفانه خیلی وقت ها در سازمان ها می بینیم که اقدام اصلاحی تعریف نمی کنند و فقط اصلاح تعریف می کنند. هنگامی که یک رویداد یا عدم انطباق رخ می دهد سازمان باید:

- به موقع به رویداد یا عدم انطباق واکنش نشان دهد، به نحوی که کاربر پذیر باشد. (۱- کنترل و اصلاح ۲- رسیدگی به عواقب)،
- با مشارکت دادن کارکنان و دیگر طرف های ذینفع، علل ریشه ای رویداد و عدم انطباق حذف شود تا دوباره با جای دیگر تکرار نشود. (۱- بررسی و بازنگری ۲- تعیین علت ها ۳- تعیین رخدادهای مشابه یا عدم انطباق های بالقوه مشابه)،
علل ریشه ای باید پیدا شوند، این علل باید حذف شوند و جای دیگری هم اقدام مشابه ای رخ ندهد.
- بازنگری مناسب ارزیابی های موجود در ریسک های (OH&S) و سایر ریسک ها.
- تعیین و پیاده سازی هرگونه اقدام مورد نیاز شامل: اقدام اصلاحی مطابق سلسله مراتب کنترل ها و مدیریت تغییر.

بند ۱۰- بهبود

بند ۱۰ استاندارد ISO 45001 در رابطه با بهبود صحبت می کند که در این مقاله می خواهیم الزامات آنرا مرور کنیم:

10-بهبود

10-1- کلیات

سازمان باید فرصت های بهبود را تعیین کرده و اقدامات ضروری به منظور دستیابی به نتایج مورد نظر سیستم را پیاده سازی کند. باید دنبال فرصت هایی گشت که به ما کمک می کند سیستم ایمنی و بهداشت شغلی بهبود پیدا کند. که این بهبود در در مقاله های قبلی زیاد در مورد آن صحبت کردیم. اگر بتوانیم میزان ریسک ها، میزان مخاطرات را کاهش دهیم و سطح ایمنی را افزایش دهیم عملاً داریم موضوع بهبود را ادامه می دهیم و بحث بهبود مداوم را داریم پیش می گیریم.

10-2- رویداد، عدم انطباق و اقدام اصلاحی

سازمان باید به منظور تعیین و مدیریت رویدادها و عدم انطباق ها، فرآیندی را ایجاد، پیاده سازی و نگهداری کند که شامل: گزارش دهی، بررسی و اقدام باشد.

رویداد همان حادثه ای است که رخ می دهد. که یک عدم انطباق می شود. حادثه ای رخ داده است که نباید رخ می داد. برای فردی اتفاقی افتاده است آسیبی و یا شبه حادثه ای رخ داده است. این یعنی عدم رعایت الزامات یعنی عدم انطباق و یا هر عدم انطباق دیگری که در سازمان در حوزه ایمنی و بهداشت وجود داشته باشد. مانند: از وسایل حفاظت فردی استفاده نمی کنند، چک لیست ها پر نشده است و دیگر عدم انطباق های سیستمی.

مثلاً فردی از یک بلندی سقوط می کند کاری را در اسرع وقت باید انجام بدهیم یک اقدام فوری که به این اصلاح می گوئیم. وقتی فردی

هر جایی که تغییر دادید هر جایی که اتفاقی افتاده باید پیاده سازی اقدام اصلاحی را داشته باشد. چطوری باید اقدام اصلاحی بنویسیم؟ اگر در سازمان استانداردهای ۹۰۰۱، ۱۴۰۰۱ و ۴۵۰۰۱ را داشته باشید فرم‌های اقدام اصلاحی را دارید و دیده‌اید و اما اگر در سازمانی این استانداردها پیاده سازی نشده باشد، یک فرمی باید وجود داشته باشد که یک قسمت آن شرح عدم انطباق است. یک قسمتی از آنرا هم باید بگذاریم برای آن اقدامی که انجام می‌دهیم.

اقدام فوری چه بوده است و چه کار کردیم. علل ریشه‌ای عدم انطباق، اقدام‌هایی که برای حذف این علت ریشه‌ای انجام می‌دهید چه هستند و چه کسی مسئول حذف آن است و تا چه تاریخی و قسمت آخر هم اثربخشی اقدام اصلاحی است. باید بررسی کنیم که این اقدام اثربخش بوده است یا خیر؟

- ارزیابی ریسک‌ها که با خطرات جدید یا تغییر یافته مرتبط هستند پیش از انجام اقدام.

گفتیم هر تغییری را که ایجاد می‌کنیم همان تغییر ممکن است ریسکی را به سازمان اضافه کند که می‌تواند ریسک جدیدی باشد باید ریسک‌ها و خطرات جدید را ارزیابی کنیم و قبل از اقدام روی این ارزیابی‌ها کار انجام بدهیم.

و همین ارزیابی‌ها می‌تواند یکی از ورودی‌های اقدامات اصلاحی ما باشد.

- بازنگری اثربخشی هر گونه اقدام انجام شده شامل: اقدام اصلاحی بعد از یک بازه زمانی که اقدام انجام شد باید چک کنیم آیا حادثه مشابهی داشته‌ایم و آیا عدم انطباق مشابهی تکرار شده است یا خیر؟

آیا این اقدام اصلاحی اثربخش بوده است یا خیر؟
- ایجاد تغییر در سیستم در صورت ضرورت اطلاعات مستند مربوط به اقدامات اصلاحی در سازمان باید نگهداری شود. باید سوابق داشته باشید.

3-10- بهبود مداوم

سازمان باید مناسب بودن، کفایت و اثربخشی سیستم مدیریت (OH&S) را از طریق زیر به طور مداوم بهبود بخشد:

- ارتقاء عملکرد سیستم مدیریت (OH&S)،

- ترویج فرهنگ سازمانی که از سیستم پشتیبانی می‌کند. (بروشور و کلاس‌های آموزشی)،

- ترویج مشارکت کارکنان در پیاده سازی اقدامات بهبود مداوم سیستم،

- اطلاع رسانی نتایج مربوط به بهبود مداوم به کارکنان و یا در صورت وجود نمایندگان کارکنان،

- نگهداری و حفظ اطلاعات مستند به عنوان شواهد بهبود مداوم:

بعضی از این مستندات به صورت کاغذی ممکن است نگهداری شوند و بعضی می‌تواند به صورت جلسات آموزشی باشد سوابق و اطلاعات مستند این جلسات شامل: تاریخ، اسامی و تعداد شرکت کنندگان، حتی عکس و فیلمی که از جلسه گرفته شده است. این موارد می‌تواند به عنوان اطلاعات مستند نگهداری شود.

پی نوشت

- مدیر تضمین کیفیت شرکت ناظران یکتا



بررسی افزایش استحکام الکتروود، با رویکرد کاهش عملیات درسینگ در تغییر عناصر آلیاژی الکتروود مورد استفاده در تولید بدنه خودروی پارس تندر

حسین زارع محمودی، علیرضا دلگشائی، عبدالله یزدانی

چکیده

جوشکاری مقاومتی نقطه ای از مهمترین روش های جوشکاری بدنه خودروها می باشد. در بدنه خودروها ورق های فولادی گالوانیزه بدلیل مقاومت در برابر خوردگی استفاده می شوند که جوشکاری نقطه ای این ورق های گالوانیزه بدلیل وجود پوشش فلز روی بر روی سطح ورق فولادی دارای مشکلاتی است. میزان مقاومت (سره) الکتروود از دفرمه شدن در پارامترهای مختلف می تواند تاثیر در تعدد و زمانهای صرف شده عملیات درسینگ و تراش الکتروود داشته باشد. باید با عملیات درسینگ به سطح موثر موردنظر دست یافت. در صورت وجود استحکام لازم در الکتروود مصرفی، دفرمگی سره موثر کمتر بوجود می آید و باعث کاهش عملیات درسینگ و کاهش کار اپراتور می شود. هدف اصلی در این تحقیق، تغییر در میزان عناصر موثر بر استحکام الکتروود همچون زیرکونیوم مطابق استاندارد رنو و بررسی و تعیین متغیرها و پارامترهای بهینه برای ایجاد اتصالاتی مناسب از نقطه نظر خواص مکانیکی و فیزیکی در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه ای در تولید بدنه خودرو بکار می رود، می باشد. نوآوری در این پژوهش بدلیل بکار بردن الکتروود استاندارد به همراه پارامترهای بهینه باحفظ استانداردهای کیفی در تولید بدنه خودرو، در شرکت خودروسازی پارس خودرو می باشد. در این پژوهش ابتدا با الکتروود مس-کروم و سپس با الکتروود مطابق با استاندارد رنو جوشکاری انجام پذیرفت. نتایج نشان داد الکتروودی که دارای زیرکونیوم می باشد، دارای بیشترین استحکام و کمترین تعداد درسکاری بدلیل سایش و دفرمگی کمتر است. همچنین لازم به ذکر است با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، الکتروودهای دارای زیرکونیوم برای گان های شرکت پارس خودرو سفارش گذاری و تامین گردید که این منجر به کاهش عملیات درسکاری، استحکام بیشتر الکتروودها، بهبود شرایط نقاط جوش و در نهایت استحکام آنها نیز گردید.

کلمات کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه ای، الکتروود مس-کروم-زیرکونیوم، استحکام جوش، بدنه خودرو، فرایند درسکاری الکتروود، سره موثر الکتروود.

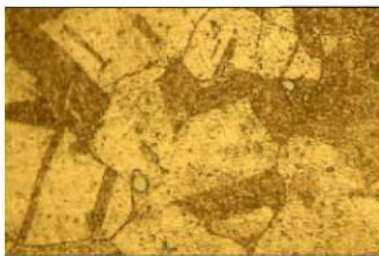
مقدمه

ایجاد اتصال هایی با خواص کاملاً مشابه در صورت تنظیم متغیرهای فرایند و قطعات کار، هزینه انسانی پائین، قابلیت بیشتر در جوشکاری در حضور لایه های اکسیدی و آلودگی سطحی نسبت به دیگر فرایندهای جوشکاری و عدم نیاز به گاز محافظ، فلز پرکننده و فلاکس منجر به گسترش روش جوشکاری مقاومتی نقطه ای در صنایع گوناگون شده است. این فرایند بطور گسترده ای در صنعت خودروسازی، حمل و نقل، ساخت لوازم خانگی، ساختمان و... کاربرد

دارد. از طرفی با پیشرفت صنایع گوناگون نیاز به مواد مرغوبتر و مقاوم تر رو به افزایش است. در این میان مواد مقاوم به خوردگی جایگاه ویژه ای را به خود اختصاص داده اند. هزینه های ناشی از خوردگی قطعات بر اهمیت این موضوع می افزاید ورق های گالوانیزه به علت خواص منحصر به فردی چون مقاومت به خوردگی، ظاهر زیبا، تنوع کاربرد، روش تولید ساده، شکل پذیری و جوش پذیری آن بیش از سایر فلزات در صنایع مذکور خصوصاً "خودروسازی مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۱- دانه های محلول جامد مس حاوی نواحی دوقلویی



شکل ۲- ساختار در بزرگنمایی بالاتر و مشاهده ذرات ترکیبات بین فلزی غنی از کروم در زمینه



شکل ۳- ساختار در ناحیه دیگر نمونه و مشاهده تجمع ذرات ترکیبات بین فلزی غنی از کروم



شکل ۴- ساختار در ناحیه دیگر نمونه و مشاهده تجمع ذرات ترکیبات بین فلزی غنی از کروم

از آنجا که عمده ترین روش اتصال ورق ها با ضخامت های کم، فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه ای است، لذا پرداختن به تحقیقات مرتبط با اتصال این فولادها توسط فرایند مذکور ضروری به نظر می رسد. انتخاب مواد مهندسی در ساخت الکتروود مصرفی، میتواند نقش مهمی در کیفیت جوش، سایکل تایم (زمان ایستگاه کاری)، تسهیل کار اپراتور و... داشته باشد.

