

بررسی مود شکست جوش مقاومتی نقطه ای اتصال مشابه و نامشابه فولاد زنگ نزن دوبلکس در شرایط کشش برش

حسین طیبی^۱، علی حیدری مقدم^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
^۲ استادیار گروه مهندسی مواد، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: پاییز ۹۶ پذیرش: زمستان ۹۶

چکیده

پژوهش حاضر به بررسی مود شکست جوش مقاومتی نقطه ای اتصال مشابه و نامشابه در فولاد زنگ نزن دوبلکس در شرایط کشش برش می پردازد. در این بررسی از فولاد زنگ نزن دوبلکس یک میلی متری با نام تجاری 1Cr21Ni5Ti استفاده شد. آزمون ریز سختی سنجی، آزمون کشش - برش و بررسی متالورگرافی نوری برای توصیف ماکرو ساختار و ریز ساختار، سختی دکمه ای جوش و مطالعه مود شکست جوش بر روی اتصالات انجام گردید. ایجاد یک جوش مقاوم نقطه ای با تغییرات متالورژیکی و هندسی همراه است که در نهایت مشخص شد که تا قبل از بیرون زدگی مذاب، هرچه جریان جوشکاری را افزایش دهیم نیروی حداکثر جوش و انرژی شکست افزایش می یابد.

* عهده دار مکاتبات: alheidarym@yahoo.com

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن دوبلکس، مود شکست، دکمه ای جوش، سختی.

۱-مقدمه

فولادهای زنگ نزن، گروهی از مهم ترین مواد مهندسی هستند که به طور گسترده در صنایع و محیط های مختلف استفاده می شوند. فولادهای زنگ نزن شامل گروهی از فولادهای پرآلیاژ، بر پایه Fe-Cr، Fe-Ce-C و Fe-Ce-Ni می باشند. این فولادها برای زنگ نزن بودن باید حاوی حداقل ۱۰/۵ درصد وزنی کرم بوده که این میزان کرم باعث ایجاد سطح غیرفعال اکسیدی می گردد و از اکسیداسیون و خوردگی فلز زیرین در شرایط محیط خورنده جلوگیری می کند. فولادهای زنگ نزن از مقاومت خوبی در برابر اکسیداسیون، حتی در دماهای بالا برخوردار هستند و به همین دلیل به عنوان آلیاژهای مقاوم به حرارت شناخته شده اند. مقاومت به اکسیداسیون در دماهای بالا نیز به دلیل میزان بالای کرم فولاد است، به طوری که برخی از آلیاژهای پر کرم (۳۰-۲۵ درصد وزنی) می توانند در دماهای بالاتر نیز مقاومت کنند. نوع دیگر مقاومت حرارتی، مقاومت در برابر کربوره شدن است که فولادهای زنگ نزن با میزان کرم متوسط (حدود ۱۶ درصد وزنی) و نیکل بالا (حدود ۳۵ درصد وزنی) برای این منظور توسعه یافته اند. فولادهای زنگ نزن دارای کاربردهای گسترده ای از جمله استفاده در عملیات تولید انرژی و کاغذسازی، ساخت بسیاری از محصولات تجاری نظیر تجهیزات آشپزخانه و قطعات اتومبیل هستند. همچنین به علت خلوص و بهداشتی بودن به طور

گسترده در کاربردهای استریل مثل فرآیندهای داروسازی، تولید لبنیات و صنایع غذایی مورد استفاده قرار می گیرند. بیشتر فولادهای زنگ نزن قابل جوشکاری هستند ولی بسیاری از آن ها نیاز به دستورالعمل ویژه ای دارند. در بیشتر موارد، جوشکاری منجر به تغییرات قابل توجه فلز جوش و ریزساختار ناحیه ای متأثر از حرارت (HAZ) در مقایسه با فلز پایه می شود که می تواند منجر به تغییر در تعادل فازی مطلوب، ایجاد فازهای بین فلزی، رشد دانه ها، جدایی عناصر آلیاژی و ناخالصی ها و واکنش های دیگر گردد [۱].

۱-۱- فولادهای زنگ نزن دوبلکس

خواص فیزیکی این فولادها مابین فولادهای زنگ نزن آستینیتی و فریتی قرار می گیرد، اما در مجموع خواص آن ها به فولادهای زنگ نزن فریتی و فولادهای کربنی شباهت بیشتری دارد. مقاومت به حفره دار شدن و خوردگی شیاری این فولادها تابعی از مقدار کرم، مولیبدن، تنگستن و نیتروژن و مشابه فولاد زنگ نزن آستینیتی AISI613 بوده و حتی برخی دوبلکس ها بهتر از فولاد زنگ نزن آستینیتی مقاوم در برابر آب دریا عمل می کنند. تمامی فولادهای زنگ نزن دوبلکس به صورت مشهودی مقاومت به خوردگی تنش کلریدی بهتری نسبت به فولادهای زنگ نزن آستینیتی داشته و همچنین استحکام و شکل پذیری و تافنس بالاتری از این رده فولادها دارند. بیش از ۸۰ سال است که فولادهای زنگ نزن دوبلکس با ساختاری مشتمل بر آستینیتی و فریت به صورت تجاری در دسترس صنایع قرار گرفته اند [۱].

