

تأثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی

فلزجوش ایجاد شده توسط GMAW بر St-37

حامد ابراهیم‌نژاد رودپشتی

مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

مسعود مصلائی پور

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت مقاله ۹۵/۰۳/۱۹ - پذیرش مقاله: ۹۶/۰۲/۲۷)

چکیده

در این پژوهش بمنظور اصلاح ساختار و خواص مکانیکی فلزجوش حاصل از فرآیند قوس فلز-گاز (GMAW) بر فلز پایه St-37، از فرآیند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی (FSP) استفاده شد. مطالعات ساختاری فلزجوش نشان داد که ساختار ریختگی و زمخت فلز جوش ایجاد شده توسط فرآیند GMAW، با اعمال عملیات FSP به یک ساختار ظریف و یکنواخت تغییر می‌نماید. توضیح آن‌که با اعمال FSP بر فلزجوش، اندازه دانه این منطقه تا حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد. تغییرات دانه‌بندی مذکور را می‌توان به فعال شدن پدیده تبلور مجدد بواسطه تغییر فرم شدید همراه با افزایش دما حین عملیات FSP نسبت داد. ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌ها آشکار نمود که با اعمال عملیات FSP بر فلزجوش GMAW، پروفیل سختی منطقه جوشکاری شده یکنواخت‌تر و درصد ازدیاد طول نسبی فلزجوش FSP شده نسبت به فلزجوش GMAW بهبود می‌یابد که می‌توان به یکنواختی و ریزدانه‌ی ساختار بعد از اعمال فرآیند FSP نسبت داد. واژه‌های کلیدی: FSP، St-37، GMAW، ریزساختار، سختی، استحکام.

Effect of Friction Stir Processing on the Microstructural and Mechanical Properties of St-37GMA-Weldmetal

Hamed Ebrahimnezhad

Advance Materials Rsearch Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad. Iran

Masoud Mosallae Pour

Department Mining & Metallurgical Engineering, Yazd University

(Received 8 June 2016, accepted 17 May 2017)

Abstract

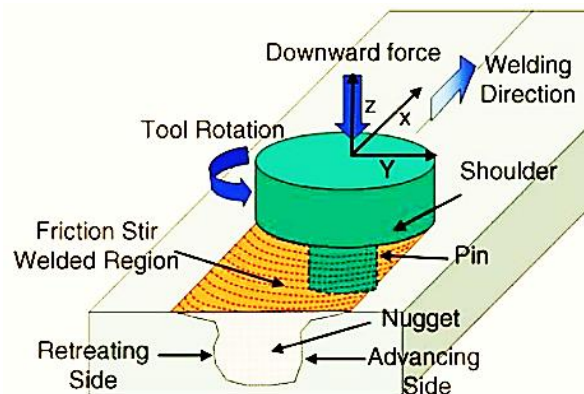
In this research, friction stir processing (FSP) was carried out to modify the microstructure and mechanical properties of gas metal arc (GMA) welded St37 base metal. Microstructural studies revealed that with applying FSP on the GMA-weld metalsignificant microstructural modification occurred and as-cast coarsegrains of weld metal modify to the fine grain, i.e. a reduction of weld metal grain size about 50% occur after FSP. This variation of grain sizes could be contributed to the recrystallization inFS-processed zone, i.e. high temperature accompany with significant deformation during FSP resulted in recrystallization and formation of fire grains in weld metal. Evaluation of mechanical properties indicated that applying FSP on the GMA-weld metal caused increasing ductility and uniform hardness profile of modified specimens that was in harmony with microstructural results.

Keywords: FSP, St-37, GMAW, Microstructure, Hardness, Strength.

E-mail of Corresponding author: Mosal@Yazd.ac.ir.

مقدمه

فرآیند فراوری اصطکاکی اغتشاشی (FSP^۱) یک فرآیند منتهج از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که توسط میشر و همکاران [۱] بمنظور اصلاح خصوصیات سطحی آلومینیوم ابداع شد. در فرآیند FSP، حرکت چرخشی یک ابزار غیر مصرفی در موضع مورد نظر موجب ایجاد گرمای موضعی (به دلیل اصطکاک بین پین ابزار و فلز پایه) و همچنین تغییر فرم پلاستیک شدید در موضع مذکور می‌شود (شکل ۱). تغییر فرم شدید به همراه دمای بالای ایجادشده در موضع حرکت ابزار موجب وقوع تبلور مجدد و توسعه ساختار ظریف در سطح مورد نظر می‌شود [۷-۲].



