

## بررسی اثر عملیات حرارتی بر ریزساختار شفت توربین بخار لایه نشانی شده توسط فرآیند جوشکاری TIG

اسماعیل گنجه\*<sup>۱</sup>، علی رهبر دوست<sup>۲</sup>، علی شکوه فر<sup>۳</sup>

### چکیده

شفت‌های نیروگاهی از نظر جوشکاری دارای مشکلاتی نظیر تشکیل فاز مارتنزیت، آستنیت باقی‌مانده، حساسیت به ترکیب سرد، ایجاد تنش‌های پسماند و ... می‌باشند. انتخاب صحیح روش و متغیرهای جوشکاری، تعیین فلز پرکننده و انجام عملیات حرارتی مناسب پس از جوشکاری سبب کاهش چنین مشکلاتی خواهد شد. با توجه به مقدار کربن و عناصر آلیاژی فولاد شفت 26 NiCrMoV 11 5، سیم جوش کم‌هیدروژن کروم-مولیبدن‌دار برای جوشکاری لایه نشانی سطح فولاد شفت انتخاب گردید. پس از انجام فرآیند جوشکاری، عملیات حرارتی آنیل و نرماله روی نمونه صورت گرفت و با نمونه‌ی بدون عملیات حرارتی مقایسه گردید. هدف از انجام این پژوهش تعیین عملیات حرارتی مناسب پس از جوشکاری و بررسی ویژگی‌های فلز جوش و HAZ با استفاده از آزمون‌های میکروسختی، XRD، SEM و میکروسکوپ نوری بود. با توجه به نتایج متالوگرافی مربوط به ریزساختار و XRD نمونه‌ها، مشاهده شد که در عملیات حرارتی نرماله فازهای کاربیدی بیشتری در زمینه حل شده‌اند که سبب شده تا تغییرات سختی در منطقه‌ی جوش و فلز پایه نسبت به سایر شرایط کمتر باشد. در نتیجه نمونه‌ی جوشکاری شده با سیم جوش کروم-مولیبدن‌دار و تحت عملیات حرارتی نرماله، ساختار و توزیع سختی مطلوب‌تری داشت.

واژه‌های کلیدی: شفت توربین بخار، جوشکاری لایه نشانی، ریزساختار، عملیات حرارتی، سختی

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، باشگاه پژوهش‌گران جوان، تهران، ایران.

۲- کارشناس ارشد رشته مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۳- استاد گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

\*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: [navidganjehie@yahoo.com](mailto:navidganjehie@yahoo.com)

### پیشگفتار

یکی از قطعات مهم در نیروگاه‌ها، شفت‌ها هستند. این شفت‌ها از نظر شکل دارای ظاهری پیچیده بوده و ابعاد و اندازه‌های قابل ملاحظه‌ای دارند. به همین منظور تکنولوژی بالایی برای تولید آنها نیاز است. همچنین، این شفت‌ها دارای استحکام بالایی بوده و از چقرمگی نسبتاً بالایی نیز برخوردار هستند. بنابراین از نظر جوشکاری دارای مشکلات گوناگونی نظیر ایجاد فازهای ترد و شکننده، وقوع استحاله‌ی مارتنزیتی و حساسیت به ترکیدگی سرد در فلز جوش و HAZ می‌باشند.

جنس و ویژگی‌های شفت‌های نیروگاهی در استاندارد ASTM A470 بیان گردیده است [۱]. با توجه به این استاندارد، مشخص است که شفت‌های نیروگاهی زیرمجموعه‌ی فولادهای کم‌آلیاژ می‌باشند. فولادهای کم‌آلیاژ به چهار دسته‌ی اصلی کم‌آلیاژ با استحکام بالا<sup>۱</sup>، کم‌آلیاژ استحکام بالای کوئچ و تمپر شده<sup>۲</sup>، کم‌آلیاژ عملیات حرارتی‌پذیر<sup>۳</sup> و کم‌آلیاژ مقاوم به حرارت کروم - مولیبدن‌دار<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند. فولادهای کم‌آلیاژ کروم - مولیبدن‌دار، در برابر خوردگی و اکسایش مقاوم بوده و در دماهای نسبتاً بالا استحکام خود را از دست نمی‌دهند. با توجه به سرعت‌های سرمایه‌ی متفاوت در انواع گوناگون عملیات حرارتی، ریزساختار فولادهای کروم - مولیبدن‌دار می‌تواند از ریزساختار فریت - پرلیت تا فریت - بینیت متفاوت باشد. مهم‌ترین کاربرد این فولادها در صنعت نفت و پتروشیمی، نیروگاه‌های برق با درجه حرارت کاری بالا، لوله‌های بخار، لوله‌های فوق‌حرارتی پالایشگاه‌ها، کوره‌ها، مولدهای حرارتی، پیچ‌ها و مهره‌های مقاوم به حرارت، قطعات توربین، شفت توربین‌های بخار و تجهیزاتی که در درجه حرارت‌های بالا قرار می‌گیرند، است [۲، ۳].

فولادهای کم‌آلیاژ کروم - مولیبدن‌دار به‌وسیله‌ی بیشتر فرآیندهای جوشکاری قابل اتصال‌دهی هستند. ویژگی سختی‌پذیری در هوا<sup>۵</sup> در این گروه فولادها، سبب می‌شود

عملیات جوشکاری با تلاش بیشتری برای جلوگیری از ترکیدگی در فلز جوش و منطقه‌ی متأثر از حرارت<sup>۶</sup> همراه باشد. با بالا بردن دمای پیش‌گرم و نگه داشتن قطعه در این دما برای زمانی مشخص و همچنین، انتخاب صحیح الکتروود، حتی پس از پایان جوشکاری و شروع عملیات حرارتی، می‌توان حساسیت به ترک را کاهش داد. ترکیب شیمیایی فلز پرکننده تقریباً باید مشابه جنس فولاد قطعه کار باشد؛ به جزء کربن که اگر کمتر باشد، بهتر است. عناصر آلیاژی در فلز پرکننده، می‌تواند کمی بالاتر از درصد آنها در فولاد باشد. با توجه به اینکه حضور وانادیوم در فلز پرکننده، عمل جوشکاری را مشکل می‌سازد، بهتر است فلز پرکننده دارای مقادیرهای وانادیوم کمتری باشد [۲].

