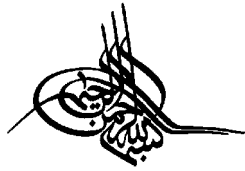


بهشتکاری

فصلنامه انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران
شماره ۱۱۵ - تابستان ۱۴۰۲



مقام اول بخش عکاسی یازدهمین مسابقه گرافیک و عکاسی صنعت جوش و بازرسی
جناب آقای مهندس فرزاد بهمنی



- 1 ارزیابی توانی لایه گذاری بر کار آبی روکش سطحی ایجاد شده بر چدن
نشکن توسط فرایند SMAW، فهیمه مرتضوی - مسعود مصلاهی پور - مجید
فاخری - مهدی راستی - محمد بصیری
- 7 تعمیر دایمی ورق آسیب دیده بدنه تجهیز با استفاده از وصله، مهندس
عبدالوهاب ادب آوازه
- 11 تحلیل و بررسی اعوجاج و تنش های پسماند در لایه تولید شده از جنس
آلیاژ Ti6Al4V به روش ذوب لیزری انتخابی، سعید چراغ سحر کیاسرای -
اسلام رنجبر نوده - سید احسان میر صالحی
- 19 آزمون های غیر مخرب در صنعت خودروسازی، حسن غلام مگوویی - مسعود
مصلاهی پور
- 29 جوشکاری با خلوص بالا برای کاربردهای بهداشتی، مهندس احمد رضا وکیلی
- 35 آشنایی با الزامات استاندارد ISO 3834 الزامات کیفیتی در جوشکاری ذوبی
مواد فلزی - بخش جامع - قسمت ششم، مهندس افشین خیام
- 39 اثر سرعت چرخشی و پیشروی پین و افزودن ذرات پودر آهن بر
ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم خالص تجاری به روش
جوشکاری اصطکاکی - هم زنی، سیامک فرهادی - حامد ثابت
- 47 بررسی اثر زمان و دمای پیشگرم روی خواص مکانیکی منطقه متأثر از
حرارت (HAZ) جوش، اتصال آلیاژ (Mo40) 1.7225 به St37، محمدرضا
تعویفی - آیدا اسعدی زهرائی - محسن قنبری حقیقی خلخالی - حامد ثابت - بنفشه
کاربخش راوری

انجمن جوشکاری و آزمایش های غیر مخرب ایران
موسسه مرجع ملی در زمینه تکنولوژی جوشکاری و
آزمایش های غیر مخرب در جمهوری اسلامی ایران

مدیر مسئول: مهندس عبدالوهاب ادب آوازه

زیر نظر شورای نویسندگان

مسئول اجرایی: کمیته انتشارات

مدیر اجرایی و گرافیک: دکتر نازیلا ادب آوازه

نشانی دبیرخانه انجمن:

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

تلفن: 03132240325 فاکس: 03132231765

پست الکترونیک:

Email: info@iwnt.com

فصلنامه جوشکاری نشریه ای در زمینه موضوعات و
مسائل مرتبط با جوشکاری و آزمایش های غیر مخرب
است.

فصلنامه در ویرایش مقالات رسیده آزاد است

نقل نوشته ها با ذکر ماخذ بلامانع است.





ارزیابی توالی لایه گذاری بر کار آیی روکش سطحی ایجاد شده بر چدن نشکن با فرایند SMAW

فهیمة مر تظوی^۱، مسعود مصلائی پور^۲، مجید فاخری^۳، مهدی راستی^۴، محمد بصیری^۵

چکیده

برای افزایش سختی و مقاومت به سایش و همچنین ایجاد روکش عاری از ترک در ناحیه فصل مشترک روکش/زیرلایه چدن نشکن، دو لایه روکش با فرایند جوشکاری قوس دستی و با استفاده از الکترودهای E-NiCr، E-316L و E-HS60V بر زیرلایه چدن نشکن ایجاد و تاثیر ترکیب شیمیایی و توالی لایه های روکش بر ریزساختار و کیفیت سطحی روکش ها مورد پژوهش واقع شد. مطالعات ریزساختاری و آنالیز فازی XRD نشان داد که استفاده از الکترودهای E-316L و E-NiCr موجب ایجاد ساختاری آستنیتی در لایه روکش می شود، همچنین استفاده از الکترودهای E-HS60V موجب ایجاد کاربیدهای غنی از کروم در لایه روکش می شود. آزمون ریزسختی آشکار نمود که روکش ایجاد شده بوسیله لایه اول E-316L و لایه دوم E-HS60V بالاترین سختی و کیفیت روکش (عاری از ترک) را ایجاد می نماید که نظر به اقتصاد تر بودن الکترودهای E-316L نسبت به E-NiCr، توالی مذکور لایه گذاری برای تعمیر و روکش کاری چدن های نشکن از جنبه کاربردی و صنعتی حائز اهمیت می باشد.

کلمات کلیدی: روکش جوشی؛ چدن نشکن؛ SMAW؛ E-316L؛ E-HS60V؛ E-NiCr؛ ریزسختی؛ ریزساختار.

1- مقدمه

چدن نشکن یا چدن با گرافیت کروی خانواده ای از آلیاژهای آهنی می باشد که به دلیل جذابیت های اقتصادی، رفتار سایشی عالی و مقاومت به خوردگی مطلوب به طور گسترده ای در صنعت خودروسازی، ساخت ماشین آلات صنعتی، ظروف آشپزخانه و غیره استفاده می شود [۱]. شبکه کریستالی هگزاگونال فشرده گرافیت و پیوندهای ضعیف و اندروالس در بین لایه های گرافیتی امکان لغزش راحت این صفحات و در نتیجه ایجاد قابلیت روانکاری گرافیت را فراهم می کند؛ اما در برخی از شرایط کاری مانند ضربه، بارهای سایشی و بارگذاری شدید، ماهیت نرم گرافیت موجب تشدید تخریب چدن های نشکن می شود [۲ و ۳]. از راهکارهای صنعتی برای بهبود کارائی و عمر مفید قطعات مهندسی می توان به بهبود کیفیت و خصوصیات سطحی قطعات مهندسی اشاره نمود. در این راستا

تحقیقات زیادی در خصوص بهبود کیفیت سطحی قطعات صنعتی در دست انجام می باشد [۱، ۲] و C.Lin و همکاران با ایجاد روکش سطحی با ضخامت 375mm/ با فرایند جوشکاری لیزر و فلز پرکن غنی از نیکل (با ترکیب شیمیایی فلز پرکن Ni-9Mo-12Cr-4Nb-4Ta-3Fe بر زیرلایه چدن نشکن مقاومت به سایش نمونه روکش کاری را در حدود دو برابر افزایش دادند [۴] و همکاران گزارش نمودند که روکش کاری چدن نشکن با استفاده از لیزر و پودر C-B-W-Cr موجب ایجاد لایه ای با زمینه آستنیت حاوی مارتنزیت و گرافیت حل نشده به همراه مقادیر اندکی لدبوریت و کاربید سخت در سطح زیرلایه شده که ریزسختی سطحی را از ۵۰۰HV به مقادیر بیشتر از ۱۲۰۰ HV افزایش می دهد. همچنین بررسی رفتار سایشی نشان داد که مقاومت سایشی لایه روکش در حدود ۱/۶ برابر زیرلایه چدنی افزایش

می‌باید [۵].

از مشکلات اصلی روکش کاری چدن‌های نشکن می‌توان به حساسیت بالای به ترکیدگی در ناحیه روکش اشاره نمود. کربن بالای چدن‌های نشکن، موجب حساسیت فلزجوش به ترکیدگی و تردی می‌شود. شکنندگی و تردی لایه روکش همراه با تنش‌های جوشی و همچنین تنش‌های حین سرویس موجب شکست و در مواردی جداشدن لایه روکش از زیرلایه چدنی می‌شود. به منظور جلوگیری از این مشکل، روکش چندلایه بر چدن‌ها مطرح گردید [۶، ۷]. jian liu و همکاران با روکش کاری چندلایه‌ای از پودرهای آلیاژ **Fe-Cr** (با ترکیب **Fe-5.2Ni-13.5Cr-0.95Si-0.68Mn-1.33B-1.56Mo**) به عنوان ماده روکش و استفاده از فرایند روکش کاری لیزر، روکش سه لایه بر چدن نشکن ایجاد و نشان دادند که استفاده از روکش چندلایه موجب جلوگیری از ترکیدگی ناشی از تشکیل سمانیت و مارتنزیت در ناحیه فصل مشترک روکش/زیرلایه می‌شود. همچنین روکش مذکور موجب افزایش مقاومت در برابر سایش می‌شود [۱]. تکنیک‌های مختلف جوشکاری و اتصال دهی را می‌توان جزء تفکیک‌ناپذیر از فرایند تولید و تعمیر قطعات و سازه‌های صنعتی لحاظ نمود. روکش کاری و بهسازی سطحی چدن با فرایندهای مختلف جوشکاری از قبیل جوشکاری پلاسما [۸]، جوشکاری پرتو الکترونی [۹]، جوشکاری زیرپودری [۱۰]، جوشکاری قوس تنگستن [۱۱] و جوشکاری قوس دستی [۱۲، ۱۳] انجام شده است. فرایند **SMAW** به دلیل اقتصادی بودن، سهولت اجرا، قابلیت جابجایی، تنوع الکترود و غیره در ساخت و تعمیرات سازه‌های فلزی و دستگاه‌های صنعتی همچنین روکش کاری بسیار مورد توجه می‌باشد [۱۴]. در این فرایند با استفاده از الکترود روکش‌دار و منبع قدرت جریان ثابت جوشکاری انجام می‌شود.

در پژوهش حاضر روکشکاری چندلایه با استفاده از فرایند **SMAW** برای لایه‌گذاری بر چدن نشکن استفاده شد. بدین منظور از الکترودهای **E-NiCr**، **E-HS60V** و **E-316L** استفاده و تأثیر توالی لایه‌گذاری بر کیفیت، ریزساختار و سختی روکش ایجاد شده مورد مطالعه و بررسی واقع شد.

2- مواد و روش پژوهش

2-1- ریخته‌گری و آماده‌سازی نمونه‌ها

چدن نشکن زیرلایه با استفاده از کوره القایی فرکانس متوسط به صورت استوانه‌هایی به قطر **80 mm** و ارتفاع **150 mm** ریخته‌گری شد. عملیات کروی‌سازی چدن با فرو آلیاژسیلیسیم منیزیم (**Fe:49%-Si:45%-Mg:6%**) به روش ساندوچی در پاتیل و جوانه‌زایی با استفاده از فروسیلیسیم (**Fe:80%-Si:20%**) انجام شد. آنالیز شیمیایی نمونه ریخته‌گری شده در جدول (۱) ارائه شده است. نمونه‌های مورد نظر برای روکش کاری به ضخامت **10mm** استوانه‌های ریخته‌گری شده برش و بعد از سنگ‌زدن، پولیش کاری و چربی‌زدایی در استون مورد عملیات روکش کاری واقع شدند.

2-2- جزئیات جوشکاری

عملیات روکش کاری با جوشکاری قوسی دستی با استفاده از

الکترودهای **E-NiCr**، **E-316L** و **E-HS60V** انجام شد. در جدول (۲) ترکیب شیمیایی این الکترودها ارائه شده است. برای کاهش حساسیت زیرلایه به ترکیدگی، زیرلایه‌های آماده‌سازی در دمای **110°C** پیش‌گرم و مورد عملیات روکش کاری واقع شدند. روکش کاری در دو لایه بر سطح زیرلایه ایجاد شد. توضیح آن که لایه اول با استفاده از الکترودهای **E-316L** یا **E-NiCr** جوشکاری و در ادامه، لایه دوم با الکترود **E-HS60V** بر لایه اول جوشکاری شد. دمای بین‌پاسی 350 ± 10 انتخاب شد. قبل از جوشکاری لایه دوم، تمیزکاری گل جوش از لایه اول و کنترل دمای بین‌پاسی انجام و سپس جوشکاری لایه دوم صورت پذیرفت. جزئیات و پارامترهای جوشکاری در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی چدن نشکن زیرلایه در این پژوهش برحسب درصد وزنی (wt%)

عنصر	Fe	C	Si	Mn	Mg	P	S
مقدار	Balance	2.95	2.42	1.05	0.04	0.03	0.01

جدول ۲- ترکیب شیمیایی الکترودهای مورد استفاده در پژوهش حاضر

نام الکترود	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
F- HS60V	0.54	0.86	0.43	0.021	0.07	7.54	0.64	0.049
F-316L	0.02	0.68	1.67	0.022	0.0	19.12	2.27	12.25
E-NiCr	0.04	0.3	2	0.02	0.015	16	1.4	69

جدول ۳- پارامترهای فرایند **SMAW** مورد استفاده برای روکش کاری در پژوهش حاضر

لایه	جریان و پلاریته جوشکاری		ولتاژ جوشکاری (v)	سرعت جوشکاری (mm/s)	حرارت ورودی (kJ/mm)
	جریان (A)	پلاریته			
اول	110	DCEP	21±1	4.39±0.01	0.51±0.01
دوم	120	DCEP	21±1	4.21±0.01	0.60±0.01

در جدول (۴)، نمونه‌های روکش کاری شده و نام‌گذاری انجام شده برای آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۴- نمونه‌ها و نام‌گذاری نمونه‌های روکش کاری شده در این پژوهش

کد نمونه	توضیح نحوه روکش کاری
Ni	نمونه روکش کاری شده با یک لایه توسط الکترود E-316L
Cr	نمونه روکش کاری شده با یک لایه توسط الکترود E-NiCr
HS	نمونه روکش کاری شده با یک لایه توسط الکترود F-HS60V
Ni/HS	نمونه روکش کاری شده با دو لایه توسط الکترود E-316L و E-HS60V
Cr/HS	نمونه روکش کاری شده با دو لایه توسط الکترود E-NiCr و E-HS60V

2-3- بررسی ساختاری و فازی نمونه‌ها

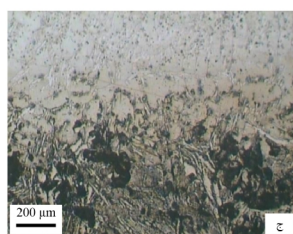
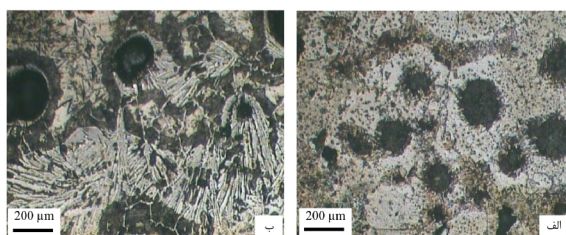
نمونه‌های متالوگرافی از مقطع عرضی قطعات روکش کاری شده برش و پس از عملیات آماده‌سازی سطحی (سنباده‌های مختلف و پولیش با امولسیون حاوی پودر آلومینای $0.2 \mu\text{m}$) با محلول اچ نایتال ۵% ($5\text{ml HNO}_3 + 95\text{ml C}_2\text{H}_5\text{OH}$) به مدت ۵sec برای بررسی زیرلایه و منطقه متأثر از حرارت اچ شدند.

برای مطالعات ریزساختاری فلز جوش از محلول اچ ماربل

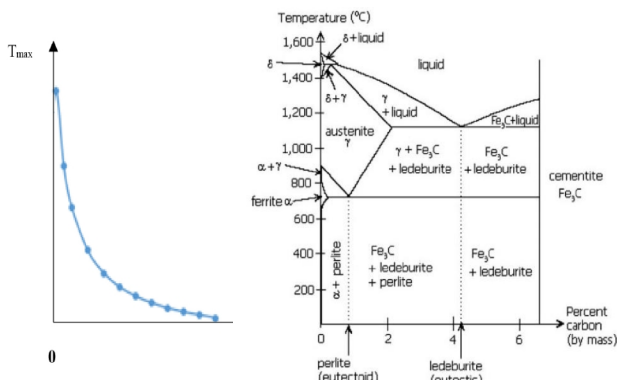
همراه با دیاگرام فازی است؛ اما کلیات تغییر در HAZ را می توان براساس دیاگرام تعادلی بیان نمود [۱۷].

با توجه به مقدار کربن در نمونه چدن زیر لایه ۳٪ و دیاگرام تعادلی Fe-C، ریزساختار HAZ از سمنتیت (Fe_3C)، لدبوریت و پرلیت تشکیل شده است؛ بدین صورت که دانه گرافیت با پرلیت و لدبوریت احاطه می گردد.

همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است ریزساختار HAZ با کاهش دمای حداکثر و در نزدیک لایه روکش از پرلیت، سمنتیت، دانه های گرافیت و لدبوریت تشکیل شده و با افزایش فاصله از لایه روکش و نزدیک به فلز پایه مقدار لدبوریت کاهش می یابد.



شکل ۲- تغییرات ریزساختار منطقه متأثر از حرارت برحسب فاصله از لایه روکش. الف- HAZ دور از لایه روکش، ب- HAZ نزدیک به لایه روکش، ج- فصل مشترک لایه روکش/زیرلایه



شکل ۳- الف- دیاگرام تعادلی Fe-C در منطقه چدن ها [۱۸]، ب- تغییرات دمای حداکثر محاسبه شده با فاصله از لایه روکش.

3-3- ریزساختار لایه روکش

در شکل (۴) تصویر ماکروسکوپی روکش ایجاد شده بر زیر لایه چدن نشکن ارائه شده است. مطابق این شکل، عمق نفوذ و در نتیجه میزان مشارکت فلز پایه یا درجه رقت (نسبت قسمت هاشور خورده به

$10gr CuSO_4 + 50ml HCl + 50ml H_2O$) و مدت زمان اچ 10sec استفاده شد. مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل Olympus و بررسی های درشت ساختاری با میکروسکوپ نوری اسبستریو مدل ZSM-1001 انجام گرفت. اندازه گیری های مختلف از قبیل عمق نفوذ و پهنای جوش، درصد کروی بودن گرافیت ها و غیره با نرم افزار آنالیزگر تصویری صورت پذیرفت، لازم به ذکر است که مقادیر گزارش شده متوسط حداقل 50 مقدار اندازه گیری شده می باشد.

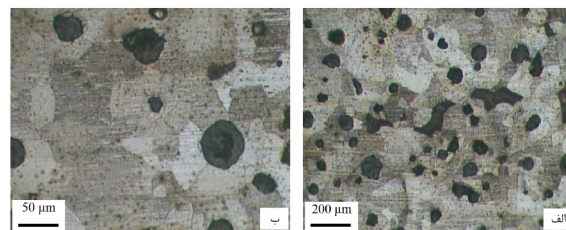
4-2- بررسی سختی

از آزمون ریزسختی برای بررسی تغییرات سختی و ترسیم پروفایل سختی در نمونه های روکش کاری شده، استفاده شد. آزمون ریزسختی با دستگاه Koopa مدل MH3 با نیروی $50 \cdot Kg.f$ و زمان نشست 10sec انجام شد و متوسط پنج سختی به عنوان سختی هر منطقه گزارش شد.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار زیرلایه

ریزساختار چدن نشکن زیر لایه در شکل (۱) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، ریزساختار زیر لایه شامل زمینه پرلیتی شامل توزیع نسبتاً یکنواخت کره های گرافیتی در آن می باشد. درصد کرویّت گرافیت بالغ بر $95 \pm 5\%$ تعیین شد که حاکی از کارآمدی عملیات کروی کردن گرافیت ها می باشد. در چدن داکتیل، کروی بودن گرافیت باعث مهار رشد ترک و در نتیجه افزایش قابلیت انعطاف پذیری و مقاومت آن در مقابل شکست می شود که مبین نام آن زیر لایه (چدن نشکن) می باشد. تشکیل گرافیت کروی عمدتاً با منیزیم و در مواردی خاص با استفاده از سریم و تلوریم انجام می گیرد [۱۵].

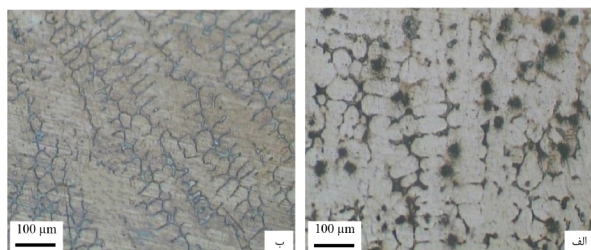


شکل ۱- ریزساختار زیرلایه چدن نشکن در دو بزرگنمایی مختلف.

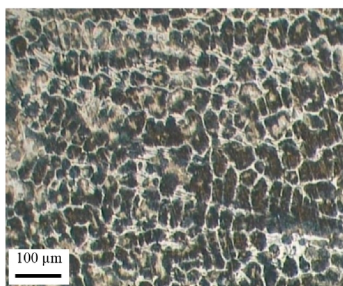
3-2- تاثیر حرارت جوشکاری بر ریزساختار زیرلایه

اختلاف دمایی در روکش و زیر لایه موجب انتقال حرارت در زیر لایه شده و تغییرات دمایی شدید در نواحی اطراف فلز جوش موجب ایجاد منطقه متأثر از حرارت (HAZ) می شود. ریزساختار HAZ برحسب فاصله از فلز روکش کاری شده در شکل ۲ ارائه شده است.

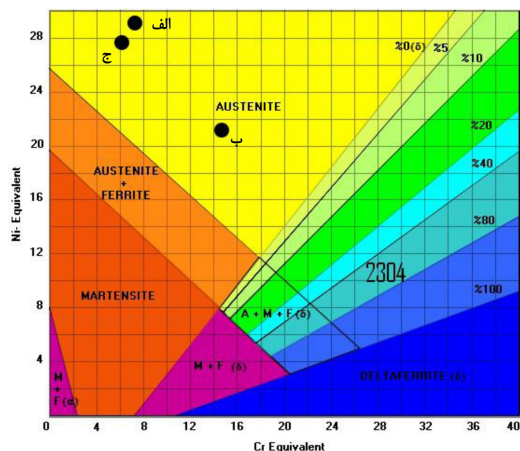
تغییرات ریزساختاری در HAZ را می توان با دیاگرام فازی Fe-C در منطقه چدن ها و کاهش دمای حداکثر با افزایش فاصله از لایه روکش (شکل ۳) توجیه نمود. لازم به ذکر است که هر چند سرعت سرد شدن در روکش کاری جوشی خیلی بیشتر از سرعت سرد شدن تعادلی



شکل ۶- تاثیر لایه‌های روکش بر ریزساختار منطقه جوش
الف - ناحیه جوش نمونه Cr ب - ناحیه جوش نمونه Cr/HS.



شکل ۷- تاثیر لایه روکش بر ریزساختار ناحیه جوش نمونه HS



شکل ۸- دیاگرام شیفلر در منطقه چدن‌ها الف - ریزساختار نمونه HS
ب - ریزساختار نمونه Ni/HS ج - ریزساختار نمونه Cr/HS [۲۱].

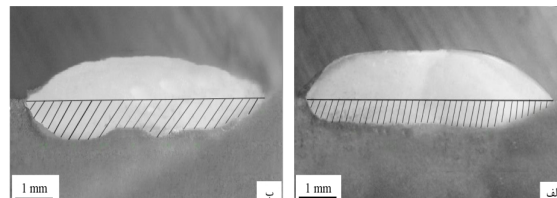
3-4- بررسی XRD روکش‌های ایجاد شده

الگوی XRD نمونه‌های HS، Ni/HS و Cr/HS در شکل (۹) نشان داده شده است. از پوشش‌های HS، Ni/HS و Cr/HS می‌توان دریافت که پوشش‌ها شامل دو فاز، که شامل کاربید کروم و کاربید آهن هستند. کاربیدهای ذکر شده در زمینه آستنیت به شکل دندریت می‌باشند.

3-5- توزیع سختی در نمونه‌های روکش کاری شده

نتایج ریزسختی در شکل (۱۰) آورده شده است. مطابق این شکل توزیع سختی با فاصله از لایه روکش، متغیر است. اولین لایه روکش جوشکاری شده در سطح بالای نمونه بیشتر تحت تأثیر تغییر ترکیب

کل ناحیه جوش) نمونه جوشکاری شده با یک الکتروود (نمونه‌های Ni، Cr و HS) 10%~ بیشتر از نمونه جوشکاری شده با دو الکتروود (نمونه‌های Ni/HS و Cr/HS) می‌باشد؛ زیرا حرارت ورودی به نمونه روکش کاری شده با یک الکتروود 100 j/mm~ بالاتر است.



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی روکش ایجاد شده بر زیرلایه چدن نشکن.
الف - روکش ایجاد شده با یک الکتروود ب - روکش ایجاد شده با دو الکتروود.

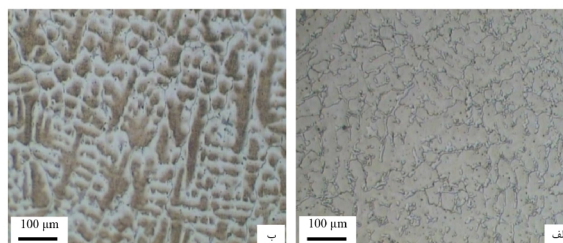
ریزساختار ناحیه جوش (WM) نمونه‌ها در شکل (۵) ارائه شده است. تغییرات ریزساختاری در WM را می‌توان با دیگرام فازی شیفلر در منطقه چدن‌ها (شکل ۸) و ترکیب شیمیایی الکتروودها (جدول ۲) بیان نمود [۲۱]. فرمول نیکل معادل و کروم معادل در معادله ۱ و ۲ آورده شده است.

$$(1) \quad \text{درصد نیکل معادل} = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn$$

$$(2) \quad \text{درصد کروم معادل} = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb$$

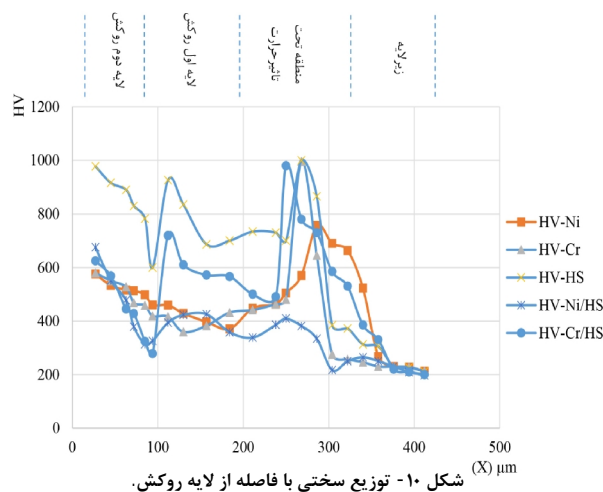
کروم (Cr) و مولیبدن (Mo) عناصر کاربیدساز قوی هستند و در ترکیب چدن‌ها تشکیل کاربیدهای پایدار می‌دهند؛ در نتیجه دو عنصر بسیار مفید در افزایش استحکام و چقرمگی چدن‌ها می‌باشند. مولیبدن علاوه بر افزایش سختی در چدن نشکن، یکنواختی در ریزساختار چدن را موجب می‌شود و بر قابلیت جوشکاری تأثیر مطلوبی دارد [۱۹، ۲۰].

با توجه به دیگرام شیفلر (شکل ۸)، سرعت بالای سرد شدن از دمای بالا (1500°C~) پس از روکش کاری جوشی منجر به تشکیل ریزساختار کاربید کروم و کاربید آهن به صورت دندریت در منطقه جوش تمام نمونه‌ها می‌شود. همین‌طور می‌توان گفت منطقه WM به دلیل مقدار زیاد گرما در طول فرایند روکش کاری جوشی دو لایه، انحلال کامل دانه‌های گرافیت را در یک زمینه آستنیت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های (۷الی ۵) دیده می‌شود با روکش کاری جوشی لایه دوم، گرافیت‌هایی که در طی فرایند روکش کاری کاملاً حل نشده بودند و از فلز پایه خود را به ناحیه جوش رساندند به طور کامل حل می‌شوند؛ همچنین کاربیدها در زمینه آستنیتی درشت تر و فاصله بین آن‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۵- تاثیر لایه‌های روکش بر ریزساختار منطقه جوش
الف - ناحیه جوش نمونه Ni ب - ناحیه جوش نمونه Ni/HS.

دو نمونه **Ni/HS** و **Cr/HS** دارای عنصر کروم با درصد بالا هستند. این عنصر به دلیل تشکیل کاربید کروم، باعث افزایش سختی حدود **500 HV** در لایه روکش نسبت به زیر لایه می‌شوند. لایه دوم روکش ایجاد شده در دو نمونه **Ni/HS** و **Cr/HS** باعث گرم شدن مجدد لایه اول شده؛ بنابراین امکان رسوب کاربید در این ناحیه را فراهم نموده و سختی را کاهش می‌دهد. بنابراین روکش‌های چند لایه می‌توانند خطر ترک خوردگی و سطح تنش را در روکش‌های قبلی کاهش دهند [۲]. نمونه **Ni/HS** به دلیل مقدار مولیبدن بالاتر (۶۳٪) نسبت به **Cr/HS** دارای سختی کمتر (**600 HV**) در ناحیه **HAZ** می‌باشد که باعث چسبندگی لایه روکش به زیر لایه و قابلیت جوشکاری بالاتر نیز در این نمونه می‌شود.



شکل ۱۰- توزیع سختی با فاصله از لایه روکش.

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

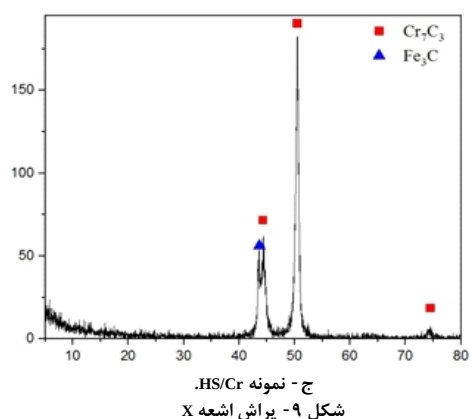
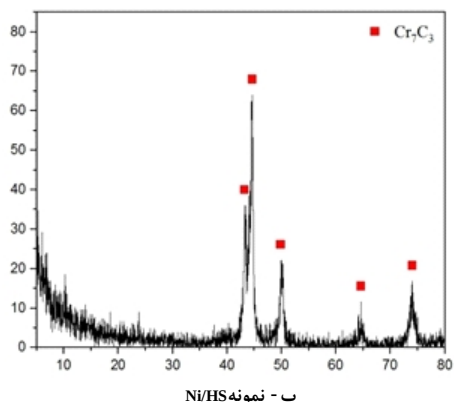
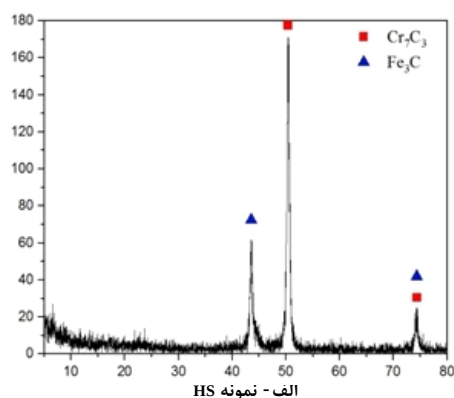
روکش کاری چدن نشکن با الکترودهای **E-316L**، **E-NiCr** و **E-HS60V** به عنوان ماده روکش با استفاده از فرایند **SMAW** انجام شد. ریزساختار و خواص مکانیکی مورد مطالعه قرار گرفت و نتیجه‌گیری زیر صورت گرفت:

- کسر حجمی کاربیدهای موجود در لایه روکش با به کار بردن الکترو **E-HS60V** به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به ترتیب پوشش نمونه **HS**، **Ni/HS** و **Cr/HS** بیشترین نسبت حجمی کاربید را نشان می‌دهد. فاز کاربید در پوشش‌ها از فاز **γ-Fe** به فاز **γ(Fe-Cr)** تغییر یافت.

- ساختار کاربیدی با کسر حجمی بالا مشخصه روکش دولایه بود. این کاربیدها به صورت دندریته‌های درشت تمایل زیادی به تشکیل در سطح لایه‌های روکش نشان می‌دهند. ساختارهای لدبوریتی نیز در منطقه فصل مشترک نزدیک به ناحیه جوش یافت می‌شدند.

- سختی در ناحیه **HAZ** نمونه روکش کاری شده با دو الکترو **E-316L** و **E-HS60V** به دلیل وجود عناصر کروم و مولیبدن و چند چرخه حرارتی کاهش یافت که باعث چسبندگی و عدم ترکیدگی در ناحیه فصل مشترک روکش/زیر لایه می‌شود. سختی در ناحیه روکش نمونه مذکور حدود **500 HV** بالاتر از زیر لایه شد.

شیمیایی الکترو قرار می‌گیرد؛ بنابراین مقدار متوسط سختی روکش ایجاد شده به دلیل وجود کاربیدهای سخت در لایه‌های روکش **400-800 HV** بالاتر از زیر لایه است. همچنین سختی ناحیه فصل مشترک به دلیل وجود لدبوریت در این ناحیه **200-800 HV** بالاتر از زیر لایه می‌باشد.



شکل ۹- پراش اشعه X

در نمونه **HS** به دلیل مقدار کربن بالاتر نسبت به نمونه‌های دیگر و در نتیجه تشکیل کاربید بیشتر، مقدار سختی لایه روکش بالاتر از نمونه‌های دیگر است. کاربید بالای تشکیل شده در این نمونه موجب تردی و شکنندگی روکش می‌شود.

- 13-Arabi Jeshvaghani, R., E. Harati, and M. Shamanian, Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding. *Materials & Design*, 2011. 32(3): p. 1531-1536.
- 14-Ahmed, A.N., et al., RBF-NN-based model for prediction of weld bead geometry in Shielded Metal Arc Welding (SMAW). *Neural Computing and Applications*, 2016. 29(3): p. 889-899.
- 15-Georgeff, J. and M. Snyder. Use of Ductile Iron for Radioactive Waste Packaging and Shielding in the United States-17278. 2017. WM Symposia, Inc., PO Box 27646, 85285-7646 Tempe, AZ (United States).
- 16-Kumar, K.S., Analytical Modeling of Temperature Distribution, Peak Temperature, Cooling Rate and Thermal Cycles in a Solid Work Piece Welded by Laser Welding Process. *Procedia Materials Science*, 2014. 6: p. 821-834.
- 17-Jeshvaghani, R.A., et al., Microstructural study and wear behavior of ductile iron surface alloyed by Inconel 617. *Materials & Design* (1980-2015), 2014. 54: p. 491-497.
- 18-Janicki, D., et al., Influence of solidification conditions on the microstructure of laser-surface-melted ductile cast iron. *Materials*, 2020. 13(5): p. 1174.
- 19-Abbas, S., et al., Effect of Molybdenum on Metallurgical and Wear Properties of Fe-Cr-C Hard facing alloy. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2019. 55(5): p. 942-950.
- 20-Arya, A., et al., Effect of chromium addition on the ordering behaviour of Ni-Mo alloy: experimental results vs. electronic structure calculations. *Acta Materialia*, 2002. 50(13): p. 3301-3315.
- 21-Guiraldenq, P. and O. Hardouin Duparc, The genesis of the Schaeffler diagram in the history of stainless steel. *Metallurgical Research & Technology*, 2017. 114(6).
- 1-Li, Y., et al., Microstructure evolution during laser cladding Fe-Cr alloy coatings on ductile cast iron. *Optics & Laser Technology*, 2018. 108: p. 255-264.
- 2-Li, Y., et al., Surface remanufacturing of ductile cast iron by laser cladding Ni-Cu alloy coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2018. 347: p. 20-28.
- 3-Zhu, L., et al., Microstructure and properties of Cu-Ti-Ni composite coatings on gray cast iron fabricated by laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 2020. 122.
- 4-Lin, C.M., et al., Repair welding of ductile cast iron by laser cladding process: microstructure and mechanical properties. *International Journal of Cast Metals Research*, 2014. 27(6): p. 378-383.
- 5-Sun, G., et al., Laser surface alloying of C-B-W-Cr powders on nodular cast iron rolls. *Surface and Coatings Technology*, 2011. 205(8-9): p. 2747-2754.
- 6-Liu, J., et al., Microstructural evolution and corrosion properties of Ni-based alloy coatings fabricated by multi-layer laser cladding on cast iron. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020. 822.
- 7-Lestan, Z., et al., Laser deposition of Metco 15E, Colmony 88 and VIM CRU 20 powders on cast iron and low carbon steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012. 66 (9-12): p. 2023-2028.
- 8-Fernandes, F., et al., Effect of arc current on microstructure and wear characteristics of a Ni-based coating deposited by PTA on gray cast iron. *Surface and Coatings Technology*, 2011. 205(16): p. 4094-4106.
- 9-Gulzar, A., et al., Microstructure evolution during surface alloying of ductile iron and austempered ductile iron by electron beam melting. *Applied Surface Science*, 2009. 255(20): p. 8527-8532.
- 10-Malek Ghaini, F., M. Ebrahimnia, and S. Gholizade, Characteristics of cracks in heat affected zone of ductile cast iron in powder welding process. *Engineering Failure Analysis*, 2011. 18(1): p. 47-51.
- 11-Abboud, J.H., Microstructure and erosion characteristic of nodular cast iron surface modified by tungsten inert gas. *Materials & Design*, 2012. 35: p. 677-684.
- 12-Pouranvari, M., On the weldability of grey cast iron using nickel based filler metal. *Materials & Design*, 2010. 31(7): p. 3253-3258.

