

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ‌نزن دوفازی Gost 5632-72

مجتبی اسمعیل زاده^۱، مرتضی شمعیان^۲، احمد کرمانپور^۳، توحید سعید^۴

^{۱،۲،۳} دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۴ دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند

چکیده

در این مقاله جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی فولاد دوفازی Gost 5632-72 مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. نمونه‌های فولاد مورد نظر به ضخامت 1/5 mm با استفاده از ابزار بسیار سخت از جنس کاربید تنگستن و سرعت چرخش 800 rpm و سرعت خطی 100 mm/min جوشکاری شدند. نتایج حاصل از پراش اشعه ایکس عدم تشکیل فازهای ثانویه و مضر را تصدیق نمود. مشاهدات ریزساختاری نشان داد که دانه‌ها در ناحیه همزده بسیار ریز شده‌اند و اندازه دانه فازهای فریت و آستنیت با توجه به اختلاف در انرژی نقص در چیده شدن آن‌ها متفاوت می‌باشد. اندازه دانه‌های فریت در حدود 6-7 μm و برای آستنیت در حدود 3-4 μm بدست آمد. از سوی دیگر سختی و استحکام این ناحیه نسبت به فلز پایه افزایش یافت. بر اساس نتایج بدست آمده، وقوع تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه همزده برای هر دوفاز موجود در فلز پایه تأیید گردید.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، فولاد زنگ‌نزن دوفازی، تبلورمجدد دینامیکی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد متالورژی - دانشگاه صنعتی اصفهان (m.esmailzadeh@ma.iut.ac.ir).

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان.

۴- استادیار دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

۱- مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ (FSW) یک فرایند اتصال حالت جامد است، یعنی بدون اینکه عمل ذوب انجام شود، صرفاً با فرایند گرم شدن و خمیری شدن لبه‌های قطعه کار اتصال صورت می‌گیرد. شایان ذکر است که این روش نخستین بار در موسسه جوش انگلیس^۲ (TWI) در سال ۱۹۹۱، برای فلز آلومینیم ابداع شد. این فرایند شامل یک ابزار چرخشی غیر مصرفی است که توسط دستگاه به آرامی وارد قطعه کار شده و پس از تولید حرارت کافی در اثر اصطکاک، در طول خط اتصال شروع به حرکت می‌کند [۱].

ریزساختار جوش شامل ناحیه اغتشاشی (SZ)^۳، ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی (TMAZ)^۴ و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)^۵ می‌باشد. تغییر شکل شدید و حرارت ناشی از اصطکاک و تغییر شکل سبب پدیده تبلور مجدد دینامیکی و نهایتاً ریز شدن دانه‌بندی در ناحیه اغتشاشی می‌شود. ناحیه TMAZ در مجاور منطقه اغتشاشی قرار دارد. در این منطقه از جوش، ماده هم دمای نسبتاً بالا و هم تغییر شکل را تجربه می‌کند ولی به دلیل کرنش ناکافی تبلور مجدد در آن به ندرت اتفاق می‌افتد. در ناحیه HAZ نیز ریزساختار و خواص مکانیکی تنها تحت تأثیر حرارت ورودی تغییر می‌کنند. حرارت ورودی پایین در جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی سبب کاهش تغییرات متالورژیکی نامطلوب در ناحیه متأثر از حرارت فولادها شود [۲].