از فولاد ۱۱ ۵ NiCrMoV ۲۶ (۱.۶۹۴۸) در شفت‌های HP/LP توربین‌های گازی استفاده می‌شود، بدین گونه که در یک سمت، شفت در شرایط کاری دما و فشار بالا (HP) و در سمت دیگر، در دما و فشار پایین (LP) کار می‌کند. سمت HP باید دارای استحکام خزشی خوب و سمت LP باید دارای چقرمگی خوب باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که وجود ساختارهای پرلیتی و بینیتی در این فولادها یک حسن به‌شمار می‌رود. این نوع فولاد، جزء فولادهای کم‌آلیاژ می‌باشند و در دسته‌بندی فولادهای مارتنزیتی کم‌آلیاژ استحکام بالا قرار دارد [۳]. این فولاد در استاندارد [۱] ASTM A470 که جنس و ویژگی‌های شفت‌های نیروگاهی در آن دسته‌بندی شده است، در کلاس ۷ قرار می‌گیرد.

با توجه به مقدار کروم و نیکل نسبتاً بالای این نوع فولاد، استحکام خزشی و چقرمگی مورد نیاز در شفت‌های توربین‌های گازی به‌طور توأمان برآورده می‌شود. گفتنی است که عناصر آلیاژی دیگری نیز به‌عنوان عناصر آلیاژی تقویت‌کننده برای بهبود ویژگی‌ها و قابلیت‌های این فولاد به آن افزوده می‌شود. کروم در این فولاد سبب افزایش قابلیت سختی‌پذیری و مقاومت برشی شده و همچنین، مقاومت به پوسته شدن در حرارت‌های بالا را بهبود می‌بخشد. مولیبدن سبب افزایش تنش تسلیم و استحکام کششی در این فولاد می‌شود. نیکل به‌عنوان یک عنصر

1 - High Strength Low-Alloy (HSLA)  
2 - Quench-Tempered Low-Alloy (QTLA)  
3 - Heat Treatable Low-Alloy (HTLA)  
4 - Cr-Mo Low-Alloy  
5 - Air Hardening

6 - Heat Affected Zone (HAZ)

آلیاژی به منظور افزایش چقرمگی و مقاومت به ضربه به این فولاد افزوده می‌شود. وانادیوم سبب ریز شدن دانه‌ها شده و از این رو افزایش چقرمگی، استحکام خزشی و مقاومت به حرارت‌های بالا را به همراه دارد. منگنز نیز با افزایش قابلیت سختی‌پذیری فولاد سبب افزایش استحکام، چقرمگی و عمق سختی‌پذیری در فولادها می‌گردد. گفتنی است که حضور عناصر گوگرد، فسفر، انتیموان و قلع سبب افزایش تردی در این فولاد شده و باید به حداقل مقدار ممکن برسند. به بیان دیگر، بهتر است این گروه از فولادها به گونه‌ای بسیار تمیز<sup>۱</sup> تولید گردد[۴].

جوشکاری لایه‌نشانی یکی از روش‌های بهبود ویژگی‌های سطحی بدون تغییر ویژگی‌های زیرلایه است. روش‌های SAW و GMAW برای لایه‌نشانی سطوح با مساحت زیاد استفاده می‌شوند؛ ولی روش GTAW به‌طور معمول برای لایه‌نشانی سطوح با مساحت کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش جوشکاری لایه‌نشانی موضوع اصلی میزان رقت<sup>۲</sup> در فصل مشترک فلز جوش با قطعه‌ی اصلی است، بدین گونه که با توجه به میزان کربن معادل فلز پرکننده و قطعه‌ی اصلی، هرچه میزان رقت در فصل مشترک اتصال افزایش یابد، میزان سختی فصل مشترک نیز افزایش پیدا می‌کند[۵].

در جوشکاری TIG، میزان عبور نفوذ عناصر آلیاژی از سیم جوش به سمت حوضچه‌ی مذاب بسیار مهم است و فلز خنثی و عناصر آلیاژی و مقدار ناخالصی موجود در سیم جوش و یا فلز پایه با توجه به میزان رقت، ترکیب شیمیایی فلز جوش را تشکیل می‌دهند[۶، ۷].

با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد 26 NiCrMo 11 5، مشخص است که این فولاد مستعد به ترکیدگی سرد بوده و لذا باید سیم جوشی انتخاب گردد که این مشکل را به حداقل ممکن برساند. برای جوشکاری فولادهای کم‌آلیاژ نیکل - کروم - مولیبدن دار سیم‌جوش‌های استاندارد AWS A5.28 مناسب می‌باشند[۸، ۹].

هدف از انجام این پژوهش، بررسی تغییرات ریزساختار و سختی در ناحیه‌های گوناگون، مانند فلز پایه، HAZ و فلز جوش در اثر جوشکاری لایه‌نشانی روی فولاد

26 NiCrMoV 11 5 در شرایط متفاوت عملیات حرارتی پس از جوشکاری با استفاده از یک سیم جوش مناسب می‌باشد. هدف اصلی رسیدن به ساختارهای بینیتی و پرلیتی همراه با هم می‌باشد.

### مواد و طراحی آزمایش، مشخصات نمونه‌های آزمایش

جدول ۱ ترکیبات شیمیایی نمونه‌های آزمایش تهیه شده از فولاد 26 NiCrMoV 11 5 را نشان می‌دهد. به منظور تعیین ویژگی‌های مکانیکی این نوع فولاد، آزمایش‌های مکانیکی کشش، ضربه و سختی روی آن انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ مشخص شده است.

### ابعاد نمونه‌های آزمایش

برای انجام عملیات جوشکاری لایه‌نشانی، نمونه‌هایی از فولاد 26 NiCrMoV 11 5 به ابعاد ۲۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر تهیه شد. پس از انجام جوشکاری روی نمونه‌های یاد شده، نمونه‌هایی با ابعاد ۲۰×۱۰×۱۰ میلی‌متر برای انجام تست‌های متالوگرافی و سختی‌سنجی تهیه شد.

### تعیین فرآیند جوشکاری

برای انجام عملیات جوشکاری به‌گونه‌ی لایه‌نشانی روی سطح، موارد گوناگونی از جمله عدم پاشش مذاب در منطقه‌ی جوش، کیفیت فلز جوش بالا، کنترل دقیق روی میزان گرمای ورودی، درجه رقت در منطقه‌ی جوش و ... را بایستی در نظر گرفت. همچنین، با توجه به حجم کم و دقیق عملیات جوشکاری و موارد یاد شده، روش جوشکاری TIG روشی مناسب برای انجام عملیات جوشکاری لایه‌نشانی می‌باشد.

