بررسی خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱۶ به فولاد کم‌کربن St ۳۷ با استفاده از جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی

امیرحسین خسروانی نژاد*، مرتضی شمعانیان، احمد رضائیان و مسعود عطاپور

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۲۹– دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۰۸/۰۳)

چکیده – در این مقاله به‌بررسی خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI۳۱۶ به فولاد کم کربن St۳۷ جوش‌کاری شده با روش جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده است. جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی با سرعت چرخشی ثابت ۸۰۰ rpm و سرعت‌های خطی ۱۰۰،۱۵۰ mm/min و۵۰ انجام شد. بررسی‌های فازی توسط آزمون پراش اشعه ایکس و آزمون طیف‌سنجی اشعه ایکس و بررسی خواص مکانیکی توسط آزمون کشش، آزمون سوراخ برشی و آزمون ریزسختی سنجی انجام شد. نتایج بررسی‌های فازی در مرز اتصال شواهدی از تشکیل کاربید و ترکیب‌های بین فلزی را نشان نداد. نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد شکست در تمام نمونه‌های جوش‌کاری شده از ناحیه فلز پایه فولاد St۳۷ اتفاق می‌افتد. نتایج آزمون سوراخ برشی بیشترین استحکام برشی نهایی و استحکام تسلیم برشی را برای نمونه جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm و سرعت خطی ۱۵۰mm/min نشان داد. با این حال این نمونه کمترین درصد ازدیاد طول برشی را نشان می‌دهد. نتایج آزمون ریزسختی سنجی نیز بیشترین میزان ریزسختی را در ناحیه اغتشاشی سمت فولاد AISI ۳۱۶ نمونه جوش‌کاری شده با سرعت چرخشیrpm ۸۰۰ و سرعت خطی ۱۵۰mm/min نشان می‌دهد که دلیل آن کاهش اندازه دانه‌ها ناشی از تبلور مجدد دینامیکی است.

واژگان کلیدی: جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی، اتصال غیرمشابه، فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱۶، فولاد کم کربن St ۳۷

Investigation of the Mechanical Properties of AISI 316 Austenitic Stainless Steel and St 37 Low Carbon Steel Dissimilar Joint by Friction Stir Welding

A.H. Khosrovaninezhad*, M. Shamanian, A. Rezaeian and M. Atapour

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract: ***This paper reports on the mechanical properties of the dissimilar joints between AISI 316 austenitic stainless steel and St 37 low carbon steel achieved using friction stir welding technique. The welding was carried out by means of rotational***

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی:h.khosrovaninezhad@ma.iut.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]

[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]

speed of 800 rpm and linear speeds of 50,100,150 mm/min. EDS and XRD techniques were employed in order to determine possible phase transformations. Tensile test, shear punch test and microhardness measurements were conducted to evaluate the mechanical properties of the joints. The results of phase investigations showed that no carbide and brittle phase were detected at the joint boundary. Also, tensile test results demonstrated that failure occurred in the St 37 base metal. According to the shear punch test, the highest ultimate shear strength and yield shear strength was achieved for the sample welded at rotational speed of 800 rpm and linear speed of 150 mm/min, while this sample showed the least elongation. In addition, the highest microhardness was measured in the stir zone of austenitic stainless steel sample welded in the above mentioned welding condition, which can be attributed to the decrease in grain size caused by recrystallization process.

Keywords: ***Friction stir welding, Dissimilar joint, AISI 316 austenitic stainless steel, St 37 low carbon steel***

۱- مقدمه

اتصالات غیرمشابه بین فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فولادهای کم کربن در بسیاری از کاربردهای دما بالا مانند خطوط بخار نیروگاه‌ها، مبدل‌های گرمایی، راکتورهای هسته‌ای و صنایع پتروشیمی کاربرد دارد. در این کاربردها بخش‌هایی از قطعه که در معرض دماهای پایین‌اند، از فولاد کم کربن و بخش‌هایی که در دماهای بالاتر قرار دارند، از فولاد زنگ نزن آستنیتی ساخته می‌شوند [۱]. دلیل استفاده از فولادهای کم کربن این است که در زیر دما و فشار معینی، این فولادها خواص مکانیکی مناسبی دارند و از نظر اقتصادی نیز نسبت به فولادهای زنگ نزن مقرون به صرفه‌ترند [۲].

تاکنون پژوهشگران زیادی به بررسی این اتصال غیرمشابه با استفاده از انواع روش‌های جوش‌کاری مانند جوش‌کاری قوسی تنگستن - گاز[۱] (GTAW) [۳،۱]، جوش‌کاری نقطه‌ای مقاومتی[۲] (RSW) [۴]، جوش‌کاری اصطکاکی[۳] (FW) [۳]، جوش‌کاری نقطه‌ای لیزر[۴] (LSW) [۵] و جوش‌کاری پرتو الکترونی[۵] (EBW) [۳] پرداخته‌اند. در این پژوهش‌ها دگرگونی‌های ریزساختاری، خواص مکانیکی و خواص خوردگی اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است.

پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که تغییرات متالورژیکی ایجاد شده سبب تشکیل کاربیدها و فازهای ترد در فصل مشترک اتصال می‌شود. تشکیل این فازهای ترد خواص مکانیکی اتصال را کاهش می‌دهد. علاوه براین، به‌دلیل تفاوت در ضریب انبساط و هدایت گرمایی، در اتصال غیرمشابه تنش گرمایی زیادی به‌وجود می‌آید. عیوب ذکر شده مربوط به حضور فاز مذاب در محل اتصال است. اخیراً برای رفع این مشکلات، پژوهش‌های زیادی روی روش‌های ایجاد اتصال حالت جامد صورت گرفته است.

جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی[۶] (FSW) یکی از انواع جدید جوش‌کاری حالت جامد است که توسط انجمن جوش‌کاری[۷] (TWI) در سال ۱۹۹۱ اختراع شد [۶]. این روش ابتدا برای ایجاد اتصال فلزهای سبک[۸] مانند آلومینیم و منیزیم مورد استفاده قرار گرفت [۷]. اما در سال‌های اخیر از این روش برای ایجاد اتصال فلزهای با نقطه ذوب بالا مانند تیتانیم، نیکل و فولاد نیز استفاده شده است [۸]. فاضل و همکاران [۸، ۹] اتصال لب‌رولب جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی[۹] (FSLW) تیتانیم خالص تجاری به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که درحالتی‌که فولاد زنگ نزن به‌عنوان لایه بالایی انتخاب شود، استحکام قابل قبول و نزدیک به استحکام تیتانیم خالص تجاری بدست می‌آید. واتاناب[۱۰] و همکاران [۱۰] اتصال غیرمشابه آلیاژ آلومینیم- منیزیم به فولاد را بررسی کردند. آن‌ها توانستند حداکثر استحکام کششی حدود ۸۶٪ استحکام آلیاژ آلومینیم - منیزیم را به‌دست آورند. حداکثر استحکام در حالتی به‌دست آمد که آلیاژ آلومینیم - منیزیم، به‌عنوان فلز نرم‌تر، در سمت پسرو[۱۱] (RS) قرار داشت. آن‌ها دریافتند در صورتی‌که آلیاژ آلومینیم- منیزیم در سمت پیشرو[۱۲] (AS) قرار گیرد، ایجاد اتصال غیرممکن است. جعفرزادگان و همکاران [۱۱] نیز خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به فولاد کم کربن St ۳۷ را بررسی نمودند. آن‌ها گزارش کردند که پدیده تبلور مجدد در

[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]

فولاد ۳۰۴ و فولاد St ۳۷ باعث کاهش قابل ملاحظه اندازه دانه‌ها و در نتیجه افزایش سختی و استحکام در ناحیه جوش می‌شود.

