

جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI304 و فولاد کم کربن AISI1008: ارتباط مشخصه‌های ماکرو و میکروساختاری و خواص مکانیکی

مجید پورانوری^{۱*} و پیروز مرعشی^۲

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

*mpouranvari@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۷/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۹/۲۸)

چکیده

پژوهش حاضر به بررسی ارتباط مشخصه‌های ماکرو و میکروساختاری با خواص مکانیکی در جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد زنگ‌نزن آستنیتی (SS) به فولاد کم کربن (CS) می‌پردازد. بررسی‌های ماکروساختاری و ریزساختاری، ریزسختی‌سنجی، آزمون کشش-برش بر روی اتصالات ایجاد شده انجام گردید. نشان داده شد ریزساختار محل اتصال بسته به میزان اختلاط دو فلز پایه (درجه رقت) وابسته می‌باشد که خود تابع جریان جوشکاری می‌باشد و از ساختاری شامل آستنیت، فریت و مارتنزیت تا ساختار کاملاً مارتنزیتی تغییر می‌کند. اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در طرف CS تعیین‌کننده‌ی کارایی مکانیکی اتصال SS/CS است و یک رابطه‌ی تقریباً خطی بین اندازه‌ی دکمه‌ی جوش و خواص مکانیکی (استحکام و انرژی شکست) وجود دارد. به طور کلی با افزایش جریان جوشکاری، ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی جوش‌های نقطه‌ای در آزمایش کشش-برش افزایش می‌یابد، اما با وقوع بیرون‌زدگی مذاب (در جریان‌های جوشکاری بیش از ۱۲ کیلوآمپر) انرژی شکست به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی:

جوش مقاومتی نقطه‌ای، جوشکاری فلزات ناهمجنس، ریزساختار، شکست.

۱- مقدمه

موضعی به وسیله حرارت ناشی از مقاومت الکتریکی فلزات در برابر عبور جریان الکتریکی تأمین می‌شود. نیروی الکتروود نیز به منظور تماس مناسب بین قطعات اعمال می‌شود. پس از شکل‌گیری منطقه‌ی مذاب، اجازه داده می‌شود تا دکمه‌ی تشکیل شده تحت فشار الکتروود آبگرد مسی سرد شود. مهمترین متغیرهای فرآیند RSW، جریان جوشکاری، زمان جوشکاری، نیروی الکتروود و زمان نگهداری الکتروود پس از قطع جریان

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اصلی‌ترین فرآیند در اتصال ورق‌های فلزی به ویژه در صنعت خودروسازی است. هر خودروی امروزی بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای دارند. کیفیت و رفتار مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای به طور قابل توجهی قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱]. در این روش حرارت مورد نیاز برای ذوب

می‌گیرند. بنابراین برای بررسی رفتار شکست جوش‌های نقطه‌ای از آزمایش‌های مختلفی از جمله آزمایش کشش-برش^۳، کشش متقاطع^۴ و کندگی مبلمانی^۵ استفاده می‌شود.

عمده تحقیقات موجود در مورد جوش‌های نقطه‌ای در مورد اتصالات مشابه صورت گرفته‌اند. اما در بسیاری از موارد به منظور دستیابی به نیازمندی‌های ویژه‌ای، اتصالات نامشابه در بدنه خودرو کاربرد دارد. در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای دو فلز ناهمجنس، به علت تفاوت خواص فیزیکی دو فلز، هر جزء یک سیکل حرارتی متفاوت تجربه می‌کند. یکی از مشخصه‌های دکه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، نامتقارن بودن شکل دکه جوش است. تشکیل و رشد دکه جوش در RSW به وسیله مقاومت الکتریکی و هدایت حرارتی کنترل می‌شود. در واقع تفاوت خواص الکتریکی و حرارتی منجر به اعمال شدن سیکل‌های حرارتی متفاوتی در دو فلز می‌شود. اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فولاد ساده کم کربن از جمله اتصالاتی است که در بدنه خودرو کاربرد دارد. در سال‌های اخیر محققین مختلفی در مورد اتصال نامتجانس فولادهای زنگ‌نزن به سایر فولادها پژوهش کرده‌اند. ورال^۶ و آکوس^۷ [۸] اتصال نامتجانس یک فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و یک فولاد عاری از عناصر بین‌نشین (IF)^۸ گالوانیزه را مورد بررسی قرار داده‌اند. بر طبق گزارش آن‌ها با افزایش قطر دکه، به علت افزایش سطح تحمل نیرو، قابلیت تحمل نیرو در اتصالات زیاد می‌شود. بر طبق مشاهدات آنان سختی دکه جوش با تغییرات پارامترهای جوشکاری تغییر نمی‌کند. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش قطر دکه جوش به دلیل افزایش سطح تحمل نیرو و همچنین کاهش میزان تمرکز تنش، موجب افزایش عمر خستگی اتصال می‌شود. حسن باسوگلو^۹ و کاکار^{۱۰} [۹] اتصال مقاومتی نقطه‌ای نامشابه فولاد L ۳۱۶ به فولاد IF 7114 را بررسی کردند. در این تحقیق ماکروساختار، پروفیل سختی و استحکام اتصال در سه جریان جوشکاری بررسی شد اما توجه چندانی به ریزساختار محل اتصال نشد. آلونوس^{۱۱} و همکارانش [۱۰] اتصال فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی (304 و 301LN) و فولادهای کم

می‌باشد [۲].

وجود حتی یک یا دو جوش نقطه‌ای معیوب در محل‌های بحرانی خودرو می‌تواند سلامت سازه‌ای خودرو را تحت تأثیر قرار دهد و بنابراین تا حد امکان باید از تشکیل چنین جوش‌هایی جلوگیری کرد. این امر به همراه عدم اطمینان از کیفیت جوش‌های نقطه‌ای به دلیل وجود نداشتن یک روش بازرسی غیر مخرب دقیق، موجب می‌شود تا برای مثال قسمت‌های مختلف اتومبیل در حدود ۳۰ درصد بیش از حد جوش داده شوند. هزینه چشمگیر مربوط به این جوش‌های اضافی (بیش از حد مورد نیاز بر اساس محاسبات تنش)، نیروی محرکه‌ی قابل توجهی برای بهینه‌سازی این فرآیند فراهم می‌آورد. به همین دلیل تلاش‌های زیادی برای به حداقل رساندن تعداد جوش‌های نقطه‌ای انجام می‌شود [۳].

به طور کلی از سه معیار برای ارزیابی کیفیت جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای استفاده می‌شود:

الف) اندازه دکه جوش:

اندازه دکه جوش به صورت پهنای منطقه ذوب شده در فصل مشترک ورق/ ورق در جهت طولی تعریف می‌شود و مهمترین پارامتر کنترل‌کننده کیفیت جوش است.

ب) مود شکست:

مود شکست جوش‌های نقطه‌ای یک معیار کیفی از کیفیت جوش است. به طور کلی، جوش‌های نقطه‌ای در دو مود فصل مشترکی (IF)^۱ و محیطی (PF)^۲ دچار شکست می‌شوند. از آنجایی که ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی در مود فصل مشترکی به طور قابل توجهی کم‌تر از مود محیطی است، بنابراین برای اینکه جوش‌های نقطه‌ای در حین سرویس دچار تخریب زودرس نشوند، متغیرهای فرآیند باید به گونه‌ای تنظیم شوند که از دستیابی به مود شکست محیطی اطمینان حاصل گردد [۴-۷].

ج) کارایی مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای:

در عمل جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای تحت بارگذاری‌های کششی، برشی، خمشی، پیچشی و یا مخلوطی از این‌ها قرار

جدول (۱): ترکیب شیمیایی ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فولاد کم کربن مورد استفاده در این پژوهش و ترکیب شیمیایی دکمه جوش در دو درجه رقت.

Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Nb
SS	۰/۰۳۵	۱/۰۸	۰/۳۸۸	۱۸/۴۷	۹	۰/۵۶۱	۰/۰۱۶
CS	۰/۰۶۵	۰/۴۰۴	۰/۰۹۵	۰/۰۱۷	۰/۰۳۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱
^{۱۲} FZ (D = %۴۰)	۰/۰۴۷	۰/۸۰۹	۰/۲۷	۱۱/۰۸	۵/۴۱	۰/۳۳۸	۰/۰۱
FZ (D = %۱۰)	۰/۰۳۸	۱/۰۱	۰/۳۵۸	۱۶/۶۲	۸/۱	۰/۵	۰/۰۱۴

جدول (۲): متغیرهای جوشکاری مورد استفاده در این تحقیق.