پی نوشت

- 1- کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه یزد
- 2- دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه یزد
- 3- مدیر واحد تحقیق و توسعه شرکت الکتروود یزد
- 4- مدیر واحد کنترل کیفیت شرکت الکتروود یزد
- 5- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه یزد



تعمیر دایمی ورق آسیب دیده بدنه تجهیز با استفاده از وصله

مهندس عبدالوهاب ادب آوازه^۱

لبه های قسمت سالم باقیمانده آماده سازی شده و با قرار دادن وصله ای از همان جنس با همان شکل و انحناء و ضخامت در داخل سوراخ ایجاد شده به صورت وصله توکار داده می شود. هنگام بکارگیری روش تعمیر با وصله، باید به سازگاری مواد، شرایط بهره برداری در طول عمر قطعه مورد نظر، جفت و جوری و جوشکاری برای به حداقل رسانیدن توجه شود. اگر قطعه مورد تعمیر در معرض بارگذاری دوره ای باشد، تاثیر پیچیدگی های دائمی روی عمر خستگی قطعه تعمیر شده باید مورد توجه باشد.

طراحی وصله توکار

ضخامت ورق وصله توکار، جنس و جوش آن باید الزامات طراحی کد ساخت قطعه فشاری را که وصله داخل آن نصب می شود، برآورده کند، بازده اتصال یا ضریب کیفیت اتصال وصله باید با بازده اتصال و ضریب کیفیت اتصال اصلی همخوانی داشته باشد.

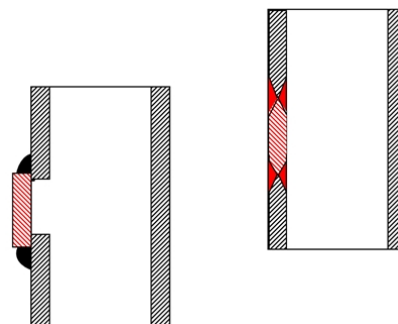
جدول ۱- بازده اتصال لب بلب برای مخزن تحت فشار (ASME VIII-1)
بازده مجاز اتصالات لب بلب برای مخزن تحت فشار

بازده مجاز	رادیوگرافی	نوع اتصال
۱۰۰ درصد	رادیوگرافی ۱۰۰ درصد	لب بلب دو طرفه
۸۵ درصد	رادیوگرافی موردی	
۷۰ درصد	بدون رادیوگرافی	
۹۰ درصد	رادیوگرافی ۱۰۰ درصد	لب بلب یک طرفه با پشت بند
۸۰ درصد	رادیوگرافی موردی	
۶۵ درصد	بدون رادیوگرافی	لب بلب یک طرفه بدون پشت بند
۶۰ درصد		

مجازن تحت فشار که از فولاد کربنی و فولاد کم آلیاژ ساخته می شوند حین کار با سیال های خورنده، دچار خوردگی می شوند. طراحان برای جبران خوردگی که در طول عمر کاری طراحی شده پیش می آید، مقداری ضخامت اضافی با عنوان (Corrosion allowance) در نظر می گیرند. اگر میزان خوردگی زیاد باشد و در نظر گرفتن C.A. به صرفه نباشد برای ساخت بدنه مخزن فولاد روکشکاری شده (Cladded steel) استفاده می کنند. در این مقاله موردی را در نظر می گیریم که قسمتی از بدنه مخزن تحت فشار به هر دلیلی آسیب دیده و نیاز به تعمیر دارد.

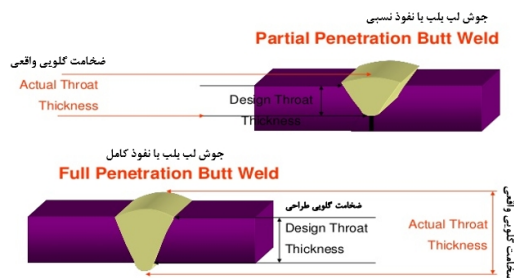
تعمیر مخزن تحت فشار با وصله

وقتی مخزن تحت فشار با پوسته استوانه ای، کروی یا مخروطی در قسمتی از بدنه دچار آسیب دیدگی یا خوردگی شدید شدند و بطور موضعی سوراخ شده یا قسمت عمده ای از ضخامت خود را از دست داده اند، قسمت معیوب بصورت دایره ای و یا چهار گوش با گوشه های گرد شده بریده می شود.



شکل ۱- وصله توکار و وصله روکار

باید ترجیحاً سنگ زده شده تا از بیرون صاف یا هم سطح با بدنه طبق شرایط سرویس برسد. پنجه جوش باید بطور ملایم به سطح پوسته برسد و شکل موزونی داشته باشد. ضخامت نهایی جوش پس از سنگ زنی، در هیچ موردی نباید از ضخامت لازم کمتر باشد.



شکل ۲- بازده اتصالات گوشه ای رویهم برای مخازن تحت فشار

آزمایش غیرمخرب جوش وصله توکار

تمام جوش‌های وصله توکار به قطعه فشاری موجود در مخزن تحت فشار باید به گستره لازم (درصد لازم) طبق کد ساخت به روش رادیوگرافی (RT) یا التراسونیک (UT) آزمایش شوند. وقتی از UT استفاده می‌شود، آزمایش پاس ریشه با روش‌های ذره مغناطیسی (MT) یا مایع نافذ (PT) توصیه می‌شود. دستورالعمل‌ها، تایید صلاحیت کارکنان و معیار پذیرش باید طبق کد ساخت باشد. برای وصله توکار مربعی یا مستطیلی، حداقل باید جوش اطراف گوشه‌های گرد شده RT یا UT بصورت موردی انجام شود.

تعمیر با وصله روکار و جوش‌های انگشتانه

این روش تعمیر را می‌توان با توجه به انتخاب معیار، محدودیت‌های کاربردی، طراحی، ساخت، آزمایش غیرمخرب و آزمایش وصله‌های سطحی با جوش گوشه ای به همراه جوش‌های انگشتانه تقویتی به قطعات تحت فشار انجام داد. روش تعمیر شامل یک ورق تعمیری است که بطور دقیق به سطح بیرونی یا داخلی قطعه اصلی می‌چسبد. ورق تعمیری به اندازه ای گرفته می‌شود که هم ناحیه‌های آسیب دیده موجود و هم پیش‌بینی شده در عمر کاری مخزن را بپوشانند. این روش تعمیر معمولاً برای پوسته‌های مخزن تحت فشار که بطور موضعی لاغر شده اند یا سوراخ شده اند، بخاطر سایش، خوردگی و مکانیزم‌های دیگر آسیب موضعی مناسب است. این روش تعمیر برای پوسته‌های استوانه ای، کروی، تخت و مخروطی کاربرد دارد. این روش تعمیر برای دمای سرویس تا حداکثر دمای طراحی ۳۴۵ درجه سانتیگراد مناسب است. استفاده از این روش برای دماهای پایین نیاز به ارزیابی چقرمگی شیاری، شکست غیرشکل پذیر و سایر اثرات دمای پایین دارد. استفاده از این روش تعمیر برای دماهای بالا نیاز به ارزیابی خستگی حرارتی، خزش و اثرات دمای بالای قابل کاربرد دارد. شکل کاربرد نمونه روی یک مخزن تحت فشار با ناپیوستگی سازه ای نازل را نشان می‌دهد. در نمای پلان در بالا دو نمونه با گوشه‌های گرد شده نشان داده شده است. نمای کف هم خوانی انحنای ورق تعمیر را نشان می‌دهد.

ورق‌های وصله توکار و جوش‌های آن‌ها باید همجنس قطعه فشاری باشند یا ماده دیگری که دست کم چقرمگی شکافی و تنش مجاز مساوی طبق کد ساخت داشته باشند و برای سرویس مورد نظر، مناسب باشند. ورق‌های وصله توکار مربع شکل یا مستطیلی باید گوشه‌های گرد شده داشته باشند (شکل ۲).

بازرسی قبل از تعمیر

برای تعیین محدوده قسمتی از بدنه که نیاز به تعویض دارد، از روش آزمایش غیرمخرب فراصوتی (التراسونیک) و سختی سنجی استفاده می‌شود.

جدول ۲- بازده اتصالات گوشه ای رویهم برای مخازن تحت فشار
بازده مجاز اتصالات گوشه‌ای رویهم برای مخزن تحت فشار (ASME VIII-1)
(محدود به اتصالات محیطی فقط تا ضخامت ۱۶ میلیمتر و قطر خارجی ۲۴ اینچ)

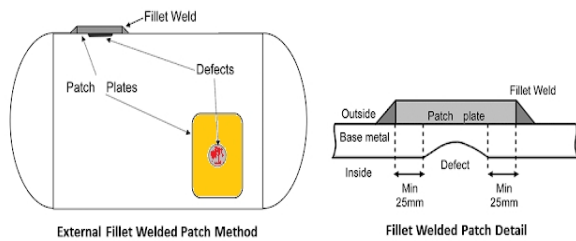
نوع اتصال	بازده مجاز
گوشه ای رویهم دوطرفه	۵۵ درصد
گوشه ای رویهم یک طرفه با جوش‌های انگشتانه	۵۰ درصد
گوشه ای رویهم یک طرفه بدون جوش انگشتانه	۴۵ درصد

ساخت وصله توکار

پخ لبه وصله توکار و قطعه فشاری را می‌توان با برشکاری حرارتی، شیار زنی قوسی، ماشین‌کاری یا سنگ زنی آماده نمود. روش آماده سازی باید برای ماده و فرایند جوشکاری مورد استفاده، مناسب باشد. شکل دهی وصله توکار به شکل مطلوب را با هر فرایندی که به خواص ماده آسیب نرساند، می‌توان انجام داد. با نورد یا پرس می‌توان انحنای وصله را مطابق انحنای پوسته مخزن در آورد.

جوشکاری وصله توکار

جوش بین وصله توکار و قطعه فشاری موجود باید جوش لب بلب با نفوذ کامل باشد. هر جا مقدور است باید اتصال جوش دوطرفه استفاده شود. دستورالعمل جوشکاری، جوشکار و اپراتور جوشکاری باید تایید صلاحیت شوند. مواد مصرفی جوشکاری و فرایندهای جوشکاری باید برای جوشکاری وصله توکار مجاز باشند. برای جوشکاری فولادهای کربنی و کم آلیاژ، الکترودها و فرایندهای کم هیدروژن توصیه می‌شود. روغن، گریس، پلیسه و مواد خارجی دیگر باید از ناحیه مجاور جوش تا فاصله کافی دورتر از جوش پاک شوند تا از آلودگی جلوگیری شود. برای یکپارچگی تعمیر، جفت و جوری وصله توکار حائز اهمیت است. جزئیات جوش و دستورالعمل‌های جوشکاری باید طوری باشد که نفوذ کامل را تسهیل کند و پیچیدگی را به حداقل برساند. سطوح در دسترس جوش لب به لب و وصله توکار



شکل ۴- تعمیر با وصله روکار از بیرون مخزن

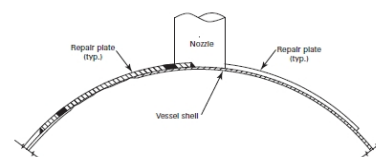
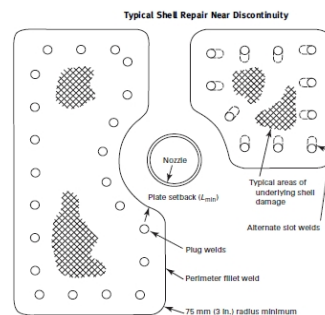
منابع

-Repair of Pressure Equipment and Piping -
ASME PCC-2,
-Pressure Vessel Inspection Code : In-Service
Inspection, Rating, Repair, and Alteration-API 510,

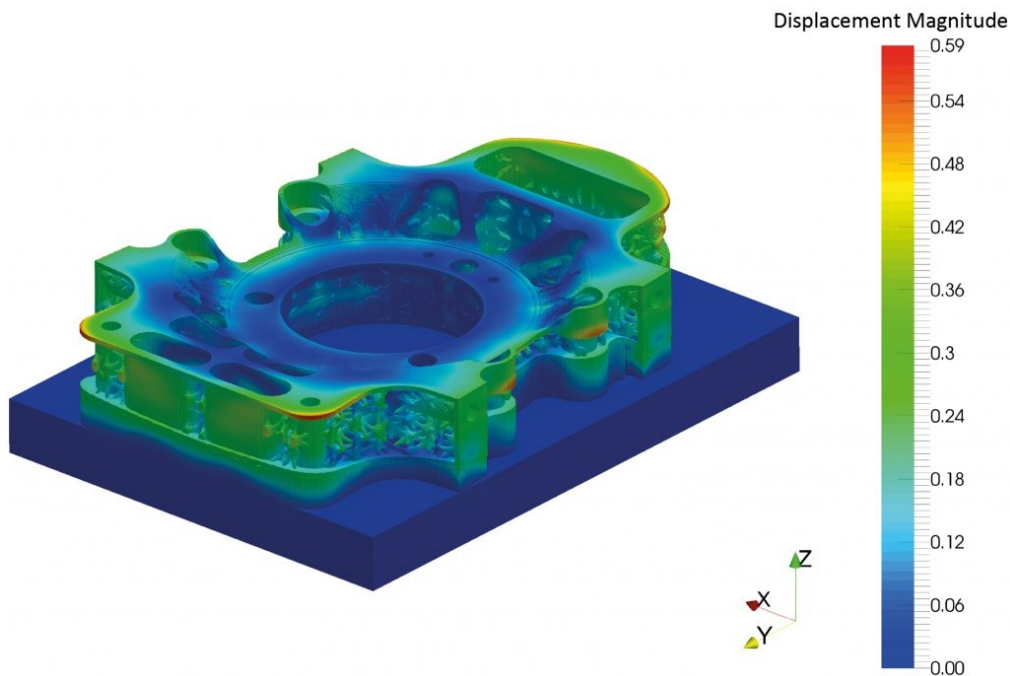
.....

پی نوشت

1-انجمن جوشکاری و آزمایش های غیرمخرب ایران



شکل ۳- تعمیر با وصله روکار و جوش های انگشتانه



تحلیل و بررسی پیچیدگی و تنش‌های پسماند در لایه تولید شده از جنس آلیاژ Ti6Al4V به روش ذوب لیزری انتخابی

سعید چراغ سحر کیاسرای^۱، اسلام رنجبر نوده^۲، سید احسان میر صالحی^۳

چکیده

ذوب لیزری انتخابی (SLM) یک تکنیک ساخت افزایشی (AM) است که برای فرآوری آلیاژ Ti6Al4V در پزشکی، هوا فضا و دیگر صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، یک مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ANSYS به منظور بررسی تنش‌های پسماند در ذوب لیزری پودرهای Ti6Al4V استفاده شده است. در ابتدا مدل حرارتی جهت محاسبه توزیع دما، توسعه یافت، سپس نتایج میدان دما برای تحلیل میدان تنش و پیش‌بینی تنش‌های پسماند، تغییر شکل ناشی از ساخت مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از مدل عددی، اثر تعدادی از متغیرهای فرایند بر اندازه تنش‌های پسماند در لایه پرینت شده بررسی شد. در این بررسی از دو سرعت ۸۰۰ و ۱۲۰۰ میلی‌متر بر ثانیه و نیز ضخامت ۰/۵ و ۱ میلی‌متر برای پلتفرم ساخت استفاده شده است. نتایج بررسی نشان داد که با افزایش سرعت اسکن، تنش پسماند طولی ۴۰ مگاپاسکال افزایش یافت و با کاهش ضخامت پلتفرم ساخت از ۱ به ۰/۵ میلی‌متر، تنش پسماند به ۱۰۰ مگاپاسکال کاهش می‌باشد.

کلمات کلیدی: ساخت افزایشی، آلیاژ Ti6Al4V، تنش پسماند، فرایند ذوب لیزری انتخابی.

1- مقدمه

ذوب لیزر انتخابی یکی از فن‌آوری‌های ساخت افزایشی است که مزایا و امکانات ویژه‌ای را در مقایسه با روش‌های سنتی ساخت مواد ارائه می‌دهد [۱]. SLM به عنوان یکی از نوید بخش‌ترین فن‌آوری‌های ساخت افزایشی در نظر گرفته می‌شود که در حال پیشرفت روزافزون است. SLM از یک پرتو لیزر با انرژی بالا برای ذوب کامل پودر فلز در یک اتمسفر محافظ در طول مسیر لیزر استفاده می‌کند و این فلز مذاب به سرعت منجمد می‌شود. با تکرار این مرحله به صورت لایه به لایه، در نهایت یک قطعه سه‌بعدی شکل می‌گیرد [۲]. با استفاده از این روش، فرایندهای جوشکاری متداول حذف می‌شوند و هیچ قالبی مورد نیاز نیست، بنابراین زمان طراحی و تولید کوتاه می‌شود. باز یافت پودر فلزی نرخ استفاده از مواد خام را افزایش و هزینه تولید را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، قطعات ساخته شده به

روش SLM کیفیت و کارایی بالایی دارند [۳]. پیش‌بینی دقیق تنش‌ها و پیچیدگی‌های پسماند در فرایندهای ذوب لیزری به دلیل دمای بالا، چرخه‌های حرارتی سریع و منبع حرارتی لیزری در حال حرکت، از چالش‌های این فرایند هستند. ذوب و انجماد سریع در طول فرایند SLM منجر به سرعت سرد شدن بالا در حوضچه مذاب می‌شود. به دلیل سیکل حرارتی پیوسته و واکنش‌های فیزیکی/شیمیایی پیچیده، توزیع ناهمگن گرمای منجر به انقباض و انقباض حرارتی ساختار جامد می‌شود. بنابراین، فرایند SLM به ناچار با تنش پسماند بالا همراه می‌شود. با توجه به پیچیدگی فرایند SLM و سختی اندازه‌گیری تجربی، روش‌های شبیه‌سازی المان محدود اغلب برای پیش‌بینی توزیع و تکامل تنش پسماند مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴-۶]. لیو و همکاران [۷] اثرات گرادین دما بر تنش پسماند و خصوصیات

ریزساختاری را به صورت تئوری مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در تحقیق خود از پودر فلزی فولاد زنگ نزن ۳۱۶L استفاده کردند.

حیدرعلی و همکاران [۸] به بررسی تاثیر ضخامت لایه بر گرادیان‌های دمایی و تنش پسماند در آلیاژ **Ti6Al4V** پرداختند. ضخامت لایه ۷۵ میکرومتر به دلیل نرخ سرد شدن و گرادیان‌های دمایی کم‌تر، به کم‌ترین تنش پسماند منجر شده است. استحکام تسلیم و ازدیاد طول یک رابطه معکوس با ضخامت لایه نشان دادند. وانگ و همکاران [۹] با استفاده از یک مدل المان محدود به بررسی تاثیر متغیرهای مختلف بر تنش پسماند پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که متغیرهای فرایند به روش‌های مختلف بر تنش پسماند نمونه تاثیر می‌گذارند. توان لیزر بر انرژی ورودی، سرعت اسکن بر نرخ سرد شدن و استراتژی اسکن لیزر بر اتلاف گرما تاثیر می‌گذارند، چن و همکاران [۱۰] نیز با استفاده از یک مدل المان محدود به بررسی تاثیر سرعت اسکن و ضخامت لایه پرینت شده بر تنش پسماند پرداختند. جنس قطعه پرینت شده آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و پلتفرم ساخت از فولاد زنگ نزن ۳۰۴ بود. ایشان دریافته‌اند که گرادیان دما با ضخامت لایه کاهش می‌یابد. این نکته سبب می‌شود که تنش پسماند به همان نسبت با افزایش ضخامت لایه کاهش یابد. مصطفی و همکاران [۱۱] به مقایسه تاثیر خواص حرارتی سه آلیاژ **Ti6Al4V**، **Invar36** و فولاد زنگ نزن ۳۱۶L روی تنش پسماند و پیچیدگی قطعه پس از جداسازی از پلتفرم پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند در حالتی که پلتفرم از جنس **Invar36** باشد کمترین پیچیدگی و تنش پسماند ایجاد خواهد شد. همچنین در بین دو ماده ۳۱۶L و **Ti6Al4V**، فولاد زنگ نزن پیچیدگی و تنش کمتری دارد.

لی و همکاران با استفاده از یک مدل کوپل حرارتی - مکانیکی به بررسی میدان‌های دمایی و تنش پسماند قطعات تولید شده به روش **SLM** پرداختند. ایشان دریافته‌اند که با افزایش تعداد لایه‌ها در جهت ساخت قطعه، تنش پسماند نیز افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که در یک نقطه معین، مولفه تنش پسماند در جهت اسکن بزرگتر از دو مولفه دیگر است [۱۲]. لی و همکاران [۱۳] نیز با استفاده از یک مدل المان محدود سه بعدی برای آلیاژ **Ti6Al4V** به این نتیجه رسیدند که افزایش توان لیزر و یا کاهش سرعت اسکن، سبب کاهش تنش پسماند در انتهای مسیر اسکن می‌شود.

یادوریوسف و همکاران [۱۴] به ارزیابی تنش پسماند در آلیاژهای ۳۱۶L و **Ti6Al4V** ساخته شده به روش **SLM** پرداختند. آن‌ها متوجه شدند که گرادیان‌های دمایی بالای ناشی از انرژی ورودی متمرکز، منجر به تنش‌های پسماند، تشکیل ترک و تغییر شکل قطعه در طول پردازش یا پس از جدا شدن از تکیه گاه‌ها و زیرلایه می‌شوند. علی رغم مطالعات نسبتاً وسیع در این زمینه در بسیاری از پژوهش‌ها، میزان تنش قبل از حذف پلتفرم اندازه‌گیری یا شبیه سازی شده است. اما در این تحقیق تنش پسماند لایه پرینت شده پس از جداسازی از پلتفرم ساخت شبیه‌سازی شد و تاثیر متغیرهای فرایند مانند سرعت اسکن و ضخامت پلتفرم بر توزیع تنش‌های پسماند از انجام فرایند مورد بررسی قرار گرفته است.

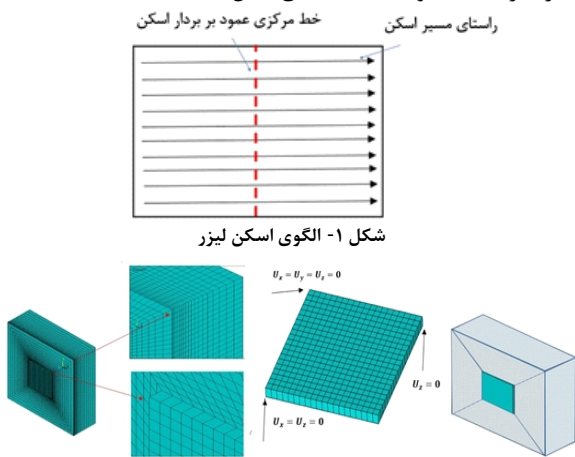
2- مدل ریاضی

مواد مورد استفاده در این تحقیق آلیاژ تیتانیوم **Ti6Al4V** (قطعه پرینت شده) و فولاد نورد گرم **AISI1015** (پلتفرم ساخت) است. ترکیب شیمیایی مواد استفاده شده در این تحقیق در "جدول ۱" آمده است [۱۵].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژهای **Ti-6Al-4V** و **AISI1015** [16]

Ti-6Al-4V	Ti	Fe	Al	V	H	O ₂ &N ₂
	۹۰	۰/۰۳	۵/۵ - ۶/۷	۳/۵ - ۴/۵	۰/۰۱۲۵	۰/۲۵
AISI1015	Fe	C	Mn	P	S	
	۹۹/۳۰	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۵	

در شبیه سازی انجام شده، هدف پیش‌بینی توزیع تنش پسماند در ذوب لیزر پودرهای فلزی است. از این رو، تحلیل حرارتی - مکانیکی گذرا مورد نیاز است. در این تحقیق از پرینت یک مدل تک لایه استفاده شده است و به همین منظور یک پلتفرم به ابعاد ۳×۳×۱ میلی‌متر طراحی شد. لایه پرینت شده دارای ابعاد ۵×۵×۰/۵ میلی‌متر و ضخامت لایه پرینت شده نیز ۳۰ میکرومتر بود. در شکل (۱) مسیر اسکن لیزر نشان داده شده و زمان توقف بین مسیرها برابر با طول زمان پیمایش یک مسیر بود. شکل (۲) مدل المان محدود را نشان می‌دهد. همچنین در مدل المان محدود یک سمت از پلتفرم ساخت قید می‌شود و پس از جداسازی از پلتفرم نیز به منظور اینکه قطعه دچار حرکت جسم صلب نشود و بتوان پیچیدگی و تنش پسماند را اندازه گرفت، سه گوشه قطعه مطابق شکل (۳) مقید شده است.



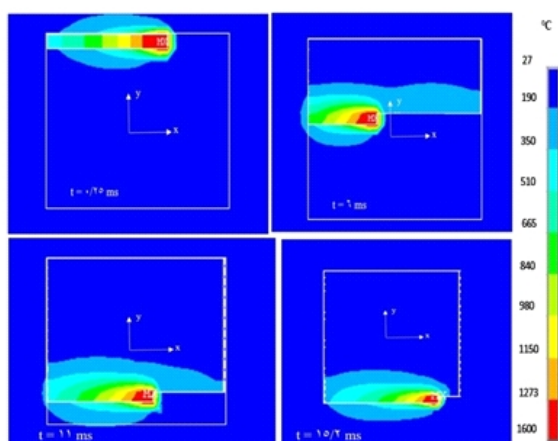
شکل ۱- الگوی اسکن لیزر

شکل ۲- الف - شرایط مرزی همرفت ب - نقاط مقید روی لایه پس از حذف پلتفرم ج - مدل المان محدود

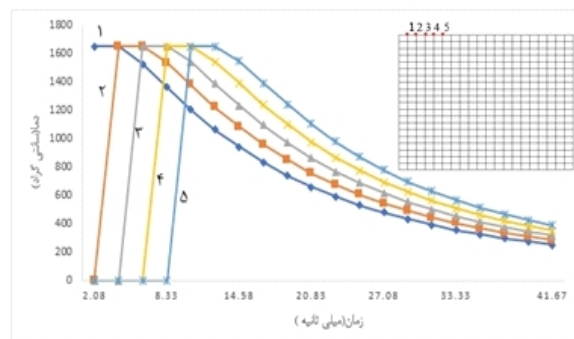
به دلیل دامنه گسترده دمایی در فرایند ذوب لیزری نمی‌توان از تاثیر دما بر خواص مکانیکی و یا ترموفیزیکی صرف نظر کرد. بنابراین در مدل مورد از خواص فیزیکی و مکانیکی وابسته به دما استفاده شد. در فرایند **SLM**، ذوب و انجماد موضعی سریع رخ می‌دهد. با حرکت سریع منبع حرارتی لیزر، دمای کل سیستم بستر پودر به طور قابل توجهی با زمان و مکان تغییر می‌کند. تحلیل میدان دمایی فرایند **SLM** یک مساله هدایت حرارتی گذرا است و براساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

شود. به عبارت دیگر در حوضچه مذاب اتلاف حرارت از طریق همرفت بسیار اندک صورت گیرد. دما در پشت حوضچه مذاب با شیب ملایم در حال کاهش است و در جلوی حوضچه دمای محیط غالب است. شکل (۴) نشان می‌دهد که تاریخچه دمایی نقاط مختلف شباهت زیادی با یکدیگر دارند که بیانگر این نکته است که نقاط مختلف تحت اسکن لیزر، چرخه‌های حرارتی مشابهی را طی می‌کنند.



شکل ۳- توزیع دما در لایه پرنیت شده در زمان‌های مختلف



شکل ۴- تاریخچه حرارتی ۵ نقطه ابتدایی اسکن شده

3-1- تغییرات توزیع تنش در پلتفرم و لایه پرنیت شده

شکل (۵) تغییرات تنش‌های طولی روی سطح پلتفرم را در دو زمان مختلف حسین اسکن لیزر نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، حداکثر تنش‌های حرارتی فشاری در لحظه‌ی برخورد لیزر و گرم شدن لایه، ظاهر می‌شود و این تنش‌های گذرای حرارتی فشاری با دور شدن منبع لیزر از منطقه تحت تابش به تنش‌های کششی تبدیل می‌شوند. همچنین مشاهده شد که تنش‌های طولی برای مسیرهای اسکن شده مشابه یکدیگر هستند که علت آن گذراندن چرخه‌های حرارتی مشابه است. مولفه تنش نرمال در مقایسه با مولفه‌های تنش طولی و عرضی کوچک‌تر است. حداکثر تنش نرمال پیش‌بینی شده ۲۵۱ مگاپاسکال است. این درحالی است که تنش‌های طولی با اختلاف اندکی از تنش‌های عرضی بزرگتر

در معادله فوق، ρ چگالی، c ظرفیت گرمایی ویژه، T دمای بستر پودر، t زمان برهم‌کنش بستر پودر و لیزر، k ضریب هدایت حرارتی و Q توان منبع حرارتی است. علاوه بر هدایت حرارتی، اتلاف از طریق همرفت و تابش نیز در فرایند SLM در نظر گرفته می‌شوند. شرایط اولیه میدان دمایی در $t=0$ به صورت زیر است، که T_0 دمای محیط است:

$$T(x, y, z, t)_{t=0} = T_0$$

با اعمال اتلاف حرارت از طریق همرفت طبق رابطه (۲) خواهیم داشت [۱۷]:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} - q + q_c = 0 \quad (2)$$

در معادله فوق n بردار نرمال صفحه، q شار حرارتی و q_c حرارت همرفتی است که طبق رابطه (۳) نشان داده می‌شود:

$$q_c = -h(T - T_0) \quad (3)$$

در معادله فوق، h ضریب انتقال حرارت همرفت است. ثابت همرفت (h) در دمای اتاق، $15 \text{ W/m}^2\text{K}$ در نظر گرفته شده است. در تحلیل ساختاری، ارتباط بین تنش و کرنش با استفاده از رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon^e\} \quad (4)$$

در معادله فوق $\{\sigma\}$ برابر تنش، $[D]$ ماتریس الاستیسیته و $\{\epsilon^e\}$ بردار کرنش الاستیک است. متغیرهای مورد استفاده در فرایند شبیه‌سازی در جدول (۲) نشان داده شده است.

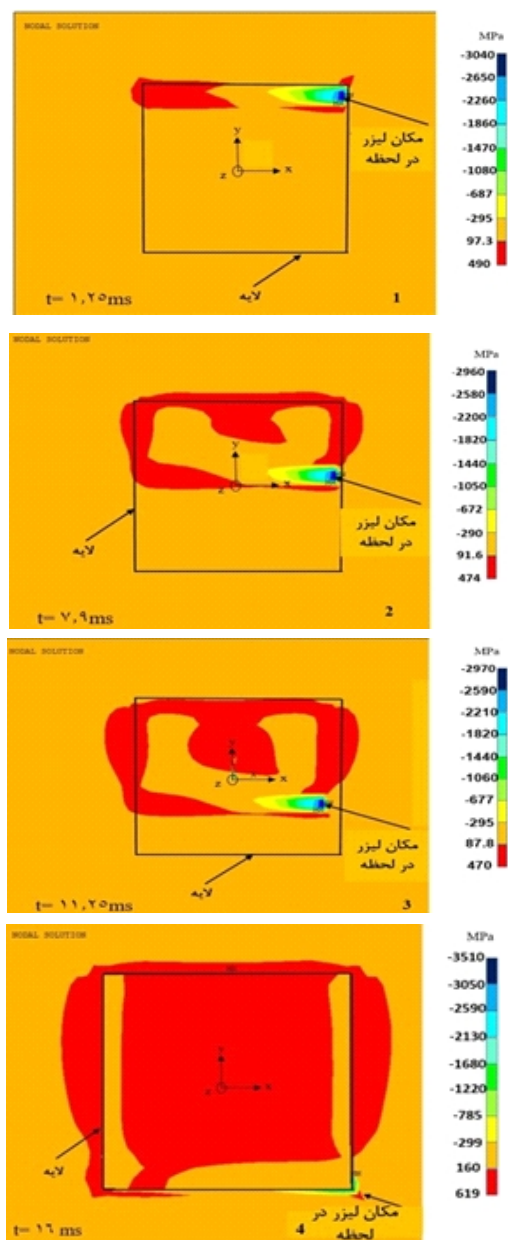
جدول ۲- متغیر استفاده شده در فرایند

سرعت اسکن (m/s)	۱/۲	۰/۸
ضخامت پلتفرم (mm)	۱	۰/۵

3- نتایج و بحث

شکل (۳) توزیع دمایی لایه اول در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. توزیع دما در زمان‌های انتخاب شده در اطراف مناطق اسکن شده با لیزر مشابه بود. حوضچه مذاب بیضی شکل در تمام زمان‌ها تشکیل شد که نشان می‌دهد سرعت سرد شدن بالا به همراه انجماد ماده در پشت حوضچه مذاب اتفاق می‌افتد. بین مسیرهای اسکن شده متوالی یک زمان توقف لیزر وجود دارد که باعث می‌شود لیزر از انتهای مسیر قبلی به ابتدای مسیر فعلی حرکت کند. با اسکن مسیر بعدی، مسیر قبلی شروع به سرد شدن می‌کند و هنگامی که لیزر در مجاورت مسیر قبلی قرار می‌گیرد دمای مسیر اولیه دوباره بالا خواهد رفت. این مسئله باعث ایجاد چرخه گرمایش و سرمایش شده و به سبب آن مسیر در حال اسکن، منبسط و مسیر اسکن شده قبلی دچار انقباض می‌شوند. پس از اینکه شار حرارتی از محل موردنظر دور می‌شود، دمای بستر مذاب به دلیل هدایت حرارتی به زیرلایه و بستر پودر، و اتلاف حرارتی از طریق همرفت به محیط اطراف، شروع به افت می‌کند. سرمایش به سرعت انجام و همین زمان اندک سبب می‌شود تا از اتلاف حرارت همرفتی در حوضچه مذاب جلوگیری

هستند، مقادیر این تنش‌ها به ترتیب ۳۲۶ و ۳۲۳ مگاپاسکال است. توزیع تنش طولی در یک لایه پرینت شده $Ti-6Al-4V$ در زمان‌های مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است. با شروع پرینت یک لایه $Ti-6Al-4V$ روی پلتفرم ساخت، در اطراف حوضچه مذاب و نیز در سطح پلتفرم تنش‌های فشاری ایجاد می‌شوند. تغییر حالت تنش لایه اول از فشاری به کششی، توزیع تنش در پلتفرم را تغییر می‌دهد.