به نظر می‌رسد که حرارت ورودی نسبتاً کم در فرایند اصطکاکی اغتشاشی، سبب تغییرات متالورژیکی کمی در HAZ شود و میزان پیچیدگی و تنش‌های پسماند را نیز کاهش دهد که در جوشکاری اجزای ضخیم به کار رفته در صنایع مختلف کشتی‌سازی و صنایع سنگین بسیار اهمیت دارد. مشکلاتی مانند ترک هیدروژنی، ترک گرم، متصاعد شدن گازهای سمی و ناهمگنی ترکیب شیمیایی هم به علت ماهیت حالت جامد FSP عملاً حذف می‌شود. این مزایا تمایل به استفاده از این فرایند برای فولادها را افزایش داده است [۳]. تاکنون مطالعاتی درباره فولادهای کم و متوسط کربن [۴-۶]، فولادهای نرم [۷]، فولاد آلیاژی کرم‌دار [۸]، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی [۲]، فریتی [۹] و دوفازی [۱۰، ۱۱] و همچنین فولادهای منگنزدار با فرایند اصطکاکی اغتشاشی انجام گرفته است. از جمله مهمترین تحقیقات در مورد فولاد دوفازی را می‌توان کار ساتو^۶ و همکارانش در مورد فولادهای سوپر دوفازی SAF۲۵۰۷ اشاره نمود. در این تحقیق ریزساختار و خواص مکانیکی جوش مورد نظر بررسی شده و به این نتیجه رسیدند که در مورد فولاد سوپر دوفازی ریزساختار و بافت حاصل از فرایند جوش مشابه بافت تغییر شکل بوده و خواص مکانیکی به دلیل ریزتر شدن ریزساختار بهبود پیدا کرده است. از بررسی اندازه و نوع مرزهای حاصل به این نتیجه رسیدند که نوع تبلور مجدد غالب در هر دو فاز آستنیت و فریت از نوع دینامیکی پیوسته بوده است [۱۱]. در ادامه این تحقیقات در سال ۲۰۰۸ سعید^۷ و همکارانش [۱۰] فولاد دوفازی SAF۲۲۰۵ را تحت پارامترهای مختلف جوشکاری نمودند. آن‌ها نیز در این تحقیق به نتایج مشابه با کار ساتو دست یافتند با این تفاوت که میزان بهبود خواص مکانیکی در مورد فولاد دوفازی SAF۲۲۰۵ چشمگیرتر بود. فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ضعیف^۸ (LDSSs) گروهی جدیدی از فولادهای دوفازی محسوب می‌گردند. این فولادها با توجه به ترکیب

1- Friction Stir Welding

2- The Welding Institute

3- Stir Zone

4- Thermo-Mechanical Affected Zone

5- Heat Affected Zone

6- Sato

7- Saeid

8- Lean Duplex Stainless Steel

شیمیایی و خواص فیزیکی و مکانیکی، نسبت به سایر فولادهای دوفازی ارزان تر بوده و از طرفی نسبت به فولادهای آستنیتی دارای خواص مکانیکی و خوردگی بهتری هستند. تحقیقات انجام شده نشان می دهد که در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای گروه های مختلف فولادها تحقیقات زیادی صورت گرفته است، اما در مورد جوشکاری فولادهای دوفازی جدید پژوهش جامع و کاملی انجام نشده است. لذا در این تحقیق جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد دوفازی جدید Gost 5632-72 که محصول کشور روسیه می باشد، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، از ورق های فولاد زنگ نزن دوفازی آستنیت- فریت Gost 5632-72 تجاری به ضخامت ۱/۵ mm استفاده شد. سطح ورق ها قبل از جوشکاری با استن تمیز گردید. فرآیند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی با دستگاه فرز NC سنگین بر مقطع جوش اعمال شد. جهت انجام FSW بر روی نمونه های فولادی، از ابزار کاربید تنگستنی استفاده شد، که قطر پین و شانه آن متناسب با پهنا و ضخامت جوش و به ترتیب ۳ mm و ۱۶ mm بود. ارتفاع پین با توجه به ضخامت ورق، ۱/۲ mm در نظر گرفته شد. در تمامی نمونه ها، ابزار در حین جوشکاری، نسبت به خط عمود بر راستای جوشکاری زاویه ۳۰° داشت و تحت گاز محافظ آرگون با دبی ۱۸ lit/min صورت گرفت. جهت اندازه گیری دما از ترموکوپل نوع K در مرکز نمونه جوشکاری استفاده شد.