### انتخاب سیم جوش

چنانچه قبلاً اشاره شد، برای جوشکاری فولاد 26 NiCrMoV 11 5، سیم‌جوش استاندارد موجود نمی‌باشد، بلکه شرکت‌های گوناگون به‌گونه‌ی انحصاری این سیم‌جوش‌ها را ساخته و تحت عنوان فولاد جوشکاری شونده ارائه می‌کنند. با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد یاد شده مشخص می‌شود که این فولاد مستعد ترکیدگی سرد است، لذا باید سیم‌جوشی انتخاب گردد که این

1 - Super Clean

2 - Dilution

مشکل را به حداقل برساند. از آنجایی که مقدار کربن و عناصر آلیاژی فلز پایه بیشتر از فلز جوش بود، لذا سیم جوش‌های با استحکام پایین نیز می‌توانستند پاسخ‌گوی کار ما باشند. بدین منظور سیم جوش ER 80S-B2 با قطر ۲ میلی‌متر مطابق استاندارد AWS A5.28 [10] انتخاب شد. با تهیه‌ی نمونه‌های کووانتومتری از این سیم جوش، ترکیب شیمیایی آن مطابق با استاندارد ASTM E1010 تعیین شد. کربن معادل (CE) سیم‌جوش‌های مصرفی نیز با استفاده از رابطه‌ی (۱) قابل محاسبه می‌باشد [۱۱]:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Si + Ni + Cu}{15} \quad (1)$$

$$C_{E(ER\ 80S-Ni\ 2)} = 0.45$$

$$C_{E(ER\ 80S-B2)} = 0.66$$

### تعیین متغیرهای جوشکاری

گرمای ورودی، گاز محافظ، دمای پیش‌گرم، دمای بین پاسی، دمای پس‌گرم و ... از جمله متغیرهای قابل تغییر بودند، ولی در تمامی موارد جوشکاری یکسان در نظر گرفته شد. در این پژوهش، دو نوع عملیات حرارتی پس از جوشکاری در نظر گرفته شد. با توجه به مقدار کربن معادل (CE) نمونه‌ی فولادی 26 NiCrMoV 11 5

(معادله Error! Reference source not

found.) مشخص شد که امکان ایجاد فازهای ترد و شکننده در کنار ناحیه‌ی جوش وجود دارد و بایستی از ترکیب سرد (هیدروژنی) آن جلوگیری شود.

$$C_{E(26\ NiCrMoV\ 11\ 5)} = 0.89$$

برای حل مشکل یاد شده، دمای پیش‌گرم مناسب

برای جوشکاری طبق رابطه‌ی Error! Reference

found.)، ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد

در نظر گرفته شد [۱۱]. این دما تقریباً براساس تغییر استحاله‌ی آستنیت به بینیت در این فولاد می‌باشد. این ساختار دارای سختی کمتری نسبت به ساختار مارتنزیتی بوده و از انعطاف‌پذیری بهتری نیز برخوردار می‌باشد، لذا حساسیت آن نسبت به ترکیب سرد هیدروژنی نیز کمتر است. همان‌گونه که قبلاً یادآور شدیم، باتوجه به ایجاد ترکیب سرد و نقش هیدروژن در به‌وجود آمدن آن از فرآیند جوشکاری TIG که دارای گرمای ورودی کم و

هیدروژن پایین می‌باشد، برای جوشکاری نمونه‌های فولادی استفاده می‌شود.

$$T_0 = 210 \times C_E + (-45/+15) \rightarrow 140 < T_0 < 200 \quad (2)$$

به‌منظور جلوگیری از ایجاد ساختار مارتنزیتی، دمای بین پاسی نیز معادل دمای پیش‌گرم انتخاب گردید، همچنین، به‌منظور خروج هیدروژن از فلز جوش و بهبود ویژگی‌های مکانیکی و چقرمگی فلز جوش، دمای پس‌گرم نیز معادل دمای پیش‌گرم و برابر با ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. پس از انجام تمامی موارد بالا، نمونه‌های جوشکاری شده تحت سیکل‌های گوناگون عملیات حرارتی قرار گرفتند. در حالت نخست، نمونه‌ها بدون هیچ عملیات حرارتی قرار گرفته و در حالت دوم، نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی آنیل به مدت یک ساعت در دمای ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس در کوره تا دمای ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و در نهایت در هوا تا دمای اتاق سرد شدند. در حالت سوم، نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی نرماله قرار گرفتند، به‌گونه‌ای که به‌مدت یک ساعت در دمای ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نگه داشته شده و سپس در هوا تا دمای اتاق سرد گردیدند. برای انجام عملیات‌های حرارتی آنیل و نرماله از کوره‌ی موفل<sup>۱</sup> AZAR F11L 1250°C با اتمسفر معمولی استفاده شد.

### انجام عملیات جوشکاری

برای انجام عملیات جوشکاری لایه‌نشانی، نخست لازم بود تا نمونه‌ها پیش‌گرم شوند. بدین منظور از دستگاه گرم-کننده استفاده گردید. بدین ترتیب نمونه‌های فولادی تا دمای ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد گرم شدند و پس از گرم شدن نمونه‌ها تا دمای مورد نظر، عملیات جوشکاری DCEN با قطبیت TIG به‌وسیله‌ی فرآیند جوشکاری روی آنها انجام شد، به‌گونه‌ای که ۳ لایه فلز جوش با ضخامتی تقریباً برابر ۳ میلی‌متر روی سطح نمونه‌ها رسوب GAAM Electric داده شد. دستگاه جوشکاری AC/DC ParsTig 250 تنگستن

**آزمایش سختی سنجی**

توریوم دار به قطر ۲/۴ میلی‌متر و نازل سرامیکی شماره ۶ و گاز محافظ آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد استفاده شد. در

جدول ۵ شرایط گوناگون جوشکاری نمونه‌ها آورده شده است.

**آزمایش متالوگرافی**

پس از پایان عملیات جوشکاری و حرارتی، از مقاطع جوشکاری شده نمونه‌های متالوگرافی تهیه گردید. برای بررسی ریزساختار ناحیه‌های گوناگون از محلول اچ نیتال ۲ درصد به مدت ۱۰ ثانیه استفاده شد. در نهایت ریزساختار نمونه‌ها به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری مدل IMI-420 (صایران، ایران) مورد بررسی قرار گرفت.

**آنالیز SEM**

به‌منظور مشاهده‌ی هرچه بهتر ریزساختار ناحیه‌های جوشکاری شده و استفاده از بزرگ‌نمایی‌های بالاتر برای بررسی این ناحیه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. دستگاه SEM مورد استفاده مدل VEGA LMX مجهز به طیف‌سنج تفکیک انرژی<sup>۱</sup> می‌باشد. نمونه‌ها در ولتاژ شتاب‌دهی 20 Kev مورد تست قرار گرفتند.