ابتدا اتصالاتی با الکتروود بدون زیر کونیوم و سپس الکتروود دارای زیر کونیوم حاصل شد. سپس بررسی های ظاهری و اطمینان از عدم وجود عیوب ظاهری با استفاده از بررسی های ماکروسکوپی با اندازه گیری مناطق متفاوت منطقه اتصال مقاومتی نقطه ای، بررسی های ریزساختاری با متالوگرافی و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، آزمون های مکانیکی از جمله ریز سختی سنجی و کشش - برش، انجام گرفت.

روش تحقیق و نتایج و بحث

- انتخاب نوع الکتروود

انتخاب نوع، ابعاد و آنالیز عنصری ترکیب الکتروود، نیروی فشاری الکتروود، برای نمونه های فولادی ورقه های فوق به ضخامت ۰,۸ میلیمتر در نظر گرفته شد که نتایج آزمونهای تعیین هدایت الکتریکی، تعیین دانه بندی با SEM و سختی سنجی برینل توسط آزمایشگاه رازی در ذیل آورده شده است.

انتخاب مواد الکتروود می بایست بر اساس هدایت الکتریکی و حرارتی ماده صورت می گرفت. از آنجایی که الکتروودها تحت تاثیر نیروهای غالباً زیادی قرار دارند، بایستی توانایی تحمل تنش های اعمالی را در دماهای بحرانی داشته باشند، بدون اینکه تغییر فرم اضافی بدهند. زیرا که تغییر فرم اضافی باعث تکرار عملیات در سینگ و در نتیجه باعث افزایش زمان کاری می شود.

پس موادی که باید برای ساخت این الکتروودها بکار برود باید دارای هدایت الکتریکی و حرارتی بالا و مقاومت تماسی کم باشند تا از آلیاژ شدن مواد الکتروود با قطعات کار جلوگیری به عمل آید. این الکتروودها باید دارای استحکام کافی باشند تا در دما و فشار جوشکاری تغییر شکل پیدا نکنند.

- گزارش نتایج حاصل آزمایش

گزارش نتایج حاصل آنالیز عنصری الکتروود بدون عنصر زیر کونیوم به شرح جدول (۱) می باشد. ساختار میکروسکوپی و متالوگرافی ریزدانه های الکتروود بدون زیر کونیوم مطابق نتایج اخذ شده از آزمایشگاه رازی به شرح اشکال (۱ تا ۴) قابل مشاهده می باشد.

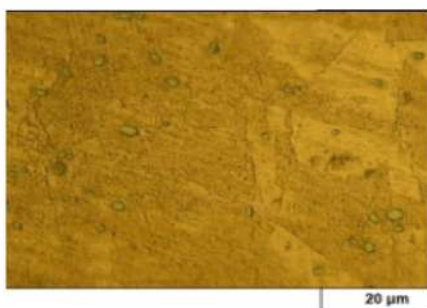
جدول ۱- ترکیب شیمیایی الکتروود بدون زیر کونیوم

Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si	Cr	Al	S
<0.01	None	Trace	0.008	Trace	0.03	0.02	0.004	0.85	Trace	0.003
Ag	Co	Zr	Cu							
0.002	0.002	None	99.01							

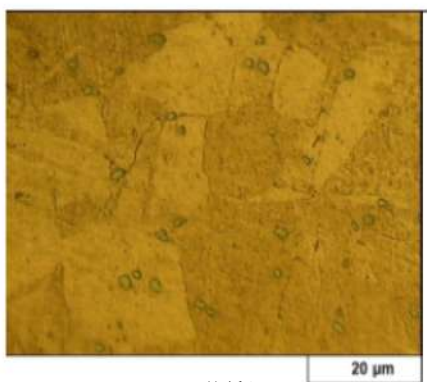
نقطه ای، ساخت شرکت اوبارا کره با توان ۱۵۰ کیلو ولت آمپر و فرکانس ۵۰ هرتز انجام شد.



شکل ۵



شکل ۶



شکل ۷

جدول ۷

ردیف	موقعیت سختی سنجی	عدد سختی (HB)				معیار پاپیران عدد سختی (HB)	لوسیتات
		نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳	میانگین		
۱	سطح (قبل از عملیات حرارتی)	۱۷۱	۱۷۱	۱۷۴	۱۷۱	---	---
۲	سطح (بعد از عملیات حرارتی)	۱۲۷	۱۲۹	۱۳۳	۱۳۰	---	---

تحلیل نتایج آزمایش

- با افزایش مقدار زیر کونیوم در آلیاژ الکتروود به مقدار % ۱۸, ۰, مقدار سختی به میزان ۷ برینل زیاد گردید.
- تجمع ذرات درشت ترکیبات بین فلزی غنی از کروم در الکتروود بدون زیر کونیوم بیشتر از نمونه دیگر دیده می شود.

- آزمون تعیین هدایت الکتریکی

آزمون تعیین هدایت الکتریکی الکتروود بدون زیر کونیوم به شرح ذیل می باشد.

جدول ۲

پارامتر مورد اندازه گیری	مقدار اندازه گیری شده
مقاومت الکتریکی (Ω)	8.838×10^{-5}
مقاومت ویژه الکتریکی (μΩ.m)	2.625×10^{-2}
هدایت الکتریکی بر حسب S/m	3.8095×10^7
هدایت الکتریکی بر حسب %IACS	65.68

- نتایج آزمون دانه بندی با SEM الکتروود بدون زیر کونیوم اندازه ذرات برخی از قسمت های نمونه به شرح جدول (۳) می باشد.

جدول ۳

ردیف	اندازه ذرات (μm)	ردیف	اندازه ذرات (μm)	ردیف	اندازه ذرات (μm)	ردیف	اندازه ذرات (μm)
۱	۰	۲	۰.۷۹	۳	۲.۱۶	۴	۰.۳۵
۱	۱.۹۷						

نتایج سختی سنجی به روش برینل الکتروود بدون زیر کونیوم به شرح جدول (۴) می باشد.

جدول ۴

ردیف	موقعیت سختی سنجی	نیروی اعمالی (kgf)	عدد سختی (HRB)				معیار پاپیران	توجهیات
			عدد سختی (HRB)	تلقه ۱	تلقه ۲	تلقه ۳		
۱	سطح	۱۰۰	۸۴	۸۴	۸۵	۸۴	---	---

نتایج حاصل آزمایش آنالیز عنصری الکتروود حاوی عنصر زیر کونیوم به شرح جدول (۵) می باشد.

جدول ۵- ترکیب شیمیایی الکتروود دارای زیر کونیوم

Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si	Cr	Al	S
0.07	<0.01	<0.01	0.018	0.03	0.02	0.11	0.07	0.9	Trace	None
Ag	Co	Zr	Cu							
0.03	<0.01	0.18	98.57							

ساختار میکروسکوپی و متالوگرافی ریزدانه های الکتروود با زیر کونیوم تصاویر میکروسکوپی در اشکال (۵ الی ۷) قابل مشاهده می باشد. نتایج آزمون تعیین هدایت الکتریکی الکتروود با زیر کونیوم به شرح جدول (۶) می باشد.

جدول ۶

پارامتر مورد اندازه گیری	مقدار اندازه گیری شده
مقاومت الکتریکی (Ω)	8.826×10^{-5}
مقاومت ویژه الکتریکی (μΩ.m)	3.007×10^{-2}
هدایت الکتریکی بر حسب S/m	3.325×10^7
هدایت الکتریکی بر حسب %IACS	57.33

نتایج سختی سنجی به روش برینل الکتروود با زیر کونیوم به شرح جدول (۷) می باشد.

- دستگاه جوش مقاومتی نقطه ای مورد استفاده

اتصال های انجام شده در این مقاله با دستگاه جوشکاری مقاومتی

- مقاومت ویژه الکتریکی در الکتروود بدون زیرکونیوم $2/625 \times 10^{-2}$ میکرواوم، در صورتی که در الکتروود دارای زیرکونیوم $3/700 \times 10^{-2}$ می باشد.

- هدایت الکتریکی در الکتروود بدون زیرکونیوم $65/68$ درصد IACS و در صورتیکه در الکتروود دارای زیرکونیوم $57/33$ درصد IACS می باشد. که مطابق استاندارد رنو هدایت الکتریکی پائین تر برای الکتروود مناسبتر می باشد زیرا منجر به فرسایش و درسکاری کمتر می گردد.

نتیجه گیری

- نتایج زمانسنجی میزان درسینگ الکتروود و آزمون تعیین ترکیب شیمیایی، آزمون هدایت الکتریکی، آزمون مقاومت الکتریکی، سختی سنجی، آزمون تعیین دانسیته و تصاویر میکروسکوپ نوری از الکتروود ساخته شده شرکت نوین سازان با میزان 0.18% زیرکونیوم دارای استحکام مناسب و مورد تایید شرکت پارس برای تولید بدنه پارس تندر می باشد. استحکام مناسب یعنی کاهش تعداد عملیات درسینگ در هنگام تولید خودرو بدلیل کاهش میزان درسکاری (بدلیل عدم دفرمگی سریع سره الکتروود) و تعویض مکرر الکتروود که در سایکل تایم تولید خودرو تاثیر مستقیم داشته و با داشتن سره مناسب الکتروود بدلیل عدم نیاز به درسینگ مستمر و پرتکرار در طول فرایند تولید در الکتروودهای دارای زیرکونیوم، باعث کاهش سایکل تایم و تسهیل کار اپراتور (جوشکار) گردید.

- با توجه به اینکه هر دو نوع الکتروود دارای قیمت مشابه بودند، اما

زمان تعویض الکتروودهای بدون زیرکونیوم در هر 50 دستگاه تولید بوده در صورتیکه در الکتروودهای دارای زیرکونیوم در هر صد دستگاه تولید رخ داده است. که این منجر اثر بخشی 50 درصدی در کاهش سفارش گذاری و خرید الکتروود، تسهیل کار اپراتور بدلیل عدم درسکاری مستمر و تعویض الکتروود، عدم خرابی هولدر کان تجهیز جوش با توجه به کاهش تعویضهای زیاد الکتروود می گردد.

منابع

- 1- مسعود وطن آراء، میثم حق شناس، محمد رضا وطن آراء، چاپ اول 1386 ، "جوشکاری مقاومتی"، منابع تخصصی جوش، مجموعه 1، جلد 11، انتشارات مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران
 - 2- امیر حسین کوبی، چاپ اول 1374 ، "تکنولوژی جوشکاری"، انتشارات آزاده
 - 3- مستندات شرکت پارس خودرو
 - 4- محمدعلی گلزار، چاپ چهارم 1382 ، "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها"، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان
- 5-ASM Handbook, 2004, "Metallography and Microstructures" ASM International, Vol. 9
6- American Welding Society, Welding Handbook, 1989, "Welding Processes", 6th ed, Vol. 2

پی نوشت

دبیر کمیته جوش بدنه، شرکت پارس خودرو
رئیس تولید بدنه، شرکت پارس خودرو
رئیس تولید جوش، شرکت پارس خودرو

ارزیابی خواص ریز ساختاری روکش کاری لیزری اینکونل ۶۲۵ روی فولاد ASTM575 با استفاده از لیزر فیبری

محمد هادی ذاکری، علیرضا نصر اصفهانی، سید مسعود برکت

ویژگی‌های استحکام و خوردگی مناسب، در صنایع هوایی و هسته‌ای نیز کاربرد دارد. از جمله خواص خوردگی، مقاومت عالی در برابر محدوده وسیعی از محیط‌های خشن به علاوه اثرات دمای بالاماندن اکسیداسیون و کربوراسیون را می‌توان نام برد [۱ و ۳].

