

تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و خوردگی فولاد زنگ نزن ۴۲۰ پس از جوشکاری به روش TIG

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

اسحاق فنواتی
اسماعیل جعفری*

چکیده

در این پژوهش خواص خوردگی و مکانیکی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 420 پس از جوشکاری و عملیات حرارتی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. پس از انجام جوشکاری به روش TIG و عملیات حرارتی باز پخت، آزمون‌های سختی سنجی، کشش، ضربه و آزمایش خوردگی پلاریزاسیون بر روی نمونه‌ها انجام شد. همچنین نمونه‌ها به منظور بررسی ریزساختار و تشخیص نوع خوردگی به وجود آمده، توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفتند. با بررسی نتایج به دست آمده از آزمون‌های مکانیکی و خوردگی، شرایط عملیات حرارتی بهینه برای رسیدن به خواص خوردگی و مکانیکی مطلوب پس از جوشکاری تعیین شد. در پایان مشخص شد که سیکل عملیات حرارتی باز پخت در دمای ۳۰۰ °C و زمان ۱ ساعت، یک سیکل مناسب به منظور رسیدن به خواص خوردگی و مکانیکی مطلوب برای فولاد زنگ نزن ۴۲۰ جوشکاری شده می‌باشد.
واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ نزن مارتنزیتی، عملیات حرارتی، ریزساختار، پلاریزاسیون.

The influence of post weld Heat Treatment on Mechanical and Corrosion Properties of martensitic Stainless Steel after TIG

I. Ghanavati
E. Jafari

Department of Materials Science, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
Department of Materials Science, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Abstract

In this study, corrosion and mechanical properties of AISI 420 martensitic stainless steel after welding and heat treatment were studied. Heat treatment cycle in order to optimize the mechanical and corrosion properties of the steel after welding was investigated. After TIG welding and heat treatment of tempering, hardness and tensile, and impact mechanical tests and corrosion polarization tests were performed on the samples. Also to study the microstructure and identify the type of the happened corrosion, by optical microscopy and transmission electron microscopy (SEM), the samples were examined. By The results of mechanical tests and corrosion, heat treatment conditions to achieve optimum mechanical properties and good corrosion properties was determined after welding. In conclusion, the cycle of heat treatment of tempering at a temperature of 300°C and 1 hour, is an appropriate cycle in order to achieve Suitable corrosion and mechanical properties for welded 420 stainless steel.

Keywords: martensitic stainless steel, heat treatment, microstructure, polarization.

به دلیل تشکیل مارتنزیت باز پخت نشده حین سرد شدن پس از جوشکاری، آلیاژهای مارتنزیتی دارای کمترین جوش‌پذیری در بین فولادهای زنگ نزن هستند. همانند بسیاری از فولادهای ساختمانی تدابیر ویژه‌ای باید هنگام جوشکاری فولادهای مارتنزیتی اعمال شود، به‌ویژه برای آن‌هایی که بیش از ۰/۱ درصد وزنی کربن دارند [۱]. فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی AISI420 قابلیت سختی‌پذیری بالایی دارند و می‌تواند تا بیش از 500 HB سخت شود. علاوه بر این به‌آسانی قابلیت مارتمپرینگ را دارند کردن می‌باشد و در همه شرایط مغناطیسی هستند. فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی را می‌توان آنیل کامل، آنیل تک دما و یا آنیل مرحله‌ای کرد که در این صورت قابل کاربرد برای ابزار برش و مواردی که چکش‌خواری و استحکام با مقاومت خوردگی نسبتاً بالا مورد نیاز است، می‌باشند [۲].

۱- مقدمه

فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی معمولاً برای کاربردهایی انتخاب می‌شوند که نیاز به ترکیبی از استحکام بالا و مقاومت به خوردگی اتمسفری باشد. به‌عنوان نمونه می‌توان از کاربردهای عمومی فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی در پره‌های توربین، لوله‌های بخار، هیدرو توربین‌های بزرگ، موانع کانال‌های آب، خطوط لوله و شیرهای جمع‌آوری و تصفیه نفت و کاربردهای دیگر نظیر روکش‌کاری^۱ غلتهای ریخته‌گری پیوسته^۲ اشاره کرد. به‌عنوان نمونه‌های دیگر می‌توان به انواع سوپرمارتنزیتی^۳ کم‌کربن که به‌طور گسترده برای خطوط لوله نفت و گاز استفاده می‌شوند و انواع پرکروم که برای ساخت قطعاتی نظیر ابزار جراحی، ابزار برش، چرخ‌دنده‌ها و محورها استفاده می‌شوند، اشاره کرد [۱].

¹ Cladding

² Continuous Caster Roll

³ Super martensitic

جدول ۱- آنالیز کوانتومتری فولاد زنگ نزن ۴۲۰ مورد استفاده در این پژوهش

| درصد وزنی عناصر | | | | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|--------|--------|------|-------|
| Fe | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo |
| پایه | ۰/۴۲۶ | ۰/۴۶۸ | ۰/۴۰۳ | ۰/۰۰۵ | <۰/۰۰۵ | ۱۴ | ۰/۰۲۶ |
| Ni | Al | Co | Cu | Nb | Ti | V | W |
| ۰/۰۹۱ | <۰/۰۰۱ | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۰۲ | <۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۳ | <۰/۰۲ |

قطعات از دو طرف با زاویه ۴۵° پخ زده شدند و تا دمای ۲۹۰°C و در مدت ۳۰ دقیقه در کوره‌ی عملیات حرارتی پیش گرم شدند تا سطح و مرکز نمونه‌ها هم‌دما شود و بلافاصله پس از خروج قطعه از کوره، عملیات جوشکاری انجام شد.

جوشکاری با فلز پرکننده‌ی ER410 با ضخامت ۲/۴ mm و با روش جوش TIG^۳ (آرگون ۹۹/۹۹%) و با پارامترهای ثابت (آمپراژ ثابت ۱۰۰ آمپر و ولتاژ ۲۸ ولت) انجام شد [۱۰]. سپس قطعه‌های جوشکاری شده در دمای اتاق به آرامی سرد شدند و بعد از آن با ژل مخصوص پاک‌کننده جوش تمیزکاری شدند. فلزهای پرکننده‌ی به کار برده شده طبق استاندارد 5/9AWS انتخاب شده‌اند [۱۱].

۲-۲- عملیات گرمای

عملیات گرمای بازپخت به صورت پلکانی در کوره انجام شد بدین‌صورت که برای باز پخت کردن قطعات در دمای ۳۰۰°C ابتدا کوره عملیات حرارتی در ده دقیقه از دمای محیط به دمای ۱۰۰°C رسید و سپس قطعات به مدت ۵ دقیقه در این دما نگهداشته شدند که سطح و درون قطعه کامل هم‌دما شود سپس دمای کوره در مدت زمان ده دقیقه از دمای ۱۰۰°C به دمای ۲۰۰°C رسید و ۵ دقیقه در این دما نگه داشته شدند و پس از آن کلیه نمونه‌ها در مدت ۱۰ دقیقه به دمای ۱۰۰°C رسیدند و در انتها برای مدت زمان یک ساعت در این دما نگه داشته شدند [۱۲]. پس از اتمام باز پخت، قطعه‌ها بلافاصله از کوره خارج شدند و در اتاق به آرامی سرد شدند و پس از رسیدن دمای آن‌ها به دمای محیط، بار دیگر در کوره قرار گرفتند و از ابتدا مراحل ذکر شده انجام شد [۱۳].