جریان جوشکاری	۷ تا ۱۴ کیلو آمپر
زمان جوشکاری	۱۲ سیکل
نیروی الکتروود	۴/۲ سیکل
زمان اعمال فشار الکتروود روی نمونه پیش از اعمال جریان	۵۰ سیکل
زمان نگهداری الکتروود پس از قطع جریان	۳۰ سیکل

کوانتومتری تعیین و در جدول (۱) آورده شده است.

۲-۲- فرآیند جوشکاری

جوشکاری توسط دستگاه جوش نقطه‌ای ثابت^{۱۳} با توان ۱۲۰kVA ساخت شرکت نوین‌سازان انجام شد. این دستگاه قابلیت تنظیم دیجیتالی تمامی متغیرهای جوشکاری نقطه‌ای را دارا می‌باشد.

برای جوش دادن نمونه‌ها از الکتروود گروه A، مطابق کلاس ۲ دسته‌بندی RWMA استفاده شد. جنس این الکتروود از آلیاژ مس-کرم-زیرکونیوم و شکل آن به صورت مخروط ناقص با قطر تماس ۷ میلی‌متر است.

در این پروژه، متغیرهای جوشکاری به صورت مقادیر داده شده در جدول (۲) در نظر گرفته شدند.

در هر جریان ۴ سری نمونه جوش داده شد که ۳ سری برای آزمایش کشش-برش و یک نمونه‌ی دیگر برای بررسی‌های ساختاری مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۳- آزمایش کشش-برش

آزمایش کشش-برش به وسیله دستگاه آزمایش کشش^{۱۴} و با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. ابعاد نمونه‌های آزمایش

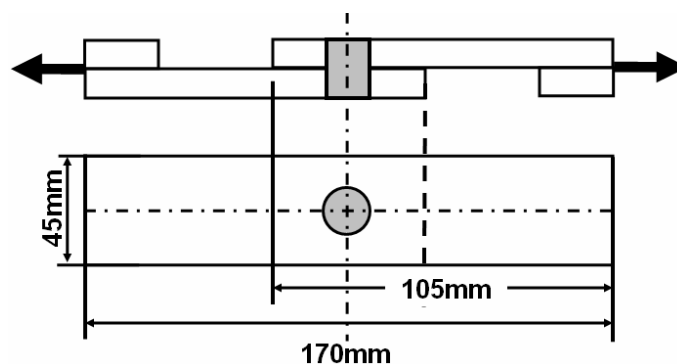
کربن غیر زنگ‌نزن (DX54DZ, FeP06GZ, ZStE260BH) را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها استحکام اتصال نامتجانس را وابسته به استحکام و ضخامت ورق‌های فولاد کم کربن دانستند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که ریزساختار اتصال یک ریزساختار مارتنزیتی است که این امر منجر به حساسیت به تردی هیدروژنی این اتصالات در محلول‌های کلریدی می‌شود.

این پژوهش به منظور بررسی جامع‌تر جوش‌پذیری، رفتار مکانیکی و رفتار شکست در اتصال ناهمجنس فولاد زنگ‌نزن و فولاد کم کربن انجام شده است. در این مقاله مشخصه‌های ساختاری این اتصال ناهمجنس بررسی و ارتباط آن با خواص مکانیکی تحلیل شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- فلز پایه‌ها

در این تحقیق از دو ورق متفاوت استفاده شد. یکی ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ (SS) با ضخامت ۱/۲ میلی‌متر و دیگری ورق فولادی کم کربن گالوانیزه شده (CS) به روش غوطه‌وری گرم با ضخامت ۱/۱ میلی‌متر. ترکیب شیمیایی ورق‌ها به روش



شکل (۱): ابعاد آزمایش کشش - برش.

شامل دکمه‌ی جوش (FZ)، منطقه‌ی متأثر از حرارت (HAZ) و فلزات پایه (BM) را پوشش دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ماکرو ساختار جوش

شکل (۲) ماکروساختار اتصال جوش نقطه‌ای ورق فولادی کم کربن و ورق فولاد زنگ‌نزن آستنی‌تی را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، محل اتصال از سه منطقه ریزساختاری مختلف تشکیل شده است:

- ۱- دکمه جوش (WN) یا منطقه ذوب شده (FZ): منطقه‌ای که در حین جوشکاری ذوب و دوباره منجمد شده است. ساختار ریختگی دکمه جوش مؤید این مطلب است.
- ۲- منطقه متأثر از حرارت (HAZ): که در حین جوشکاری ذوب نشده اما دچار تغییرات ریزساختاری شده است.
- ۳- فلز پایه

دکمه جوش دو مشخصه ساختاری مهم در اتصال نامتجانس فولاد زنگ‌نزن به فولاد گالوانیزه دارد:

- (۱) نامتقارن بودن دکمه جوش است، به طوری که قطر دکمه جوش در سمت فولاد زنگ‌نزن بیشتر است. با توجه به اینکه ترکیب شیمیایی فلزهای پایه متفاوت است، خواص فیزیکی آن‌ها یکسان نخواهد بود. در نتیجه به علت تفاوت مقاومت الکتریکی دو جزء فولاد زنگ‌نزن و فولاد کربنی، این دو جزء حین فرآیند جوشکاری سیکل حرارتی متفاوتی را تجربه

کشش - برش طبق استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 تهیه شدند [۱۱]. شکل و ابعاد نمونه‌های آزمایش کشش - برش در شکل (۱) آمده است.

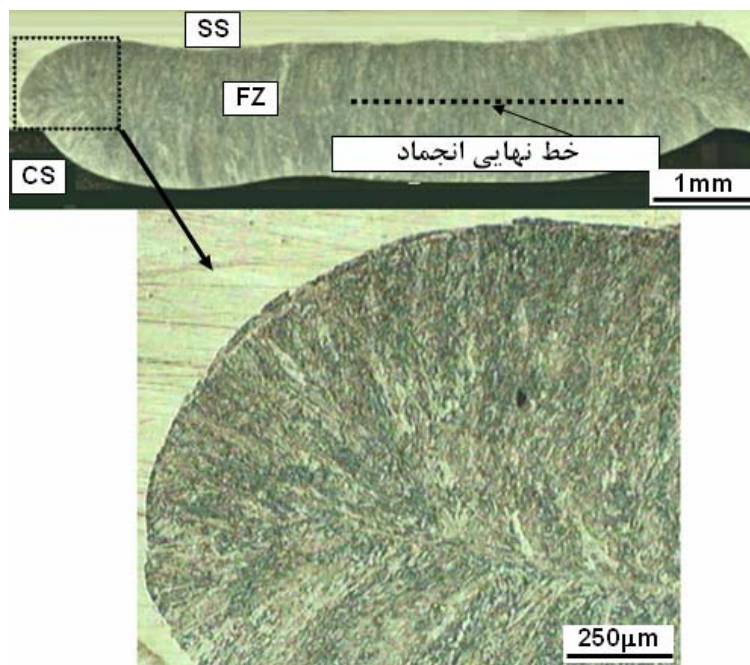
برای کاهش چرخش نمونه و اعمال تنش‌های ترکیبی به نمونه در حین انجام آزمایش کشش - برش از یک لایه فلزی با ضخامت یکسان با ضخامت ورق مصرفی، در انتهای نمونه‌ها استفاده شد. مود شکست نمونه‌ها حین آزمایش کشش - برش ثبت شد.

۲-۴- بررسی‌های ساختاری

برای بررسی ماکرو ساختاری نمونه‌ها پس از انجام عملیات مرسوم آماده‌سازی نمونه برای متالوگرافی شامل سنباده‌زنی و پولیش، نمونه‌ها توسط محلول ویللا^{۱۵} اچ شده و از تمامی نمونه‌ها عکس ماکرو تهیه شد. برای انجام بررسی‌های میکرو ساختاری پس از انجام عملیات مرسوم آماده‌سازی نمونه برای متالوگرافی، ابتدا نمونه‌ها را با محلول نایتال ۲ درصد اچ کرده و از ریزساختار قسمت فولاد کم کربن گالوانیزه عکس تهیه شد. سپس نمونه‌ها مجدداً پولیش شده و توسط محلول ماربل^{۱۶} اچ شدند، ریزساختار دکمه جوش و ورق زنگ‌نزن بررسی شد.

