

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Microstructure and Mechanical Properties of HSLA-100 Steel during Friction Stir Welding

Abstract

The purpose of this study is to investigate feasibility of friction stir welding in joining of HSLA-100 steel and to examine microstructure and mechanical properties of weldment. To this end FSW was performed in constant linear velocity of 100 mm/min and rotational speeds of 400, 630, and 800 rpm. Microstructures and mechanical properties evaluated by optical microscope, tensile and microhardness tests, respectively. The results revealed that in all condition of present study sound welds produced. Microstructure of all stir zones consisted of low carbon martensite that was in agreement with microhardness results. By increasing rotational speed and therefore increase in heat input, hardness of this zone decreases. Failure of tensile test specimens was occurred in the base metal.

Keywords: HSLA-100 steel, Friction stir welding, Microstructure, Mechanical properties

ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد HSLA-100 در جوشکاری همزن اصطکاکی

چکیده

هدف از تحقیق حاضر امکان‌سنجی جوشکاری فولاد HSLA-100 به روش همزن اصطکاکی و بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی حاصل از آن است. بدین منظور جوشکاری در سرعت‌های چرخشی ۴۰۰، ۶۳۰ و ۸۰۰ rpm و سرعت خطی ثابت ۱۰۰ mm/min انجام شد. ریزساختارهای حاصل با استفاده از میکروسکوپ نوری و خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از ریزسختی‌سنجی و کشش مورد بررسی قرار گرفتند. در نتیجه جوشکاری سه خط جوش سالم حاصل شد و بررسی ریزساختاری نمونه‌ها حاکی از آن بود که ناحیه همزده تمامی نمونه‌ها مارتنزیت کم کربن می‌باشد که با نتایج آزمون ریزسختی در توافق است و با افزایش سرعت چرخشی سختی ناحیه همزده کاهش یافته است. شکست نمونه‌های آزمون کشش از ناحیه فلز پایه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فولاد HSLA-100، جوشکاری همزن اصطکاکی، ریزساختار، خواص مکانیکی

مقدمه

فولاد HSLA-80 در سال ۱۹۸۴ پس از انجام آزمایشات متعدد برای استفاده در ساختمان کشتی مورد تایید قرار گرفت. زیرا که نتایج بررسی‌ها حاکی از آن بود که این فولاد خواص لازم در این راستا را برآورده ساخته و جوشکاری آن نیز آسان‌تر، بدون نیاز به پیش‌گرم و با مواد مصرفی و فرآیندهای مشابه برای جوشکاری فولاد HY-80 که قبلاً از فولادهای این خانواده استفاده می‌شد، قابل انجام است (Czyryca, Vassilaros, 1993).

در ادامه توسعه فولاد HSLA-80 به منظور کاهش هزینه‌ها جایگزینی فولاد HSLA-100 بجای فولاد HY-100 صورت گرفت. فولاد HSLA-100 نیز بسیار کم کربن و استحکام بخشی شده توسط رسوب سختی مس و عملیات ترمومکانیکی کنترل شده می‌باشد که استحکام و چقرمگی آن حداقل در حد فولاد HY-100 بوده و جوش‌پذیری آن با توجه به عدم نیاز به پیش‌گرم و نیز استفاده از مواد مصرفی و فرآیندهای مشابه برای جوشکاری فولاد HY-100 بهبود یافته است (Czyryca, Vassilaros, 1993).

با توجه به اینکه فولادهای HSLA رسوب سخت شده توسط مس دارای کربن بسیار کمی هستند لذا پس از جوشکاری ناحیه متأثر از حرارت آنها افزایش سختی قابل توجهی نداشته و حتی ممکن است در نتیجه انحلال مس و درشت شدن دانه‌ها در حین جوشکاری سختی کاهش یابد. از این رو حساسیت این ناحیه به ترک هیدروژنی بسیار کم بوده و این امر سبب جوش‌پذیری بسیار عالی این فولادها شده است (Czyryca, Vassilaros, 1993).