شکل ۵- تاریخچه تنش‌های طولی روی پلتفرم ساخت

پلتفرم و لایه پرینت شده روی پلتفرم به تحلیل تنش لایه پرینت شده بعد از جدا شدن پلتفرم پرداخته شده است. شکل (۷) پیچیدگی لایه پرینت شده در راستای ساخت لایه بعد از جدا شدن پلتفرم را نشان می‌دهد. قبل از جدا شدن لایه از پلتفرم ساخت، حداکثر پیچیدگی قطعه و پلتفرم در سه راستای X ، Y و Z به ترتیب ۲/۳۵، ۲/۴ و ۰/۹۸ میکرومتر است. بعد از جدا شدن پلتفرم این مقادیر به ترتیب ۵/۷، ۲/۴ و ۱۳/۱ میکرومتر هستند. در راستای Z ، مقدار پیچیدگی تفاوت چشمگیری با دو راستای دیگر دارد و پیچیدگی ۱۳ برابر افزایش می‌یابد. این تفاوت مقدار پیچیدگی در محورهای مختلف به مهار لایه پس از حذف پلتفرم مربوط می‌شود. لایه قبل از جدا شدن فقط بوسیله سطح زیرین خود با پلتفرم در تماس بود و همین موضوع سبب شد یک مهار کلی برای لایه در حال پرینت ایجاد شود. ولی در مدل المان محدود بعد از جدا شدن لایه از پلتفرم مهار با سه نقطه باعث شد تا لایه پرینت شده از گره‌ای که قید نشده است تقریباً نصف ارتفاع خود پیچیدگی پیدا کند.

شکل (۸) توزیع تنش پسماند طولی لایه پرینت شده را بعد از جدایی پلتفرم نشان می‌دهد. پس از جدا شدن قطعه از پلتفرم انتظار می‌رود که تنش‌های موجود در لایه پرینت شده آزاد شوند و تنش‌های پسماند در جهات مختلف کاهش یابند. مقادیر تنش پسماند در سه راستای X ، Y و Z قبل از جدا شدن پلتفرم به ترتیب ۸۸۰، ۶۳۵ و ۳۹۰ مگاپاسکال هستند. تنش‌های پسماند طولی بعد از جدا شدن پلتفرم به ۲۴۵ مگاپاسکال کاهش یافتند که این کاهش ۷۲ درصدی متناسب با تغییرات پیچیدگی در همین راستا بود. پس می‌توان گفت که مقدار کاهش تنش‌های طولی رابطه مستقیم با افزایش اعوجاج دارد. اما تنش‌های پسماند در راستای Y بعد از حذف پلتفرم ۱۵ درصد کاهش و به ۴۲۲ مگاپاسکال رسید. کاهش پیچیدگی در راستای Y بسیار ناچیز و در حدود ۱ درصد بود. قبل از حذف پلتفرم حداکثر تنش پسماند در لبه انتهایی قطعه، جایی که مسیر اسکن پایان می‌یافت، اتفاق افتاد.

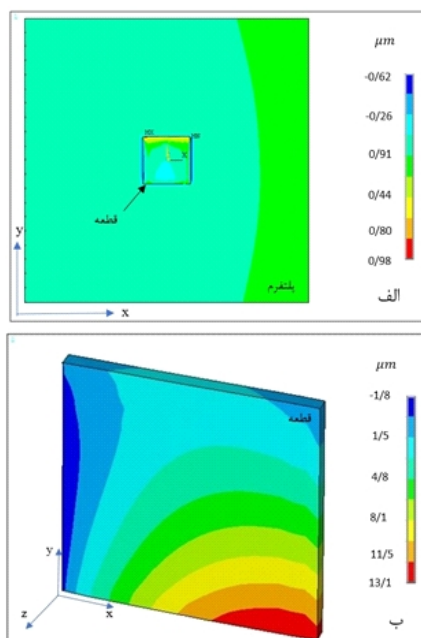
3-2- تاثیر ضخامت پلتفرم بر پیچیدگی و تنش پسماند

ذوب لیزری پودرهای فلزی به طور معمول روی زیرلایه یا پلتفرم ساخت انجام می‌شود. تفاوت در خواص مواد بین پلتفرم پایه و مواد پودری، به ویژه هدایت حرارتی، انبساط حرارتی و استحکام، یک شرایط عدم انطباق سازه‌ای را ایجاد می‌کند که بر ویژگی‌های میدان تنش تاثیر می‌گذارد. در همین راستا از دو ضخامت ۱ و ۵ میلی‌متر برای پلتفرم استفاده شد. به دلیل تغییرات بیشتر پیچیدگی در راستای Z تاثیر متغیرهای فرایند بر پیچیدگی در این راستا بررسی شد. شکل (۹) نمودار تغییرات پیچیدگی عمود بر خط مرکزی اسکن را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش ضخامت در جهت ساخت قطعه (جهت Z)، مقدار پیچیدگی کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش شیب حرارتی در جهت مذکور است.

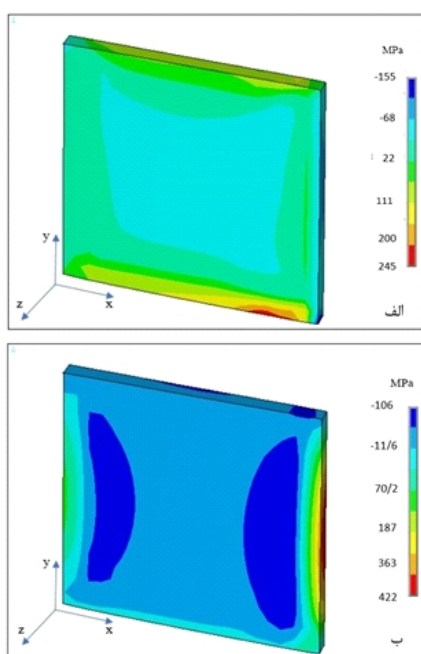
تاثیر ضخامت پلتفرم بر تنش پسماند در شکل (۱۰) نشان داده شده است. ماکزیمم تنش پسماند در هر دو حالت در مسیرهای پایانی لایه اتفاق می‌افتد و در این قسمت یک تجمع تنش پسماند دیده می‌شود. در این نقاط اختلاف تنش زیادی بین لایه پرینت شده روی پلتفرم

در این تحقیق علاوه بر بررسی میدان‌های حرارتی و توزیع تنش

0/5 و ضخامت ۱ میلی متر دیده می شود و در نقاط دیگر در این مسیر تنش های پسماند در دو حالت اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند. بیشینه مقدار تنش پسماند در لایه پرینت شده روی ضخامت 0/5 میلی متر حدود ۱۰۰ مگاپاسکال است و این مقدار برای لایه پرینت شده روی پلتفرم ۱ میلی متری ۱۳۰ مگاپاسکال می باشد که 30 درصد افزایش در مقدار تنش پسماند در این مسیر دیده می شود. با کاهش ضخامت پلتفرم، شیب دمایی در راستا محور Z کاهش می یابد، از همین رو تنش های کمتری در لایه ایجاد و باقی می ماند.



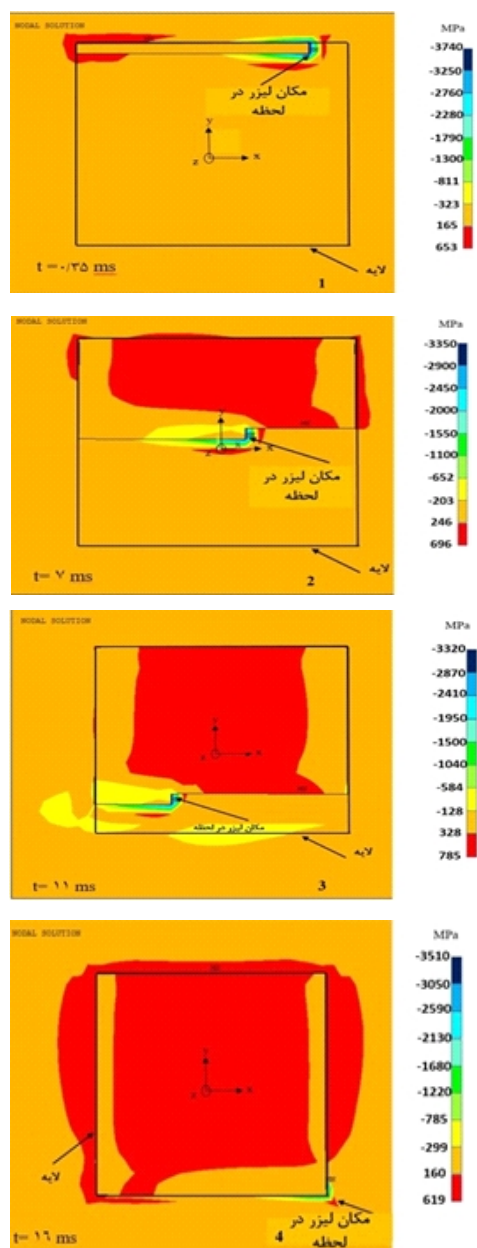
شکل ۷- اعوجاج لایه پرینت شده در راستای Z الف - قبل از جدا شدن پلتفرم
ب - بعد از جدا شدن پلتفرم



شکل ۸- تنش پسماند لایه Ti-6Al-4V بعد از جدا شدن پلتفرم
الف - طولی ب - عرضی

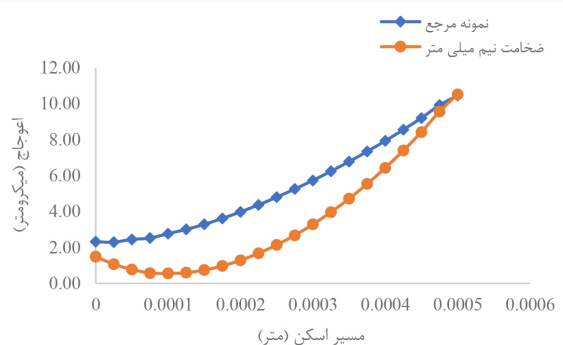
3-3- تاثیر سرعت اسکن بر تنش پسماند و پیچیدگی

موفقیت ذوب لیزری پودرهای فلزی به حرارت وارد شده به پودر و کنترل مناسب سرعت انجماد بستگی دارد. توان لیزر و سرعت اسکن به طور قابل توجهی مقدار انرژی وارد شده به پودر و در نتیجه مقدار



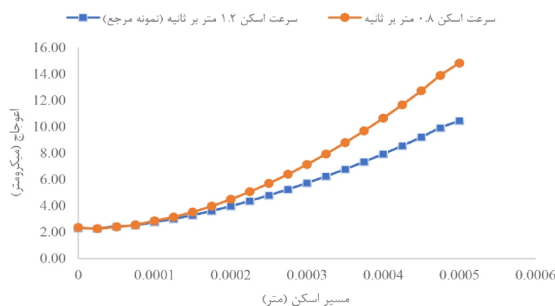
شکل ۶- نحوه تحول توزیع تنش های طولی ایجاد شده روی لایه Ti-6Al-4V در زمان های مختلف

ذوب و انجمادی که رخ می‌دهد را کنترل می‌کند. با کاهش سرعت اسکن از ۱/۲ به ۰/۸ متر بر ثانیه، حداکثر پیچیدگی در کل لایه پرینت شده از ۱۳/۱ به ۲۲ میکرومتر افزایش یافت (شکل ۱۱). با توجه به نمودار نیز قابل مشاهده است که با کاهش سرعت اسکن لیزر، مقدار پیچیدگی و تغییر شکل لایه پرینت شده تقریباً ۳۰ درصد افزایش یافته است. این امر را می‌توان به افزایش میزان حرارت اعمال شده به سیستم نسبت داد. یک توضیح اساسی برای این موضوع این است که با افزایش زمان برهم کنش، حرارت ورودی افزایش می‌یابد. شکل (۱۲) تغییرات تنش پسماند طولی را در ناحیه عمود بر خط مرکزی را نشان می‌دهد.

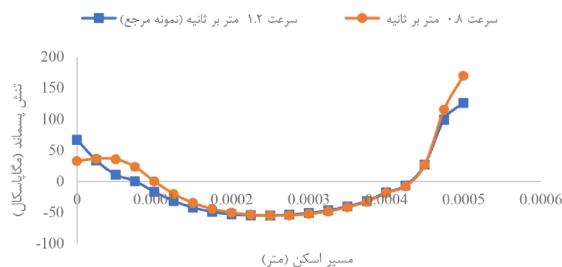


شکل ۹- تغییرات اعوجاج برای دو پلتفرم به ضخامت‌های ۰/۵ و ۱ میلی‌متر

شکل (۱۲) تغییرات تنش پسماند طولی را در ناحیه عمود بر خط مرکزی اسکن نشان می‌دهد. حداکثر تنش پسماند کل لایه پرینت شده با افزایش سرعت اسکن از ۰/۸ به ۱/۲ متر بر ثانیه، از ۱۸۷ مگاپاسکال به ۲۴۵ مگاپاسکال افزایش یافته است. حداکثر تنش پسماند طولی در هر دو نمونه نیز در مسیرهای پایانی اسکن دیده می‌شوند. در این مسیر نیز حداکثر تنش پسماند طولی در لایه پرینت شده با سرعت ۰/۸ متر بر ثانیه ۱۷۰ مگاپاسکال است که با افزایش سرعت به ۱/۲ متر بر ثانیه این مقدار ۲۳/۵ درصد کاهش یافته و به ۱۳۰ مگاپاسکال می‌رسد. با افزایش سرعت اسکن، زمان اعمال بار در ناحیه اسکن کاهش پیدا می‌کند. همین موضوع سبب کاهش تنش در لایه پرینت شده با سرعت اسکن ۱/۲ متر بر ثانیه می‌شود.



شکل ۱۱- نمودار تغییرات اعوجاج ناحیه عمود بر خط مرکزی اسکن



شکل ۱۲- نمودار تغییرات تنش پسماند طولی در ناحیه عمود بر خط مرکزی

4- نتیجه گیری

در این مطالعه یک مدل اجزا محدود برای پیش بینی تنش و پیچیدگی در نمونه پرینت سه بعدی توسعه یافت و سپس تغییر متغیرهای سرعت اسکن، ضخامت لایه، ضخامت پلتفرم و جنس پلتفرم روی تنش پسماند و پیچیدگی مورد مطالعه قرار گرفت که اهم نتایج بدست آمده عبارتند از:

- پس از حذف پلتفرم مقدار تنش طولی از ۸۸۰ به ۲۴۵ مگاپاسکال کاهش یافت و بیشینه تغییرات در راستای X بود. بیشترین میزان پیچیدگی قطعه پس از حذف پلتفرم در جهت Z، ۱۳ برابر افزایش یافت.

- با کاهش ضخامت پلتفرم از ۱ به ۰/۵ میلی‌متر شیب‌های حرارتی در جهت Z کاهش یافته و مقدار پیچیدگی لایه Ti-6Al-4V پرینت شده کاهش می‌یابد. تنش‌های پسماند طولی نیز با افزایش ضخامت از ۰/۵ به ۱ میلی‌متر، ۳۰ درصد افزایش یافته و از ۱۰۰ مگاپاسکال به

3-4- تاثیر سرعت اسکن بر تنش پسماند و پیچیدگی

موفقیت ذوب لیزری پودرهای فلزی به حرارت وارد شده به پودر و کنترل مناسب سرعت انجماد بستگی دارد. توان لیزر و سرعت اسکن به طور قابل توجهی مقدار انرژی وارد شده به پودر و در نتیجه مقدار ذوب و انجمادی که رخ می‌دهد را کنترل می‌کند. با کاهش سرعت اسکن از ۱/۲ به ۰/۸ متر بر ثانیه، حداکثر پیچیدگی در کل لایه پرینت شده از ۱۳/۱ به ۲۲ میکرومتر افزایش یافت (شکل ۱۱). با توجه به نمودار نیز قابل مشاهده است که با کاهش سرعت اسکن لیزر، مقدار پیچیدگی و تغییر شکل لایه پرینت شده تقریباً ۳۰ درصد افزایش یافته است. این امر را می‌توان به افزایش میزان حرارت اعمال شده به سیستم نسبت داد. یک توضیح اساسی برای این موضوع این است که با افزایش زمان برهم کنش، حرارت ورودی افزایش می‌یابد.

- 9-L. Wang, X. Jiang, Y. Zhu, X. Zhu, J. Sun, and B. Yan, "An approach to predict the residual stress and distortion during the selective laser melting of AlSi10Mg parts," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 97, no. 9–12, pp. 3535–3546, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2207-3.
- 10-C. Chen et al., "The effect of process parameters on the residual stress of selective laser melted Inconel 718 thin-walled part," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 25, no. 8, pp. 1359–1369, 2019, doi: 10.1108/RPJ-09-2018-0249.
- 11-M. Yakout, M. A. Elbestawi, S. C. Veldhuis, and S. Nangle-Smith, "Influence of thermal properties on residual stresses in SLM of aerospace alloys," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 26, no. 1, pp. 213–222, 2020, doi: 10.1108/RPJ-03-2019-0065.
- 12-Y. Li, K. Zhou, P. Tan, S. B. Tor, C. K. Chua, and K. F. Leong, "Modeling temperature and residual stress fields in selective laser melting," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 136, pp. 24–35, 2018, doi: 10.1016/j.ijsmecsci.2017.12.001.
- 13-H. Li, M. Ramezani, Z. Chen, and S. Singamneni, "Effects of Process Parameters on Temperature and Stress Distributions During Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 72, no. 12, pp. 3201–3214, 2019, doi: 10.1007/s12666-019-01785-y.
- 14-I. Yadroitsev and I. Yadroitsava, "Evaluation of residual stress in stainless steel 316L and Ti6Al4V samples produced by selective laser melting," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 10, no. 2, pp. 67–76, 2015, doi: 10.1080/17452759.2015.1026045.
- 15-Robertz, "Investigation of residual stresses in selective laser melting," *Key Eng. Mater.*, vol. 627, 2015.
- 16-A. Hussein, L. Hao, C. Yan, and R. Everson, "Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting," *Mater. Des.*, vol. 52, pp. 638–647, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.05.070.
- 17-K. Dai and L. Shaw, "Finite element analysis of the effect of volume shrinkage during laser densification," *Acta Mater.*, vol. 53, no. 18, pp. 4743–4754, 2005.

پی نوشت

- 1- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- 2- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- 3- دانشیار، مهندسی مواد و متالورژی، صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

از ۵/۰ به ۱ میلی متر، ۳۰ درصد افزایش یافته و از ۱۰۰ مگاپاسکال به ۱۳۰ مگاپاسکال رسیدند.

- با افزایش سرعت اسکن از ۸۰۰ به ۱۲۰۰ میلی متر بر ثانیه، کاهش تنش پسماند از طریق کاهش زمان بار حرارتی بر افزایش تنش به دلیل کم شدن زمان اتلاف حرارت به اطراف و افزایش شیب های دمایی غلبه کرد و حداکثر تنش پسماند طولی از ۱۷۰ مگاپاسکال به ۱۳۰ مگاپاسکال کاهش پیدا کرد.

منابع

- 1-X. Jiang, T. Ye, and Y. Zhu, "Effect of process parameters on residual stress in selective laser melting of AlSi10Mg," *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*, vol. 36, no. 3, pp. 342–352, 2020, doi: 10.1080/02670836.2019.1705560.
- 2-C. Y. Yap et al., "Review of selective laser melting: Materials and applications," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 2, no. 4, 2015, doi: 10.1063/1.4935926.
- 3-M. Attaran, "The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing," *Bus. Horiz.*, vol. 60, no. 5, pp. 677–688, 2017, doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.
- 4-P. Mercelis and J. P. Kruth, "Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 12, no. 5, pp. 254–265, 2006, doi: 10.1108/13552540610707013.
- 5-M. Shiomi, K. Osakada, K. Nakamura, T. Yamashita, and F. Abe, "Residual stress within metallic model made by selective laser melting process," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 53, no. 1, pp. 195–198, 2004, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60677-5.
- 6-T. Simson, A. Emmel, A. Dwars, and J. B?hm, "Residual stress measurements on AISI 316L samples manufactured by selective laser melting," *Addit. Manuf.*, vol. 17, pp. 183–189, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.07.007.
- 7-Y. Liu, Y. Yang, and D. Wang, "A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 87, no. 1–4, pp. 647–656, 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8466-y.
- 8-H. Ali, H. Ghadbeigi, and K. Mumtaz, "Processing Parameter Effects on Residual Stress and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, no. 8, pp. 4059–4068, 2018, doi: 10.1007/s11665-018-3477-5.



آزمون‌های غیرمخرب در صنعت خودروسازی

حسن غلام‌م‌گویی^۱، مسعود مصلاهی‌پور^۲

چکیده

نظر به اهمیت بالای کیفیت و صحت عملکرد قطعات و اجزاء خودرو در حصول اطمینان از کارایی و ایمنی خودروی تولیدی، در پژوهش حاضر سعی شده با ارزیابی و تحلیل زمینه‌های استفاده از تکنیک‌های مختلف آزمون‌های غیرمخرب در صنعت خودروسازی کشورهای پیشرفته، پتانسیل و اهمیت آزمون‌های غیرمخرب برای صنعت خودروسازی کشور آشکارتر شود. با توجه به تعدد جوش‌های نقطه‌ای ایجاد شده در بدنه خودرو، راهکارهای ارزیابی غیرمخرب جوش‌های نقطه‌ای با استفاده از تکنیک‌های فراصوتی و آزمون حرارتی و استفاده از توموگرافی کامپیوتری بطور کامل مورد بررسی واقع شده است. همچنین با توجه به موارد متعدد استفاده از فولادهای سازه‌ای (فولاد با خاصیت مغناطیسی، فرومغناطیس)، در این پژوهش شیوه کارآمد استفاده از آزمون غیرمخرب نظیر ذرات مغناطیسی برای ارزیابی قطعات مذکور در صنعت خودروسازی بررسی شده است. امروزه با توسعه دانش، تکنولوژی و پیشرفت تجهیزات آزمون‌های غیرمخرب انتظار می‌رود که این آزمون‌ها جایگاهی رفیع در ارزیابی قطعات و محصولات صنعت خودروسازی پیدا نماید که در این صورت می‌توان شاهد بهبود کیفیت در خودروهای داخلی و در نتیجه ارتقاء صنعت خودروسازی ملی شود.

کلمات کلیدی: آزمون‌های غیرمخرب، TG، UT، MT، خودرو، جوش نقطه‌ای.

۱- مقدمه

صنعت خودروسازی را می‌توان جزء ۱۰ صنعت بزرگ در دنیا خواند که از سال ۱۳۳۶ با تاسیس کارخانه جیپ ایران وارد صنعت کشور شد [۱]. از اهمیت این صنعت همین بس که در زمان اعمال تحریم‌های غیرقانونی غرب مربوط به موضوع استفاده صلح‌آمیز انرژی هسته‌ای علیه کشورمان، صنعت خودرو کشور در کنار صنعت نفت، به دلیل نقش برجسته آن در اقتصاد کلان کشور دچار محدودیت‌های بین‌المللی شد. صنعت خودرو ایران به عنوان لوکوموتیو صنعت کشور دارای ظرفیت بالفعل تولید حدود ۲ میلیون دستگاه خودرو و تولید روزانه بالغ بر ۱۰ میلیون قطعه و ۶۰۰۰ دستگاه خودرو در کشور است که موجب رونق ۶۰ رشته بزرگ و

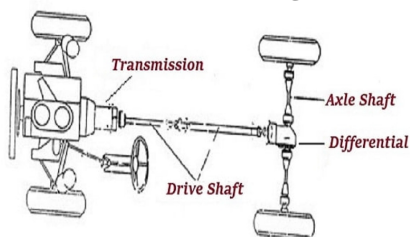
کوچک صنعتی مانند فولاد، پتروشیمی، لاستیک، آلومینیوم، شیشه، نساجی، رنگ و پوشش‌ها مواد شیمیایی و غیره می‌شود [۲] (شکل ۱).



شکل ۱- جزئیات بخش‌های یک خودرو.

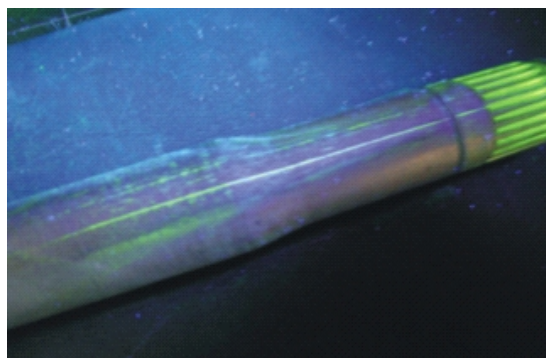
2-1- MT و ارزیابی محورهای محرک

بازرسی محورهای محرک (Drive shaft) یا شفت‌ها در قطعات خود عمدتاً با تکنیک تمام اتوماتیک MT انجام می‌شود. محورهای محرک بصورت قطعات استوانه‌ای به طول ۷۵۰-۳۰۰ mm و قطر ۱۹-۳۲ mm می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳- شماتیک محور محرک یا میل‌لنگ در خودرو.

عیوب متداول در این اجزاء، عیوب مرتبط با سخت شدن است. شکل (۴-الف) این عیب را در یک شفت مغناطیس شده بعد از پاشش ذرات مغناطیسی تحت نور فرابنفش (UV) نشان می‌دهد. این سیستم بازرسی اساساً به صورت اتوماتیک طراحی شده است که قطعات به صورت متوالی به ایستگاه‌های مختلف فرایند بازرسی هدایت می‌شوند (شکل ۵).



شکل ۴- عیب در یک شفت مغناطیس شده تحت نور فرابنفش (UV).

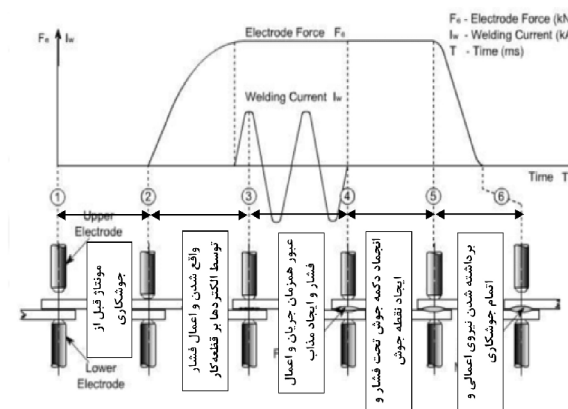
برای مغناطیس نمودن شفت‌ها از ترکیب عبور جریان و شار مغناطیسی استفاده می‌شود. بدین ترتیب میدان حاصل از عبور جریان، ترک‌های عرضی را نشان می‌دهد و شار مغناطیسی برای شناسایی عیوب طولی استفاده می‌شود. در بالای ایستگاه مغناطیس نمودن و بازرسی، نازل‌های پاشش ذرات مغناطیسی و در زیر سیستم حرکت و چرخش قطعات قرار داد (شکل ۵-ج). روشنایی با دو لوله UV و هشت دوربین CCD بررسی و بازرسی را انجام می‌دهند (شکل ۵-د). در شکل (۶) نشانه MT از حضور عیب در شفت محرک در دو پردازش تصویر خاکستری و رنگی نشان داده شده است.

با توجه به هندسه و شکل قسمت انتهایی شفت‌ها، تجمع ذرات مغناطیس در شیارهای این نواحی از شفت اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بنابراین یک الگوریتم بینایی ماشین بر پایه الگوریتم لایه‌برداری برای تمیز نمودن این نشانه‌های کاذب از نشانه‌های واقعی با عیب توسعه یافته است. در این الگوریتم، محیط یک قطعه به المان‌هایی با

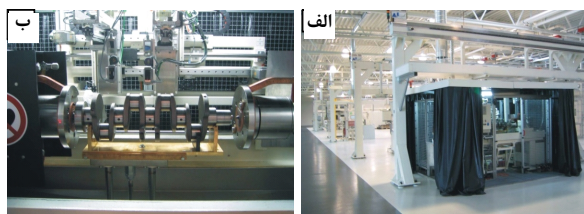
از جمله فرایندهای اتصال‌دهی که در صنعت خودروسازی بسیار مورد استفاده واقع می‌شود، جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای می‌باشد [۳]. SRW یک فرایند جوشکاری الکتریکی است که مقاومت الکتریکی موضع اتصال در مقابل عبور جریان الکتریکی موجب تشکیل فاز مذاب و فشاری اعمالی بر آن موجب ممزوج شدن دو قطعه و در نهایت با انجماد فاز مذاب اتصال تشکیل می‌شود. شماتیک سیکل جریان-فشار برحسب مدت زمان جوشکاری در SRW در شکل (۲) نشان داده شده است [۴]. گروه خودروسازی سایپا جهت بررسی جوش‌های نقطه‌ای از آزمون غیرمخرب فراصوتی (UT) استفاده می‌کند و سازندگان ملزم به اجرای آزمون در شرایط گفته شده در آیین‌نامه الزامات کیفی می‌باشند و محصولات و شاهین و سایر محصولات جدید در این چرخه قرار گرفته‌اند. البته این روش کیفی اطلاعات دقیقی از کیفیت جوش‌های نقطه‌ای نمی‌دهد و تنها وجود یا عدم وجود جوش نقطه‌ای را مشخص می‌کند و همچنین به میزان قابل توجهی به مهارت و تجربه اپراتور بستگی دارد [۵ و ۶].

2- آزمون ذرات مغناطیسی و صنعت خودروسازی

آزمون ذرات مغناطیسی (MT) در سال ۱۹۲۹ میلادی به عنوان یک تکنیک غیرمخرب برای ارزیابی ترک‌های سطحی در قطعات فرومغناطیس ابداع شد. نظر به تاثیر تخریبی شدیدتر ترک‌های سطحی نسبت به ترک‌های داخلی (تاثیر تخریبی ترک‌های سطحی تقریباً در حدود ۲ برابر ترک‌های داخلی ماده می‌باشد) و همچنین از آنجایی که در اغلب شرایط سرویس، حداکثر نیرو در سطح قطعه ایجاد می‌شود، ارزیابی ترک‌های سطحی از اهمیت صنعتی زیادی برخوردار می‌باشد. سهولت، سرعت، دقت و مقرون به صرفه بودن موجب شده تکنیک MT یک آزمون غیرمخرب بسیار کارآمد در صنعت و نظر به قابلیت اتوماتیک نمودن MT موجب شده این آزمون غیرمخرب در صنعت خودروسازی بسیار استفاده شود. به عنوان مثال سالانه در آلمان بیش از یک بیلیون قطعه در صنعت اتومبیل‌سازی مورد آزمون ارزیابی‌های غیرمخرب ترک‌های سطحی واقع می‌شود که عمدتاً توسط تکنیک MT صورت می‌پذیرد [۷].

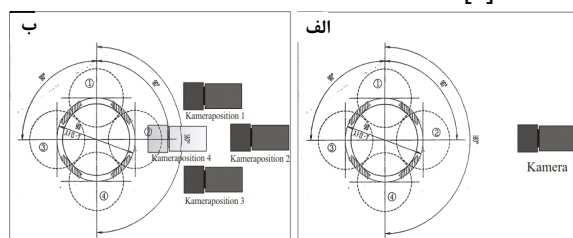


شکل ۲- شماتیک سیکل نیرو-جریان برحسب زمان در جوشکاری مقاومتی [۶].



شکل ۷- سیستم یکپارچه و اتوماتیک تست میل لنگ توسط MT
الف - کلیات سیستم، ب - ایستگاه مغناطیسی کردن.

برای آزمون ذرات مغناطیسی میل لنگ نهایی، بازرسی تمام سطوح ماشینکاری شده ضروری است. برای یک میل لنگ چهار سیلندر (شکل ۷-الف)، چهار ژورنال و پنج یاتاقان اصلی و همچنین چندین وزنه تعادل باید بازرسی شوند. با نگاهی به هندسه و شکل میل لنگ براحتی می توان دریافت که بازرسی با استفاده از دوربین های ثابت به نتایج مطلوبی منجر نمی شود. در طول یک چرخش شفت، ژورنال ها بر روی یک مدار دایره ای در اطراف یاتاقان های اصلی مطابق شکل (۸-الف) حرکت می کنند. همانگونه که در این شکل دیده می شود موقعیت و فاصله عمودی قطعه تا دوربین دایما تغییر می کند. برای ارزیابی نواحی مرزی ژورنال ها، می بایست دوربین ها حرکت شفت ها را دنبال کنند. در شکل (۸-ب) مسیر حرکت دوربین ها نشان داده شده است. حرکت افقی یعنی حرکتی که تثبیت فاصله بین دوربین و ژورنال را درک می کند. که از لحاظ نظری می تواند با استفاده از زوم اپتیکی جایگزین شود. اما از آنجایی که حرکت این نوع اپتیک ها موجب تغییر فاصله بین لنز و قطعه نسبت به فاصله کانونی می شود که موجب مشکلاتی در اندازه و کیفیت تصویر می شود. بنابراین با استفاده از یک سیستم اندازه گیری که براساس فوکاس نوری کار می کند، حساسیت سنسور نسبت به فاصله کانونی تنظیم می شود [۸]. در شکل (۹) ایستگاه بازرسی در آزمون غیرمخرب اتوماتیک میل لنگ در صنعت خودروسازی نشان داده شده است [۸].



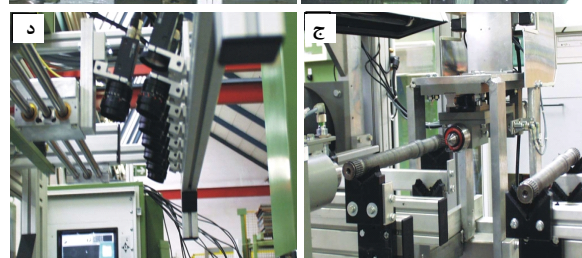
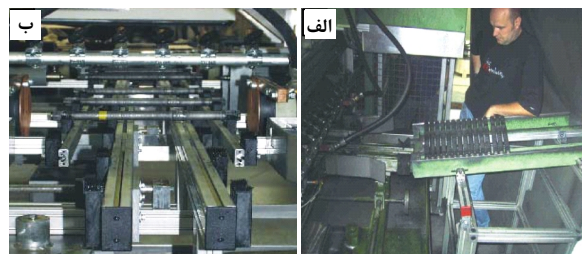
شکل ۸-الف- دیاگرام چرخش یک ژورنال ب- نمودار موقعیت های دوربین که میدان دید ثابتی را ایجاد نماید [۸].

در جدول (۱) اطلاعات فنی در خصوص سیستم ارزیابی میل لنگ با تکنیک MT ارائه شده است.

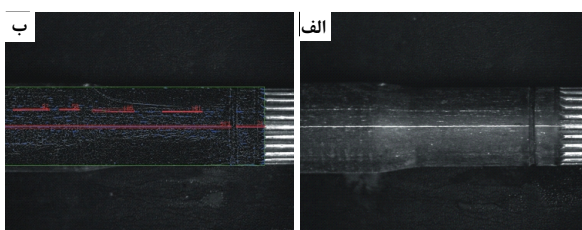
جدول ۱- اطلاعات فنی در خصوص سیستم ارزیابی میل لنگ با تکنیک MT.