فولاد ASTM575، از جمله فولادهای کربنی می‌باشد که یکی از پرکاربردترین مواد فلزی هستند که در حالت جوشکاری شده استفاده می‌شوند. قطعاتی که از این فلزات با فرایند جوشکاری تولید می‌شوند در بسیاری از صنایع نظیر نفت و پتروشیمی در محیط‌های دریایی، صنعت حمل و نقل زمینی، صنایع شیمیایی و بویژه در صنعت ساختمان به کار می‌روند. به همین دلیل بسیاری از تحقیقات متالورژی جوشکاری شامل بررسی انجماد فلز جوش، ریزساختار فلز جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت، استحاله‌های فازی حالت جامد در حین جوشکاری و ناپیوستگی‌های جوشکاری بر روی این دسته از فلزات انجام شده است. فولادهای کربنی که در صنایع ساختمانی به کار می‌روند معمولاً در محیط‌های خوردنده شدید استفاده نمی‌شوند. اما شرایط خوردگی متوسط مانند تاسیسات پالایش نفت و لوله‌های انتقال نفت/گاز ترش مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴ و ۵].

در روکش کاری لیزر از منبع حرارتی لیزر برای نشان دادن لایه نازک روی فلز پایه بهره می‌گیرند در این روش، بخشی از انرژی پرتوان لیزر، جذب پودر شده و منجر به ذوب پودر قبل از رسیدن به زیر لایه می‌شود بخش دیگر آن لایه سطحی نازک از زیر لایه را ذوب کرده پس در نتیجه پیوند متالورژیکی قوی ضمن حداقل اختلاط بین زیر لایه و روکش ایجاد می‌شود، حرارت ورودی بسیار پایین که در این روش منتقل می‌شود، باعث آمیختگی بسیار پایین رسوب با زیر لایه می‌شود. همچنین منجر به ناحیه متاثر از حرارت بسیار باریک به همراه اعوجاج و پیچیدگی حداقل می‌شود. فرایند روکش کاری لیزری به دلیل سرعت انتقال حرارت بالا سبب ظریف شدن ساختار و یکنواخت شدن ترکیب شیمیایی در سطح پوشش می‌شود در این روش از یک پرتو لیزر پراثرژی به جای قوس یا شعله گاز به عنوان منبع حرارتی استفاده می‌شود. پرتوهای لیزر امکان به وجود آوردن لایه‌هایی با ضخامت کم و دسترسی آسان تر به سطوح را نسبت به الکتروود یا مشعل فراهم می‌سازند. عمده کاربردهای روکش کاری لیزری به منظور بازسازی سطوح فرسوده توربین‌های هوایی و صنعتی، قطعات شناورهای دریایی مانند پره‌های موتور قایق و کشتی، قطعات صنایع نفت و مجموعه‌های در معرض سایش می‌باشد.

در این پژوهش، به بررسی ریز ساختار لایه اینکونل ۶۲۵ روی زیر لایه فولاد ASTM575 پرداخته شده است. با بررسی پارامترهای مختلف، نمونه بهینه تک پاس با کمترین میزان رقت، تخلخل و آمیختگی و زاویه ترشوندگی مناسب، مشخص شده و در ادامه روکش کاری با پارامتر بهینه انجام شد. ریز ساختار از ناحیه فلز پایه تا راس روکش مورد ارزیابی قرار گرفته و با توجه به نرخ سرد شدن متفاوت در فواصل مختلف انواع ریخت دندریت‌ها مشاهده شد. همچنین پوشش‌کاری از هرگونه حفره، تخلخل و ترک و ارتفاع آن ۰/۹ میلی‌متر (۹۰۰ میکرومتر) مشاهده شد با بررسی آنالیز عنصری از راس پوشش تا زیر لایه، توزیع عناصر از راس پوشش تا زیر لایه تقریباً یکسان نشان داده شده و در ناحیه نزدیک به زیر لایه نیز تغییر چندانی در توزیع عناصر مشاهده نشد. همچنین میانگین سختی روکش VHN450 و زیر لایه VHN135 می‌باشد.

کلمات کلیدی: روکش کاری لیزری، اینکونل ۶۲۵، فولاد ASTM575، ریز ساختار، پارامترهای لایه نشانی.

مقدمه

سوپر آلیاژها، آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت، خوردگی و اکسیداسیون می‌باشند. که به لحاظ ترکیب شیمیایی شامل سه گروه پایه نیکل، پایه نیکل-آهن و پایه کبالت می‌باشند. آلیاژ اینکونل ۶۲۵ نوعی آلیاژ کرم - مولیبدن دار است که مقاومت عالی در برابر خوردگی و اکسایش دارد و از خواص کششی و خستگی مناسبی نیز در محدوده دماهای پایین تا 980°C برخوردار است. استحکام بالای این آلیاژ ناشی از حضور مولیبدن و نیوبیم در آن است و بنابراین نیاز به انجام عملیات رسوب سختی برای افزایش استحکام ندارد، حضور این عناصر در کنار هم سبب ایجاد مقاومت زیاد در برابر انواع محیط‌های خوردنده می‌شود و مقاومت به اکسایش و کربوره شدن را نیز افزایش می‌دهد. این آلیاژ با توجه به استحکام کششی بالا، مقاومت به خوردگی/خستگی و مقاومت در برابر ترک‌های ناشی از خوردگی تنش‌های یون‌های کلریدی، به طور گسترده‌ای در کاربردهای دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. موارد کاربردهای دریایی این آلیاژ می‌تواند به کابل‌های مهارکننده قایق، پره‌های پروانه موتورهای ناو، قطعات موتور رانش اضطراری زیر دریایی، اتصالات جداکننده زیر دریایی، دمنده‌های خط بخار، داکت‌های آگزوز قایق، محافظ کابل‌های ارتباطی زیر دریا، رابط کابل‌های الکتریکی می‌توان نام برد. همچنین به دلیل قابلیت جوشکاری و لحیم کاری بالا و

بحث و نتیجه گیری

- بررسی ریز ساختار

تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه های تک پاس ایجاد شده به وسیله روکش کاری لیزری در شکل (۳) نشان داده شده است. نمونه شماره ۲۵ دارای ریز ساختار همگن شامل یک مرز واضح نسبتاً صاف مرزی در فصل مشترک پوشش زیر لایه با درصد آمیختگی رانشان می دهد و بیانگر پیوند متالوژیکی و چسبندگی مطلوب روکش به زیر لایه می باشد. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می شود نواحی سیاه رنگ کوچک و نامنظم نشان دهنده حفرات گازی و ناخالصی ها می باشد که با توجه به مقدار کم تاثیر زیادی بر خواص مکانیکی و کیفیت روکش ندارد. همچنین ارتفاع متوسط روکش ۰/۹ میلی متر و درصد آمیختگی ۱۷/۲ و مقدار تخلخل کمتر از ۱ درصد و زاویه ترشوندگی متوسط ۴۲/۳ درجه می باشد.

شکل (۴)، تصویر میکروسکوپ نوری با ۵۰ درصد همپوشانی رانشان می دهد که تقریباً عاری از هرگونه تخلخل، حفره، ترک و تراکم با ارتفاع ۰/۹۴ میلی متر می باشد. شکل (۵)، ریز ساختار ناحیه فلز پایه، فصل مشترک و روکش رانشان می دهد. که ریزساختار فلز پایه شامل فریت و پرلیت (شکل ۵-الف)، فصل مشترک شامل بینیت تمپر شده (شکل ۵-ب) و روکش شامل ترکیبی از ساختار ستونی-دندریتی (۵-ج و ۵-د) است. فاز ۷ اولین فاز است که در حین سرد شدن فاز مایع اینکونل تشکیل می شود و غنی از عناصر آلیاژی می باشد که طبق الگوی پراش پرتو ایکس (شکل ۶) می باشد [۹ و ۸] و ریز ساختار آن شامل محصولات ثانویه تشکیل شده در مراحل پایانی انجاماد شامل ترکیبات یوتکتیک گاما-لاوه به همراه رسوبات کاربیدی (کمپلکس غنی از نیوبیوم MC, M_6C) می باشد. فاز یوتکتیک لاهه در دمای بالا یا در حالت انجاماد در اثر جدایش نیوبیوم در ساختار به وجود می آید (شکل ۷).

پس از اعمال روکش روی زیر لایه ترکیب شیمیایی پوشش بررسی شده و با آنالیز اینکونل ۶۲۵ ارایه شده در جدول (۱) مقایسه شد، با توجه به شکل (۸) از مقایسه داده ها نتیجه می شود که مقدار نیکل و کروم به عنوان عناصر اصلی در پوشش تغییرات چندانی نکرده است که بیانگر این موضوع می باشد که روکش کاری با پارامترهای بهینه انجام شده است. و با حرکت از سمت روکش به سمت زیر لایه، آمیختگی آهن در روکش ثابت بوده و در منطقه فصل مشترک افزایش می یابد. مقدار ریز سختی ویکرز در نواحی روکش، فصل مشترک و زیر لایه اندازه گیری و در شکل (۹) نشان داده شده است.

نتیجه گیری

از پژوهش حاضر نتیجه می شود پارامترهای مختلف روکش کاری بر میزان تخلخل، آمیختگی، زاویه ترشوندگی و ارتفاع پوشش تاثیر می گذارد و پارامتر بهینه دارای تخلخل کم، آمیختگی کم و ارتفاع مناسب می باشد. در فرایند روکش کاری لیزری بالا بودن سرعت انتقال حرارت سبب ظریف تر شدن ساختار و یکنواخت ترکیب شیمیایی در سطح پوشش شده و ریز ساختار در بالای پوشش

پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر کیفیت روکش لیزری ایجاد شده شامل توان متوسط، سرعت روبش لیزری و نرخ تغذیه پودر می باشد. عمده مواد مورد استفاده در روکش کاری لیزری، شامل سیم، پودر و خمیر می باشند که پودر بیشترین مورد استفاده را دارد [۷ و ۶].

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از پودر تجاری اینکونل ۶۲۵ به عنوان ماده تغذیه لایه روکشی استفاده شد. ویژگی های این پودر شامل ترکیب شیمیایی، مورفولوژی و اندازه ذرات در جدول (۱) و تصویر (۱) نشان داده شده است. از فولاد $ASTMA575$ به صورت ورق هایی به طول و عرض و ضخامت ۱۴، ۴ و ۱ سانتی متر به عنوان زیر لایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی زیر لایه (به دست آمده از آزمون کوانتومتری) در جدول (۲) ارایه شده است.

به منظور انجام فرایند روکش کاری لیزری، زیر لایه های فولاد $ASTMA575$ تا رسیدن به زبری سطح در حدود ۱ میکرومتر تحت سنباده زنی و پولیش قرار گرفته و در ادامه از دستگاه لیزر فیبری برای لایه نشانی اینکونل ۶۲۵ استفاده شد. برای یافتن پارامترهای بهینه، ابتدا روکش کاری لیزری به صورت تک پاس و با بهره گیری از ۲۷ گروه پارامترهای مختلف بر روی سطح فولاد $ASTMA575$ انجام شد. جدول (۳) پارامترهای مختلف روکش کاری لیزری تک پاس رانشان می دهد.