بیشتر مطالعات انجام گرفته در زمینه جوشکاری فولاد HSLA-100 مربوط به جوشکاری با فرآیندهایی نظیر جوشکاری فلز تحت حفاظت گاز (Gianetio, 1995) و جوشکاری زیرپودری (Xue, 2003 Shome, 2007) می‌باشد که بدین منظور از فلز پرکننده استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده در این مطالعات بیشتر در مورد ناحیه HAZ متمرکز بوده و ناحیه‌ی جوش کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. اما جوشکاری ذوبی این فولادها می‌تواند خواص حاصل از عملیات ترمومکانیکی کنترل شده و نیز رسوب سختی را از بین برده و تاثیرات منفی بر خواص مکانیکی داشته باشد. از طرف دیگر تحقیقات بسیاری در مورد جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژهای Cu, Ti, Mg, Al فولادهای ساده کربنی و زنگ زن انجام گرفته که نتایج قابل توجهی در بخش‌های نظامی و تجاری داشته است (Wei, Tracy, 2012, Mishra, Ma, 2005). جوشکاری همزن اصطکاکی جزء فرآیندهای حالت جامد اتصال دهی بوده که توسط موسسه جوشکاری درانگستان ابداع شده است. در این فرآیند یک ابزار چرخشی در درز اتصال قرار می‌گیرد که در اثر این چرخش و سیلان پلاستیک ماده جوشکاری صورت می‌پذیرد. در مقایسه با روش‌های جوشکاری ذوبی، به دلیل ماهیت حالت جامد جوشکاری همزن اصطکاکی، عیوب ناشی از انجماد حذف و ریز ساختار کار شده به جای ریزساختار انجمادی حاصل می‌شود (Uenishi, Ogata, Iwatani, 2007). از این رو در این پژوهش امکان ایجاد اتصال و نیز ریزساختار مناطق مختلف جوش و خواص مکانیکی اتصال فولاد HSLA-100 بوسیله جوشکاری همزن اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

فولاد HSLA-100 مورد استفاده در این تحقیق ورق نورد شده با ابعاد $230 \times 105 \times 6$ mm می‌باشد که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. برای رفع اکسیدهای موجود بر روی سطح و نیز بهبود کیفیت سطحی نمونه‌ها، در ابتدا سنگ‌زنی صورت گرفت و در ادامه برای تمیزی سطح از چربی از استن استفاده شد. به منظور انجام جوشکاری از فرز سنگین استفاده شد. با توجه به استحکام بالای فولاد و نیاز به ابزاری با مقاومت به سایش بالا در این تحقیق از ابزار کاربید تنگستنی به شکل استوانه‌ای با پینی به شکل مخروط ناقص برای جوشکاری استفاده شد که قطر شانه آن ۱۶ mm، قطر بالا و پایین پین به ترتیب ۶ mm و ۳/۶ mm و طول پین ۳ mm

۲ بود. با توجه به اینکه مطالعه‌ای در زمینه FSW این فولاد انجام پذیرفته بود، انتخاب پارامترها با در نظر گرفتن شرایط مشابه برای فولادها صورت گرفت که بدین منظور جوشکاری در سرعت پیشروی ثابت ۱۰۰ mm/min و سرعت‌های چرخشی ۴۰۰، ۶۳۰ و ۸۰۰ rpm انجام پذیرفت. به منظور اختلاط بهتر حین جوشکاری زاویه ابزار نسبت به راستای عمود بر خط جوشکاری ۳ درجه لحاظ شد.

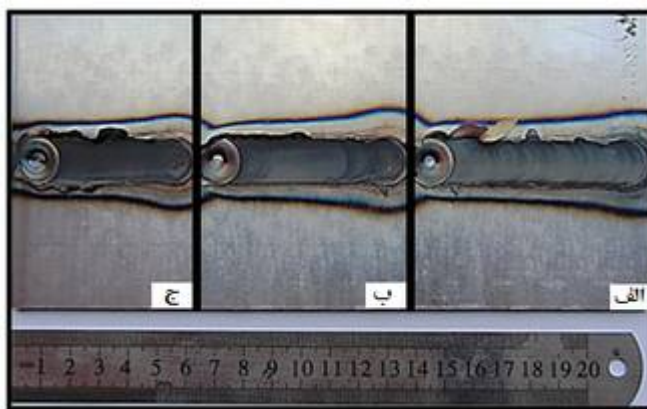
جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد HSLA-100

| عنصر | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | Nb | Ti + V | Fe |
|-----------|-------|-------|------|-------|-------|-----|------|------|------|-------|--------|-------|
| درصد وزنی | ۰/۰۶۱ | ۰/۰۸۲ | ۰/۲۷ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۸ | ۱/۷ | ۳/۳۵ | ۰/۷۱ | ۰/۷۱ | ۰/۰۴۴ | ۰/۰۲۹ | مابقی |

جهت ارزیابی ریزساختار، نمونه‌ها از قسمت میانی خط جوش ایجاد شده برش داده شده و سپس سنباده‌زنی شدند. در ادامه نمونه‌ها بعد از صیقل کاری با محلول نایتال ۴ درصد به مدت ۷ ثانیه حکاکی و آماده تصویربرداری با میکروسکوپ نوری شدند. از آزمون کشش برای تعیین خواص کششی نمونه‌ها استفاده شد؛ بدین ترتیب که ابتدا نمونه‌های جوشکاری شده طبق استاندارد نمونه‌های کوچک ASTM-E8 در جهت عمود بر خط جوش تهیه و در ادامه به منظور رسیدن به ضخامت مورد نظر (۳ mm) سنگ‌زنی شدند. لازم به ذکر است که سرعت حرکت فک در آزمون کشش ۲ mm/min بود. آزمون ریزسختی‌سنجی جهت اندازه‌گیری دقیق سختی در نقاط مختلف نمونه‌های جوشکاری شده و تهیه پروفیل ریزسختی استفاده شد. برای دستیابی به نتایج صحیح ریزسختی میزان بار ۳۰۰ گرم و زمان اعمال آن ۱۵ ثانیه لحاظ شد.