اندازه میل لنگ	۴ تا ۱۲ سیلندر
مدت زمان بازرسی	۴۵ ثانیه برای میل لنگ ۴ سیلندره
ترک های قابل شناسایی	ترک های طولی و عرضی بر سطوح ماشین کاری شده
کوچکترین اندازه ترک قابل تشخیص	2mm
تعداد دوربین ها	دو دوربین مدار بسته (CCIR)
سیستم روشنایی	لامپ های جویای / لامپ فراینتش

عرض یک پیکسل تفکیک می شود. با توجه به این واقعیت که یک نشانه واقعی ترک بسیار باریک تر از نشانه کاذب است، به راحتی می توان ترک واقعی را از علایم کاذب تشخیص داد.



شکل ۵- بررسی اتوماتیک آزمون غیرمخرب MT بر میل لنگ. الف- شمای کلی، ب- شمای جزئی از قسمت حرکت قطعات برای آزمون، ج- دستگاه گیرش و جرخش قطعات، د- ایستگاه دوربین ها [۸].

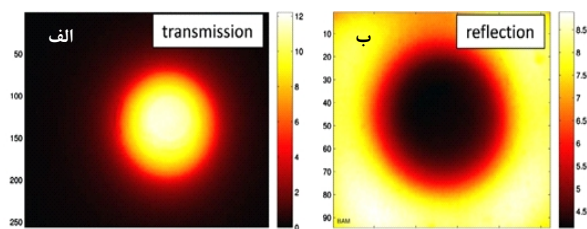


شکل ۶- نشانه MT از حضور عیب در شفت محرک در دو پردازش تصویر خاکستری (الف) و رنگی (ب).

2-2- MT و ارزیابی میل لنگ ها

در شکل (۷-الف) یک سیستم یکپارچه و اتوماتیک تست میل لنگ با MT نشان داده شده است. در این سیستم، مغناطیس کردن با سیم پیچ متحرک و یوک های چرخشی صورت می پذیرد. روش مغناطیسی ترکیبی از عبور جریان برای ارزیابی ترک های طولی و مغناطیس نمودن با سیم پیچ برای ارزیابی ترک های عرضی است. حین فرایند مغناطیس کردن، مایع حاوی ذرات مغناطیس بر قطعه واقع در سیم پیچ متحرک پاشیده می شود. در شکل (۷-ب) ایستگاه مغناطیسی کردن نشان داده شده است. میل لنگ از طریق نوار نقاله وارد دستگاه شده و در بین شاخک های یوک تنظیم و نگداشته می شود. یوک ها و همچنین سیم پیچ متحرک که در سمت چپ شکل دیده می شود، مغناطیسی می شود. پس از انجام فرایند مغناطیس کردن، سیم پیچ به موقعیت اولیه خود باز می گردد و توالی تشخیص ترک آغاز می شود. میل لنگ باید چرخانده شود تا سیستم مشاهده شود. با توجه عدم تقارن چنین شفتی، بازرسی کاملاً خودکار با دوربین ها انجام می شود.

همانطور که در شکل (۱۳) نمایش داده شده است، تصاویر حرارتی اصلاح شده در حین تابش و بازتابش حرارت در اثر ایجاد کنتراست توسط جوش نقطه ای که منجر به دماهای نسبی بالاتر در حین عبور (شکل ۱۳-الف) می شود، در حالی که جوش نقطه ای با دمای نسبی پایین تر در حین بازتابش (شکل ۱۳-ب) ظاهر می شود.

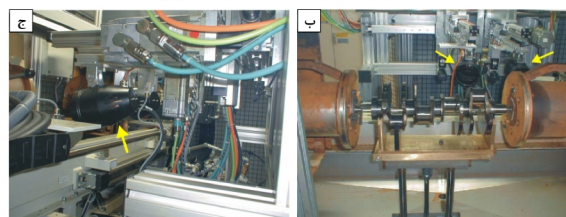


شکل ۱۱- تصاویر حرارتی اصلاح شده جوش های نقطه ای در حین تابش الف و بازتابش (ب) [۱۷].

مهندسان گروه **BMW** و مرکز توسعه فران هوفر به منظور توسعه و فناوری محصولات خود با استفاده از توموگرافی کامپیوتری با اشعه ایکس دو سال صرف این سیستم کردند که برای اولین بار در صنعت خودرو، در توسعه، تولید و تجزیه و تحلیل نمونه های اولیه تولیدی خود معرفی کرده است که در صنعت خودرو منحصر به فرد می باشد. این گروه، به لطف این فناوری، طیف کامل وسایل نقلیه از **MINI** تا رولزرویس، اکنون حتی در مراحل اولیه توسعه قابل کنترل کیفیت هستند. مطابق تصویر نشان داده شده (شکل ۱۲) اسکن ها با چهار ربات انجام می شود که در خارج از نمونه اولیه حرکت می کنند تا چندین هزار تصویر مقطعی تولید کنند و سپس برای بررسی دقیق تر با فناوری های کامپیوتری پیوند داده می شود. تا به حال، وسایل نقلیه برای تجزیه و تحلیل باید برچیده می شدند، اما **CT** اجازه می دهد تا بررسی ها با خودرو کاملاً سالم انجام شود. این سیستم در کارخانه آزمایشی گروه **BMW** در مرکز تحقیقات و نوآوری (**FIZ**) در مونیخ، در مراحل توسعه و تولید محصولات، بکار گرفته می شود. [۱۸]



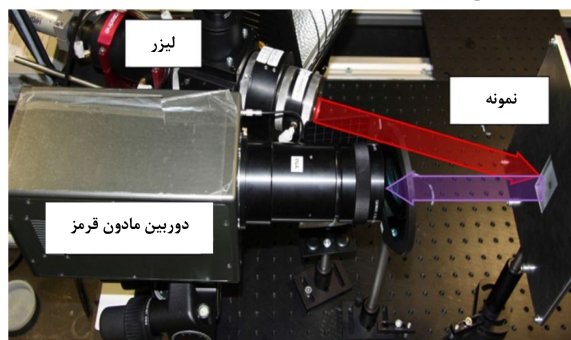
شکل ۱۲- ارزیابی و اسکن خودرو و توموگرافی کامپیوتری به وسیله ربات ها [۱۸].



شکل ۹- ایستگاه بازرسی ارزیابی اتوماتیک میل لنگ. (الف) حرکت ۳ بعدی دوربین ها، (ب، ج) سیستم روشنایی شامل لامپ های جیوه ای.

3- آزمون غیرمخرب حرارتی با توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس و صنعت خودروسازی

آزمون غیرمخرب حرارتی (**TG**) از تکنیک های غیر مخرب قابل استفاده برای ارزیابی کیفیت و قطر نقطه جوش ها می باشد [۹]. در تکنیک **TG** با اعمال نور لیزر به عنوان منبع حرارتی نوری و تنظیم هندسه تابش آن به محل جوش، ارزیابی کیفیت جوش بر اساس کنتراست گرماسنجی ثبت شده با دوربین مادون قرمز انجام می شود (شکل ۱۰). بدیهی است که کیفیت جوش نقطه ای (حضور یا عدم حضور عیب در نقطه جوش) بر اندرکنش پرتو و نقطه جوش تاثیر و در نتیجه ارزیابی نقطه جوش ها ممکن شود.



شکل ۱۰- سیستم آزمون غیرمخرب حرارتی در خصوص نقطه جوش [۱۲].

این تکنیک نیازی به تماس با نمونه ندارد، زیرا اجرای آن می تواند به روشی کاملاً نوری با استفاده از منابع حرارتی نوری مانند لیزر یا لامپ های فلاش انجام شود. [۱۰، ۱۱] قطر جوش نقطه ای ناشی از پاسخ انتشار گرما در محل مورد نظر به واسنجی سیستم آزمون به خصوص گرمای دریافتی بوسیله دوربین مادون قرمز بستگی دارد، همچنین قطر جوش نقطه ای تعیین شده با استفاده از **CT** اشعه ایکس، وابستگی یکسانی به جریان جوشکاری با قطر ناشی از آزمون حرارتی دارد.

در تعیین عرض اندازه گیری برای قطر واقعی جوش نقطه ای،

4- آزمون فراصوتی و صنعت خودروسازی

در سال ۱۹۴۲ میلادی برای اولین بار دانشمندی به نام دکتر فلویید فری استون توانست روشی برای تشخیص ناپیوستگی‌ها در مواد به وسیله یک مبدل بدون متلاشی کردن نمونه با استفاده از امواج فراصوتی ارائه دهد که آزمون غیرمخرب امواج فراصوتی نام گرفت و پس از آن در صنایع گوناگون شاهد پیشرفت چشمگیر این آزمون تاکنون بوده ایم. اولین کاربرد صنعتی این روش در Sonar بود که در زیردریایی‌ها به کار گرفته شد. این آزمون توانایی‌هایی از جمله ضخامت سنجی، شناسایی و اندازه گیری ناپیوستگی‌های داخلی، بررسی تنش پسماند و ... را داراست و همچون آزمون (MT) امکان اتوماتیک نمودن آن در اکثر تکنیک‌ها مهیاسست. در صنعت خودروسازی روشی مرسوم برای کنترل کیفیت و اطمینان از سلامت جوش‌های نقطه ای از این آزمون غیرمخرب استفاده می شود که شامل تکنیک‌های مختلفی برای بازرسی می باشد.

4-1- تکنیک تماسی پالس اکو

تکنیک پالس اکوی آزمون غیرمخرب فراصوتی روشی ثابت برای اطمینان از یکپارچگی جوش می باشد زیرا می تواند تشخیص دهد که آیا جوش دارای ناپیوستگی‌هایی از قبیل ترک و حفره است یا خیر، همچنین می تواند نفوذ ناقص و سایر عیوب جوش که به روش آزمون چشمی قابل مشاهده نیستند را بررسی کند. این نوع آزمایش جوش در بسیاری از استانداردها و رویه های جوشکاری اجباری شده است. همچنین به دلیل پیشرفت های اخیر در تجهیزات اولتراسونیک و طراحی مبدل‌ها که امکان انجام تست جوش نقطه ای را به سرعت و با دقت بیشتر می دهد، این روش پرکاربردترین روش در صنعت خودرو است اما باید به این نکته توجه داشت که دقت این تکنیک به مهارت اپراتور بستگی دارد [۱۹]. محقق هندی آزمایشی تجربی جهت بررسی کیفیت جوش نقطه ای با استفاده از آزمون غیرمخرب فراصوتی انجام داد. با تغییر پارامترهای فرایند جوشکاری مانند اختلاف زمانی بین ۱۰-۱ ثانیه و ولتاژ جوش ۸ کیلوولت، منطقه متاثر از حرارت بصری HAZ نتایج متفاوتی به دلیل طول زمان جوش دارد. در انجام آزمون از پروب استاندارد که قابلیت شناسایی ضخامت ۵ میلی متر به بالا استفاده شد که دارای فرکانس ۴ مگاهرتز، قطر ۱۰ میلی متر، برد ۱۰۰ و کوپلنت مورد استفاده روغن می باشد. تکنیک‌های شناسایی با استفاده از افت ۶ دسی بل، با سرعت صوت ۲۲۶۷ متر بر ثانیه آهن که با کمترین زمان ۱ ثانیه نتایج قابل شناسایی را نشان می دهد و در نتیجه اثر زمان جوش بر اندازه HAZ تأثیر می گذارد، در شکل (۱۳) ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) را نشان می دهد که با زمان جوشکاری متغیر ۱۰-۱ ثانیه متفاوت است، شرایط زمانی ۱ ثانیه منطقه متاثر از حرارت را بسیار کوچک نشان می دهد، اما با افزایش زمان جوشکاری مشاهده شد که منطقه متاثر از حرارت (HAZ) نیز بزرگ تر می شود. [۲۰].

تجهیزات فنی آزمون در جدول (۲) آمده است. پارامترهای جوشکاری نیز در جدول (۳) آمده است. پس از کالیبراسیون دستگاه عیب یاب التراسونیک، آزمون بر روی چندین نمونه با زمان‌های مختلف جوشکاری انجام گردید که شکل (۱۳-الف) نشان دهنده

میزان عمق نفوذ در زمان‌های جوشکاری ۶ تا ۸ ثانیه است و شکل (۱۳-ب) نیز میزان نفوذ و ضخامت را در زمان جوشکاری ۱۰ ثانیه نشان می دهد که با در نظر گرفتن ضخامت بلوک (۲۵ میلی متر) برای رعایت محدوده مجاز شناسایی مطابق استاندارد و همچنین ۱+ میلی متر ضخامت نمونه های جوشکاری شده در تصاویر ۱۳ دو ضخامت مختلف تحت تاثیر زمان های جوشکاری متفاوت حاصل شده است.



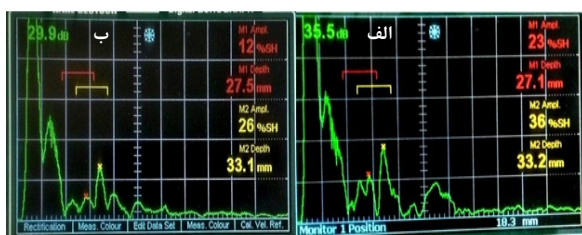
شکل ۱۳- اثر زمان جوشکاری بر منطقه متاثر از حرارت HAZ.

جدول ۲- تجهیزات فنی آزمون فراصوتی.

عیب یاب التراسونیک	
تک کریستاله ۴ مگاهرتز، قطر ۱۰ میلی متر	پروپ
MPKL	کابل پروپ
روغن	کوپلنت
VI	بلوک کالیبراسیون

جدول ۳- اطلاعات و پارامترهای جوشکاری در خصوص نمونه های مورد آزمون.

ضخامت قطعه کار (mm)	قطر کلاهک الکترود (mm)	نیرو (kg)	جریان (KVA)	زمان جوشکاری (s)
۱	۵	۲	۸	۱۰
۱	۵	۲	۸	۹
۱	۵	۲	۸	۸
۱	۵	۲	۸	۷
۱	۵	۲	۸	۶
۱	۵	۲	۸	۵
۱	۵	۲	۸	۴
۱	۵	۲	۸	۳
۱	۵	۲	۸	۲
۱	۵	۲	۸	۱



شکل ۱۴- نتایج تست مربوط به نمونه های جوشکاری شده در

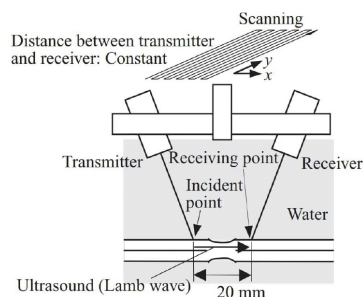
زمان های ۸ تا ۶ ثانیه

الف - زمان ۱۰ ثانیه ب- ضخامت ۲۵ میلی متر بلوک و ۱۰۱ میلی متر ورق جوشکاری شده.

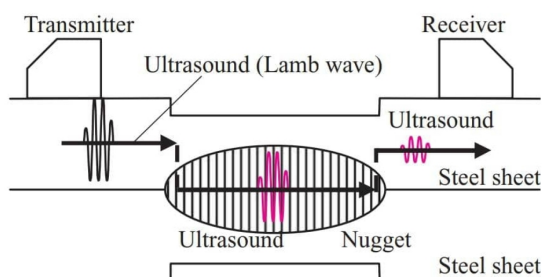
نمودار زیر حاصل اندازه گیری ضخامت ورق قطعه جوش است که بر روی چندین نمونه جوش اندازه گیری می شود، از زمان جوشکاری مختلف ۱۰-۱ ثانیه استفاده شده است، بنابراین می توان مشاهده

شدن بین پروب و جسم مورد آزمایش بستگی دارد که روش غوطه وری در از بین بردن تاثیر تغییرات در جفت شدن پروب و جسم موثر است (شکل ۱۸) [۲۲].

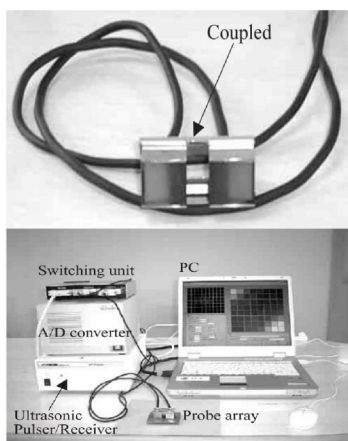
ظاهر یک سیستم اندازه گیری نشان داده شده است. واحد switchings بین پالسر و گیرنده فراصوتی و آرایه های پروب (آرایه های المان های پیزوالکتریک) اتصالات بین المان های پیزوالکتریک در آرایه پروب و پالسر و گیرنده فراصوتی را تغییر می دهند. تمام سیگنال های دریافتی تحت تبدیل A/D قرار می گیرند و با یک رایانه شخصی مدیریت می شوند. دامنه امواج ارسالی دریافت شده در محدوده زمانی تعیین شده پرواز با استفاده از یک برنامه پردازش سیگنال در رایانه شخصی مطابق شکل (۱۹) شناسایی و نمایش داده می شود.



شکل ۱۷- شماتیک تکنیک عبوری به روش غوطه وری.



شکل ۱۸- شماتیک آزمون فراصوتی (امواج بشقابی) تکنیک عبوری.

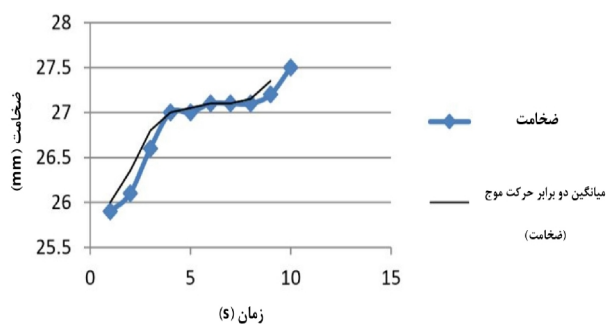


شکل ۱۹- اجزای سیستم آزمون فراصوتی شامل آرایه پروب کوپل شده، پالسر و دریافت کننده موج، رایانه شخصی، واحد Switching و تبدیل A/D.

کرد که زمان جوشکاری کمتر، ضخامت قطعه جوشکاری شده نیز کمتر است و مقدار زمان جوشکاری بیشتر اندازه ضخامت بزرگتری دارد و زمان جوش بر کیفیت نتیجه اندازه گیری نقطه جوش بر سطح قطعه با استفاده از آزمون غیرمخرب با استفاده از پروب های معمولی فراصوتی، نشان داد که ارزش زمان بر نتایج کیفی جوش تأثیر می گذارد.



شکل ۱۵- اجزا و نمونه آزمون.



شکل ۱۶- نمودار ضخامت نمونه ورق های تست شده بر حسب زمان جوشکاری [۲۰].

4-2- امواج بشقابی یا صفحه ای

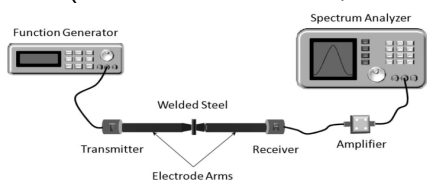
اصول اولیه روش آزمایش جوش نقطه ای غیر مخرب که توسط گروه JFE توسعه یافته است به گونه ای است که با استفاده از امواج فراصوتی (امواج بشقابی یا صفحه ای) مطابق شکل (۱۷) به یک ورق فولادی در "نقطه ارسال" خارج از فلز جوش نقطه جوش (ناگت) منتقل می شوند و امواج ارسالی از طریق در "نقطه دریافت" مخالف نقطه ارسال دریافت می شوند. از آنجایی که یک ساختار با قابلیت انتقال کم برای امواج فراصوتی (تضعیف بزرگ) در قطعه وجود دارد، امواج منتشر شده در امتداد سطح ورق فولادی متناسب با قطر قطعه میرا می شوند. [۲۱]

تضعیف امواج فراصوتی را می توان با پراکندگی امواج فراصوت ناشی از شکل پله مانند شکل گرفته در جوش نقطه ای تغییر داد. با این حال امواج در بسیاری از حالت های انتشار در طول یک ورق فولادی منتشر می شوند. به همین دلیل، استفاده از حالت انتشار با جابجایی ذرات بزرگ در نزدیکی مرکز ضخامت ورق، تأثیر شکل پله مانند را بر انتشار به حداقل می رساند. دقت اندازه گیری میرایی امواج به جفت

3-4- سیستم آزمون فراصوتی آنالین

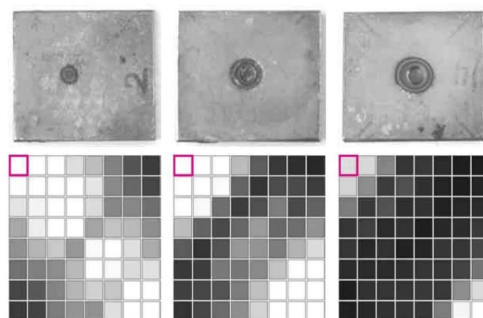
تکنیک عبوری، یک روش آزمایش فراصوتی است که در آن یک مبدل فرستنده و یک مبدل گیرنده در طرف مقابل جسم مورد آزمایش قرار می گیرند. سپس یک سیگنال فراصوتی از جسم عبور داده می شود. کاهش قدرت سیگنال دریافتی مورد انتظار نشان دهنده وجود یک نقص است از آنجایی که هم فرستنده و هم گیرنده برای انجام روش تست دریافت فرستنده مورد نیاز هستند، این نوع بازرسی غیرمخرب فراصوتی به ندرت در صنعت خودرو استفاده می شود زیرا دسترسی به هر دو طرف ساختار بدنه به اغلب غیرممکن است. با این حال، از آنجایی که این مقاله یک سیستم تست فراصوتی آنالین را پیشنهاد می کند که در آن بازرسی همزمان با جوشکاری انجام می شود، فرستنده و گیرنده فراصوتی را می توان بر روی بازوهای الکتروستگاه جوش نقطه ای قرار داد [۲۵].

گروه SORPAS با استفاده از سیستم شبیه سازی و بهینه سازی فرایند جوشکاری نقطه ای به منظور دستیابی به پارامترهای صحیح قبل از جوشکاری واقعی، برای کاهش ضایعات فولاد استفاده شد [۲۶]. سپس از فولاد IF180 برای انجام مجموعه ای از جوش ها با استفاده از پارامترهای انتخاب شده از شبیه سازی ها استفاده شد. جریان ۷ کیلو آمپر و تنظیم فشار ۳،۵ بار تنظیمات انتخاب شده بودند. آزمایشی به عنوان اثبات اصل به صورت آفلاین انجام شد، با استفاده از تنظیمات نشان داده شده در شکل های (۲۲ و ۲۳) که بازوهای الکتروستگاه واقعی و کلاهایک های الکتروستگاه جوشکاری نقطه ای را نشان می دهد. یک گیره نیروی مورد نیاز برای نگه داشتن کلاهایک های الکتروستگاه در تماس نزدیک با کوپن های فولادی را فراهم می کرد. ۵۰ جوش نقطه ای با افزایش زمان جوش اندازه گیری شده در چرخه های ۲۰ میلی ثانیه انجام شد تا شبیه جوش شکل دهنده باشد. جوش های تولید شده با استفاده از تست لایه برداری باز شدند و قطعات جوش حاصل اندازه گیری شدند. میانگین قطر قطعات برای هر چرخه در جدول (۴) نشان داده شده است، که نشان می دهد با افزایش زمان جوش، اندازه قطعه جوش حاصل بر این اساس افزایش می یابد. ۱ تا ۴ سیکل بدون جوش نبود و اگرچه قطر قطعه در سیکل های ۹ و ۱۰ بزرگتر است، به دلیل وجود پاشش در حین جوشکاری، جوش دارای ترک و حفره خواهد بود. هر یک از کوپن های فولادی جوش داده شده در بین دو کلاهایک الکتروستگاه قرار داده شد و با استفاده از نگهدارنده به طور ایمن نگه داشت. یک ژنراتور تابع (Tti TG2000 10MHz DDS) برای ارسال یک ولتاژ سینوسی به مبدل فرستنده استفاده شد. سیگنال الکتریکی حاصل با استفاده از تقویت کننده Mini Circuits ZFL-500LN که خروجی آن با استفاده از یک تحلیلگر طیف مانیتور شد (Hewlett Packard 8594E, 9 kHz-2.9 GHz).

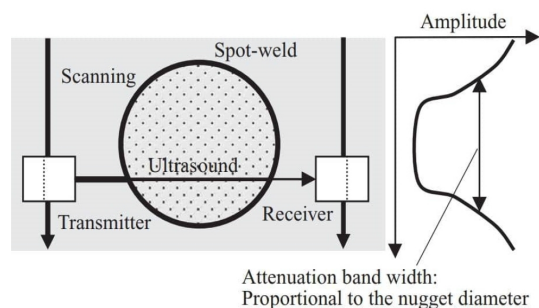


شکل ۲۳- راه اندازی آزمایشی فراصوتی.

در این آزمایش اندازه گیری نمونه های نماینده عناصر تیره رنگ که به صورت مورب به سمت پایین از چپ به راست حرکت می کنند، با نوار تضعیف مطابقت دارند. قطر جوش قطعه بزرگتر با پهنای باند تضعیف بزرگتر مطابقت دارد. پهنای باند تضعیف با استفاده از دامنه امواج دریافتی ارسال شده توسط المان در آرایه کاوشگر فرستنده و سپس توسط المان ها در آرایه پروب گیرنده دریافت می شود [۲۳].

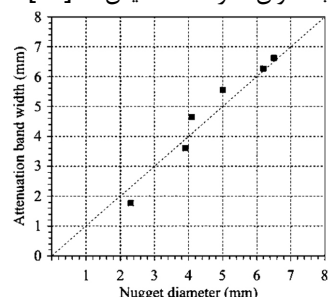


شکل ۲۰ - تطابق باند تضعیف با قطر جوش نقطه ای.



شکل ۲۱ - طرح عرض محدوده تضعیف حین عبور امواج از جوش نقطه ای.

دامنه های امواج عبوری که بین عناصر پیزوالکتریک روبروی هم منتشر می شود استفاده می شود. نمایه دامنه امواج ارسالی دریافتی در جهت آرایه با درون یابی با استفاده از دامنه امواج ارسالی دریافتی تعیین شد. سپس عرض بخشی که دامنه آن کمتر از مقدار آستانه از پیش تعیین شده بود به عنوان پهنای باند تضعیف اندازه گیری شد. رابطه بین پهنای باند تضعیف اندازه گیری شده با استفاده از روش فوق الذکر و قطر ناگت تعیین شده توسط آزمایش با استفاده از نمونه های نشان داده شده است. در نتیجه، ثابت شد که پهنای باند تضعیف را می توان به عنوان قطر قطعه نمایش داد [۲۴].

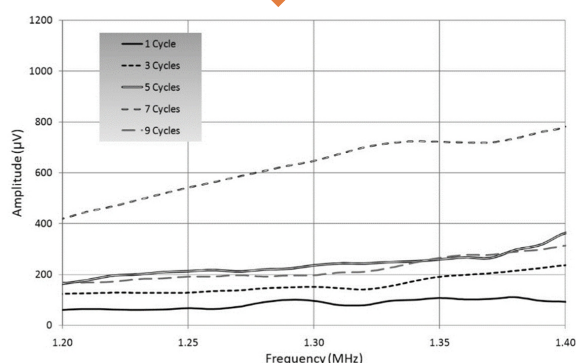


شکل ۲۲ - رابطه بین محدوده میرایی با قطر جوش نقطه ای.

- با استفاده از آزمون غیرمخرب حرارتی و تنظیم منبع حین تابش و بازتابش، می توان قطر ناگت جوش را با دقت قابل قبولی اندازه گیری کرد.

- در آزمون فراصوتی با استفاده از امواج بشقابی با برقراری ارتباط بین پدیده میرایی امواج و آرایه های المان های پیزوالکتریک امکان بررسی کیفیت جوش نقطه ای وجود دارد.

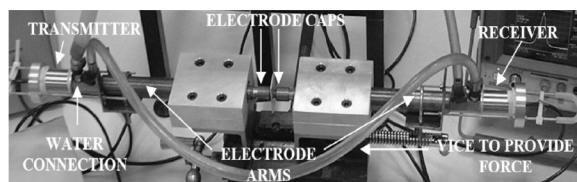
- سیستم آنالیز آزمون فراصوتی می تواند روشی موثر برای کنترل پارامترهای جوشکاری نقطه ای باشد.



شکل ۲۵- نتایج آزمون بر روی نمونه فولادی IF180 جوش داده شده با جریان ۷ کیلوآمپر و ۳/۵ بار.

منابع

- 1- "داستان ۵۰ سال خودروسازی در ایران"، شماره روزنامه، ۴۸۹۳، تاریخ چاپ، ۱۳۹۹/۰۲/۳۱.
- 2- اسفندیار جهانگرد، "صنعت خودروسازی و جایگاه آن در اقتصاد ایران"، پژوهشکده اقتصادی، شماره ۲۳، صفحه ۱۸۳-۲۰۶، زمستان ۱۳۸۵.
- 3- H. Zhang and J. Senkara, "Resistance Welding: Fundamentals and Applications", Second Edition, CRC press, 2012.
- 4- H. Jaber and T. Kovacs, "Dissimilar Resistance Spot Welding of Ferrite-Martensite Dual Phase Steel/Low Carbon Steel: Phase Transformations and Mechanical Properties", Published in Vehicle and Automotive Engineering 2, Springer International Publishing, 2018.
- 5- گروه سایپا، "الزامات کیفی نقطه جوشکاری مقاومتی گروه خودروسازی سایپا"، صفحه ۱۷، اسفند ۱۳۹۹.
- 6-AWS D8.6:2005, "SPECIFICATION FOR AUTOMOTIVE RESISTANCE SPOT WELDING ELECTRODES", 2005.
- 7-J. T. Schmidt, K. Skeie and P. McIntire (Editors), VOLUME 6 of NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, "MAGNETIC PARTICLE TESTING", Second Edition, 1989.
- 8-Thomas VETTERLEIN, Silvio GEORGI, TIEDE, Germany, "Application of Magnetic Particle Inspection in the Field of the Automotive Industry. ECNDT", ECNDT 2006 - Th.1.6.3.
- 9-Philipp Myrach, Florian Jonietz, Dietmar Meinel, Hubert Suwala and Mathias Ziegler, "Calibration of thermographic spot weld testing with X-ray computed tomography. Quantitative InfraRed Thermography", Quantitative InfraRed Thermography Journal, v. 14, pp. 122-131, 2017.



شکل ۲۴- نمای نزدیک بازوهای الکترود.

نتایج حاصل از این آزمایش، همانطور که در شکل (۲۴) نشان داده شده است، نشان می دهد که، همانطور که پیش بینی شد، هر چه زمان جوش کمتر باشد، دامنه سیگنال دریافتی کمتر می شود. این به دلیل شکاف های هوایی است که بین کوپن های فولادی وجود دارد، و با افزایش زمان جوش، اندازه این شکاف های هوا کاهش می یابد که فلز شروع به ذوب شدن می کند و در نتیجه دامنه بیشتری ایجاد می کند. با این حال، با افزایش زمان جوش به بالای ۸ سیکل، پاشش شروع به وقوع می کند و بنابراین دامنه سیگنال دریافتی به دلیل ناپیوستگی هایی که هنگام بیرون راندن فلز مذاب از قطعه جوش شکل دهنده ایجاد می شود، کاهش می یابد که در جدول زیر نشان داده شده است (شکل ۲۵).

جدول ۴- جدول قطر جوش ها برای تعداد ۱۰ تا ۱ چرخه جوش داده شده با ۷ کیلو آمپر و ۵/۳ بار.

Weld Time (Cycles)	Average Nugget Diameter (mm)	Splash
5	Stuck	No
6	2.4	No
7	2.9	No
8	3.7	No
9	4.9	Yes
10	5.2	Yes

تأثیرات مختلف بر کیفیت جوش نقطه ای مورد بحث قرار گرفته است. یک روش جدید اولتراسونیک غیر مخرب نیز مورد بررسی قرار گرفته است. این امواج اولتراسونیک را از طریق بازوهای الکترود جوشکاری نقطه ای منتقل می کند. نتایج یک تنظیم آزمایشی نشان داد که با شکل گیری جوش، سیگنال دریافتی در دامنه افزایش می یابد. پس از تولید ناپیوستگی ها، قدرت سیگنال به دلیل تغییر امپدانس صوتی بین فولاد و ناپیوستگی که از آن سیگنال ارسالی منعکس می شود، شروع به کاهش می کند.

مبدل های مورد استفاده برای دستیابی به نتایج ارائه شده است که هنگام استفاده از تکنیک عبوری، نیازی به داشتن مبدل های فرکانس بالا وجود ندارد، زیرا سیگنال ارسالی همپوشانی دارد و پژواک های بعدی رخ نمی دهد. یک تقویت کننده نیز برای تقویت سیگنال دریافتی در دست ساخت است. سیستم نهایی همچنین باید روی دستگاه جوش صنعتی نقطه ای آزمایش شود تا اطمینان حاصل شود که آیا این نتایج قابل تکرار هستند یا خیر.

5- نتیجه گیری

- آزمون ذرات مغناطیسی تحت نور فرابنفش در عیب یابی و تشخیص عیوب سطحی در میل لنگ و شفت های فولادی از کارآمدی بالایی برخوردار است.

19-Olympus- High Speed Video, Remote Visual Inspection, NDT, Non Destructive Ultrasonic Test Equipment. Olympus Corporation. [Online] Olympus, (2008), <http://www.olympusims.com/en/>

20-Baskoro, a. s., & Muzakki, h. (2016). The Effect of Welding Time and Welding Currents on Weld Nugget and Tensile Properties of Thin Aluminum a1100 by Micro Resistance Spot Welding. 11(2), 1050-1055.

21-TAKADA Hajime, HIROSE Tomoyuki, "An Ultrasonic Method for Testing Spot-Welds", JFE TECHNICAL REPORT, No. 10, Dec. 2007

22-The Japanese Society for Non-Destructive Inspection Ultrasonic Testing III. The Japanese Society for Non-Destructive Inspection. Tokyo, p. 235. (Japanese), 2001

23-Matsushima, T. Proc JSNDI Fall Conf. 2001. p. 57-58 (Japanese).

24-Rose, J. L. Ultrasonic waves in solid media, Cambridge Univ. Press, Cambridge, p. 101-126, 1999

25-N. Athi, S. R. Wylie, J. D. Cullen, M. Al-Jader, A. I. Al-Shamma'a and A. Shaw., " An online real time ultrasonic NDT system for the quality control of spot welding in the automotive industry". RF and Microwave Group, General Engineering Research Institute, Liverpool John Moores University, Byrom Street, Liverpool, L3 3AF, UK. Journal of Physics: Conference Series 178 (2009) 012013

26-SORPAS- Simulation and optimization of resistance projection and spot welding processes. Denmark : SWANTEC Software and Engineering ApS, (2008).

10-Rizhsky Politekhnikhesky Institut (Riga, SU), Fastritsky VS, Vingris LT, Ardentov VV, et al. Apparatus for non-destructive testing of spot welds using an electromagnetic Field. US Patent 4503392, 21. 7. 1981

11-Schlichting J, Brauser S, Pepker L, et al. Thermographic testing of spot welds. NDT&E Int. 2012;48:23

12-Maldague X. Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography. London: Springer; p.207, 1993

13-Balageas DL. Defense and illustration of time resolved pulsed thermography for NDE. Quant InfraRed Thermogr J. 2012;9(1):3-32.

14-Omar MA, Hassan M, Saito K, et al. Infrared thermography for inspection automotive welded joints. Int J Nondestr Test Eval. 2006;39:1-7.