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

Q: گرمای تولید شده بر حسب یکای ژول (J)

R: مقاومت الکتریکی بر حسب یکای اهم (Ω)

I: شدت جریان الکتریکی بر حسب یکای آمپر (A)

t: زمان عبور جریان الکتریکی بر حسب یکای ثانیه (s)

در مدار دستگاه جوشکاری مقاومتی و قطعات کار هفت نوع مقاومت (شکل ۱) به شکل سری با هم در ارتباط بوده و حرارت ایجاد می کنند [۳]. مقاومت کل مسیر جوشکاری را می توان از رابطه (۲) به دست آورد، همچنین شکل ۳ میزان مقاومت های الکتریکی موجود در سیکل جوش مقاومت نقطه ای را نشان می دهد.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad (2)$$

این مقاومت ها به دو گروه تقسیم می شوند:

- مقاومت های مواد (R_2 و R_4 و R_6 و R_7)
- مقاومت های بین الکترود و قطعه کار (R_1 و R_5)

R_1 : مقاومت فصل مشترک بین الکترود ورق بالایی

R_2 : مقاومت الکتریکی ورق بالایی

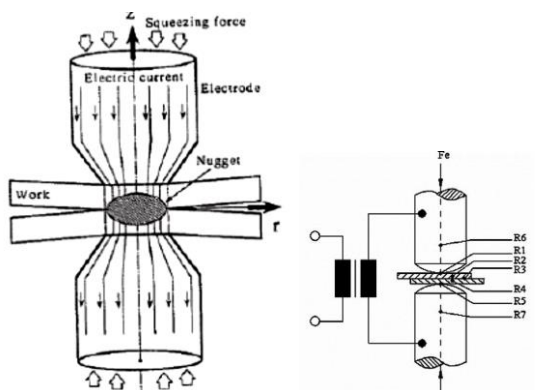
R_3 : مقاومت فصل مشترک بین دورق

R_4 : مقاومت الکتریکی ورق پایینی

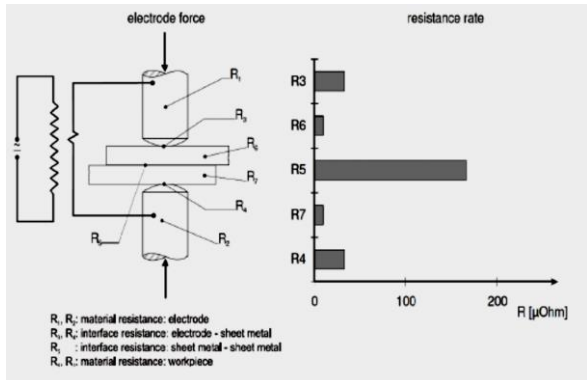
R_5 : مقاومت فصل مشترک بین الکترود ورق پایینی

R_6 : مقاومت الکترود بالایی

R_7 : مقاومت الکترود پایینی



شکل (۱): نمایش شماتیک جوش مقاومت نقطه ای و نمایش مقاومت های هفتگانه [۲]



شکل (۲): میزان مقاومت های الکتریکی موجود در سیکل جوش مقاومت نقطه ای [۳]

فولادهای زنگ نزن فریتی- آستینیتی دو فازی نام خود را از ریزساختارشان در دمای محیط گرفته اند که تقریباً نیمی فریت و نیمی آستینیت است. فولادهای زنگ نزن دو فازی در جاهایی استفاده می شوند که نیاز به مقاومت به خوردگی عالی، استحکام و یا هردوی آن باشد. چون این فولادها نسبت به فولادهای آستینیتی، مقدار فریت بالاتری دارند، بیشتر فرو مغناطیس هستند و هدایت حرارتی بالاتر و انبساط حرارتی کمتری دارند. این فولادها اغلب به دلیل مقاومت به خوردگی انتخاب می شوند و در بسیاری از کاربردها که ترک خوردن به دلیل خوردگی تنش و خوردگی حفره ای مهم می باشند، بجای آلیاژهای آستینیتی استفاده می شوند. آلیاژهای دوفازی عموماً نسبت به ترک خوردن انجمادی جوش کاملاً مقاوم هستند، این امر احتمالاً به دلیل این واقعیت است که میزان ناخالصی اندک است و احتمال وجود فیلم های مذاب مرز دانه ای پیوسته کم می باشد. برخی موارد ترک خوردن تحت شرایط مهار زیاد گزارش شده است که نیاز به انجام برخی احتیاط ها می باشد. هرچند فولادهای زنگ نزن دوفازی مقاوم به ترک خوردن هیدروژنی می باشد، ولی برخی شکست های هزینه بر در اثر وجود همزمان میزان هیدروژن بالا و کنترل ریزساختار ضعیف در جوشکاری این نوع فولادها رخ داده است. در فلزاتی با نیروی کشش ذوب بالا اگر هیدروژن و تنش کافی موجود باشد، نسبت به ترک خوردن هیدروژنی حساس می شوند [۱].