**آنالیز پراش پرتوی ایکس (XRD)**

برای مشخص کردن ریزساختار و تعیین فازهای گوناگون در فلز جوش و HAZ، از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده گردید. دستگاه XRD مورد استفاده مدل Philips PW 1800 diffractometer بود که نمونه‌ها تحت ولتاژ ۴۰ kV، آمپر ۳۰ mA، سرعت اسکن ۴°/min تحت آند  $CuK\alpha_1$  قرار گرفتند. به‌منظور تعیین فازهای گوناگون در نمونه‌های جوشکاری شده، از نرم‌افزار PANalytical X'Pert HighScore<sup>۱</sup> استفاده کردید.

برای اطلاع از تغییرات متالورژیکی به‌وجود آمده، ناشی از جوشکاری، از آزمایش میکروسختی‌سنجی ویکرز استفاده گردید. در آزمایش سختی‌سنجی، تغییرات سختی در راستای ضخامت نمونه و لایه‌ی روکش مورد بررسی قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده در سختی‌سنجی Buehler Micromet 1-Vickers Micro Hardness بود. نمونه‌ها با بار ۱ کیلوگرم مورد تست قرار گرفتند.

**نتایج****بررسی ریزساختار ناحیه‌های گوناگون با استفاده از میکروسکوپ نوری**

شکل ۱ ریزساختار مناطق گوناگون در قطعه‌ی روکش-کاری شده با سیم‌جوش ER 80S-B2 تحت عملیات حرارتی گوناگون را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۱، فلز جوش کاملاً ریز دانه شده و نزدیک به ریزساختار فلز پایه می‌باشد. در شکل ۱ پدیده‌ی رشد دانه‌ها در فلز جوش کاملاً مشخص است. در واقع ریزساختار به‌وجود آمده در شکل ۱ مناسب‌ترین حالت ریزساختار فلز جوش است، چرا که ریزساختار فلز جوش نسبت به حالات دیگر یکنواخت‌تر است. لازم به ذکر است که وجود مناطق فریتی در این نمونه‌ها، به‌علت نفوذ عنصر نیکل از فلز پایه به سیم‌جوش می‌باشد. لذا مشاهده می‌شود نمونه‌ای که تحت عملیات حرارتی نرماله قرار گرفته است، ریزساختاری را تشکیل داده که جزایر کروی کاربیدهای عناصر آلیاژی به‌همراه مارتنزیت یا بینیت به‌طور یکنواخت در زمینه‌ای از فریتی قرار گرفته‌اند.

**بررسی ریزساختار مناطق گوناگون با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی**

در این قسمت به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری با بزرگ‌نمایی بالا از ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده تهیه گردید. شکل ۲ ناحیه‌های گوناگون قطعه‌ی روکش‌کاری شده با سیم‌جوش ER 80S-B2 و بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری را نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که دانه‌بندی فلز جوش ریز بوده و شامل تیغه‌های کاربیدی، مارتنزیتی یا بینیتی نازک بسیاری

جدول ۶ گردآوری شده است.

است. شکل ۲ ناحیه‌های گوناگون قطعه‌ی روکش‌کاری شده با سیم‌جوش ER 80S-B2 و عملیات حرارتی آنیل شده پس از جوشکاری را نشان می‌دهد. در این حالت ریزساختار فلز جوش در اثر عملیات حرارتی آنیل نسبت به نمونه‌ی بدون عملیات حرارتی رشد دانه داشته است، ولی به دلیل حضور کاربیدهای عناصر آلیاژی در فلز جوش، این رشد نسبت به حالت پیش تا حدودی کمتر شده است. همچنین، شکل ۲ ناحیه‌های گوناگون قطعه روکش‌کاری شده با سیم‌جوش ER 80S-B2 و عملیات حرارتی نرماله شده پس از جوشکاری را نشان می‌دهد. ریزساختار فلز جوش و فلز پایه نزدیک به یکدیگر بوده و تقریباً یکنواخت است. به‌طور کلی شروع تخریب در شفت‌ها از محل‌های تمرکز تنش شروع می‌شود. محل‌های جوشکاری یکی از ناحیه‌های تمرکز تنش می‌باشد که بایستی در هنگام ساخت و تعمیر شفت به آن توجه شود. دقت در طراحی جوش‌ها، انتخاب صحیح متغیرهای جوشکاری و فلز پرکننده و نیز انجام عملیات حرارتی مناسب پس از جوشکاری سبب کاهش تنش‌های پسماند در محل‌های جوشکاری خواهد شد. لذا انتخاب صحیح این متغیرها نیاز به شناخت تأثیر هر کدام بر منطقه‌ی HAZ و فلز جوش دارد.

### پراش پرتو ایکس

بر اساس الگوهای پراش پرتو ایکس، عمده‌ی فازهای تشکیل شده در ناحیه‌ی جوش کاربرد عناصر آلیاژی و مارتنزیت/باینیت می‌باشند که در زمینه‌ای از فاز فریت قرار گرفته‌اند. همچنین با توجه به شکل ۳ مشخص می‌شود که با انجام عملیات حرارتی آنیل و نرماله مقادیر کاربید عناصر آلیاژی کمتر شده و در زمینه حل می‌شوند، بنابراین طول XRD پیک‌های مربوطه کاهش یافته است. نمودارهای به‌همراه فازهای تشکیل یافته در منطقه‌ی جوش، در شکل ۳ و

### آزمایش سختی سنجی

با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که سختی از سطح به عمق جوش تقریباً کاهش می‌یابد، ولی زمانی که به فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه نزدیک می‌شویم، دوباره شروع به افزایش می‌کند. همان‌گونه که در این نمودارها مشخص است، مقدار سختی در فلز جوش کمترین مقدار و در فلز پایه بیشترین مقدار است و در منطقه‌ی HAZ، این تغییرات سختی مشهودتر بوده و به شدت افزایش می‌یابد. با انجام عملیات حرارتی مناسب می‌توان این افزایش سختی را کاهش داده و به حداقل رسانید. با توجه به عملیات‌های حرارتی انجام شده در عملیات حرارتی نرماله، این موضوع مشهودتر است.

### بحث و بررسی تأثیر جنس سیم جوش بر ویژگی‌های مکانیکی جوش و HAZ

با توجه به نوع سیم‌جوش انتخابی، ویژگی‌های متفاوتی در فلز جوش به‌دست آمد. سختی فلز جوش و منطقه‌ی (ناحیه‌ی) HAZ در نمونه‌های جوشکاری شده با کروم-مولیبدن دار بالا بود که به دلیل وجود عناصر کاربیدزای کروم و مولیبدن و غیره می‌باشد. همچنین، ریزساختار فلز جوش در نمونه‌ی جوشکاری شده با سیم‌جوش کروم-مولیبدن دار، ریزساختار ریزی دارد که ناشی از حضور کاربیدهای عناصر آلیاژی در فلز جوش است.