شکل ۱۰. تصویر شماتیکی از فرآیند [FSP/FSW].

انجماد است، تا به این ترتیب بهبود خواص مکانیکی برای قطعات حاصل شود [۱۴].

فرآیند جوشکاری قوس فلز-گاز (GMAW^۲) به دلیل برخورداری از راندمان تولید بالا، قابلیت اتوماسیون، کیفیت بالای جوش و... مورد توجه صنایع متعددی از جمله صنعت خودروسازی واقع شده است. در مقابل حرارت ورودی بالا و مشکلات مربوط به ذوب و انجماد فلزجوش حین جوشکاری ذوبی موجب ایجاد تغییرات ساختاری شدید و توسعه تنش پسماند محسوس در نواحی جوشکاری شده توسط فرآیندهای جوشکاری قوسی می‌شود [۱۵]. بدلیل ماهیت فشاری و اصلاح ساختاری ایجادشده حین FSP، می‌توان انتظار داشت که با اعمال این فرآیند بر فلز جوش ایجاد شده توسط فرآیند GMAW، اصلاح ساختار و بهبود خصوصیات فلز جوش ایجادشده توسط فرآیند ذوبی صورت پذیرد [۱۶].

در این پژوهش برخلاف تحقیقات متداول بمنظور اصلاح و بهبود خصوصیات فلزجوش راسب شده توسط فرآیند GMAW از عملیات FSP استفاده شد و تأثیر عملیات FSP بر تغییرات ساختاری و مکانیکی منطقه جوشکاری شده توسط فرآیند مورد مطالعه و پژوهش واقع می‌شود.

مواد و روش تحقیق

فلز پایه

در این تحقیق از صفحات فولاد ساده کربنی St-۳۷ با ضخامت ۱/۵ mm بعنوان زیرلایه استفاده شده است. آنالیز ترکیب شیمیایی صفحات دریافتی توسط روش اسپکتروسکوپی نشر نوری با استفاده از تکنیک کوانتومتری تعیین شد (جدول ۱).

جدول ۱. ترکیب شیمیایی صفحات فولاد دریافتی (wt.%).

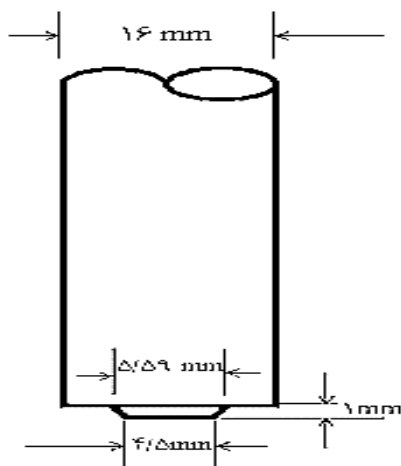
مشکلات تکنیکی همراه با اعمال عملیات FSP بر آلیاژهای با نقطه ذوب بالا از قبیل فرسایش شدید ابزار و غیره موجب عدم گسترش این فرآیند در مورد آلیاژهای کبالت، فولادها و موارد مشابه شده است [۸-۱۳].

ساختار حاصل از انجماد فلزات عمدتاً از نوع دندریتی با مقادیر بالای جدایش عنصری است که در نتیجه باعث کاهش خواص مکانیکی قطعات می‌شود، لذا یکی از مباحث مورد توجه محققین تغییر ماهیت انجماد مذاب و در نتیجه کاهش میزان جدایش عناصر آلیاژی در هنگام

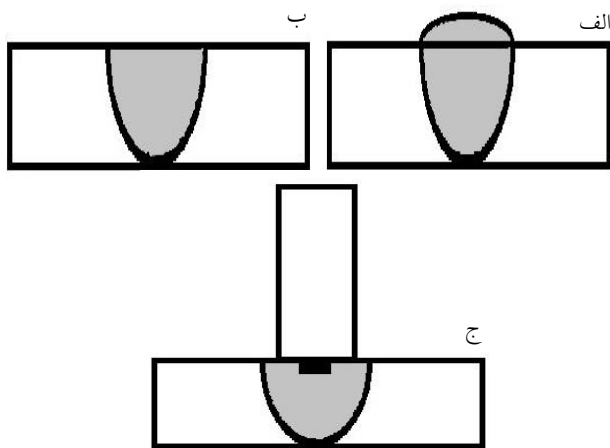
^۲ Gas Metal Arc Welding

^۱ Friction Stir Processing

مخروط ناقص از جنس کاربید تنگستن-کبالت استفاده شد (شکل ۲). عملیات FSP با استفاده از دستگاه فرز NC مدل funk-f و زاویه ابزار با سطح قطعه کار 30° ، سرعت پیشروی 14 mm/min و با سرعت چرخشی 1000 rpm انجام شد. همچنین شماتیک مربوط به انجام روند تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲. شماتیک ابزار مورد استفاده در این پژوهش.