نتایج و بحث

شکل ۱ کیفیت ظاهری جوش‌های ایجاد شده در سرعت‌های چرخشی متفاوت را نشان می‌دهد. در این شکل از راست به چپ سرعت چرخشی ابزار افزایش یافته و لذا علاوه بر حرارت ورودی میزان تغییر شکل نیز بیشتر شده است. از طرفی مهره‌های جوش در سرعت چرخشی پایین کاملاً قابل تفکیک از هم بوده در حالی که در سرعت چرخشی بالا این مهره‌ها به صورت به هم چسبیده بوده و قابل رویت نمی‌باشند و ظاهر جوش کاملاً صاف، یکنواخت و سالم است.



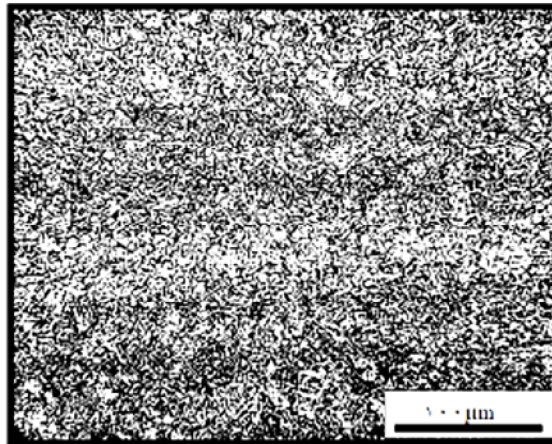
شکل ۱- کیفیت ظاهری جوش‌های انجام شده در سرعت‌های چرخشی

الف) ۴۰۰، ب) ۶۳۰ و ج) ۸۰۰ rpm

www.iran-mavad.com

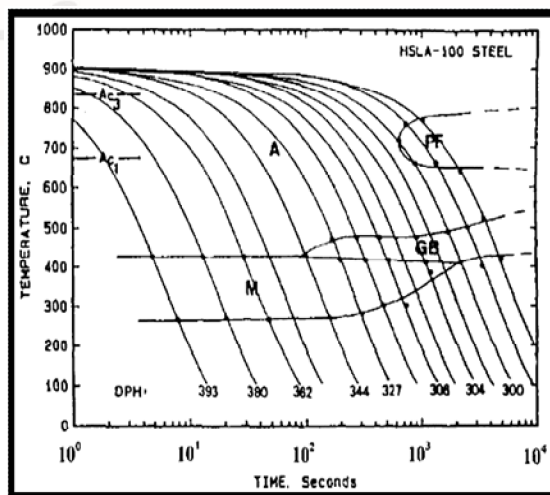
مرجع دانلود رایگان مهندسی مواد و متالورژی

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ریزساختار فلز پایه بیشتر از تیغه‌های مارتنزیتی به همراه مقداری بینیت دانه‌ای (فریت سوزنی) تشکیل یافته است.



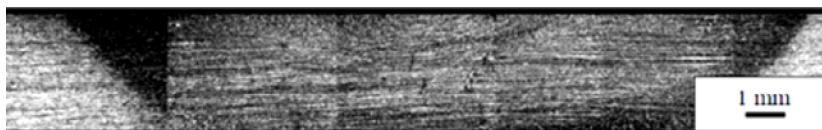
شکل ۲- ریز ساختار فلز پایه فولاد HSLA-100

برای اطمینان از ریزساختار از نمودار CCT این فولاد که در شکل ۳ آورده شده است و آزمون ریزسختی استفاده شده است که این ریزساختار تأیید می‌شود.