در ادامه این پژوهش‌ها هدف از این پژوهش ایجاد اتصال بین فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱۶ و فولاد کم کربن St ۳۷ و بررسی خواص مکانیکی اتصال است.

۲- مواد و روش پژوهش

در این پژوهش از فولاد زنگ نزن آستینیتی AISI ۳۱۶ و فولاد کم کربن St ۳۷ به‌عنوان فلزهای پایه استفاده شد که در جدول ۱ ترکیب شیمیایی آن‌ها آورده شده است.

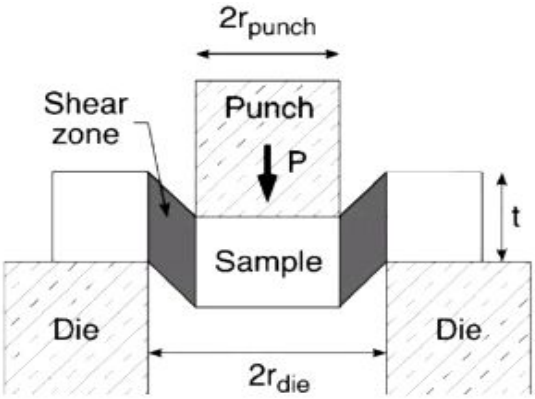
برای انجام جوش‌کاری ورق‌هایی از فلزهای پایه با ابعاد ۶ cm در ۱۰ cm و با ضخامت ۱/۵ mm آماده سازی و اتصال بصورت لب‌به‌لب[۱۳] انجام شد. ابزار جوش‌کاری از جنس آلیاژ تنگستنی رنیوم‌دار با پین مخروط ناقص در نظر گرفته شد. ابزار جوش‌کاری دارای قطر شانه ۱۶ mm، طول پین ۱/۲۵ mm، قطر قسمت بالای پین ۴/۵ mm و قطر قسمت پایین پین ۳/۵ mm بود. جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از دستگاه فرز و با سرعت چرخشی ثابت۸۰۰ rpm و سرعت‌های خطی ۱۵۰، ۱۰۰و۵۰ mm/min انجام شد. در این پژوهش و باتوجه به استحکام بالاتر فولاد ۳۱۶ نسبت به فولاد St ۳۷، فولاد St ۳۷ در سمت پسرو و فولاد ۳۱۶ در سمت پیشرو قرار داده شد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد در جوش‌کاری اصطکاکی‌اغتشاشی سمت پیشرو دمای بالاتری را تجربه می‌کند. بنابراین برای دست‌یابی به سیلان یکسانی از مواد در محل اتصال، فلز با استحکام بالاتر در سمت پیشرو قرار داده می‌شود [۱۰، ۱۲، ۱۳]. برای حفاظت از منطقه جوش، در حین جوش‌کاری دمش گاز آرگون با دبی حدود ۱۸ L/min اعمال شد. برای تحلیل بهتر خواص مکانیکی اتصال‌ها، دما در خط مرکزی جوش و در سطح زیری ورق‌ها با استفاده از ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری شد.

برای بررسی ریزساختار، نمونه‌ها پس از مانت، با سنباده‌های ۸۰ تا ۴۰۰۰ سنباده‌زنی و سپس با پودر آلومینا پولیش شدند. بررسی ریزساختار مناطق مختلف در دو مرحله صورت گرفت. ابتدا سمت فولاد کم کربن St ۳۷ توسط محلول نایتال ۲ درصد اچ و بررسی شد. سپس سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱۶ بصورت الکترولیتی در محلول HNO_3 ۶۰٪ با ولتاژ ۱۰-۵ V و مدت زمان ۱۰-۵ ثانیه حکاکی شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، ارزیابی ریزساختاری با میکروسکوپ نوری NIKON-EPIPHOTO300 و میکروسکوپ الکترونی روبشی XL30Philips انجام شد. برای تحلیل طیف سنجی اشعه ایکس (EDS) نیز از میکروسکوپ الکترونی روبشی نوع Seron استفاده شد. شناسایی فازهای تشکیل شده در محل اتصال با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکسPhilips – XPERT MPD با تیوب مس (λ=۰/۱۵۴nm در ۲۰KV و ۳۰mA) انجام شد. اندازه دانه نواحی مختلف با استفاده از نرم افزار Clemex به‌دست آمد.

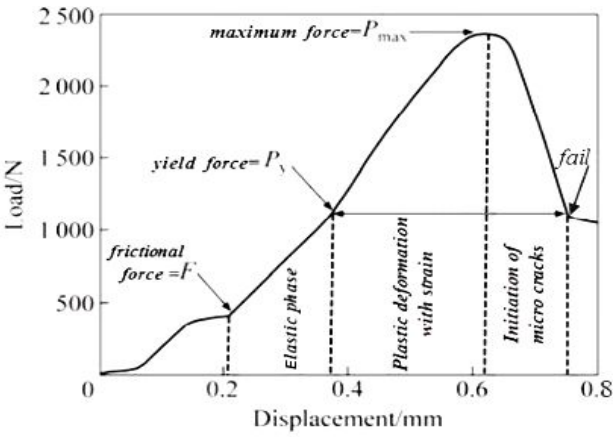
برای انجام آزمون کشش، نمونه‌هایی به‌صورت عمود بر مقطع جوش و بر اساس استاندارد ASTM E8 تهیه شد. از هر نمونه جوش‌کاری شده سه نمونه کشش تهیه شد و سپس آزمون کشش با نرخ کرنش ۱ mm/min برای همه نمونه‌ها در دمای محیط، تحت شرایط یکسان و توسط دستگاه Hounsfield H25KS انجام شد. اندازه‌گیری میزان سختی نمونه‌ها در طول خطی در مرکز مقطع عرضی جوش‌ها، با استفاده از دستگاه ریزسختی سنجی Buehler– MICROMET5101، تحت بارگذاری ۱۰۰gr و مدت زمان ۱۵ s و با فاصله نقاط ۱۲۵ µm انجام شد.

آزمون سوراخ برشی[۱۴] توسط دستگاه Hounsfield H25KS و قالب آزمون سوراخ برشی در دمای محیط انجام شد. در این آزمون سرعت حرکت فک دستگاه ۰/۱ mm/min در نظر گرفته شد. نمونه‌های آزمون با ابعاد ۱۰×۱۰ mm و ضخامت حدود ۳۰۰-۴۰۰µm تهیه شدند. برای نمونه‌های جوش‌کاری، آزمون در ناحیه اغتشاشی و دقیقاً در فصل مشترک بین فولاد St ۳۷ و فولاد ۳۱۶ انجام شد. برای هر نمونه جوش‌کاری شده ۳ نمونه

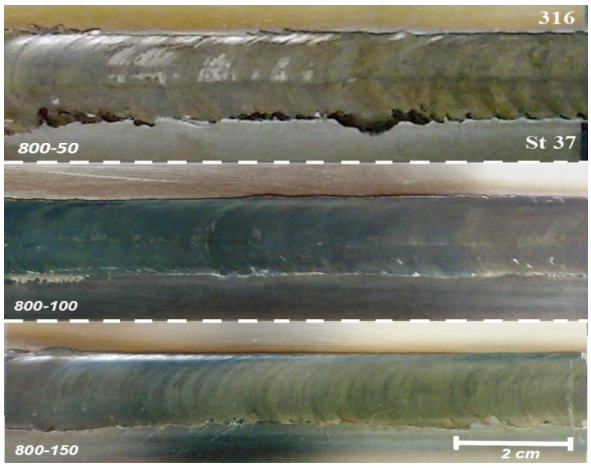
[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]



شکل ۱- طرح نمادینی از آزمون سوراخ برشی [۱۴]



شکل ۲- نمودار معمول حاصل از آزمون سوراخ برشی [۱۵]