پس از انجام فرایند روکش کاری، به منظور ارزیابی هندسی نمونه های تک پاس و بررسی ریز ساختاری روکش بهینه، نمونه ها به وسیله دستگاه وایر کات بریده و سطح آن ها سنباده زنی و پولیش شد. از محلول ۱ گرم $FeCl_3$ و ۱۰ میلی لیتر HCl و ۵ میلی لیتر HNO_3 برای اچ کردن نمونه ها استفاده شد. همانطور که در بخش نتایج ارایه خواهد شد از میان پارامترهای ۲۷ گانه به کار رفته در روکش کاری، شماره نمونه ۲۵ به عنوان پارامتر بهینه انتخاب و برای روکش کاری چند پاس مورد استفاده قرار گرفت. ایجاد پوشش با ضخامت مناسب و هندسه یکنواخت، تراکم بالا و عدم حضور عیوب مانند ترک و حفره به عنوان معیارهای این انتخاب در نظر گرفته شد.

برای تعیین ترکیب فازی، الگوهای پراش پرتو ایکس پودر اینکونل ۶۲۵ اولیه، زیر لایه و روکش شماره ۱ با استفاده از دستگاه پراش سنج فیلیپس با ولتاژ ۴۰ کیلو ولت و تابش $K\alpha$ (Cu) با طول موج ۰/۱۵۴۰۶ نانومتر و اندازه گام ۰/۰۵ درجه بر ثانیه ثبت شدند. برای انجام آنالیز فازی، الگوهای پراش پرتو ایکس به دست آمده با استفاده از نرم افزار **Xpert high score** مورد ارزیابی قرار گرفتند. از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی های مختلف برای بررسی ریز ساختار و هندسه روکش استفاده شد و از نرم افزار دیجیتالی برای تعیین زاویه ترشوندگی، میزان آمیختگی و ارتفاع روکش استفاده شد. شکل (۲) طرح واره ای از سطح مقطع یک نمونه تک پاس می باشد که برای تعیین میزان آمیختگی از معادله (۱) استفاده می شود.

7- ر. شجاع رضوی، م. عرفانمنش، فراوری مواد با لیزر، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، چاپ اول، ۱۳۹۳.

8- D. Verdi, M.A. Garrido, C.J. Monez, P. Poza, Cr 3 C 2 incorporation into an Inconel 625 laser cladded coating: Effects on matrix microstructure, mechanical properties and local scratch resistance Materials and Design 67- (2015) 20-27.

9- Yi-tong LONG, Pu-lin NIE, Zhu-guo LI, Jian HUANG, Xiang LI, Xin- mei XU, Segregation of niobium in laser cladding Inconel 718 superalloy, Transactions Nonferrous Metals Society. China 26-(2016) 431-456.

پی نوشت

- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

دندریتی هم محور و در نزدیک فصل مشترک ستونی می باشد و پوشش دارای سختی میانگین **VHN450** و زیر لایه **VHN135** می باشد.

منابع

1- S.Eric, Supper alloys, WAILEY, 2012.

2- ک. زنگنه مدار، ا. فیضی، مقدمه ای بر فلزات و آلیاژهای هوایی، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، ۱۳۸۷.

3- ASM specialty Handbook: Nickel, Cobalt. And Their alloys.

4- J.R.Davis, "Corrosion of Weldments", ASM International, 2006

5- ASM Handbook, Volume 20, pages 357-382.

6- ر. شجاع رضوی، روکش کاری لیزری، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، چاپ اول، ۱۳۹۵.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فولاد ASTM A575

P%	S%	Mn%	C%	Fe%
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۶	۰/۲	base

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و مشخصات پودر تجاری اینکونل ۶۲۵

Al%	Si%	Fe%	Mo%	Cr%	Nb%	Ni%
۱/۵	۰/۲۸	۱/۳۲	۱۱/۵۴	۲۰/۳۷	۳/۴۱	۶۱/۵
کروی		مورفولوژی		۱۲-۸۰ میکرومتر		اندازه ذرات

جدول ۳- پارامترهای روکش کاری لیزری تک پاس پوشش اینکونل ۶۲۵

توضیحات	%D	θ(degre)	b(mm)	h(mm)	W(mm)	F	S	P	شماره نمونه
	33	21.4	0.51	1	2.7	10	6	300	۱
	18	33.6	0.2	0.9	2.6	10	8	300	۲
	16	40	0.146	0.75	2.65	10	10	300	۳
	12.1	36.3	0.106	0.77	2.53	20	6	300	۴
	11.6	35.5	0.1	0.76	2.65	20	8	300	۵
	31	20.8	0.23	0.51	2.61	20	10	300	۶
	12	68.6	0.15	1.1	2.5	30	6	300	۷
	27	22.7	0.29	0.75	2.61	30	8	300	۸
	14.8	33.2	0.12	0.69	2.67	30	10	300	۹
	16	43	0.2	1	2.64	10	6	400	۱۰
	27.2	21	0.3	0.8	2.61	10	8	400	۱۱
	38	16	0.35	0.55	2.52	10	10	400	۱۲
	10	61	0.1	0.9	2.2	20	6	400	۱۳
	4.6	61	0.06	1.24	2.65	20	8	400	۱۴
	7	58.3	0.1	1.32	2.69	20	10	400	۱۵
	16.8	26.5	0.14	0.69	2.8	30	6	400	۱۶
	6.9	61.5	0.12	1.62	2.65	30	8	400	۱۷
	11.5	37	0.13	1	2.6	30	10	400	۱۸
	10.5	71.6	0.2	1.7	2.5	10	6	500	۱۹
	7.1	75.4	0.1	1.3	2.5	20	8	500	۲۰
	9.5	59	0.1	0.95	2.4	30	10	500	۲۱
	23.5	42	0.4	1.3	2.8	10	6	500	۲۲
	27	46.5	0.28	0.75	2.9	20	8	500	۲۳
	35	52	0.64	1.75	2.8	30	10	500	۲۴
	22	18.5	0.5	1.15	3	10	6	500	۲۵
	10.8	75	0.2	1.64	3	20	8	500	۲۶
	12.5	70	0.2	1.4	2.8	30	10	500	۲۷

W: عرض روکش بر حسب میلیمتر

b: میزان آمیختگی (رقت) بر حسب میلیمتر

h: ارتفاع روکش بر حسب میلیمتر

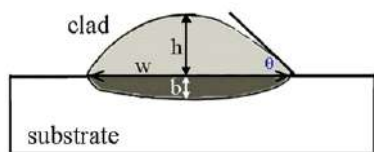
θ: زاویه تروشوندگی بر حسب درجه

D: درصد آمیختگی (رقت)

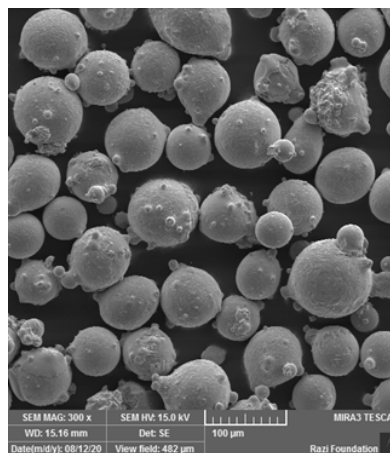
P: توان اسمی (بر حسب وات)

F: نرخ تزریق پودر (mg/s)

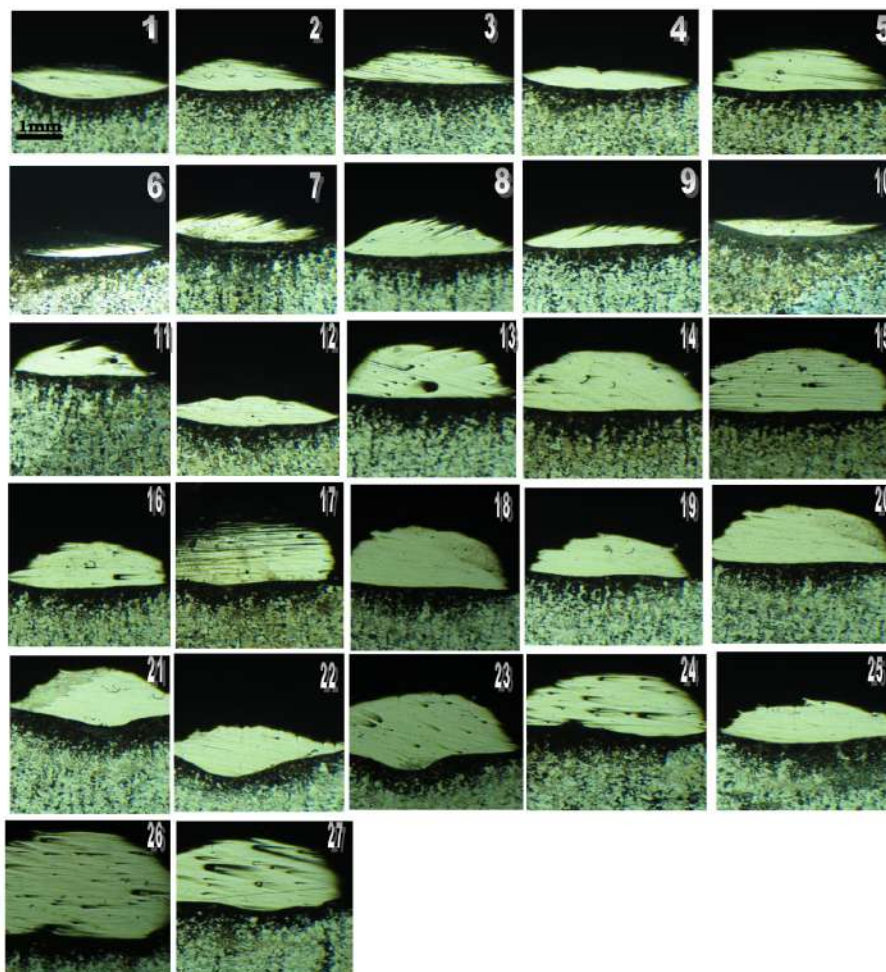
S: سرعت روبش سطح (mm/s)



شکل ۲- طرح واره سطح مقطع یک نمونه تک پاس

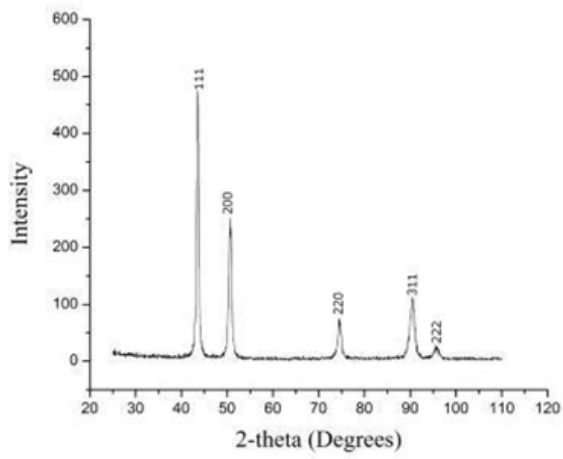


شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از پودر اینکونل ۶۲۵

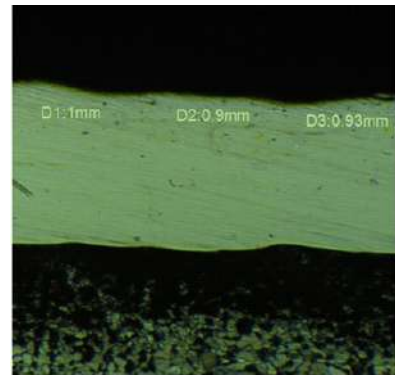


شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه های تک پاس ایجاد شده به وسیله روش کاری لیزری (بزرگنمایی ۵۰)