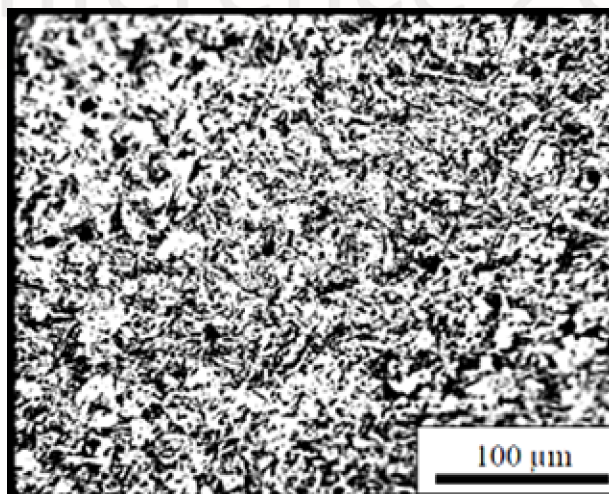
شکل ۳- نمودار CCT برای فولاد HSLA-100

در حین جوشکاری همزن اصطکاکی تغییر شکل پلاستیک و شرایط دمایی سبب ایجاد تغییراتی در ریزساختار فلز پایه می شود. بر اساس شرایط مختلف تاثیرگذار بر خواص ماده می توان نواحی متفاوتی در ناحیه ی اتصال مشخص کرد. در دو طرف خط مرکزی جوش سمتی که در آن مواد در جهت حرکت جوشکاری سیلان می یابند سمت پیش رونده (AS) و سمتی که در آن مواد در خلاف جهت جوشکاری سیلان می یابند سمت پس رونده (RS) نام گذاری شده است (Shome, 2007). در شکل ۴ درشت ساختار مقطع جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۴۰۰ rpm نشان داده شده است.



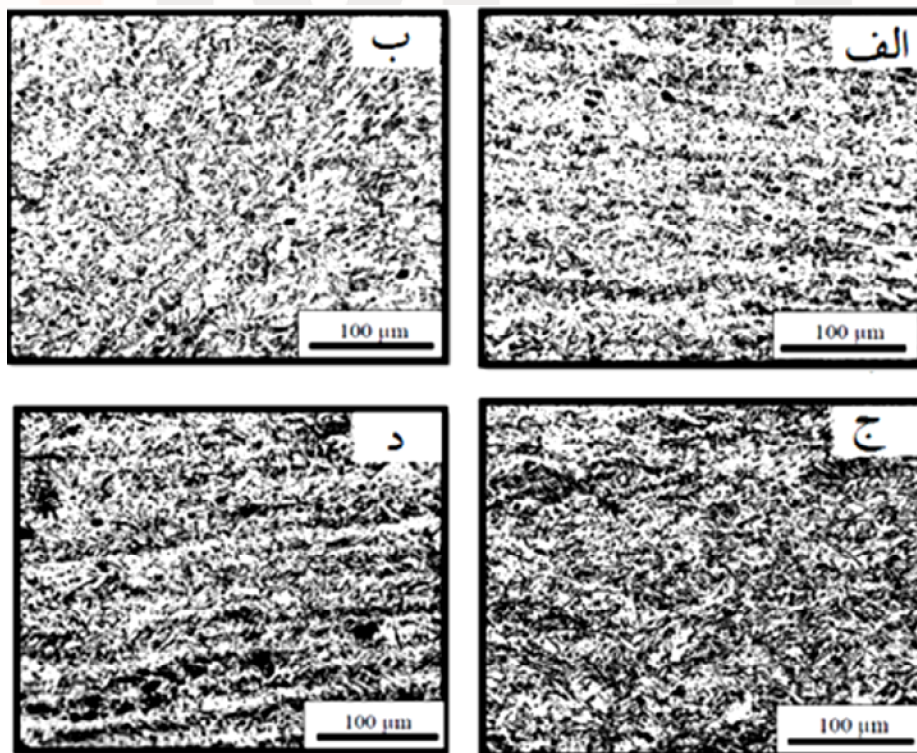
شکل ۴- درشت ساختار مقطع جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۴۰۰ rpm

در شکل ۵ نیز تصویر ناحیه همزده ی مربوط به آن نشان داده شده است. با توجه به حرارت ورودی کم در این نمونه دما به طور قابل ملاحظه ای افزایش نیافته است. اما با توجه به سرعت سرمایش نسبتا بالا در ناحیه SZ احتمال ایجاد فازهای سختی نظیر مارتنزیت افزایش یافته است که این احتمال با نتایج ریزسختی در توافق می باشد؛ به عبارتی ریزساختار این ناحیه از بسته های ریز مارتنزیتی تشکیل یافته است اما از طرف دیگر با توجه به پایین بودن سرعت چرخشی ابزار تغییر شکل زیادی در نمونه ایجاد نشده و ابعاد بسته ها در این ناحیه نسبت به فلز پایه که تحت عملیات ترمومکانیکی کنترل شده ریز شده است تا حدودی درشت تر به نظر می رسد.