برای تشخیص فاز مضر سیگما (σ) از پراش پرتو ایکس کمک گرفته شد. برای ظاهر ساختن ریزساختار از محلول حکاکی بر اها^۱ با ترکیب $K_2S_2O_5 + 20 \text{ cc (HCl)} + 80 \text{ cc (H}_2\text{O)}$ استفاده و بررسی ها توسط میکروسکوپ نوری انجام شد. به جهت بررسی بیشتر مقاطع جوش با میکروسکوپ الکترونی روبشی از فرایند الکترو اچ در محلول ۶۵٪ اسید نیتریک با ولتاژ اعمالی حدود ۱۵ ولت و مدت زمان ۲۰ ثانیه استفاده گردید. به کمک این روش ها و به کمک نرم افزار پیشرفته آنالیز تصویر ClemexVisionTM متوسط اندازه دانه ها با استانداردهای مختلف اندازه گیری دانه بدست آمد.

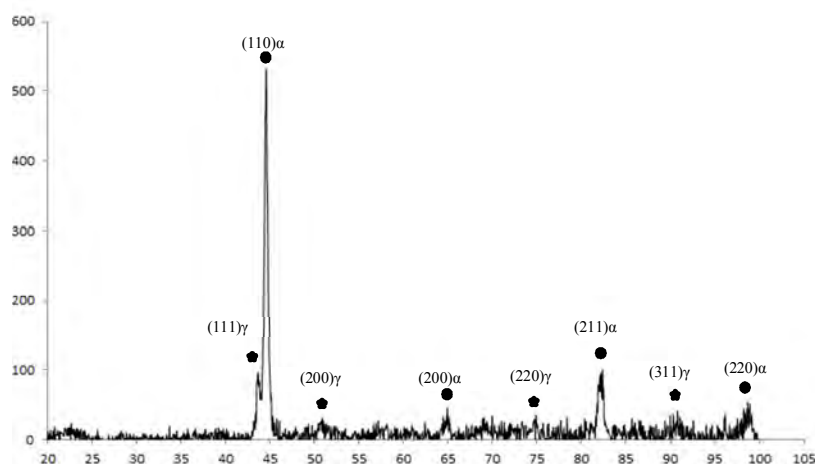
خواص مکانیکی به وسیله آزمون سختی ویکرز و آزمون کشش نمونه های عرضی جوش مورد اندازه گیری قرار گرفت. لازم به ذکر است که بار ۳۰۰ g و مدت زمان ۱۰ ثانیه در طی آزمون سختی اعمال شد. همچنین، نمونه های کشش از مقطع عرضی جوش ها مطابق استاندارد ASTM- E8 تهیه شدند و با سرعت حرکت فک ۱ mm/min تحت آزمون قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ ریزساختار

پس از انجام جوشکاری چند نمونه برای بررسی تشکیل فاز مضر آماده سازی شده و تحت پراش اشعه X قرار گرفتند. الگوی بدست آمده از پراش اشعه X (شکل ۱)، نشان می‌دهد که فاز مضر تشکیل نشده و یا اینکه میزان آن کمتر از ۵٪ است. البته نتایج سیکل حرارتی و دمای ایجاد شده در حین جوش و همچنین سرعت سرد شدن آن‌ها عدم تشکیل فاز مضر σ را تایید می‌کنند. سیکل حرارتی بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که ماکزیمم دمای ایجاد شده در حدود 800°C بوده و از یک سو سرعت سرد شدن در بازه 800°C تا 600°C در حدود $54/5^{\circ}\text{C/s}$ محاسبه شده، از سوی دیگر فاز سیگما در بازه 950°C تا 650°C پس از نگه داشتن برای مدت زمان طولانی، تشکیل می‌شود. بنابراین نتیجه بدست آمده در بالا، تا حدود زیادی مورد قبول می‌باشد.

جهت بررسی ریزساختار شکل ۲ نمای کلی از مقطع جوش را نشان می‌دهد. در این شکل جانی که جهت سرعت خطی و مماس بر سرعت چرخشی در یک سو قرار می‌گیرند را قسمت پیشرونده^۱ (AS) و جانی دیگر را که سرعت خطی و مماس بر سرعت چرخشی خلاف جهت هم قرار می‌گیرند را قسمت پسرونده^۲ (RS) نامیده شده است. همانگونه از تصویر مشخص است در سمت پیشرونده جوش بر خلاف سمت پسرونده، مرز مشخصی ایجاد شده است. نتایج شبیه‌سازی شده نیز علت این پدیده را سیلان ماده در حین جوشکاری بیان می‌کند [۱۲]. چرا که در سمت پیشرونده میزان تغییر شکل اعمالی بیشتر از طرف دیگر بوده و سویی دیگر در حین جوشکاری متده از سمت پیشرونده کنده می‌شود و به سمت پسرونده هدایت می‌گردد. نتایج کار سعید و همکارانش [۱۰] نیز این موضوع را تایید می‌کند.