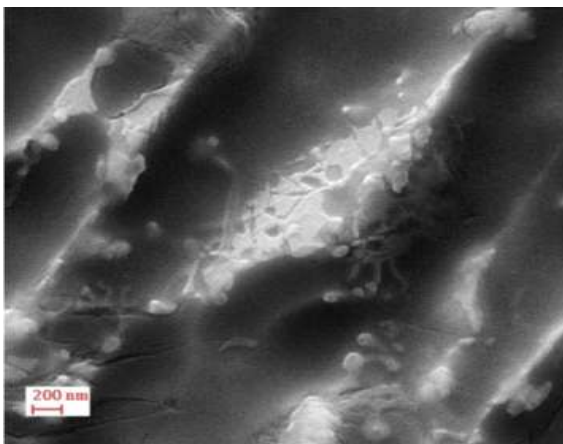
Welding Research



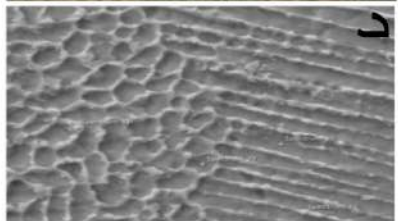
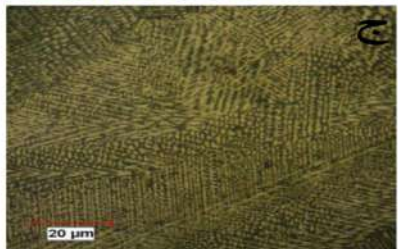
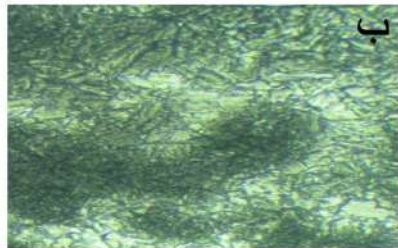
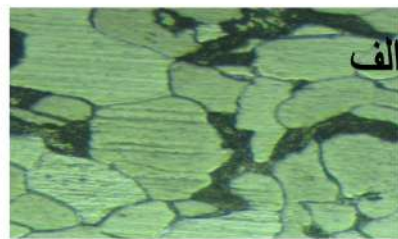
شکل ۶- الگوی پراش پرتو ایکس از روکش



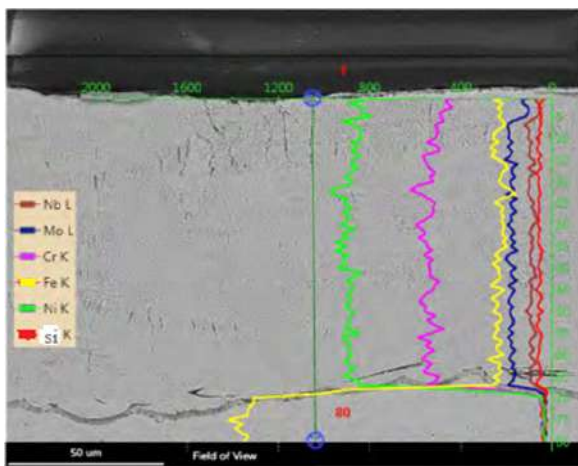
شکل ۴- تصویر میکروسکوپ نوری با ۵۰ درصد همپوشانی



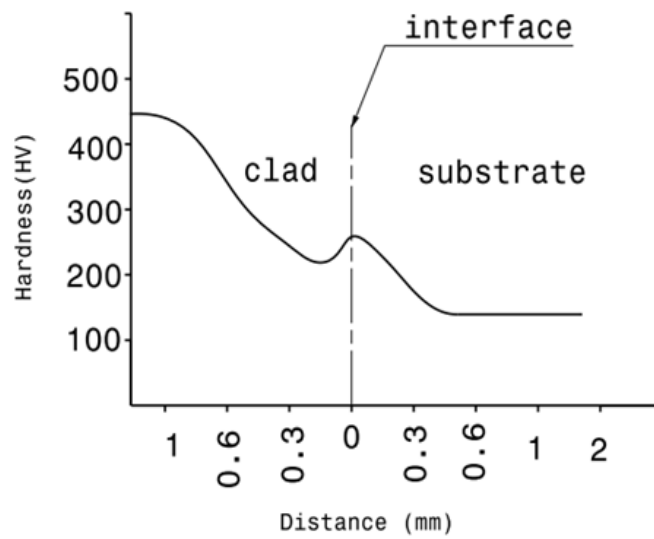
شکل ۷- تشکیل فاز لایه در مناطق بین دندربیتی



شکل ۵- ریز ساختار فلز پایه، فصل مشترک و روکش



شکل ۸- آنالیز عنصری از روکش تا زیر لایه



شکل ۹- نمودار پروفیل سختی از روکش تا زیر لایه

تأثیر پارامترهای لحیم کاری سخت بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال ساندویچی فولاد زنگ نزن

معصومه خیاط^۱، بهروز بیدختی^۲

چکیده

یکی از روش های اتصال ساندویچی صفحات به یکدیگر روش لحیم کاری سخت است که در آن اتصال تحت خلا، فشار و دمای بالا صورت می گیرد. در این طرح از لایه واسطه مس به دلیل مقرون به صرفه بودن، پایین بودن دمای ذوب و ایجاد استحکام اتصال نسبتاً مناسب آن در مقایسه با سایر پرکننده ها نظیر نقره یا نیکل استفاده شده است. اتصال ساندویچی دولایه و ۵ لایه نمونه ها تحت تاثیر اتمسفرهای خلا بالا و اتمسفر هوا بررسی شده است. برای بررسی ریز ساختار درز اتصال پس از متالوگرافی و الکترواچ، از نمونه ها تصاویر نوری گرفته شد. که نشان داد اتصال در اتمسفر خلا هیچ اکسید و فاز مضر تشکیل نشده است و اتصال کاملاً یکنواخت و بدون حفره بوده است. همچنین برای بررسی خواص مکانیکی اتصال از ریز سختی سنجی استفاده شد که سختی درزهای اتصال در نمونه های اتمسفر هوا به دلیل ایجاد فازهای سخت بالاتر از نمونه های اتمسفر خلا بالا بود. همچنین بالاترین میزان سختی در نمونه خلا بالا ۱۰۰ ویکرز بود.

کلمات کلیدی: اتصال ساندویچی؛ فولاد زنگ نزن؛ لحیم کاری سخت.

مقدمه

فلزات، سرامیک ها و یا پلیمرها به تنهایی نمی توانند تمام نیازهای فن آوری را برای انواع کاربردها برآورده کنند. محققان و همچنین مهندسان دانستند که برای بدست آوردن موادی با ویژگی های برتر، باید مواد را با یکدیگر ترکیب کنند [۱]. یکی از روش های ترکیب مواد، اتصال آن ها به یکدیگر به روش ساندویچی می باشد. اتصال ساندویچی عبارت است از قرار گرفتن لایه های مختلف بر روی یکدیگر و اتصال آن ها به هم دیگر با روش های مکانیکی مانند پیچ و مهره [۲]، پرچ [۳، ۲، ۱] و گیره و جوشکاری مانند جوشکاری با لیزر [۴، ۲، ۱]، جوشکاری نقطه ای [۱]، جوشکاری اصطکاکی [۱]، جوشکاری با گاز [۲].

از اتصالات ساندویچی می توان در صنایع کشتی سازی [۵، ۲]، تجهیزات پرتاب سفینه به فضا [۶] و تولید مبدل های حرارتی [۷] نیز استفاده کرد. مبدل های حرارتی در صنایع زیادی همانند نیروگاه، تهویه مطبوع، تبرید، باز یافت حرارت و صنایع ساخت و تولید کاربرد دارند. یکی از انواع مبدل ها، مبدل های صفحه ای هستند که نسل نسبتاً جدیدی از مبدل های حرارتی هستند که عموماً از تعداد زیادی صفحات چین دار از جنس فولاد زنگ نزن تشکیل شده است. بین این

صفحات پدیده ای به نام انتقال حرارت صورت می گیرد که بر اساس این پدیده، گرما از جسم با دمای بیشتر به جسم با دمای کمتر منتقل می شود [۸].

برای تولید مبدل های حرارتی از روش های اتصال دهی متفاوتی نظیر جوشکاری نقطه ای، واشر، جوشکاری نفوذی و لحیم کاری استفاده می شود. در روش لحیم کاری، مبدل می تواند در فشارها و دماهای بالاتر کار کند [۹]. لحیم کاری یکی از متداول ترین روش های اتصال فلزات است که در آن دو یا چند قطعه با استفاده از ذوب و جریان یافتن ماده مصرفی که نسبت به فلز پایه نقطه ذوب پایین تری دارد، به یکدیگر متصل می شوند. عدم ذوب قطعات در این فرایند موجب عدم تغییر خواص متالورژیکی آنها می شود. فرایند لحیم کاری دارای کاربردهای مختلفی در صنایع گوناگون است که ایجاد اتصال بین مواد همجنس یا غیر همجنس شاید مهم ترین آن ها باشد. این روش همچنین به منظور آب بند نمودن قطعات و نیز روکش کاری مواد به کار برده می شود [۱۰].

لحیم کاری به دو نوع لحیم کاری نرم (ایجاد اتصال دائم با ذوب فلز لحیم با نقطه ذوبی کمتر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد و بدون ذوب لبه های فلزات پایه) و لحیم کاری سخت (اتصال با ذوب فلز پرکننده با نقطه ذوب بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد و پایین تر از نقطه ذوب فلز پایه) تقسیم می گردد. لحیم کاری سخت دارای مزایای منحصر به فردی نسبت به سایر روش های اتصال، از جمله امکان اتصال مواد متفاوت (مانند اتصالات فلزی و سرامیک) و تغییرات ریزساختاری محدود می باشد. این نوع اتصالات دارای استحکام نسبتاً بالایی می باشند که غالباً رسانا از نظر حرارتی هستند. جنبه تعیین کننده اتصال لحیم کاری سخت، ذوب فلز پرکننده در درز اتصال است. فلز پرکننده که می تواند خالص و یا آلیاژی باشد، با قرارگیری بین سطوح مواد پایه اتصال را برقرار سازد [۱۱].

مس یکی از رایج ترین فلزات پرکننده بریزینگ است. درحالی که آلومینیوم دارای نقطه ذوب پایین تر نسبت به مس است، به همین علت آلومینیوم مورد علاقه محققین قرار گرفت. اما، در دهه ۱۹۹۰، انجمن بین المللی مس، رادیاتورهایی با فلز پرکننده مس را توسعه داد. زیرا سیستم های رادیاتور با فیلر آلومینیومی اشکالاتی داشتند، از جمله از دست دادن استحکام آن ها هنگام دمای کار بیش از ۱۵۰ درجه سانتیگراد که در این موارد آلیاژهای مس ترجیح داده شدند. همچنین لایه واسطه مس به دلیل مقرون به صرفه بودن، پایین بودن دمای ذوب، ایجاد استحکام اتصال نسبتاً مناسب و نیز رسانایی حرارتی بالایی که دارد، در مقایسه با سایر پرکننده ها نظیر نقره یا

برای بررسی خواص مکانیکی درز اتصال، نمونه‌ها تحت ریزسختی سنجی قرار گرفتند.

نتایج و بحث

شکل (۱)، تصاویر نوری گرفته شده از درزهای اتصال نمونه پنج لایه (a,b,c,d) و دو لایه (e) تحت اتمسفر خلا 10^{-2} و شکل (۲) نمونه‌های تحت اتمسفر هوا را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در تصاویر مشخص است، درزهای اتصال نمونه‌های تحت خلا (شکل ۱) تقریباً یکپارچه و بدون حفره است و فاز اکسیدی تشکیل نشده است. اما در نمونه‌های تحت اتمسفر هوا (شکل ۲) کاملاً تشکیل فازهای اکسیدی و عدم اتصال یکنواخت مشخص است.