شکل ۵- ناحیه ی SZ: نمونه ی جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۴۰۰ rpm

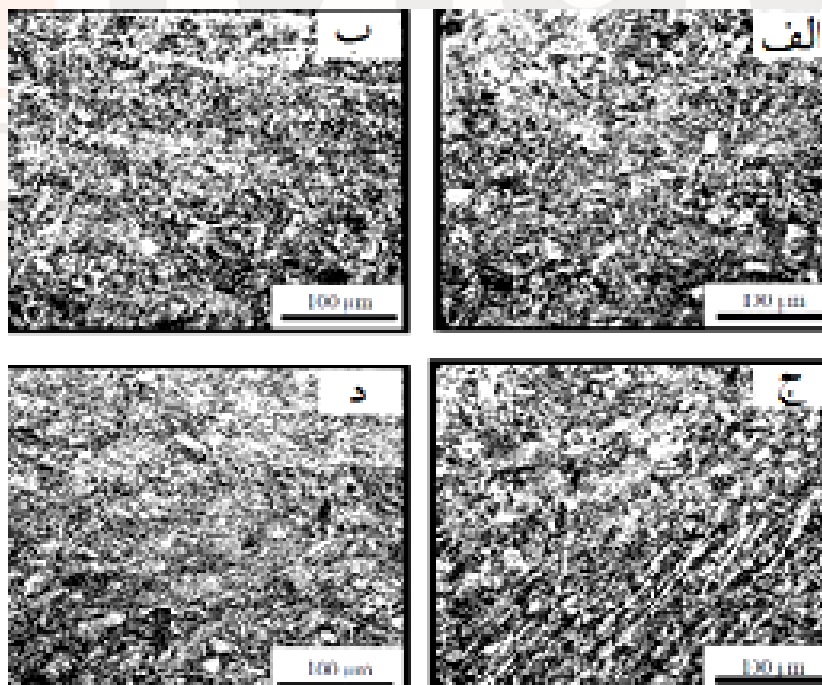
در شکل ۶ تصاویر مربوط به ناحیه‌ی تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی در دو سمت خط جوش و همچنین تصاویر مربوط به ناحیه-ی HAZ خارجی (مرز بیرونی) و داخلی (بین دو مرز) نشان داده شده است. اشکال ۶-الف و ۶-ب مربوط به تصویر ناحیه‌ی TMAZ در دو سمت خط جوش می‌باشند. با توجه به اینکه این ناحیه در حین جوشکاری هم تغییر شکل و هم حرارت را تجربه می‌کند و از آن-جاییکه میزان کرنش ناشی از تغییر شکل کم است فقط کشیدگی دانه‌ها که از ویژگی‌های این ناحیه است مشاهده می‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه در سمت AS تغییر شکل و پیک دمایی بالاتر است کشیدگی دانه‌ها بیشتر مشهود است. غالب ریزساختار در این دو ناحیه نیز از مارتنزیت تشکیل شده است. در ناحیه HAZ خارجی که در شکل ۶-ج ملاحظه می‌شود فازها از حالت نواری خارج شده و بصورت شکسته درآمده‌اند و از طرف دیگر به نظر می‌رسد ابعاد بسته‌ها نیز تا حدودی درشت شده‌اند. از سوی دیگر با توجه به اینکه دما و سرعت سرمایش بالا بوده است، غالب ریزساختار مارتنزیتی است که در توافق با نتایج بخش خواص مکانیکی می‌باشد. لازم به ذکر است که ناحیه بین TMAZ و HAZ (شکل ۶-د) به لحاظ ریزساختاری کاملاً شبیه فلز پایه (BM) بوده و نواری شدن را که از ویژگی-های فلز پایه است کاملاً قابل مشاهده است. فازهای موجود در ریزساختار نیز به لحاظ ظاهری تفاوت چندانی با فازهای فلز پایه ندارند. اما سختی در این ناحیه متفاوت با فلز پایه است و از این‌رو به مطالعه‌ی بیشتر نیازمند است.



شکل ۶- نواحی نمونه‌ی جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۴۰۰ rpm
الف) TMAZ در سمت RS، ب) TMAZ در سمت AS، ج) HAZ خارجی و د) HAZ داخلی
www.iran-mavad.com