۲-۵- آزمون ریزسختی سنجی

آزمون ریزسختی سنجی توسط دستگاه ریزسختی سنج شیمیدزو با نیروی ۱۰۰ گرم در امتداد قطر دکمه‌ی جوش انجام شد. امتداد قطری بگونه‌ای انتخاب شد که مناطق مختلف ریزساختاری



شکل (۲): ماکرو ساختار و میکرو ساختار محل اتصال ناهمجنس (CS: فولاد گالوانیزه، SS: فولاد زنگ‌نزن).

باشد زیرا فولاد کم کربن به دلیل داشتن رسانایی بیشتر سرعت انجماد بالاتری خواهد داشت و خط پایان انجماد در سمت فولاد زنگ‌نزن پیشروی بیشتری می‌کند. در این حالت ماکزیمم قطر دکمه‌ی جوش در ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی به وجود می‌آید و نه در جایی که لازم است (یعنی فصل مشترک ورق/ورق). به عبارت دیگر این امر موجب کاهش قطر دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ورق می‌شود. از آنجایی که خواص مکانیکی اتصال با قطر دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ورق کنترل می‌شود، نامتقارن بودن دکمه‌ی جوش می‌تواند موجب افت خواص مکانیکی اتصالات ناهمجنس شود. برای رفع این مشکل می‌توان با استفاده از الکترودی با سطح تماس کمتر و یا هدایت گرمایی و الکتریکی کمتر در تماس با فولاد کم کربن موجب برقراری توازن حرارتی در دو ورق شد. این امر تشکیل یک دکمه جوش متقارن و در نتیجه قرارگیری خط پایان انجماد در فصل مشترک ورق/ورق را در پی خواهد داشت.

می‌کنند. مقادیر مقاومت الکتریکی برای فولاد زنگ‌نزن آستنیتی در حدود $72 \mu\Omega\text{cm}$ [۱۲] و برای فولاد کربنی ساده در حدود $12 \mu\Omega\text{cm}$ [۱۲] گزارش شده‌اند. از آنجایی که مهمترین پارامتر کنترل‌کننده تشکیل دکمه جوش در این فرآیند، مقاومت الکتریکی می‌باشد، دکمه جوش تشکیل شده نامتقارن خواهد بود. نامتقارن بودن شکل دکمه جوش را می‌توان با استفاده از الکترودهایی با قطر مختلف برطرف کرد.

(۲) در اتصالات جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های هم جنس با ضخامت یکسان، خط انجماد نهایی یا خط مرکز جوش، یعنی محلی که در آن انجماد پایان می‌یابد که متناظر با محل تقاطع دانه‌های ستونی در دکمه‌ی جوش است، در فصل مشترک ورق/ورق قرار دارد. اما همان طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود، در مورد اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد زنگ‌نزن به فولاد معمولی، محل خط انجماد نهایی در فصل مشترک ورق/ورق قرار ندارد بلکه به طرف ورق زنگ‌نزن آستنیتی جابجا شده است. علت آن می‌تواند وجود الکترودهای مشابه

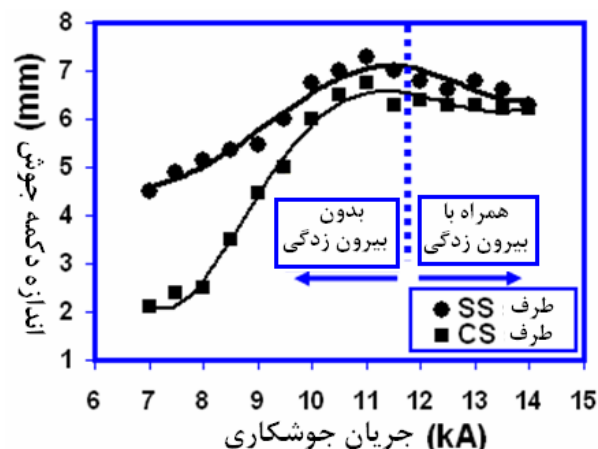
محل اتصال در دو طرف فولاد کربنی و فولاد زنگ‌نزن اندازه گیری شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در جریان‌های پایین مقدار فرورفتگی الکتروود در ورق صفر است، اما با افزایش بیشتر جریان جوشکاری و نرم شدن ماده زیر الکتروود در اثر اعمال فشار، مقدار فرورفتگی الکتروود زیاد می‌شود. با وقوع بیرون‌زدگی مذاب این مقدار به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۳-۳- مشخصه‌های ریزساختاری دکمه جوش (FZ)

ریزساختار منطقه ذوب شده در اتصالات ناهمجنس تابع میزان مخلوط شدن و درجه رقت دو فلز پایه است. میزان رقت نیز تابع مقدار حرارت تولیدی در محل اتصال است که این نیز به نوبه‌ی خود تابع پارامترهای جوشکاری از جمله جریان جوشکاری است. در کار حاضر مشاهده شده که جریان جوشکاری تأثیر قابل توجهی بر ریزساختار FZ دارد.

ریزساختار دکمه جوش در اتصالات نامتجانس فولاد زنگ‌نزن به فولاد کربنی را می‌توان با استفاده از دیاگرام‌های شیفلر [۱۲] پیش‌بینی کرد. اگر چه استفاده از دیاگرام شیفلر برای پیش‌بینی ریزساختار در روش‌های جوشکاری با سرعت سرد شدن بالا، ممکن است دقیق نباشد اما برای یک تخمین اولیه مناسب است [۱۲]. همانطور که در شکل‌های (۲) و (۴) مشخص است، سهم فولاد زنگ‌نزن در دکمه جوش بیشتر از سهم فولاد کم کربن است. در اینجا برای بررسی ریزساختار دکمه جوش با استفاده از دیاگرام شیفلر پارامتری به نام درجه رقت به صورت نسبت حجم فولاد ساده کم کربن به حجم کل دکمه جوش تعریف شد. با استفاده از تصاویر متالوگرافی و محاسبه مساحت دکمه در قسمت فولاد کم کربن و همچنین حجم کل دکمه جوش این نسبت تعیین شد.

شکل (۶) ارتباط جریان جوشکاری با درجه رقت و ریزساختار دکمه جوش را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش جریان جوشکاری درجه رقت افزایش می‌یابد اما افزایش جریان جوشکاری بیش از ۸ کیلو آمپر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر درجه رقت ندارد به طوری که در جریان‌های جوشکاری بین

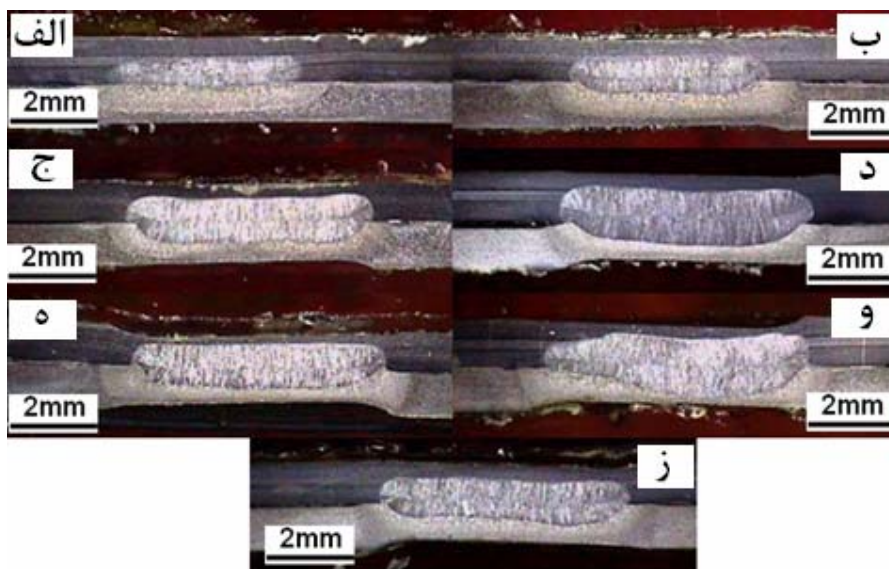


شکل (۳): تغییرات اندازه دکمه جوش در دو طرف SS و GS.