علت آن را این‌گونه می‌توان بیان کرد که در دمای بالا نمونه با اکسیژن هوا واکنش داده و فازهای اکسیدی را تشکیل داده است [۱۶]. همچنین نمونه‌های دو لایه و ۵ لایه از لحاظ تشکیل درز اتصال و میزان یکنواختی آن مشابه هم هستند.

شکل (۳) و (۴)، نتایج ریز سختی سنجی نمونه‌ها را نمایش می‌دهد به گونه‌ای که در هر رنگ، دو ستون اول و آخر مربوط به فلز پایه و دو ستون وسط مربوط به درز اتصال می‌باشد.

همان‌طور که مشخص است سختی نمونه‌های تحت اتمسفر هوا به دلیل تشکیل فازهای اکسیدی تقریباً بالاتر از سختی نمونه‌های تحت اتمسفر خلا می‌باشد [۱۶]. همچنین نمونه‌های دو لایه و ۵ لایه سختی تقریباً یکسانی را دارا هستند.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه تاثیر پارامتر اتمسفر کوره بر اتصال ساندویچی فولاد زنگ نزن ۳۱۶L به روش لحیم کاری سخت با استفاده از فلز پرکننده مسی خالص بررسی گردید. مشخص شد که ریزساختار و سختی اتصالات دو لایه و ۵ لایه نمونه‌ها تفاوت چشم‌گیری با یکدیگر ندارد. همچنین تحت اتمسفر خلا، نمونه‌ها تقریباً دارای اتصالاتی یکنواخت و بدون حفره و فازهای اکسیدی هستند و نیز سختی درز اتصال آن‌ها به دلیل عدم تشکیل فازهای اکسیدی مقداری پایین‌تر از نمونه‌های تحت اتمسفر هوا است.

منابع

- 1-O. A. S. a. A. C. Heinz Palkowski, "Sandwich Materials," *Encyclopedia of Automotive Engineering*, p. 17, 2014.
- 2-R. R. & T. G. R. Iwaikowicz, "Review of joining methods of sandwich panels in ship constructions," *Transactions on the Built Environment*, vol. 68, no. 68, p. 6, 2003.
- 3-X. H. B. X. D. Z. F. G. A. B. Lei Lei, "Effect of Foam Copper Interlayer on the Mechanical Properties and Fretting Wear of Sandwich Clinched Joints," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 21, no. 21, p. 21, 2019.
- 4-A. H. M. K. M. J. A. J. Mikko Hietala, "Mechanical characterization of laser-welded

نیکل انتخاب مناسبی برای این کاربرد می‌باشد [۱۰].

بسیاری از محققین نظیر سونگ و همکارانش بر روی بریزینگ آلیاژ مس - کروم و DSS (فولاد زنگ نزن دوپلکس) با فیلر مسی در شرایط مختلف دمایی تحت خلا بالا با هدف بررسی اتصال، ریزساختار و خصوصیات مکانیکی آن فعالیت کردند [۱۲]. در پژوهشی دیگر، سواتی و همکارانش، بریزینگ فولاد زنگ نزن و آلیاژ مس با استفاده از فلز پرکننده مس تحت خلا بالا و شرایط دمایی و زمانی مختلف را مورد مطالعه قرار دادند و ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال را بررسی نمودند [۷]. در مطالعه ای دیگر، ژانگ و همکارانش فلزات پایه HNS و ۳۱۶L در کوره خلا بالا برای مدت زمان‌های مختلف تحت بریزینگ قرار دادند. آن‌ها تأثیر زمان نگه داشتن بر ریزسختی درز اتصال و استحکام برشی برای اتصالات را مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. آرمن و همکارانش نیز بر روی اتصال فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در خلا با دو نوع پرکننده ۱. مس - نقره - تیتانیوم و ۲. مس - نقره - ایندیوم - تیتانیوم در دماهای مختلف مطالعاتی را انجام دادند [۱۴]. تمیزکاری سطح، فشار، درجه حرارت کوره، زمان نگه‌داری در کوره و اتمسفر کوره از پارامترهای مهم لحیم کاری سخت در کوره تحت خلا می‌باشند [۱۵]. همچنین مشکلات شناسایی شده در اتصالات بریزینگ را می‌توان به عیوبی که در هنگام تشکیل اتصال (مانند تخلخل، حفره‌ها و تشکیل فازهای بین فلزی مضر) و مواردی که در سرویس (مانند خوردگی) رخ می‌دهند، تقسیم کرد [۱۰]. در این پژوهش سعی شده است صفحات فولاد زنگ نزن ۳۱۶L را به کمک پرکننده مسی با روش لحیم کاری سخت به یکدیگر متصل نمود.

در این فرایند، چندین لایه فولاد زنگ نزن با پرکننده مسی بصورت ساندویچی تحت خلا بالا و فشارهای نسبتاً پایین متصل می‌گردند. تاثیر اتمسفر کوره بر روی درز اتصال با میکروسکوپ نوری از نظر پیوستگی بررسی می‌شود. با دستگاه ریزسختی سنجی، سختی اتصال ایجاد شده اندازه‌گیری می‌شود. در این کار با تغییر پارامتر اتمسفر کوره سعی شده است بهترین شرایط برای یک اتصال مناسب، یکپارچه و مستحکم فراهم آورد.

مواد و روش پژوهش

برای این پژوهش از ورق‌های فولاد زنگ نزن ۳۱۶L و مس خالص استفاده گردیده است که در جدول (۱) ترکیب شیمیایی آن‌ها آورده شده است. ابعاد این ورق‌ها ۳۵×۲۰ میلی‌متر با ضخامت ۰.۶ میلی‌متر و ۵۰ میکرون به ترتیب ورق ۳۱۶ و مس می‌باشد. این ورق‌ها به صورت یکی در میان کنارهم به شکل دو نوع نمونه یکی به صورت دو لایه فولاد ۳۱۶ و یک ورق مسی و دیگری بصورت پنج لایه فولاد ۳۱۶ و چهار لایه مسی داخل فیکسچر قرار گرفتند. سپس در کوره گذاشته شدند. آزمایش در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد، مدت زمان نگهداری ۳۰ دقیقه، فشار ۵ مگاپاسکال و خلا 10^{-4} و اتمسفر هوا انجام گردید. سپس نمونه‌ها پس از برش مانت و متالوگرافی و اچ شدند و تصاویر نوری از ریز ساختار درز اتصال گرفته شد. همچنین

12-J. K. K. B. Y. J. a. C. Y. K. Hye Sung Na, "Effect of Brazing Conditions on the Microstructure and Mechanical Properties of Duplex Stainless Steels to Cr-Cu Alloy with Cu-Base Insert Metal," METALS AND MATERIALS International, vol. 13, no. 6, pp. 511-515, 2007.

13-H. Z. C. G. Y. L. X. R. Weiwei Zhu, "Wetting and brazing characteristic of high nitrogen austenitic stainless steel and 316L austenitic stainless steel by Ag-Cu filler," elsevier, vol. 166, pp. 97-106, 2019.

14-K. L. C. M. E. K. K. B. J. J. P. H. D. P. B. a. M. F. H. Armen Kvrnan, "Microgalvanic Corrosion Behavior of Cu-Ag Active Braze Alloys Investigated with SKPFM," metals, pp. 1-17, 2016.

15-م. ق. و. ا. ب. مصطفی، "بررسی پارامترهای بریزینگ جهت بازسازی سطوح تخریب شده آلیاژهای دما بالا،" سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی، 10، 2006.

16-G. H. M. U. o. P. F. S. P. Neil Birks, Introduction to the High Temperature Oxidation of Metals, Pittsburgh: Cambridge University Press, 2006.

double-lap joints in ultra-high and low strength steels for sandwich panel applications," Materials Today: Proceedings, vol. 6, no. 6, p. 6, 2019.

5-J. L. G. Jun Cao, "Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls," compositesa, vol. 15, no. 15, p. 15, 2004.

6-V. X. D. S. B. P. P. J. a. G. J. R. T. Venkateswaran, "Brazing of Martensitic Stainless Steel to Copper Using Electroplated Copper and Silver Coatings," Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 11, no. 11, p. 11, 2019.

7-A. K. J. S. K. M. S. R. N. S. S. Swathi Kiranmayee, "Microstructural Characterisation of Copper-Stainless Steel brazed joint with Copper based filler metal," Materials Science, vol. 710, pp. 650-655, 2012.

8-J. E. Hesselgreaves, Compact Heat Exchangers: Selection, Design and Operation, Pergamon Press, oxford, 2001.

9-R. E. M. M. V. G. M. G. M. Denis E. Clark, "Diffusion-Welded Microchannel Heat Exchanger for Industrial Processes," Journal of Thermal Science and Engineering Applications, vol. 5, no. 011009-4, p. 12, 2013.

10-J. W. & R. G. Matthew Way, "Brazing filler metals," International Materials Reviews, pp. 1-30, 2019.

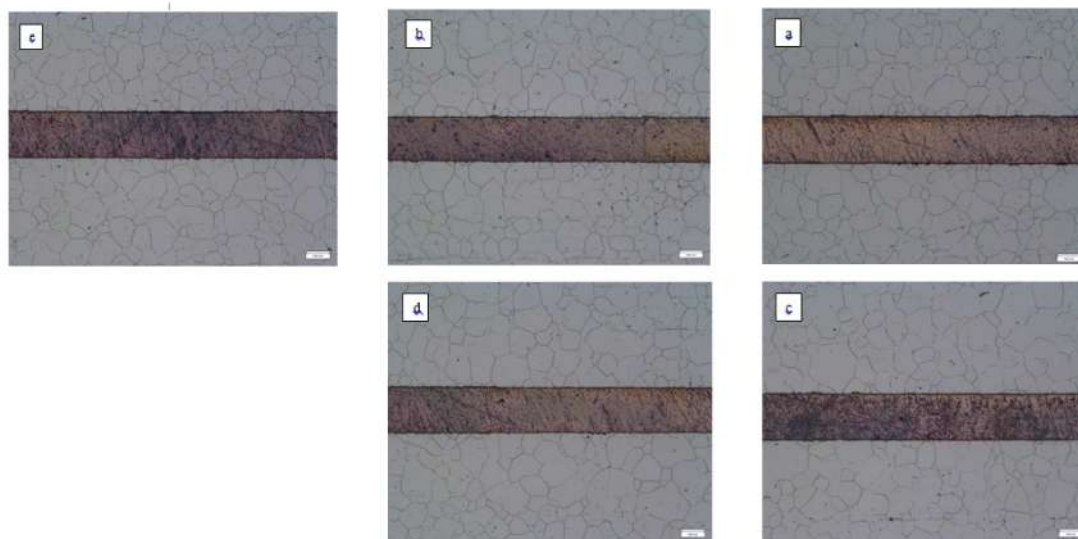
11-س. م. میرقربانی، "بریزینگ،" علم شناخت فلزات، ایران، ۱۳۹۵.