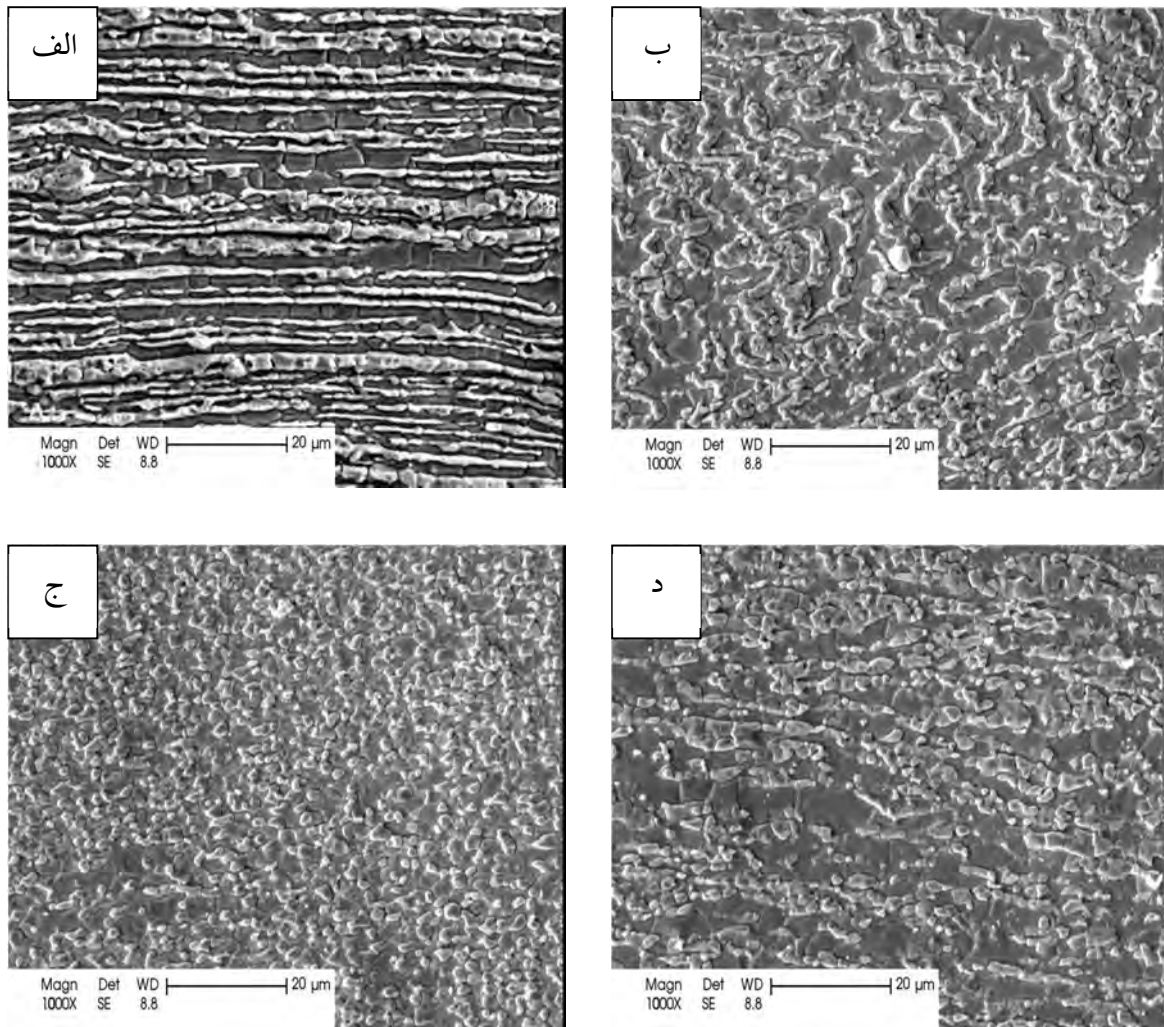
شکل ۱- الگوی پراش اشعه X نمونه جوشکاری شده در 800 rpm و 100 mm/min .

