

بررسی اثر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی مقطع جوش فولاد AISI 4140

میثم زرچی^۱

چکیده

در این پژوهش اثر عملیات حرارتی پیش گرم و پس گرم بر خواص مکانیکی فولاد AISI 4140 از خانواده فولادهای کم آلیاژ، عملیات حرارتی پذیر بررسی شد. جوشکاری این فولاد در سه حالت بدون پیش گرم و پس گرم، با پیش گرم و بدون پس گرم و نیز با پیش گرم و پس گرم انجام گرفت. از روش جوشکاری SMAW استفاده شد و تاثیر عملیات حرارتی پیش گرم و پس گرم بر خواص نهایی اتصال جوشکاری به کمک آزمایش‌های ضربه و کشش و سختی سنجی و خمش بررسی گردید. نتایج نشان دادند که با عملیات حرارتی پیش گرم و پس گرم می‌توان خواص نهایی اتصال را کنترل کرد و عملیات حرارتی پس گرم بهبود چقرمگی و استحکام در برابر ضربه را در پی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: استحکام شکست، پس گرم، پیش گرم، خواص مکانیکی، فولاد کم آلیاژ.

۱- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، گروه مهندسی مواد، دزفول، ایران. sky_man1983@yahoo.com

پیشگفتار

نیاز صنعت به فولادهای کم آلیاژ و استفاده روزافزون صنایع حساس به فولادهای با استحکام بسیار بالا، اتصال این مواد را در جایگاهی ویژه برای پژوهش قرار داده است. این گروه فولادها با توجه به درصد عناصر موجودشان در دسته بندی فولادهای کم آلیاژ عملیات حرارتی پذیر قرار گرفته اند. فولادهای کم آلیاژ در واقع فولاد کربنی می باشند که جهت بهبود خواص گوناگون، عناصر آلیاژی به مقدار کم به آن ها افزوده می شود. مهم ترین عنصر در این گروه فولادها کربن است و سختی فولاد با مقدار کربن آن تعیین می شود. افزودن عناصر آلیاژی خواص نظیر افزایش سختی پذیری و افزایش استحکام و مقاومت در برابر خوردگی را در پی خواهد داشت [۱].

فولاد مورد بحث از نوع کربن متوسط است. نوع عملیات حرارتی که روی این فولادها انجام می شود، عملیات آستنیتیزه کردن و بعد کوئنچ و سپس تمپر کردن است که جهت سخت کردن این فولاد بکار می رود. از راه کوئنچ کردن از آستنیت، مارتنزیت سخت بوجود می آید و جهت رسیدن به سختی، استحکام و داکتیلیته مورد نظر مارتنزیت تمپر می شود [۲]. این فولاد دارای خواص ماشین کاری متوسط است و بیش تر در حالت آنیل ماشین کاری شده و پس از عملیات حرارتی ماشین کاری دقیق می شود. [۳] این گروه فولادها با توجه به این که به صورت کوئنچ تمپر بکار می روند، دارای استحکام بالا و سختی و نیز چقرمگی بالایی هستند و بنابراین، دارای نسبت استحکام به وزن بالایی می باشند و در صنایع هوایی کاربرد دارند. [۴]. استفاده از آن ها در این صنایع لزوم اتصال آن ها به آلیاژی مشابه و یا نامشابه خود را سبب می شود که نقش عملیات جوشکاری به عنوان اتصال دائم را نمی توان نادیده گرفت. بدست آوردن ریزساختار مناسب، با کنترل ورود عناصر آلیاژی به فلز جوش، هم چنین، کنترل سرعت سرد شدن به وسیله عملیات پیش گرم و دماهای بین پاسی در هنگامی که جوش چند پاسه انجام می گیرد و گرمای ورودی حاصل از روش جوشکاری و البته، عملیات پس گرم، امکان پذیر خواهد بود.