به‌منظور بررسی اثر دمای بازپخت بر خواص مکانیکی و خوردگی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۲۰، عملیات حرارتی در دماهای ۳۰۰ و ۳۵۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس انجام شد.

۲-۳- برشکاری و گرده‌برداری از نمونه‌ها

کلیه نمونه‌های، توسط دستگاه جت آب^۴ که یک روش برشکاری سرد و بسیار دقیق است، به ابعاد موردنظر برش داده شدند. گرده‌ی جوش تمام قطعات پس از برشکاری توسط دستگاه فرز^۵ با سطح فلز پایه، هم‌سطح گردیدند. دلیل انتخاب دستگاه واتر جت و دستگاه فرز، برای برشکاری و گرده‌برداری، عملکرد آن‌ها در دمای اتاق می‌باشد زیرا برای آزمایش‌های انجام‌شده لازم می‌باشد که دمای قطعه به‌جز در زمان جوشکاری و عملیات حرارتی پیش گرم و پس گرم، بالا نرود تا بتوان

فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، به‌طور کلی بر اساس اندازه‌ی سختی و استحکام ناشی از عملیات حرارتی کوئنچ - تمپر کردن، طبقه‌بندی شده‌اند. حساسیت فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی در برابر مساله عملیات حرارتی به حد زیادی به مقدار کربن آنها بستگی دارد. تغییرات درجه گرما و نرخ سرد شدن جوش در منطقه HAZ معادل تأثیراتی است که در اثر کوئنچ کردن پدید می‌آید [۳].

ساختارهای مارتنزیتی پرکربن که در اثر جوشکاری تولید می‌شوند، خیلی ترد و شکننده هستند به‌ویژه اگر عملیات حرارتی باز پخت روی آن انجام نگیرد. این تردی، سبب بروز ترک‌ها در اطراف ناحیه‌ی HAZ می‌شود. به همین دلیل، در جوشکاری این خانواده از فولادها، عملیات پس گرمایی و کنترل سرعت سرد شدن بسیار مهم است تا بتوان از تنش‌های انقباضی و بروز ترک‌ها جلوگیری نمود [۴].

به‌عنوان نمونه، می‌توان به پژوهش‌هایی که توسط راجاسخار^۱، در زمینه‌های تأثیر عملیات حرارتی و روش جوشکاری بر روی میکروساختار فولاد زنگ نزن مارتنزیتی [۵ و ۶] و ناصری اصفهانی در مورد تأثیر عملیات حرارتی بر مقاومت به خوردگی فولاد زنگ نزن ۴۲۰ [۷] و همچنین تحقیقات انجام‌شده توسط کاسی^۲ که بر روی تأثیر پیش گرم و عملیات حرارتی پس گرم بر جوش‌پذیری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی که با استفاده از جوشکاری به روش پرتو لیزری انجام شد، اشاره کرد [۸]. آنها به این نتیجه دست یافتند که انجام عملیات حرارتی بر روی افزایش مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، جوشکاری شده بسیار مؤثر می‌باشد. به همین منظور، در این پژوهش تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و خوردگی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی پس از جوشکاری مورد توجه قرار گرفته است اما آنچه این تحقیق را از سایر پژوهش‌های انجام‌شده متمایز می‌کند ارائه روشی مناسب برای عملیات حرارتی فولاد زنگ نزن برای افزایش مقاومت به خوردگی آن در کنار حفظ خواص مکانیکی، پس از جوشکاری می‌باشد.

۲- روش انجام تحقیق

۲-۱- تهیه مواد

در این پژوهش از ورق فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI420 به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد که از طریق آنالیز کوانتومتری به دست آمد، در جدول ۱ نشان داده شده است.

آماده‌سازی سطحی نمونه‌ها برای جوشکاری، با سمباده ۸۰۰ انجام شد و پس از آن عملیات چربی زدایی انجام شد. به جهت نفوذ بهتر جوش،

^۳ Tangsten inert gas welding

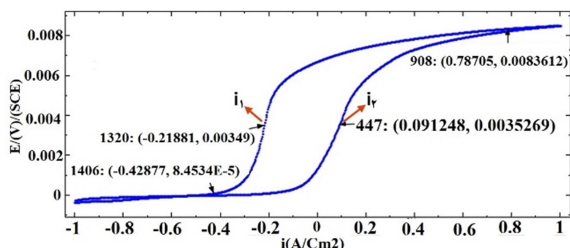
^۴ Water Jet

^۵ Milling machine

^۱ Rajasekhar

^۲ kose

محلول ۳/۵wt% NaCl انجام شد [۱۸]. داده‌های حاصل از آزمایش‌های خوردگی، از برنامه‌ی NOVA استخراج گردیدند. نمونه‌ای از اندازه‌گیری پارامترهای آزمایش پلاریزاسیون چرخه‌ای در برنامه‌ی NOVA در شکل ۴ نشان داده شده است. نقطه‌های i_1 و i_2 به جهت به دست آوردن اندازه پهنای نمودار پلاریزاسیون سیکنی، اندازه‌گیری شدند.



شکل ۴- نمونه‌ی اندازه‌گیری پارامترهای آزمایش پلاریزاسیون سیکنی، ناحیه جوش، نمونه جوشکاری شده و باز پخت شده در دمای ۳۵۰ °C

۲-۵-۲- آزمایش کاهش وزن

طبق استاندارد ASTM G31، آزمون کاهش وزن بر روی نمونه‌ی پایه و نمونه‌های باز پخت شده در دماهای ۳۰۰ °C و ۳۵۰ °C و ۴۰۰ °C و همچنین بر روی نمونه‌ی جوشکاری شده ولی باز پخت نشده انجام شد [۱۷].

نمونه‌های آزمون کاهش وزن در ابعاد 100mm×30mm×4mm تهیه و تا سمباده ۱۲۰۰ سمباده زده و با محلول استون چربی زدایی شدند و برای مدت ۵ دقیقه در دمای ۸۰ °C در آن رطوبت‌زدایی شده و به‌وسیله‌ی ترازویی با دقت ۴ رقم اعشار وزن شدند و سپس به مدت ۴ ماه در محلول ۳/۵wt% NaCl غوطه‌ور گردیدند و پس از اندازه‌گیری مقدار کاهش وزن، سرعت خوردگی برحسب mpy محاسبه و به‌عنوان شاخصی برای حساسیت به خوردگی بیان گردید.

زمان انجام آزمایش بر اساس فرمول

$$\text{Hours} = 2000 / (\text{corrosion Rate in Mpy}) \quad (1)$$

محاسبه شد.