شکل ۳- سطح نمونه‌های جوش‌کاری شده

برای آزمون تهیه و سپس میانگین خواص گزارش شد. شکل ۱ طرح نمادینی از آزمون سوراخ برشی را نشان می‌دهد. هم‌چنین در شکل ۲ نمودار معمول حاصل از این آزمون دیده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، r_{die} برابر با شعاع قالب، r_{punch} برابر با شعاع پانچ، p نیروی پانچ و t ضخامت نمونه است. در نمودار نیرو بر حسب جابجایی که در شکل ۲ نشان داده شده است، تا نقطه F، پانچ هنوز به نمونه نرسیده است و در واقع این نیرو ناشی از اصطکاک بین پانچ و قالب است. از نقطه F تا P_y منطقه الاستیک خطی است که با یک منطقه پلاستیک دارای کارسختی (از نقطه P_y تا P_{max}) ادامه پیدا می‌کند و به یک نقطه بیشینه نیرو می‌رسد. پس از این نقطه میزان نیرو به‌صورت پیوسته کاهش یافته، تغییر شکل پلاستیک ادامه پیدا می‌کند تا جایی که به دلیل اشاعه ترک و گسیختگی، مقدار نیرو به‌صورت چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند. در واقع P_y همان نقطه تسلیم برشی و P_{max} نقطه بیشینه نیرو است. داده‌های نیرو برحسب جابجایی توسط روابط ۱ تا ۳ به داده‌های استحکام برشی (τ) برحسب جابجایی نرمال[۱۵] (ND) تبدیل می‌شوند.

$$^{2}{}_{y,\max} = \frac{P_{y,\max} - F}{®(r_{ave})t} \qquad (۱)$$

$$r_{ave} = \frac{r_{die} + r_{punch}}{۲} \qquad (۲)$$

$$ND = \frac{D - D_F}{t} \qquad (۳)$$

در جایی‌که D برابر با جابجایی پانچ و D_F مقدار جابجایی که متناظر با نقطه F بوده، ناشی از جابجایی قطعه نیست، است. بر این اساس می‌توان مقادیر استحکام برشی نهایی[۱۶] (USS) و استحکام تسلیم برشی[۱۷] (YSS) را برای نمونه‌های مختلف گزارش کرد. هم‌چنین اختلاف بین جابجایی نقطه شکست و تسلیم به‌عنوان ازدیاد طول[۱۸] (رابطه ۴) تعریف می‌شود.

$$\text{درصد ازدیاد طول برشی} = \frac{D_f - D_y}{t} \times ۱۰۰ \qquad (۴)$$

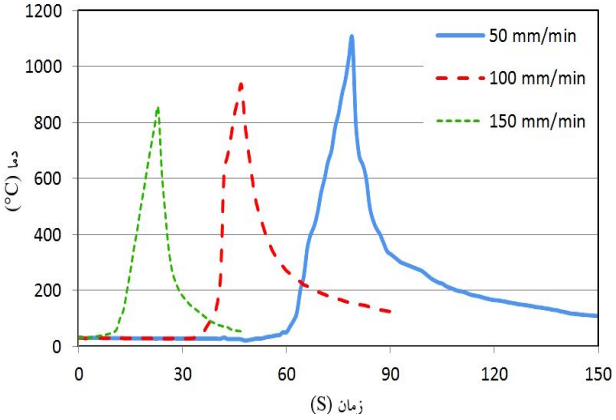
که D_y جابجایی نقطه تسلیم و D_f جابجایی نقطه شکست است [۱۴، ۱۵].

۳- نتایج و بحث

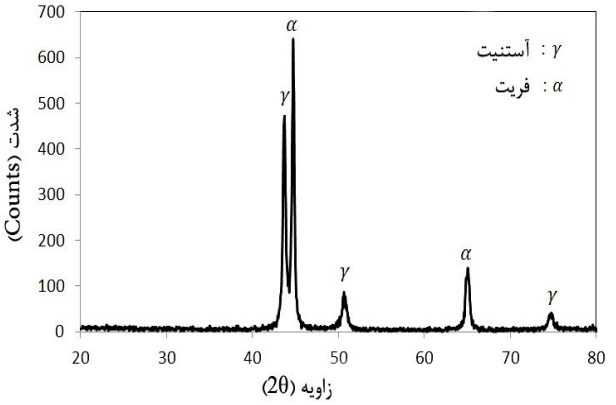
۳-۱- کیفیت ظاهری جوش‌ها

نمونه‌های جوش‌کاری‌شده کیفیت سطحی قابل قبولی را نشان دادند که در شکل ۳ نشان داده شده است. با این‌وجود سطح

[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]



شکل ۴- نمودار دما-زمان در زیر خط‌جوش نمونه‌های جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm



شکل ۵- الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm و سرعت خطی ۵۰ mm/min

نمونه جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm و سرعت خطی ۵۰ mm/min وجود پلیسه در سمت پسرو جوش را نشان می‌دهد که دلیل آن گرمای ورودی زیاد تولید شده در این نمونه است. بررسی مقطع عرضی این نمونه‌ها نیز عدم وجود عیب در محل اتصال را نشان داد.

۳-۲- سیکل گرمایی جوش

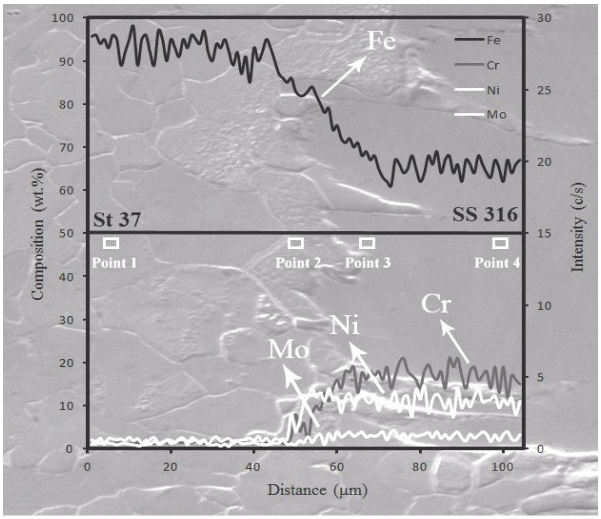
شکل ۴ نمودار دما-زمان نمونه‌های جوش‌کاری شده در خط مرکزی جوش را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با کاهش سرعت جوش‌کاری در سرعت چرخشی ثابت ۸۰۰ rpm، دمای بیشینه افزایش و نرخ سرمایش قطعه کاهش می‌یابد. پژوهش‌های دیگر انجام شده نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهند [۱۶-۱۹]. مشاهده می‌شود که بیشترین دمای اندازه‌گیری شده در خط مرکزی جوش (حدود ۱۱۰۰ $^{\circ}$C)، به پایین‌ترین سطح سرعت خطی (۵۰ mm/min) و بالاترین سطح سرعت چرخشی (۸۰۰rpm) اختصاص دارد.

۳-۳- تشکیل و توزیع فازها

برای بررسی احتمال تشکیل کاربیدها و ترکیبات بین فلزی در محل اتصال نمونه جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm و سرعت خطی ۵۰ mm/min که بیشترین قله دمایی و کمترین نرخ سرمایش را نشان می‌دهد، تحلیل پرتو ایکس (XRD) انجام شد که در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به بالا رفتن دما، احتمال تشکیل فازها و ترکیبات بین فلزی در محل اتصال زیاد بود. اما همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، نتایج الگوهای پراش پرتو ایکس نشان از تشکیل نشدن فازها و ترکیب‌های بین فلزی دارد و تنها قله‌های شناسایی شده مربوط به فازهای فریت و آستنیت است. به‌نظر می‌رسد باوجود بالا رفتن دما حین جوش‌کاری، به‌دلیل سرد شدن سریع محل اتصال، فاز دیگری غیر از آستنیت و فریت تشکیل نشده است. این در حالی است که پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه اتصالات ذوبی بین فولادهای کربنی و فولادهای زنگ نزن آستنیتی، تشکیل کاربیدها و فازهای ترد را در محل اتصال نشان می‌دهند [۱، ۳]. هم‌چنین تشکیل کاربیدهای غنی از کُرم در برخی از فرایندهای حالت جامد مانند اتصال نفوذی و جوش‌کاری اصطکاکی نیز گزارش شده است [۲۰، ۲۱].