در شکل ۷ تصاویر مربوط به نواحی مختلف نمونه‌ی جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۶۳۰ rpm نشان داده شده است. در این سرعت چرخشی نمونه نسبت به نمونه قبلی پیک دمایی بالاتری را تجربه کرده و سرعت سرمایش آن پایین تر خواهد بود و از طرف دیگر به دلیل افزایش سرعت چرخشی ابزار تغییر شکل بیشتری نیز ایجاد شده است. با توجه به مطالب عنوان شده و نیز تصویر ناحیه SZ (شکل ۷-الف) این نمونه می‌توان گفت ساختاری با بسته‌های ریز ایجاد شده است که با توجه به نمودار CCT احتمالاً از مارتنزیت کم کربن به همراه رسوبات درشت شده‌ی مس تشکیل یافته است. اگرچه به نظر می‌رسد اندازه بسته‌ها نسبت به BM در این ناحیه تا حدودی درشت‌تر باشد اما این درشت شدن چندان محسوس نیست. از طرفی از آنجا که طی جوشکاری دما به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد همزمان با پیشروی فرآیند، رشد دانه‌ها منجر به تشکیل ساختار هم‌محور شده است؛ به گونه‌ای که آن را می‌توان یک تکامل ریزساختاری در اثر تبلور مجدد پیوسته در نظر گرفت (Chen, Nakata, 2009). دلیل ریز دانه بودن نیز این است که جوشکاری همزن اصطکاکی را می‌توان عملاً یک نوع از تغییر شکل پلاستیک شدید در نظر گرفت که یکی از ویژگی‌های شاخص مواد تغییر شکل شدید یافته نیز تولید ساختار ریزدانه است (Shome, 2007).

همانطور که در شکل‌های ۷-ب و ۷-ج مشاهده می‌شود، ناحیه TMAZ ریزساختاری بینابین BM و ناحیه SZ دارد. در مقایسه دو سمت می‌توان گفت که در سمت AS دانه‌ها کشیده‌تر بوده و ابعاد بسته‌ها در این سمت نسبت به سمت RS نسبتاً درشت‌تر است. ناحیه HAZ خارجی (شکل ۷-د) نیز با توجه به افزایش حرارت ورودی و نیز کاهش سرعت سرمایش، انتظار می‌رود نسبت به نمونه قبلی سختی کمتری داشته باشد؛ اما همین ناحیه در مقایسه با سایر نواحی این نمونه میزان فاز سخت‌تر بیشتری دارد.



شکل ۷- نواحی نمونه‌ی جوشکاری شده در سرعت ۶۳۰ rpm

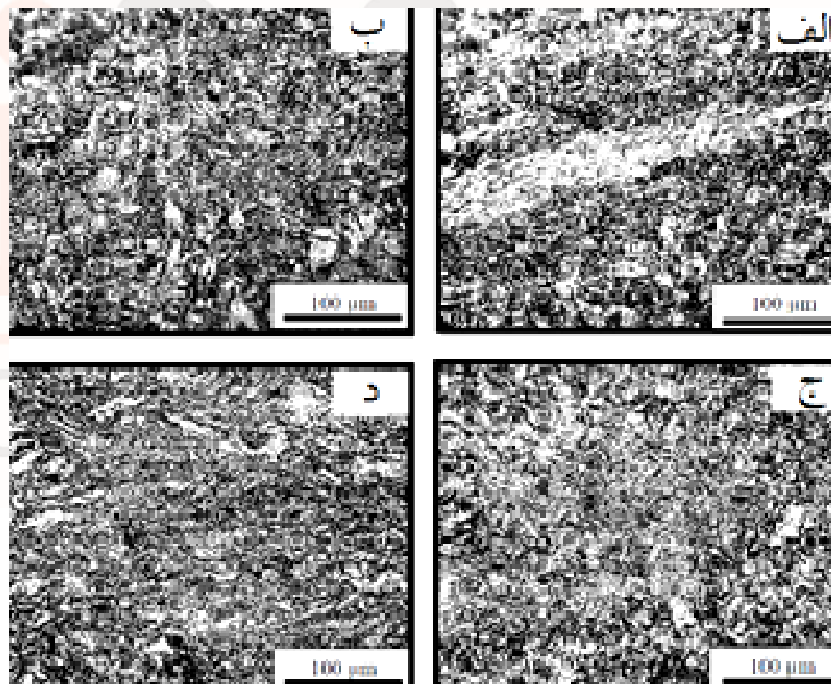
الف) SZ، ب) TMAZ در سمت RS، ج) TMAZ در سمت AS و د) HAZ خارجی