روش های گوناگون جوشکاری از قبیل شعله ای، الکتروود دستی و... استفاده می شود که استفاده از این

روش ها در اتصال این فولاد کاملاً متداول است [۵]. جوشکاری این فولاد دشوار نیست، ولی راهکار مربوط به آن و همچنین، عملیات حرارتی پس از جوش لازم است [۶] و [۷]. عناصر آلیاژی در این فولاد عبارتند از: کربن، کرم، منگنر، مولیبدن و سیلیسیم. عناصر منگنز، سیلیسیم، مولیبدن و کرم که همگی از عناصر جانشین هستند و این عناصر به وسیله مکانیزم محلول جامد جانشین باعث افزایش استحکام فولاد می شوند [۸]. نسبت به روش های دیگر استحکام بخشیدن مانند کار سختی، رسوب سختی در هنگام جوشکاری کم ترین تغییر در منطقه HAZ را این مکانیزم از خود نشان می دهد و تغییری که در این فولادها ایجاد می شود، افزایش اندازه دانه در کنار خط جوش می باشد، ولی معمولاً فقط مقدار کمی از دانه ها رشد می کنند و تاثیر کمی بر خواص فولاد خواهد داشت [۹]. بهترین شرایط جوشکاری این فولادها با توجه به پژوهش ها و آزمایش های پیشین انجام شده، جوشکاری در حالت آنیل می باشد که پس از اتمام عملیات جوشکاری، سازه جوشکاری مورد عملیات کوئنچ و تمپر قرار گرفته و استحکام و خواص مکانیکی لازم به آن دوباره برگردانده می شود [۱۰].

ناحیه پیرامون جوش به وسیله گرمای ناشی از جوشکاری آستنیتیزه شده و دارای ساختار اصلاح شده ای خواهد شد، به جز در منطقه چسبیده به فلز جوش که دارای دانه های درشت بوده و خواص خوبی در مقابل ضربه نداشته و بیش تر مشکلات جوشکاری این دسته فولادها و فولادهای با استحکام بالاتر از همین ناحیه سرچشمه می گیرد که البته، در اندازه گیری سختی با روش ماکرو نمی توان چیزی مشاهده کرد زیرا این منطقه بسیار باریک بوده و قابل اندازه گیری دقیق با این روش نمی باشد. افزایش سختی پذیری در منطقه چسبیده به جوش به معنای سهولت تشکیل مارتنزیت و افزایش شکنندگی می باشد. گرماهای ورودی کم و همچنین، دمای پیش گرم مناسب منطقه HAZ باریک تری را باعث می شود، در حالی که در گرمای ورودی زیاد و دمای پیش گرم نامناسب وسعت منطقه متأثر از جوش زیاد شده و کنترل خواص آن که در شرایط ایده آل باید همگون با فلز پایه باشد مشکل خواهد بود [۱۱].

ساخت نمونه‌های کشش چه در مورد نمونه‌های تهیه شده از فلز پایه و چه نمونه‌های تهیه شده از مقاطع جوش بر اساس استاندارد ASME QW462 انجام گرفت. نمونه ضربه بر اساس استاندارد ASTM Sa370 ابعاد $10 \times 10 \times 55$ mm دارد که با توجه به ضخامت صفحات آزمون، قابل اجراء است. شکل ۳ و ۲ تصاویری شماتیک از نمونه‌های کشش و ضربه را نشان می‌دهد.

بر اساس ضخامت مورد آزمایش استاندارد AWS D1.1 و کد ASME ۴ عدد نمونه خمش را لازم می‌داند که اندازه ابعادی نمونه‌ها بر اساس کد ASME-QW-462 می‌باشد. دمای عملیات پیش گرم 200°C و در کوره الکتریکی انجام گرفت و عملیات پس گرم در دمای 650°C به مدت یک ساعت در کوره صورت گرفت. با انجام آزمایش ضربه، مشخص شد که در منطقه اطراف جوش (HAZ) بدون انجام عملیات پس گرم، کاهش شدیدی را در مقاومت به ضربه خواهیم داشت و تنها انجام عملیات پیش گرم به تنهایی نمی‌تواند موجب تشکیل نشدن مارتنزیت و بینیت بالایی در اطراف جوش شود و به همین دلیل باید عملیات پس گرم پس از جوشکاری این فولاد انجام گیرد. به جهت بررسی‌های ساختاری نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری استفاده شد، پس از بررسی تصاویر مشخص شد که در قطعات بدون عملیات حرارتی فلز پایه دارای فریت ریز به اضافه کاربیدهای کرم و مولیبدن می‌باشد. ساختار فلز جوش، شامل تیغه‌های مارتنزیت کم کربن به اضافه کاربیدهای حل نشده در آن است که در شکل ۴ به خوبی مشاهده می‌شود.