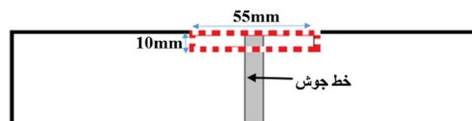
۲-۶- متالوگرافی

به‌منظور انجام متالوگرافی، نمونه‌ها پس از طی مراحل صیقلی، توسط محلول رالف (Ralph) با ترکیب شیمیایی: Ralph: 100cc H₂O + 200cc methyl alcohol + 100cc HCl + 2gr CuCl₂ + 7gr FeCl₂ + 5cc HNO₃ آج شدند و تصاویر میکرو ساختاری با میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 400X و میکروسکوپ SEM تهیه گردید و به‌منظور بررسی‌های بیشتر از آنالیز EDS نیز استفاده شد [۱۹]. به‌منظور اختصار، نمونه‌ها به‌صورت جدول ۲ نام‌گذاری می‌شوند.

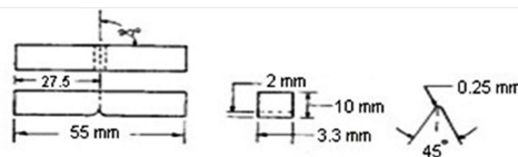
به‌درستی اثرات ناشی از عملیات حرارتی و جوشکاری را بر فولاد مذکور بررسی نمود.

۲-۴- روش انجام آزمون‌های مکانیکی

نمونه‌های آزمون ضربه چارپی طبق استاندارد ASTM A370 با ابعاد مشخص شده در شکل ۲ از ناحیه نشان داده شده در شکل ۱ تهیه گردیدند و آزمون‌ها توسط دستگاه Impact Testing Machine (JB-300) در دمای محیط انجام شد. انرژی ضربه قطعه پایه برابر با ۱۰ ژول می‌باشد [۱۴].



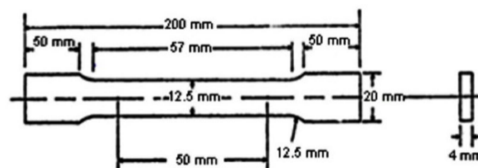
شکل ۱- طرح‌واره ای از ناحیه برش کاری شده از قطعه مورد استفاده برای آزمون ضربه (خطوط قرمز (منقطع): خطوط برش)



شکل ۲- ابعاد نمونه‌ی آزمون ضربه طبق استاندارد ASTM A270

طبق استاندارد ASTM E92 بر روی نمونه‌های تهیه شده از ناحیه‌های جوش و متأثر از گرما، توسط دستگاه DVH-1000 Vickers/Knoop Hardness Tester با الماس مربع‌القاعده در دمای محیط، آزمایش سختی ویکرز انجام شد [۱۵]. (سختی ویکرز قطعه پایه 271/9(HV) می‌باشد).

نمونه‌های آزمون کشش، طبق استاندارد ASTM E8 و با ابعاد مشخص شده در شکل ۳ تهیه شدند و آزمایش توسط دستگاه universal testing machine 30 ton در دمای محیط انجام شد [۱۶].



شکل ۳- ابعاد نمونه آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM E8

۲-۵-۵- آزمایش خوردگی

۲-۵-۱- آزمایش پلاریزاسیون

نمونه‌های آزمون خوردگی طبق استاندارد ASTM G31 آماده‌سازی شدند [۱۷]. آزمایش خوردگی توسط دستگاه Auto lab Type III محیط برنامه‌ی NOVA 1.8 به دو صورت پلاریزاسیون چرخه‌ای و پتانسیو دینامیک و با استفاده از الکترومد مرجع کالومل و در محدوده ۱۰۰۰± از پتانسیل مدار باز بعد از رسیدن پتانسیل نمونه‌ها به حالت پایدار و اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز، با سرعت رویش ۰/۰۰۱ V.S⁻¹ در

جدول ۲- نام‌گذاری اختصاری نمونه‌ها

| نام اختصاری | نام کامل |
|-------------|--|
| P1 | نمونه پایه |
| P2 | نمونه جوشکاری شده ولی باز پخت نشده |
| P3 | نمونه جوشکاری شده و باز پخت شده در دمای °C ۳۰۰ |
| P4 | نمونه جوشکاری شده و باز پخت شده در دمای °C ۳۵۰ |
| P5 | نمونه جوشکاری شده و ت باز پخت شده در دمای °C ۴۰۰ |

جوش و متأثر از گرما از نمونه‌ی باز پخت شده در دمای °C ۴۰۰ نشان داده شده است همان طوری که مشاهده می‌شود تغییرات نسبی ساختار فولاد زنگ نزن در اثر باز پخت در دمای °C ۴۰۰ نسبت به نمونه‌ی بازپخت نشده و یا حتی نمونه‌های بازپخت شده در دماهای پایین‌تر، بیشتر می‌باشد که این تغییرات را می‌توان در اثر شکل‌گیری فاز سمنتیت در مجاور تیغه‌ی مارتنزیت دانست.

۳-۲- بررسی رفتار خوردگی

شکل های ۷ و ۸ نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک را در ناحیه‌های جوش و متأثر از گرما نشان می‌دهند. نتایج این نمودارها به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. بر اساس این جداول مشاهده می‌شود که در اثر عملیات حرارتی در بازه دمایی °C ۳۰۰ تا °C ۴۰۰ میزان سرعت خوردگی (i_{cor}) در ناحیه جوش و متأثر از گرما، نسبت به نمونه‌ی جوشکاری شده ولی باز پخت نشده (نمونه‌ی P2) کاهش یافته است همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شکل های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که تفاوت محسوس در پتانسیل مدارباز نمونه‌های باز پخت شده نسبت به نمونه‌ی باز پخت نشده وجود دارد. علت این تفاوت را می‌توان یکنواختی ساختار و همچنین کم‌تر شدن عیوب ایجادشده در نمونه‌های باز پخت شده دانست [۲۲] که در نتیجه کاهش نواحی آندی در ناحیه جوش و بنابراین افزایش پتانسیل مدار باز این نواحی را نسبت به نمونه‌ی باز پخت نشده خواهیم داشت [۲۳]. بررسی دقیق‌تر نتایج نیز نشان می‌دهد که باز پخت نمونه‌ها در دمای °C ۳۰۰ با مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به دیگر دماهای بازپخت دارا خواهد که دلیل این موضوع را می‌توان ایجاد خوردگی گالوانیکی در اثر استفاده از فلز پرکننده با ترکیب شیمیایی متفاوت نسبت به فلز پایه دانست زیرا در اثر تفاوت ساختاری فلز پایه و فلز پرکننده، خوردگی گالوانیکی در نواحی جوش و HAZ اتفاق می‌افتد و افزایش دمای باز پخت، با افزایش میزان خوردگی گالوانیکی رابطه مستقیمی خواهد داشت [۲۴]؛ بنابراین بهترین مقاومت به خوردگی در دمای بازپخت °C ۳۰۰ مشاهده می‌شود.