15-Adams MJ, Crisman EM, inventors; Lockheed Corporation, assignee. Method of and apparatus for thermographic evaluation of spot welds. US Patent 4854724. 1986. Filing date: 5

16-Schlichting J, Brauser S, Pepker L, et al. Thermographic testing of spot welds. NDT&E Int. 2012;48:23.

17-Jonietz J, Myrach P, Suwala H, et al. Examination of spot welded joints with active thermography. J Nondestr Eval. 2016;35:1

18-Carolin Seidel, Sandra Schillmeier, Communications Production Network BMW Group, " Computer tomography in automotive construction: BMW Group uses X-ray measurements for vehicle analysis", Corporate Communications, p.1-3, 19 July 2018

پی نوشت

- 1- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد.
- 2- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد.



جوشکاری با خلوص بالا برای کاربردهای بهداشتی

مهندس احمد رضا وکیلی

تمیزکاری را ندارند و باید به صورت تمیزکاری در محل یا درجا (CIP) **Cleaned In Place** پاکسازی شوند، این کار از طریق پمپاژ مواد شوینده با سرعت بالا انجام می‌شود تا خطر تشکیل لایه‌های میکروبی بر روی سطوح تماس با محصول که می‌تواند منجر به آلودگی محصول شود را به حداقل برساند. یکی از ویژگی‌هایی که سامانه‌های بهداشتی برای بهبود اثربخشی تمیزکاری درجا (CIP) به کار می‌برند، سطوح صاف و صیقلی است. سطوح صاف‌تر، چسبیدن کلونی‌های باکتریایی را دشوارتر می‌سازند و در نتیجه فرایند تمیزکاری را مؤثرتر و آسان‌تر می‌کنند. مهندسان طراح معمولاً چندین قطعه و تجهیز مورد نیاز را برای یک فرایند تولید بر روی یک سکوی واحد به نام شاسی فلزی یکپارچه (Skid) چیدمان می‌کنند. برای فراهم کردن امکان تمیزکاری درجا (CIP)، رواداری‌های ساخت باید میزان تغییرات را در بخش‌هایی مانند هم‌راستایی محوری، گرده جوش، نفوذ اتصال، تحدب و تقعر جوش محدود کنند. برای تعیین میزان رواداری‌ها می‌توان به بخش ۶ از استانداردهای **AWS D18.1**، **AWS D18.2** مراجعه نمود. این شاخص‌های کیفی باید سخت‌گیرانه‌تر از شاخص‌های مورد استفاده در سامانه‌های معمولی فراوری سیالات باشند. یک نمونه رایج از سامانه **Skid** با کاربری بهداشتی در شکل (۱) نمایش داده شده است.

استانداردها نجات‌بخش هستند

پیش از انتشار استانداردهایی مانند سری **AWS D18**، مالکان تأسیسات تولید مواد غذایی و نوشیدنی اغلب مجبور بودند استانداردهای ساخت مخصوص به خود را تدوین کنند یا ریسک وجود شکاف کیفی بین نیازهای واقعی و آنچه در استانداردهای موجود ارائه شده بود را بپذیرند. این صنعت به مدرکی قابل فهم و

چگونه می‌توان از استاندارد **AWS D18** برای بهبود کیفیت جوشکاری لوله‌کشی‌های بهداشتی، مخازن، ظروف و سایر تجهیزات استفاده کرد.

جوشکاری با خلوص بالا می‌تواند برای بخش‌های مختلف صنعت جوشکاری معانی متفاوتی داشته باشد. برای صنایع غذایی و آشامیدنی، این استاندارد دارای الزامات ساخت و ساز است که ایمنی زنجیره تأمین مواد غذایی کشور را تضمین می‌کند. استانداردهای سری **D18** انجمن جوشکاری آمریکا (AWS) شامل این الزامات هستند. صنعت داروسازی به الزامات تا حدودی سخت‌گیرانه‌تری نیاز دارد، چرا که این صنعت به طور معمول تجهیزات خود را مطابق با استاندارد تجهیزات زیست‌فراوری انجمن مهندسين مکانیک آمریکا (ASME) تولید می‌کند. سخت‌گیرانه‌ترین الزامات برای ساخت تجهیزات بهداشتی مربوط به صنعت نیمه هادی است، جایی که استاندارد **SEMI F81** با عنوان مشخصات بازرسی چشمی و حدود پذیرش جوش‌های قوسی تنگستن با گاز محافظ (GTAW) در سامانه‌های توزیع سیالات برای کاربردهای تولید نیمه‌هادی به‌طور منظم مورد استناد قرار می‌گیرد. تأسیسات تولید مواد غذایی و نوشیدنی بخش عمده‌ای از سایت‌های تولید بهداشتی را تشکیل می‌دهند. بر همین اساس، این مطلب بر استانداردهای سری **AWS D18** تمرکز خواهد داشت.

تمیزکاری، تمیزکاری، و باز هم تمیزکاری

یکی از موارد مشترک در اغلب سامانه‌های بهداشتی (استریل) ضرورت اطمینان از تخلیه صحیح و قابلیت تمیزکاری مناسب سطوح در تماس با محصول است. این سامانه‌ها قابلیت باز شدن برای

آسان برای اجرا نیاز داشت که دارای سطوح کیفی مناسب و در عین حال انعطاف پذیری کافی برای پوشش دادن گسترده‌ای از کاربردهای موجود باشد. در پاسخ به این نیاز، کمیته فعالیت‌های فنی **Technical Activities Committee (TAC)** مربوط به **AWS** و هیئت مدیره این انجمن در پاییز سال ۱۹۹۵ با تشکیل کمیته **D18** برای جوشکاری در کاربردهای بهداشتی موافقت کردند. کمیته **D18** نخستین مشخصه خود را در سال ۱۹۹۹ با عنوان‌های زیر منتشر نمود.



شکل ۱ - یک سیستم شاسی فلزی یکپارچه (Skid) با کاربری بهداشتی معمولی شامل یک مخزن و لوله کشی برای افزودن ترکیبات مختلف به یک محصول بهداشتی/استریل.

استاندارد AWS D18.1 - مشخصات جوشکاری برای سامانه‌های لوله و تیوب از جنس فولاد زنگ‌زن آستنیتی در کاربردهای بهداشتی (استریل).

از زمان انتشار اولین مدرک، کمیته **D18** دو استاندارد دیگر نیز با عنوان‌های زیر منتشر نمود:

- استاندارد **AWS D18.2** - راهنما برای سطوح تغییر رنگ جوش در سطح داخلی تیوب‌های فولاد زنگ‌زن آستنیتی.

- استاندارد **AWS D18.3** - مشخصات جوشکاری برای مخازن، ظروف و سایر تجهیزات در کاربردهای بهداشتی (استریل).

مدرک چهارم با عنوان **AWS D18.4** - مشخصات جوشکاری ابزارهای جراحی ارتوپدی در حال حاضر در دست تدوین می‌باشد.

استاندارد AWS D18.1/D18.1M، با عنوان مشخصات جوشکاری برای سامانه‌های لوله و تیوب از فولاد زنگ‌زن آستنیتی در کاربردهای بهداشتی (استریل).

نخستین ویرایش از استاندارد **AWS D18.1** تنها به جوشکاری قوسی تنگستنی - گاز محافظ (GTAW) و جوشکاری قوسی پلاسمایی (PAW) برای لوله‌ها و تیوب‌های فولاد زنگ‌زن آستنیتی با قطر $\frac{1}{4}$ اینچ (۶ میلی‌متر) و بزرگ‌تر مربوط می‌شود. این استاندارد برای سامانه‌هایی که در فراوری لبنیات، گوشت، مرغ، سبزیجات، نوشیدنی‌ها و سایر محصولات که توسط انسان یا حیوان مصرف می‌شوند تدوین شده و به کار می‌روند. الزامات موجود در استاندارد **AWS D18.1** به گونه‌ای تدوین شده‌اند که انتظارات منطقی از کیفیت جوش‌های خودجوش **Autogenous** (بدون استفاده از فلز

پرکننده)، بدون آنکه نیاز به بازرسی‌های حجمی **Volumetric** یا بازرسی داخلی گسترده باشد فراهم نماید. در ویرایش سال ۲۰۰۹، دامنه‌ی کاربرد استاندارد گسترش یافت و آلیاژهای پایه نیکل نیز به آن افزوده شدند، چرا که استفاده از این آلیاژها در صنعت رو به افزایش بود. در ویرایش سال ۲۰۲۰، دو تغییر مهم اعمال شد:

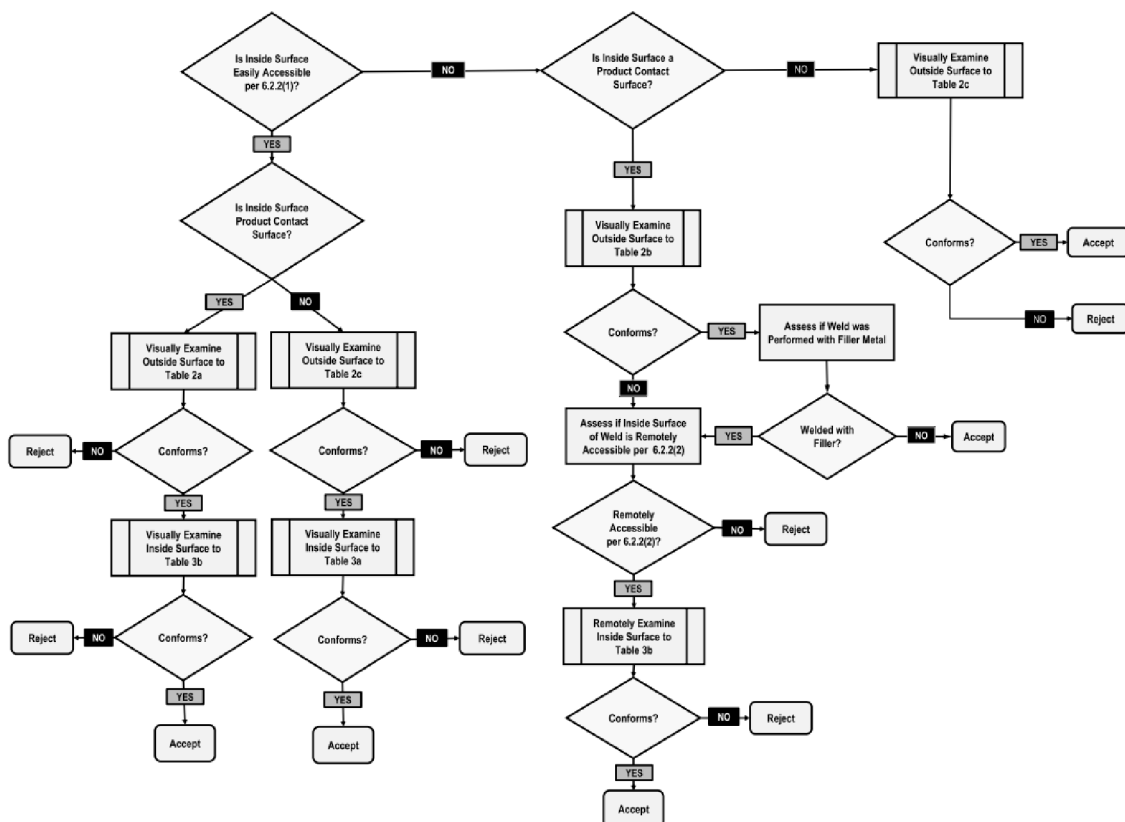
- ایجاد یک نمودار جریان برای ساده‌سازی و شفاف‌سازی الزامات بازرسی جوشکاری (به شکل ۲ مراجعه کنید).

- ارائه معیارهای پذیرش به صورت جدول بندی شده برای سهولت در بررسی و ارزیابی کیفیت جوش‌ها.

معیارهای پذیرش بازرسی چشمی در استاندارد **D18.1** الزامات مشخصی را برای جوش‌های شیاری ذوبی در کاربردهای بهداشتی تعیین می‌کند، به گونه‌ای که این الزامات باعث بهینه‌سازی فرایندهای تمیزکاری در جا (CIP) شده و خطر رشد میکروارگانیسم‌ها که می‌توانند محصول را آلوده کنند، به حداقل برسد. تمام جوش‌ها، چه به صورت دستی و چه به صورت خودکار، در سطحی که با محصول در تماس می‌باشند، باید به طور کامل و در تمام محیط اتصال دارای نفوذ کامل و بدون وجود تفرع یا تحذب بیش از حد در سطح جوش باشند. ناپیوستگی‌های جوش که می‌توانند بر قابلیت تمیزکاری یا تخلیه‌پذیری سامانه لوله‌کشی تأثیر منفی بگذارند، مانند ترک‌ها، بریدگی لبه‌ها، شکاف‌ها، تخلخل، حفره‌ها و فرو رفتگی یا بیرون زدگی، دلایلی برای مردود شدن جوش محسوب می‌شوند. شکل‌های **3A** و **3B** نمونه‌هایی از جوشکاری قابل قبول بر روی لوله‌های پرداخت شده یک سامانه با کاربری بهداشتی به صورت مکانیکی را نشان می‌دهند. یکی از نوآورانه‌ترین ویژگی‌های ویرایش ۱۹۹۹ استاندارد **AWS D18.2**، نمودار رنگی آن می‌باشد که مقادیر مختلف تغییر رنگ در سطح ریشه جوش را بر روی تیوب‌های فولاد زنگ‌زن آستنیتی نشان می‌دهد. تغییر رنگ سطح فولاد زنگ‌زن در اثر مقدار بیش از حد اکسیژن حین جوشکاری ایجاد می‌شود. این تغییر رنگ باعث کاهش مقاومت به خوردگی فلز شده و بنابراین، بسته به نوع کاربرد، باید محدودیت‌هایی برای پذیرش آن در نظر گرفته شود. این نمودار در شکل (۳) استاندارد **AWS D18.1/D18.1M:2020** آورده شده است.

استاندارد AWS D18.2، با عنوان راهنمای سطوح تغییر رنگ جوش در داخل تیوب‌های فولاد زنگ‌زن آستنیتی.

استاندارد **AWS D18.2:2020** یک مدرک مستقل است که شامل دقیقاً همان نمودار رنگی می‌باشد که در شکل (۳) از استاندارد **AWS D18.1**، ویرایش ۲۰۲۰ نیز آورده شده است. این مدرک عمده فاقد معیارهای پذیرش است و فقط سطوح تغییر رنگ مرتبط با مقادیر مختلف اکسیژن در گاز محافظ داخلی یا گاز پاکسازی **Purge Gas** را نمایش می‌دهد و هدف آن صرفاً ارائه یک مرجع چشمی برای ارزیابی تغییر رنگ جوش بوده و تصمیم‌گیری درباره پذیرش یا رد آن به سایر استانداردها یا الزامات سازمانی واگذار شده است. تعیین سطح مجاز تغییر رنگ جوش برای یک کاربرد خاص، بر عهده مالک یا بهره‌بردار سامانه است. این تصویر کنترل شده بر اساس رنگ، ابزاری است برای آنکه مالک سامانه و سازنده بتوانند به



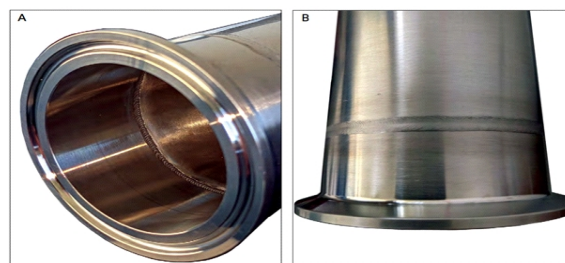
شکل ۲ - نمودار جریان فرایند الزامات بازرسی (جوش‌های بدون فلز پرکننده و با فلز پرکننده)، برگرفته از صفحه ۹ استاندارد AWS D18.1/D18.1M:2020.

استاندارد AWS D18.3، با عنوان مشخصات جوشکاری برای مخازن، ظروف و سایر تجهیزات در کاربردهای بهداشتی (استریل).

استانداردهای AWS D18.1 و AWS D18.2 به ترتیب به جوشکاری برای سامانه‌های لوله و تیوب و تغییر رنگ‌های مربوطه می‌پردازند. در سال ۲۰۰۵، کمیته D18 انجمن AWS با انتشار اولین ویرایش استاندارد AWS D18.3/D18.3M، دامنه تجهیزات تحت پوشش را گسترش داد تا شامل مخازن، ظروف تحت فشار، و سایر تجهیزات مورد استفاده در کاربردهای بهداشتی نیز شود. این مشخصات فنی به مخازن، ظروف تحت فشار و سایر تجهیزات مورد استفاده در کاربردهای تولید بهداشتی می‌پردازد. علاوه بر این، استاندارد شامل مواد دیگر نیز می‌شود که در این نوع تجهیزات به کار می‌روند، اما در لوله‌ها و تیوب‌ها چندان رایج نیستند.

اگرچه استاندارد AWS D18.3 به‌طور مستقیم به جوشکاری لوله و تیوب برای توزیع محصول نمی‌پردازد، اما جوشکاری لوله یا تیوب در مواردی از جمله زمانی که یک قطعه لوله یا تیوب به دهانه‌ای در مخزن یا ظرف به منظور استفاده به عنوان نازل جوش داده می‌شود، یا این قطعات به تجهیزاتی برای کاربردهایی غیر از توزیع سیال متصل می‌شوند، مانند پوشش‌های محافظ برای حسگرها، در دامنه پوشش این استاندارد قرار می‌گیرند.

صورت مشترک سطوح قابل قبول تغییر رنگ در جوش‌های تولیدی را تعیین و توافق کنند. از این رو، نمودار رنگی AWS D18.2 می‌تواند علاوه بر صنایع غذایی و نوشیدنی، در سایر صنایع نیز مورد استفاده قرار گیرد و به عنوان مرجع در کدها، استانداردهای دیگر یا مشخصات فنی مالکان تجهیزات ذکر شود. اگرچه این نمودار رنگی بر اساس تیوب‌های فولاد زنگ‌نزن طراحی شده است، اما می‌توان از آن برای جوش‌های انجام شده روی لوله‌ها، مخازن، ظروف تحت فشار و سایر تجهیزات نیز استفاده نمود. شکل (۴) نمودار رنگی از مدرک AWS D18.2 را نشان می‌دهد.



شکل ۳- الف - نمونه‌ای از جوش در کاربرد بهداشتی لوله بدون فلز پرکننده (Autogenous) که سطح ریشه جوش و قطر داخلی لوله را نشان می‌دهد؛ ب - نمونه‌ای از جوش در کاربرد بهداشتی لوله بدون فلز پرکننده که سطح رویی جوش و قطر خارجی لوله را نشان می‌دهد.

شکل (۵) یک ظرف تحت فشار را نشان می‌دهد که مشابه نمونه‌هایی است که مطابق با استاندارد **AWS D18.3** ساخته شده‌اند. این مشخصات فنی همچنین مفاهیم جدید متعددی را معرفی کرده است تا به افزایش شفافیت و هماهنگی بهتر میان مالک و سازنده سامانه در زمینه معیارهای پذیرش جوش کمک کند. یکی از این مفاهیم جدید، تعریف نواحی طبقه‌بندی سطحی یا **Surface Classification Zones (SCZs)** می‌باشد. شکل (۱) از استاندارد **AWS D18.3** مقطعی از یک نقشه مخزن معمولی با کاربری بهداشتی ارائه می‌دهد که به کمک آن می‌توان نواحی مختلف داخل مخزن را بر اساس میزان احتمال آلودگی محصول از یکدیگر تفکیک و طبقه‌بندی کرد. این طبقه‌بندی به تعیین دقیق‌تر معیارهای پذیرش جوش و پرداخت سطحی در هر ناحیه کمک می‌کند. این نواحی به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

- سطوح در تماس با محصول (**PCS - Product Contact Surface**)
- سطوح بدون تماس با محصول / قابل مشاهده (**NPCS/E - Nonproduct Contact Surface / Exposed**)
- سطوح بدون تماس با محصول / دور از دسترس (**NPCS/R - Nonproduct Contact Surface / Remote**)
- سطوح پنهان (**NES - Nonexposed Surface**)

این طبقه‌بندی، امکان استفاده از واژگان مشترک و مثال‌های مشخص را فراهم می‌سازد، به طوری که می‌توان سطوح مختلفی از الزامات را بسته به نوع ناحیه طبقه‌بندی سطحی (**SCZ**) اعمال کرد. برای مثال، یک مالک ممکن است سطح پرداخت صاف‌تری را برای یک سطح در تماس با محصول (**PCS**) بخواهد، در حالی که ممکن است برای سطوح بدون تماس با محصول / قابل مشاهده (**NPCS-E**) یا بدون تماس با محصول / دور از دسترس (**NPCS-R**)، سطح پرداخت زیرتر یا با کیفیت پایین‌تری را بپذیرد. همچنین استاندارد **AWS D18.3** دستورالعمل‌های دقیقی برای پرداخت سطحی جوش‌ها ارائه داده است. در این استاندارد، کمیته تدوین کننده هشت نوع مختلف از پرداخت سطوح جوش را تعریف کرده است که با کدهای **Weld Finish (WF-1 ~ WF-8)** شناخته می‌شوند. این طبقه‌بندی امکان درک مشترک و ارائه شاخص‌های قابل اندازه‌گیری برای پرداخت‌های مختلف نهایی سطوح جوش را فراهم می‌کند. این شاخص‌ها از حالت جوش به همان صورت اولیه بدون تغییر (**WF-1**) شروع شده و تا جوش‌هایی که کاملاً صاف‌کاری، صیقل‌کاری یا پرداخت سطحی الکتروشیمیایی شده‌اند و دارای مقدار مشخصی از زبری سطح (**Ra**) هستند (**WF-8**) ادامه می‌یابند. پرداخت‌های سطحی، از جمله پرداخت سطوح جوش‌ها، اغلب توسط مالکان با اصطلاحاتی مشخص می‌شوند که قابلیت اندازه‌گیری مستقیم ندارند، مانند **Grit 180** (اندازه زبری براساس دانه‌بندی سنباده)، **2B** (نوعی پرداخت سرد نورد شده در فولادهای زنگ‌زن)، یا **Mirror** (سطح آینه‌ای و بسیار براق). از آنجا که این اصطلاحات بسیار ذهنی هستند و روش عینی و قابل اندازه‌گیری مشخصی برای ارزیابی آن‌ها وجود ندارد، بروز اختلاف نظرها و سوء تفاهم‌ها میان مالک، بازرس و سازنده بسیار محتمل است. نسخه سال ۲۰۱۵ استاندارد **AWS** شامل اصلاحات فراوانی نسبت به نسخه

اولیه می‌باشد که در ادامه به برخی از نکات برجسته آن اشاره شده است:

- جدول مربوط به متغیرهای اساسی و غیر اساسی، الزامات مشخصات رویه جوشکاری، و فرم‌های نمونه آن به متغیرهای احراز صلاحیت و راستی‌آزمایی تغییر یافت. این تغییر باعث شد تا این الزامات پیشتر با دیگر استانداردهای **AWS** مانند **AWS B2.1/B2.1M** (مشخصات صلاحیت رویه‌ها و عملکرد جوشکاری)، و **AWS D18.1/D18.1M** (جوشکاری لوله‌ها و تیوب‌های زنگ‌زن در کاربردهای بهداشتی)، هماهنگ و منطبق شوند.

- دامنه کاربرد استاندارد در نسخه ۲۰۱۵ با شفافیت بیشتری تعریف شده است.

- تعدادی تعاریف، شکل (نمودار و تصویر)، و بخش‌هایی از متن در نسخه جدید استاندارد تغییر داده شده است تا هماهنگی بیشتری با استانداردهایی مانند **AWS A3.0M/A3.0** (اصطلاحات و تعاریف جوشکاری) و **AWS D1.6/D1.6M** (کد جوشکاری سازه‌ای برای فولاد های زنگ‌زن) ایجاد شود.

- چندین تبدیل واحد متریک در نسخه جدید استاندارد، مطابق با راهنمای به روز شده **AWS**، مورد بازنگری و هماهنگ‌سازی قرار گرفته‌اند.

استاندارد **AWS D18.4/D18.4M**، با عنوان مشخصات جوشکاری ابزارهای جراحی ارتوپدی

در سال ۲۰۱۵، درخواست ایجاد یک استاندارد اختصاصی برای محصولات ابزارهای پزشکی از طرف گروهی از مهندسان از چندین شرکت تولیدکننده به انجمن جوشکاری آمریکا (**AWS**) ارائه شد. ابزارهای جراحی برای انجام اقداماتی طراحی شده‌اند که میزان تماس آن‌ها با بدن بیمار می‌تواند از عدم تماس یا تماس تصادفی تا تماس موقت شدید، نفوذ به بافت، یا غوطه‌وری در زخم باز به مدت کمتر از ۲۴ ساعت متغیر باشد. روش رایج فعلی در صنعت برای ساخت ابزارهای جراحی، پیروی از رویه‌های جوشکاری صنعت هوافضا است، زیرا در صنعت هوافضا از استانداردهایی برای ساخت قطعات با مواد خاص و بسیار مقاوم در برابر خوردگی استفاده می‌شود که از نظر خواص متالورژیکی، مشابه با مواد به کاررفته در ابزارهای جراحی هستند. پس از گردآوری کارشناسان متخصص مورد نیاز برای زیر کمیته، کمیته **D18** انجمن جوشکاری آمریکا (**AWS**) از کمیته فعالیت‌های فنی (**TAC**) مربوط به **AWS** درخواست تأیید برای تدوین سند **AWS D18.4** را ارائه نموده است. این تأییدیه در سال ۲۰۱۷ دریافت شده است و پس از چندین سال تلاش مستمر، سند **AWS D18.4** اکنون در مراحل نهایی تدوین قرار دارد و انتظار می‌رود به زودی منتشر شود.

خلاصه

استانداردهای **AWS D18.2**، **AWS D18.1** و **AWS D18.3** راهنمایی‌ها و معیارهای پذیرش قابل اعتمادی برای ساخت تجهیزات بهداشتی در صنایع غذایی و نوشیدنی فراهم می‌کنند. این



شکل ۵ - مخزن تحت فشار با کاربری بهداشتی

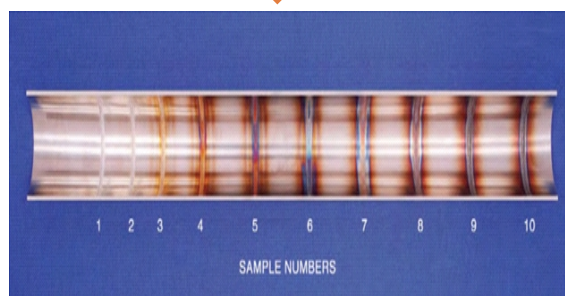
منابع

- WILLIAM ROTH and JAY KELLY - AWS Welding Journal- MAY 2021.
- AWS D18.1-2020- Specification for Welding of Austenitic Stainless-Steel Tube and Pipe. Systems in Sanitary (Hygienic).
- AWS D18.2-2009- Guide to Weld Discoloration Levels on Inside of Austenitic Stainless-Steel Tube.
- AWS D18.3-2015- Specification for Welding of Tanks, Vessels, and Other Equipment in Sanitary (Hygienic) Applications.

پی نوشت

رئیس بازرسی فنی شرکت توسعه انرژی سپاهان ایرانیان (ISEDICO)

استانداردهای شناخته شده صنعتی باعث بهبود ارتباط بین مالکان تجهیزات و سازندگان در خصوص الزامات کیفی جوشها، پرداختهای سطحی جوش، و تغییر رنگها می شوند. این امر به نوبه ی خود منجر به کاهش سردرگمی و افزایش بهره وری در مراحل تدوین مشخصات، ساخت، آزمون و بازرسی سیستمها و تجهیزات مورد استفاده در کاربردهای بهداشتی (استریل) شده است. با انتشار استاندارد **AWS D18.4**، حوزه پزشکی نیز دارای یک استاندارد اختصاصی برای بهبود کیفیت ساخت و معیارهای پذیرش در مورد ابزارهای جراحی ارتوپدی خواهد شد.



شکل ۴ - سطوح تغییر رنگ جوش در داخل لوله فولاد زنگ نزن آستنییتی، برگرفته از خلاصه استاندارد AWS D18.2:2020.



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

مهندس افشین خیام

در ممیزی‌های استاندارد ISO 3834 در سازمان یکی از موارد مهم و تأثیرگذار همین زیر بند استاندارد می‌باشد، که در آن مشخص می‌شود شرکت چقدر در فرایندهای برنامه‌ریزی تولیدشان کار کرده است. استاندارد یک حداقلی را مشخص کرده است، ولی سازمان‌ها بسته به بلوغ و تعالی‌شان این بند را خیلی سطح پایین و یا حتی ناچیز اجرا می‌کنند یا اینکه خیلی بالغ و شفاف در قالب نرم افزارهای قدرتمند انجام می‌دهند این بند استاندارد را بدون نرم افزار به خوبی نمی‌توان اجرا کرد. اگر برنامه‌ریزی تولید را به عنوان سازنده تهیه کرده باشید و آنرا وقتی می‌خواهید محصولی را تولید کنید باید قدم به قدم (Step by Step) فرایندهای تولید را مشخص کرده باشید و توالی (Sequence) را هم باید ذکر کرده باشید. رعایت کنید، نمودار فرایند عملیات (OPC) در واقع می‌آید با ترتیب و توالی از ابتدای شروع ساخت فرایند یک محصول شروع می‌شود و تا آخرین مرحله‌ای که بحث تحویل به مشتری و یا صحنه گذاری محصول است ادامه پیدا می‌کند. تمام مراحل تولید قدم به قدم (Step by Step) و پشت سرهم در نمودار OPC ذکر می‌شود. اولین چیزی که ممیز در این بند از شما مطالبه می‌کند نمودار OPC است. که شما به عنوان سازنده تهیه کرده‌اید. و آنرا به تایید کارفرما هم رسانیده‌اید. این برنامه‌ریزی برای تولید انجام می‌شود. باید به ممیز اثبات شود که روی اقلای که دارید تولید می‌کنید همه آن‌ها را طبق نمودار OPC تولید کرده‌اید. وجود یک فرم که تمامی مراحل‌های OPC در آن آورده شده باشد الزامی است. اسامی مثل logهای تولید، شناسنامه محصول، پاسپورت محصول یا گذرنامه محصول این مفهوم به شفاف سازی اطلاعات مربوط به یک محصول از مواد تشکیل دهنده گرفته تا فرایند تولید و چرخه عمر آن کمک می‌کند و اطلاعات کاملی را در اختیار مصرف کنندگان و ذینفعان قرار می‌دهد و قدم‌ها را از همان ابتدا تا انتها مشخص می‌کند.

گام 1- تحویل گیری مواد اولیه: در این مرحله سوابق آزمون‌ها و تایید

بند ۱۰- جوشکاری و فعالیت‌های وابسته (Welding and related activities)

این بند از استاندارد یکی از بندهای بسیار مهم و فنی می‌باشد که در این بند از استاندارد یکی از موارد مهم یعنی روش (Method) مورد بحث قرار می‌گیرد.

این بند استاندارد شامل پنج زیربند زیر می‌باشد:

- 10-1- برنامه‌ریزی تولید،
- 10-2- مشخصات دستورالعمل جوشکاری (WPS)،
- 10-3- تایید صلاحیت دستورالعمل‌های جوشکاری (PQR)،
- 10-4- دستورالعمل‌های کاری،
- 10-5- دستورالعمل‌های آماده سازی و کنترل مستندات.

10-1- برنامه‌ریزی تولید: سازنده باید برنامه‌ریزی تولید مناسبی انجام دهد. و به قدر کفایت برای تولید برنامه‌ریزی نماید. آنچه که در نظر گرفته می‌شود. باید حداقل شامل موارد زیر باشد:

- مشخصات ترتیب و توالی ساخت (برای مثال قطعات منفرد یا مونتاژ مقدماتی و مونتاژ نهایی)،
- مشخص کردن فرایندهای مورد نیاز برای ساخت (OPC)،
- ارجاع به رویه‌های مناسب برای جوشکاری و فرایندهای مربوطه،
- ترتیب و توالی جوشکاری،
- ترتیب و زمان بندی استفاده از فرایندهای مختلف،
- مشخصات فنی برای بازرسی و آزمایش و اینکه در هر مرحله کدام سازمان بازرسی عمل می‌کند،
- شرایط محیطی (برای مثال حفاظت در برابر باد و باران)،
- شناسایی برطبق بهره‌ها، قطعات یا قسمت‌ها (برحسب نیاز)،
- اختصاص کارکنان تایید صلاحیت شده،
- ترتیب هرگونه آزمایش تولید.

کنترل کیفیت بررسی می‌شود، که اثبات می‌کند این مواد اولیه طبق شرایط استاندارد خریداری شده است و واحد کنترل کیفیت هم تایید کرده است.

گام ۲- تمیزکاری مواد،

گام ۳- رولینگ مواد،

گام ۴- آماده سازی درز اتصال برای جوشکاری،

گام ۵- جوشکاری،

گام ۶- بازرسی،

گام ۷- رنگ کاری،

گام ۸- تست و آزمون،

برای هر محصول یکی از این فرم‌ها باید تکمیل شده باشد و موجود باشد، که نشان دهد تمام مراحل OPC را در این برنامه تولید یا شناسنامه (log) تولید آورده اید و دوم آن را اجرا کرده اید و یک نفر مثل واحد کنترل کیفیت آن را تایید کرده باشد، و حتما این مورد را در سازمان داشته باشند، که نشان‌دهنده احاطه بر تولید می‌باشد و نشان‌دهنده داشتن پایه و علاقمندی سازنده به استاندارد ۳۸۳۴ می‌باشد، و نشان‌دهنده داشتن کیفیت در محصول می‌باشد، و همین کار را هم می‌توان در قالب نرم افزار انجام داد خیلی جاها این کار را دارند انجام می‌دهند برای مثال خودروسازها که تعداد تولیدشان انبوه است و قطعه سازها نمی‌توانند بدون نرم افزار کارشان را پیش ببرند، اما در سازمان‌های کوچک همین فرم کاغذی هم باشد کفایت می‌کند. اگر log تولیدی، پاسپورت تولید یا شناسنامه تولید را داشته باشید علاوه بر اینکه این زیربند را می‌توانید پاس کنید می‌توانید بند ۱۷ استاندارد را هم "بحث شناسایی و قابلیت ردیابی" آنجا هم می‌توانید بگویید در هر محصول هر خط جوش را چه کسی جوشکاری کرده است و چه کسی بازرسی کرده است و مطابق کدام دستورالعمل و ردیابی‌ها هم خیلی قشنگ و کامل مستند می‌شود.

♦ مشخص کردن فرایندهای مورد نیاز برای ساخت (OPC) مشخص می‌شود، می‌توانید هر فرایند تولیدی را که انجام می‌دهید به دستورالعمل آن ارجاع بدهید، اگر شرایط محیطی خاصی مد نظرتان هست می‌توانید ذکر کنید.