شکل ۳. شماتیک نمونه‌ها در وضعیت (الف) جوشکاری شده، (ب) سنگ زده شده، (ج) اعمال عملیات FSP بر جوش.

Cu	N	S	P	MN	C	Fe	
۰/۶	۰/۰۱۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۱/۵	۰/۱۹	Base	استاندارد St۳۷
۰/۰۵	-	۰/۰۲	۰/۰۱۳	۰/۵	۰/۱۶	Base	صفحات دریافتی

جوشکاری قوس فلز-گاز (GMAW) تست کوپن‌های مورد نظر با ابعاد $250 \times 125 \text{ mm}^2$ در جهت نورد از صفحات دریافتی برش زده و بعد از تمییزکاری سطحی (بدون لبه‌سازی) در وضعیت تخت در یک پاس جوشکاری GMAW با استفاده از دستگاه جوش شرکت راد الکتریک جوشکاری شدند. جزییات فرآیند GMAW در جدول ۲ آورده شده است. از سیم جوش ER70S-6 با قطر 0.8 mm و ترکیب شیمیایی ارایه شده در جدول ۳ برای جوشکاری نمونه‌ها استفاده شد [۱۷].

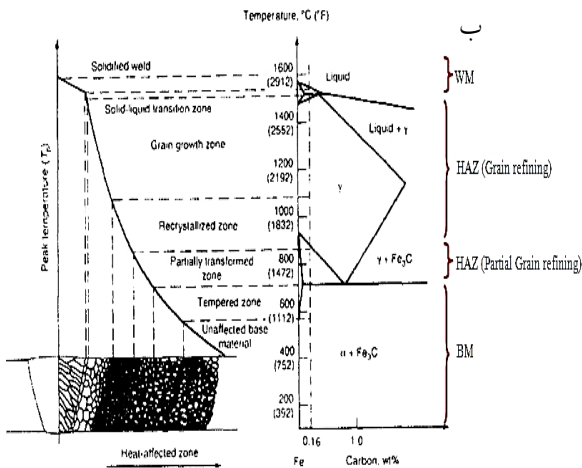
جدول ۲. جزییات جوشکاری GMAW.

گاز محافظ	سرعت جوشکاری (cm/min)	ولتاژ (V)	جریان (A)	سرعت تغذیه سیم (m/min)	حرارت ورودی (kJ/mm)
CO ₂	۱۵	22 ± 2	180 ± 20	۵	$1/2 \pm 0/86$

جدول ۳. ترکیب شیمیایی سیمجوش GMAW (wt.%).

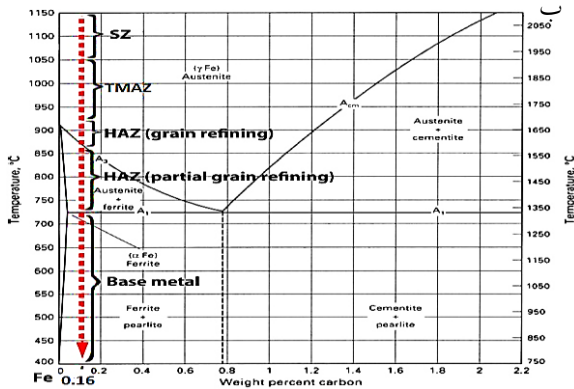
C: ۰/۰۹	MN: ۱/۴۷	Si: ۰/۰۱۴	P: ۰/۰۱۴
Cu: ۰/۰۶	Ni: ۰/۰۲	Cr: ۰/۰۲	S: ۰/۰۱۴

فرآیند FSP بمنظور اصلاح خصوصیات ساختاری و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی فلزجوش ایجاد شده توسط فرآیند GMAW از فرآیند FSP استفاده شد. سطح فوقانی فلزجوش توسط دستگاه ساب، سنگ زده شد تا ضخامت نمونه‌های جوشکاری شده مشابه با ضخامت صفحات دریافتی ($1/5 \text{ mm}$) شد و در ادامه مورد عملیات FSP واقع شد. برای اعمال FSP از ابزار استوانه‌ای شکل با بین



شکل ۴. الف) ریزساختار ناحیه جوش GMAW، ب) نمودار آهن - کربن همراه با محدوده دمایی نواحی مختلف جوش [۱۹].