ناحیه جوش و متأثر از گرما از فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۲۰ مستعد خوردگی‌های موضعی می‌باشد و رفع این مشکل، یکی از مهمترین دلایل انجام این پژوهش می‌باشد به همین جهت تأثیر عملیات باز پخت بر خوردگی موضعی در هر دو ناحیه‌ی جوش و متأثر از گرما با استفاده از نمودارهای پلاریزاسیون چرخه‌ای (شکل های ۹ و ۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این نمودارها در جداول ۵ و ۶ خلاصه شده است بر اساس این جداول و مقایسه‌ی نمونه‌های باز پخت شده نسبت به نمونه‌ی باز پخت نشده مشخص می‌شود که عملیات حرارتی باز پخت عامل افزایشده‌ی بازه حفاظت ($E_b - E_{pp}$) در بازه دمایی °C ۳۰۰ تا °C ۳۵۰ می‌باشد. در شکل‌های ۵ (ریزساختار ناحیه جوش از نمونه‌های باز پخت شده و باز پخت نشده) و ۶ (ریزساختار ناحیه متأثر از گرما از نمونه‌های باز پخت شده و باز پخت نشده) نشان داده شده است با توجه به این شکل‌ها مشخص می‌شود که میزان تجمع رسوب‌ها بر روی مرزخانه‌ها در نمونه‌ی P2 نسبت به نمونه‌های P3 و P4 بیشتر می‌باشد.

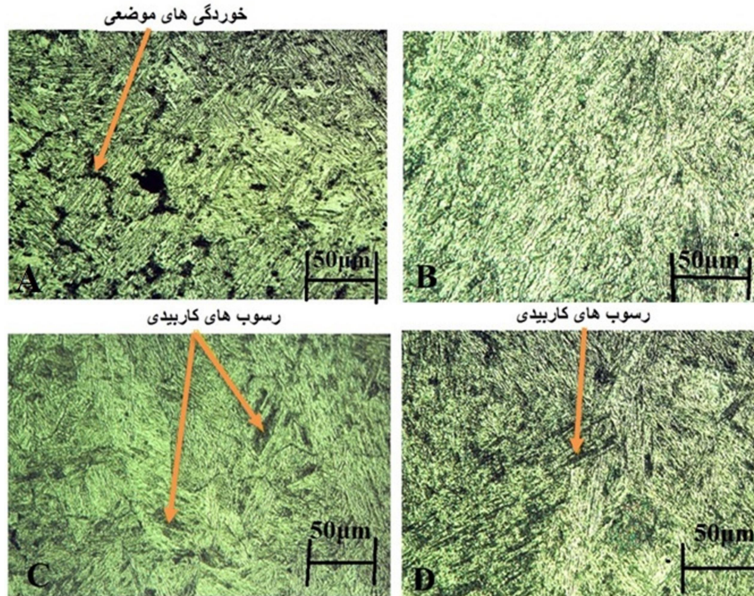
۳-۲- نتایج و بحث

هدف از این مقاله بهبود خواص خوردگی و مکانیکی فولاد زنگ نزن ۴۲۰ جوشکاری شده، به‌صورت هم‌زمان می‌باشد بنابراین انتخاب دمای باز پخت با محدودیت‌هایی همراه می‌باشد. دمای مناسب برای رسیدن به مقاومت به خوردگی مطلوب برای فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 420 کمتر از حدود ۴۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد [۱۳]. از طرف دیگر یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده از فولاد زنگ نزن ۴۲۰ در صنایع، استفاده از سختی بالای آن می‌باشد و برای رسیدن به سختی مناسب و تبدیل آستنیت باقیمانده به فاز مارتنزیت نیاز به دمای باز پخت بالای ۲۳۵ درجه سلسیوس می‌باشد [۲۰]. همچنین با توجه به اینکه در طی جوشکاری قطعه از نقطه ذوب سرد می‌شود، در نتیجه پس از سرد شدن و تشکیل مارتنزیت، قطعه تنش باقیمانده بالاتری را نسبت به سایر فرآیندهای تولید مارتنزیت دارا خواهد بود. از این جهت بازه‌ی دمایی °C ۳۰۰ تا °C ۴۰۰ به‌عنوان بازه‌ی دمای بازپخت فولاد زنگ نزن ۴۲۰ انتخاب گردید [۲۰].

۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری

در شکل‌های ۵ و ۶ ریزساختار نمونه‌ها پس از جوشکاری نشان داده شده است. ساختار فولاد زنگ نزن مورد استفاده در این پژوهش، مارتنزیتی و به‌صورت مارتنزیت لایه‌ای می‌باشد که این موضوع با توجه به اینکه میزان کربن فولاد زنگ نزن مورد استفاده (با توجه به جدول ۱)، % ۰/۴۲۶ می‌باشد، تأیید می‌شود. با مشاهده جدول ۱ مشخص می‌شود که با توجه به بالا بودن میزان کروم و کربن در نمونه، احتمال تشکیل رسوبات کاربیدی وجود خواهد داشت. شکل‌های 5A و 6A که به ترتیب تصاویر میکروسکوپی نوری از ناحیه جوش و متأثر از گرما را در نمونه‌ی جوشکاری شده ولی باز پخت نشده نشان می‌دهند. حاکی از تجمع میزان بالای رسوب‌های کاربیدی بر روی مرزخانه‌ها می‌باشند و بنابراین انتظار می‌رود که میزان خوردگی‌های موضعی به‌ویژه خوردگی حفره‌ای در نمونه‌ی P2 نسبتاً بالا باشد. پژوهش‌های انجام‌شده توسط ناصری اصفهانی [۷] و کاسی [۸] نیز تأیید کننده این مطلب می‌باشد.

تصاویر ریزساختاری از ناحیه جوش و ناحیه متأثر گرمایی نمونه‌های باز پخت شده در دمای °C ۳۰۰ و °C ۳۵۰ (شکل‌های 5B و 5C و 6B و 6C) حاکی از کاهش تجمع رسوبات کاربید کروم بر روی مرز دانه‌ها می‌باشند به همین جهت انتظار افزایش مقاومت در برابر خوردگی موضعی را در اثر بازپخت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی بازپخت نشده می‌توان داشت. بازپخت کردن فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی در دمای °C ۴۰۰ باعث شکل‌گیری فاز سمنتیت نیز در مجاور تیغه مارتنزیت می‌شود [۲۰]. در شکل‌های 5D و 6D به ترتیب تصاویر ناحیه



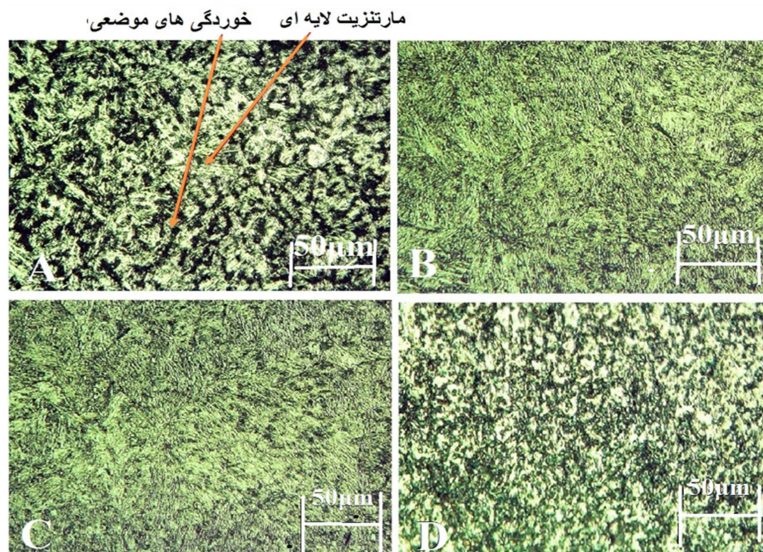
شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی نوری از ناحیه جوش با بزرگنمایی (۴۰۰X) (فاز زمینه مارتنزیت)