۲-۱- جوشکاری مقاومتی نقطه ای

جوشکاری فرآیندی است که سطوح دو قطعه را یکی می سازد و روشی دقیق و قابل اطمینان و دارای صرفه ی اقتصادی برای اتصال قطعات است. اغلب اشیاء در جامعه مدرن امروزی مانند ساختمان ها، پل ها، خودروها، کامپیوترها و وسایل پزشکی بدون استفاده از جوشکاری قابل تولید نیستند. جوشکاری نقطه ای یکی از انواع جوشکاری مقاومتی است که از آن به منظور جوشکاری ورق ها استفاده می شود. معمولاً ضخامت ورق هایی که با این روش جوشکاری می شوند، بین ۰/۵ تا ۳ میلی متر است. در این نوع جوشکاری از دو الکترود مسی مشابه برای متمرکز کردن جریان بر روی قطعه کار و همچنین وارد کردن فشار روی قطعه کار استفاده می شود. نتیجه کار نقطه جوشی است که به سرعت تا نقطه ذوب آن گرم می شود و با قطع جریان در آن نقطه، دو قطعه کار به هم متصل می شوند. جوشکاری نقطه ای می تواند به صورت دستی، رباتیک و یا توسط ماشین مخصوص جوشکاری نقطه ای انجام شود. همچنین می توان جوش های نقطه ای مشابه با خواص یکسان و سرعت تولید بالا را با کنترل جریان جوش، نیروی الکترودها و زمان جوش به صورت خودکار، به دست آورد. در این فرآیند جوشکاری، ولتاژ پایین مورد نیاز به همراه جریان بالا توسط ترانسفورماتورها و فشار لازم توسط ماشین های هیدرولیکی، مکانیکی و دستگاه های پنوماتیکی به دست می آید [۲]. جوشکاری مقاومت نقطه ای فرآیندی است که در آن سطوح مورد نظر در یک یا چند نقطه به یکدیگر توسط حرارت ایجاد شده در اثر مقاومت در برابر جریان الکتریکی گذرنده از قطعات کاری (که توسط نیروی الکترودها روی یکدیگر نگه داشته شده اند) متصل می شوند. سطوح تحت تماس در منطقه تمرکز جریان توسط یک پالس کوتاه مدت با ولتاژ کم و جریان بالا حرارت می بینند تا یک دکمه از فلز جوش را ایجاد نمایند. وقتی جریان قطع می شود، فشار الکترودها ادامه پیدا می کند تا زمانی که فلز جوش با سرعت سرد شده و منجمد گردد.

ارتباط و تأثیر پارامترهای بالا را می توان در رابطه (۱) مشاهده کرد:

۳-۱-۳- تأثیر جریان - زمان بر قطر دکمه ی جوش

در فشار ثابت ۲/۵ بار با افزایش جریان و زمان جوشکاری به علت افزایش انرژی ورودی به منطقه جوش، قطر دکمه جوش افزایش می‌یابد. همچنین قطر دکمه جوش با افزایش زمان به یک حد بیشینه می‌رسد و پس از آن مقدار قطر دکمه در جریان بالا کاهش می‌یابد. در زمان‌ها و جریان‌های بالا به دلیل بالا رفتن مقدار گرما در محدوده دکمه جوش، پس از مدتی جوش ریزش خواهد کرد و در همین زمان خواص مکانیکی جوش نیز افت خواهد کرد و له شدن قطعه کار در زیر الکترودها پدید می‌آید. اگر بخواهیم اثر زمان را در جریان‌های مختلف بررسی کنیم خواهیم دید که در جریان‌های کم افزایش زمان باعث افزایش اندازه دکمه جوش می‌شود، و مقادیر زمان به ازای رسیدن به اندازه دکمه بیشینه در زمان‌های بین ۸ تا ۱۰ سیکل رخ می‌دهد [۴].

۴-۱- مود شکست

ایجاد یک جوش مقاومت نقطه‌ای با تغییرات متالورژیکی و هندسی همراه است. تغییرات متالورژیکی به دلیل گرادیان دمایی به گرادیان ریزساختاری مناطق (FZ)، (HAZ)، (BM) تولید می‌شود. این گرادیان ریزساختاری منجر به تولید گرادیان خواص مکانیکی می‌شود که در نهایت رفتار شکست جوش مقاومت نقطه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تغییرات هندسی ناشی از تشکیل یک شیار طبیعی در محل اتصال و فرو رفتگی الکتروده در ورق‌ها به میزان زیادی است که در نهایت منجر به ایجاد تمرکز تنش شده و مجدداً رفتار شکست جوش مقاومت نقطه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از پارامترهای تعیین‌کننده استحکام شکست جوش مقاومت نقطه‌ای عمق فرو رفتگی الکتروده می‌باشد. بر این اساس هرچه عمق فرو رفتگی الکتروده زیاد باشد، تمرکز تنش نیز بیشتر و در نتیجه نیروی شکست کاهش می‌یابد. عمق فرو رفتگی الکتروده تابع حرارت ورودی، نیروی الکتروده و تنش نهایی فلز است [۳].

$$T_i = f(Q, F_e, \sigma_y) \quad (7)$$

نکته‌ی مهم این است که عمق فرو رفتگی الکتروده باید کمتر از ۲۰٪ ضخامت ورق باشد.