قطعاتی که روی آن‌ها عملیات پیش گرم و پس گرم انجام شده بود، ساختاری مشتعل بر فریت، مارتنزیت و ذرات کاربید حل نشده داشتند و درشت دانه بودند که همین اندازه دانه‌ها، نشان دهنده کاهش استحکام فولاد در اثر عملیات پیش گرم و پس گرم می‌باشد. شکل ۵ ریز ساختار نمونه را در حالت‌های گوناگون نشان می‌دهد.

بر اساس بررسی‌های انجام شده ورق فولاد ۴۱۴۰ دارای استحکام کششی $766/66$ MPa است. کلیه نمونه‌های کششی تهیه شده از نوع عمود بر خط جوش بودند و تهیه آنها جهت ساخت نمونه‌های کشش چه در مورد نمونه‌های تهیه شده از فلز پایه و چه نمونه‌های

در مجموع، برای چنین فولادهایی توصیه می‌شود که از روش‌هایی با گرمای ورودی کم استفاده شود [۱۲] زیرا درشت شدن دانه، کاهش استحکام به ضربه و نرم شدن HAZ را به دنبال استفاده از روش‌ها با گرمای ورودی زیاد در پی خواهد داشت. در فولادهای با سختی پذیری بالا با کاهش سرعت سرد شدن تمایل به ترکیبگی و ایجاد HAZ با سختی زیاد کاهش می‌یابد. در این ارتباط جداول خواص مکانیکی که از آزمایش روی برخی فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا بدست آمده اند، نشان می‌دهند که تغییرات عمده در میزان گرمای ورودی موجب تفاوت‌های زیادی در نقطه تسلیم و یا تنش نهایی نمی‌شود و در عوض تغییرات زیاد و پراکنده‌ای را در انرژی ضربه خواهد داشت [۱۳].

مواد و روش پژوهش

این فولاد دارای ترکیب شیمیایی است که در جدول ۱ آمده است.

برای نامگذاری نمونه‌های آزمایشی از یک عدد چهاررقمی بر اساس جدول ۲ استفاده شد.

جوشکاری به وسیله یک جوشکار ماهر و با الکتروود دستی انجام گرفت و در این رابطه الکتروود مصرفی ثابت و عملیات پیش گرم و پس گرم، ثابت بودند. همچنین الکتروودهای مصرفی از نوع E8018-B2 بودند و شرایط کاری بر اساس جدول ۳ می‌باشد.

گرمای ورودی بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$H = \eta \frac{EI}{V}$$

در این رابطه E ولتاژ بر حسب ولت، I شدت جریان بر حسب آمپر و V سرعت حرکت قوس بر حسب میلی متر بر ثانیه است. η بین ۰/۷-۱ برای روش‌های گوناگون می‌باشد. این فولادها با جریان مستقیم و روش اتصال قطب‌ها به صورت مستقیم می‌باشد DCSP [۱۵].

صفحات آزمون با سه نوع عملیات ترکیبی بدون پیش گرم و پس گرم و با پیش گرم و بدون پس گرم و با پیش گرم و پس گرم تهیه شدند. شکل ۱ نمونه‌ای از این صفحات را نشان می‌دهد.

از نمونه‌های استاندارد نمونه‌های گوناگونی تهیه شد.

سرعت سرد شدن به قطعه وارد شده و به واسطه آن تغییراتی در ساختار و خواص مکانیکی بوجود آمده است و این در حالی است که از عملیات پس گرم به عنوان یک عملیات حرارتی پس از جوش استفاده شده است. لذا، در مورد قطعاتی که روی آن‌ها عملیات پیش گرم و پس گرم انجام شده است، ساختاری مشتمل بر فریت همراه با مارتنزیت به اضافه ذرات کاربید حل نشده ایجاد گردیده که افزایش اندازه دانه‌ها نشان‌دهنده کاهش استحکام فولاد در اثر عملیات پیش گرم و پس گرم می باشد. منطقه درشت‌دانه با وجودی که موجب افزایش سختی پذیری می‌شود و شرایط را برای بوجود آمدن مارتنزیت مهیا می‌کند، ولی از لحاظ خواص مکانیکی ضعیف است. رشد آسان‌تر از محل ترک مرزدانه‌های وسیع و ادامه فراگیر شدن آن موجب کاهش خواص مکانیکی گردد.