10-2- مشخصات دستورالعمل جوشکاری (WPS)،

10-3- تایید صلاحیت دستورالعمل‌های جوشکاری (PQR)،

از الزامات اولیه تولید یک محصول جوشکاری، وجود دستورالعمل جوشکاری (WPS) است. دستورالعمل جوشکاری که باید تایید صلاحیت شود که با PQR گرفتن از آن می‌شود، WPS (Welding Procedure Specification) یک فرمی هست که روش اجرای یک خط جوش و یا گروهی از خط جوش‌ها را مشخص می‌کند. استانداردهایی وجود دارد که نحوه نوشتار WPS را خدمتان ارائه می‌کند، یکی از معروفترین و مهمترین استانداردهای WPS نویسی که از مراجع الزامی (Normative Reference) استاندارد ISO 3834 است، ISO 15609-1 این استاندارد نحوه نگارش WPS را برای جوشکاری قوسی (MIG، MAG، TIG، SAW) در این استاندارد صحبت می‌شود، پس مطابق با استانداردهای بین‌المللی WPS نوشته می‌شود. WPS در

حال حاضر قابل استفاده در خط تولید و روی محصول اصلی نیست، چون صلاحیت این WPS فعلاً "تایید نیست باید اصطلاحاً از این WPS، PQR گرفته شود، در واقع WPS که از آن هنوز PQR نگرفته اید و مورد تایید قطعی نیست به آن PWPS گفته می‌شود، یعنی WPS اولیه یعنی فقط نوشته‌ایم و نمی‌دانیم جواب می‌دهد یا نه؟ برای اینکه اطمینان پیدا کنیم که این WPS می‌تواند در خط تولید ورودی محصول هم پاسخگو باشد باید از PQR بگیریم. برای PQR گرفتن باید تایید کنید که WPS تان می‌تواند پاسخگو باشد یا خیر؟

روش‌های مختلفی در دسترس قرار می‌گیرد، ۵ روش برای PQR گرفتن در اختیار تان هست که شما می‌توانید یکی از این روش‌ها را استفاده کنید، استانداردهایی را که خود ISO برای PQR گرفتن به شما معرفی می‌شود.

1- ساده‌ترین روش PQR گیری که بخصوص در استانداردهای آمریکایی مثل ASME و AWS D1.1 به آن اشاره شده است استفاده از WPS‌های استاندارد است، یعنی یکسری WPS‌هایی هستند که بیشتر کاربرشان در ارتباط با متریال‌های پراستفاده و شرایط پرکاربرد استفاده می‌شود، مثل St-37، فولاد زنگ نزن و روش‌های جوشکاری پراستفاده برای آن‌ها بیشتر وجود دارد، یکسری از سازمان‌ها WPS‌ها را خودشان نوشته‌اند و از آن PQR گرفته‌اند و گفتند اگر طبق این WPS که ما می‌گوئیم جوشکاری می‌کنید، یعنی با همین متریال، همین طرح اتصال، همین آمپر، همین گاز اگر طبق این کار می‌کنید دیگر نیازی به PQR گرفتن توسط شما نیست و نیازی نیست بروید تست بکنید و هزینه بدهید، ما خودمان اینکار را انجام داده‌ایم اینها مورد تایید است به این روش Standard WPS می‌گویند که استاندارد آن ISO 15612 است. و در ارتباط با Standard Welding Procedure است در واقع به WPS‌هایی اشاره می‌کند که به شکل استاندارد وجود دارد و شما دیگر نیازی به تست گرفتن از اینها ندارید.

2- یکی از معروفترین و پرکاربردترین روش‌های PQR گیری همان روش Sample Test است، یعنی شبیه همان کاری که برای تست جوشکار انجام می‌شود یک نمونه‌ای را در اختیار یک جوشکار با صلاحیت و یک دستگاه و تجهیز با صلاحیت قرار می‌دهیم و می‌گوئیم مطابق این PWPS اولیه جوشکاری را انجام دهید و جوشکاری بر روی این نمونه انجام می‌شود و طبق استاندارد آزمون‌هایی را که مشخص کرده است را انجام می‌دهید، اگر آن آزمون‌ها تایید شدند و آن کیفیت جوش مطابق استاندارد به تایید رسید آن دستورالعمل از فاز مقدماتی (Preliminary) به فاز WPS تایید شده وارد می‌شود و آن WPS اجازه استفاده در خط تولید را پیدا می‌کند. این دو روش PQR گرفتن یکی از پرکاربردترین روش‌های PQR گیری هستند.

1- Standard WPS

2- استفاده از روش Sample Test

3- اما روش‌های دیگری هم هستند مثل روش Previous Experience یعنی WPS را که در پروژه‌های قبلی و تجربه‌های

قبلی استفاده می کردید و آنجا کاربرد داشته و مورد تایید بوده است و محصولش هم تایید شده است، و سال ها هم دارد تجربه خودش را پس می دهد الان **WPS** تو کار شما دقیقا مشابه همان کار است استفاده می شود که به آن **Previous Experience** گفته می شود، که استاندارد آن **ISO 15611** است.

4-روش PQR گیری به نام **Pre-Production Welding Test** می باشد که در اینگونه موارد می گویند به جای اینکه **Sample Test** در بیاورید، بیائید دو سه قطعه اول تولید را استفاده کنید طبق شرایط تولید (بدون توجه به **Sample Test**) خود محصول را تولید کنید، این روش بیشتر جاهایی استفاده می شود که نمونه های کوچکی دارد و قیمت بالایی ندارند.

تیراژ تولید بالاست ما از دو سه نمونه اول استفاده می کنیم و این دو سه نمونه اول را با آن **PWPS** جوشکاری می کنیم بعد می آئیم اینها را مورد تست عملکردی قرار می دهیم. مثل تست فشار هوا، تست با آب، تست نشتی، حتی شاید بخواهید رادیوگرافی انجام دهید، و یا چیزهای دیگری که استاندارد به آن اشاره شده است اینها را تست می کنیم، دو سه نمونه اول را تست می کنیم و اگر ببینیم به لحاظ عملکردی، عملکرد درستی از خودشان نشان می دهند **WPS** را تایید می کنیم و به عنوان یک **WPS** تایید شده اجازه پیدا می کند برای سایر محصولات خط تولید استفاده شود، فقط وجود **WPS** ها کفایت نمی کند و باید از اینها استفاده کنیم. **WPS** را یکی در اختیار واحد تولید یا جوشکار قرار می دهیم که بتواند اجرا کند، یک نسخه را هم در اختیار بازرس جوش قرار می دهیم که کنترل کند، (بازرسی در حین جوشکاری) و یک نسخه اصلی را هم در آرشیو صنعت نگهداری می شود، اما **PQR** ها فقط باید نگهداری شوند، اینها

پشتوانه **WPS** هستند، تمامی آزمون ها **Sample Test** هایی که برای **PQR** تهیه می کنید به عنوان پشتوانه آن **PQR** باید تست سوابقش را حفظ بکنید، مهم این است که اجرا در کارگاه با **WPS** مطابقت داشته باشد، که استاندارد آن **ISO 15613** است.

10-4- دستورالعمل های کاری: دستورالعمل های کاری باید مطابق با **WPS** باشد، ممکن است سازنده از **WPS** ها به طور مستقیم به منظور ساخت استفاده کند، همینطور ممکن است از دستورالعمل های کاری در برگیرنده جزئیات استفاده شود. این دستورالعمل های کاری در برگیرنده جزئیات باید از یک **WPS** تهیه شده و نیازی به تایید کیفی جداگانه ندارد، هر سندی هر برگه ای هر دستورالعملی که به واحد تولید داده می شود باید یک مهر کنترل مستندات شرکت روی آن زده شده باشد که مطمئن شوید هرکسی از هر جایی یک کاغذی را بر نمی دارد و بیاورد اجرا کند.

10-5- رویه های آماده سازی و کنترل مستندات: رویه ها (روش های اجرایی) برای تهیه و کنترل مستندات هر کاری که انجام می دهید روش اجرایی مربوط به خودش را داشته باشید (روش اجرایی نگهداری و تعمیرات (نت) تجهیزات، روش اجرایی انبارداری مواد مصرفی جوشکاری و ...) در سازمان مهر و کنترل مستندات مربوط به کیفیت (نظیر **WPS**، **PQR**، گواهینامه تایید کیفی جوشکاران و اپراتورهای جوشکاری) را تهیه کرده و نگهداری نماید.

پی نوشت

- مدیر تضمین کیفیت شرکت ناظران یکتا

اثر سرعت چرخشی و پیشروی پین و افزودن ذرات پودر آهن بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم خالص تجاری به روش جوشکاری اصطکاکی - هم زنی

سیامک فرهادی^۱، حامد ثابت^۲

چکیده

در این پژوهش اثر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی - هم زنی شامل سرعت پیشروی و دورانی بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیوم خالص تجاری همراه با افزودن پودر آهن به درز اتصال جهت افزایش استحکام جوش مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ورق آلومینیوم خالص تجاری در ابعاد $150 \times 100 \times 5$ mm آماده سازی شد. به منظور بررسی اثر سرعت های چرخشی و پیشروی ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش، سرعت های چرخشی ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۵۰ دور بر دقیقه و سرعت های پیشروی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی متر بر دقیقه انتخاب شدند. همچنین به منظور بررسی اثر افزودن پودر آهن، مقادیری از آن با درصدهای وزنی ۱٪، ۵/۱٪ و ۲٪ به درز اتصال افزوده شد. پس از اجرای فرایند جوشکاری، نمونه های مورد نظر جهت آزمایش های سختی سنجی و استحکام کششی و نیز بررسی های ریزساختاری و الگوی پراش اشعه ایکس آماده سازی شدند. نتایج حاصل از بررسی های ریزساختاری نشان داد که تغییر سرعت دوران و پیشروی ابزار از طریق تبلور مجدد دانه ها و یا نرخ سرمایش می تواند اثر قابل ملاحظه ای را بر کیفیت اتصال نهایی و خواص مکانیکی آن داشته باشد بطوری که استحکام کششی نهایی به بالاترین مقدار خود یعنی ۱۴۲ مگاپاسکال می رسد. از طرف دیگر مشخص شد که افزودن پودر آهن به محل اختلاط اثر مفیدی بر استحکام نمونه ها داشته بطوری که استحکام کششی نهایی و تسلیم نمونه با بالاترین مقدار پودر اضافه شده به ترتیب برابر ۱۵۳ مگاپاسکال و ۱۳۹ مگاپاسکال بدست آمد.

مواد پلاستیکی از جلو به عقب پین شده و ضمن فورج شدن آن منجر به تکمیل فرایند اتصال می گردد. از آنجایی که جوشکاری اصطکاکی - هم زنی یک فرایند حالت جامد می باشد، ریزساختار انجمادی در منطقه جوش وجود نخواهد داشت. بنابراین تمام عیوب مرتبط با حضور فازهای یوتکتیکی و بسین دندریتی ترد نیز وجود نخواهند داشت [۳]. متغیرهای اصلی فرایند جوشکاری اصطکاکی هم زنی که بر استحکام و ریزساختار جوش تأثیر گذار هستند شامل سرعت چرخشی و پیشروی، نیروی محوری و زاویه ابزار می شود [۴]. ابعاد و شکل هندسی ابزار، نقش مهمی را در کیفیت اتصال جوشکاری ایفا می کنند. پیش از این مطالعات بسیاری درباره جوشکاری آلیاژهای غیرمشابه آلومینیوم انجام شده است [۵-۱۵]. پیل و همکارانش [۷] و استور و همکارانش [۸] مطالعاتی را درباره اثر سرعت دورانی و پیشروی ابزار بر ریزساختار، سختی و توزیع رسوبات اتصال آلیاژهای آلومینیوم AA5083 و AA6082 انجام دادند. لیتائو و همکارانش [۹] رفتار کششی اتصال آلیاژهای AA5182-H111 و AA6016-T4 را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که اندازه دانه در منطقه TMAZ و توزیع رسوبات بر رفتار کششی این آلیاژها اثر گذار هستند. در این مطالعه سعی بر آن شد تا دو ورق آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ تحت سرعت های دوران و پیشروی مختلف با استفاده از فرایند جوشکاری اصطکاکی هم زنی، به یکدیگر متصل شده تا ضمن بررسی کیفیت جوش با استفاده از تکنیک های غیرمخرب، اثر متغیرهای مربوطه بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ مورد بررسی قرار گیرند.

۲- مواد و روش تحقیق

در این مطالعه از ورق آلیاژی آلومینیوم خالص تجاری و پودر آهن خالص با مش بندی ۱۰۰ میکرومتر استفاده شد. ترکیب شیمیایی حاصل از آنالیز اسپکتروسکوپی نشر نوری آلیاژ آلومینیوم خالص تجاری مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است. ابعاد ورق های آلومینیومی بریده شده جهت جوشکاری اصطکاکی - هم زنی برابر $150 \times 100 \times 5$ mm بودند.

در این تحقیق از سه سرعت دورانی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دور بر دقیقه و سه سرعت پیشروی ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۵۰ میلی متر بر دقیقه استفاده شد. به منظور بررسی اثر افزودن پودر آهن بر خواص مکانیکی اتصال، مقادیری از پودر آهن به درز اتصال جوش اضافه شد. طرح پین مورد استفاده در شکل (۱) نمایش داده شده است. پین از جنس فولاد گرماکار H13 و هندسه آن بصورت استوانه ای انتخاب شد.

کلمات کلیدی: آلیاژ آلومینیوم خالص تجاری، جوشکاری جوشکاری اصطکاکی - هم زنی، سرعت چرخشی و پیشروی پین، پودر آهن.

۱- مقدمه

تکنیک جوشکاری اصطکاکی هم زنی، روشی مناسب از نوع حالت جامد است که با استفاده از آن می توان آلیاژهای آلومینیوم غیرمشابه را جوشکاری کرد [۱]. روش جوشکاری جوشکاری اصطکاکی - هم زنی در انستیتوی جوشکاری انگلستان در سال ۱۹۹۱ پایه گذاری شد [۲]. در این روش، ابزار شامل دو بخش شانه و پین بوده و مواد پایه در اطراف پین بواسطه حرارت ناشی از اصطکاک بوجود آمده در اثر حرکت چرخشی ابزار، نرم می شوند. پیشروی ابزار سبب جابجایی

شده با استفاده از میکروسکوپ نوری از نمونه شماره ۱ نشان داده شده است. با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته و با توجه به تصاویر استاندارد، برای این نمونه و سرعت دورانی ۴۰۰ دور بر دقیقه، مشاهده می شود که عدد اندازه دانه نمونه ۱ حدود ۵ و نمونه شماره ۱۰ حدود ۸ می باشد (شکل ۴-ب).

در این روش جوشکاری، چرخش ابزار در طول مسیر پیشروی باعث ایجاد گرما در داخل ناحیه جوش شده و بنابراین هر چه مقدار سرعت چرخش و دوران پین، افزایش یابد حرارت ایجاد شده نیز بیشتر خواهد بود [۱۷]. با توجه به این نکته، چون نمونه شماره ۱ نسبت به سایر نمونه ها با سرعت دوران کمتری تحت جوشکاری قرار گرفته است انتظار می رود که اختلاط کمتری را نیز ایجاد کرده و حرارت ناشی از آن نیز کمتر باشد زیرا با زیاد شدن سرعت دورانی پین، امکان اختلاط مواد پلاستیکی شده در ناحیه جوش افزایش خواهد یافت که این یک عامل مثبت محسوب می شود. از طرف دیگر با افزایش سرعت چرخش پین، سرعت دوران شانه روی ابزار نیز افزایش پیدا می کند. این افزایش باعث ایجاد حرارت بیشتر در ناحیه بالای سطح جوشکاری خواهد شد اما هر چه سرعت پیشروی ابزار نیز افزایش یابد، میزان اثر سرعت دوران پین کاهش خواهد یافت [۱۸]. میزان گرمای تولید شده بر اثر دوران پین مابین دو ورق آلومینیومی خالص تجاری، یک حالت بهینه دارد. این بدان معنی است که اگر گرمای تولید شده بر اثر دوران ابزار به اندازه کافی بالا نباشد امکان ایجاد یک فصل مشترک اتصال مناسب به علت کم بودن حرارت تولید شده نیز کمتر خواهد بود. بنابراین کیفیت جوش ایجاد شده بین دو آلیاژ پایه از نظر خواص مکانیکی آن ضعیف خواهد بود.

در شکل (۵) نتایج حاصل از بررسی با میکروسکوپ نوری برای نمونه های شماره ۶ و ۱۱ ارائه شده است. با توجه به بررسی های میکروسکوپی انجام شده در این نمونه ها مشخص شد که عیوبی همچون عیب عدم همجوشی در منطقه اتصال وجود دارد. علت این امر آن است که سرعت دورانی پایین ابزار و سرعت پیشروی بالای آن سبب عدم اختلاط و خمیری شدن مواد در منطقه جوش و ظاهر شدن عیوب جوش می شود. از طرف دیگر نیز اگر سرعت پیشروی به اندازه کافی بالا باشد می توان اثر مثبت سرعت دوران ابزار را نیز در روش جوشکاری اصطکاکی - هم زنی کاهش دهد. از این رو انتظار می رود تا عیوبی همچون ریز ترک ها و حفرات در نتیجه عدم اختلاط مناسب بین دو فلز پایه، در محل اتصال تشکیل شوند.

نتایج بدست آمده نشان داده است که با افزایش سرعت پیشروی پین اندازه دانه ها کاهش خواهند یافت. به عبارت دیگر با کاهش سرعت جوشکاری انتظار می رود ریز ساختار با دانه بندی درشت تر مشاهده شود. عدد اندازه دانه در نمونه شماره ۴ حدود ۵ و در نمونه شماره ۳ حدود ۶ تخمین زده شد. با دقت در شکل ۶ و مقایسه حالت های الف و ب مشاهده می شود که اندازه دانه ها در نمونه شماره ۴ با سرعت پیشروی کمتر و برابر ۲۰ میلی متر بر دقیقه نسبت به نمونه شماره ۳ با سرعت جوشکاری ۶۰ میلی متر بر دقیقه، درشت تر می باشد. علت این امر آن است که با افزایش سرعت پیشروی، اصطکاک بین ابزار با

جهت جوشکاری اصطکاکی - هم زنی و ایجاد کامپوزیت مورد نظر شیار به پهنای ۲/۵ میلی متر و عمق ۳ میلی متر در طول ورق ایجاد شد و شیار مورد نظر کاملاً بوسیله استون تمیز و خشک شده و پودر با مقادیر درصد وزنی ۱٪، ۱/۵٪ و ۲٪ به شیار افزوده و داخل شیار فشرده شد. در شکل (۲) طرح اتصال و ابعاد آن نشان داده شده است. به منظور جلوگیری از حرکت و ارتعاش های ناخواسته ورق های آلومینیومی در حین جوشکاری، فیکسچری بصورت شکل (۳) طراحی و ساخته شد.

در جدول (۲) مشخصات مربوط به هر نمونه همراه با شماره آن آورده شده است. جهت بررسی خواص مکانیکی مقاطع جوشکاری شده، نمونه های آزمون کشش طبق استاندارد **ASTME8** با فرایند ماشینکاری عمود بر خط جوش از نمونه ها تهیه شد. به منظور صحت آزمون انجام شده، برای اطمینان از صحت داده های حاصل از آزمون کشش برای هر حالت ۲ نمونه تهیه شده و با تکرار پذیری ۲ مرتبه آزمون کشش صورت گرفته است.

به منظور اجرای فرایند سختی سنجی قطعات مذکور از روش میکرو ویکرز و استاندارد **ASTME10** استفاده شد. سختی سنجی قطعات در منطقه جوش و مناطق مجاور انجام شد به نحوی که اعداد گزارش شده میانگین سه عدد سختی بدست آمده باشد. نیروی سختی سنجی در آزمایش ۱۰۰ گرم و زمان توقف یا ماندگاری ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد. جهت بررسی ریز ساختار و دانه بندی ناحیه هم زنی یافته و مناطق مجاور آن و نیز اندازه پودر آهن مورد استفاده، از دستگاه های میکروسکوپ الکترونی روبشی و نوری بهره گرفته شد. جهت فرایند متالوگرافی، نمونه ها تا دانه بندی ۳۰۰۰ سنباده زنی شده و در نهایت با استفاده از دستگاه پولیش شدند. سپس نمونه ها با محلول حک کاری کلر برای آشکار شدن ریز ساختار آلیاژ اچ شدند. حداکثر قدرت تفکیک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی، ۱ نانومتر با بزرگنمایی مفید ۳۰۰۰ برابر و حداکثر ولتاژ کاری آن ۳۰ کیلوولت بود. به منظور بررسی و شناسایی فازهای تشکیل شده در منطقه جوش از آنالیز الگوی پراش اشعه ایکس بهره گرفته شد. نمونه های مربوطه پس از آماده سازی، در زمان شمارش ۰/۵ ثانیه، با ولتاژ ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی آمپر تحت آنالیز قرار گرفتند.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی های ریز ساختاری

در شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از نمونه های ۱ (400 r/min و 40 mm/min)، نمونه ۱۰ (800 r/min و 40 mm/min) و نمونه ۱۲ (1250 r/min و 40 mm/min) آورده شده است. پارامتر سرعت دورانی ابزار یکی از مهم ترین و اصلی ترین متغیرهای فرایند محسوب می شود. حتی بررسی ها نشان داده است که هر دو عملکرد اصلی ابزار جوشکاری اصطکاکی - هم زنی یعنی ایجاد اصطکاک و در نتیجه آن نرم شدن ماده و اختلاط مواد، به طور محسوسی به مقدار سرعت دورانی ابزار وابسته است [۱۶]. در شکل (۴-الف) تصویر تهیه

ایجاد شده بدون ترک بوده و فازهای بین فلزی ایجاد شده ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی و نفوذ بین اتم های آلومینیوم و پودر آهن افزوده شده می باشد.

3-2- نتایج حاصل از آزمون های خواص مکانیکی

در جدول (۳) نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه های مورد بررسی ارائه شده است. باتوجه به استحکام کششی نهایی بدست آمده برای نمونه های شماره ۱، ۶ و ۹ مشاهده می شود که نمونه شماره ۹ دارای بالاترین استحکام کششی می باشد. باتوجه به ثابت بودن سرعت دوران پین، تنها عامل تأثیر گذار بر استحکام این نمونه ها سرعت پیشروی ابزار می باشد. البته تفاوت بین مقادیر بدست آمده برای استحکام کششی و تسلیم نمونه های ۹ و ۱ تفاوت ناچیزی داشته و بطور کلی نمی توان اثر قابل توجهی را در مقاومت به شکست آن ها در طی آزمون مشاهده کرد. این روند در مورد نمونه های دیگر نیز صادق می باشد زیرا در تمامی نمونه ها با سرعت دوران ثابت و سرعت پیشروی مختلف، با افزایش سرعت پیشروی کیفیت اتصال جوش ایجاد شده کاهش یافته است. مقایسه نتایج بدست آمده برای نمونه های ۵، ۱۱ و ۱۲ نشان می دهد که استحکام کششی از مقدار بیشینه ۱۴۰ مگاپاسکال به عدد ۱۰۸ مگاپاسکال رسیده است. این تفاوت تا حدودی قابل ملاحظه بوده و تنها در اثر افزایش سرعت پیشروی از ۲۰ میلی متر بر دقیقه به ۶۰ میلی متر بر دقیقه بوجود آمده است. با توجه به مطالعات پیشین و نیز بررسی های میکروسکوپی انجام شده در این پژوهش به نظر می رسد، کاهش مقدار عدد استحکام کششی نمونه با سرعت پیشروی بیشتر در اثر برآیند اثر اندازه دانه ها و نیز عیوب ایجاد شده ناشی از عدم اختلاط مناسب در منطقه اتصال باشد. باتوجه به جدول (۳) در میان کل نمونه های مورد بررسی بدون افزودن پودر آهن (به غیر از نمونه های ۲، ۷ و ۸) بیشترین مقدار استحکام مربوط به نمونه شماره ۴ بوده و کمترین آن نیز برای نمونه شماره ۶ گزارش شده است. بررسی داده های بدست آمده، نشان می دهد که بهینه ترین حالت برای پارامترهای انتخابی، سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه همراه با سرعت جوشکاری ۲۰ میلی متر بر دقیقه می باشد. هنگامی که سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار در فرایند جوشکاری اصطکاکی - هم زنی در بهینه ترین حالت ممکن باشد، بعلت حرارت ایجاد شده ناشی از اصطکاک بین سطوح درگیر، دانه ها دچار تبلور مجدد دینامیکی می شوند. در تبلور مجدد دینامیکی، در حین تغییر شکل دانه های جدیدی جوانه زنی و رشد می کنند. کاهش اندازه دانه ناشی از این پدیده سبب افزایش استحکام آلیاژ می گردد. در جدول (۴) نتایج بدست آمده از سختی سنجی درز اتصال ارائه شده است. باتوجه به نتایج بدست آمده، بیشینه عدد سختی برحسب میکرو ویکرز برابر ۳۰۵ و کمترین آن برابر ۱۱۲ ویکرز بدست آمد. بنابراین نمونه شماره ۲ با سرعت پیشروی ۲۰ میلی متر بر دقیقه و سرعت چرخشی ۱۲۵۰ دور بر دقیقه با درصد بیشتری از پودر آهن افزوده شده به آن، عدد سختی بالاتری را بدست داده است. بنابر بررسی های انجام شده، به

ورق های آلیاژی پایه کاهش یافته و پیش از ایجاد حرارت کافی و ایجاد اتصال مناسب، پین از محل موردنظر عبور می کند. در نتیجه این امر دما در منطقه جوش کمتر خواهد بود. از این رو، دانه ها مدت زمان لازم جهت رشد را نداشته و نرخ سرد شدن بالاتر می باشد.

در شکل (۷) تصاویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از نمونه های شماره ۲ و ۸ ارائه شده است. لازم به توضیح است که مقادیر پودر افزوده شده برای نمونه ۸ برابر ۱٪ وزنی و برای نمونه ۲ برابر ۲٪ وزنی بوده است. در شکل (۷-الف و ۷-ب) ترکیبات بین فلزی آلومیناید آهن با فلش سیاه رنگ مشخص شده اند.

در شکل ۸ نتایج حاصل از آنالیز نقطه ای EDS برای نمونه های شماره ۴ (بدون پودر) و ۷ (با پودر) از منطقه جوش آورده شده است. با دقت در شکل ۸-الف، درصد وزنی آهن بطور تقریبی برابر ۲۰ درصد بوده که این مقدار براساس نتایج بدست آمده برای نمونه ۴ (شکل ۸-ب) برابر ۰/۶۱ درصد می باشد. بالا بودن درصد عنصر آهن که توسط EDS بدست آمده، نشان دهنده وجود فاز بین فلزی حاصل از ترکیب آلومینیوم و آهن در حین فرایند جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی می باشد. از طرف دیگر آنالیز EDS نشان می دهد عنصر اکسیژن نیز در مقادیری در منطقه اختلاط یافته وجود دارد. وجود درصد عنصر اکسیژن در نمونه شماره ۷ مشهود بوده که علت آن سرعت دوران بالای پین در این حالت بوده است. مقادیر گزارش شده برای عنصر اکسیژن در نمونه های مورد بررسی دلالت بر وجود فاز Al_2O_3 دارد.

به منظور صحت وجود این ترکیبات و نیز مشخص شدن نوع آن ها از آنالیز الگوی پراش اشعه ایکس استفاده شد. در شکل (۹) نتیجه آنالیز الگوی پراش اشعه ایکس انجام شده، ارائه شده است. در شکل (۹-الف) الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه ۸ و در شکل (۹-ب) الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه ۲ آورده شده است. در هر ۲ نمونه مذکور پیش از اجرای فرایند جوشکاری اصطکاکی - هم زنی پودر آهن در مقادیر مختلف اضافه شده است. باتوجه به الگوی الگوی پراش اشعه ایکس ارائه شده برای نمونه شماره ۸ مشاهده می شود که به دلیل افزودن مقدار کمی از پودر آهن به محل جوشکاری، فاز بین فلزی آلومیناید آهن Al_3Fe_2 در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی - هم زنی تشکیل شده است. از طرف دیگر مشاهده می شود که در برخی مناطق نیز آهن با آلومینیوم موجود در زمینه وارد واکنش نشده و بصورت منفرد باقی مانده است. از طرف دیگر همانگونه که انتظار می رفت به سبب وجود درصد بالایی از عنصر آلومینیوم در زمینه آلیاژ، بخش عمده ای از منطقه جوش حاوی این عنصر باشد. در شکل ۹-ب که مربوط به نمونه شماره ۲ با مقدار بیشینه ای از پودر آهن است به نظر می رسد فاز دیگری با ترکیب Al_3Fe که از جمله ترکیبات بین فلزی قابل تشکیل در سیستم آلومینیوم - آهن می باشد، تشکیل شده است. کرنش برشی بالا و حرارت ناشی از فرایند جوشکاری اصطکاکی - هم زنی علاوه بر ایجاد اتصال بین دو آلیاژ سبب تشکیل فازهای بین فلزی نیز شده است. همانگونه که در بررسی های متالوگرافی مشاهده شد، پیوند

Sci 2008;53:980-1023.

5-Shigematsu I, Kwon YJ, Suzuki K, Imai T, Saito N. Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding. J Mater Sci Lett 2003;22:353-6.

6-Peel MJ, Steuwer A, Withers PJ. Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082. Part II: process parameter effects on microstructure. Metall Mater Trans A 2006;37:2195-206.

7-Peel MJ, Steuwer A, Withers PJ, Dickerson T, Shi Q, Shercliff H. Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082. Part I: process parameter effects on thermal history and weld properties. Metall Mater Trans A 2006;37:2183-93.

8-Steuwer A, Peel MJ, Withers PJ. Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082: the effect of process parameters on residual stress. Mater Sci Eng A 2006;441:187-96.

9-Leal RM, Leitao C, Loureiro A, Rodrigues DM, Vilaca P. Material flow in heterogeneous friction stir welding of thin aluminum sheets: effect of shoulder geometry. Mater Sci Eng A 2008;498:384-91.

10-Leitao C, Leal RM, Rodrigues DM, Loureiro A, Vilaca P. Mechanical behaviour of similar and dissimilar AA5182-H111 and AA6016-T4 thin friction stir welds. Mater Des 2009;30:101-8.

11-Leitao C, Emílio B, Chaparro BM, Rodrigues DM. Formability of similar and dissimilar friction stir welded AA5182-H111 and AA6016-T4 tailored blanks. Mater Des 2009;30:3235-42.

12-Park SK, Hong ST, Park JH, Park KY, Kwon YJ, Son HJ. Effect of material locations on properties of friction stir welding joints of dissimilar aluminum alloys. Sci Technol Weld Joi 2010;15:331-6.

13-Aval HJ, Serajzadeh S, Kokabi AH, Loureiro A. Effect of tool geometry on mechanical and microstructural behaviours in dissimilar friction stir welding of AA5086-AA6061. Sci Technol Weld Joining 2011;16:597-604.

14-Aval HJ, Serajzadeh S, Kokabi AH. Evolution of microstructures and mechanical properties in similar and dissimilar friction stir welding of AA5086 and AA6061. Mater Sci Eng A 2011;528:8071-83.

15-Aval HJ, Serajzadeh S, Kokabi AH. Thermo-mechanical and microstructural issues in dissimilar friction stir welding of AA5086-AA6061. J Mater Sci 2011;46:3258-68.

16-Prabha, K. A., Putha, P. K., Prasad, B. S., "Effect of Tool Rotational Speed on Mechanical Properties Of Aluminium Alloy 5083 Weldments in Friction Stir Welding", Materials Today: Proceedings, Vol., 2018, pp. 18535-18543.

17-Klobcar, D., Kosec, L., Pietras, A., Smolej, A., "Study of Mechanical Properties and Microstructure of Friction Stir Welded 5083 Aluminium Alloy", Journal of Materials and Technology 46, 2012, 483-488.

18-Srinivasa, M. S., Kumar, B.V., Hussain, M., "Experimental study on the effect of welding parameters and tool pin profiles on the IS:65032

نظرمی رسد، سرعت ۱۲۵۰ دور بر دقیقه درجه حرارت مطلوبی را ایجاد کرده که با افزودن پودر آهن به محل اتصال ورق های آلیاژی سبب تشکیل ترکیبات بین فلزی شده است. در نتیجه یکی از علل افزایش عدد سختی در این نمونه نسبت به سایر نمونه ها علاوه بر شرایط دانه بندی، وجود ترکیبات بین فلزی می باشد. از طرف دیگر نمونه شماره ۶ با سرعت دوران پین برابر ۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی نسبتا بالای ۶۰ میلی متر بر دقیقه، کمترین عدد سختی را در زیر دستگاه سختی سنجی نشان داده است. همانگونه که انتظار می رفت در شرایط آزمایش فوق به سبب سرعت پایین چرخش پین و نیز سرعت بالای پیشروی آن، سطح تماس بین سطوح در گیر در فرایند جوشکاری اصطکاکی - هم زدنی کاهش یافته و در عمل حرارت کافی جهت اتصال مناسب آلیاژهای پایه ایجاد نشده و صرف نظر از آن، تغییرات دانه بندی نیز ایجاد نخواهد شد.

4- نتیجه گیری

- نتایج حاصل از بررسی های ریزساختاری نشان داد که تغییر سرعت دوران و پیشروی ابزار از طریق تبلور مجدد دانه ها و یا نرخ سرمایش می تواند اثر قابل ملاحظه ای را بر کیفیت اتصال نهایی و خواص مکانیکی آن داشته باشد.

- نتایج حاصل از آنالیزهای EDS و الگوی پراش اشعه ایکس نیز نشان می دهد که در حالت های افزودن پودر آهن به درز اتصال، فازهای بین فلزی Al_3Fe و $AlFe_2$ تشکیل شده است.

- داده های بدست آمده از آزمون کشش نشان می دهد که بالاترین استحکام کششی در حالت بدون افزودن پودر آهن مربوط به نمونه شماره ۵ (۱۲۵۰ دور بر دقیقه / ۲۰ میلی متر بر دقیقه) و کمترین مربوط به نمونه شماره ۶ (۴۰۰ دور بر دقیقه / ۶۰ میلی متر بر دقیقه) می باشد.

- مشخص شد که افزودن پودر آهن به محل اختلاط اثر مفیدی بر استحکام نمونه ها داشته بطوری که استحکام کششی نهایی و تسلیم نمونه شماره ۲ با بالاترین مقدار پودر اضافه شده بترتیب برابر 153 مگاپاسکال و ۱۳۹ مگاپاسکال بدست آمد.

- باتوجه به نتایج آزمون سختی سنجی مشخص شد که کمترین عدد سختی مربوط به نمونه ۶ (۴۰۰ دور بر دقیقه / ۶۰ میلی متر بر دقیقه) و بیشترین مربوط به نمونه ۲ (۱۲۵۰ دور بر دقیقه / ۲۰ میلی متر بر دقیقه) می باشد.

منابع

1-Murr LE. A review of Friction stir welding research on dissimilar metal and alloy systems. J Mater Eng Perform 2010;19:1071-89.

2-Mishra RS, Ma ZY. Friction stir welding and processing. Mater Sci Eng R 2005;50:1-78.

3-Threadgill PL, Leonard AJ, Shercliff HR. J. friction stir welding of aluminum alloys. Int Mater Rev 2009;54:49-93.

4-Nandan R, Debroy T, Bhadeshia HKDH. Recent advances in friction stir welding - process, weldment structure and properties. Prog Mater

Welding Research

پی نوشت

- 1- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلام واحد کرج
- 2- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

aluminum alloy Friction stir welding joints", Materials Today: Proceedings 4, 2017, pp. 1394-1404.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی بدست آمده از روش اسپکتروسکوپی نشر نوری ورق آلیاژی آلومینیوم خالص تجاری.

عنصر	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Mg
Wt. %	99.50	0.04	0.30	0.05	0.02	0.04	0.01

جدول ۲- شماره و مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه.

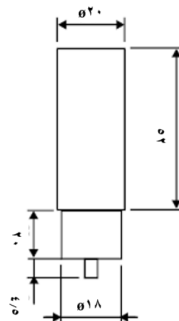
شماره نمونه	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلیمتر بر دقیقه)	میزان پودر آهن افزوده شده (درصد وزنی)
۱	۴۰۰	۴۰	-
۲	۱۲۵۰	۲۰	۲
۳	۸۰۰	۶۰	-
۴	۸۰۰	۲۰	-
۵	۱۲۵۰	۲۰	-
۶	۴۰۰	۶۰	-
۷	۱۲۵۰	۲۰	۱/۵
۸	۱۲۵۰	۲۰	۱
۹	۴۰۰	۲۰	-
۱۰	۸۰۰	۴۰	-
۱۱	۱۲۵۰	۶۰	-
۱۲	۱۲۵۰	۴۰	-

جدول ۳- نتایج بدست آمده از آزمون کشش برای نمونه‌های مورد بررسی.