$$t_i < 20\%t \quad (8)$$

مود شکست جوش‌های نقطه‌ای یک معیار کیفی از کیفیت جوش است. به طور کلی، جوش‌های نقطه‌ای در دو مود فصل مشترکی (IF) و محیطی (PF) دچار شکست می‌شوند. مود فصل مشترکی با رشد ترک از میان دکمه-ی جوش رخ می‌دهد و مود محیطی با بیرون کشیده شدن دکمه‌ی جوش از یک ورق و تولید یک سوراخ در ورق دیگر همراه است. با توجه به تغییر فرم پلاستیک ناچیز مود فصل مشترکی، وقوع این نوع شکست بیانگر انرژی شکست پایین اتصال هست. بنابراین تغییر فرم پلاستیک قابل توجهی همراه با شکست محیطی، منجر به تولید یک شکست پر انرژی می‌شود و این از منظر قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف برای خودرو و سرنشینان اهمیت بالایی دارد. از آنجایی که ظرفیت تحمل نیرو، قابلیت جذب انرژی در مود فصل مشترکی به‌طور قابل توجهی کمتر از مود محیطی است، بنابراین برای اینکه جوش‌های نقطه‌ای در حین سرویس دچار تخریب زودرس نشوند، متغیرهای فرآیند باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که از دستیابی به مود شکست محیطی اطمینان حاصل گردد. در جوش‌های نقطه‌ای یک قطر دکمه‌ی بحرانی (DCR) وجود دارد که در اندازه‌ی دکمه‌ی جوش‌های کمتر از آن

مقاومت مواد ناشی از خواص فیزیکی قطعات کار (R2 و R4) و الکترودها (R6 و R7) بوده و تغییر نمی‌کنند درحالی‌که مقاومت‌های تماسی با شرایط نوک الکترودها تغییر می‌کند، و مقاومتی که لازم است تا جوش نقطه‌ای تشکیل شود مقاومت تماسی بین دو قطعه کار (R3) است. مقدار این مقاومت به شرایط سطحی فلز پایه و نیروی الکتروده (F) و جریان جوشکاری (I) و زمان (t) بستگی دارد. هرچه این مقاومت بیشتر شود، جوش‌پذیری راحت‌تر می‌شود. در اینجا باید دقت داشت که با وجود حرارت تولیدی بسیار زیاد، به دلیل رسانایی حرارتی بالای الکترودها و وجود سیستم آب‌گرد، سطح فلز پایه به دمای ذوب نمی‌رسد [۲]. در حین جوش نقطه‌ای چهار فاصله زمانی وجود دارد که عبارتند از: زمان فشار قبل از جوش، زمان جوش، زمان نکه داشتن بعد از جوش، زمان خاموش.

۳-۱-۱- ارزیابی کیفیت نقطه جوش مقاومتی

به‌طور کلی از سه معیار برای ارزیابی کیفیت جوش‌های مقاومت نقطه‌ای استفاده می‌شود:

۱-۳-۱- اندازه ی دکمه ی جوش

اندازه‌ی دکمه‌ی جوش به صورت پهنای منطقه‌ی ذوب شده در فصل مشترک ورق/ ورق در جهت طولی تعریف می‌شود و مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده‌ی کیفیت جوش است. قطر دکمه‌ی جوش تعیین‌کننده‌ی مساحت ناحیه‌ی اتصال است. با افزایش قطر دکمه‌ی جوش نیروی شکست بیشتر می‌شود (رابطه (۳)).

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (3)$$

از سوی دیگر قطر دکمه‌ی جوش تابعی از حرارت ورودی است (رابطه (۴)).

$$D = f(Q) \quad (4)$$

حداکثر قطر دکمه‌ی جوش (D_{MAX}) قابل دستیابی در جوشکاری مقاومت نقطه‌ی تابع قطر الکتروده است [۳]. و رابطه‌ی قطر حداکثر با قطر الکتروده به صورت زیر است:

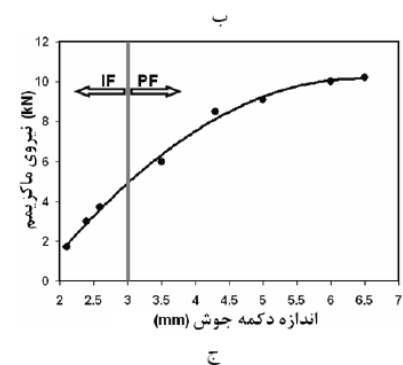
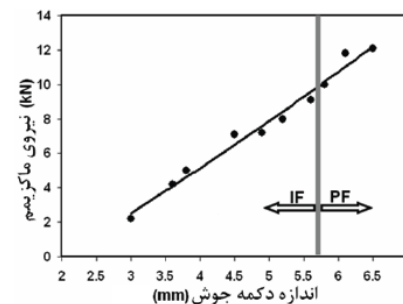
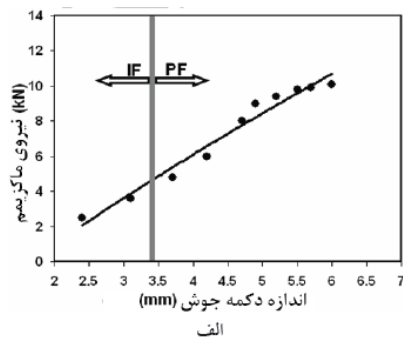
$$D_{MAX} = 1.1 D_e \quad (5)$$

۲-۳-۱- رابطه ی بین قطر دکمه ی جوش و ضخامت ورق

میزان قطر دکمه‌ی جوش یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده‌ی رفتار مکانیکی قطعات جوش داده شده است، استانداردهای مختلف صنایع پیشنهاد می‌کنند که قطر دکمه جوش مقدار مینیمم برای ضخامت‌های ورق‌های داده شده باشد. انجمن جوشکاری آمریکا (AWS/ANSI/SAE) معادله زیر را برای رسیدن به شرایط ایده‌ال در رفتار مکانیکی جوش نقطه‌ای پیشنهاد می‌کند:

$$d = 4\sqrt{t} \quad (6)$$

که در آن d و t به ترتیب قطر دکمه جوش و ضخامت ورق برحسب میلی‌متر هستند. ولی به هر حال این رابطه همیشه بهترین نتیجه را نشان نمی‌دهد. به عنوان مثال دکتر پورانوری و همکارانشان در پژوهشی نشان دادند که جهت دستیابی به استحکام بالاتر در ورق‌های فولادی با استحکام بالا، باید بزرگ‌ترین قطر ممکن دکمه جوش در رابطه بالا جایگذاری شود. با این حال به نظر می‌رسد که فاکتورهای متالورژیکی باید به ضخامت ورق‌ها افزوده شود [۳].