در انجام آزمایش کشش نمونه‌های آزمایشی آماده شده همگی از منطقه کاملاً چسبیده به جوش و یا HAZ شکسته شدند که براساس نتایج بدست آمده شکست از بخشی از منطقه سه گانه HAZ صورت گیرد که کم‌ترین استحکام را به خاطر وسعت مرزدانه‌ها داراست، این مطلب به روشنی در شکل ۶ قابل مشاهده است. با توجه به نتایج آزمایش کشش و مقایسه نمونه‌هایی که مورد عملیات پیش گرم و پس گرم قرار گرفته اند و نمونه‌هایی که عملیاتی روی آن‌ها انجام نشده است، بالاتر بودن استحکام کششی در نمونه جوشکاری شده بدون پیش گرم و پس گرم نسبت به سایر نمونه‌ها می‌تواند به خاطر درصد بیش‌تر مارتنزیت در یک حجم یکسان باشد. در واقع، بدون عملیات پیش گرم و پس گرم در نمونه‌های با تعداد پاس ثابت و گرمای ورودی یکسان، سرعت سرد شدن نسبت به نمونه‌های پیش گرم شده بیش‌تر بوده و نتیجه آن بالاتر بودن استحکام کششی نسبت به نمونه‌هایی است که عملیات پیش گرم و پس گرم روی آن‌ها انجام شده است که این امر به وسیله دیگران نیز مورد تایید قرار گرفته است [۵ و ۱۰]. از سوی دیگر، انجام عملیات پیش گرم روی نمونه‌ها، فرصت و امکان بهتری برای درشت شدن دانه‌ها در منطقه HAZ را فراهم می‌سازد که شاهد کاهش استحکام کششی از حدود MPa ۷۳۳ به MPa ۶۹۷ شده است و هم‌چنین، کاهش سرعت سرد

تهیه شده از مقاطع جوش بر اساس استاندارد ASME QW462 انجام گرفت. طبق نتایج به دست آمده از آزمایش کشش به ترتیب با اعمال عملیات پیش گرم، بدون پس گرم و انجام عملیات پیش گرم و پس گرم، استحکام کششی، افت می‌کند. این نتایج در جدول شماره ۴ آمده است:

برای بررسی فلز جوش و منطقه پیرامون جوش که تغییرات ساختاری داشتند، آزمایش ضربه‌ای در دمای محیط انجام گرفت. نتایج در جدول ۵ آمده است. جهت بررسی بیش‌تر و شناخت چگونگی گسیختگی و شکست چند نمونه خمش ساخته شد. با توجه به حساسیت نمونه سازی و اهمیت قرار دادن نمونه روی تکیه‌گاه و محل تماس فک و اعمال نیرو، نمونه‌های آزمایشی تهیه گردید. کیفیت سطح تحت خمش نیز بسیار مهم می‌باشد. شرح نتایج در جدول ۶ آمده است. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، این آزمایش می‌تواند به عنوان شاخصی برای مقدار انعطاف‌پذیری، انتخاب نوع الکتروود، شرایط جوشکاری و عملیات انجام شده باشد و هم‌چنین تاییدی بر آزمایش ضربه است.

آزمایش سختی با روش راکول C انجام گرفت که البته، در مواردی که سختی کم‌تر از ۲۲ راکول بود، توسط روش ویکرز بررسی گردید و سپس مقادیر بدست آمده به راکول C تبدیل شد. انجام آزمایش (ماکرو سختی) به روش راکول C که نتایج آن در جدول ۷ آمده است، نشان دهنده سختی بالاتر ناحیه HAZ نسبت به فلز جوش در کلیه نمونه‌ها بود و نمونه‌هایی که عملیات کوئنچ تمپر شده بودند، سختی بالاتری نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده بدون این عملیات نشان می‌دادند.