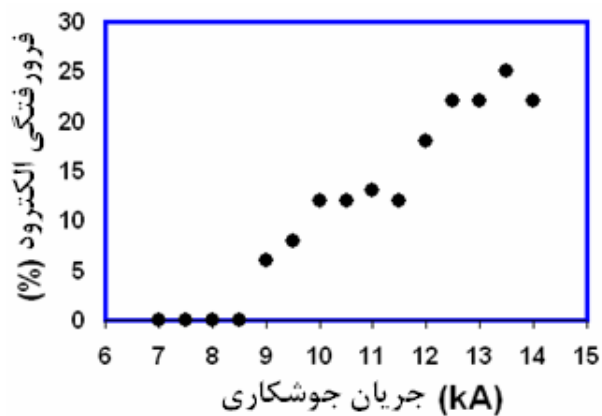
۳-۲- تأثیر جریان جوشکاری بر مشخصه‌های ماکرو ساختاری دکمه جوش

مشخصه‌های هندسی دکمه جوش مهمترین فاکتور کنترل‌کننده رفتار مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای است. مشخصه‌های هندسی دکمه جوش شدیداً تابع سیکل حرارتی فرآیند جوشکاری می‌باشد که در درجه اول به وسیله پارامترهای جوشکاری کنترل می‌شود. شکل (۳) تغییرات قطر دکمه جوش در دو طرف فولاد زنگ‌نزن و فولاد گالوانیزه را بر حسب جریان جوشکاری نشان می‌دهد. شکل (۴) ماکرو ساختار جوش در جریان‌های جوشکاری مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود به طور کلی با افزایش جریان جوشکاری قطر دکمه جوش و عمق نفوذ جوش افزایش می‌یابد. حجم مذاب در دکمه جوش تابعی از حرارت ورودی جوشکاری است. با افزایش جریان جوش حرارت ورودی افزایش یافته و در نتیجه دکمه جوش بزرگتر می‌شود. اما در جریان‌های جوشکاری بالاتر از ۱۲ کیلو آمپر، به علت بیرون‌زدگی مذاب و تلفات حرارتی ناشی از آن قطر دکمه جوش ثابت و حتی در برخی موارد کاهش می‌یابد.

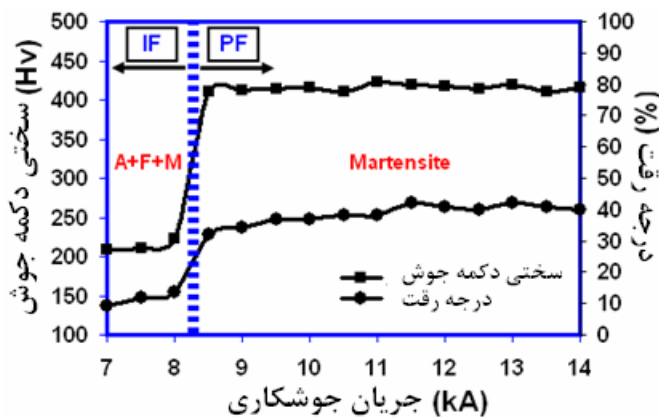
یکی دیگر از فاکتورهای تأثیرگذار بر کیفیت جوش‌های نقطه‌ای میزان فرورفتگی الکتروود در ورق است. شکل (۵) تأثیر جریان جوشکاری بر میزان فرورفتگی الکتروود در ورق را نشان می‌دهد. فرورفتگی الکتروود بر حسب میانگین درصد کاهش ضخامت



شکل (۴): تغییرات مشخصه‌های هندسی دکمه‌ی جوش با افزایش جریان جوشکاری، الف) ۸ (ب) ۹، ج) ۱۰، د) ۱۱، ه) ۱۲، و) ۱۳ و ز) ۱۴ کیلو آمپر.

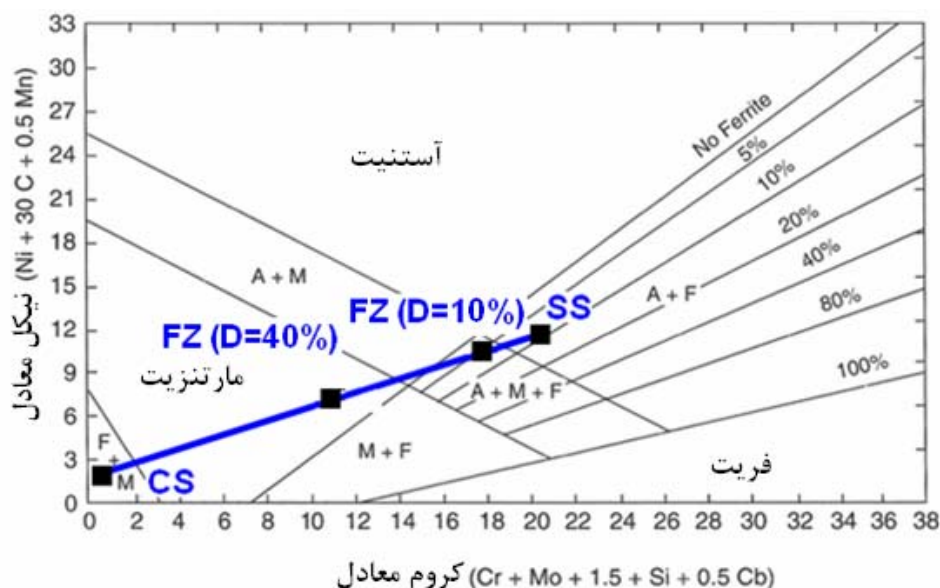


شکل (۵): تأثیر جریان جوشکاری بر درصد فرو رفتگی الکترود در ورق.



شکل (۶): ارتباط جریان جوشکاری با درجه رقت، ریزساختار FZ، سختی FZ و

مود شکست جوش‌های نقطه‌ای SS/CS.



شکل (۷): دیاگرام شیفلر، پیش‌بینی ریزساختار دکمه جوش حاصل از اتصال نامتجانس فولاد زنگ‌نزن به فولاد کم کربن، هنگامی که سهم فولاد زنگ‌نزن در دکمه جوش حدود ۱۰ درصد و ۴۰ درصد باشد.

ریزساختار آستنیت + فریت + مارتنزیت قابل پیش‌بینی است (شکل ۷). ریزساختار FZ در جریان ۸ کیلو آمپر در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ریزساختار متشکل از دندریتهای آستنیت به همراه فریت است. فاز مارتنزیت در دکمه جوش با استفاده از میکروسکوپی نوری قابل مشاهده نبود. احتمالاً، همانطور که از موقعیت دکمه جوش در دیاگرام شیفلر مشخص است مقدار مارتنزیت در دکمه جوش در این شرایط جوشکاری باید بسیار کم باشد.

در اینجا مناسب است برای تحلیل تشکیل مارتنزیت از روابط و نمودار سلف و همکارانش [۱۳] استفاده شود. آنها با استفاده از آنالیز رگرسیون آماری داده‌های ۱۶ محقق مختلف، یک عبارت برای تعیین دمای شروع مارتنزیت بر حسب ترکیب شیمیایی آلیاژ به دست آوردند.

$$M_s = 526 - 12.5Cr - 17.4Ni - 29.7Mn - 31.7Si - 354C - 20.8Mo - 1.34(CrNi) + 22.41(Cr+Mo)C \quad (1)$$

با محاسبه دمای شروع مارتنزیت برای دو درجه رقت مختلف $D = 10\%$ و $D = 40\%$ ابتدا درصد عناصر آلیاژی در FZ محاسبه شد (جدول ۱). بر اساس رابطه بالا دمای تشکیل مارتنزیت وقتی که درجه رقت 10% باشد (در جریان‌های کم)، برابر 53°C درجه

۸/۵ تا ۱۴ کیلو آمپر درجه رقت حدود ۴۰ درصد است. در ادامه ریزساختار FZ در دو حالت الف) جریان‌های جوشکاری بالای ۸ کیلو آمپر و ب) جریان‌های جوشکاری کمتر از ۸/۵ کیلو آمپر مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد، در این دو محدوده از جریان جوشکاری ریزساختارهای کاملاً متفاوتی در FZ دیده شد.

۳-۱-۳-۳-۱- ریزساختار FZ در جریان‌های جوشکاری بالاتر از ۸ کیلو آمپر

شکل (۲-ب) ریزساختار دکمه جوش ایجاد شده در جریان جوشکاری ۱۰ کیلو آمپر را نشان می‌دهد. ریزساختار دکمه جوش مارتنزیتی است. در مورد اتصال ایجاد شده در جریان جوشکاری ۱۰ کیلو آمپر درجه رقت برابر 40% به دست آمد. با در نظر گرفتن این درجه رقت و محاسبه کروم معادل و نیکل معادل دکمه جوش، ساختار دکمه جوش در منطقه کاملاً مارتنزیتی قرار می‌گیرد (شکل ۷).