شکل (۳): تغییرات نیروی ماکزیمم و مود شکست برحسب اندازه دکه جوش [۵]

الف - CS/CS ب - SS/SS ج - CS/SS

به طور کلی می‌توان گفت با کاهش جریان، قطر دکه‌ی جوش کاهش می‌یابد که احتمالاً به دلیل ایجاد شکست فصل مشترکی می‌باشد. با افزایش جریان، قطر دکه‌ی جوش افزایش می‌یابد در نتیجه عمق فرو رفتگی الکتروود زیاد شده که منجر به کاهش عمق نفوذ و کاهش انرژی شکست می‌گردد. برای بررسی تأثیر اندازه دکه جوش بر استحکام و انرژی شکست جوش‌های نقطه‌ای، ابتدا رفتار شکست جوش‌های عاری از بیرون زدگی مذاب و سپس رفتار شکست جوش‌هایی که بیرون زدگی مذاب را تجربه کرده‌اند مورد آزمایش قرار گرفته است. پیش از وقوع بیرون زدگی مذاب، یک رابطه‌ی مستقیم بین اندازه دکه‌ی جوش و استحکام شکست وجود دارد. به شکلی که در مود شکست فصل مشترکی هرچه اندازه دکه‌ی جوش بیشتر باشد، مقاومت فصل مشترکی به برش بیشتر می‌شود و در مود محیطی با افزایش قطر دکه‌ی جوش، مقاومت دکه‌ی جوش در برابر چرخش دکه‌ی جوش و در نتیجه نیروی لازم برای گردنی شدن محل شکست افزایش می‌یابد. با این حال افزایش قطر دکه‌ی جوش سبب افزایش نیروی لازم جهت شکست جوش می‌شود. بنابراین الزاماً ارتباط مستقیمی بین اندازه دکه‌ی جوش و نیروی حداکثر و انرژی شکست وجود ندارد. انرژی شکست برخی جوش‌ها با بیرون زدگی مذاب کمتر از انرژی شکست جوش‌هایی بدون

مود، شکست فصل مشترکی و در اندازه‌ی دکه‌ی جوش بیشتر از آن مود شکست محیطی حاکم است [۵].

۱-۴-۱- تحلیل ریاضی ساده مود شکست

دو مسیر برای رشد ترک در دکه‌ی جوش وجود دارد، یکی گلوبی شدن ورق در جهت ضخامت آن (PF) و دیگری تغییر فرم پلاستیک برشی دکه‌ی جوش (IF). شکست در مواردی رخ می‌دهد که نیاز به نیروی کمتری داشته باشد (رابطه ۹ و ۱۰).

$$F_{PF} = \pi D t \sigma_{PFL} \quad (9)$$

$$F_{IF} = \frac{\pi D^2}{4} \tau_{fz} \quad (10)$$

σ_{PFL} : استحکام کششی محل شکست محیطی در منطقه‌ی HAZ و BM
 τ_{fz} : استحکام برشی دکه‌ی جوش

هرچه قطر دکه‌ی جوش کمتر باشد (جریان کم، ضخامت کم، نیرو زیاد) احتمال ایجاد ترک فصل مشترکی زیاد می‌شود [۵].

۱-۵- فاکتورهای کنترل کننده‌ی انتقال از شکست فصل مشترکی به شکست محیطی در جوش‌های مقاومتی نقطه ای در آزمون کشش-برش

وقتی یک جوش نقطه‌ای تحت آزمون کشش - برش قرار می‌گیرد، رفتار جوش نقطه‌ای در برابر تنش‌های اعمالی بدین گونه است که ابتدا دکه‌ی جوش برای از بین بردن گشتاور و هم راستا شدن با جهت اعمال نیرو چرخش می‌کند. هر چه اندازه‌ی دکه بیشتر باشد، چرخش دکه بیشتر می‌شود. در شکل ۳ تغییرات قطر دکه جوش به عنوان مهم ترین پارامتر کنترل کننده‌ی استحکام مکانیکی جوش نقطه‌ای بر حسب جریان جوشکاری نشان داده شده است.

چرخه جوشکاری بر روی خواص مکانیکی نقطه‌ی جوش از نظر نیروی حداکثر و انرژی شکست تاثیرگذار است [۵-۷].