A: نمونه جوشکاری شده ولی باز پخت نشده

B: نمونه جوشکاری شده و باز پخت شده در دمای 300°C

C: نمونه جوشکاری شده و باز پخت شده در دمای 350°C

D: نمونه جوشکاری شده و باز پخت شده در دمای 400°C



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی از ناحیه متاثر از گرما قطعات با بزرگنمایی $400 \times$ (فاز زمینه مارتنزیت)

A: نمونه جوشکاری شده ولی باز پخت نشده

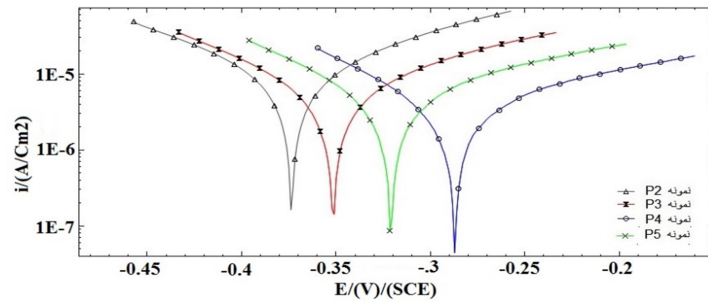
B: نمونه جوشکاری شده و باز پخت شده در دمای 300°C

C: نمونه جوشکاری شده و باز پخت شده در دمای 350°C

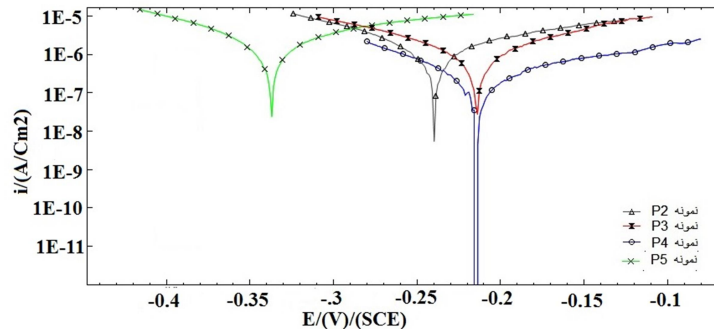
D: نمونه جوشکاری شده و باز پخت شده در دمای 400°C

پخت شده در دمای 400°C حاکی از کاهش بازه حفاظت نسبت به دیگر دماهای بازپخت می‌باشد که دلیل این موضوع افزایش میزان رسوب‌های کاربیدی در اثر افزایش دمای بازپخت و همچنین تشکیل

تجمع رسوبات بر روی مرز دانه‌ها باعث افزایش نواحی آندی بر روی مرز دانه‌ها و ضعیف‌تر شدن مرز دانه‌ها نسبت به دانه‌ها خواهد شد که در نتیجه آن افزایش سرعت خوردگی‌های موضعی را در نمونه P2 خواهیم داشت [۲۵]. بررسی نتایج خوردگی‌های حفره‌ای نمونه‌ی باز



شکل ۷- آزمایش پلاریزاسیون خطی، ناحیه جوش



شکل ۸- نتایج آزمایش‌های پلاریزاسیون خطی، ناحیه متأثر از گرما

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های پلاریزاسیون خطی، ناحیه جوش

| پارامترها نمونه | OCP | icor (A) | Corrosion Rate (mm/year) | Polarization Resistance (KΩ) |
|--------------------|--------|------------|-----------------------------|---------------------------------|
| P2 | -./۳۵۷ | ۵/۸۶۲ μA | ۶/۹۱۸×۱۰ ^{-۲} | ۲/۳۸۹ |
| P3 | -./۳۳۳ | ۳۲۷/۱۷۰ nA | ۳/۸۶۰×۱۰ ^{-۳} | ۵/۸۶۹ |
| P4 | -./۲۶۰ | ۱/۷۰۳ μA | ۲/۰۰۹×۱۰ ^{-۲} | ۶/۲۴۷ |
| P5 | -./۲۹۶ | ۳۳۴/۱۳۰ nA | ۳/۹۴۲×۱۰ ^{-۳} | ۷/۳۳۱ |

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های پلاریزاسیون خطی، ناحیه متأثر از گرما

| پارامترها نمونه | OCP | icor (A) | Corrosion Rate (mm/year) | Polarization Resistance (KΩ) |
|--------------------|--------|------------|-----------------------------|---------------------------------|
| P2 | -./۲۲۴ | ۴۳۲/۴۴۰ nA | ۵/۱۰۲×۱۰ ^{-۳} | ۱۳/۱۰۴ |
| P3 | -./۲۰۹ | ۹۷/۳۱۷ nA | ۱/۱۴۸×۱۰ ^{-۳} | ۲۳/۸۱۳ |
| P4 | -./۱۸۰ | ۱۶۰/۸۱۰ nA | ۱/۸۹۷×۱۰ ^{-۳} | ۶۸/۵۵۳ |
| P5 | -./۳۱۶ | ۱/۹۴۴ μA | ۲/۲۹۴×۱۰ ^{-۳} | ۹/۱۵۷ |

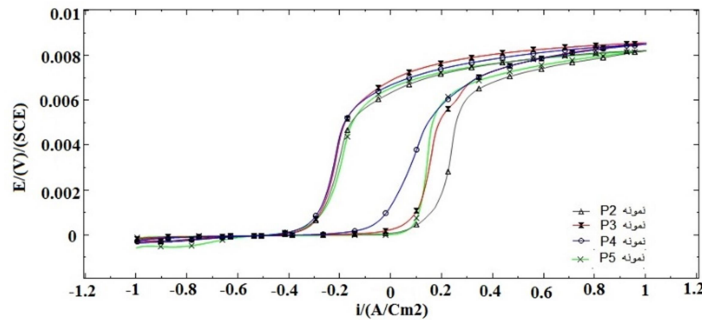
بر اساس جدول‌های ۳ و ۴، پهنای نمودار سیکیلی (i_2-i_1) نمونه‌های باز پخت شده نسبت به نمونه‌ی باز پخت نشده کاهش یافته است که نشان از افزایش مقاومت در برابر خوردگی و یا کاهش میزان خوردگی در اثر باز پخت می‌باشد. کاهش میزان خوردگی به دلیل تأثیر عملیات باز پخت بر روی یکنواختی ساختار در فولادهای زنگ نزن جوشکاری شده می‌باشد. (شکل‌های ۹ و ۱۰) یکنواختی ساختار در فولادها، عاملی برای جلوگیری از تشکیل کوپل گالوانیکی بین ناحیه جوش و فلز پایه می‌باشد که در نتیجه کاهش سرعت خوردگی را در این نواحی خواهیم

فاز سمیتیت در مجاور تیغه مارتنزیت است که در شکل‌های 5D و 6D نیز این تغییر ساختاری مشاهده می‌شود.