1- Advancing side
2- Retreating Side



شکل ۲- نمای کلی از مقطع FSW شده فولاد دوفازی Gost 5632-72.

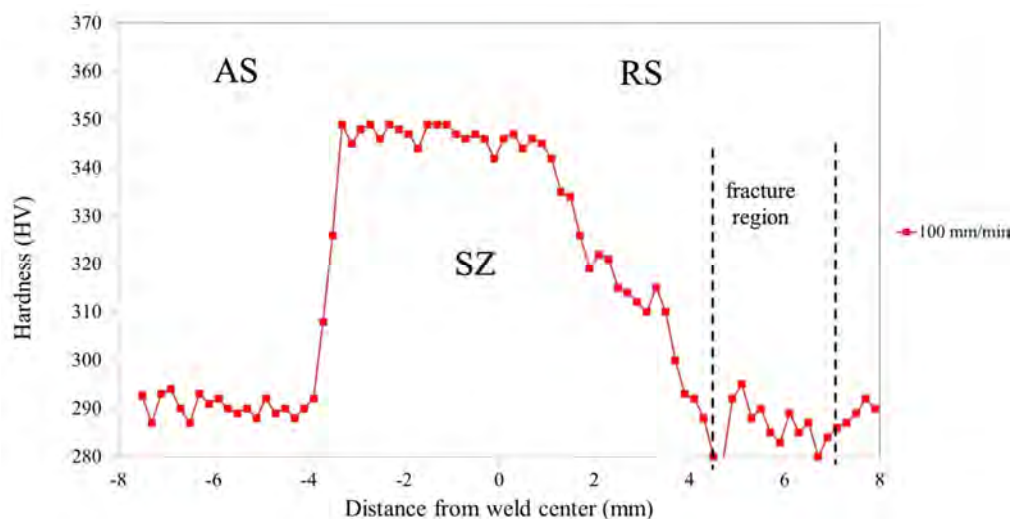
بررسی دقیق تر ریزساختار بدست آمده نشان می دهد که منطقه متأثر از حرارت (HAZ) در این نمونه های جوشکاری شده بصورت واضح و مشخصی تشکیل نشده است. البته مشابه این نتیجه در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد دوفازی SAF2205 [۱۰] نیز مشاهده شده است. جهت تحلیل دقیق تر مناطق مختلف جوش، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تهیه شد. در شکل ۳ این تصاویر نشان داده شده است. شکل ۳- الف ریزساختار نورد شده فلز پایه را نشان می دهد که براساس آن لایه های فریت و آستنیت با یک مورفولوژی تقریباً مشابه (کشیده شده) در کنار هم قرار گرفته اند. براساس نرم افزار دقیق Clemex درصد فازهای فریت و آستنیت به ترتیب 53 ± 2 و 47 ± 2 محاسبه شده است. پس از این منطقه، در تصویر ۳- ب منطقه TMAZ از سمت AS نشان می دهد که در این منطقه مورفولوژی فلز پایه در اثر اعمال فرایند تغییر شکل نسبت به فلز پایه کاملاً تغییر کرده و با توجه به دانه بندی جدید فازها در این منطقه، احتمال پدیده تبلور مجدد بسیار زیاد است. البته شایان ذکر است که این تبلور مجدد در بعضی از نواحی این منطقه زیاد و در بعضی قسمت ها کمتر است که نشان از تبلور مجدد جزئی در این منطقه است. تصویر ۳- ج نیز دانه بندی ریزساختار را در ناحیه اغتشاش (SZ) را نشان می دهد. ریزساختار این منطقه ماکزیمم میزان تغییر شکل و حرارت را بصورت همزمان متحمل می شود، به همین دلیل شرایط جهت رخداد پدیده تبلور مجدد دینامیکی در این منطقه بسیار زیاد است [۱۱، ۱۰، ۲]. ریزساختار این منطقه تقریباً کروی بوده و اندازه دانه بدست آمده در این منطقه برای دوفاز فریت و آستنیت به ترتیب برابر با $6-7 \mu m$ و $3-4 \mu m$ محاسبه شده است. نسبت فاز آستنیت و فریت در این منطقه مشابه نسبت آن ها در فلز پایه می باشد. ریز ساختار منطقه SZ مشابه ریزساختار حاصل از فرایند تغییر شکل گرم این آلیاژها، کروی و ریز شده است. بنابراین می توان از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان یک فرایند بهبود ریزساختار در سطح برای این آلیاژها نام برد؛ چرا که از یک سو ریزساختار ریز، خواص مکانیکی را بهبود می بخشد و از طرف دیگر با نسبت فازهای آستنیت به فریت تقریباً دست نخورده باقی می ماند و خواص مکانیکی و خوردگی را بصورت همزمان دارا خواهند بود. با توجه به تصاویر به دست آمده از مناطق مختلف و درشت بودن اندازه دانه فریت در آن ها به نظر می رسد که کمتر بودن انرژی نقص در چیده شدن فاز فریت باعث شده تا که این فاز سریعتر از فاز آستنیت وارد مرحله درشت شدن دانه شود و به همین دلیل اندازه دانه فریت در قسمت های مختلف جوش بزرگتر از دانه های آستنیت باشد.