### تأثیر نوع عملیات حرارتی بر ویژگی‌های مکانیکی جوش و HAZ

در فرآیند جوشکاری که در حقیقت نوعی سرمایه‌ساز سریع است، امکان تشکیل مارتنزیت بسیار بالا است؛ اما می‌توان با کنترل دمای پیش‌گرم و پس‌گرم و استفاده از عملیات حرارتی مناسب پس از جوشکاری این مشکل را حل نمود. اثرات متالورژیکی جوش روی فلز پایه، بستگی به ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های عملیات حرارتی فلز پایه و فلز جوش دارد. در جوشکاری هر اندازه نقاط به منطقه‌ی

جوش نزدیک‌تر باشند، دمای بالاتری داشته و هر اندازه که دورتر شوند، دمای آنها کاهش می‌یابد. از این رو مناطق گوناگون اطراف فلز جوش ویژگی‌های گوناگونی خواهند داشت. تأثیر مشترک میزان بالای کربن و عناصر آلیاژی در فولادهای کم‌آلیاژ سبب تشکیل مارتنزیت در جوش، پس از سرد شدن جوش از دمای آستنیت می‌شود. میزان کربن به مقداری بالا است که سبب ایجاد مارتنزیت ترد می‌شود. در هنگام جوشکاری مقداری از منطقه‌ی HAZ به آستنیت تبدیل خواهد شد. اگر فلز جوش و منطقه‌ی HAZ با ساختار آستنیتی به سرعت سرد شوند، به مارتنزیت و یا ترکیبی از مارتنزیت و بینیت تبدیل می‌شوند. تنش‌های داخلی ایجاد شده در حین سرد شدن و در اثر انقباض فلز و تبدیل آستنیت به مارتنزیت، سبب ایجاد ترک در مارتنزیت ترد می‌شود. نرخ سرمایش باید به اندازه‌ای کم شود که مارتنزیت تشکیل نشده و ساختار نهایی بینیتی شود. بینیت در ریزساختار جوش و منطقه HAZ به میزان کافی چقرمگی دارد و این مقدار چقرمگی برای جلوگیری از ایجاد ترک در فاصله‌ی بین پایان جوشکاری و عملیات پس از جوشکاری کافی است [۱۲و۱۳]. در اثر عملیات آنیل منطقه HAZ بسیار کاهش یافته و تیغه‌های مارتنزیت در اثر حرارت به فریت و مارتنزیت تمپر شده تبدیل شده‌اند. از سویی، برخی از کاربیده‌های عناصر آلیاژی مانند کاربید کروم که پایداری حرارتی کمتری نسبت به دیگر کاربیدها دارد، تجزیه شده‌اند. نمونه‌هایی که تحت عملیات حرارتی نرماله قرار گرفتند، دارای ساختار ریزتری نسبت به نمونه‌های آنیل شده بودند؛ ولی از سویی نمونه‌های نرماله شده، ریزساختار یکنواخت‌تری نسبت به نمونه‌های آنیل شده داشتند. از این میان نمونه‌ی B<sub>3</sub> نرماله شده که به وسیله‌ی سیم‌جوش کروم-مولیبدن‌دار جوشکاری شده بود، بهترین یکنواختی در ریزساختار را به همراه تغییرات سختی مناسب دربرداشت.

#### تأثیر ضخامت بر ویژگی‌های مکانیکی جوش و HAZ

با افزایش ضخامت، سختی فلز جوش و HAZ افزایش پیدا می‌کند. در توضیح این رفتار باید گفت که در اثر افزایش ضخامت، سرعت انتقال حرارت زیاد شده و

در نتیجه منطقه‌ی جوش و HAZ با سرعت بیشتری سرد می‌شوند. در ضخامت‌های بالا، سرعت سرد شدن فلز جوش و منطقه HAZ افزایش پیدا کرده و بنابراین فلز جوش با ساختارهای با دمای پایین تشکیل می‌شود. این ساختارها دارای استحکام و سختی بالاتری نسبت به ساختارهای نفوذی هستند. در هنگام جوشکاری قطعات با ضخامت کم، سرعت گرم شدن سریع بوده و سرعت سرد شدن کم می‌باشد. با توجه به دمای بالای قطعات نازک و زمان کافی برای نفوذ، ساختارهای نفوذی در فلز جوش تشکیل می‌شود. در ضخامت بالا، سرعت انتقال حرارت سریع بوده و سبب افت سریع دما می‌شود. این موضوع سبب پیش آمدن کاهش عرض منطقه HAZ و همچنین تمایل ریزساختار منطقه HAZ و فلز جوش به سوی ساختارهای برشی می‌شود.

افزایش بیش از حد سختی منطقه HAZ را می‌توان ناشی از تشکیل ساختارهای برشی و نیمه برشی دانست، زیرا ساختارهای بینیتی و مارتنزیتی دارای چنین سختی بالایی هستند. به دلیل اینکه تنش‌های پسماند در ساختارهای مارتنزیتی زیاد می‌باشد و از طرفی تنش‌های پسماند سبب کاهش عمر قطعه می‌شود، لذا می‌بایست قطعات را پیش از جوشکاری پیش‌گرم نمود. دمای پیش‌گرم باید به اندازه‌ای انتخاب گردد که از تغییر استحاله‌ی آستنیت به مارتنزیت جلوگیری شود و حداقل ساختار بینیتی که نسبت به ساختار مارتنزیتی دارای انعطاف بیشتری است، تشکیل گردد. این ساختار دارای استحکام تقریباً یکسانی با ساختار مارتنزیتی بوده و مقاومت به ضربه‌ی بهتری نسبت به ساختار مارتنزیتی را داراست. گفتنی است که پدیده‌ی رشد دانه‌ها در فلز جوش و منطقه HAZ دلیل اصلی افت سختی در این مناطق می‌باشد [۱۴].