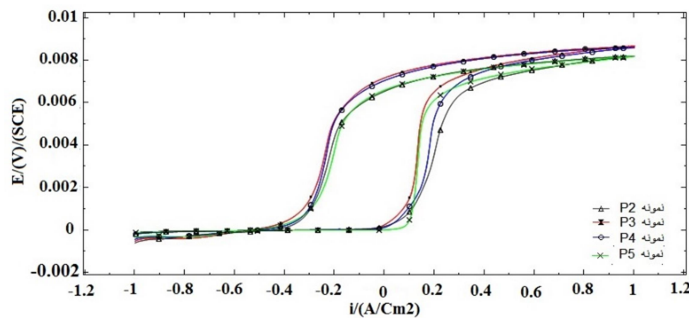
بررسی نتایج آزمون‌های پلاریزاسیون چرخه‌ای نشان دهنده کاهش قابل ملاحظه‌ای در خوردگی حفره‌ای در نواحی جوش و متأثر از گرما، در اثر انجام باز پخت در دمای 300°C نسبت به دیگر دماهای باز پخت می‌باشد. همچنین شکل 5B و 6B که کاهش میزان رسوب‌های کاربیدی را نشان می‌دهند تأیید کننده این موضوع می‌باشند.

موضوع از روش جوشکاری TIG و عملیات حرارتی پیش‌گرمایش استفاده شد. نتایج آنالیز کوانتومتری فولاد زنگ نزن AISI420 مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد که در قطعه‌ی پایه، هیدروژنی وجود نداشته است همچنین شکل ۱۱ نیز نشان می‌دهد که با انجام عملیات حرارتی پیش‌گرمایش و همچنین روش جوشکاری TIG، هیچ‌گونه هیدروژنی پس از جوشکاری نیز به قطعه وارد نشده است.

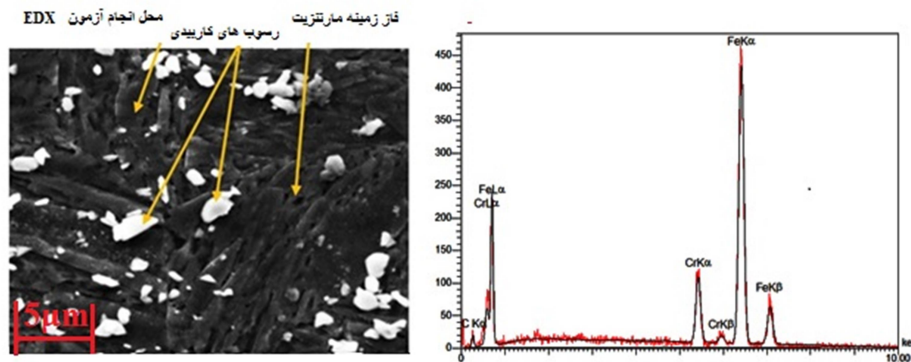
داشت. [۲۵]. نتایج حاصله از آزمایش کاهش وزن در جدول ۷ نشان داده شده است این نتایج تایید کننده نتایج حاصل از آزمون‌های پلاریزاسیون و بررسی‌های ریزساختاری می‌باشد. از دیگر مشکلات احتمالی برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی می‌توان به ورود هیدروژن به ناحیه جوش در هنگام انجام عملیات جوشکاری اشاره کرد که در این پژوهش برای جلوگیری از این



شکل ۹- نتایج آزمایش‌های پلاریزاسیون سیکیلی، ناحیه جوش



شکل ۱۰- نتایج آزمایش‌های پلاریزاسیون سیکیلی، ناحیه متأثر از گرما



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپی SEM با بزرگنمایی 10000 X و نتایج EDAX از ناحیه جوش از نمونه باز پخت نشده

پایدارکننده‌ی آستنیت می‌باشد وجود دارد و آستنیت باقیمانده عامل کاهنده‌ی سختی می‌باشد [۲۶]. با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با باز پخت قطعه‌ها در دمای ۳۰۰ °C و ۳۵۰ °C سختی نمونه‌ها در ناحیه جوش و متأثر از گرما نسبت به نمونه باز پخت نشده افزایش یافته است که این موضوع به دلیل تبدیل آستنیت باقیمانده به مارتنزیت در اثر بازپخت و همچنین تشکیل کاربیدهای کروم می‌باشد

۳-۳- بررسی نتایج آزمون سختی

در فولادهایی که قابلیت سختی‌پذیری دارند ساختار از نوع مارتنزیت لایه‌ای می‌باشد و فولادی که در این پژوهش نیز استفاده شده فولاد با کربن متوسط می‌باشد که ساختار لایه‌ای شکل دارد بنابراین انتظار می‌رود که با انجام عملیات حرارتی سختی آن افزایش یابد [۲۰]. مطابق جدول ۱ در فولاد استفاده شده، منگنز و نیکل و کربن که سه عامل

رسوب سمنتیت در مجاور تیغه‌های مارتزیت می‌باشد و از آنجاکه سختی فاز سمنتیت نسبت به مارتزیت کمتر می‌باشد، نمونه در اثر بازپخت با کاهش سختی مواجه خواهد شد [۲۶].

زیرا در فولاد مورد استفاده میزان بالای کربن و کروم وجود دارد که موجب تشکیل کاربیدهای کروم می‌گردند [۲۶]. باز پخت در دمای 350°C با کاهش سختی نسبت به دمای باز پخت 300°C و 400°C در ناحیه جوش و متأثر از گرما همراه می‌باشد که به دلیل تشکیل

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های پلاریزاسیون سیکنی، ناحیه جوش

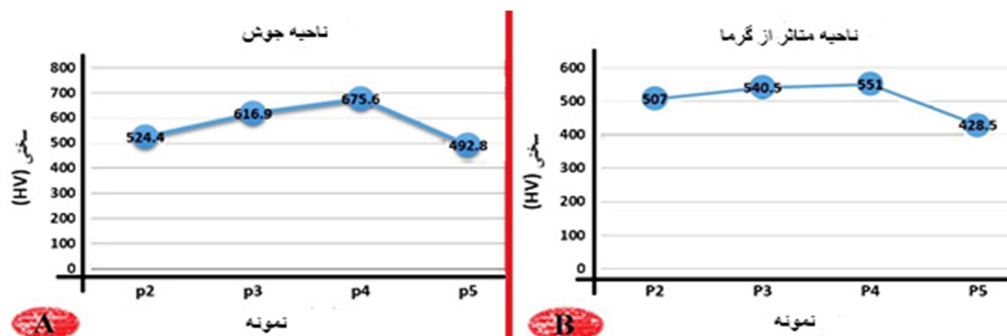
| پارامترها نمونه | E_{pp} (V) | E_b (V) | E_b-E_{pp} (V) | i_2 (A) | i_1 (A) | i_2-i_1 (A) |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| P2 | $1/198 \times 10^{-4}$ | $8/192 \times 10^{-3}$ | $8/072 \times 10^{-3}$ | $2/352 \times 10^{-1}$ | $-1/968 \times 10^{-1}$ | $4/321 \times 10^{-1}$ |
| P3 | $1/159 \times 10^{-4}$ | $8/488 \times 10^{-3}$ | $8/327 \times 10^{-3}$ | $1/596 \times 10^{-1}$ | $-2/114 \times 10^{-1}$ | $3/711 \times 10^{-1}$ |
| P4 | $8/453 \times 10^{-5}$ | $8/361 \times 10^{-3}$ | $8/276 \times 10^{-3}$ | $9/124 \times 10^{-1}$ | $-2/188 \times 10^{-1}$ | $3/100 \times 10^{-1}$ |
| P5 | $8/184 \times 10^{-5}$ | $8/107 \times 10^{-3}$ | $8/025 \times 10^{-3}$ | $1/449 \times 10^{-1}$ | $-1/870 \times 10^{-1}$ | $3/320 \times 10^{-1}$ |