برای بررسی دقیق‌تر محل اتصال و با توجه به‌اینکه اگر مقدار فاز تشکیل شده کم‌تر از ۵٪ باشد، دستگاه تحلیل پراش پرتو ایکس قادر به شناسایی آن نیست، در محل تحلیل طیف‌سنجی اشعه ایکس انجام شد (شکل ۶). همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، فولاد St ۳۷ در سمت چپ و فولاد ۳۱۶ در سمت راست فصل مشترک قرار گرفته‌اند. برای بررسی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]



wt.%	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Fe	۹۲/۹	۸۳/۱	۶۶/۳	۶۴/۱
Cr	۲/۴	۸/۴	۱۶/۸	۱۸/۵
Ni	۲/۸	۶/۸	۱۳/۲	۱۳/۳
Mo	۱/۹	۱/۸	۳/۵	۴/۷

شکل ۶- تحلیل EDS خطی و نقطه‌ای در طول فصل‌مشترک اتصال در ناحیه SZ نمونه جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm و سرعت خطی ۵۰ mm/min

نفوذ عناصر در عرض فصل‌مشترک و بررسی احتمال تشکیل کاربیدها و ترکیب‌های بین فلزی، تحلیل اسکن خطی[۱۹] و نقطه‌ای[۲۰] بر روی خط سیاه مشخص شده در مرکز تصویر انجام شد. آزمون طیف‌سنجی اشعه ایکس، توزیع عناصر Fe، Cr، Ni و Mo را در عرض فصل مشترک نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با رفتن از سمت فولاد St ۳۷ به سمت فولاد ۳۱۶، درصد وزنی عناصر Cr، Ni و Mo افزایش و درصد وزنی Fe کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد در فصل مشترک اتصال، به‌دلیل بالا رفتن دما حین جوش‌کاری، نفوذ عناصر آلیاژی اتفاق افتاده است اما تمرکز عناصر آلیاژی برای تشکیل کاربید و یا سایر محصولات بین‌فلزی وجود ندارد. بنابراین به نظر می‌رسد که کاربید و یا ترکیب‌های بین‌فلزی در فصل مشترک اتصال تشکیل نشده است. دلیل عدم تشکیل کاربید و ترکیب‌های بین‌فلزی این است که تشکیل این فازها در محل اتصال نیاز به قرارگیری در دمای بالا برای مدت زمان طولانی دارد که این شرایط در جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها مهیا نیست. پژوهشگران نیز در زمینه جوش‌کاری اصطکاکی‌اغتشاشی فولادها، عدم تشکیل کاربید و ترکیب‌های بین فلزی را در محل اتصال گزارش کرده‌اند [۱۱، ۲۲].

۳-۴- ریزساختار

شکل ۷ تصویری با بزرگ‌نمایی کم از مقطع عرضی جوش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، ریزساختار به نواحی مختلفی تقسیم می‌شود. ناحیه ۱ فلز پایه فولاد St ۳۷، ناحیه ۲ ناحیه اغتشاشی سمت فولاد St ۳۷، ناحیه ۳ ناحیه اغتشاشی سمت فولاد AISI ۳۱۶ و ناحیه ۴ فلز پایه فولاد AISI ۳۱۶ را نشان می‌دهد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد، دو پارامتر سرعت چرخشی و سرعت خطی ابزار با کنترل میزان گرما ورودی و میزان تغییر شکل، بر ریزساختار ناحیه جوش تاثیر می‌گذارند [۲۳]. برای تحلیل بهتر خواص مکانیکی اتصالات جوش‌کاری شده، اندازه دانه‌ها در فلزهای پایه و ناحیه اغتشاشی سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱۶ و فولاد کم کربن St ۳۷ بررسی شد. شکل ۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار فلزهای پایه را نشان می‌دهد. فولاد St ۳۷ دارای زمینه فریتی (F) با میانگین اندازه دانه ۱۴ μm و حدود ۵ ٪ پرلیت (P) است. فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱۶ شامل دانه‌های آستنیت (A) هم محور با میانگین اندازه دانه ۲۳μm است. در این تصاویر دانه‌های فریت (F) کشیده شده در جهت نورد نیز دیده می‌شوند.

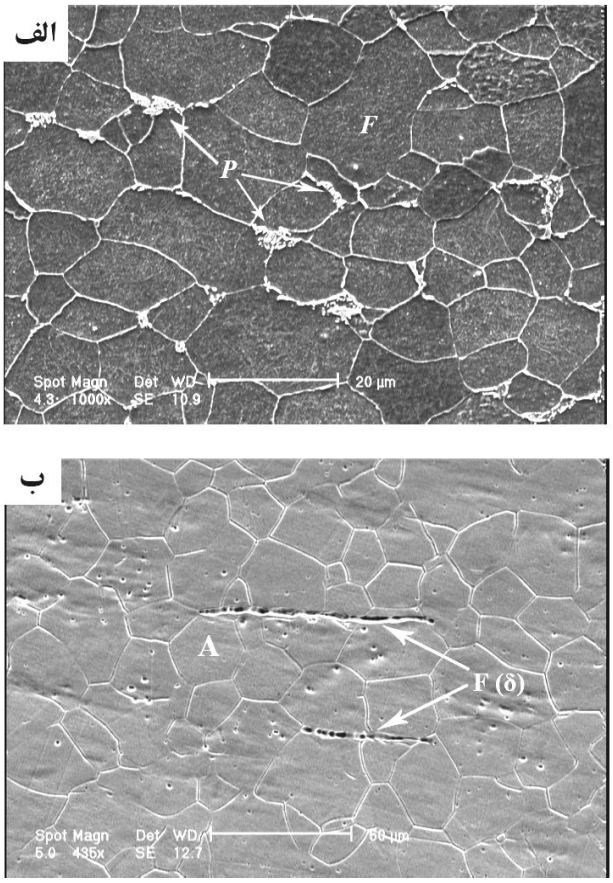
در شکل ۹ و ۱۰ به‌ترتیب تصاویر SEM از ناحیه اغتشاشی سمت فولاد کم کربن St ۳۷ و ناحیه اغتشاشی سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱۶ نشان داده شده است. در جدول ۲ نیز میانگین اندازه دانه‌ها در ناحیه اغتشاش برای نمونه‌های جوش‌کاری شده آورده شده است. همان‌طور که در تصاویر دیده می‌شود، در ناحیه اغتشاشی سمت فولاد ۳۱۶ در اثر تبلور مجدد، اندازه دانه‌ها کاهش زیادی داشته است. این درحالی است که در سمت فولاد St ۳۷ به دلیل تغییر فازهای صورت گرفته در طی سیکل سرد شدن، تبلور مجدد کامل انجام نشده است و اندازه دانه‌ها نسبت به ناحیه اغتشاشی سمت فولاد ۳۱۶

[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]

شکل ۷- تصویر با بزرگ‌نمایی کم از مقطع عرضی نمونه ۵۰-۸۰۰

جدول ۲- میانگین اندازه دانه‌ها مربوط به فلزهای پایه و ناحیه اغتشاش نمونه‌های جوش‌کاری شده (μm)

	سمت فولاد St ۳۷	سمت فولاد AISI ۳۱۶
فلز پایه	۱۴	۲۳
۸۰۰-۵۰	۱۳/۷	۱۷/۹
۸۰۰-۱۰۰	۱۲/۶	۱۴/۲
۸۰۰-۱۵۰	۱۱/۹	۷/۳