#### تأثیر رقت بر ویژگی‌های مکانیکی جوش و HAZ

اندازه‌ی سختی از مرکز جوش به سمت کناره‌های جوش افزایش می‌یابد. برای توضیح این موضوع، بایستی به نقش عناصر آلیاژی و کربن در فلز جوش اشاره کرد. عناصر آلیاژی سبب افزایش کربن معادل فلز جوش شده و لذا سختی‌پذیری را افزایش می‌دهند. این عناصر از راه

ذوب شدن فلز پایه در هنگام عملیات جوشکاری تأمین می‌گردند. در خط جوش بیشترین رقت به وجود آمده و با فاصله گرفتن از خط جوش و حرکت به سمت مرکز جوش، از میزان رقت کاسته می‌شود. همچنانکه رقت افزایش می‌یابد، اندازه‌ی سختی منطقه جوش نیز افزایش پیدا می‌کند. افزایش سختی در منطقه جوش سبب کاهش چقرمگی شکست فلز جوش می‌شود و بنابراین تردی افزایش پیدا می‌کند. استفاده از سیم جوش با درصد کربن و عناصر آلیاژی کمتر از فلز پایه، سبب کاهش تنش‌های پسماند در محل جوش می‌شود. با توجه به تأثیر ضخامت و رقت این نکته نتیجه می‌شود که در هنگام جوشکاری در اثر افزایش عناصر آلیاژی در کنار خط جوش، کربن معادل افزایش پیدا کرده و در ضخامت بالای ساختارهای برشی تشکیل می‌شود. این ساختارها نخست، مستعد به ترکیدگی سرد بوده و دوم، میزان تنش پسماند در آنها نیز زیاد می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً محاسبه گردید، کربن معادل فلز پایه  $0/189$  و کربن معادل سیم جوش ER 80S-B2  $0/66$  به دست آمد. همان‌گونه که مشخص است، میزان کربن معادل فلز پایه از سیم جوش مصرفی بالاتر است که این خود سبب افزایش درجه رقت در محل اتصال، به‌ویژه در منطقه HAZ می‌شود؛ در نتیجه سبب افزایش سختی در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه می‌گردد. اما با انجام عملیات حرارتی مناسب، می‌توان این سختی را کاهش داده و به حداقل رسانید. با توجه به عملیات‌های حرارتی انجام شده، در عملیات حرارتی نرماله این موضوع مشهودتر است [۱۵].

### تأثیر تعداد پاس‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی جوش و HAZ

با توجه به نمودارهای سختی، مشاهده می‌شود که سختی از سطح به عمق جوش تقریباً کاهش می‌یابد ولی زمانی که به فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه نزدیک می‌شویم، دوباره شروع با افزایش می‌کند. دلیل را می‌توان در تعداد پاس‌های جوشکاری و اثر هر پاس بر پاس قبلی جستجو نمود. البته افزایش درجه رقت در محل اتصال نیز سبب افزایش سختی در این منطقه می‌گردد. از نظر تعداد پاس‌های جوشکاری و اثر هر پاس بر پاس بایستی این‌گونه

بیان نمود که در واقع هر پاس، پاس پیشین خود را آنیل یا تمپر می‌نماید و سبب کاهش سختی در آن می‌گردد. در هر حال با اندازه‌گیری سختی در طول جوش، می‌توان نقاط با کمترین سختی را مشخص نمود. تعداد پاس‌ها بر سختی منطقه HAZ نیز اثر می‌گذارد، به‌گونه‌ای که اندازه‌ی سختی HAZ مربوط به پاس‌های ریشه، کمتر از پاس‌های آخر می‌باشد. بنابراین سختی جوش و منطقه HAZ پاس آخر، بیشتر از پاس ریشه می‌باشد، اما به دلیل موضوع رقت و ضخامت، در ضخامت‌های بالا این موضوع عکس شده و پاس ریشه دارای سختی بیشتری نسبت به پاس آخر است. تعداد پاس‌ها بر عمر محور نیز تأثیر می‌گذارند، به‌گونه‌ای که با افزایش تعداد پاس‌ها از عمر محور نیز کاسته می‌شود [۱۶].

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روی فولاد کم‌آلیاژ شفت توربین بخار 26 NiCrMoV 11 5 عملیات روکش‌کاری با استفاده از جوشکاری TIG با سیم جوش ER 80S-B2 (کروم-مولیبدن‌دار) انجام شد. پس از انجام عملیات جوشکاری، به‌منظور کاهش تنش‌های پسماند و جلوگیری از ترک سرد در منطقه‌ی جوش، نمونه‌های جوشکاری شده تحت عملیات حرارتی آنیل و نرماله قرار گرفتند که نتایج به‌صورت زیر به دست آمد:

- ۱- وجود کاربیدهای عناصر آلیاژی در فلز جوش به دست آمده از جوشکاری سبب افزایش سختی می‌شوند. همچنین، به دلیل جوشکاری چند پاسه، ساختار مارتنزیت تمپر شده در ساختار ایجاد شده است.
- ۲- ریزساختار فلز جوش در اثر عملیات حرارتی آنیل، نسبت به نمونه‌ای که تحت عملیات حرارتی نرماله قرار گرفته، رشد دانه‌ی بیشتری کرده است.
- ۳- وجود کربن یا کربن معادل کمتر در سیم جوش در مقایسه با فلز پایه سبب افزایش مقدار فریت در فلز جوش شده است.
- ۴- مقدار سختی در فلز جوش کمترین مقدار و در فلز پایه، بیشترین مقدار است و در منطقه HAZ این تغییرات سختی، مشهودتر می‌باشد. به‌گونه‌ای که توزیع سختی در نمونه‌ی نرماله شده نرمال‌تر بود.



۵- نمونه‌ی B<sub>3</sub> که تحت عملیات حرارتی نرماله قرار گرفت، ریزساختار یکنواخت‌تری نسبت به نمونه‌های آنیل شده داشت که دلیل اصلی آن حضور ساختارهای بینیتی می‌باشد.

### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از شرکت مینا(حامی مالی پروژه در تأمین هزینه‌ها و تجهیزات)، کمال تشکر و قدردانی را داشته و نیز از ناظر پروژه، مهندس میثم خدابخشی نماینده‌ی شرکت مینا که رهنمودهای ایشان همواره راه‌گشا و امید بخش بوده، صمیمانه تشکر می‌شود.

### References:

- 1- ASTM and A470, "Standard Specification for Vacuum-Treated Carbon and Alloy Steel Forgings for Turbine Rotors and Shafts," 2005
- 2- W. Wiemann, C. Berger, K. H. Mayer and E. Potthast, "A New 2% CrMoNiWV Creep Resistant Rotor Steel," International Conference on Advances in Material Technology for Fossil Power Plants, Chicago, USA, Vol. 1, pp. 100-112, 1987.
- 3- A. Salemi and A. Abdollah-zadeh, "The effect of tempering temperature on the mechanical properties and fracture morphology of a NiCrMoV steel ", Materials Characterization, Vol. 29, pp. 484 – 487, 2008.
- 4- R. F. Hanus, K. H. Schönfeld and H. Wagner, "Transformation of Knowledge and Technology from Research and Development to the Commercial Production of Heavy Steel Castings and Forgings for Power Engineering, Made of Advanced Creep Resistant Steels," Voest-Alpine Giessereilinz GmbH, Germany, Vol. 1, pp. 165-177, 2000.
- 5- H. Furuya, S. Aihara and K. Morita, "A new proposal of HAZ toughness evaluation method HAZ toughness of structural steel in multi-layer and single-layer weld joints," Weld Journal, Vol. 2, pp. 46-58, 2007.
- 6- T. Robakowski, Fatigue Test Joints and Welded Elements Performed at the Institute of

Welding and Fatigue Resistance of Materials and Metal Structural Parts, p. 156-169, Institute of Precision Mechanics, Warszdwa, 1964.