جدول ۶- نتایج آزمایش‌های پلاریزاسیون سیکنی، ناحیه متأثر از گرما

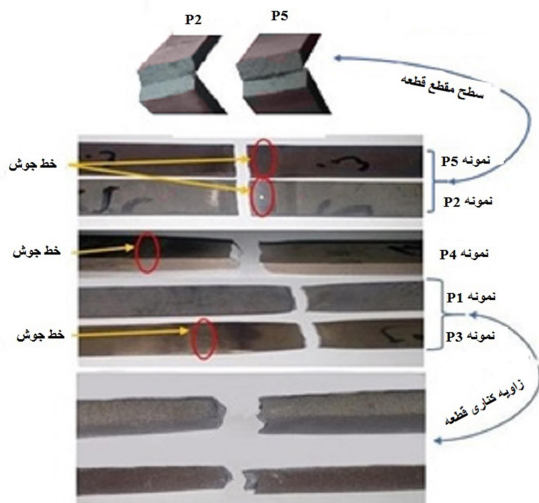
| پارامترها نمونه | E_{pp} (V) | E_b (V) | E_b-E_{pp} (V) | i_2 (A) | i_1 (A) | i_2-i_1 (A) |
|--------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| P2 | $1/134 \times 10^{-4}$ | $8/102 \times 10^{-3}$ | $7/988 \times 10^{-3}$ | $1/986 \times 10^{-1}$ | $-2/188 \times 10^{-1}$ | $4/174 \times 10^{-1}$ |
| P3 | $-1/858 \times 10^{-5}$ | $8/526 \times 10^{-3}$ | $8/545 \times 10^{-3}$ | $1/303 \times 10^{-1}$ | $-2/407 \times 10^{-1}$ | $3/710 \times 10^{-1}$ |
| P4 | $1/142 \times 10^{-4}$ | $8/539 \times 10^{-3}$ | $8/425 \times 10^{-3}$ | $1/742 \times 10^{-1}$ | $-2/334 \times 10^{-1}$ | $4/077 \times 10^{-1}$ |
| P5 | $7/720 \times 10^{-5}$ | $8/063 \times 10^{-3}$ | $7/985 \times 10^{-3}$ | $1/351 \times 10^{-1}$ | $-2/066 \times 10^{-1}$ | $3/417 \times 10^{-1}$ |

جدول ۷- نتایج آزمایش‌های MPY

| پارامترها قطعه | قطعه‌ی پایه | قطعه‌ی جوشکاری شده و باز پخت نشده | قطعه جوشکاری شده و تا دمای 300°C باز پخت شده | قطعه جوشکاری شده و تا دمای 350°C باز پخت شده | قطعه جوشکاری شده و تا دمای 400°C باز پخت شده |
|---------------------|-------------|-----------------------------------|--|--|--|
| وزن اولیه قطعه (g) | 95/5580 | 95/6125 | 94/3949 | 92/7732 | 93/7673 |
| وزن ثانویه قطعه (g) | 95/1202 | 95/2019 | 93/9272 | 92/3218 | 93/3327 |
| MPY | 1/4134 | 1/3361 | 1/5179 | 1/4701 | 1/4068 |



شکل ۱۲- نمودارهای آزمون‌های سختی ویکرز نمودار A: از ناحیه جوش نمودار B: از ناحیه HAZ

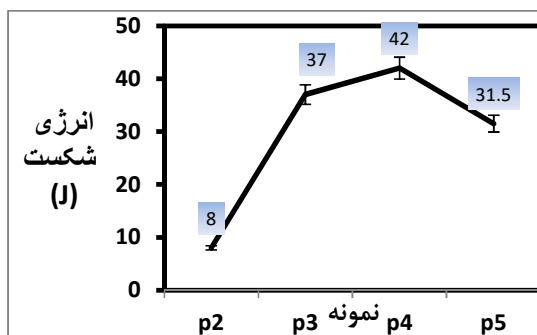


شکل ۱۴- تصویر نمونه‌ها پس از آزمایش کشش

۳-۵- آزمون ضربه

به منظور بررسی تردی نمونه‌ها آزمون ضربه انجام شد. از جمله عناصر آلیاژی در فولاد مورد استفاده در این پژوهش، سیلیسیوم و فسفر و مولیبدن می‌باشد که به دلیل درصد پایین فسفر و مولیبدن موجود، تأثیر آن‌ها بر ترد شدن نمونه‌ها پایین است ولی سیلیسیوم احتمال تردی را بالا می‌برد و عناصری همچون نیکل و منگنز که کاهنده تردی احتمالی قطعات هستند، نیز در فلز پایه وجود دارند [۲۶]. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که نمونه‌های P2 و P5 دارای انرژی شکست پایینی می‌باشند که در نتیجه وجود خوردگی‌های موضعی و بین‌دانه‌ای در نمونه P2 و تشکیل فاز سمنتیت در نمونه P5 می‌باشد که هردو به‌مانند ترک عمل کرده‌اند که عامل شکست ترد در نمونه‌های P2 و P5 شده‌اند.

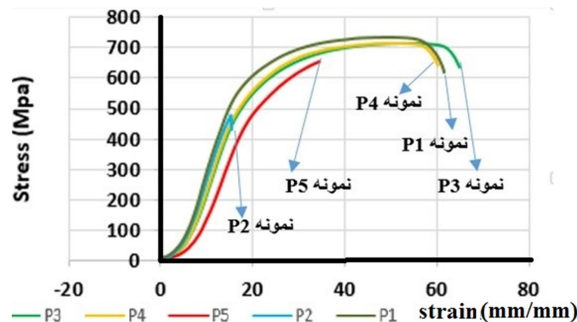
نمونه‌های P3 و P4 دارای چقرمگی بالا و همچنین دچار شکست همراه با تغییر شکل شده‌اند که این به دلیل کاهش خوردگی‌های موضعی و بین‌دانه‌ای در اثر باز پخت می‌باشد. با احتمال به اینکه یکبار انجام آزمون‌های مکانیکی نتایج دقیقی را نشان ندهند، همه‌ی آزمون‌ها دو بار تکرار شدند و در هر دو نوبت نتایج مشابه‌ای به دست آمد.