الف



شکل ۵. الف) ریزساختار نمونه FSP شده، ب) نمودار آهن-کربن همراه با محدوده دمایی ایجاد شده در مناطق مختلف موضع FSP. SZ، TMAZ، HAZ به ترتیب معرف منطقه اغتشاشی، منطقه متأثر از کارمکانیکی و حرارت و منطقه متأثر از حرارت است [۱۹].

هرچند عملیات جوشکاری یک فرآیند غیرتعادلی است، اما از دیاگرام تعادلی می‌توان روند تغییرات ریزساختاری موضع اتصال را مورد تحلیل قرار داد.

مطالعات ساختاری

بمنظور مطالعه تاثیر عملیات FSP بر ساختار منطقه جوش، نمونه‌های جوشکاری شده قبل و بعد از اعمال FSP در ابعاد $10 \times 20 \text{ mm}^2$ در راستای عمود بر موضع جوش برش و مطابق با اصول استاندارد متالوگرافی آماده سازی شدند. در ادامه نمونه‌ها توسط محلول کلوئیدی آلومینا $0.4 \mu\text{m}$ پولیش و با استفاده از اچانت نایتال ۲٪ ($2 \text{ ml HNO}_3 + 98 \text{ ml CH}_3\text{OH}$) به مدت ۱۰ ثانیه حکاکی شیمیایی و سپس مورد مطالعات ریزساختاری نوری واقع شدند. اندازه دانه و مقدار فازها توسط نرم‌افزار آنالیزگر تصویر clemx مورد بررسی واقع شد. مطالعات ریزساختاری دقیق‌تر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA3-TESCAN انجام شد.

آزمون سختی‌سنجی

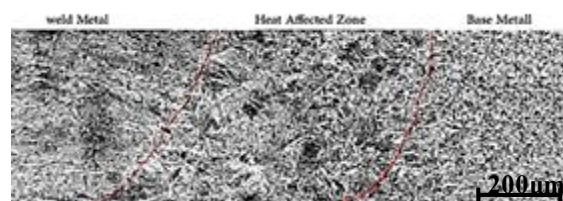
سختی فلزجوش در دو وضعیت قبل و بعد از اعمال FSP با استفاده از دستگاه سختی‌سنجی کوپا پژوهش تحت بار 300 gf و زمان 10 s به فاصله ۱ میلی‌متر از سطح فوقانی نمونه‌ها بررسی شد.

نتایج و بحث

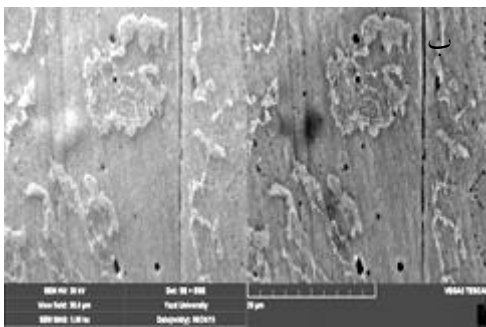
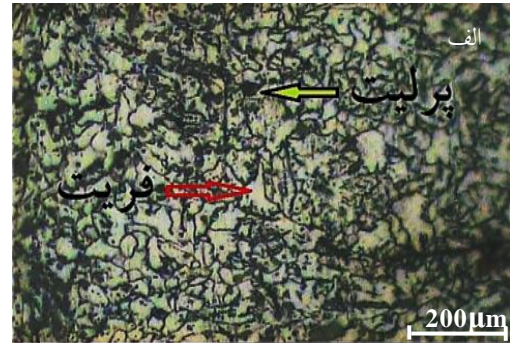
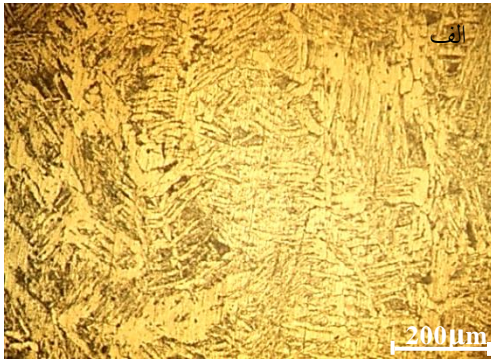
مطالعات ریزساختاری

در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب ریزساختار موضع جوشکاری قبل و بعد از اصلاح توسط فرآیند FSP، همراه دیاگرام تعادلی Fe-C و محدوده تغییرات دمایی در مناطق مختلف اطراف موضع اتصال ارایه شده است [۱۸].