7- S. J. Maddox, "An Introduction to the Fatigue of Welded Joints," International Institute Welding, Vol. 4, pp. 65-78, 1983.

8- R. Castro and J. J. D. Cadenet, Welding Metallurgy of Stainless and Heat-Resisting Steel, p. 77-92, Cambridge University Press, UK, 1975.

9- S. Kou, Welding Metallurgy, p. 182-195, John Wiley & Sons, USA, 2003.

10- AWS and A5.28, "Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding for Gas Shielded Arc Welding," 2005

11- ASM, Vol.6: Welding, Brazing and Soldering, p. 242, 1077, USA, 1993.

12- T. El-Bitar, M. Gamil, I. Mousa and F. Helmy, "Development of carbon-Low alloy steel grades for low temperature applications," Materials Science and Engineering A, Vol. 528, pp. 6039–6044, 2011.

13- G. E. Totten, Steel Heat Treatment Handbook, 2, p. 377-380, CRC Press, Oregon, USA, 2006.

14- M. L. Zhu and F. Z. Xuan, "Correlation between microstructure, hardness and strength in HAZ of dissimilar welds of rotor steels," Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 4035–4042, 2010.

15- M. Jayaprakash, Y. Mutoh, K. Asai, K. Ichikawa and S. Sukarai, "Effect of contact pad rigidity on fretting fatigue behavior of NiCrMoV turbine steel," International Journal of Fatigue, Vol. 32, pp. 1788–1794, 2010.

16- M. L. Zhu and F. Z. Xuan, "Effects of temperature on tensile and impact behavior of dissimilar welds of rotor steels," Materials and Design, Vol. 31, pp. 3346–3352, 2010.

## پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد شفت 26 NiCrMoV 11 5 (مقادیر برحسب درصد وزنی اند)

نوع فولاد	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Ni	%Cr	%Mo	%V	%W	%Cu	%Al
26 NiCrMoV 11 5	۰/۲۶	۰/۰۲	۰/۲۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۳/۰۸	۱/۴۶	۰/۳۲	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۲۱

جدول ۲- ویژگی‌های مکانیکی فولاد شفت 26 NiCrMoV 11 5

نوع فولاد	سختی (HV)	انرژی ضربه (J) (20°C)	درصد ازدیاد طول (%)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)
26 NiCrMoV 11 5	۳۰۵	۱۱۰	۱۵	۷۶۰	۹۰۰

جدول ۳- ترکیب شیمیایی سیم جوش‌های مصرفی (مقادیر برحسب درصد وزنی اند)

مس	مولیبدن	کروم	گوگرد	فسفر	منگنز	سیلیسیم	کربن	درصد عناصر آلیاژی در فلز سیم جوش
۰/۰۴	۰/۵	۱/۲	۰/۰۰۶	۰/۰۱۵	۱	۰/۶	۰/۱۱	ER 80S-B2

جدول ۴- فراسنج‌های ثابت انتخاب شده برای جوشکاری

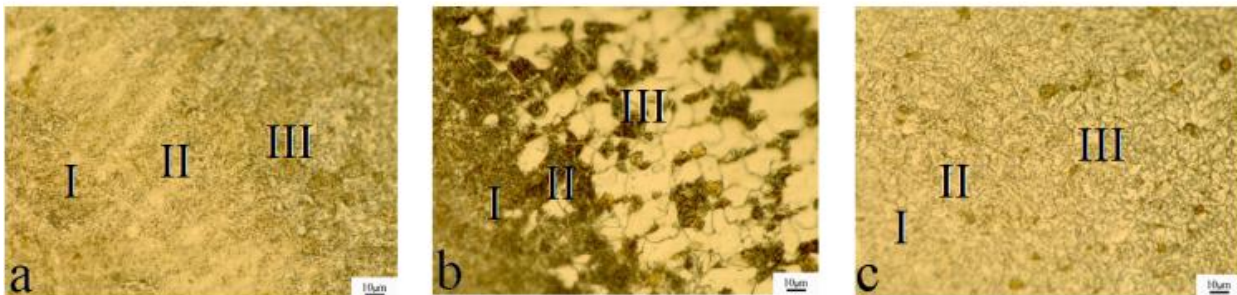
مقدار	فراسنج جوشکاری
۱۱۰	شدت جریان (آمپر)
۲۲	ولتاژ (ولت)
۷۰	سرعت جوشکاری (mm/min)
۱۲۰۰	حرارت ورودی (J/mm)
۶	دبی گاز محافظ (lit/min)

جدول ۵- شرایط جوشکاری نمونه‌های فولادی

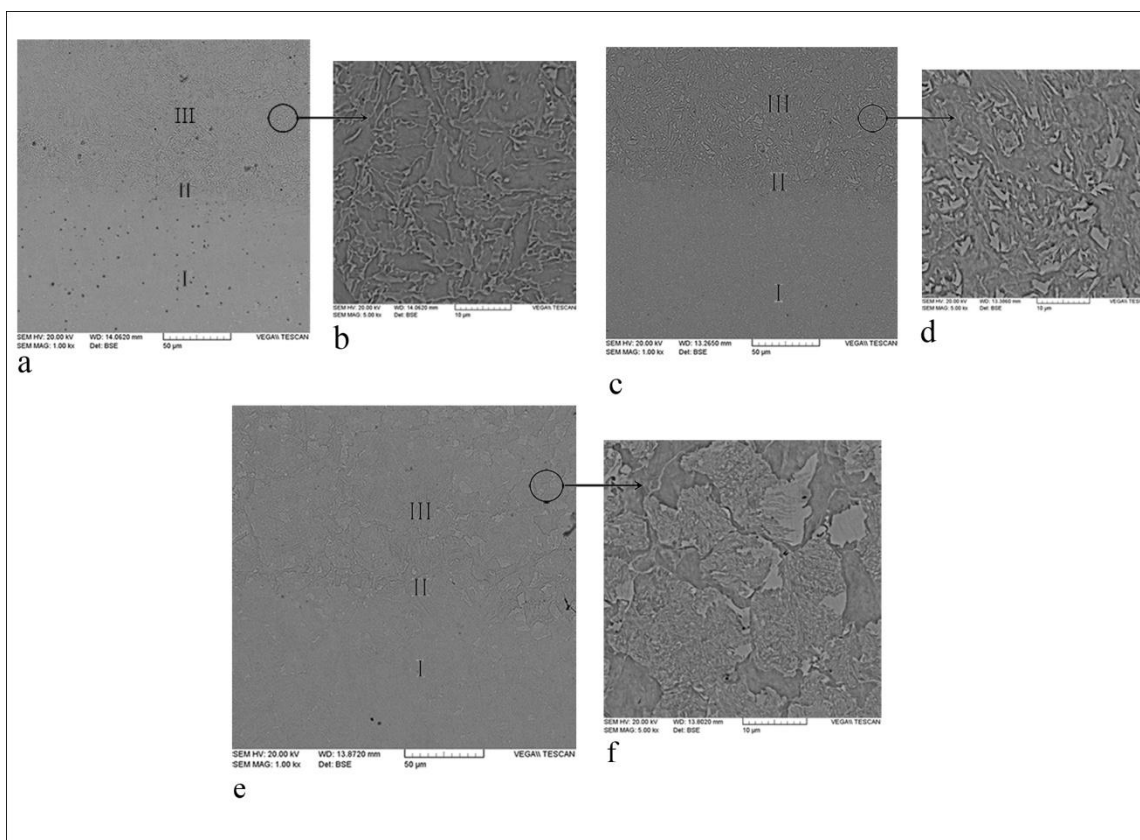
نمونه B3	نمونه B2	نمونه B1	مشخصه
۲۰۰°C	۲۰۰°C	۲۰۰°C	دمای پیش گرم
ER 80S-B2	ER 80S-B2	ER 80S-B2	سیم جوش مصرفی
نرماله	آنیل	بدون عملیات حرارتی	عملیات حرارتی
۹۰۰ °C	۹۰۰ °C	---	دمای عملیات حرارتی
۱ h	۱ h	---	زمان عملیات حرارتی
سرد شدن در هوا	سرد شدن در کوره تا ۶۰۰ °C و سپس سرد شدن در هوا	---	توضیح عملیات حرارتی