۳-۳-۲-۳-۲- ریزساختار FZ در جریان‌های جوشکاری کمتر از ۸/۵ کیلو آمپر

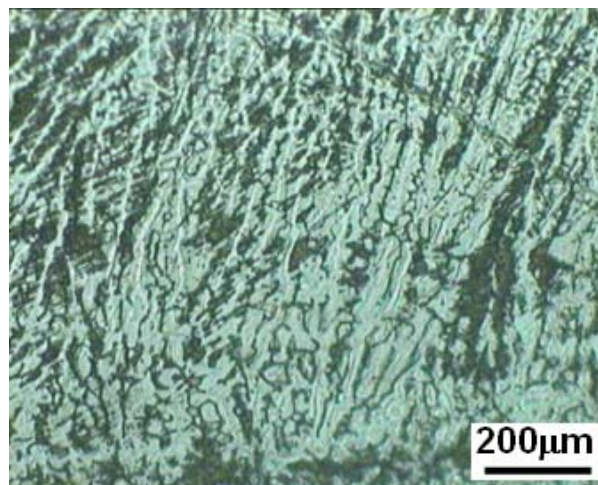
درجه رقت در جریان‌های جوشکاری کمتر از ۸/۵ کیلو آمپر بین ۸ تا ۱۳ درصد متغیر است. بر اساس دیاگرام شیفلر یک

در مجاورت مرز جوش (محل ه و محل و) متشکل از لایه‌های مارتنزیت و فریت‌های ویدمنشتاتن و مرزدانه‌ای است.

تشکیل مارتنزیت در HAZ یک فولاد کم کربن نشان‌دهنده سرعت سرد شدن بسیار بالای این فرآیند می‌باشد. تشکیل مارتنزیت در جوش نقطه‌ای فولادهای کم کربن (با کربن کمتر از ۰/۱ درصد) توسط بسیاری از محققان گزارش شده است [۱۷-۱۵]. سرعت سرد شدن در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در مقایسه با سرعت سرد شدن در دیگر فرآیندهای اتصال از جمله جوشکاری‌های قوسی، جوشکاری پرتوالکترونی و جوشکاری لیزر بالاتر است. ولگر^{۱۷} [۱۸] گزارش کرد، سرعت سرد شدن در RSW هنگامی که زمان نگهداری صفر باشد، به $1000^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ می‌رسد. با افزایش زمان نگهداری به علت اثر کوینچ الکترودهای مسی، سرعت سرد شدن تا بیشتر از $10000^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ می‌رسد. این سرعت سرد شدن در دیگر فرآیندهای اتصال به وجود نمی‌آید. این سرعت بالای سرد شدن ناشی از حضور الکترودهای آبگرد مسی و اثر کوینچ آنها و همچنین زمان کوتاه سیکل حرارتی اعمال شده بر محل اتصال است. گولد و همکارانش [۱۷] مدلی تحلیلی برای تخمین سرعت سرد شدن در جوش‌های مقاومتی ارائه دادند. بنا بر مدل آنها سرعت سرد شدن برای یک ورق به ضخامت $1/2\text{ mm}$ ، حدود 8000 درجه سانتی‌گراد بر ثانیه تخمین زده می‌شود [۱۷]. مقدار سرعت سرد شدن بحرانی برای تشکیل مارتنزیت در فولادها را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد [۱۹]:

$$\text{Log } v = 7.42 - 3.13C - 0.71Mn - 0.37Ni - 0.34Cr - 0.45Mo \quad (2)$$

که در آن C ، Mn و ... ترکیب شیمیایی دکمه جوش و v سرعت سرد شدن بر حسب درجه سانتی‌گراد بر ساعت است. با توجه به ترکیب شیمیایی محاسبه شده، سرعت سرد شدن بحرانی برای تشکیل مارتنزیت در دکمه جوش برابر 2375 درجه سانتی‌گراد بر ثانیه محاسبه می‌شود. از آنجایی که سرعت سرد شدن تجربه شده حین جوشکاری ورق فولادی به ضخامت $1/2$ میلی‌متر بیشتر از سرعت سرد شدن بحرانی است، انتظار می‌رود مارتنزیت

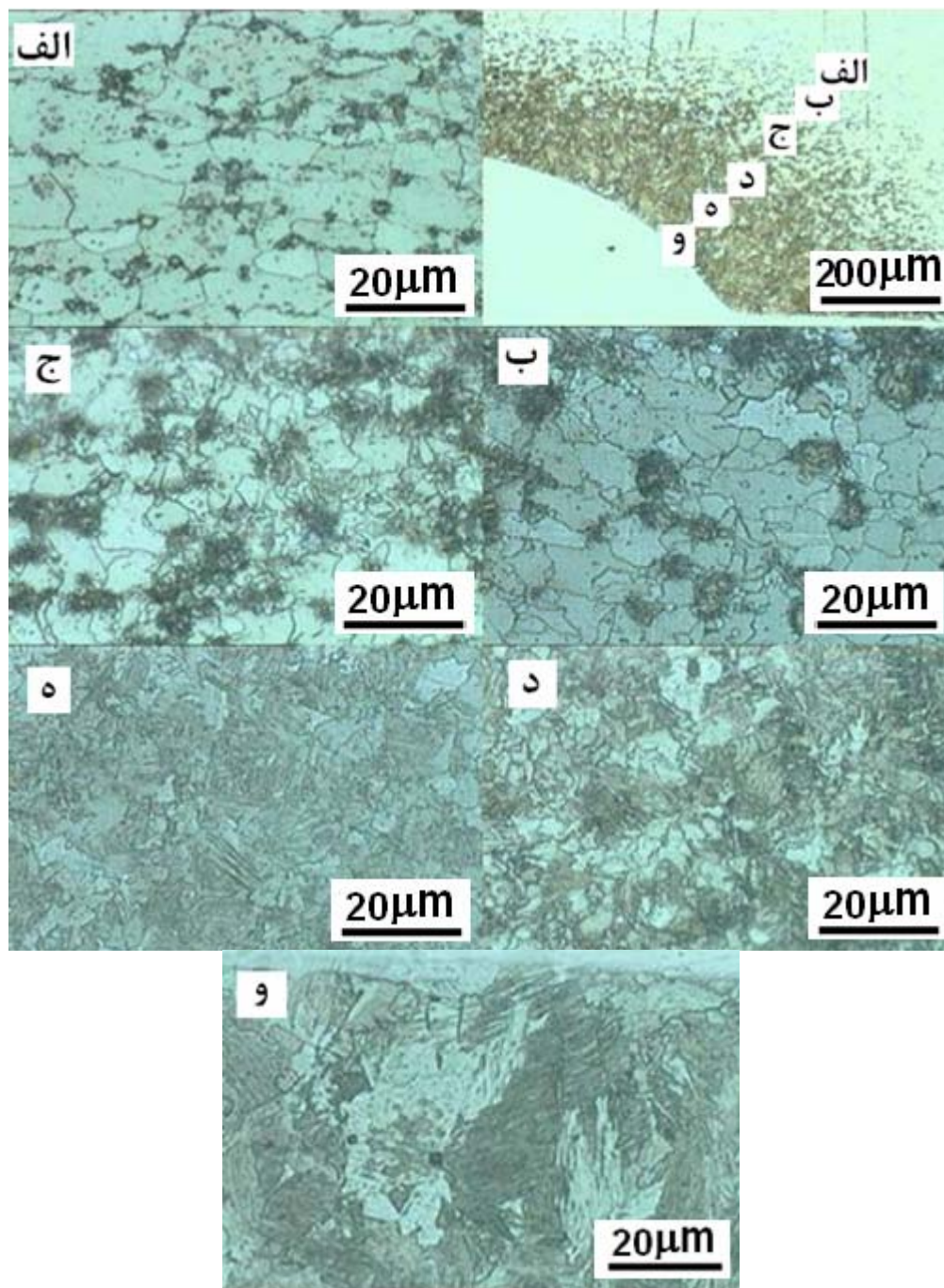


شکل (۸): ریزساختار دکمه جوش در جریان ۸ کیلو آمپر.