الف



الف) ناحیه فلز پایه (BM^1). ریزساختار فلز پایه شامل دانه‌های هم‌محور فریت با اندازه دانه حدود $15 \pm 1 \mu m$ و کلونی‌های پرلیت (مناطق تیره رنگ) تشکیل شده در محل برخورد مزرده‌های فریت است.



شکل ۷. ریزساختار فلزجوش. الف) با استفاده از میکروسکوپ نوری، ب) با استفاده از SEM در مدالکترون برگشتی.

شکل ۶. ساختار فلز پایه. الف) با استفاده از میکروسکوپ نوری، ب) با استفاده از SEM در مدالکترون برگشتی.

ب-۲) HAZ در نمونه جوشکاری شده. همانگونه که در شکل ۸ نشان داده شده است. HAZ در نمونه‌های GMAW شده دارای دو زیر منطقه: الف) منطقه متأثر از حرارت درشت دانه (CG-HAZ) با اندازه دانه متوسط $20 \pm 2 \mu m$ و ب) منطقه متأثر از حرارت ریز دانه (FG-HAZ) با اندازه دانه متوسط $3 \pm 1 \mu m$ است. علت تشکیل این ریزمنطقه‌های مختلف در HAZ را می‌توان به کاهش حرارت ورودی با افزایش فاصله از درز اتصال نسبت داد. توضیح آن‌که در CG-HAZ حداکثر دمای ایجاد شده بیشتر از $1150^\circ C$ است که موجب فعال شدن نفوذ اتمی و در نتیجه رشد دانه می‌شود. در مقابل در FG-HAZ حداکثر دمای ایجاد شده کمتر از $850^\circ C$ بوده که موجب استحاله تبلور مجدد و ایجاد زیرمنطقه ریزدانه در این قسمت از نمونه می‌شود [۲۱ و ۲۲]. از

ب) ریزساختار نواحی مختلف نمونه جوشکاری شده ب-۱) فلز جوش (WM). حرارت ورودی بالای جوشکاری موجب تشکیل فاز مذاب و حوضچه جوش در موضع اتصال GMAW می‌شود. در ادامه انجماد حوضچه جوش با مکانیزم رشد اپیتکسیال شروع و با مکانیزم رقابتی دنبال می‌شود [۲۰]. فلزجوش حاصله در این پژوهش متشکل از ساختار نسبتاً درشتی از فریت با مورفولوژی عمدتاً ویدمن اشتاتن است. (شکل ۷)

³ Base Metal

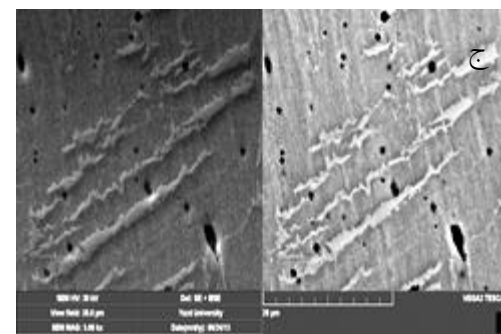
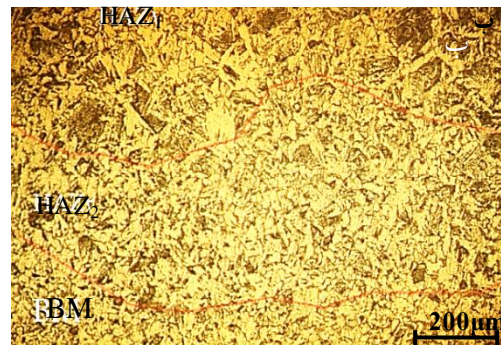
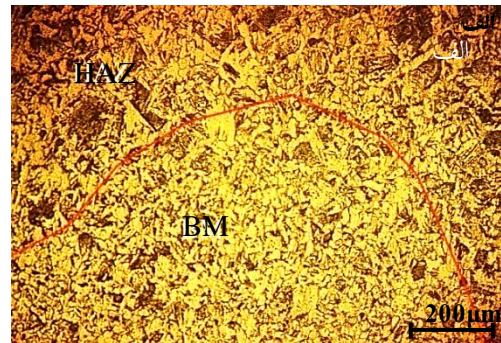
آستینیتی می‌شود. نرخ کرنش در SZ حین فرآیند FSW/FSP در حدود $10^{-2} s^{-1}$ گزارش شده است [۲۳]. بنابراین به دلیل کرنش و دمای بالای ایجاد شده در SZ، این منطقه دستخوش تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته می‌شود که به ایجاد دانه‌های ریز آستینیتی منجر می‌شود [۲۴ و ۲۵]. در ادامه به دلیل وقوع استحاله‌های آلوتروپیک حین سرد شدن ساختار ظریف با اندازه دانه حدود $5 \pm 1 \mu m$ در SZ ایجاد می‌شود.