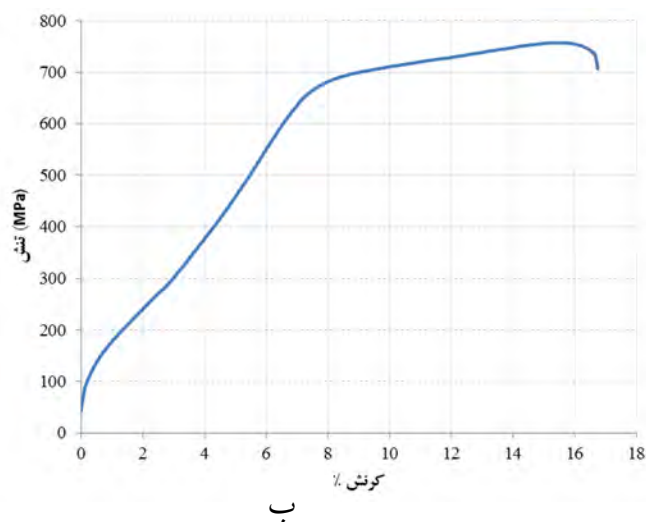
شکل ۳. تصاویر SEM از مقطع نمونه جوشکاری شده (الف) فلز پایه (ب) سمت پیشرونده جوش (ج) منطقه اغتشاش (د) سمت پسرونده جوش.

۲-۳ خواص مکانیکی

در شکل ۴ نمودار سختی از مقطع جوش را برای آلیاژ Gost 5632-72 را نشان می‌دهد. پس از اعمال فرآیند اغتشاشی اصطکاکی میزان سختی، با حرکت از فلز پایه به سمت مرکز جوش افزایش می‌یابد و تا حدود ۳۵۰ ویکرز نیز می‌رسد. که ناشی از کاهش اندازه دانه و همچنین افزایش دانسیته نابجایی‌ها می‌باشد. افزایش ناگهانی سختی در سمت پیشرونده جوش تاییدی بر مرز مشخص این قسمت می‌باشد؛ که در قسمت قبلی به آن اشاره شد. اما در سمت پسرونده این شیب ملایم‌تر است. با توجه به شیب تند این نمودار انتظار می‌رود تا نمونه‌های کشش از این منطقه دچار شکست شوند اما آزمایش کشش نمونه‌ها نشان داد که نمونه‌ها از سمت پسرونده جوش دچار شکست شدند (شکل ۵-الف). تاکنون دلایل محکم و متقنی بر علت این پدیده ارائه نشده است، اما آنچه از مشاهدات این تحقیق برمی‌آید، شاید یکی از دلایل عمده این پدیده درشت شدن اندازه دانه فریت‌های این قسمت جوش باشند که باعث شکست این نمونه‌ها گردیده‌اند. نمودار تنش - کرنش برای مقاطع جوش در شکل ۵-ب نشان داده شده است. بررسی مقاطع شکست نمونه‌های جوشکاری وجود شکست نرم در این منطقه را تایید می‌کند. علت اصلی افزایش سختی و استحکام و از سوی دیگر انعطاف‌پذیری خوب این نوع جوش به ریز شدن دانه در مناطق مختلف جوش برمی‌گردد.