۲- مواد و روش تحقیق

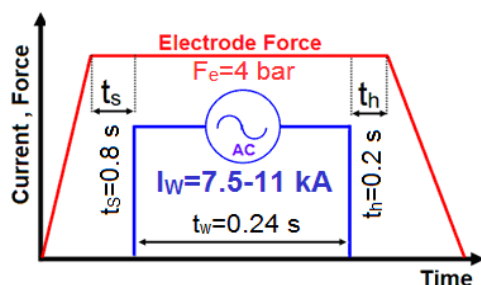
در این تحقیق از ورق فولاد زنگ نزن دابلکس با نام تجاری 1Cr21Ni5Ti استفاده شده است؛ ضخامت این ورق یک میلیمتر می باشد. ترکیب شیمیایی ورق به روش کوانتومتری تعیین و در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی ورق فولاد زنگ نزن دابلکس مورد استفاده در این پژوهش

Base Metal	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	Nb	Cu	Ti	N
1Cr21Ni5Ti	۰/۰۹۵	۲۱	۵/۵	۰/۵۷	۰/۱۶	۰/۶۲	۰/۰۲	۰/۲۱	۰/۵۸	-

جدول (۲): ابعاد نمونه استاندارد دابلکس

ابعاد بر حسب (mm)	
عرض W	۴۵
ضخامت T	۱
شعاع فیلر R	۶
طول کل L	۱۰۵
A-طول بخش کاهش یافته	۳۲
B-طول قسمت گرفته شده	۳۰
C-عرض قسمت گرفته شده	۱۰



شکل (۴): شماتیک سیکل جوشکاری

در هر جریان ۳ سری نمونه جوش داده شده است که یک جریان برای تست کشش- برش و جریان دیگر برای آزمون کندگی مبلمانی و یک جریان دیگر برای بررسی های ساختاری مورد استفاده قرار گرفتند. تست کشش- برش به وسیله ی دستگاه تست کشش SANTAM-150 و با سرعت ۵ میلی متر بر دقیقه انجام شد. ابعاد نمونه های تست کشش- برش طبق استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 تهیه شدند. برای جلوگیری از اعمال تنش های ترکیبی به نمونه در حین انجام تست کشش- برش از یک لایه فلزی با ضخامت یکسان با ضخامت ورق مصرفی، روی نمونه ها استفاده شد. با استفاده از نمودار نیرو- جابجایی مقدار حداکثر نیرو و حداکثر انرژی شکست (سطح زیر نمودار بار- جابجایی تا نقطه ی ماکزیمم نیرو) برای هر نمونه تعیین شد. برای انجام بررسی های ساختاری نمونه ها همان طور که در شکل ۳-۱۵ مشاهده می شود، نمونه ها از مقطع عرضی ورق

بیرون زدگی مذاب حتی با قطر دکه می جوش کمتر است. گرمی و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی ارتباط ساختار و خواص مکانیکی جوشکاری مقاومت نقطه ای فولاد زنگ نزن آستینیتی نشان دادند که با افزایش قطر دکه می جوش نیروی حداکثر و انرژی شکست افزایش می یابد و با وقوع بیرون زدگی مذاب، انرژی شکست به طور قابل توجهی کاهش می یابد. از سوی دیگر دکتر پور انوری و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی ساختار و عملکرد مکانیکی جوشکاری مقاومت نقطه ای فولاد های زنگ نزن فریتی AISI430 نشان دادند که تاثیر

برای بررسی خواص کششی فلزهای پایه؛ آزمایش کشش استاندارد انجام شد. برای این منظور نمونه ی استاندارد آزمایش مطابق استاندارد ASTM E8M آماده سازی شد.

خواص کششی فولادهای مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از آزمودن کشش به دست آمده و در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳): خواص کششی فولاد دابلکس مورد استفاده

Steels	ensile Strength (MPa)	otal Elongation (%)
1Cr21Ni5Ti	۸۲۵	۲۷

جوشکاری توسط دستگاه جوش نقطه ای ثابت (Pedestal) با توان ۱۲۰ KVA ساخت شرکت نوین سازان انجام شد. این دستگاه قابلیت تنظیم تمامی متغیرهای جوشکاری نقطه ای را با استفاده از دستگاه کنترل دیجیتالی را دارد. برای جوش دادن نمونه ها از الکترود گروه A، مطابق کلاس ۲ دسته بندی RWMA استفاده شد.

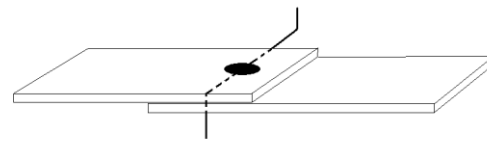
برای بررسی مشخصه های ماکرو ساختاری و ارتباط آن با مود شکست تاثیر مهم ترین پارامتر جوشکاری یعنی جریان جوشکاری بررسی شد. برنامه جوشکاری عبارت است از:

- ۱- زمان فشارش (اعمال نیرو پیش از عبور جریان) برابر ۴۰ سیکل معادل ۰/۸ ثانیه
- ۲- جریان جوشکاری در ۱۰ سطح مختلف از ۷/۵ تا ۱۲ کیلوآمپر با فاصله های ۰/۵ کیلوآمپری
- ۳- زمان جوشکاری ۱۲ سیکل معادل ۰/۲۴ ثانیه
- ۴- نیروی الکترود ۴ بار (معادل ۵ کیلو نیوتن)
- ۵- زمان نگهداری الکترود روی دکه می جوش برابر ۱۰ سیکل معادل ۰/۲ ثانیه

$$I_w = 7.5 - 11.5 \text{ kA}$$

در شکل ۴ شماتیک سیکل جوشکاری نشان داده شده است.

و از محلی کمی بالاتر از قطر دکمه جوش ها برش زده شدند تا پس از سنگ و سمباده زدن به قطر دکمه جوش رسیده و سپس مانت سرد شدند.