بحث و تحلیل نتایج بدست آمده

پس از بررسی تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری مشخص شد که فلز پایه دارای فریت ریز به اضافه کاربیدهای کرم و مولیبدن می‌باشد که این ساختار مربوط به قطعاتی است که بدون عملیات پیش گرم و پس گرم بودند هم‌چنین، مشخص شد که ساختار فلز جوش، شامل تیغه‌های مارتنزیت کم کربن به اضافه کاربیدهای حل نشده در آن است. عملیات پیش گرم بمنظور کاهش

گسیختگی آنها از ناحیه چسبیده به جوش و در مرز جوش و فلز پایه صورت گرفت. زاویه نمونه ها در هنگام شکست در حدود ۲۰ تا ۵۰ درجه (از خط افقی) می باشد که این شکست ناشی از ناحیه HAZ است که موجب تشکیل ترک های بزرگی می گردد که کل نمونه را به دو قسمت تفکیک می کند. بدیهی است که نوع الکتروود در این قضیه نقش و دخالتی نداشته و مساله کاملاً مربوط به مساله ساختاری فلز پایه در اثر سرعت های سرد شدن متفاوت می باشد [۱۳-۱۴].

با مطالعه این دو آزمایش مشخص می شود که عملیات پیش گرم به تنهایی و بدون انجام عملیات پس گرم نمی تواند تنها با کاهش نسبی سرعت سرد شدن خواص بهینه ای را از لحاظ مقاومت به ضربه و خمش تامین کند. در عوض مشاهده می شود نتایج آزمایش ضربه برای نمونه های پیش گرم و پس گرم شده به ماکزیمی در حدود $8/1 kJ$ خواهد رسید که ناشی از تغییرات بنیادی خواص در مقایسه با نمونه های بدون پیش گرم و پس گرم و یا فقط پیش گرم شده است. این مسئله به خاطر داشتن زمان کافی منطقه HAZ و تمپر شدن آن در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد در زمان یک ساعت است.

بهترین خواص مکانیکی در میان ساختارهای موجود در فولاد مارتنزیت تمپر شده است [۵] که در این جا نیز این عملیات جهشی را در مقدار مقاومت به ضربه باعث می شود. گرچه این عملیات موجب کاهش خواص کششی می شود، ولی در مقایسه با بدست آوردن نتایج حاصل از انرژی ضربه در منطقه HAZ توجیه پذیر است. این در حالی است که نمونه های پیش گرم و پس گرم شده در آزمایش خمش مقاومت بیشتری از خود نشان داده و خمش بیشتری را تحمل می کند. انرژی ضربه در فلز جوش بستگی مستقیم به ترکیب شیمیایی فلز جوش افزون بر روند تغییرات حرارتی خواهد داشت در حالی که در منطقه HAZ که تغییرات ترکیب شیمیایی بوجود می آید، چگونگی تغییرات حرارتی بسیار مهم است. انتظار می رود که انرژی ضربه فلز جوش به ترتیب با انجام عملیات پیش گرم و عملیات پس گرم و پس گرم افزایش یابد. با بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش های انجام شده می توان تاثیر انجام عملیات پیش گرم را بویژه

شدن باعث تشکیل فازهایی با سختی کم تر (مانند بینیت یا انواع فریت ها) می شود که منجر به کاهش سختی را در این نمونه ها می شود.

انجام عملیات پس گرم به همراه پیش گرم در برخی از نمونه ها ساختار تمپر شده ای را باعث شد و باعث نرم شدن و بهبود ساختار و خواص گردید در حالی که ناحیه شکست هم جوار جوش و در ناحیه HAZ قرار داشت. گرچه در ناحیه رشد دانه امکان جوانه زنی فریت و سمنتیت نیز در مرزدانه های آستنیت وجود دارد، ولی ضعف منطقه درشت دانه هنوز به قوت خود باقی است و با توجه به تجمع ناخالصی های احتمالی، جوانه زنی فریت و سمنتیت در آن، کمک شایانی به جلوگیری از ترک در این منطقه نکرده است. نتیجه سرعت سرد شدن روی نتایج ماکروسختی نیز مشخص است. در یک نگاه کلی به سختی فلز جوش در نمونه های گوناگون مشاهده می گردد که مقدار آن در نمونه های پیش گرم نشده نسبت به نمونه های پیش گرم شده بیشتر است. کاهش دوباره سختی ها پس از عملیات پس گرم به خاطر بازگشت یا تمپر شدن فازهای سخت بوجود آمده همچون مارتنزیت و بینیت می باشد. هم چنین، انجام عملیات پیش گرم و کاهش سرعت سرد شدن موجب کاهش سختی در منطقه HAZ نسبت به فلز جوش می گردد که این مسئله می تواند به دلیل نرمی حاصل از افزایش اندازه دانه هایی باشد که در اثر کاهش سرعت سرد شدن ایجاد شده اند.