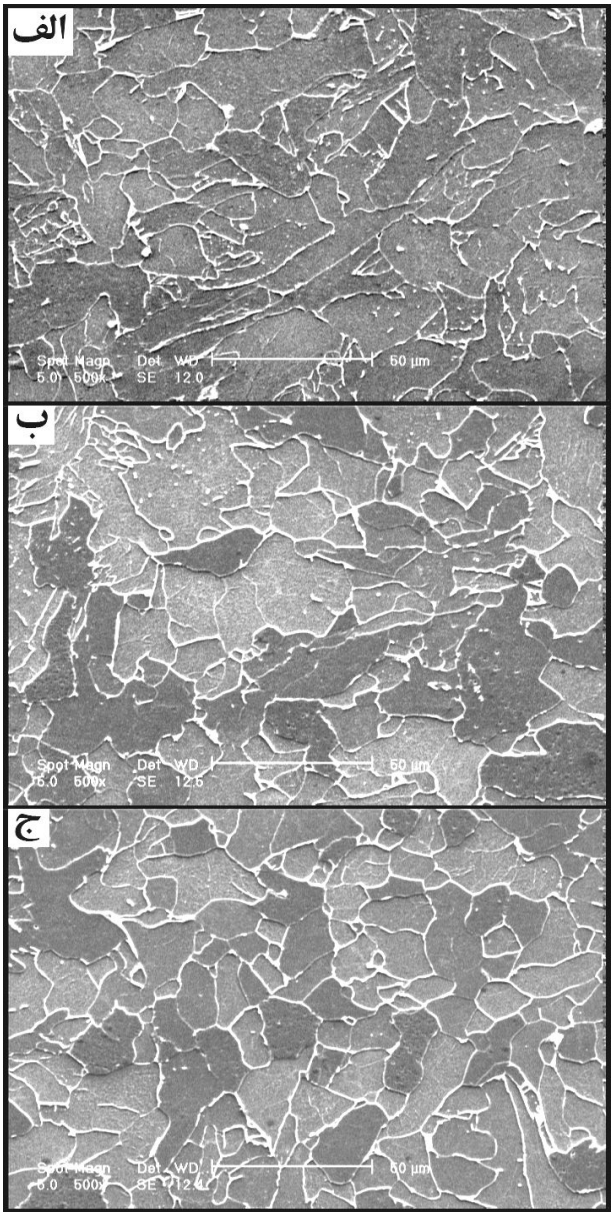


شکل ۸- تصویر الکترونی روبشی از ریزساختار فلزهای پایه:
الف) فولاد St ۳۷ و ب) فولاد AISI ۳۱۶

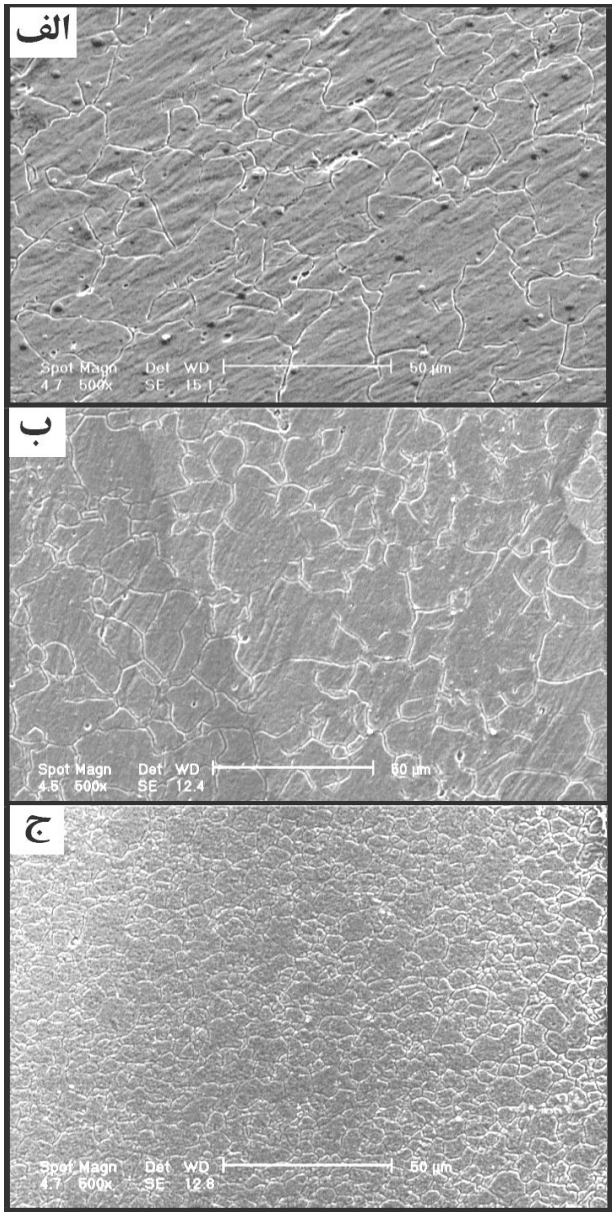
تغییر زیادی نداشته است. به نظر می‌رسد غیر از تغییر فاز، انرژی نقص‌چیدن و دمای تغییرشکل نیز بر تفاوت میزان کاهش اندازه دانه در این دو ناحیه تاثیر دارند. فولاد زنگ نزن آستنیتی انرژی نقص‌چیدن کمی دارد، در صورتی که فولاد فریتی انرژی نقص‌چیدن نسبتاً بالایی دارد. انرژی نقص‌چیدن بر مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی تاثیر می‌گذارد. بدین‌ترتیب که برای فولاد زنگ نزن آستنیتی انتظار می‌رود که تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته رخ دهد، در حالی که برای فولاد فریتی، تبلور مجدد دینامیکی پیوسته به عنوان مکانیزم غالب معرفی شده است. البته در دمایی که فولاد فریتی در محدوده دمایی آستنیت قرار دارد، احتمال وقوع تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته وجود دارد. در ارتباط با دمای تغییرشکل نیز می‌توان نتیجه گرفت با توجه به اینکه فولاد زنگ نزن آستنیتی رسانایی گرمایی کم‌تری نسبت به فولاد فریتی دارد و هم‌چنین با توجه به‌اینکه فولاد زنگ نزن آستنیتی در سمت پیشرو جوش و فولاد فریتی در سمت پسرو جوش قرار دارد، ازاین‌رو فولاد زنگ نزن آستنیتی دمای بالاتری را تجربه می‌کند و بنابراین قله دمایی در این ناحیه بالاتر و سرعت سرمایش در این ناحیه پایین‌تر است. بنابراین فولاد زنگ نزن آستنیتی زمان بیش‌تری را در دمای بالا قرار دارد و تبلور مجدد در این ناحیه کامل‌تر اتفاق می‌افتد.

نتایج نشان می‌دهد، با افزایش سرعت خطی و در نتیجه کاهش میزان گرمای ورودی، اندازه دانه‌ها در ناحیه اغتشاش کاهش یافته است.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]



شکل ۹- تصویر SEM از ریزساختار ناحیه اغتشاشی سمت فولاد St ۳۷ نمونه‌های جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی ثابت rpm ۸۰۰ و سرعت‌های خطی: الف) mm/min ۵۰، ب) mm/min ۱۰۰و ج) mm/min ۱۵۰



شکل ۱۰- تصویر SEM از ریزساختار ناحیه اغتشاشی سمت فولاد AISI ۳۱۶ نمونه‌های جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی ثابت rpm ۸۰۰ و سرعت‌های خطی: الف) mm/min ۵۰، ب) mm/min ۱۰۰و ج) mm/min ۱۵۰

دگرگونی‌ها ریزساختاری افزون بر کرنش به دمای تغییر شکل (T) و نرخ کرنش ($\dot{\varepsilon}$) نیز بستگی دارد. رابطه زنر- هولمن[۲۱] (رابطه ۵) ارتباط بین نرخ کرنش و دما را نشان می‌دهد.