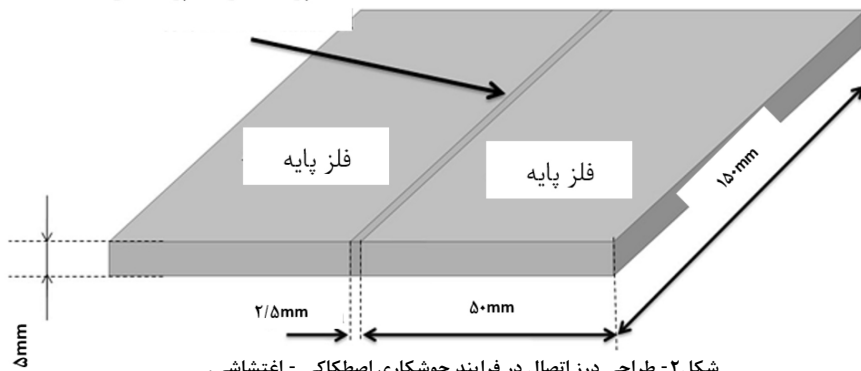
نمونه	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	درصد ازدیاد طول نسبی (%)
فلز پایه	۷۹	۷۶	۱۵
۱	۱۱۵	۱۰۹	۱۲
۲	۱۵۳	۱۳۹	۲۴
۳	۱۲۰	۱۰۹	۱۹
۴	۱۴۲	۱۲۴	۲۳
۵	۱۴۳	۱۴۰	۱۸
۶	۷۸	۶۲	۱۰
۷	۱۴۸	۱۳۴	۲۳
۸	۱۴۲	۱۲۹	۱۹
۹	۸۰	۷۰	۲۱
۱۰	۱۳۵	۱۲۱	۱۸
۱۱	۱۰۸	۹۳	۱۹
۱۲	۱۱۵	۱۰۳	۱۶

جدول ۴- نتایج سختی سنجی حاصل از منطقه اتصال نمونه‌های مختلف.

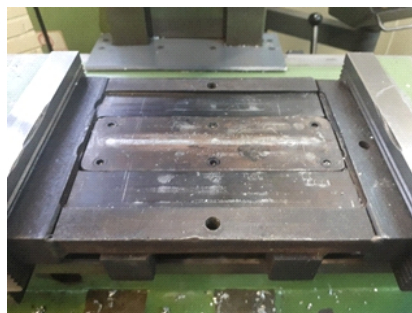
نمونه	عدد سختی (ویکرز)
۱	۱۲۶
۲	۳۰۵
۳	۲۳۴
۴	۲۵۸
۵	۲۳۲
۶	۱۱۲
۷	۲۶۴
۸	۲۴۴
۹	۱۱۷
۱۰	۲۴۳
۱۱	۲۲۱
۱۲	۱۱۹



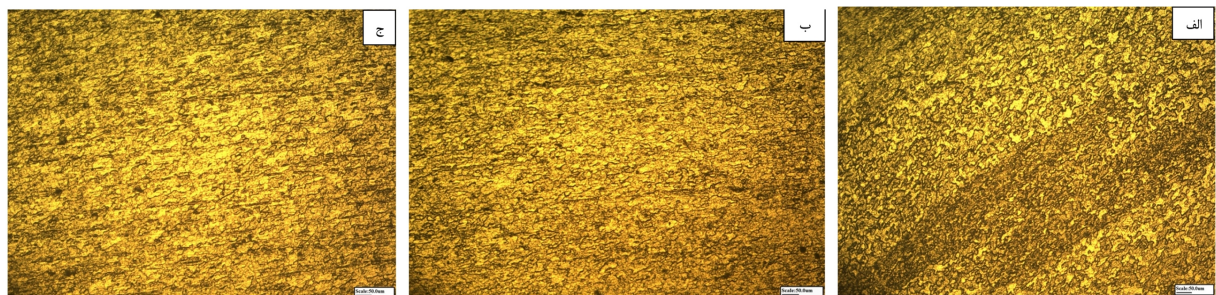
شکل ۱- طرح پین مورد استفاده در این مطالعه (برحسب میلی متر).
پیر شده توسط پودر آهن



شکل ۲- طراحی درز اتصال در فرایند جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی.

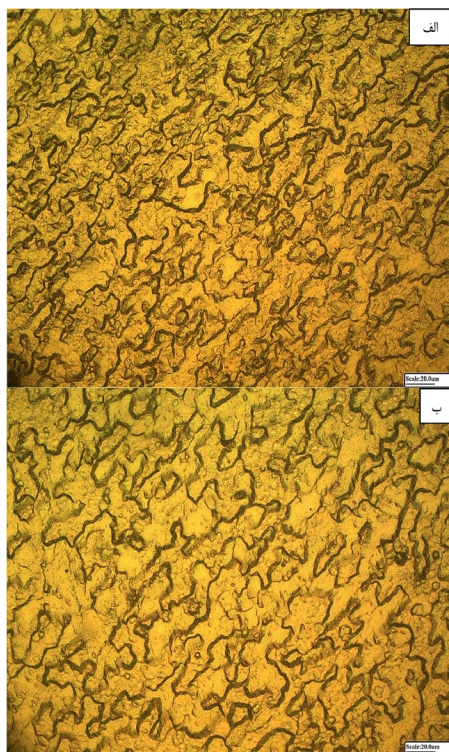


شکل ۳- فیکسچر طراحی شده جهت فرایند جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی.

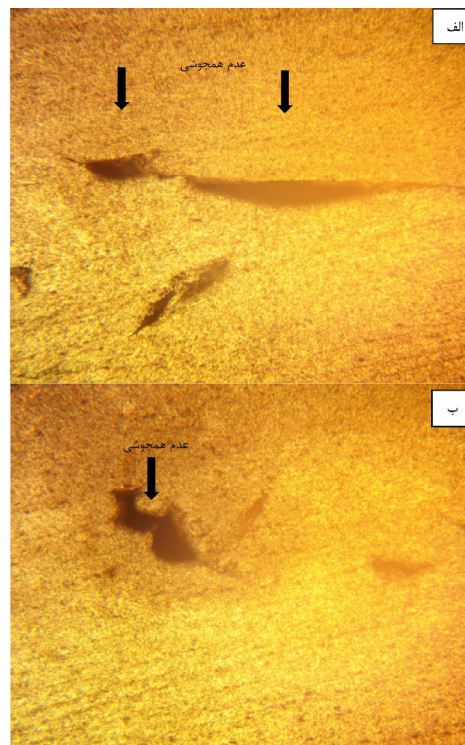


شکل ۴- تصویر میکروسکوپ نوری مربوط به نمونه الف - ۱، ب - ۱۰ و ج - ۱۲.

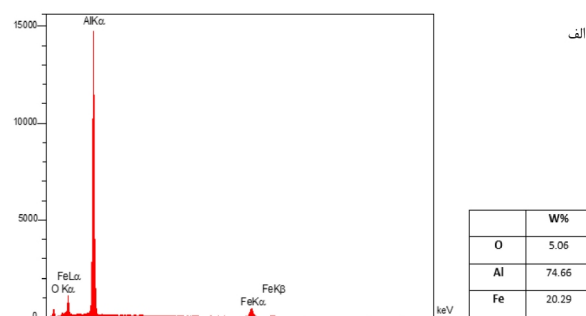
Welding Research



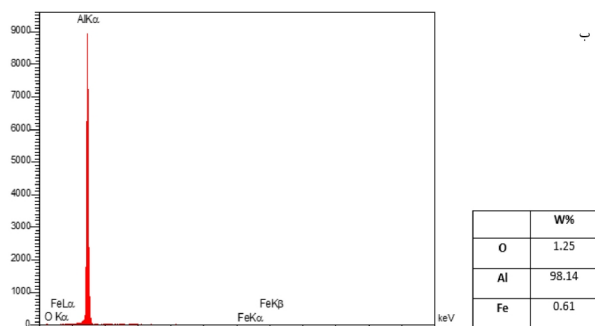
شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از منطقه جوش نمونه‌های الف - ۳ و ب - ۴.



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ نوری از منطقه اتصال الف - نمونه شماره ۶ ب - نمونه شماره ۱۱.

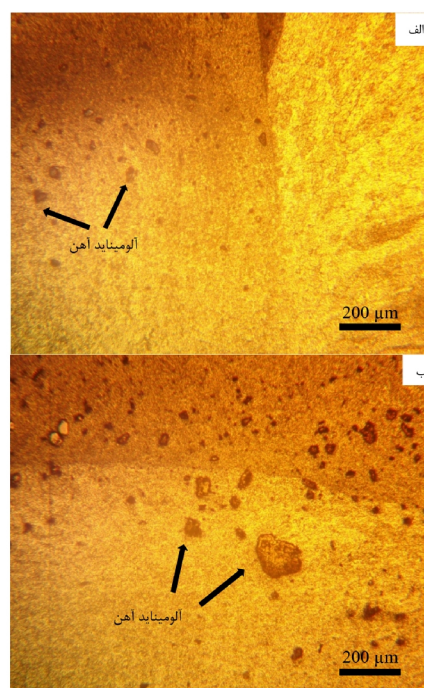


الف



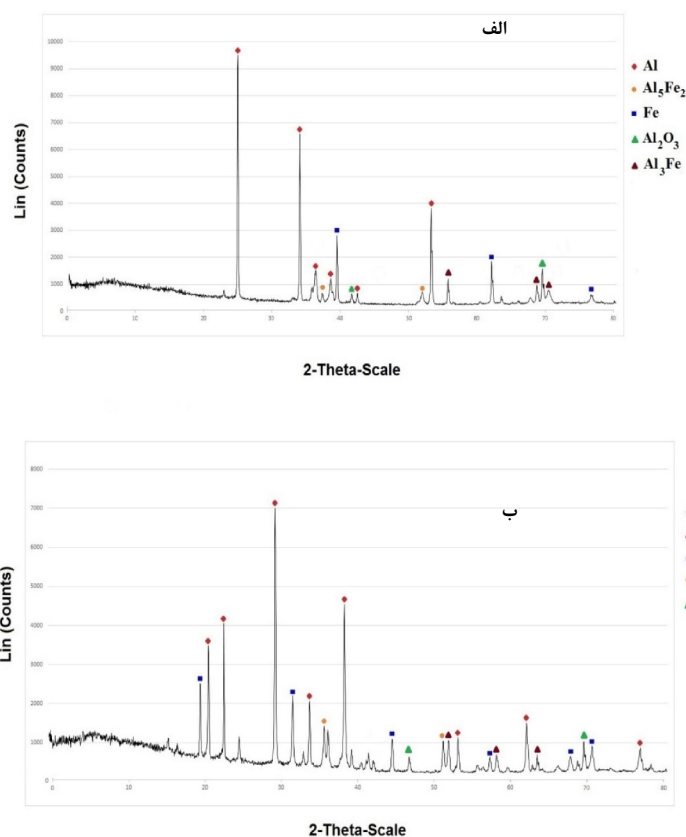
ب

شکل ۸- نتایج آنالیز نقطه ای EDS از منطقه جوش برای نمونه‌های الف - ۷ و ب - ۲.



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی نوری تهیه شده از فصل مشترک اتصال نمونه الف - ۸ و ب - ۲.

Welding Research



شکل ۹- آنالیز الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌های الف - ۸ و ب - ۲.

بررسی اثر زمان و دمای پیشگرم روی خواص مکانیکی منطقه متأثر از حرارت (HAZ) جوش، اتصال آلیاژ (Mo40) 1.7225 به St37

محمد رضا تعویقی^۱، آیدا اسعدی زهرائی^۲، محسن قنبری حقیقی خلخالی^۳، حامد ثابت^۴، بنفشه کاربخش راوری^۵

چکیده

اتصال فلزات غیرهم جنس یکی از مهمترین الزامات صنایع مختلف است. اتصال فولادهای آلیاژی و ساده کربنی به طور معمول در فرایندهای ساخت و تولید دخیل هستند و علت این امر آن است که در این حالت، هزینه مورد نیاز جهت تهیه مواد اولیه کاهش می یابد. از طرف دیگر در اتصال فلزات و آلیاژهای غیرهم جنس به سبب ترکیب شیمیایی متفاوت آن ها، استحکام و کیفیت فصل مشترک HAZ اتصال تا حد زیادی وابسته به پارامترهای دخیل در فرایند است. گریدهای فولادی 1.7225 (Mo40) و St37 در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین با توجه به شرایط، استحکام اتصال گریدهای فولادی فوق از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. از این رو، هدف از این تحقیق بررسی اثر متغیرهای مدت زمان پیشگرم و دمای آن بر خواص مکانیکی اتصال ایجاد شده بین آلیاژ 1.7225 (Mo40) و فولاد St37 مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقاتی انجام شده نشان می دهد که از بین متغیرهای مختلف، مدت زمان و دمای پیشگرم در افزایش طول عمر سسرویس دهی قطعات مذکور در حالت جوشکاری شده از اهمیت به سزایی برخوردار هستند و در منطقه متأثر از حرارت جوش مورد بررسی قرار می گیرد. تاکنون هیچ مطالعه دقیقی در ارتباط با مدت زمان و دمای پیشگرم مناسب جهت فرایند جوشکاری فولادهای 1.7225 (Mo40) و St37 ارائه نشده است و بطور معمول بازدهی کارکرد این قطعات نیز در شرایط شدید تنش کاهش یافته و این قطعات در محل جوشکاری دچار شکست می شوند.

کلمات کلیدی: اتصال فلزات غیرهم جنس، منطقه متأثر از حرارت، (HAZ) فولاد 1.7225 (Mo40)، فولاد St37، مدت زمان پیشگرم، دما پیشگرم.

1- مقدمه

به منظور دستیابی به خواص مطلوب در ساخت سازه های مهندسی از آلیاژهای فلزی با خواص متفاوت در کنار یکدیگر استفاده می شود. به همین دلیل لازم است از چند فلز در کنار یکدیگر استفاده شود که مجموعه آن ها تامین کننده خواص مورد نیاز طراحی باشد که یکی از این موارد، اتصال فلزات غیرهمجنس در صنایع مختلف است [۱]. از طرف دیگر در اتصال فلزات و آلیاژهای غیرهمجنس به سبب ترکیب شیمیایی متفاوت آن ها، استحکام و کیفیت فصل مشترک اتصال تا حد زیادی وابسته به متغیرهای دخیل در فرایند است [۲۱]. یکی از

روش های جوشکاری، جوشکاری قوسی با گاز محافظ است که در آن از گاز محافظ کربن دی اکسید استفاده می شود که به آن جوش Co₂ می گویند. از آن جایی که Co₂ یک گاز فعال است، این نوع جوشکاری در طبقه بندی MAG قرار می گیرد. شایان ذکر است که جوشکاری Co₂ به عنوان بهترین روش برای جوشکاری صفحات نازک و نیمه ضخیم غیر سخت فولادی معرفی شده است که امروزه در صنایع گوناگون بویژه در حوزه ماشین آلات رشد بسزایی داشته اند [۳]. فولاد St37 با استاندارد **EN 10025 2004 (S235JR)** و جدید اروپایی **DIN 17100** یکی از مهمترین مواد اولیه ای که در صنایع مختلف بدلیل هزینه کم بسیار مورد استفاده است، این نوع فولاد جز کم آلیاژها، ساختار شامل فاز فریت زمینه و پرلیت بین دانه ای در محدوده فولاد کربن ملایم نرم قرار می گیرد و دارای استحکام کششی تسلیم معینی در حدود **۳۶۰ MPa** با ضخامت مشخص است. فولاد St37 بطور معمول در ساخت و تولید پروفیل های ساختمانی و صنعت ساختمان سازی کاربرد دارد [۴].

فولاد St37 دارای جوش پذیری بسیار مناسبی است که دلیل این امر وجود کربن کم در ساختار این فولاد است و همین عامل موجب شده تا این فولاد از سایر رقبای خود در این زمینه پیشی بگیرد. همچنین فولاد St37 دارای خواص مکانیکی بسیار بالایی است که همین ویژگی فولاد St37، موجب افزایش عمر مفید محصولات تولیدی شده است. فولاد ۱،۷۲۲۵ Mo_{۴۰} مشهور است، جز معروفترین و پرکاربردترین فولادهای آلیاژی قرار دارد که برای ساخت قطعات با سطح مقطع متوسط و نسبتاً بزرگ در صنایع مختلف از جمله خودرو سازی و ماشین سازی مانند میل لنگ، شاتون، چرخ دنده های واسط، اسپیندل غلطک های صنایع فولاد، پیچ های مقاوم استفاده می گردد [۴، ۵].

جوشکاری فولاد ۴۱۴۰ کمی دشوار بوده زیرا حساسیت بیشتری نسبت به ترک داشته و در نتیجه نیازمند پیشگرم مناسب است [۶]. در سال ۲۰۱۵ عزیزیه و همکارانش [۷] تحقیقاتی را در ارتباط با جوشکاری فولادهای St37 و CK60 انجام دادند. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان می دهد که استحکام منطقه جوش بین استحکام دو فولاد اولیه قرار می گیرد در مطالعات سربو استاوا و همکارانش [۸] در حین اجرای فرایند جوشکاری فولاد به آن حرارت داده می شود که در اثر آن، بخش حرارت دیده دارای ریزساختار متفاوت از ریزساختار فلز پایه شده که به آن منطقه متأثر از حرارت گفته می شود [۹ و ۱۰]. جینلانگ و همکارانش [۱۱] به بررسی اثر

بررداری تا بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر انجام شد. به این منظور طبق استاندارد **ASTME7** با استفاده از کاغذ سنباده به ترتیب با مش ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ سنباده زده شد و در نهایت با استفاده از نمذ پولیش و سوسپانسیون آلومینا با قطر ۱ میکرومتر پولیش گردید تا سطح نزدیک به آینه حاصل شود. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی با استفاده از محلول نایتال ۲٪ (۲٪ اسید نیتریک و ۹۶٪ الکل اتانول) به مدت ۳ تا ۶ ثانیه تحت اچ شیمیایی قرار گرفتند تا ریزساختار آن‌ها نمایان شود. همچنین به منظور بررسی دقیق ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (محصول شرکت **TEScan** مدل **Vega**) استفاده شد. حداکثر قدرت تفکیک این دستگاه ۳/۵ نانومتر با بزرگنمایی ۳۰۰۰۰ و حداکثر ولتاژ کاری آن ۳۰ کیلو ولت است. آزمون سختی سنجی طبق استاندارد **ISO 6506-1:2014** بر روی نمونه‌ها انجام شد. این آزمون تحت دمای محیط انجام شد. قطر ساجمه اعمال کننده نیرو برابر با ۱۰ mm، نیروی اعمالی برابر با ۲۹۴۲۰ N و زمان اعمال نیرو برابر با ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. نمونه‌های آزمون کشش بر اساس استاندارد **ASTME 8** به صورت ابعادی که در شکل (۲) آمده است، تهیه شدند.

این آزمون براساس **ISO 6892-1:2019 A23** و در دمای محیط با سرعت آزمایش و نرخ کرنش **mm/mm/min ۰/۵-۰/۵** انجام گردید. به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج بدست آمده از این آزمون، تعداد سه نمونه تحت آنالیز قرار گرفته و سپس میانگین نتایج گزارش شد. نمونه‌های آزمایش ضربه بر اساس استاندارد **ASTME23-01** تهیه شدند. این آزمایش با روش شاری شکل (۳-الف) و با دستگاهی متعلق به شرکت پارس پیگیر مدل **PM29** و در دمای محیط انجام شد. ابعاد نمونه ضربه براساس استاندارد مربوطه در شکل (۳-ب) آورده شده است. در این آنالیز نیز اعداد گزارش شده، بصورت میانگین از نتایج بدست آمده از سه نمونه در هر حالت مشخص بوده است.

3-نتایج و بحث

3-1-نتایج بررسی ریزساختاری

به منظور مشاهده ریزساختار فلزات پایه و مقایسه آن با ریزساختار تشکیل شده در منطقه جوش، نمونه‌ها در بزرگنمایی‌های مختلف با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولادهای پایه **St37** و **(Mo40)** ۱،۷۲۲۵ ارائه شده است.

در شکل (۴-الف) مشاهدات میکروسکوپی در بزرگنمایی‌های مختلف تصویر میکروسکوپ نوری از فولاد **St37** ارائه شده است. که فازهای موجود در ریزساختار این فولاد شامل ۲۱٪ الی ۵۱٪ درصد دانه‌های فریت و فریت سوزنی به همراه مقداری از نواحی پرلیت در مرز دانه‌ها در فلز پایه **St37** است. فازهای پرلیتی-فریت کاملاً مشخص هستند [۱۲، ۱۳، ۱۴]. در شکل (۴-ب) تصاویر تهیه شده از فولاد آلیاژی **(Mo40)** ۱،۷۲۲۵ ارائه شده که می‌توان نتیجه گرفت ساختار

دمای پیشگرم بر ریزساختار و خواص اتصال آلیاژ **42CrMo4/38MnVS6** پرداختند. فولادهای **42CrMo4/38MnVS6** جز فولادهای کربن متوسط و کم آلیاژ هستند. فولاد **42CrMo4** متعلق به سیستم آلیاژی **Cr-Mo** بوده و دارای استحکام و چقرمگی مناسبی است [۱۰]. عنصر مولیبدن موجود در این فولاد، سبب کاهش تردی تمپر فولاد و افزایش استحکام دمای بالا می‌گردد. **38MnVS6** مربوط به سیستم آلیاژی **Mn-V** بوده و وانادیوم در این فولاد سبب بهبود استحکام، چقرمگی و پلاستیسیته فولاد و نیز افزایش پایداری تمپر دمای بالا می‌شود [۱۰]. گریدهای فولادی **St-37** و **Mo40(1.7225)** در ساخت قطعات مختلف صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. باتوجه به استفاده رایج از این قطعات لازم است تا استحکام جوش، انرژی ضربه و خواص متالورژیکی ایجاد شده از آن‌ها نیز بررسی شوند.

2-مواد و روش تحقیق

به منظور اجرای آزمون‌های طراحی شده، صفحات فولادی از جنس فولاد ساختمانی **St37** و فولاد **(Mo40)** ۱،۷۲۲۵ تهیه شد [۱۲]. و جهت اطمینان تحت آنالیز کوانتومتری با استاندارد **ASTME 415-08** اندازه گیری شد و در جدول (۱ و ۲) آنالیز نشان می‌دهد این ترکیب با فولاد **St37** و **(Mo40)** ۱،۷۲۲۵ می‌باشد. در این پژوهش به منظور تعیین ترکیب شیمیایی دقیق آلیاژهای مورد استفاده، آنالیز مربوطه طبق استاندارد مرجع **ASTME 415-17: 2018** و استاندارد کنترل شرایط محیطی **ASTME 406-81(2012):2018** بهره گرفته شد. در جدول (۱ و ۲) ترکیب شیمیایی فولاد **St37** و **(Mo40)** ۱،۷۲۲۵ ارائه شده است.

به منظور بررسی اثر متغیرهای زمان و دمای پیشگرم، ۹ حالت در نظر گرفته شد. دماهای پیشگرم انتخابی به ترتیب ۲۵۰، ۳۵۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان پیشگرم نیز ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه انتخاب شدند. از طرف دیگر به منظور مقایسه اثر متغیرهای فوق بر کیفیت جوشکاری آرگون نیز حالت‌های ۱۰ الی ۱۲ مدنظر قرار گرفت. جهت جوشکاری صفحات فولادی مورد نظر نیز از روش جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ **Co₂** و **TIG** با فیلترکننده سیم جوش اما ۴۰-۱۸ قطر ۱،۲ میلی‌متر استاندارد **DIN 8559**: **SG 2** یا **En 440 : G3 Si1** ۱،۵۱۲۵ استفاده شد. بر اساس طراحی آزمون انجام شده، نحوه قرارگیری نمونه‌ها استاندارد **BS EN ISO 9692** جهت جوشکاری از نوع **Butt Joint** و بصورت **Sing V- Groove** که در این حالت زاویه پخ نمونه‌ها ۱۷/۵ درجه و **Root Face** برابر ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در جدول (۳)، ۱۲ حالت انتخابی همراه با شماره نمونه‌ها ارائه شده است. همچنین در شکل (۱) تصویر شماتیکی از نحوه چیدمان نمونه‌ها با ابعاد نسبت به یکدیگر را نشان می‌دهد.

بررسی ریزساختار نمونه‌های آماده‌سازی شده با استفاده از میکروسکوپ نوری (مدل **Meiji**) ساخت ژاپن مجهز به عکس

منطقه جوش نمونه شماره ۴ در بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر آورده شده است.

3-2- نتایج حاصل از آزمون های خواص مکانیکی

3-2-1- آزمون کشش

در جدول (۴) نتایج حاصل از آزمون کشش انجام شده بر روی نمونه های مورد بررسی آورده شده است. از بین مقادیر گزارش شده، نمونه های شماره ۲ و ۳ بیشترین مقدار استحکام کششی و تسلیم و نمونه شماره ۹ دارای کمترین مقدار استحکام کششی است. استحکام کششی نهایی نمونه شماره ۳ با دمای پیشگرم ۲۵۰ درجه سانتی گراد و مدت زمان ۲۰ دقیقه، برابر ۴۲۰ مگاپاسکال و استحکام تسلیم برابر ۲۸۴ مگاپاسکال بدست آمد. نمونه شماره ۲ با استحکام کششی و تسلیم، ۴۱۲ و ۲۷۶ مگاپاسکال نیز پس از نمونه شماره ۳ دارای بیشترین مقدار استحکام در بین نمونه ها در شکل (۸) نشان داده می شود. با توجه به آنکه نمونه شماره ۳ نسبت به نمونه های شماره ۱ و ۲ در مدت زمان بیشتری تحت گرمایش بوده، انتظار می رود توزیع دما در سطح و مغز این قطعه یکسان باشد. با توجه به رابطه هال - پیچ [۱۷، ۱۸، ۱۹] و به سبب آنکه نمونه شماره ۳ نسبت به نمونه های ۱ و ۲ در مدت زمان بیشتری در دمای پیشگرم 250°C قرار گرفته است، انتظار می رود توزیع دما در همه نقاط آن تقریباً یکسان بوده باشد. این موضوع منجر به کاهش عیوب بوجود آمده در منطقه اتصال شده و از این رو سبب استحکام بیشتر نمونه خواهد شد. نمونه شماره ۱ نسبت به نمونه های شماره ۲ و ۳ دارای کمترین استحکام بوده و این موضوع ناشی از مدت زمان کمتر پیشگرم آن است. بر اساس بررسی های میکروسکوپی انجام شده به یک عیب در پاس ریشه جوش، که اگر بازرس جوش و جوشکار ماهر داشتیم می توانستیم از این عیب جلوگیری کنیم. با استفاده از میکروسکوپ نوری مشخص شد که در ساختار پاس ریشه جوش این نمونه عیب ذوب ناقص یا عدم همجوشی وجود داشته و در یک بخش از جوش، اتصال با فلز پایه ایجاد نشده است [۲۱]. در شکل (۹) تصویر منطقه دارای عدم همجوشی نشان داده شده است. این مسئله تا حد زیادی بر مقدار استحکام کششی نهایی و تسلیم این نمونه تأثیر خواهد داشت. با توجه به جدول (۴) استحکام کششی نهایی نمونه های شماره ۴ الی ۶ که در دمای 350°C پیشگرم شده اند به ترتیب برابر ۳۸۴، ۴۰۳ و ۳۷۹ مگاپاسکال است. با مقایسه مقدار استحکام کششی نمونه شماره ۴ (دمای پیشگرم 350°C و مدت زمان ۱۰ دقیقه) با نمونه های شماره ۲ و ۱ می توان مشاهده کرد که اختلاف تقریباً اندکی بین آن ها وجود داشته است، در صوتی که درصد ازدیاد طول نسبی نمونه شماره ۴ با نمونه شماره ۳ که بهترین نتیجه را نشان داده است، یکسان می باشد.

بر خلاف نمونه های ۱ الی ۳ که دمای پیشگرم آن ها کمترین مقدار و برابر 250°C بوده، با افزایش مدت زمان پیشگرم تا دمای 350°C استحکام کششی و تسلیم نمونه ها افت پیدا کرده است. در بین نمونه های ۴ الی ۶، نمونه ۴ دارای بیشترین استحکام و

موجود عمدتاً از فاز بینیت تشکیل شده است. در برخی نقاط جدایش میکروسکوپی نیز مشاهده می گردد.

در شکل (۵) تصاویر تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از فولاد (Mo40) ۱،۷۲۲۵ و St37 آورده شده است. در شکل (۵-الف و ۵-ب)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با استفاده از آشکارساز الکترون های ثانویه در بزرگنمایی بالا به ترتیب از فولادهای (Mo40) ۱،۷۲۲۵ و St37 نشان داده شده است. در شکل (۵-ب) نیز فاز تیره رنگ فاز فریت بوده و فاز روشن از نوع پرلیت است. در این تصویر ماهیت اثر انگشتی (صدفی) بودن فاز پرلیت به وضوح مشخص است.

در شکل (۶) تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری و SEM با آشکارساز الکترون های ثانویه در بزرگنمایی های ۱۰۰ و ۱۰۰۰ برابر از ناحیه جوشکاری شده و HAZ آورده شده است. در شکل (۶-الف) تصویر میکروسکوپ OM از ریزساختار منطقه جوش در پایین و وسط گرده جوش ارائه شده است. با توجه به بررسی های ریزساختاری انجام شده در ارتباط با مورفولوژی فازی، به نظر می رسد ریزساختار منطقه جوش شامل دانه های فریت، فریت سوزنی و ویدمن اشتاتن به همراه مقادیر اندکی پرلیت و ذرات سمینتیت می باشد. تحقیقات انجام شده [۱۵، ۱۶] نشان می دهند درصد مرزدانه ها ۲۴٪ الی ۳۵٪ که درصد فریت ویدمن اشتاتن آن ۶٪ الی ۲۴٪ اولیه بطور مستقیم از سطح دانه های آستنیت جوانه زده و رشد می کند اما فریت ویدمن اشتاتن ثانویه از فریت آلوتریومورفیک موجود در ساختار حاصل می شود. از این رو، فریت ویدمن اشتاتن موجود در ساختار از نوع ثانویه هستند، شکل (۶-ج) نیز تصویر SEM ریزساختار منطقه جوش در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر ارائه شده است.

در شکل (۶-د) نیز تصویر SEM از مرز بین نواحی جوشکاری شده و متأثر از حرارت تهیه شده است. با توجه به اینکه ریزساختار منطقه HAZ شامل فریت ویدمن اشتاتن و پرلیت می باشد، تفاوت بین این دو ناحیه در تصویر مذکور قابل تشخیص است. در شکل (۷) نیز تصاویر تهیه شده از نمونه های با شماره ۳ و ۴ با استفاده از میکروسکوپ OM و SEM نشان داده شده است. در شکل (۷-الف) تصویر ارائه شده از ریزساختار ناحیه HAZ در سمت و مجاور آلیاژ پایه (Mo40) ۱،۷۲۲۵ با استفاده از میکروسکوپ نوری تهیه شده است. ساختار ریزدانه عمدتاً بینیتی در این ناحیه قابل مشاهده بوده و همچنین در این نواحی آثار جدایش میکروسکوپی نیز مشاهده می گردد. در شکل (۷-ب) تصویر SEM تهیه شده از نمونه شماره ۳ از همان منطقه در بزرگنمایی ۳۰۰۰ ارائه شده است. در شکل (۷-ج) تصویر بدست آمده با استفاده از میکروسکوپ نوری از منطقه HAZ در نزدیکی و مجاورت جوش ارائه شده است.

همانگونه که در این تصویر مشخص است، در برخی نقاط فاز آستنیت باقی مانده مشاهده می شود. علت وجود این فاز را می توان به درصد کربن آلیاژ (Mo40) ۱،۷۲۲۵ نسبت داد. بطور کلی ریزساختار در این ناحیه شامل مارتنزیت، بینیت درشت دانه و مقداری از آستنیت باقی مانده است. در شکل (۷-د) نیز تصویر SEM بدست آمده از

در این آزمایش بترتیب مربوط به نمونه های ۹ و ۱ می باشد. علت این امر ناشی از آن است که نمونه شماره ۹ نسبت به نمونه دیگر دارای دمای پیشگرم بیشتر و در نتیجه حرارت ورودی بیشتری بوده که به دنبال آن مدت زمان لازم جهت سرد شدن آن نیز بیشتر خواهد بود. به سبب کاهش سرعت سرد شدن، دانه ها مدت زمان لازم جهت رشد را پیدا کرده و در نتیجه ریزساختار نهایی، دانه درشت تر خواهد بود. قابل ذکر است اندازه دانه اثر قابل ملاحظه ای بر چقرمگی شکست ضربه دارد. بر اساس مطالعات انجام شده با افزایش اندازه دانه، چقرمگی شکست ضربه افزایش می یابد [۲۴].

در شکل (۱۰) نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی ارائه شده است. آزمون سختی سنجی بر روی منطقه جوش نمونه ها و در فواصل معینی از آن انجام شده است. همانگونه که در جدول (۵) مشاهده می شود بیشترین مقدار سختی بدست آمده برای نمونه شماره ۱ بوده و کمترین مقدار سختی گزارش شده مربوط به نمونه شماره ۹ است. مدت زمان و دمای پیشگرم نمونه شماره ۱ و شماره ۹ بترتیب برابر ۱۰ دقیقه، ۲۵۰ درجه سانتی گراد و ۲۰ دقیقه و ۴۵۰ درجه سانتی گراد می باشد. با توجه به فازهای تشکیل شده در ریزساختار منطقه جوش و نواحی مجاور آن و نیز مقایسه این نواحی با یکدیگر می توان نتایج بدست آمده را مورد بررسی قرار داد. با مقایسه اعداد سختی بدست آمده از نمونه های شماره ۱ الی ۳ (که به ترتیب برابر ۲۴۶، ۲۳۹ و ۲۳۷ ویکرز بدست آمد)، روند کاهشی سختی منطقه جوش قابل مشاهده در شکل (۱۰) است. این موضوع می تواند به سبب مدت زمان کمتر قرار گیری نمونه شماره ۱ نسبت به نمونه های ۲ و ۳ در دمای پیشگرم ۲۵۰ درجه سانتی گراد باشد. نمونه های شماره ۴ الی ۶ نیز همانند نمونه های شماره ۷ الی ۹ این روند کاهشی را نشان می دهند. علت این امر می تواند ناشی از آن باشد که با افزایش مدت زمان قرار گیری نمونه در یک دمای پیشگرم مشخص، سرعت سرد شدن آن نمونه به سبب دمای بالای فولادهای پایه، کمتر شده و درصد فاز نرمی همچون فریت نیز افزایش می یابد [۲۷، ۲۶، ۲۵، ۲۸]. در شکل (۱۰) پروفیل سختی از محل جوش به طرف فولادهای پایه St37 و (Mo40) ۱,۷۲۲۵ مربوط به 3 نمونه به شماره ۴, ۱ و ۹ ارائه شده است. با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد آلیاژی (Mo40) ۱,۷۲۲۵ و فولاد کم آلیاژ St37 تفاوت اعداد سختی در دو طرف محل اتصال طبیعی می باشد. با فاصله گرفتن از محل جوش به سمت فولاد آلیاژی (Mo40) ۱,۷۲۲۵، عدد سختی بطور نسبی افزایش پیدا کرده در حالی که این روند در سمت فولاد St37 در ابتدا کاهش شدیدی داشته و پس از آن این روند ابتدا افزایش و سپس ثابت می گردد. با توجه به تحقیقات انجام شده [۲۹، ۳۰] و همچنین تفاوت سختی قابل مشاهده از فولادهای پایه، انتظار می رود که منطقه جوش دارای سختی کمتر نسبت به فولاد با سختی بالا و دارای سختی بیشتر نسبت به فولاد با سختی کمتر باشد. همان گونه که در شکل (۱۱) نیز مشاهده می شود، عدد سختی بدست آمده در منطقه جوش در محدوده بین اعداد سختی فولادهای پایه قرار گرفته است.