ج-۲) ناحیه متأثر از حرارت و کارمکانیکی (TMAZ) در نمونه‌های FSP شده TMAZ در بین مناطق HAZ و SZ واقع شده و دارای ساختاری نسبتاً متفاوت از این دو ناحیه است (شکل ۹ الف). اندازه میانگین دانه‌ها در این ناحیه $8 \pm 2 \mu m$ اندازه‌گیری شد. کاهش اندازه دانه در TMAZ نسبت به اندازه دانه فلزپایه می‌توان به تبلور مجدد نسبت داد [۱۹ و ۲۶].

ج-۳) ناحیه تحت تأثیر حرارت (HAZ). همان‌طور که در قسمت‌های مختلف شکل ۹ بدیده می‌شود، HAZ در نمونه FSP مشابه با این منطقه در نمونه جوشکاری شده به دو بخش ریزدانه (نزدیک به فلزپایه) و درشت دانه (نزدیک به منطقه اغتشاشی) قابل تقسیم است. تشکیل این نواحی مختلف را می‌توان به تفاوت حرارت ورودی به مناطق مختلف HAZ نسبت داد [۱۹ و ۲۲]. میانگین قطر دانه‌های فریت در HAZ درشت دانه در نمونه‌های FSP شده $15 \pm 2 \mu m$ است.

تأثیر عملیات FSP بر پروفیل سختی مناطق جوشکاری شده در شکل ۱۰ پروفیل سختی نمونه‌های جوشکاری شده و تأثیر عملیات FSP بر موضع جوشکاری شده نشان داده شده است.

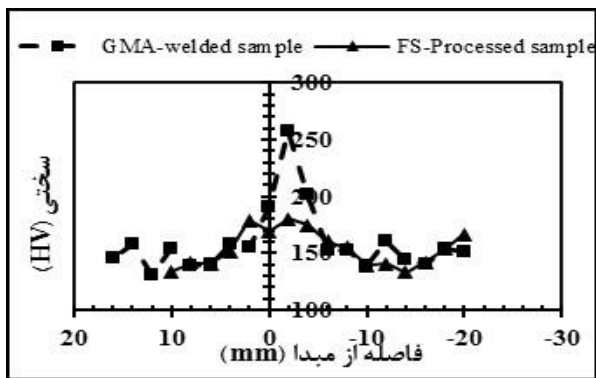
نکات قابل توجه می‌توان به تشکیل فازهای سوزنی شکل در CG-HAZ اشاره نمود (شکل ۸-ج).



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ نوری از الف) HAZ نزدیک به BM و ب) HAZ نزدیک به WM، ج) تصاویر SEM در دو مد الکترون ثانویه و الکترون برگشتی از HAZ نزدیک به WM.

ج) بررسی ریزساختار نمونه اصلاح شده با FSP ج-۱) ناحیه اغتشاشی (SZ). SZ علاوه بر سیکل‌های حرارتی، سیکل‌های مکانیکی را نیز تجربه می‌کند. طبق بررسی‌های انجام شده دمای این منطقه به بالای دمای A_1 می‌رسد، بنابراین می‌توان گفت که این ناحیه کاملاً

بررسی سختی نواحی مختلف نمونه جوشکاری شده نشان داد که سختی فلزجوش در حدود ۷۰٪ بیشتر از سختی فلزپایه (بسه ترتیب $250 \pm 10 \text{ HV}$ و $140 \pm 10 \text{ HV}$) است (شکل ۱۰). این افزایش سختی را می‌توان به ساختار زمخت و ریختگی فلزجوش نسبت داد. بعلاوه حرارت ورودی به HAZ نمونه GMAW شده موجب کاهش اندکی در سختی ($135 \pm 10 \text{ HV}$) نسبت به سختی فلز پایه شده است [۲۷].