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp(\frac{Q}{RT}) \qquad (۵)$$

در این رابطه Q و R به‌ترتیب انرژی فعال‌سازی (اکتیواسیون) و ثابت گازها هستند. هم‌چنین اندازه دانه‌های تبلور مجدد یافته در SZ می‌تواند از رابطه ۶ تخمین زده شود.

$$D = (a + b\ln Z)^{-1} \qquad (۶)$$

در این رابطه a و b ثوابتی هستند که به نوع ماده بستگی دارند. رابطه ۶ نشان می‌دهد، برای کاهش اندازه دانه‌ها، پارامتر

[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]

شکل ۱۱- نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های جوش‌کاری شده

زنر– هولمن (Z) باید افزایش یابد. از سویی طبق رابطه ۵، Z با افزایش نرخ کرنش و کاهش دما، افزایش می‌یابد. بنابراین برای دست‌یابی به ساختار ریزدانه، نیاز به تعیین مقدار بهینه نرخ کرنش و دما است [۱۱، ۱۸، ۲۴]. پژوهش‌های انجام شده در زمینه جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهد [۱۷، ۱۸].

۳-۵- خواص مکانیکی

۳-۵-۱- آزمون کشش

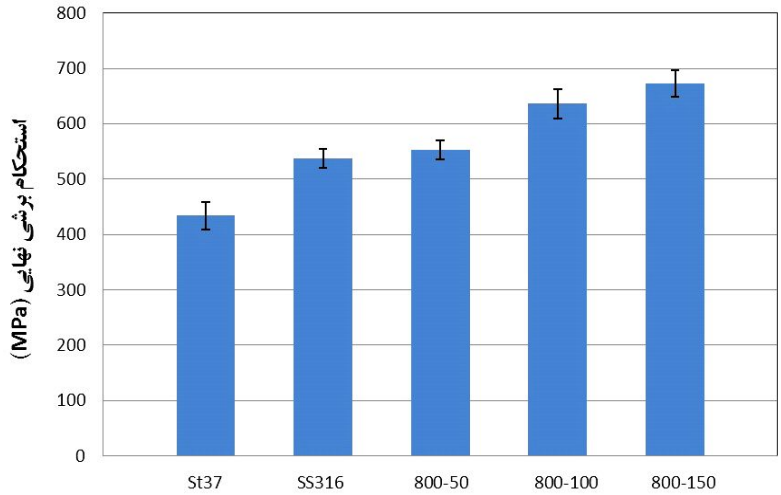
آزمون کشش با نرخ کرنش ۱ mm/min انجام شد. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، نتایج آزمون کشش نشان داد در تمام نمونه‌های جوش‌کاری شده ضعیف‌ترین بخش اتصالات، فلز پایه فولاد St ۳۷ بود. بدین ترتیب برای این نمونه‌ها استحکام کششی ۱۲ ± ۳۵۵ MPa ، استحکام تسلیم ۱۰ ± ۲۹۶ MPa و درصد ازدیاد طول ۲ ± ۱۸ بدست آمد.

برای بررسی بیش‌تر خواص مکانیکی اتصالات جوش‌کاری شده و به‌دست آوردن پارامتر بهینه، در محل جوش این اتصالات آزمون سوراخ برشی انجام شد، که در ادامه مورد بررسی خواهد گرفت.

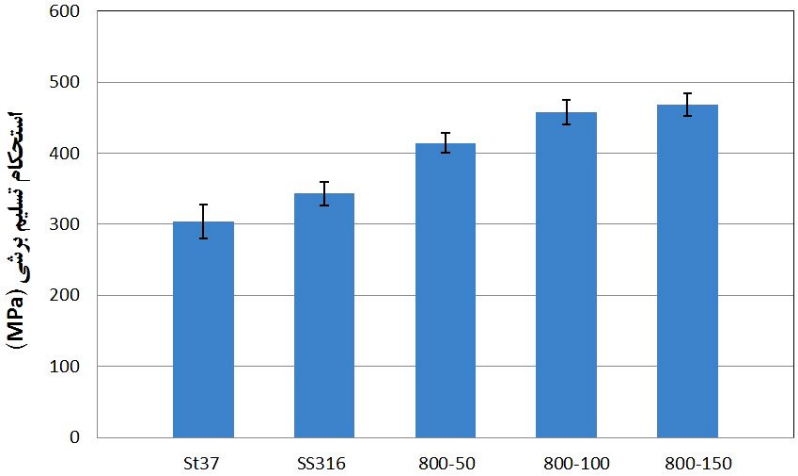
۳-۵-۲- آزمون سوراخ برشی

آزمون سوراخ برشی، یکی از آزمون‌های کارآمد برای ارزیابی خواص مکانیکی مواد است [۱۴]. شکل ۱۲ و ۱۳ به‌ترتیب مقادیر استحکام برشی نهایی (USS) و استحکام تسلیم برشی (YSS) برای فلزهای پایه و نمونه‌های جوش‌کاری شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین استحکام برشی نهایی و استحکام تسلیم برشی برای نمونه جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm و سرعت خطی ۱۵۰mm/min به‌دست آمده است. به‌نظر می‌رسد طبق جدول ۲، ساختار ریزدانه در ناحیه اغتشاش باعث افزایش استحکام برشی نهایی و استحکام تسلیم برشی دراین نمونه شده است. مرز دانه‌ها به‌دلیل سطح انرژی بالایی که دارند، موانع قوی در برابر حرکت نابجایی‌ها هستند، زیرا به‌علت اختلاف آرایش بلوری دانه‌های مجاور، نابجایی‌ها قادر به لغزش از یک دانه به دانه دیگر نیستند. بنابراین نابجایی‌های متحرک با رسیدن به مرز دانه‌ها تجمع کرده، از حرکت باز می‌مانند و استحکام را افزایش می‌دهند. هم‌چنین مشاهده می‌شود که تمام نمونه‌های جوش‌کاری شده استحکام برشی نهایی و استحکام تسلیم برشی بیش‌تری نسبت به فلزهای پایه دارند. دلیل این استحکام بیش‌تر نمونه‌های جوش‌کاری شده، می‌تواند مربوط به تغییرشکل ایجاد شده در ناحیه جوش و در نتیجه افزایش میزان نابجایی‌ها، مرزهای با زاویه زیاد و مرزهای با زاویه کم باشد. برای بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها بر استحکام تسلیم برشی می‌توان از رابطه هال– پچ[۲۲] (رابطه ۷) استفاده نمود. طبق این رابطه در نمونه‌های جوش‌کاری شده، ریز شدن دانه‌ها باعث افزایش میزان YSS (σ_0) می‌شود.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]



شکل ۱۲- مقادیر استحکام برشی نهایی مربوط به فلزهای پایه و نمونه‌های جوش‌کاری شده



شکل ۱۳- مقادیر استحکام تسلیم برشی مربوط به فلزهای پایه و نمونه‌های جوش‌کاری شده

$$\pm_0 = \pm_i + kD^{-\frac{1}{2}} \qquad (۷)$$

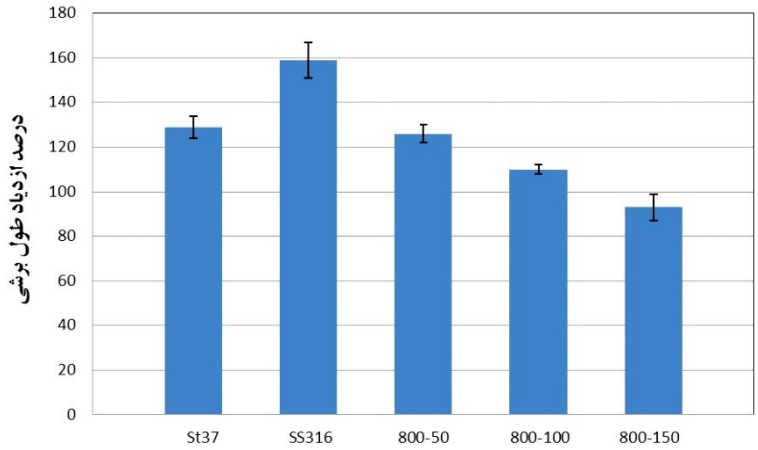
در این رابطه σ_i، تنش اصطکاکی، نشان‌دهنده مقاومت کلی شبکه بلوری در برابر حرکت نابجایی‌ها، k پارامتر قفل‌شوندگی که سهم مرز دانه‌ها را در سخت شدن نسبی نشان می‌دهد و D قطر دانه است. برای بررسی تاثیر چگالی نابجایی‌ها بر استحکام تسلیم برشی می‌توان از رابطه لی[۲۳] (رابطه ۸) استفاده نمود. براساس این رابطه با افزایش میزان چگالی نابجایی‌ها، میزان YSS (σ_0) افزایش می‌یابد.