پی نوشت

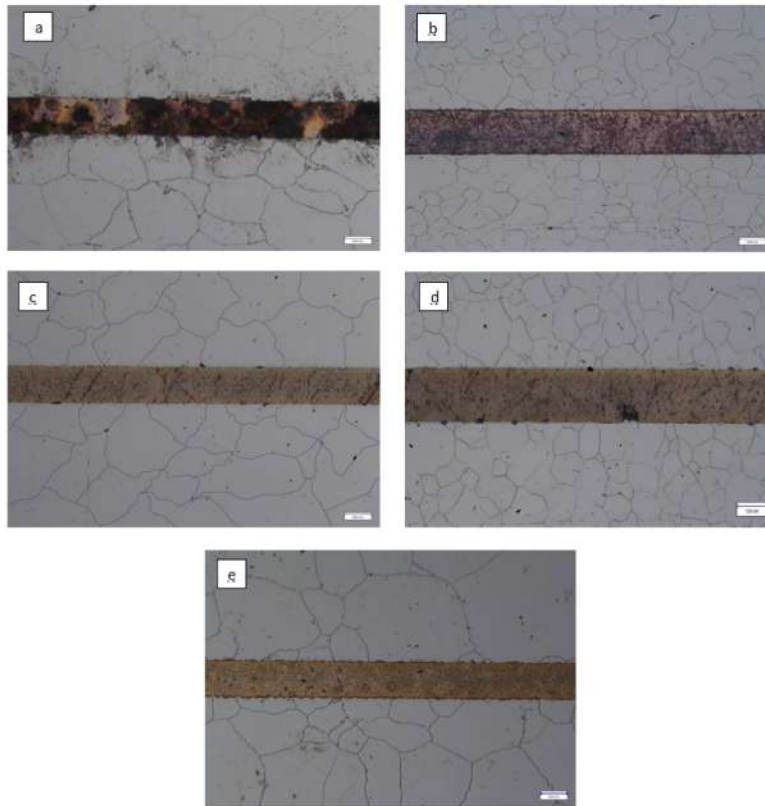
- 1-کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد
- 2-دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد ۳۱۶L و مس

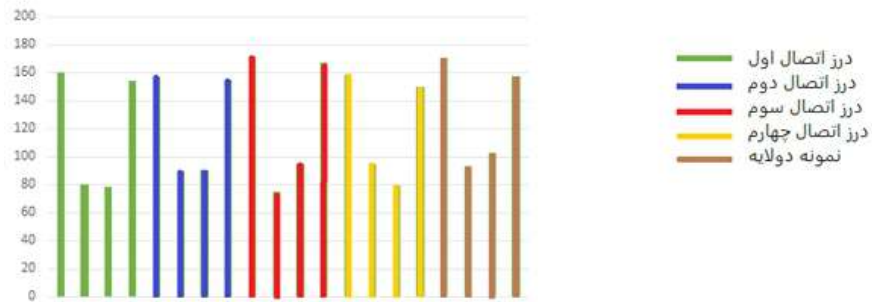
Cu	Fe	Mo	Ni	Cr	Si	S	P	Mn	C	درصد عناصر
-	Base	۲.۵	۱۳.۲	۱۶.۷	۱	۰.۰۲	۰.۰۲	۲	۰.۰۳	فولاد 316L
۹۹.۹۹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	مس



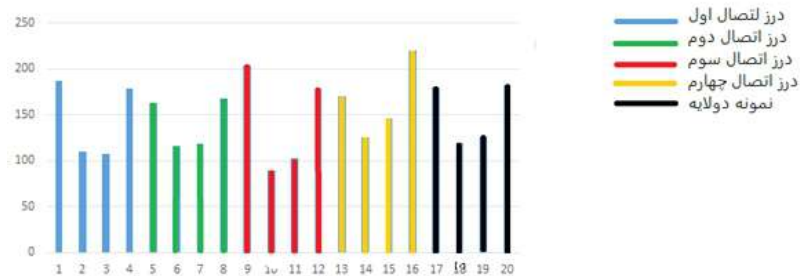
شکل ۱- تصاویر نوری درزهای اتصال (a,b,c,d) درزهای اتصال اول تا چهارم) نمونه ۵ لایه و e نمونه دولایه-اتمسفر خلا ۴-۱-۱۰^{-۴} -بزرگنمایی ۲۰۰برابر



شکل ۲- تصاویر نوری درزهای اتصال (a,b,c,d) درزهای اتصال اول تا چهارم) نمونه ۵ لایه و e- نمونه دولایه- اتمسفر هوا- بزرگنمایی ۲۰۰ برابر



شکل ۳- نمودار ریزسختی نمونه‌های تحت اتمسفر خلا 10^{-4} بر حسب ویکرز



شکل ۴- نمودار ریزسختی نمونه‌های تحت اتمسفر هوا بر حسب ویکرز

تأثیر دما بر ریز ساختار اتصال نفوذی چند لایه فولاد زنگ نزن

مهیار مهران^۱، بهروز بیدختی^۲

چکیده

اتصال نفوذی یک روش اتصال حالت جامد است که در آن دو ماده تحت فشار و در دمایی زیر نقطه ذوب مواد، اتصال برقرار می کنند. چندین تکنیک برای اتصال صفحات فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در مبدل های حرارتی به کار برده شده است ولی به دلیل انسداد معابر با مواد پرکننده فشرده شده، این فرایندها خیلی موفق نبوده اند. از این رو اتصال نفوذی برای اتصال صفحات کاملاً امیدوار کننده است. با کنترل شرایط مورد نیاز اتصال نفوذی از جمله دما، زمان، فشار و میزان خلا به اتصالی یکنواخت رسیدیم و بررسی تصاویر ریز ساختار محل اتصال، اتصالی مناسب و بدون ناپیوستگی را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: اتصال نفوذی، فولاد زنگ نزن، چند لایه، ریز ساختار، دما، فشار، خلا.

مقدمه

اتصال نفوذی یک روش اتصال حالت جامد است که در آن دو ماده مشابه یا غیر مشابه تحت فشار و در دمایی زیر نقطه ذوب مواد اتصال برقرار می کنند. برای به دست آوردن یک اتصال مناسب باید سطوح اتصال تا حد ممکن صاف باشند تا سطح تماس بیشتر باشد و مسیرهای نفوذ اتمی افزایش یابد. از آن جا که هیچ سطحی کاملاً مسطح نیست، قطعه کار باید از طریق اعمال بار به -طور موضعی تغییر شکل پلاستیک دهد.

مبدل های حرارتی از اجزای حیاتی هر سیستم برودتی هستند. چندین تکنیک از جمله اتصال با چسب [۱]، لحیمکاری [۲] و غیره برای ساخت مبدل حرارتی ماتریسی به کار برده شده است ولی به دلیل انسداد معابر با مواد پرکننده فشرده شده، این فرایندها خیلی موفق نبوده اند. از این رو اتصال نفوذی برای اتصال صفحات کاملاً امیدوار کننده است و یک تکنیک جذاب در زمینه ساخت مبدل های حرارتی ماتریسی است [۳].

فرایند جوشکاری نفوذی شامل یک سیکل حرارتی است که رشد دانه را امکان پذیر می سازد، از این طریق امکان اتصال بدون لایه واسطه بین صفحات را فراهم می کند، که علاوه بر اجتناب از خوردگی سلول ها، امکان اتصالی با استحکام ماده پایه و توانایی مهار فشار بسیار بالا را دارد، همانطور که توسط هسل گریوز توضیح داده شده است [۴]. فرایند جوشکاری حالت جامد که در آن سطوح با اعمال فشار و درجه حرارت بالا به هم متصل می شوند. این فرایند شامل تغییر شکل ماکروسکوپی یا حرکت نسبی قطعات نمی شود و یک

فلز پرکننده جامد ممکن است استفاده شود یا نشود [۵].

از آن جایی که این نوع اتصال به نفوذ عناصر وابسته هست، برای تسهیل امر نفوذ و رسیدن به اتصالی مناسب، ملزم به فراهم نمودن شرایط نفوذی مناسب خواهیم بود. ترمودینامیک ماده یا مواد درگیر، مشخص کننده دما و زمان لازم برای ایجاد یک اتصال نفوذی است. جنبه مهم این امر، رفتار ماده با توجه به اکسیدهای خود آن است. برخی عناصر مانند مس و تیتانیوم برای اکسید خود از حلالیت بالایی برخوردار هستند و به همین دلیل اتصال نفوذی نسبتاً آسانی را دارند. این موضوع برای اکسیدهای کروم صحیح نیست. اکسیدهای کروم، لایه محافظتی بسیاری از آلیاژهای مورد علاقه برای کار در شرایطی با درجه حرارت بالا، مانند فولاد زنگ نزن و بسیاری از آلیاژهای نیکل که به طور معمول دارای محتوای کروم حدود ۲۰٪ هستند. به جز در سیستم های خلاء بالا بسیار پیشرفته، جلوگیری از تشکیل یک لایه نازک اکسید کروم در هوا در دمای محیط غیرممکن است و با نزدیک شدن به دمای اتصال نفوذی، کوره با اتمسفر کنترل شده می تواند به این فرایند سرعت ببخشد.

درجه حرارت انتخابی به طور معمول به دمای ذوب ماده بستگی دارد، در همان محدوده دمایی تبلور مجدد که حدود ۰/۷-۰/۶ دمای نقطه ذوب در مقیاس دمای مطلق است، اتصال نفوذی انجام می شود. با این حال، در مورد آلیاژهای درجه حرارت بالا، ممکن است دما به دلیل افزایش مقاومت خزش این مواد، به اندازه ۰/۸-۰/۹ دمای نقطه ذوب باشد. برای ایجاد تماسی نزدیک میان اسپریت های مخالف (پستی و بلندی های سطوح در تماس)، فشار مشخصی نیاز است. حد بالایی برای این فشار، جایی است که خزش ماکروسکوپی رخ می دهد که می تواند نسبتاً دقیق از منحنی های خزش ایجاد شده برای مواد مورد نظر پیش بینی شود. اعمال فشار مناسب می تواند برای آلیاژهای درجه حرارت بالا بسیار دشوار باشد؛ زیرا به طور کلی برای مقاومت در درجه حرارت بالا طراحی شده اند. به عنوان مثال، فولادهای زنگ نزن آستنیتی به ندرت در سرویس های بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد استفاده می شوند، اما معمولاً در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد برای ۱۰۰۰ دقیقه به هم اتصال داده می شوند [۶]. این کافی است زیرا درجه حرارت اتصال به طور قابل توجهی بالاتر از دماهای سطح است و تنش نسبتاً کم باعث ایجاد تماس کامل می شود.

طبق مدل حذف منافذ تهیه شده توسط هیل و والاچ [۷] که یک روش جامع در پیش بینی درصد سطح اتصال داده شده، برای یک سطح پایه شش مکانیسم برای بسته شدن حفرات ارائه می دهد.

(1) $T=c \times D \times F$
 که T میزان گشتاور، c ثابت وابسته به اصطکاک رزوه پیچ که برای،
 D قطر پیچ و F نیرو مورد نیاز است. در اینجا با توجه به اینکه
 پیچ های انتخابی، پیچ ساده فولادی بدون هیچ پوششی هستند،
 c برابر ۰٫۲ است، چون پیچ M10 است پس D برابر ۱۰ در نظر
 می گیریم. مطابق فرمول (۲):

(2) $P=F/A$
 که P تنش اعمالی، F نیروی اعمالی، A مساحت سطح است. با توجه
 به اینکه مساحت سطح نمونه 35×20 میلیمتر مربع و تنش اعمالی
 مورد نظر ۱۰ مگاپاسکال است میزان ۷۰۰۰ نیوتن نیاز داریم تا به
 سطح نمونه ها ۱۰ نیوتن تنش اعمال شود. از آنجایی که دو تا پیچ
 داریم پس برای هر پیچ میزان ۳۵۰۰ نیوتن نیرو لازم داریم. پس
 مقدار F فرمول (۲) را 3500 قرار داده و میزان گشتاور مورد نیاز
 ۷ نیوتن بر متر یا ۷۰۰ نیوتن بر سانتی متر خواهد بود. پس میزان
 ۷۰۰ نیوتن بر متر گشتاور را با دستگاه تورک متر به هر پیچ اعمال
 شد.