سانتی‌گراد محاسبه شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ساختار FZ در دمای اتاق حاوی مارتنزیت نیست. این مطلب نیز در ریزساختار تشکیل شده در این شرایط جوشکاری مشاهده شد. اما وقتی که درجه رقت 40% باشد (در جریان‌های بالاتر از ۸ کیلو آمپر)، دمای شروع تشکیل مارتنزیت برابر 169 درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ساختار FZ در دمای اتاق حاوی مارتنزیت خواهد بود که این امر در ریزساختار این جوش مشاهده شد.

۳-۴- ریزساختار HAZ

۳-۴-۱- ریزساختار HAZ در طرف فولاد کم کربن
شکل (۹) گرادیان شدید ریزساختاری در HAZ سمت ورق فولاد کم کربن نشان داده شده است. گرادیان شدید ریزساختاری در HAZ ناشی از گرادیان شدید سرعت سرد شدن است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با حرکت از فلز پایه به سمت مرز ذوب (محل‌های الف، ب و ج) مقدار کلونی‌های پرلیت افزایش می‌یابد. این امر را می‌توان به افزایش سرعت سرد شدن و در نتیجه افزایش تحت تبرید برای تشکیل پرلیت وابسته کرد. نشان داده شده است که با افزایش سرعت سرد شدن در یک فولاد درصد پرلیت افزایش می‌یابد [۱۴]. به مرور فازهای دیگری از جمله مارتنزیت و فریت ویدمنشتاتن نیز تشکیل می‌شود (محل د). همانطور که نشان داده شده است ریزساختار



شکل (۹): گرادیان ریزساختاری در HAZ طرف فولاد ساده کم کربن.

۳-۴-۲- ریزساختار HAZ و PMZ^{18} در طرف فولاد زنگ‌نزن آستنیتی از آنجایی که فولادهای آستنیتی استحاله‌ناپذیر می‌باشند، HAZ این فولادها حین جوشکاری تغییرات فازی تجربه نمی‌کنند. اما مقداری رشد دانه در این منطقه مشاهده شد. به علت سرعت سرد

به طور قابل توجهی در HAZ تشکیل شود. همانطور که مشاهده شد، ریزساختار HAZ در مجاورت مرز ذوب مقادیر زیادی مارتنزیت دارد. باید توجه داشت که رشد دانه‌ای در مجاورت FZ موجب افزایش سختی‌پذیری فولاد در آن قسمت می‌شود.

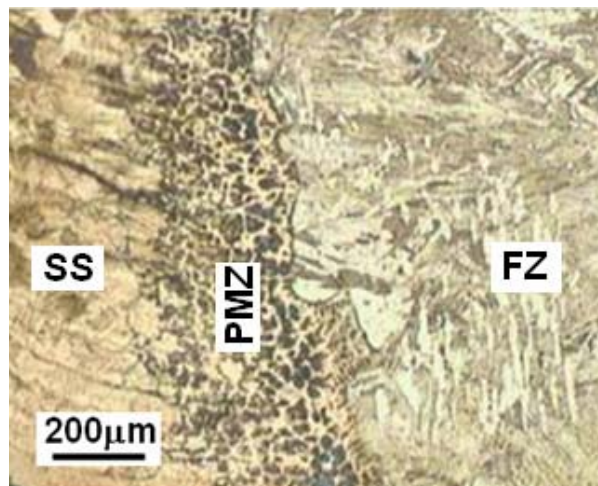
جوشکاری دو نوع پروفیل سختی متفاوت مشاهده شد.

۳-۵-۱- پروفیل سختی در جریان‌های بالاتر از ۸ kA

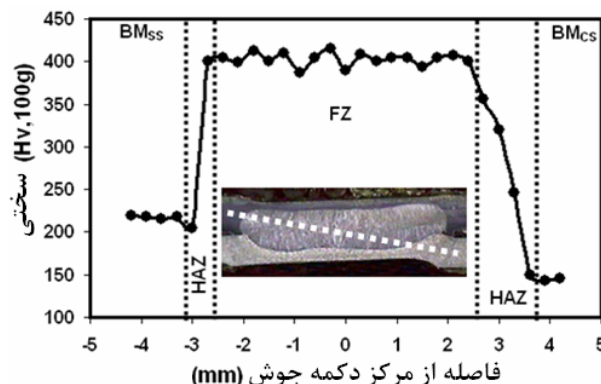
پروفیل سختی در امتداد قطری در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود سختی در داخل دکمه در راستای قطر دکمه جوش تقریباً ثابت است و با رسیدن به مرز فولاد کم کربن افت می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌شود، سختی فلز جوش حدود ۱/۹ برابر سختی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و حدود ۲/۸ برابر سختی فولاد کم کربن است.

سختی بالای دکمه جوش نسبت به فلز پایه مؤید تشکیل مارتنزیت در دکمه جوش اتصال نامتجانس است. این نکته باید ذکر شود که افزایش جریان جوشکاری در محدوده مورد استفاده در این پژوهش تأثیر چندانی بر سختی دکمه جوش ندارد. در واقع افزایش جریان جوشکاری، مشخصه‌های هندسی دکمه جوش (قطر دکمه و عمق نفوذ) را تغییر داده و در نتیجه درجه رقت را تغییر می‌دهد. اما همانطور که از دیاگرام شیفلر مشخص است، تغییر درجه رقت در محدوده ۳۰ تا ۹۰ درصد تأثیری بر ریزساختار دکمه جوش نخواهد داشت. این مطلب عدم تغییر قابل ملاحظه سختی دکمه جوش با تغییر جریان جوشکاری را توضیح می‌دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد در این محدوده جریان جوشکاری، درجه رقت حدود ۴۰ درصد است.

با حرکت از مرز دکمه جوش به سمت ورق فولاد کم کربن (CS)، در HAZ مجاور دکمه‌ی جوش به دلیل وجود مخلوطی از فازهای سخت مثل مارتنزیت و فریت ویدمنشتاتن سختی به مقدار کمی نسبت به دکمه جوش افت می‌کند ولی با ادامه حرکت و به دلیل زیادتر شدن فازهای نرمی از قبیل فریت در زمینه، سختی به شدت افت می‌کند. این امر در سمت ورق زنگ‌نزن اتفاق نمی‌افتد زیرا از آنجا که این فولاد به دلیل آستنیتی بودن استحاله‌ناپذیر می‌باشند در HAZ طرف فولاد زنگ‌نزن تغییرات فازی اتفاق نمی‌افتد و در نتیجه سختی HAZ با سختی فلز زمینه تفاوت چندانی ندارد.



شکل (۱۰): منطقه ذوب موضعی شده در فولاد زنگ‌نزن آستنیتی.



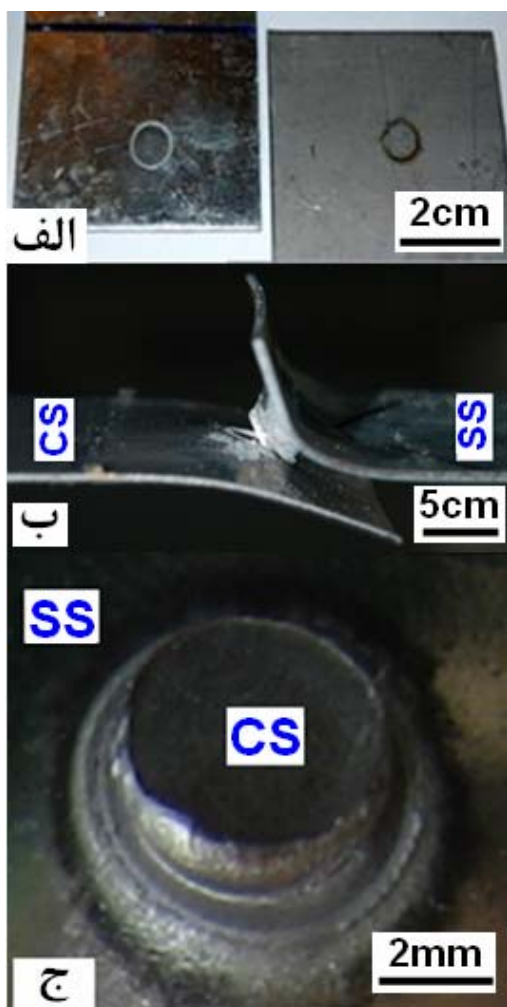
شکل (۱۱): پروفیل سختی در امتداد قطری جوش.