$$\pm_0 = \pm_i + \sim Gb\circ^{\frac{1}{2}} \qquad (۸)$$

که α عددی ثابت معمولاً بین ۰/۳ تا ۰/۶، G مدول الاستیسیته برشی، b فاصله بین اتم‌ها و ρ چگالی نابجایی‌ها است [۲۵]. پژوهش‌های انجام شده در زمینه بررسی تاثیر اندازه دانه بر استحکام کششی و استحکام تسلیم نشان می‌دهد با کاهش اندازه دانه استحکام کششی و استحکام تسلیم افزایش می‌یابد [۲۶، ۲۷]. پژوهش‌های انجام شده در زمینه FSW فولادها نیز نشان می‌دهد استحکام کششی و استحکام تسلیم با کاهش اندازه دانه‌ها و افزایش چگالی نابجایی‌ها افزایش یافته است [۱۱، ۱۸ ، ۲۸].

در شکل ۱۴ نتایج مربوط به‌درصد ازدیاد طول برشی فلزهای پایه و نمونه‌های جوش‌کاری شده با پارامترهای مختلف

[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]
[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]



شکل ۱۴- مقادیر درصد ازدیاد طول برشی مربوط به فلزهای پایه و نمونه‌های جوش‌کاری شده

آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های جوش‌کاری شده درصد ازدیاد طول برشی کم‌تری نسبت به فلزهای پایه دارند. در بین فلزهای جوش‌کاری شده نیز نمونه ۱۵۰-۸۰۰ که بیشترین استحکام برشی را نشان داده بود، کمترین درصد ازدیاد طول برشی را نشان می‌دهد. دلیل این کاهش درصد ازدیاد طول می‌تواند مربوط به افزایش چگالی نابجایی‌ها در اثر تغییر شکل شدید باشد. پژوهش‌های انجام شده در زمینه بررسی تاثیر اندازه دانه بر ازدیاد طول نشان می‌دهد که با کاهش اندازه دانه‌ها، درصد ازدیاد طول یکنواخت کاهش می‌یابد [۲۶، ۲۷]. تسوجی[۲۴] و همکارانش [۲۷] گزارش کردند این کاهش ازدیاد طول به‌دلیل شرایط تغییرشکل پلاستیک غیریکنواخت[۲۵] رخ می‌دهد. شرایط تغییرشکل پلاستیک غیریکنواخت مانند شرایط گلویی شدن در آزمون کشش طبق رابطه ۹ بیان می‌شود.

$$\pm \geq \frac{d\pm}{d\pounds} \qquad (۹)$$

جایی‌که σ تنش سیلان، ε کرنش حقیقی و dσ/dε نرخ کارسختی[۲۶] است. ریزشدن دانه‌ها تنش سیلان مواد، مخصوصاً در مراحل اولیه تغییرشکل پلاستیک را افزایش می‌دهد. به‌عبارت دیگر، کارسختی پس از نقطه تسلیم با کاهش اندازه دانه‌ها نسبتا دشوار می‌شود. در نتیجه، تغییرشکل پلاستیک غیریکنواخت (گلویی شدن) برای مواد ریزدانه، در مراحل اولیه آزمون کشش اتفاق می‌افتد. به‌همین دلیل ازدیاد طول یکنواخت کاهش می‌یابد. جعفرزادگان و همکارانش [۱۱] نیز گزارش کردند دلیل این کاهش ازدیاد طول، کاهش کرنش یکنواخت حقیقی (ε_n) در هنگام گلویی‌شدن است. کرنش یکنواخت حقیقی به‌توان کرنش سختی (n) مربوط می‌شود (رابطه ۱۰).

$$\pounds_n = n \qquad (۱۰)$$

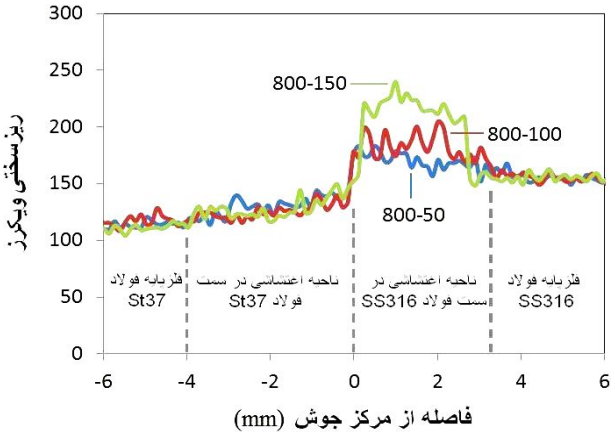
با کاهش اندازه دانه، فاصله میانگین حرکت نابجایی‌ها کاهش می‌یابد و به‌سرعت تجمعی از نابجایی‌ها در مرزدانه‌ها شکل می‌گیرد. توان کرنش سختی هنگامی‌که مسیرهای آزاد حرکت نابجایی‌ها کاهش یابد، کم می‌شود. در نتیجه با کاهش اندازه دانه، ازدیاد طول یکنواخت کاهش یافته، گلویی شدن در اولین مرحله آزمون کشش رخ می‌دهد.

۳-۵-۳- آزمون ریزسختی سنجی

در حالت کلی، سختی معمولاً دلالت بر مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک دارد، بنابراین معرف استحکام موضعی مواد است [۲۵]. شکل ۱۵. توزیع ریزسختی نمونه‌های جوش‌کاری شده را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که در این نمونه‌ها با افزایش سرعت خطی میزان سختی در ناحیه اغتشاشی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در بخش ۳-۴ بحث شد، در این نمونه‌ها با افزایش سرعت خطی، میزان گرمای ورودی کاهش می‌یابد و ساختاری با دانه‌های ریزتر بدست می‌آید.

پژوهش‌ها نشان می‌دهد ریزشدن دانه‌ها موجب افزایش

[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]



شکل ۱۵- توزیع ریزسختی در مقطع عرضی نمونه‌های جوش‌کاری شده

سختی و استحکام مواد می‌شود. تاثیر اندازه دانه بر سختی را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۱ توضیح داد.

$$H = H_0 + kD^{-\frac{1}{2}} \qquad (۱۱)$$

جایی‌که H_0 مربوط به‌سختی ماده با اندازه دانه بی‌نهایت و k عددی ثابت است. رابطه ۱۱ نشان می‌دهد کاهش اندازه دانه باعث افزایش میزان سختی می‌شود. به‌عبارتی دیگر می‌توان مرزدانه را به‌عنوان مانعی در برابر تغییر شکل معرفی کرد [۱۱، ۲۶].

۴- نتیجه گیری

۱- طبق بررسی‌های فازی در فصل مشترک اتصال با وجود اینکه نفوذ عناصر آلیاژی اتفاق افتاده است اما هیچ‌گونه شاهدی از تشکیل کاربید و ترکیبات بین فلزی مشاهده نشد. دلیل تشکیل نشدن این ترکیب‌ها، زمان بسیار کم قرارگیری در دمای بالا است.