شکل (۵): محل برش نمونه ها

۲-۱- بررسی های میکروساختاری

برای بررسی میکرو ساختاری نمونه ها پس از انجام عملیات استاندارد متالوگرافی آماده سازی، نمونه ها توسط محلول Vilella (4 g CuSO_4 , 20 mL HCl , $20 \text{ mL H}_2\text{O}$) اچ شده و عکس ماکرو تهیه شد.

۲-۲- بررسی های میکروساختاری

برای انجام بررسی های میکرو ساختاری پس از انجام عملیات استاندارد متالوگرافی آماده سازی، برای بررسی ریزساختار دکمه ی جوش از محلول اچ کالینگز شماره ی یک (1.5 g CuCl_2 , 33 mL HCl , $33 \text{ mL H}_2\text{O}$) و برای بررسی ریزساختار منطقه ی متاثر از حرارت از محلول اچ الکترولیتی KOH (56 g KOH and $100 \text{ mL H}_2\text{O}$) استفاده شد.

(ا) برش توسط دستگاه کاتر SPCIMEN CUTTER SQ80

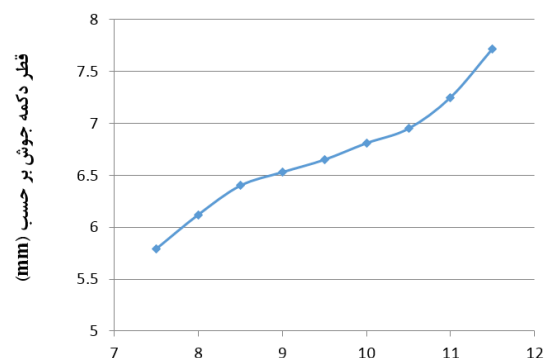
(ب) سنباده زنی از شماره ۲۴۰ تا ۲۰۰۰ سنباده زده شد

(ج) پالیش کردن نمونه ها با پودر اکسید آلومینیوم توسط دستگاه MONTASUPAL ساخت شرکت RATHENOW آلمان شرقی



شکل (۶): ماکرو ساختار اتصال جوش مقاومت نقطه ای فولاد زنگ نزن

دوتایی Fe-C در ۱۳ درصد کروم (شبیه فلز پایه مورد استفاده) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود انجماد آلیاژ با تشکیل فاز فریت دلتا آغاز می شود و سپس در حین یک استحاله حالت جامد فاز آستینیت از آن تشکیل می شود و در نهایت هنگام آهسته سرد شدن، باقیمانده به مخلوطی از فریت و کاربید تبدیل می شود. شکل (۷) ریزساختار فلز پایه فولاد دوبلکس را نشان می دهد. در این شکل زمینه بیانگر آستینیت و رگه های موجود در شکل بیانگر فریت هستند. همان طور که مشاهده می شود ریز ساختار فلز پایه حدوداً شامل ۵۰ درصد فریت و ۵۰ درصد آستینیت است.

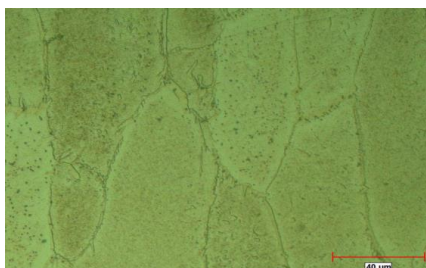


شدت جریان الکتریکی بر حسب (KA)

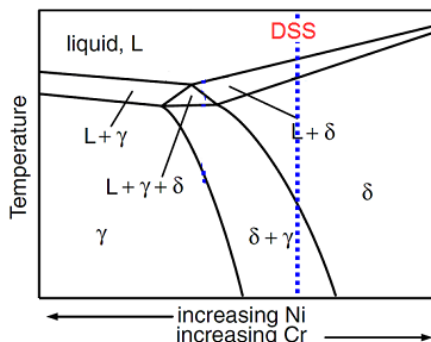
نمودار (۱) تاثیر جریان جوشکاری بر اندازه دکمه جوش (دوبلکس - دوبلکس)

۳-۱- ریز ساختار فلز پایه در اتصال جوش نقطه ای

شیب دمایی شدید و سرعت سرد شدن بالای فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای ریز ساختار محل اتصال را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد. برای بررسی ریز ساختار محل اتصال، دیاگرام تعادلی شبه



شکل (۹): ریز ساختار دکمه ی جوش فولاد دوبلکس



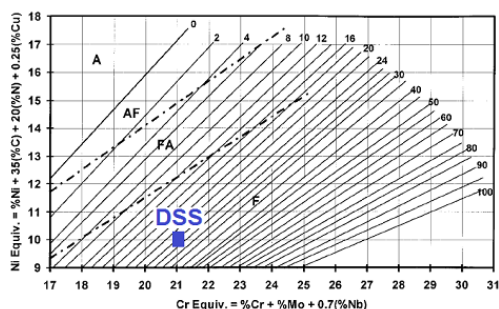
شکل (۱۰): شماتیک تحولات فازی در فولاد دوبلکس

۳-۳- پیش بینی درصد فریت به وسیله نمودارهای ساختاری

یکی از نمودارهای ساختاری که در جوشکاری قوسی برای پیش بینی درصد فریت در جوش استفاده می شود، دیاگرام WRC-1992 است که در آن درصد فریت حدود ۲۴ پیش بینی می شود که با واقعیت اختلاف زیادی دارد. دلیل این امر این است که سرعت سرد شدن در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه ای به دلیل حضور الکترودهای مسی آبگرد بسیار بیشتر از فرایندهای قوسی است، این موضوع موجب می شود استحاله ای حالت جامد فریت به آستنیت به سختی انجام شود. دلیل دیگر، وجود ۵۸/۰ درصد Ti در فلز جوش هست.