شدن بالا در این فرآیند و پایین بودن درصد کربن فولاد زنگ‌نزن (۰/۰۳۵)، امکان تشکیل رسوبات کاربید کروم در HAZ نیز وجود ندارد. اما در طرف فولاد زنگ‌نزن آستنیتی یک منطقه باریک که حین فرآیند جوشکاری دچار ذوب موضعی شده بود، مشاهده شد (شکل ۱۰). به این منطقه، منطقه ذوب جزئی شده (PMZ) گفته می‌شود. ذوب در طول مرزدانه و با پیشروی کمی درون دانه جای گرفته است. منطقه PMZ در برد دمایی یوتکتیک تا لیکوئیدوس حرارت می‌بیند بنابراین در آن ذوب موضعی اتفاق می‌افتد.

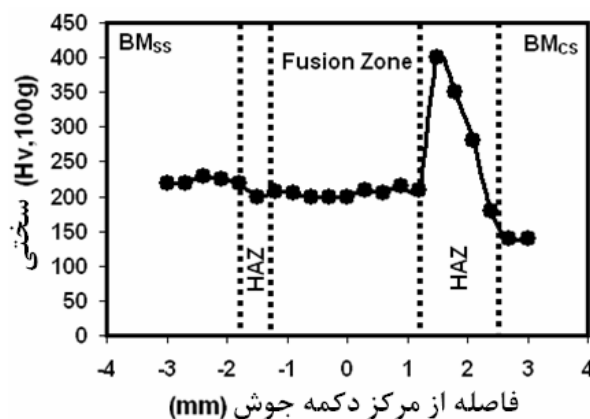
۳-۵-۲- پروفیل سختی

پروفیل سختی معیار مناسبی از ریزساختار تشکیل شده در مناطق مختلف محل اتصال است. در این پژوهش بر حسب جریان

کم کربن بیرون کشیده شده است به طوری که روی یک ورق یک سوراخ و روی ورق دیگر دکمه‌ی جوش باقی می‌ماند. مود شکست فصل مشترکی در جریان‌های جوشکاری پایین‌تر از ۸/۵ کیلو آمپر مشاهده شد و مود شکست محیطی در جریان‌های جوشکاری بالاتر از ۸ کیلو آمپر مشاهده شد.



شکل (۱۳): الف) مود شکست فصل مشترکی، شکست از میان دکمه جوش رشد کرده است، ب) شکست محیطی در آزمایش کشش-برش، شکست از ورق فولاد ساده کربنی شروع شده است. دکمه‌ی جوش در حال بیرون کشیده شدن از ورق فولاد کم کربنی است و ج) دکمه‌ی جوش بیرون کشیده شده از ورق طرف فولاد ساده کم کربن در یک نمای نزدیک‌تر.



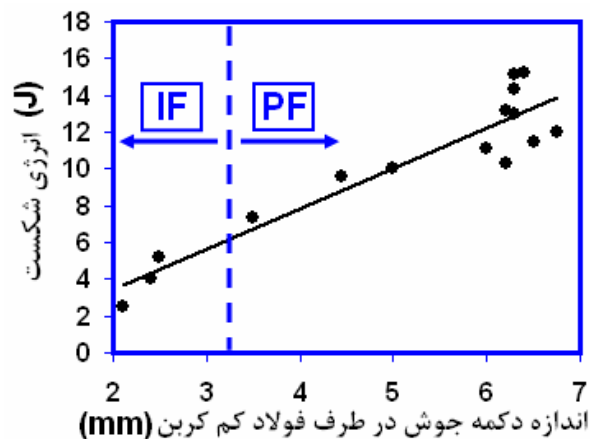
شکل (۱۲): پروفیل سختی در امتداد قطری دکمه جوش در جریان ۸ کیلو آمپر.

۳-۵-۲- پروفیل سختی در جریان‌های جوشکاری کمتر از ۸/۵ کیلو آمپر

شکل (۱۲) پروفیل سختی در امتداد قطری دکمه جوش در نمونه ۸ کیلو آمپر را نشان می‌دهد. نکته قابل توجهی که در نمودار شکل (۱۲) مشاهده می‌شود این است که سختی دکمه جوش کمتر از سختی HAZ در طرف فولاد کم کربن می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان با توجه به ریزساختار و با استفاده از دیاگرام شیفلر توجیه نمود. درجه رقت در این نمونه در حدود ۱۲ درصد است. با توجه به مقدار محاسبه شده و رجوع به دیاگرام شیفلر (شکل ۷) این ترکیب در داخل منطقه آستنیت + فریت + مارتنیت قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است ریزساختار دکمه جوش در این شرایط جوشکاری آستنیتی + فریتی است. واضح است که این ساختار از ساختار HAZ در طرف فولاد کم کربن سختی کمتری دارد.

۳-۶- مود شکست

در این پژوهش به طور کلی دو نوع مود شکست مختلف مشاهده شده است (شکل ۱۳). شکل (۱۳-الف) سطح مقطع شکست فصل مشترکی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، شکست با تغییر فرم پلاستیک ناچیزی همراه است. شکل (۱۳-ب و ج) سطح مقطع شکست در مود محیطی را نشان می‌دهد. در شکست محیطی دکمه‌ی جوش از ورق فولاد ساده



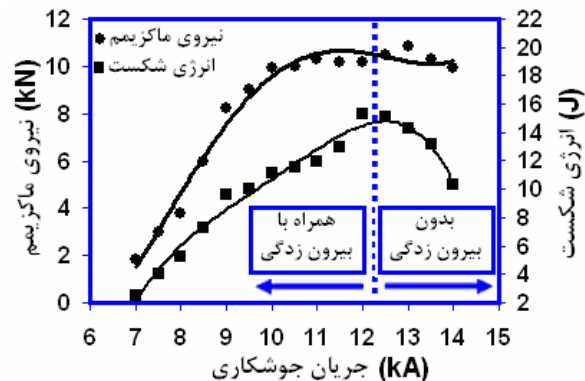
شکل (۱۷): تأثیر اندازه‌ی دکمه جوش در طرف CS بر انرژی شکست اتصال SS/CS در آزمایش کشش-برش.

۳-۷- خواص مکانیکی

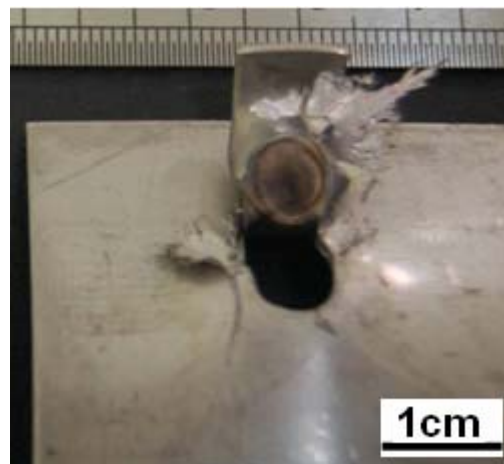
شکل (۱۴) تغییرات نیروی ماکزیمم (ظرفیت تحمل بار) و انرژی شکست در آزمایش کشش-برش را بر حسب جریان جوشکاری نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود به طور کلی با افزایش جریان جوشکاری نیروی ماکزیمم نیز افزایش می‌یابد. این امر در ابتدا به علت افزایش قطر دکمه‌ی جوش و پس از ثابت ماندن و حتی در برخی موارد کاهش قطر دکمه، به دلیل افزایش عمق نفوذ جوش است.

همچنین همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش جریان جوشکاری ابتدا به علت افزایش قطر دکمه و عمق نفوذ جوش، انرژی شکست افزایش می‌یابد. اما با رخ دادن بیرون زدگی مذاب (شکل ۱۵)، به علت افزایش عمق فرورفتگی الکتروود انرژی شکست جوش به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بیرون زدگی مذاب اگر چه ممکن است بر نیروی ماکزیمم (استحکام) جوش تأثیری نداشته باشد، به طور قابل توجهی می‌تواند انرژی شکست جوش را کاهش دهد.