آزمایش ضربه در دمای محیط که تأثیر این عملیات را وضوح نشان می دهد. همانطور که در جدول آزمایش ضربه مشاهده می شود در هر صفحه آزمون ۲ آزمایش ضربه انجام گرفته که مربوط به انرژی ضربه منطقه HAZ می باشد. آنچه به طور کلی مشخص است، پایین بودن انرژی ضربه منطقه HAZ در نمونه های بدون انجام عملیات پیش گرم و پس گرم و پیش گرم تنها می باشد. این مساله در آزمایش خمش نیز تایید می گردد، نمونه های استخراج شده از صفحات آزمونی که تحت عملیات پیش گرم و پس گرم قرار گرفته اند دارای خمش بیشتری نسبت به سایر نمونه ها هستند. در حالی که نمونه های تهیه شده از صفحات آزمون، بدون پیش گرم و پس گرم و با پیش گرم تنها خیلی سریع می شکند. شکست و

فازهایی با سختی کمتر موجبات نرمی در این نمونه‌ها را فراهم آورد.

۳- عملیات پیش گرم به تنهایی و بدون انجام عملیات پس گرم، نمی‌تواند تنها با کاهش نسبی سرعت سرد شدن خواص بهینه‌ای را از لحاظ مقاومت به ضربه و خمش تأمین کند، ولی زمانی که از هر دو فرایند استفاده شد این خواص بهینه در فولاد به دلیل تمپر شدن فاز مارتنزیت تأمین گردید.

۴- با توجه به اثر نامطلوب حرارت ورودی روی ریز ساختار مناطق اطراف جوش، باید از روش جوشکاری با کمترین حرارت ورودی استفاده شود.

در نتایج عددی بدست آمده از آزمایش ضربه منطقه HAZ مشاهده کرد.

نتیجه گیری

بر اساس مطالب بالا می‌توان نتیجه گرفت که:

- ۱- عملیات حرارتی انجام شده بسته به نوع آن باعث تغییرات اساسی در سختی ساختار نمونه در مناطق گوناگون اطراف حوزه جوش می‌شود.
- ۲- انجام عملیات پیش گرم باعث کاهش سرعت سرد شدن شد که این درشت شدن دانه‌ها و در نتیجه کاهش استحکام کششی را به دنبال داشت از سوی دیگر، تشکیل

References

- 1- L.T. Anderson, The Benefits of New Strength Low-Alloy Steel, Welding journal, P 21-25, May 1997.
- 2- K.E. Easterling, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. 8ed. (London): Butterworths Monographs in Materials, 231p, 1995.
- 3- S. Liu, and J.E. Indacochea, Weld ability of Steels, Metals Handbook, 14ed. (Ohio). American Society for Metals. 2006.
- 4- G. E. Linnert, in Welding Metallurgy, AWS Pub Vol. 4, 1999.
- 5- Materials & Processing Databook '91. Metal Progress. American Society for Metals, Vol. 234. No. 1, 2001.
- 6- E.R. Bueno, "Welding Procedure Development of the AISI 4140 Steel with Post-Weld Heat Treatment," M.Sc. Thesis, Universidad Federal de Santa Catharine, Brazil, <http://en.ufsc.br/>, 2004.
- 7- S.H. Avener, introduction to Physical Metallurgy. 2 Ed., Mc- Graw-Hill, 1994 .
- 8- American Welding Society (AWS), Structural Welding Steel. Section 3.5.2. pp. 58 and 66. Code D1.1/D1.1M: 2006.
- 9- W. Galvery, Industrial Press Welding Essentials: 2 Ed, Oxford University Press, 2003.