www.iran-mavad.com

مرجع دانلود رایگان مهندسی مواد و متالورژی

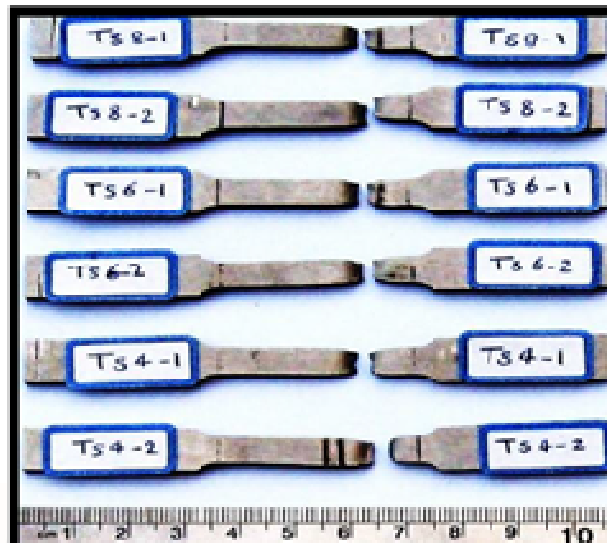
در شکل ۸ نیز تصاویر مربوط به نواحی مختلف نمونه‌ی جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm نشان داده شده است. در شکل ۸-الف ریزساختار ناحیه‌ی SZ نشان شده است. همانطور که انتظار می‌رود با توجه به افزایش سرعت چرخشی ابزار میزان تغییر شکل بیشتر شده و در نتیجه ریزساختاری با بسته‌های ریزتر از فلز پایه حاصل شده است. از طرفی علیرغم افزایش حرارت ورودی و کاهش سرعت سرمایش در این نمونه غالب ریزساختار از مارتنزیت تشکیل شده است که در آن احتمالاً رسوبات مس انحلال یافته‌اند (یا بسیار درشت شده‌اند) و نیز احتمالاً دانسیته نابجایی‌ها کاهش یافته باشد؛ این امر با نتایج بخش خواص مکانیکی و افت سختی مطابقت می‌کند.

عمده تفاوتی که ناحیه‌ی TMAZ این نمونه با نمونه‌های قبلی دارد، کشیدگی کمتر دانه‌ها در سمت AS است. از طرفی بدلیل حرارت ورودی بالا و تغییر شکل زیاد در این نمونه سهم عمده ریزساختار فازهای نرم‌تری نظیر فریت سوزنی می‌باشد که برای بررسی ریزساختار با جزئیات بیشتر نیاز به مطالعات بیشتر با استفاده از TEM می‌باشد.



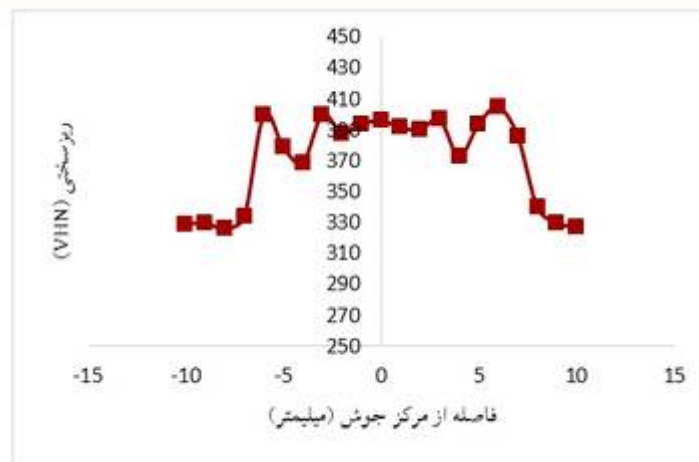
شکل ۸- نواحی نمونه‌ی جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm
(الف) SZ، (ب) TMAZ در سمت RS، (ج) TMAZ در سمت AS و (د) HAZ خارجی

شکل ۹ تصاویر مربوط به نمونه‌های آزمون کشش را پس از شکست نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود شکست تمامی نمونه‌ها از فلز پایه رخ داده است که این امر در نتیجه‌ی ایجاد ریزساختار کار شده در ناحیه جوش توسط فرآیند FSW و افزایش استحکام این ناحیه بوده است.