شکل ۱۵- نمودار مقایسه انرژی‌های شکست حاصل از آزمایش ضربه

۳-۴- آزمون کشش

با توجه به شکل ۱۳، مشخص می‌شود که نمونه‌های P2 و همچنین نمونه P5 با تحمل تنش و کرنش بسیار پایین‌تری نسبت به قطعه پایه دچار شکست شده است. نمونه‌های P2 به‌طور کامل در ناحیه الاستیک دچار شکست گردیده و وارد ناحیه پلاستیک نشده که نشان‌دهنده‌ی شکست کاملاً ترد این نمونه می‌باشد. نمونه P5 نیز ناحیه پلاستیک بسیار محدودی داشته است که این مطلب با بررسی سطح مقطع نمونه‌های P2 و P5 در شکل ۸ نیز تأیید می‌گردد. با توجه به تصاویر 6A و 6D علل شکست را می‌توان حضور خوردگی‌های موضعی بخصوص خوردگی بین‌دانه‌ای در ناحیه متأثر از گرما در نمونه P2 دانست. همچنین وجود فاز سمنتیت نیز یکی دیگر از عوامل شکست در نمونه‌های P5 می‌باشد [۲۰]. نمونه‌های P3 و P4 با تنش و کرنشی نزدیک به تنش و کرنش تحمل شده توسط قطعه پایه (نمونه P1) دچار شکست گردیده‌اند و با توجه به تصاویر 6B و 6C که نشان‌دهنده‌ی کاهش در میزان خوردگی بین‌دانه‌ای و موضعی در ناحیه متأثر از گرما، بر اثر باز پخت شدن نمونه‌ها می‌باشند، به این نتیجه می‌توان رسید که بهبود خواص خوردگی بین‌دانه‌ای و موضعی در ناحیه متأثر از گرما عامل تحمل تنش و کرنش بالاتر نمونه‌های P3 و P4 بوده است. هر سه نمونه‌های P1 و P3 و P4 ناحیه پلاستیک نسبتاً یکسانی دارند و همچنین ناحیه پلاستیک آنها از ناحیه پلاستیک تحمل شده توسط نمونه P5 بسیار گسترده‌تر می‌باشد و تغییر فرم بیشتری داشته‌اند (مطابق شکل ۱۴) که نشان‌دهنده شکست نرم این نمونه‌ها می‌باشد. نمونه P4 دچار شکست نرم و از نوع برشی و نمونه‌های P3 دچار شکست نرم از نوع فجان و مخروط شده‌اند (در یک سطح شکست حالت فرورفتگی و در سطح دیگر حالت برآمدگی ایجاد شده است). هر دو نمونه‌های P3 و P4 از ناحیه پایه دچار شکست شده‌اند که این موضوع کاهش میزان خوردگی‌های موضعی در ناحیه متأثر از گرما در اثر باز پخت نمونه‌ها در بازه دمای ۳۰۰ °C تا ۳۵۰ °C را تأیید می‌کند و همچنین ثابت‌کننده‌ی این موضوع می‌باشد که چرخه انتخابی برای انجام پیش‌گرم و پس‌گرم و همچنین پارامترهای جوشکاری، به‌صورت صحیح انتخاب گردیده‌اند که این خود عاملی برای افزایش مقاومت به خوردگی ناحیه متأثر از گرما در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی جوشکاری شده، پس از فرآیند جوشکاری می‌باشد.



شکل ۱۳- مقایسه نمودارهای آزمون کشش

۴- جمع‌بندی نتایج

- عملیات حرارتی باز پخت در دمای 300°C و زمان یک ساعت عامل کاهش چشمگیر خوردگی‌های موضعی در ناحیه‌های جوش و متأثر از گرما در فولاد زنگ نزن 420 استفاده شده در این پژوهش می‌باشد.
- باز پخت در دماهای 300°C تا 350°C باعث بهبود خواص مکانیکی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی 420 نسبت به سایر دماهای باز پخت خواهد شد.
- به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت برای دستیابی به خواص خوردگی و مکانیکی مناسب برای فولاد زنگ نزن 420 جوشکاری شده، چرخه عملیات حرارتی باز پخت در دمای 300°C تا 350°C در مدت‌زمان یک ساعت، یک چرخه حرارتی مناسب می‌باشد.

۵- مرجع

- [18] ASTM International, Standard practice for preparing, Cleaning and evaluating corrosion test specimens, Designation: G1, 2009.
- [19] ASM Handbook, Volume9, Metallography and microstructures
- [20] Golozar M.A., Principle and applications of heat treatment of Steels, 2010.
- [21] Fontana M.G., Corrosion engineering, 9th Ed, November, 1985.
- [22] Li G, Lu X., Zhu X., Huang J., Luwei L., Wu Y., The interface microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar joints during multipass laser welding for nuclear power plants, Optics & Laser Technology, 101, Pp 479-490, 2018
- [23] Kangazian J., Shamanian M., Ashraf A., Dissimilar welding between SAF 2507 stainless steel and Incoloy 825 Ni-based alloy: The role of microstructure on corrosion behavior of the weld metals, Journal of Manufacturing Processes, 29, Pp 376-388, 2017
- [24] Schweitzer A, Fundamentals of corrosion, 2010.
- [25] Zhang Z., Jing H., Xu L., Han Y., Zhao L., Zhang J., Influence of microstructure and elemental partitioning on pitting corrosion resistance of duplex stainless steel welding joints, Applied Surface Science, 394, Pp 297-314, 2017.
- [26] Sajjadi K., Mechanical behavior of materials, 2010.
- [1] Lippold J. C., Kotecki D. J., Welding metallurgy and weldability of Stainless Steels, May 2005.
- [2] Harvey P. D., Engineering properties of steel. ASM international, December 1982.
- [3] Moenian M., Welding key, Tehran, Azadeh, 2002.
- [4] Dillon Cp, Corrosion resistance of stainless steels corrosion, 2000.
- [5] Rajasekhar A., Effect of Welding Process and Weld Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 431 Martensitic Stainless Steel, International Journal of Technical Research and Applications, Volume 3, Issue 3, Pp.280-285, 2015.
- [6] Rajasekhar A., Influence of Microstructure on Mechanical Properties of Martensitic Stainless Steel Welds, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), Pp.5-10, 2015.
- [7] Nasery Isfahany A., H. Saghafian, The Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Corrosion Behavior of AISI420 Martensitic Stainless steel, Journal of Alloys and Compounds, 509, Pp. 3931-3936, 2011.
- [8] Köse C., Kacar R., The Effect of Preheat & Post Weld Heat Treatment on the Laser Weldability of AISI 420 Martensitic Stainless Steel, Materials and Design, 2014.
- [9] Adel Salih A., Zaidi Omar M., Junaidi S., Sajuri Z., Effect of different Heat Treatment on the SS440C Martensitic Stainless Steel, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Pp.867-871, 2011.
- [10] Kou S., Welding metallurgy, November 2002.
- [11] Specification for bare Stainless steel welding electrodes and rods (AWS A5.9), An American National Standard, 2012.
- [12] Dossett J., Practical heat treating, 2006.
- [13] ASM Handbook, Heat treating, volume 4, 1993.
- [14] ASTM International, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, Designation: A 370, 2009.
- [15] ASTM International, Standard test method for Vickers hardness of metallic materials, Designation: E 92, 2009.
- [16] ASTM International, Standard test methods for tension testing of metallic materials, Designation: E 8/E 8M, 2009.
- [17] ASTM International, Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals, Designation: G 31, 2009.