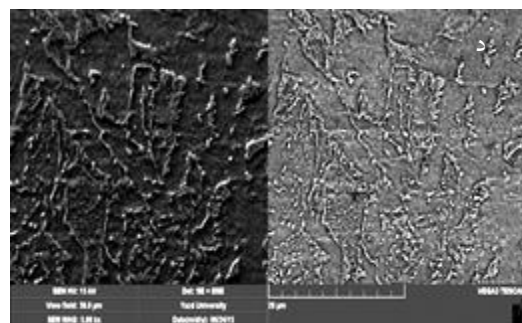
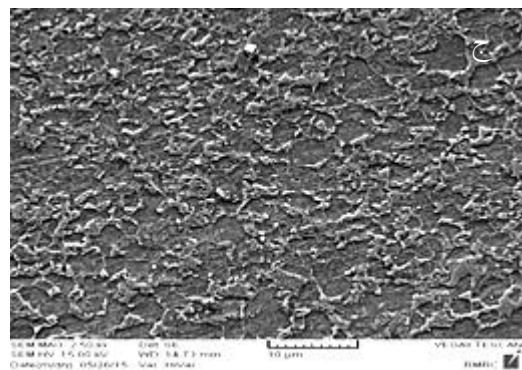
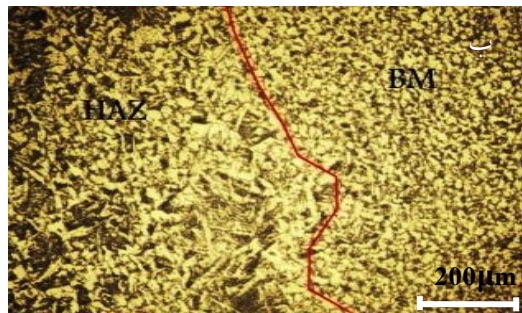
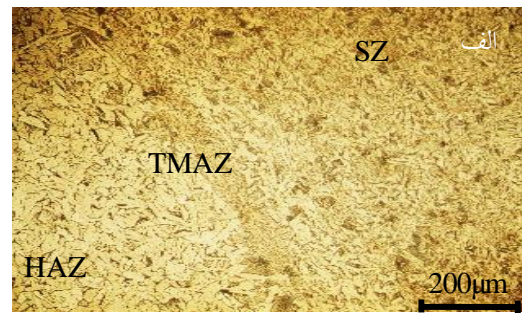
شکل ۱۰. تأثیر عملیات FSP و GMAW بر پروفیل سختی نمونه‌های جوشکاری.

میانگین سختی SZ در نمونه‌های FSP شده در حدود $150 \pm 10 \text{ HV}$ اندازه‌گیری شد. سختی HAZ در نمونه‌های اصلاح شده با FSP در سطوح پیشرو و پسرو به ترتیب $150 \pm 10 \text{ HV}$ و $140 \pm 10 \text{ HV}$ است. تغییرات نسبتاً یکنواخت توزیع سختی در نمونه FSP شده در همخوانی با اصلاح ساختار ایجاد شده در نتیجه اعمال FSP است.

نتیجه‌گیری

۱- اعمال عملیات فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر فلزجوش موجب ظرافت و یکنواختی ساختار در موضع اتصال می‌شود.

۲- میانگین اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی نمونه‌های FSP



شکل ۹. الف) تصویر نوری از منطقه SZ، TMAZ و HAZ نزدیک به منطقه اغتشاشی. ب) ریزساختار نوری مربوط به منطقه HAZ نزدیک به فلز پایه. ج) تصویر SEM در مد الکترون ثانویه از SZ. د) تصویر SEM در مد الکترون ثانویه و برگشتی از HAZ نزدیک به SZ.

James Boileau, G.JohnSpray, *The static and dynamic mechanical properties of a new low-carbon, low-alloy austempered steel*, Materials Science & Engineering A, (2014)280-287.

10. Cinta Lorenzo-Martin, Oyelayo O. Ajayi, *Rapid surface hardening and enhanced tribological performance of 4140 steel by friction stir processing*, Wear332-333, (2015)962-970.

11. A.Rahbar-kelishami, A.Abdollah-zadeh, M.Hadavi, R.Seraj, A.Gerlich, *Rapid surface hardening and enhanced tribological performance of 4140 steel by friction stir processing*, Applied Surface Science, (2014)501-507.

12. Matsushita, *Development of friction stir welding of high strength steel sheet*, Science and Technology of Welding and Joining, (2011)181-187.

13. A.Ghasemi-kahrizsangi, S.Kashani-Bozorg, F.Moshref-Javadi, *Effect of friction stir processing on the tribological performance of Steel/Al₂O₃ nanocomposites*, Surface & Coatings Technology, (2015)1-28.

14. G.Brodova, PS.Popel, *Liquid Metal Processing*, New York: Taylor & Francis, (2002).

15. J.de Jesus, A.Loureiro, J.Costa, M.Ferreira, *Effect of tool geometry on friction stir processing and fatigue strength of MIG T welds on Al alloys*, Journal of Materials Processing Technology, (2014) 2450-2460.