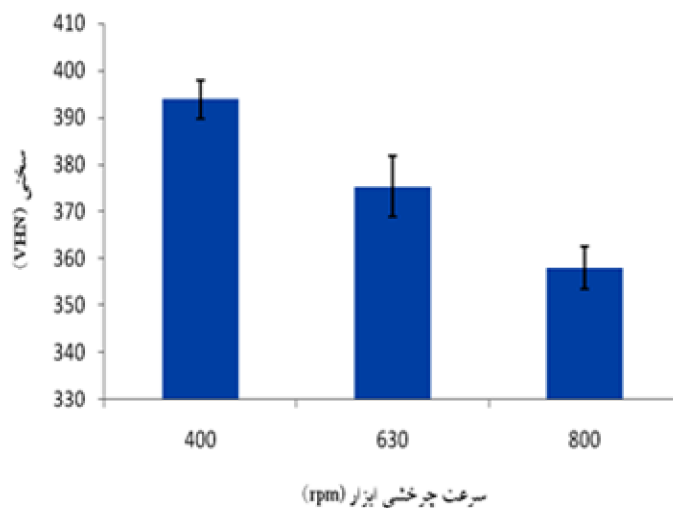
شکل ۹- نمونه‌های آزمون کشش پس از شکست

در شکل ۱۰ پروفیل ریزسختی برای نمونه جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۴۰۰ rpm ارائه شده است. مطابق این نمودار با توجه به سرعت سرمایش بالا در نتیجه پایین بودن حرارت ورودی سختی ناحیه‌ی SZ در نمونه جوش شده با ۴۰۰ rpm بطور میانگین در حد ۳۹۳ ویکرز می‌باشد که نشان از ریزساختار تمام مارتنزیتی این ناحیه داشته و نیز احتمالاً بدلیل پیک دمایی پایین و عدم انحلال کامل و حضور رسوبات مس سختی این نمونه نسبت به دو نمونه دیگر بالاتر است. در دو طرف انتهای جوش ناحیه‌ی TMAZ قرار دارد که طبق نمودار با فاصله گرفتن از سمت جوش به سمت BM سختی در نتیجه کاهش میزان تغییر شکل کاهش یافته است. در مورد ناحیه بین دو مرز سختی افزایش یافته ولی در خود مرز بیرونی کاهش چشمگیری داشته است که نشان از آنیل شدگی این ناحیه دارد.



شکل ۱۰- پروفیل ریزسختی برای نمونه‌ی جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۴۰۰ rpm

در نمودار شکل ۱۱ نیز میانگین ریزسختی مراکز جوش بر حسب سرعت‌های چرخشی آورده شده است؛ همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت چرخشی ابزار بدلیل افزایش پیک دمایی سختی ناحیه‌ی SZ تا ۳۵۰ ویکرز کاهش یافته است که این امر ناشی از بالا رفتن حرارت ورودی و کاهش سرعت سرمایش و احتمالاً انحلال رسوبات در آنها می‌باشد. از طرف دیگر علت این امر می‌تواند در نتیجه از بین رفتن نایبایی‌ها در این ناحیه باشد.



شکل ۱۱- میانگین ریزسختی بر حسب سرعت چرخشی ابزار

نتیجه گیری

در این تحقیق امکان‌سنجی جوشکاری فولاد HSLA-100 به روش همزن اصطکاکی و همچنین ریزساختار و خواص مکانیکی حاصل از آن مورد مطالعه قرار گرفت که با توجه به مشاهدات و بررسی‌ها نتایج زیر بدست آمده است:

۱. جوشکاری فولاد HSLA-100 به روش همزن اصطکاکی امکان‌پذیر می‌باشد بطوریکه در این پژوهش سه خط جوش سالم ایجاد شد.
۲. با توجه به حرارت‌های ورودی کار شده در این پژوهش و نیز نمودار CCT این فولاد ریزساختار ناحیه جوش از مارتنزیت کم کربن تشکیل یافته که با افزایش حرارت ورودی احتمالاً رسوبات مس انحلال یافته‌اند.
۳. شکست نمونه‌های آزمون کشش از فلز پایه بوده که این امر نشان از استحکام بالای ناحیه جوش این فولاد به روش همزن اصطکاکی دارد.
۴. سختی مرکز جوش همه نمونه‌ها بالای ۳۵۰ ویکرز حاصل شده است که با کاهش سرعت چرخشی ابزار و در نتیجه کاهش حرارت ورودی ریزسختی تا نزدیک ۳۹۵ ویکرز افزایش داشته است.

منابع

- E.J. Czyryca, M.G. Vassilaros, (1993), "Advances in low carbon high strength ferrous alloys", Ship materials Engineering Department, research and development report.
- J.A. Gianetio, (1995), "Gas metal-arc & submerged-arc welding of HSLA-100 steel", Metals Technology Laboratories.
- K. Uenishi, Y. Ogata, S. Iwatani, (2007), "Laser cladding of Fe-Cu based alloys on aluminum", Solid State Phenomena, vol. 127, Pp. 331-336.
- Q. Xue, (2003), "Constitutive response of welded HSLA 100 steel", Materials Science and Engineering: A, vol. 354, Pp. 166-179.
- L. Wei, W.N. Tracy, (2012), "Influence of heat input on post weld microstructure and mechanical properties of friction stir welded HSLA-65 steel", Materials Science and Engineering: A.
- M. Shome, (2007), "Effect of heat-input on austenite grain size in the heat-affected zone of HSLA-100 steel", Materials Science and Engineering: A, vol. 445, Pp. 454-460.
- R.S. Mishra, Z.Y. Ma, (2005), "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering: A Reports, vol. 50, Pp. 1-78.
- Y.C. Chen, K. Nakata, (2009), "Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir processed SKD61 tool steel", Materials Characterization, vol. 60, Pp. 1471-1475.