۲- نتایج آزمون کشش نشان داد در نمونه‌های جوش‌کاری شده، ضعیف‌ترین بخش اتصال فلز پایه فولاد St ۳۷ بود و شکست از این ناحیه اتفاق افتاد.

۳- نتایج آزمون سوراخ برشی نشان داد نمونه جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm و سرعت خطی ۱۵۰ mm/min بیشینه استحکام برشی نهایی و بیشینه استحکام تسلیم برشی به‌ترتیب برابر با ۶۷۳ ± ۲۴ MPa و ۴۶۸ ± ۱۶ MPa را دارد. با این وجود این نمونه کمترین میزان ازدیاد طول را نشان داد.

۴- نتایج آزمون ریزسختی نیز بیشترین میزان سختی را در ناحیه اغتشاشی سمت فولاد AISI ۳۱۶ نمونه جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm و سرعت خطی ۱۵۰ mm/min نشان داد.

واژه‌نامه

1. gas tungsten arc welding
2. resistance spot welding
3. friction welding
4. laser spot welding
5. electron beam welding
6. friction stir welding
7. the welding institute
8. light metals
9. friction stir lap welding
10. Watanabe
11. retreating side
12. advancing side
13. butt joint
14. shaer punch
15. normalized displacement
16. ultimate shear strength
17. yield shear strength
18. elongation
19. line scan
20. spot
21. Zener-Hollomon
22. Hall-Petch
23. Li
24. Tsuji
25. plastic instability condition
26. work-hardening rate

مراجع

1. Celik, A. and Alsaran, A., “Mechanical and Structural Properties of Similar and Dissimilar Steel Joints”, *Materials Characterization*, Vol. 43, pp. 311-318, 1999.
2. Lippold, J.C. and Kotecki, D.J., *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless steels*,1st ed., Wiley-Interscience, 2005.
3. Arivazhagan, N., Singh, S., Prakash, S. and Reddy, G.M., “Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 Low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Welding”, *Materials & Design*, Vol. 32, pp. 3036-3050, 2011.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]

4. Marashi, P., Pouranvari, M., Amirabdollahian, S., Abedi, A. and Goodarzi, M., "Microstructure and Failure Behavior of Dissimilar Resistance Spot Welds between Low Carbon Galvanized and Austenitic Stainless Steels", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 480, pp. 175-180, 2008.
5. Torkamany, M.J., Sabbaghzadeh, J. and Hamedi, M.J., "Effect of Laser Welding Mode on the Microstructure and Mechanical Performance of Dissimilar Laser Spot Welds between Low Carbon and Austenitic Stainless Steels", *Materials & Design*, Vol. 34, pp. 666-672, 2012.
6. Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., "Friction Stir Welding and Processing", *Materials Science and Engineering: R Reports*, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.
7. Thomas, W.M., Threadgill, P.L. and Nicholas, E.D., "Feasibility of Friction Stir Welding Steel", *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 4, pp. 365-372, 1999.
8. Fazel-Najafabadi, M., Kashani-Bozorg, S.F. and Zarei-Hanzaki, A., "Joining of CP-Ti to 304 Stainless Steel using Friction Stir Welding Technique", *Materials & Design*, Vol. 31, pp. 4800-4807, 2010.
9. Fazel-Najafabadi, M., Kashani-Bozorg, S.F. and Zarei-Hanzaki, A., "Dissimilar Lap Joining of 304 Stainless Steel to CP-Ti Employing Friction Stir Welding", *Materials & Design*, Vol. 32, pp. 1824-1832, 2011.
10. Watanabe, T., Takayama, H. and Yanagisawa, A., "Joining of Aluminum Alloy to Steel by Friction Stir Welding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 178, pp. 342-349, 2006.
11. Jafarzadegan, M., Feng, A.H., Abdollah-zadeh, A., Saeid, T., Shen, J. and Assadi, H., "Microstructural Characterization in Dissimilar Friction Stir Welding between 304 Stainless Steel and St37 Steel", *Materials Characterization*, Vol. 74, pp. 28-41, 2012.
12. Chung, Y.D., Fujii, H., Sun, Y. and Tanigawa, H., "Interface Microstructure Evolution of Dissimilar Friction Stir butt Welded F82H Steel and SUS304", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, pp. 5812-5821, 2011.
13. Bang, H., Bang, H., Jeon, G., Oh, I. and Ro, C., "Gas Tungsten arc Welding Assisted Hybrid Friction Stir Welding of Dissimilar Materials Al6061-T6 aluminum alloy and STS304 stainless steel", *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 48-55, 2012.
14. Guduru, R., Darling, K., Kishore, R., Scattergood, R., Koch, C. and Murty, K., "Evaluation of Mechanical Properties Using Shear–Punch Testing", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 395, pp. 307-314, 2005.
15. Alvani, S., Aashuri, H., Kokabi, A. and Beygi, R., "Semisolid Joining of Aluminum A356 Alloy by Partial Remelting and Mechanical Stirring", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 20, pp. 1792-1798, 2010.
16. Fujii, H., Sun, Y., Kato, H. and Nakata, K., "Investigation of Welding Parameter Dependent Microstructure and Mechanical Properties in Friction Stir Welded Pure Ti Joints", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, pp. 3386-3391, 2010.
17. Miyano, Y., Fujii, H., Sun, Y., Katada, Y., Kuroda, S. and Kamiya, O., "Mechanical Properties of Friction Stir Butt Welds of High Nitrogen-Containing Austenitic Stainless Steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, pp. 2917-2921, 2011.
18. Esmailzadeh, M., Shamanian, M., Kermanpur, A. and Saeid, T., "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Lean Duplex Stainless Steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 561, pp. 486-491, 2013.
19. Saeid, T., Abdollah-Zadeh, A., Assadi, H. and Malek Ghaini, F., "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.
20. Kurt ,B., "The Interface Morphology of Diffusion Bonded Dissimilar Stainless Steel and Medium Carbon Steel Couples", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, pp. 138-141, 2007.
21. Hascalik, A., Unal, E. and Ozdemir, N., "Fatigue Behaviour of AISI 304 Steel to AISI 4340 Steel Welded by Friction Welding", *Journal of Materials Science*, Vol. 41, pp. 3233-3239, 2006.
22. Lienert, T.J., Stellwag, W.L., Grimmett, B.B. and Warke, R.W., "Friction Stir Welding Studies on Mild Steel", *Welding Journal*, Vol.1, pp. 1-9, 2003.
23. Nandan, R., DebRoy, T. and Bhadeshia, H.K.D.H., "Recent Advances in Friction-Stir Welding- Process, Weldment Structure and Properties", *Progress in Materials Science*, Vol. 53, pp. 980-1023, 2008.
24. Rollett, A., Humphreys, F.J. and Rohrer, G.S., *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, 2nd ed., Elsevier Science, 2004.
25. Dieter, G.E., *Mechanical Metallurgy*, 2nd ed., McGraw-Hill Book Company, 1988.
26. Di Schino, A., Barteri, M. and Kenny, J., "Effects of Grain Size on the Properties of a Low Nickel Austenitic Stainless Steel", *Journal of Materials Science*, Vol. 38, pp. 4725-4733, 2003.
27. Tsuji, N., Ito, Y., Saito, Y. and Minamino, Y., "Strength and Ductility of Ultrafine Grained Aluminum and Iron Produced by ARB and Annealing", *Scripta Materialia*, Vol. 47, pp. 893-899, 2002.
28. Fujii, H., Cui, L., Tsuji, N., Maeda, M., Nakata, K., and Nogi, K., "Frictionstir Welding of Carbon Steels", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 429, pp. 50-57, 2006.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1394.34.2.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jame.34.2.89]