پس از قرار دادن نمونه ها داخل فیکسچر، مجموعه در دو دما
 ۱۰۵۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد و هر دو در زمان یکسان ۲ ساعت و
 تنش اعمالی ۱۰ مگاپاسکال درون کوره قرار گرفتند. پس از اتمام
 سیکل حرارتی، نمونه ها تا رسیدن به دمای محیط داخل کوره سرد
 شدند. سپس به منظور بررسی ریزساختار، نمونه ها با استفاده از
 وایرکات برش داده شدند و داخل مانت رسانا قرار گرفتند و سپس
 نمونه ها تا سنباده گریت ۱۰۰۰ سنباده زده و پس از آن پولیش
 شدند. سپس به منظور مشاهده ریزساختار، نمونه ها با استفاده از
 دستگاه الکترواچ در محلول ۱۰ درصد اگزالیک اسید به مدت حدوداً
 ۴۰ ثانیه با ولتاژ ۶ ولت، اچ شدند. از میکروسکوپ نوری برای مشاهده
 ریزساختار استفاده شد.

نتایج و بحث

هدف این پژوهش بررسی تاثیر دما بر ریز ساختار اتصال می باشد
 پس به بررسی تغییرات در هر دما می پردازیم.

- نمونه قرار گرفته در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد، زمان
 ۲ ساعت و فشار ۱۰ مگاپاسکال

اولین دمای انتخابی، دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد می باشد.
 دو ساعت در دمای مذکور و در فشار ۱۰ مگاپاسکال نمونه نگهداری
 می شود. در شکل (۲) و (۳) ریزساختار محل اتصال آورده شده است.
 همانطور که به وضوح مشخص است، ورق های فولادی با نفوذ در
 یکدیگر با هم اتصال برقرار کرده اند. نقاط مشکلی رنگ در محل
 اتصال، نقاطی هستند که اتصال ایجاد نکردند که این موضوع چند
 دلیل دارد؛ از جمله آمادگی اولیه سطح مناسب نبوده و مقداری خط و
 خش بر روی نمونه وجود داشته است. با توجه به اینکه فرایند در کوره
 خلا انجام شده است ولی در صورت وجود آلودگی قبلی یا مشکلات
 کوره، خلا دستگاه ممکن است افت کرده و مقداری فاز اکسیدی
 در محل اتصال تشکیل شده باشد. دلیل دیگر، فشار اعمالی کم است
 که صفحات نتوانستند به اندازه کافی به هم نزدیک شوند و با

هنگامی که صفحات در کنار هم قرار گرفتند، فرض می شود که
 سطوح، تشکیل حفره های بیضوی طولانی (منافذ) بین سطوح اتصال
 می دهند. مکانیسم های بسته شدن منافذ عبارتند از:

- تغییر شکل پلاستیک اسپریت های اولیه در دمای اتصال
 - نفوذ سطحی، نفوذ حجمی اتم ها از سطوح منافذ به یک فصل
 مشترک رو به رشد بین حفره های بیضوی
 - نفوذ مرز دانه ای و حجمی از فصل مشترک رو به رشد برای پر کردن
 منافذ

- خزش وابسته به زمان، تغییر شکل فصل مشترک را فراهم
 می کند.

انرژی محرک مکانیسم های نفوذ، اختلاف در پتانسیل شیمیایی مواد
 در مجاورت منافذ و همچنین در داخل منافذ به دلیل تفاوت در
 انحنای اطراف منافذ می باشد.

پژوهش پیش رو با هدف بررسی تاثیر دما بر ریز ساختار اتصال
 چندلایه فولاد زنگ نزن انجام شده است. در جاهایی که استفاده از
 فلز پرکننده مناسب نبوده و یا ایجاد مشکلاتی از جمله خوردگی
 فلزات ناهمجنس می کند، استفاده از این روش اتصال بسیار مناسب
 بوده و توسعه بیشتر این روش اتصال و رسیدن به پارامترهای تعیین
 کننده مناسب از ارزش بالایی برخوردار خواهد بود.

مواد و روش پژوهش

از فولاد زنگ نزن ۳۱۶ که در کنار قیمت مناسب، از مقاومت
 خوردگی خوبی برخوردار است با ضخامت ۰/۶ میلی متر با ابعاد
 35×20 میلی متر استفاده شد. به منظور نگهداری نمونه تحت فشار
 مناسب از فولاد AISI 310 (EN 1.4841) به عنوان فولاد فیکسچر
 با ابعاد 70×20 میلی متر و ارتفاع ۲۰ میلی متر استفاده شده است،
 چرا که مقاومت خوبی در دمای انتخابی آزمایش ها دارد. از کوره
 تحت خلا 10^{-5} تور با نرخ گرمایش و سرمایش حدود ۱۰ درجه
 سانتی گراد بر دقیقه استفاده شده است. به منظور جلوگیری از آسیب
 رسیدن به بدنه کوره از بوته ای از جنس آلومینا استفاده شده است. به
 منظور آماده سازی سطح، سنباده زده و پولیش شده و در انتها
 نمونه ها با آب و صابون، الکل و آب مقطر شستشو داده شده و در انتها
 با استون در دستگاه اولتراسونیک قرار گرفتند تا نمونه ها عاری از
 هرگونه چربی و آلودگی باشند. ابتدا بر اساس نمودار فازی آهن -
 کربن نیکل، درجه حرارت اتصال بیشتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد
 است که به طور معمول به منظور تثبیت فاز آستنیتی فولاد
 زنگ نزن سری ۳۰۰ و جلوگیری از شکل گیری هرگونه فاز مضر
 انتخاب می شود. در ادامه نمونه ها مطابق شکل (۱) داخل فیکسچر
 تعبیه شده قرار گرفته و با پیچ و مهره بر روی هم ثابت نگه داشته
 می شوند. به منظور کنترل میزان فشار اعمالی بر روی نمونه ها،
 پیچ ها با تورک متر دیجیتال بسته شدند. تنش اعمالی
 10 مگاپاسکال انتخاب شده و برای تمام نمونه ها ثابت فرض
 می شود. فرمول (۱) تبدیل میزان تنش اعمالی به نمونه به گشتاور را
 محاسبه می کند به شرح زیر:

وجود هر گونه آلودگی در کوره و یا نمونه ها کیفیت اتصال پایین خواهد آمد و فاز های اکسیدی و مضر در محل اتصال تشکیل می شود. از آنجایی که در نمونه دوم بیشتر از ۷۰ درصد اتصال برقرار شده است، می توان پیشبینی کرد که استحکام اتصال در این نمونه تقریباً نزدیک به استحکام اتصال فلز پایه خواهد بود که ارزش این روش اتصال را بیشتر مشخص می کند.

منابع

- 1-G.A. Vonk, *Adv. Cryog. Eng.*, vol 13, pp. 282-589, 1968
- 2-N.S. Zablotskys, "Matrix Heat Exchangers in Cryogenic Engineering," *Cent. Chem. Netmash. Moscow. USSR*, 1980. (in Russian).
- 3-J.Krishnan, K.Bhanumurthy, P.S.Gawde, J.Derose, G.B.Kale, G.Srikrushnamurthy, "Manufacture of a matrix heat exchanger by diffusion bonding," *Journal of materials Processing Technology*, Vol 66, pp. 85-89, 1997.
- 4-Hesselgreaves, J. E., 2001, *Compact Heat Exchangers: Selection, Design and Operation*, Pergamon Press, Oxford, UK.
- 5-American Welding Society (AWS), 1969, "AWS A3.0 Terms and Definitions," AWS Report No. 1910.251.
- 6-Miller, T., 2012, personal communication, Oregon State University.
- 7-A. Hill and E. R. Wallach, "Modelling solid-state diffusion bonding," *Acta Metallurgica*, vol. 37, no. 9, pp. 2425-2437, 1989.

پی نوشت

گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

هم اتصال برقرار کنند. در نهایت صفحات کمتر از ۴۰ درصد با هم اتصال برقرار کرده اند.

-نمونه قرار گرفته در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد، زمان دو ساعت و فشار ۱۰ مگاپاسکال

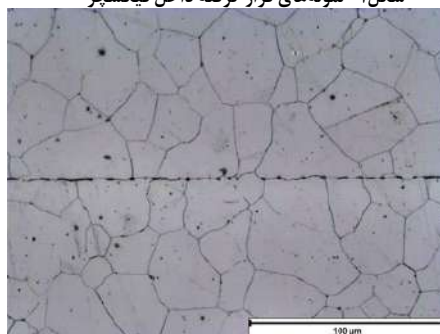
نمونه ها در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت و در فشار ۱۰ مگاپاسکال نگهداری شدند. در نهایت با دو روش الکترواچ در محلول اگزالیک اسید و روش اچ در محلول $HNO_3:HCL(1:3)$ ریزساختار نمونه مشخص شد. دلیل اینکه در این نمونه از دو نوع روش حکاکی استفاده شد، اچ نامنظم و ناواضح با استفاده از الکترواچ به تنهایی بود. همانطور که در شکل (۴) مشخص است دمای بالاتر باعث نفوذ بیشتر اتم ها و اتصال یکنواخت تری در سطح تماس صفحات شده است. از طرفی به وضوح مشخص است که با فراهم بودن دما و زمان لازم، رشد دانه بیشتری در این نمونه رخ داده است و اندازه دانه ها افزایش یافته است. در نهایت بالای ۷۰ درصد سطح، اتصال برقرار شده است که مناسب می باشد.

نتیجه گیری

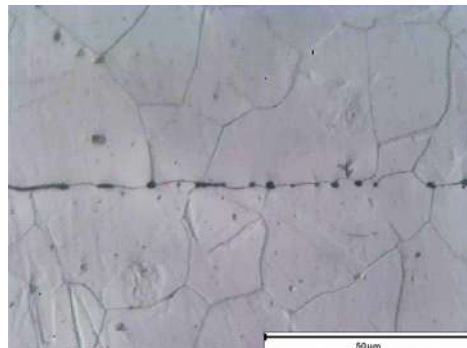
در پژوهش انجام شده نمونه ها در دو شرایط دمایی مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی خط اتصال صفحات به هم اتصال داده شده به وضوح موید تاثیر مثبت دمای بیشتر بر میزان اتصال انجام شده، یکنواختی و کیفیت آن است. از طرفی اهمیت کیفیت سطوح در تماس، عامل بسیار مهمی در کیفیت این نوع روش اتصال می باشد. در صورت



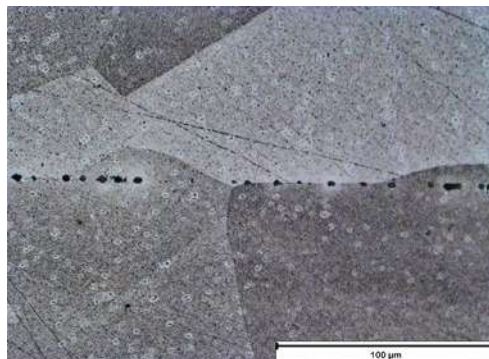
شکل ۱- نمونه های قرار گرفته داخل فیکسچر



شکل ۲- تصویر محل اتصال نمونه قرار گرفته در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت با فشار ۱۰ مگاپاسکال با بزرگنمایی ۵۰۰



شکل ۳- تصویر محل اتصال نمونه قرار گرفته در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت با فشار ۱۰ مگاپاسکال با بزرگنمایی ۱۰۰۰



شکل ۴- تصویر محل اتصال نمونه قرار گرفته در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت با فشار ۱۰ مگاپاسکال با بزرگنمایی ۵۰۰