- 10- A. Aloraier, R.N. Ibrahim, and J. Ghajel, Post-Weld heat Treatment in Repair Welding by Temper Bead Technique: Role Bead Sequence in Metallurgical Changes. J. Mater. Proc. Techno., 133-134, pp. 390-398, 2008.
- 11- B. Irving, The Challenge of Welding Heat Treatable Alloy Steels. Weld. J., 84(3), pp. 43-48, 1999.
- 12- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)/AWS D1.5M/D1.5: Bridge Welding Code. C-12.14 Preheat and Inter Pass Temperature Control. 387, 2008.
- 13- C.E. Nino, "Developing Weld Repair Procedures Specifications with Post Weld Heat Treating – Tempering Effects by Thermal Cycles," Ph.D. Thesis, Universidad Federal de Santa Catharine, Brazil, <http://en.ufsc.br/>, 2003.
- 14- ASTM International, 03.01 E140 (Tables 4 and 5): 2009.
- 15- S. D. Sharma, R. Saluja, K. M. Moeed, A Review on Effect of Preheating and/or Post Weld Heat Treatment (PWHT) on Hardened Steel, Volume 1, Issue 2 (may-june 2013), PP. 05-07.

پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد AISI 4140.

C	Cr	Mn	Mo	P _{max}	Si	S _{max}
0.38-0.43	0.8-1.1	0.75-1	0.15-0.25	0.035	0.15-0.35	0.04

جدول ۲- نامگذاری نمونه های آزمایش.

رقم اول	رقم دوم	رقم سوم	رقم چهارم
۰- نمونه بدون پیش گرم و پس گرم	۱- نمونه در حالت آنیل	۱- نشان دهنده نمونه کشش	۱- نشان دهنده اولین نمونه
۱- نمونه در حالت پیش گرم و بدون پس گرم	۲- نمونه در حالت کوئنچ و تمپر شده	۲- نشان دهنده نمونه خمش	۲- نشان دهنده دومین نمونه
۲- نمونه در حالت پیش گرم و پس گرم شده		۳- نشان دهنده نمونه ضربه	۳- نشان دهنده سومین نمونه

جدول ۳- شرایط متغیرهای مربوط به جوشکاری.

شدت جریان (A)	ولتاژ (V)	تعداد پاس	سرعت جوشکاری cm/min	گرمای ورودی j/mm
250	20	5	40	618
آنالیز الکتروود مصرفی	نوع الکتروود	C قطر الکتروود mm	دمای پیش گرم و بین پاسی	دمای پس گرم °C
C= 0.08, Mn= 0.71 Si=0.42, Cr= 1.28, Mo=0.51, Fe= Bal	E8018-B2	4	250~200	650

جدول ۴- نتایج بدست آمده از آزمایش کشش.

شماره نمونه	۰۱۱۱	۰۱۱۲	۰۲۱۱	۰۲۱۲	۱۱۱۱	۱۱۱۲	۱۲۱۱	۱۲۱۲	۲۱۱۱	۲۱۱۲	۲۲۱۱	۲۲۱۲
استحکام نهایی کشش MPa	733.9	729.5	933	921.5	720.6	697.8	861.6	876.7	695.1	699.7	823.3	845.3

جدول ۵- نتایج بدست آمده از آزمایش ضربه در دمای محیط.

شماره نمونه	0131	0231	1131	1231	2131	2231
انرژی ضربه (کیلوژول)	7.8	6.4	7.4	6.2	8.1	7.1

جدول ۶- نتایج آزمایش خمش.

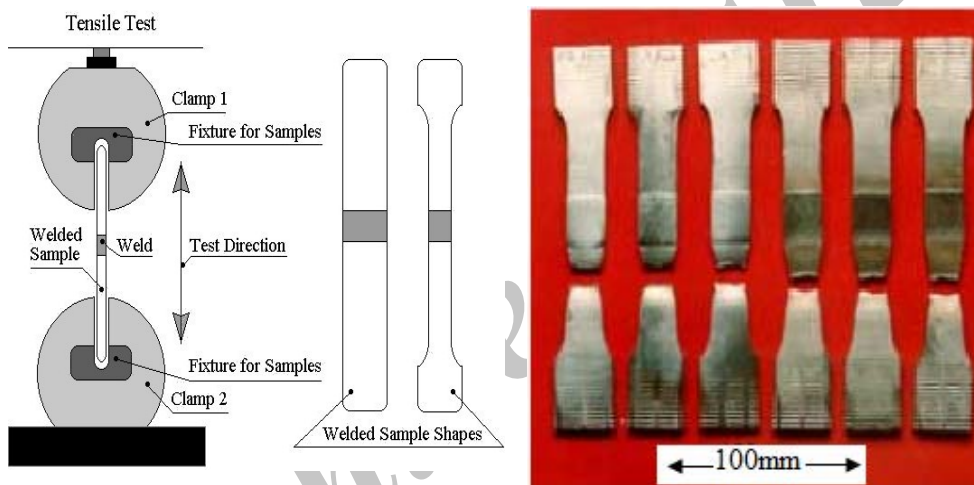
شماره نمونه	0121	0221	1121	1221	2121	2221
وضعیت نمونه پس از انجام آزمون	شکسته شد	شکسته شد	شکسته شد	شکسته شد	شکسته شد	شکسته شد
زاویه شکست (درجه)	35	17	38	28	47	30