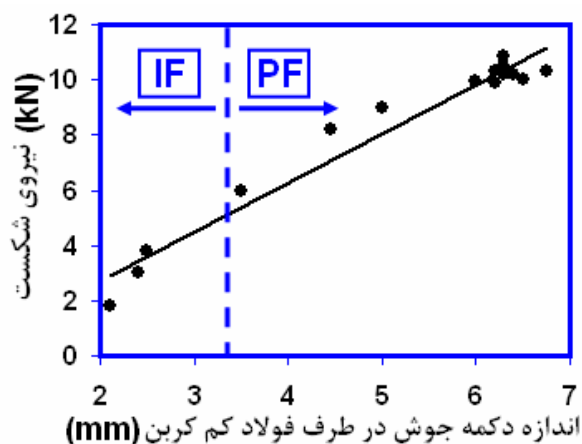
شکل‌های (۱۶) و (۱۷) به ترتیب تأثیر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در طرف CS را با استحکام و انرژی شکست اتصال SS/CS در آزمایش کشش-برش نشان می‌دهد. رفتار مکانیکی جوش تابع اندازه‌ی محل اتصال در فصل مشترک ورق/ورق است. همانطور که قبلاً ذکر شد، دکمه‌ی جوش نامتقارن است و



شکل (۱۴): تغییرات نیروی ماکزیمم و انرژی شکست با جریان جوشکاری.



شکل (۱۵): بیرون زدگی مذاب.



شکل (۱۶): تأثیر اندازه‌ی دکمه جوش در طرف CS بر استحکام اتصال SS/CS در آزمایش کشش-برش.

ریزساختار است. با افزایش جریان جوشکاری بالاتر از ۸ کیلو آمپر با افزایش درجه‌ی رقت یک ساختار مارتزیتی تشکیل شده که سختی بالای دکمه‌ی جوش نیز مؤید تشکیل مارتزیت در دکمه‌ی جوش هستند.

۳- به طور کلی با افزایش جریان جوشکاری، ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی جوش‌های نقطه‌ای در آزمایش کشش- برش افزایش می‌یابد. اما با وقوع بیرون‌زدگی مذاب (در جریان‌های جوشکاری بیش از ۱۲ کیلو آمپر) انرژی شکست به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۴- اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در طرف CS تعیین‌کننده‌ی کارایی مکانیکی اتصال SS/CS است. یک رابطه تقریباً خطی بین اندازه دکمه جوش در طرف CS و خواص مکانیکی (استحکام و انرژی شکست) وجود دارد.

۵- مراجع

- [1] M. D. Tumuluru, "Resistance Spot Welding of Coated High-Strength Dual Phase Steels", Weld J., Vol. 87, pp. 31-37, 2007.
- [2] H. Zhang, J. Senkara, Resistance Welding: Fundamentals and Applications, Taylor & Francis CRC Press, 2005.
- [3] M. Pouranvari, A. Abedi, P. Marashi and M. Goodarzi, "Effect of Expulsion on Peak Load and Energy Absorption of Low Carbon Resistance Spot Welds", Sci. Tech. Weld. Join, Vol. 13, pp. 39-43, 2008.
- [4] Y. J. Chao, "Failure Mode of Resistance Spot Welds: Interfacial Versus Pullout", Sci. Technol. Weld. Joining, Vol. 8, pp. 133-137, 2003.
- [5] M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadeh, P. H. Marashi and M. Goodarzi, "Effect of Weld Nugget Size on Overload Failure Mode of Resistance Spot Welds", Sci. Technol. Weld. Joining, Vol. 12, pp. 217-225, 2007.
- [6] M. Marya, K. Wang, L. G. Hector and X. Gayden, "Tensile-Shear Forces and Fracture Modes in Single and Multiple Weld Specimens in Dual-Phase Steels", J. Manufact. Sci. Eng., Vol. 128, pp. 287-298, 2006.
- [7] X. Sun, E. V. Stephens and M. A. Khaleel, "Effects of Fusion Zone Size and Failure Mode on Peak Load and Energy Absorption of Advanced High Strength Steel Spot Welds Under Lap Shear Loading Conditions", Engineering Failure Analysis, Vol. 15, pp. 356-367, 2005.
- [8] M. Vural, A. Akkus, J. Mater. Proc. Techno., Vol. 204, pp. 1-6, 2004.
- [9] M. Alenius, P. Pohjanne, M. Somervuori and H. Hanninen: Weld. J., Vol. 85, pp. 305s-313s, 2006.

اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در طرف CS کوچکتر از طرف SS است (به علت کمتر بودن مقاومت الکتریکی CS نسبت به SS). این نکته قابل ذکر است که موقعیت خط نهایی انجماد (جایی که دانه‌های ستونی در FZ با هم برخورد می‌کنند) می‌تواند بر خواص مکانیکی تأثیر داشته باشد. همانطور که در قسمت ۳-۱ ذکر شد، خط نهایی انجماد، در طرف با مقاومت الکتریکی بالاتر (یعنی طرف SS) قرار دارد. در واقع ماکزیمم اندازه‌ی منطقه‌ی FZ در طرف SS واقع شده است. اما، خواص مکانیکی اتصال با اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ ورق کنترل می‌شود. بنابراین در این حالت، اندازه دکمه‌ی جوش در جایی که نیاز به آن است (یعنی فصل مشترک ورق/ ورق) ممکن است ناکافی باشد. بنابراین نیاز است که مقدار بیشتری یا برای مدت زمان بیشتری جریان الکتریکی اعمال شود. بنابر بحث فوق، اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در طرف CS تعیین‌کننده‌ی کارایی مکانیکی اتصال SS/CS است. همانطور که در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) مشاهده می‌شود، یک رابطه‌ی تقریباً خطی بین اندازه‌ی دکمه‌ی جوش و خواص مکانیکی (استحکام و انرژی شکست) وجود دارد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- دکمه‌ی جوش در اتصالات نامتجانس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فولاد کم کربن گالوانیزه به دلیل تفاوت مقاومت الکتریکی، نامتقارن است. همچنین محل خط انجماد نهایی در فصل مشترک ورق/ ورق قرار ندارد بلکه به طرف ورق زنگ‌نزن آستنیتی جابجا شده است.

۲- ریزساختار دکمه‌ی جوش در اتصالات نامتجانس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فولاد کم کربن گالوانیزه تابع میزان اختلاط دو فلز پایه است. در جریان‌های جوشکاری پایین (کمتر از ۸/۵ کیلو آمپر) که درجه رقت کم (در حدود ۱۲-۸ درصد) است ساختار پیش‌بینی شده توسط دیاگرام شیفلر یک ساختار آستنیت + فریت + مارتزیت است. سختی کم دکمه‌ی جوش (در حدود ۲۰۰ ویکرز) در این شرایط جوشکاری مؤید تشکیل این

۶- پی‌نوشت

- 1- Interfacial Failure
- 2- Pullout Failure
- 3- Tensile-Shear Test
- 4- Cross-Tension Test
- 5- Coach-Peel Test
- 6- Vural
- 7- Akus
- 8- Interstitial Free
- 9- Hasanbaşoğlu
- 10- Kacar
- 11- Alenus
- 12- Fusion Zone
- 13- Pedestal
- 14- Instron
- 15- Vilella
- 16- Marble
- 17- Volger
- 18- Partially Melted Zone

- [10] R. Kacar and A. Hasanbasoglu: Mater. Design, Vol. 28, pp. 1794-1800, 2007.
- [11] American Welding Society: "Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials", ANSI/AWS/SAE/D8. 9-97, 1997.
- [12] C. Lippold, D. J. Kotecki, Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, John Wiley & Sons, 2005.
- [13] W. F. Self, W. A. Zhou and S. A. Mori, Weld. J, Vol. 76, pp. 181s-25s, 1999.
- [14] A. Porter, K. E. Sterling, Phase Transformation in Metals and Alloys, Van Nostrand Reinhold, UK, 1981.
- [15] M. I. Khan, M. L. Kuntz, Y. Zhou, Effects of Weld Microstructure on Static and Impact Performance of Resistance Spot Welded Joints in Advanced High Strength Steels Sci. Technol. Weld. Joining, Vol. 13, pp. 294-304, 2008.
- [16] S. S. Babu, B. W. Reimer, M. L. Santella and Z. Feng, Influence of Microstructure on the Properties of Resistance Spot Welds, Proc. 8th Sheet Metal Welding Conf., Detroit, MI, USA, October, 2-5, 1998.
- [17] J. E. Gould, S. P. Khurana, T. Li, Predictions of Microstructures when Welding Automotive Advanced High-Strength Steels, Weld J., Vol. 86, pp. 111s-116s, 2006.
- [18] M. Volger, "Investigation of Resistance Spot Weld Formation", Ph. D. Thesis of Stanford University, Palo Alto, CA, USA, 1993.
- [19] K. E. Easterling, Modelling the Weld Thermal Cycle and Transformation behavior in the Heat-Affected Zone, Mathematical Modelling of Weld Phenomena, The Institute of Materials, 1993.