جدول ۶ - نتایج فازهای بدست آمده در منطقه‌ی جوش

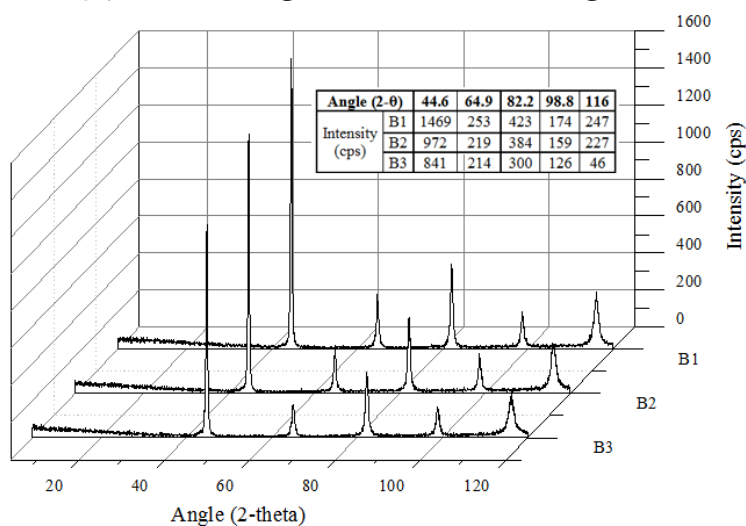
نمونه	θ۲	نتیجه
جوشکاری شده (B1)	۴۴.۶	(Mn, Cr, Fe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , SiC, (Ni, Fe) <sub>3</sub> C Ferrite
جوشکاری شده + عملیات حرارتی آنیل	۶۴.۹	(Mn, Cr, Fe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , SiC, (Ni, Fe) <sub>3</sub> C Ferrite
(B2) جوشکاری شده +	۸۲.۲	(Mn, Cr, Fe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , SiC Ferrite
عملیات حرارتی نرماله (B3)	۹۸.۸	SiC, Ferrite
	۱۱۶.۱	SiC, Ferrite



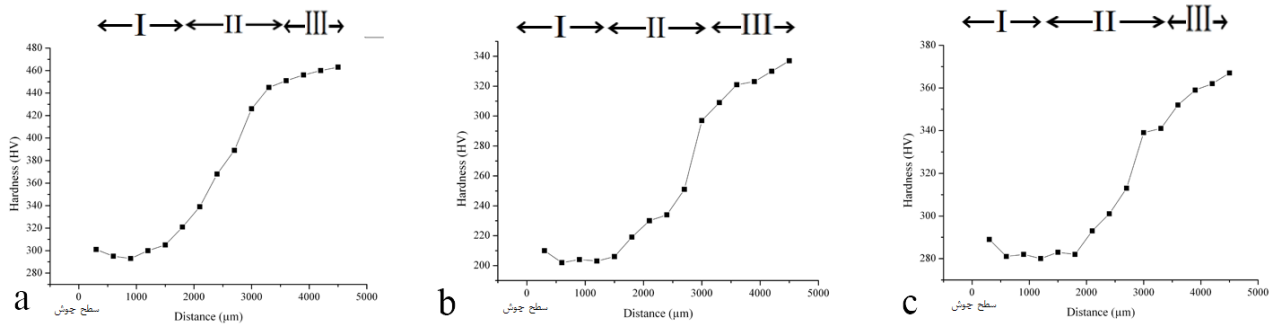
شکل ۱- ریزساختار مناطق فلز پایه (I)، متأثر از حرارت (II) و فلز جوش (III) در مقاطع روکش کاری شده با سیم جوش ER 80S-B2 و بدون عملیات حرارتی (a)، عملیات حرارتی آنیل شده (b)، عملیات حرارتی نرماله شده (c) پس از جوشکاری



شکل ۲ - تصویر SEM در مناطق فلز پایه (I)، متأثر از حرارت (II) و فلز جوش (III) در قطعات روکش کاری شده با سیم جوش ER 80S-B2 به همراه ریزساختار منطقه جوش در بزرگ‌نمایی بالا در شرایط بدون عملیات حرارتی (a,b) عملیات حرارتی آنیل شده (c,d)، عملیات حرارتی نرماله شده (e,f) پس از جوشکاری



شکل ۳ - الگوی پراش مربوط به قطعه‌ی روکش کاری شده با سیم جوش ER 80S-B2 و بدون عملیات حرارتی (b1)، عملیات حرارتی آنیل شده (b2)، عملیات حرارتی نرماله شده (b3) پس از جوشکاری



شکل ۴- تغییرات سختی از سطح جوش در مناطق فلز جوش (I)، متأثر از حرارت (II) و فلز پایه (III)

در قطعات روکش‌کاری شده با سیم جوش ER 80S-B2 و بدون عملیات حرارتی  
(a)، عملیات حرارتی آنیل شده (b)، عملیات حرارتی نرماله شده (c) پس از جوشکاری