16. P.Atapour, A.Pilchak, G.Frankel, J.Williams, *Corrosion Behavior of Friction Stir-Processed and Gas Tungsten Arc-Welded Ti-6Al-4V*, Metals & Materials Society, (2014).

17. H.Hussain, M.AliEljaraio, S.Al-Jadi, *Erosive Wear Resistance of Austenitic Stainless Steel Surfacing Deposited on Carbon Steel Plate by GMAW at Different Welding Parameters*, ICEIT, (2012) 84-91.

18. ASM Hand Book, Welding, brazing and soldering, Volume 6, (1993)288-344.

19. M.Jafarzadegan, A. Feng, A.Abdollah-zadeh, T.Saeid, J.Shen, M.Assadi, *Microstructural characterization in dissimilar friction stir welding between 304 stainless steel and s37 steel*, Sciverse Science Direct, (2012).

20. S. Kou, *Welding Metallurgy*, second edition, John Wiley & Sons Inc, (2003) 197-410.

21. C.Thaulow, A.J. Paauw and K. Guttormsen, *The Heat Affected Zone*

شده در حدود ۶۰٪ کوچکتر از میانگین اندازه دانه فلز پایه و حدود ۳۰٪ کوچکتر از میانگین اندازه دانه در فلزجوش در نمونه جوشکاری شده به روش GAMW است.

۳- پروفیل سختی در فلزجوش اصلاح شده توسط فرآیند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی یکنواخت‌تر از توزیع سختی در نمونه جوشکاری شده به روش GMAW است.

مراجع

1. R.S.Mishra, Z.Ma, *Friction stir welding and processing*, Materials Science and Engineering, (2005)1-78.

2. I.Charit, R.S.Mishra, *Low temperature superplasticity in a friction-stir-processed ultrafine grained Al-Zn-Mg-Sc alloy*, Materials Science and Direct, (2005)1-35.

3. A.Rao, V.Katkar, G.Gunasekaran, V.Deshmukh, N.Prabhu, B.Kashyap, *Effect of multipass friction stir processing on corrosion resistance of hypereutectic Al-30Si alloy*, Materials Letters, (2015)417-419.

4. K.Nakata, Y.Kim, H.Fujii, T.Tsumura, T.Komazaki, *Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing*, Materials Science and Engineering X, (2010)274-280.

5. F.Khodabakhshi, A.Simchi, H.Kokabi, M.Nosko, F.Simančik, P.Švec, *Microstructure and texture development during friction stir processing of Al-Mg alloy sheets with TiO₂ nanoparticles*, Materials Science and Engineering, (2014)1-17.

6. S.David, S.Babu, M.Vitek, *Solidification and Microstructure*, Metals & Ceramics Division, (2003)37831-6095.

7. V.JeganathanArulmoni, R.S.Mishra, *Friction Stir Processing of Aluminum alloys for Defense Applications*, International Journal of Advance Research and Innovation, (2014)337-341.

8. H.Grewal, S.Arora, H.Singh, A.Agrawal, *Surface modification of hydroturbine steel using friction stir processing*, Applied Surface Science, (2013)315-412.

9. Codrick J. Martis, K.Susil, K. Putatunda,

- Toughness of Low carbon Microalloyed Steel*, Welding Research Supplement, Sep. (1987)266s-279s.
22. W.Tianqi, L.Liangyu, L. Xiao, Y. Xu, *The Numerical Simulation and Control of Microstructure in Heat-affected Zone in GMAW*, Modern applied science, Volume 3(2009)163-166.
23. T.Lienert, W.Stellwag, B.Grimmett, R.Warke, *Friction stir welding studies on mildsteel*, Suppl Weld J Jan, (2009)1s-9s.
24. A.Aghaei, K.Deighani, *Characterizations of friction stir welding of dissimilar Monel400 and stainless steel 316*, Springer-Verlag, (2014)573-579.
25. A.Kumar, M.Kumar, *study offriction stirwelding and its process parameters Forjoining of dissimilar metals*, South Asia Journal of Multidisciplinary Studies SAJMS, 1(2015)77-88.
26. L. Huabing, Shouxing, Z. Shucai, *Microstructure evolution and mechanical properties of friction stir welding super-austenitic stainless steel S32654*, Materials and Design, (2017)207-217.
27. P.Xue, B.Xiao, W.Wang, Q.Zhang, Q.Wang, D.Wang, Z.Ma, *Achieving ultrafine dual-phase structure with superior mechanical property in friction stir processed plain low carbon steel*, Materials Science & Engineering A, (2011)30-34.