جدول ۷- نتایج آزمایش سختی.

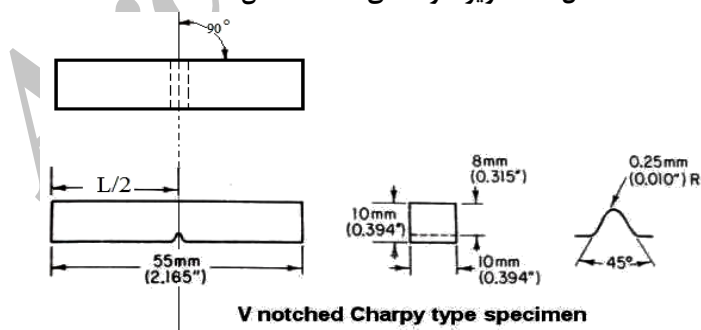
28.7	18.2	32.4	23	35.3	25.5	فلز پایه HV
19	19.1	20	21.1	21.1	21	فلز جوش HV
37.5	34.3	39.9	36.4	39.96	38	منطقه متأثر از جوش HV
22	21	12	11	02	01	شماره نمونه



شکل ۱- نمونه ای از قطعات جوشکاری شده قبل از مقطع زنی جهت انجام آزمایش.



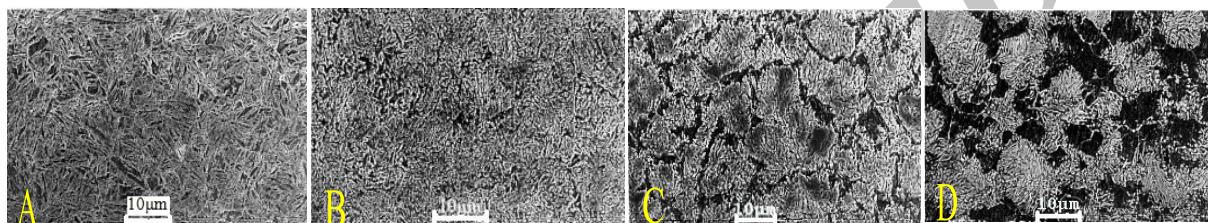
شکل ۲- تصویر نمونه های تست کشش.



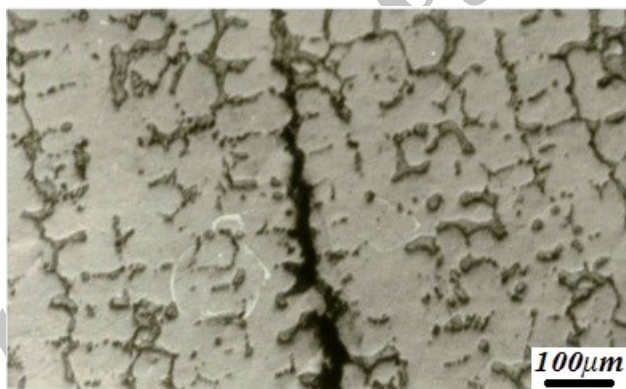
شکل ۳- تصویر شماتیک نمونه آزمایش ضربه.



شکل ۴- ریز ساختار فلز پایه، فصل مشترک فلز پایه و منطقه جوش و منطقه جوش.



شکل ۵- تصاویر متالوگرافی نمونه. الف) نمونه فلز پایه بدون هیچ‌گونه عملیات حرارتی ب) فقط پیش گرم ج) فقط پس گرم (د) هم پیش گرم و هم پس گرم.



شکل ۶- ساختار میکروسکوپی همراه با ترک در منطقه HAZ درشت دانه (نمونه آزمایش کشش).