شكل ۴. نمودار سختي و تغييرات سختي در اطراف محل شكست نمونه هاي كشش از مقطع عرضي نمونه هاي جوشكاري شده در ۸۰۰ rpm و ۱۰۰ mm/min.



شكل ۵. الف) نمونه كشش پس از آزمايش كشش و محل شكست آن ب) نمودار تنش - کرنش برای نمونه هاي جوشكاري شده.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، ریزساختار و خواص مکانیکی حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق فولاد زنگ‌نزن دوفازی Gost 5632-72، مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده، موارد زیر استحصال می‌شود:

- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر به کاهش اندازه دانه در ناحیه جوش شده و این کاهش اندازه نتیجه وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی در این منطقه می‌باشد.
- نسبت فازهای آستنیت و فریت همگن و به نسبت ۵۰-۵۰ نزدیک‌تر شده است.
- سختی ناحیه اغتشاش افزایش چشم‌گیری را نشان می‌دهد. البته سختی ناحیه TMAZ نیز بیش از فلز پایه بوده اما این میزان کمتر از سختی ناحیه اغتشاش می‌باشد که دلیل این پدیده نیز احتمالاً به اندازه دانه و دانسیته نابجایی‌ها مربوط می‌گردد.
- خواص مکانیکی منطقه جوشکاری شده با فرایند اصطکاکی اغتشاشی نسبت به فلز پایه افزایش یافته به گونه‌ای که نمونه‌های کشش از منطقه فلز پایه و نزدیک به سمت پسرونده (RS) شکسته شده‌اند.

۵- منابع و مراجع

- [1] M. Ericsson and M.R. Sandstro, "Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG", International Journal of Fatigue, Vol. 25, pp. 1379-1387, 2003.
- [2] R.S. Mishra and Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R, Vol 50, pp. 1-78, 2005.
- [3] R.S. Mishra and M. W. Mahoney, "Friction Stir Welding and Processing", ASM International, USA, 2007.
- [4] P.J. Konkol, J.A. Mathers, R. Johnson and J.R. Pickens, "Friction stir welding of HSLA-65 steel for shipbuilding", Proceedings of third international Symposium on friction stir welding, Kobe, Japan, September 2001.
- [5] A. P. Reynolds, W. Tang, , M. Posada and J. DeLoach, "Friction stir welding of DH36 steel", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 8, pp. 455-460, 2003.
- [6] H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, , K. Nakata and K. Nogi, "Friction stir welding of carbon steels", Materials Science and Engineering A, Vol. 429, pp. 50-57, 2006.
- [7] Y. D. Chung, H. Fujii, R. Ueji and N. Tsuji, "Friction stir welding of high carbon steel with excellent toughness and ductility", Scripta Materialia, Vol. 63, pp. 223-226, 2010.
- [8] A. P. Reynolds, Wei. Tang, T. Gnaupel-Herold and H. Prask, "Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds", Scripta Materialia, Vol. 48, pp. 1289-1294, 2003.
- [9] Ch. Hoon-Hwe, N. H. Heung, H. Sung-Tae, P. Jong-Hwan, K. Yong-Jai, K. Seok-Hyun and J. S. Russell, "Microstructural analysis of friction stir welded ferritic stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 528, pp. 2889-2894, 2010.
- [10] T. Saeid, A. Abdollah-zadeh, H. Assadi and F. Malek Ghaini, "Effect of friction stir welding speed on the microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol 496, pp. 262-268, 2008.
- [11] Y. S. Sato, T. W. Nelson, C. J. Sterling, R. J. Steel and C. O. Pettersson, "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded SAF 2507 super duplex stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 397, pp. 376-384, 2005.
- [12] Seth Jason Norton, MS.c. Theses, Ohio State University, 2006.