نمونه شماره ۶ دارای کمترین مقدار است. در مورد نمونه های ۷ الی ۹ نیز (که در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد پیشگرم شده اند) به همین صورت مشاهده می شود که نمونه ای که دارای کمترین مدت زمان پیشگرم بوده دارای بیشترین استحکام کششی در این گستره دمایی است زیرا در این حالت فاز سخت مارتزیت بر تشکیل کاربیدهای جدید غلبه داشته است [۲۱].

با توجه به نتایج بدست آمده می توان تاحدودی اثر دمای پیشگرم و مدت زمان آن را بر روی نمونه های جوشکاری شده در مورد نمونه های با دمای پیشگرم ۳۵۰ و ۴۵۰ درجه سانتی گراد، مشاهده شد که هر چه مدت زمان پیشگرم کمتر بوده، استحکام کششی نهایی قطعه بیشتر می شود. علت این امر آن است که با کاهش مدت زمان پیشگرم، فرایند پیشگرم نمونه و رسیدن به دمای تعیین شده در سطح و مغز بطور صحیح صورت نگرفته و این موضوع از درشت شدن دانه ها ممانعت به عمل می آورد. اندازه دانه ها در منطقه اتصال دو فولاد یکی از مهمترین موارد تعیین کننده استحکام قطعه می باشد در نتیجه مقاومت نمونه نسبت به تنش کششی اعمال شده بر آن با کاهش مدت زمان پیشگرم، افزایش می یابد [۲۲]. از سوی دیگر با تغییر سرعت سرد شدن در نمونه ها، ریزساختارهای حاصل همراه با اندازه دانه بندی ها دچار تغییر شده و به همین علت مقادیر مربوط به استحکام کششی نهایی، تسلیم و شکست متفاوت خواهند بود [۲۳]. در نمونه های شماره ۷، ۸ و ۹ کسر حجمی فاز فریت افزایش یافته است و از این رو خواص مکانیکی این نمونه ها نسبت به نمونه های شماره ۳ و ۲ با ریزساختار شامل فریت ویدمن اشتاتن و مارتزیت افت قابل توجهی داشته است. در مورد نمونه های شماره ۱۰ الی ۱۲ که با روش جوشکاری TIG تحت فرایند جوشکاری قرار گرفته اند نیز مشاهده می شود که استحکام کششی و تسلیم نسبتا بالا است. با توجه به یکسان بودن دما و زمان پیشگرم این نمونه ها با نمونه های ۴ الی ۶ (که با روش Co₂ جوشکاری شده اند)، مشاهده می شود که استحکام کششی و تسلیم نمونه های ۱۰ الی ۱۲ در روش تیگ از نمونه های ۴ الی ۶ در روش Co₂ بیشتر هستند. البته این تفاوت، چشمگیر نبوده اما در نتیجه کیفیت بالای اتصال ایجاد شده، بدست آمده است. بطور کلی در نمونه های مورد بررسی در این پروژه با افزایش دمای پیشگرم، نرخ سرد شدن کاهش می یابد که این موضوع سبب افزایش اندازه دانه و تبلور مجدد بیشتر در ناحیه HAZ می گردد. با افزایش دمای پیشگرم رسوبات بیشتری در مرز دانه ها و نوارهای لغزش نابجایی ها تجمع می کنند. تجمع رسوبات در مرز دانه ها موجب شده رسوباتی که پراکنده بودند، بصورت شبکه ای پیوسته در مرز دانه ها جمع شوند و زمینه از این فاز سخت تهی شود. خالی شدن زمینه از این فاز سخت و افزایش اندازه دانه در اثر کاهش نرخ سرد شدن می تواند تا حدی بر استحکام تاثیر گذار باشد.

3-3- نتایج آزمون ضربه

در جدول (۵) و شکل (۹) نتایج حاصل از آزمون ضربه برای نمونه های مورد بررسی آورده شده است. مقادیر ماکزیمم و مینیمم بدست آمده

- براساس پروفیل استخراج شده از منطقه جوش و مناطق مجاور آن مشخص شد که عدد سختی ناحیه اتصال در بین مقادیر فولادهای (Mo40) ۱,۷۲۲۵ و St37 قرار دارد.

منابع

- 1-L. Jeffus, "Welding: Principles and Applications", 2016, Cengage Learning.
- 2-M. A. Reeser, "Welding Complete: Techniques, Project Plans & Instructions", 2017, Cool Springs Press.
- 3-ح. ثابت، "تکنولوژی و متالورژی جوشکاری"، ۱۳۸۷.
- 4-ح. ساعتچی، ح. آدریس، "کلید فولاد"، ارکان دانش، ۱۳۸۰.
- 5-J. Vora, V. J. Badheka, "Advances in Welding Technologies for Process Development", 2019, CRC Press.
- 6-E. El-Kashif and M. A. Morsy, "Repair Welding Reclamation of 42CrMo4 and C45 Steels", IIW 2017 International Conference, At: Shanghai China, June, 2017.
- 7-M. Azizieh, M. Khamisi, "Characterizations of Dissimilar Friction Welding of ST37 and CK60 Steels", The Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2016, 2773-2781.
- 8-B. P. Srivastava, S. P. Tewari, J. Prakash, "A Review on Effect of Preheating and/or PWHT on Mechanical Behavior of Ferrous Metals", International Journal of Engineering Science and Technology Vol. 2(4), 2010, 625-631.
- 8-Q. Xue, D. Benson, M. A. Meyers, V. F. Nesterenko and E. A. Olevisky, "Constitutive Response of Welded HSLA 100 Steel, Materials Science and Engineering A354", 2003(, 166-179.
- 9-E. Ramirez, S. Mishael and R. Shockley, "Properties and Sulfide Stress Cracking Resistance of Coarse-Grained Heat-Affected Zones in V-Micro Alloyed X60 Steel Pipe, Welding Research, Welding Journal,) 2005(.
- 10-S. Jinlong and Q. Xiaoming, "Effect of Preheating Temperature on Microstructure and Properties of 42CrMo4/38MnVS6 Heterogeneous Laser Welded Joint", Licensee MDPI, Basel, Switzerland, 2019.
- 11-A. G. Olabi, G. Casalino, "Mathematical Modeling of Weld Phenomena, Part 1: Finite Element Modeling", Comprehensive Mater. Process., Vol. 6, 2014, pp. 101-109.
- 12-S. R. Amirabdizadeh, S. Shafinia, H. Sabet, S. Mirdamadi and H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, "The Effect of Boron on the Impact Energy of Low-Carbon Steel Weld Metal at Low Temperatures, Metallography Microstructure LLC and Analysis part of Springer Nature and ASM International, 2018.
- 13-ا. حاجیان نیا، م. ر. پاک منش، م. شمعانیان، م. کثیری، ارزیابی خواص مکانیکی جوش های غیر مشابه فولاد AISI 347 به فولاد کم آلیاژ ASTM A335، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد مجلسی، ۲۰۲۱، دوره ۲ (شماره پیاپی ۴۵)، ۱۳۹۷، ۱-۱۳.
- 14-ن. خدابنده لو، ح. ثابت، اثر سرعت سرد شدن و حرارت ورودی بر

بطور کل تغییرات بوجود آمده در سختی قطعات می تواند به دلیل مواردی همچون تغییر اندازه دانه ها و تشکیل رسوبات سخت در مرز دانه ها یا زمینه ریز ساختار باشد. با دقت در روند تغییرات اعداد سختی در سمت فولاد آلیاژی (Mo40) ۱,۷۲۲۵ مشاهده می شود که در فاصله ۱ سانتی متری از محل جوش، عدد سختی در بیشتر موارد افزایش داشته است. برخلاف این روند، در سمت فولاد ساختمانی St37 با فاصله از محل اتصال افت شدیدی در عدد سختی بوجود آمده، که با افزایش این فاصله، عدد سختی تا حدودی افزایش می یابد. در شکل (۱۱) مقایسه پروفیل های سختی سنجی در دماهای پیشگرم مختلف نشان می دهد که نتایج مرتبط با دمای پیشگرم 250 درجه سانتی گراد تقریباً بالاترین سختی را نشان می دهد که علت این موضوع قرارگیری رسوبات سخت در زمینه آلیاژ در دماهای پایین پیشگرم است و با بالا رفتن دمای پیشگرم، زمینه از رسوبات تهی شده و این رسوبات در مرز دانه ها تشکیل می شوند.

4- نتیجه گیری

طبق آزمایش ها و بررسی های انجام شده، نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- بررسی های ریز ساختار منطقه جوش نمونه ها شامل فریت، فریت ویدمن اشتاتن، به همراه مقادیر کمی از ذرات ریز سمنتیت، پرلیت و مارتنزیت می باشد. ریز ساختار فولاد St37 فریت - پرلیتی بوده و فازهای موجود در فولاد آلیاژی (Mo40) ۱,۷۲۲۵ نیز عمدتاً بینیتی است.

- تغییر دمای پیشگرم نمونه ها از ۲۵۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی گراد سبب تغییر نرخ سرد شدن نمونه ها در مناطق اتصال و منطقه متأثر از حرارت جوش (HAZ) آن ها شده که همین امر منجر به تغییرات فازها و دانه بندی در ریز ساختار مناطق جوش حاصل می شود بطوری که با افزایش دمای پیشگرم نرخ سرد شدن نمونه بیشتر شده و اندازه دانه ها افزایش یافته و کسر حجمی فازهای نرمی همچون فریت نیز افزایش می یابد.

- در نتایج حاصل از کشش مشاهده شد که نمونه شماره ۳ با استحکام کششی و تنش تسلیم ۴۲۰ و ۲۸۴ مگاپاسکال بیشترین و نمونه شماره ۹ با استحکام کششی و تنش تسلیم ۳۵۹ و ۲۵۸ مگاپاسکال کمترین مقادیر استحکام را از خود نشان می دهند.

- در داده های آزمون ضربه مشاهده شد که نمونه شماره ۹ با ۷۰ ژول دارای بیشترین چقرمگی (Toughness) شکست در بین نمونه ها است که این موضوع ناشی از بالا بودن مدت زمان و دمای پیشگرم این نمونه می باشد.

- تافنس شکست نمونه شماره ۱ کمترین مقدار و برابر ۳۶ ژول محاسبه شد که این نمونه در کمترین مدت زمان و دمای پیشگرم تحت جوشکاری قرار گرفته است.

- در آزمون سختی نیز اعداد بدست آمده از آزمون نشان می دهد بالاترین عدد سختی با مقدار HV ۲۵۰ و یکرز مربوط به نمونه ۱۰ بوده و کمترین آن نیز مربوط به نمونه ۹ با مقدار HV 210 است.

23-س. سلیمی فر، د. داودی، س. سلحشور، ع. لطفی، بهبود خواص تریبولوژی فولاد St37 با ایجاد لایه کامپوزیتی حاوی ذرات آلومینا به روش جوشکاری GTAW. فصلنامه مواد و فناوری‌های پیشرفته، دوره ۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴، صفحات ۶۱-۵۳.

24- Li, Wen-Lan., C. M. J. Li., "the Effect of Grain Size on Fracture Toughness", *Philosophical Magazine A*, Vol. 59, 2006.

25-Tadashi Kasuya, Nobutaka Yurioka, Makoto Okumura, Methods for Predicting Maximum Hardness of Heat Affected Zone and Selecting Necessary Preheat Temperature for Steel Welding, *Nippon Steel Technical Report No.65*, (1995).

26-Teng, Tso-Liang, Chang, Peng-Hsiang, "A Study of Residual Stresses in Multi-Pass Girth-Butt Welded Pipes", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 74, 59-70, (1997).

27-S. Lee, B. C. Kim and D. Kwon, Correlation of Microstructure and Fracture Properties in Weld Heat-Affected Zones of Thermomechanically Controlled Processed Steels, *Metallurgical Transactions, A*, 1992.

28-B. Eigenmann, V. Schulze and O. Vo'hringer, Surface Residual Stress Relaxation in Steels by Thermal or Mechanical Treatment, In *Proceedings of the Fourth International Conference on Residual Stresses*, Society of Experimental Mechanics, Bethel, Connecticut, Baltimore, MD, 598-607, 1994.

29- Y. C. Lin and K. H. Lee, "Effect of Preheating on the Residual Stress in Type 304 Stainless Steel Weldment", *J. Mater. Process. Technol.*, 63, 1997, 797-801.

30-M. Mazni, M. H. Ismail, et. Al. "Effect of Welding Preheats on Metallurgical Analysis and Microstructural Development", *Materials Science and Engineering* 834, 2020, 12-45.

پی‌نوشت

1- فارغ التحصیل مهندسی مواد-جوشکاری، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
2- فارغ التحصیل مهندسی مواد-شکل دادن فلزات، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طلوسی، تهران، ایران

3- استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
4- دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

5- استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

ریزساختار و خواص مکانیکی فلز جوش فولاد کربنی جوشکاری شده به روش GMAW و FCAW. شانزدهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی و پنجمین کنفرانس ملی آزمایش‌های غیرمخرب، یزد، ۱۳۹۴.

15-م. رضائی موفق، م. نادری، م. ع. سلطانی، ر. برادران، تعیین درصد حجمی و ریخت شناسی فاز فریت دلتا در فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 431، مجله مهندسی متالورژی، دوره ۱۷، شماره ۵۴ - شماره پیاپی ۵۳ تابستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۸-۲۳.

16-ح. ثابت، م. ر. فرزین، ب. عابدینی، م. م. حسینیون، اطلاع رابه درصد عناصر آلیاژی منطقه جوش فولادهای کربنی و کم آلیاژ در فرایند GMAW توسط فاکتور قطبیت و نوع گاز، دهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی، تهران، 1388.

17-W. D. Callister, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 2nd ed. Wiley & Sons. pp. 252.

18-Smith, F. William, J. Hashemi, *Foundations of Materials Science and Engineering* (4th ed.), McGraw-Hill, 2006.

19-G. E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", Third edition, McGraw-Hill, 2017.

20-م. ر. طاهری، ح. ثابت، ب. کاربخش، اثر میدان مغناطیسی خارجی بر میزان پاشش، نسبت پهنا به عمق W/D و پایداری قوس، جوشکاری فولاد معمولی در فرایند جوشکاری GMAW، هجدهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی و هفتمین کنفرانس ملی آزمایش‌های غیرمخرب، اراک.

21-ا. طالبی، ر. بختیاری، ب. عباسی خزایی، بررسی تاثیر عملیات بازپخت بر ریزساختار و خواص کششی فولادهای سه فازی فریت-بینایت-مارتنزیت، مجله مهندسی متالورژی، دوره ۱۷، شماره ۵۳ - شماره پیاپی ۵۳ بهار ۱۳۹۳، صفحه ۴۰-۴۸.

22-ر. صابری، ح. دهکردی، ابراهیم و ع. خداپنده، "بررسی تاثیر دمای پیشگرم بر ریزساختار آلیاژ Al-5083 در جوشکاری به روش GMAW". پایگاه مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی، ۱۳۸۹.

Welding Research

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد St37 مورد استفاده در این پژوهش (بر حسب درصد وزنی)

C	Si	Mn	P	S	N	Cu
۰/۱۸۰	۰/۴۰۰	۱/۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱۲	۰/۵۵۰

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فولاد (Mo40) ۱,۷۲۲۵ مورد استفاده در این پژوهش (بر حسب درصد وزنی)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
۰/۴۲۰	۰/۲۴۰	۰/۸۲۰	۰/۰۲۰	۰/۰۱۰	۱/۰۳۰	۰/۲۵۰	۰/۱۹۰

جدول ۳- شرایط نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه

شماره نمونه	دمای پیشگرم (°C)	مدت زمان پیشگرم (min)
جوشکاری CO ₂		
۱	۲۵۰	۱۰
۲	۲۵۰	۱۵
۳	۲۵۰	۲۰
۴	۳۵۰	۱۰
۵	۳۵۰	۱۵
۶	۳۵۰	۲۰
۷	۴۵۰	۱۰
۸	۴۵۰	۱۵
۹	۴۵۰	۲۰
جوشکاری آرگون TIG		
۱۰	۳۵۰	۱۰
۱۱	۳۵۰	۱۵
۱۲	۳۵۰	۲۰

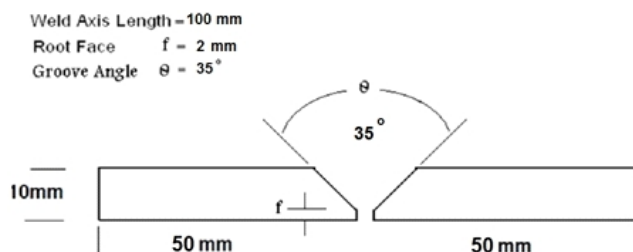
جدول ۴- نتایج حاصل از آزمون کشش برای نمونه‌های مختلف

نمونه	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	درصد ازدیاد طول نسبی (%)
۱	۳۹۰	۲۵۲	۱۵
۲	۴۱۲	۲۷۶	۲۲
۳	۴۲۰	۲۸۴	۲۷
۴	۴۰۳	۲۶۸	۲۱/۵
۵	۳۸۴	۲۵۲	۲۲
۶	۳۷۹	۲۴۱	۱۳
۷	۳۷۲	۲۴۰	۲۳
۸	۳۶۱	۲۵۴	۱۳
۹	۳۵۹	۲۵۸	۱۱
۱۰	۳۹۳	۲۵۹	۲۱
۱۱	۴۱۰	۲۷۰	۲۵
۱۲	۳۷۰	۲۳۵	۲۷

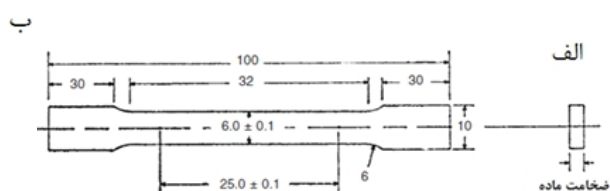
جدول ۵- نتایج آزمون ضربه برای نمونه‌های مختلف مورد بررسی (بر حسب ژول)

شماره نمونه	انرژی ضربه (ژول)
۱	۳۶
۲	۴۲
۳	۴۶
۴	۵۱
۵	۶۰
۶	۶۶
۷	۶۶
۸	۶۸
۹	۷۰
۱۰	۴۳
۱۱	۴۴
۱۲	۴۶

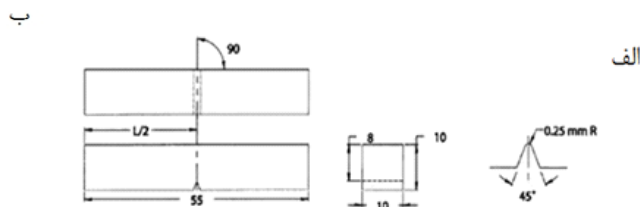
Welding Research



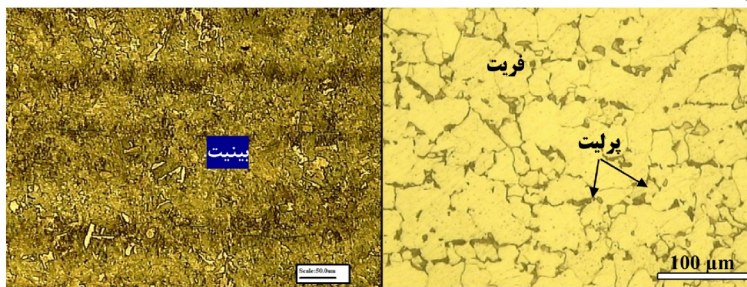
شکل ۱- تصویر شماتیکی از آماده سازی نمونه با استاندارد BS EN ISO 9692 و چیدمان نمونه‌های جوشکاری.



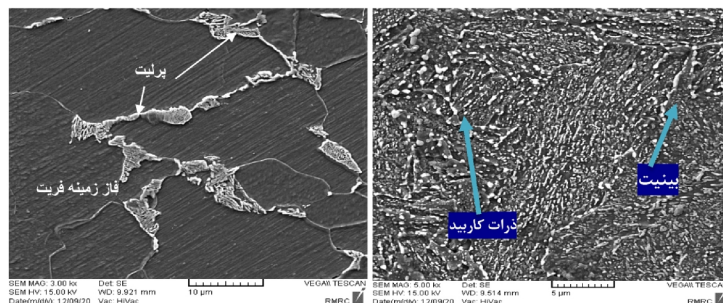
شکل ۲- الف- ابعاد نمونه آزمون کشش براساس استاندارد ASTM E8 (برحسب میلی‌متر)، ب- تصویر نمونه‌های آماده سازی شده.



شکل ۳- الف- ابعاد نمونه ضربه شاری (برحسب میلی‌متر)، ب- تصویر نمونه‌های آماده سازی شده.

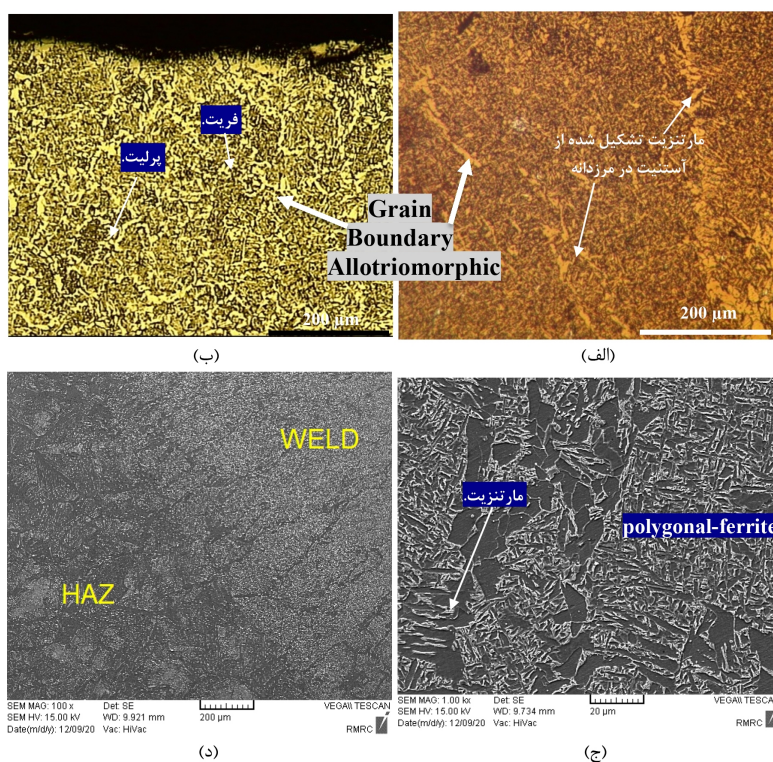


شکل ۴- الف- تصاویر میکروسکوپ نوری از فولاد St37، ب- تصاویر میکروسکوپ نوری از فولاد (Mo40) ۱,۷۲۲۵ فاز بینیتی.

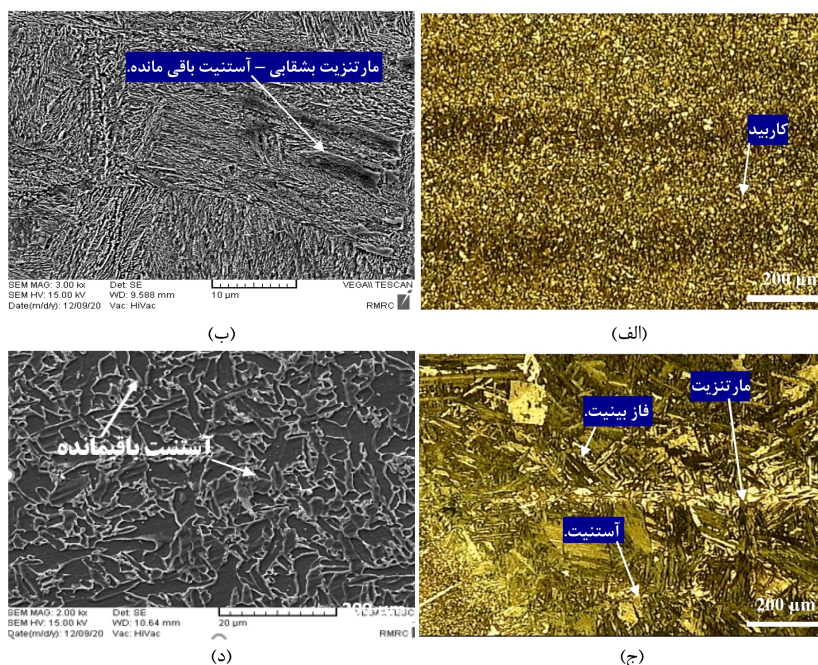


شکل ۵- تصاویر SEM بدست آمده از الف- فولاد (Mo40) ۱,۷۲۲۵ فاز بینیت مقداری کاربید در بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر و ب- فولاد St37 در بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر.

Welding Research

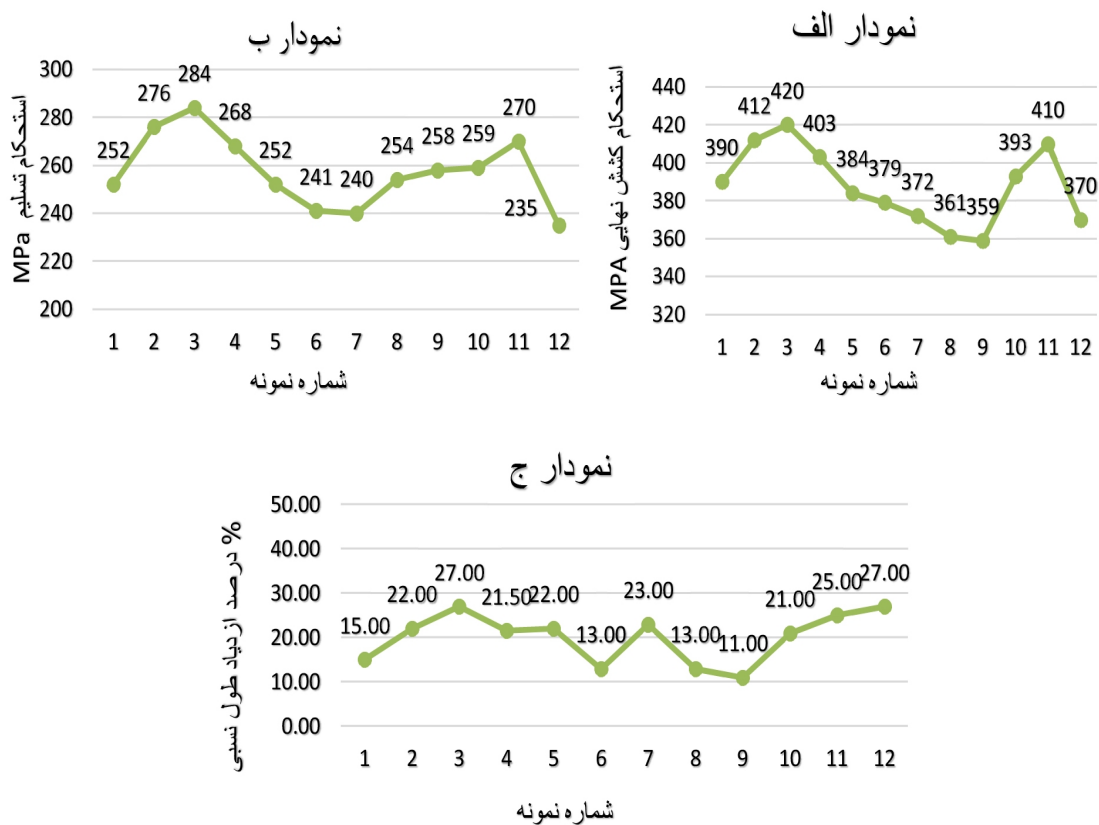


شکل ۶- تصاویر بدست آمده از نمونه شماره ۱ با استفاده از میکروسکوپ نوری الف- از پایین و وسط جوش، ب- از بالای گرده جوش، تصاویر بدست آمده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی ج- از منطقه جوش و د- محل اتصال و ناحیه HAZ فولاد St37 در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر.

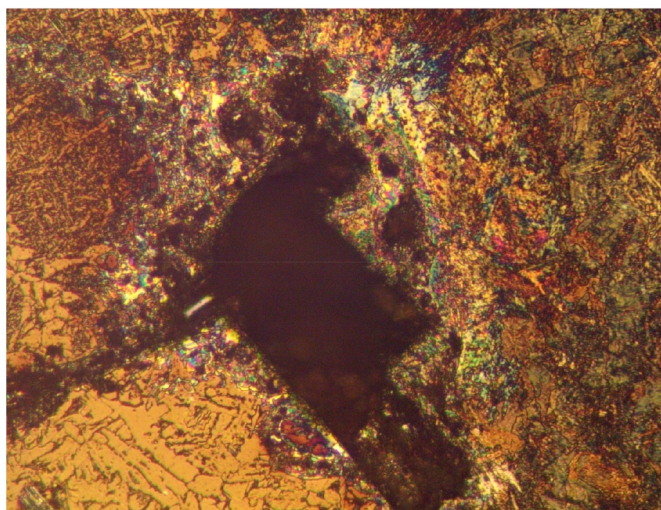


شکل ۷- الف- تصویر OM از نمونه شماره ۳ منطقه HAZ سمت (Mo40) ۱,۷۲۲۵ ب- تصویر SEM از نمونه شماره ۳ منطقه HAZ سمت (Mo40) ۱,۷۲۲۵ در بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر ج- تصویر OM از نمونه شماره ۳ منطقه HAZ نزدیک به جوش و د- تصویر SEM منطقه جوش نمونه شماره ۴ در بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر.

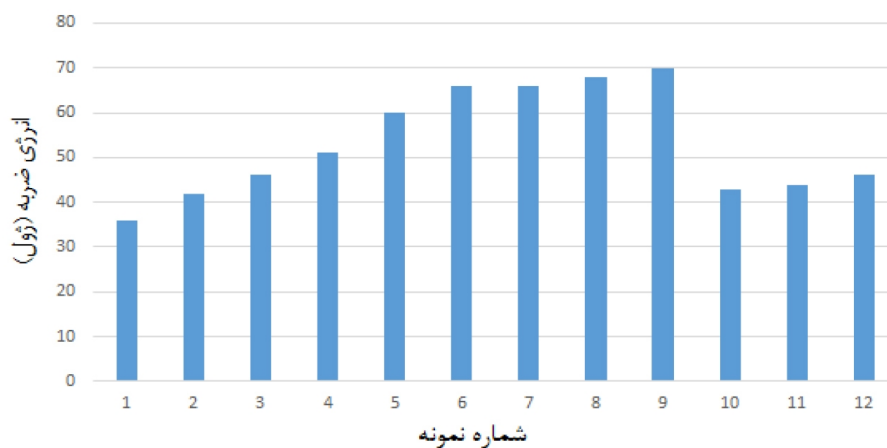
Welding Research



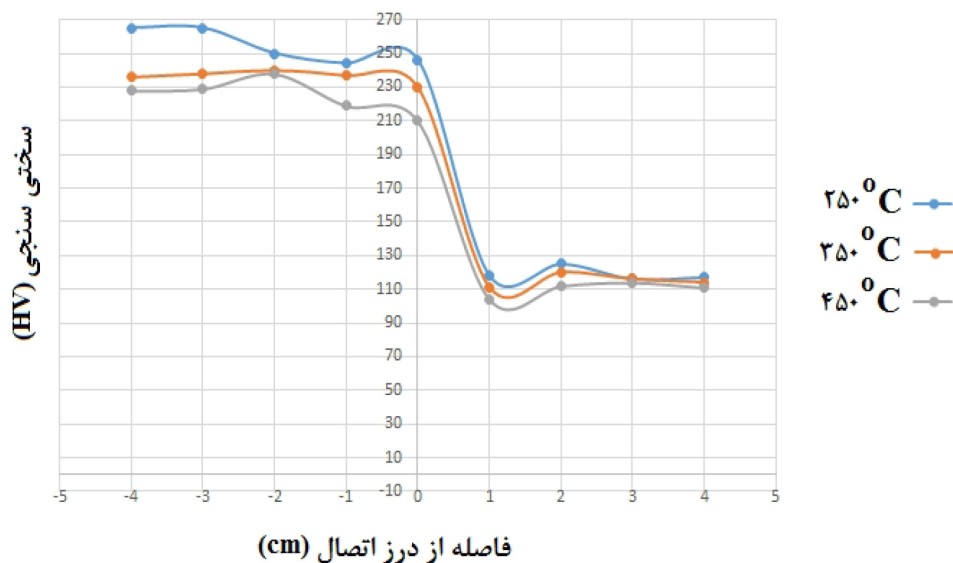
شکل ۸ - الف - گراف تغییرات مربوط به مقادیر استحکام کششی نهایی بر حسب MPa،
ب - نمودار استحکام تسلیم بر حسب MPa ج - درصد ازدیاد طول نسبی مربوط به نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه هستند.



شکل ۹ - تصویری از ناحیه دارای عیب عدم هم‌جوشی و انفصال در نمونه شماره ۱.

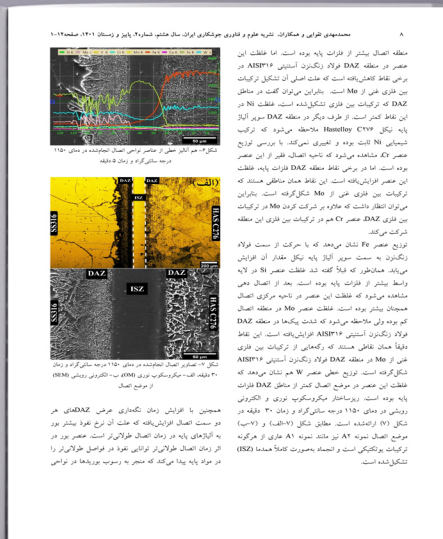
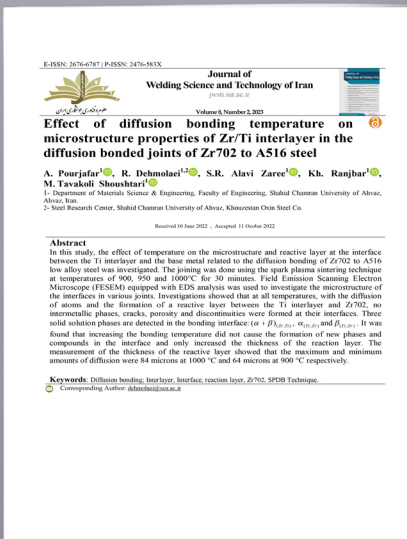


شکل ۱۰- نمودار ستونی تغییرات انرژی ضربه برای نمونه‌های مختلف.



شکل ۱۱- پروفیل سختی از محل جوش به طرف فولادهای پایه در طرفین مربوط به نمونه‌های ۱، ۴ و ۹.

نشریه علم و پژوهش در فناوری جوشکاری ایران



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

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

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

تار نما: www.iwnt.com سامانه عضویت: www.iwnt-membership.ir سامانه گواهینامه‌ها: https://iwntes.ir