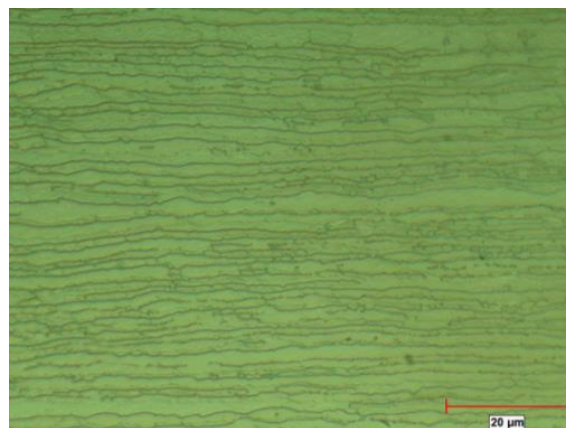
تیتانیوم یک کاربردی قوی است، بنابراین، حضور آن موجب بیرون کشیده شدن C از زمینه می شود. این امر موجب کاهش میزان C محلول در زمینه می شود.

کربن یک آستنیت زای قوی است، بنابراین حضور تیتانیوم در فلز پایه موجب کاهش پتانسیل آستنیت زایی در فلز جوش می شود.



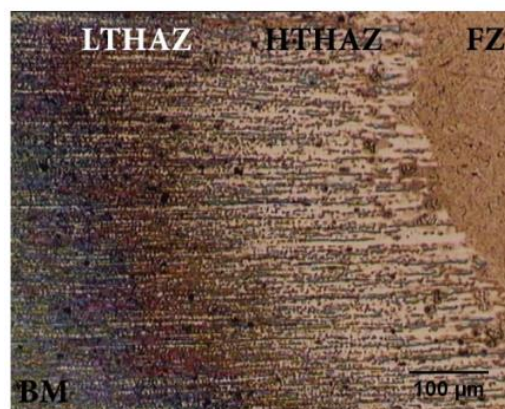
شکل (۱۱): پیش بینی میزان فریت در فلز جوش توسط دیاگرام WRC-1992

در شکل (۱۲) پروفیل سختی فولاد دوبلکس نشان داده شده است، همان گونه که در نمودار مشاهده می شود، تغییرات سختی در امتداد محل اتصال زیاد نیست، با این وجود تغییرات سختی در منطقه ای متأثر از حرارت با دمای



شکل (۷): ریز ساختار فلز پایه فولاد دوبلکس

شکل (۸) نمایی از ریز ساختار HAZ فولاد دوبلکس را نشان می دهد. با توجه به این شکل، ناحیه ای متأثر از حرارت (HAZ) به دو ناحیه ای با دمای بالا (HTHAZ) و با دمای پایین (LTHAZ) تقسیم شده است. در ناحیه متأثر از حرارت با دمای بالا که به منطقه ای چسبیده است. ساختار آستنیتی بیشتری مشاهده می شود ولی در LTHAZ ساختار فریتی بیشتری مشاهده می شود. به طور کلی می توان گفت در منطقه ای متأثر از حرارت (HAZ) بالانس فازی نسبت به فلز پایه به هم خورده است.

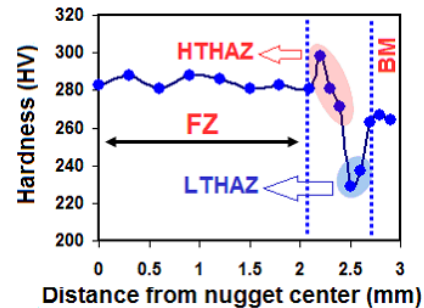


شکل (۸): ریز ساختار منطقه ای متأثر از حرارت (HAZ) فولاد دوبلکس

۳-۲- ریز ساختار FZ

شکل (۹) ریز ساختار دکمه ی جوش فولاد دوبلکس را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود. ساختار فلز پایه که دارای بالانس فازی بین فریت و آستنیت بوده، پس از جوشکاری به یک ریز ساختار غیر بالانس تبدیل می شود. همان طور که مشاهده می شود درصد فریت در دکمه ی جوش بسیار بالاست و مقدار کمی آستنیت در مرز دانه های فریت به همراه رسوبات زیادی در درون دانه های فریتی در ریز ساختار مشاهده می شود. برای تحلیل ریز ساختار دکمه ی جوش باید مسیر استحاله های فازی در آن مشخص شود. بر اساس شکل (۱۰) می باشد.

بالا (HTHAZ) از سختی دکه جوش بالاتر است. این امر احتمالاً به دلیل انحلال ذرات TiC در این منطقه و در نتیجه افزایش درصد کربن محلول در ساختار هست. افزایش درصد کربن هم فریت و هم آستینیت را مستحکم می کند و موجب افزایش سختی در این منطقه می شود.



شکل (۱۲): پروفیل سختی جوش نقطه ای فولاد زنگ نزن دبلکس

۴-۳- مود شکست در آزمون کشش - برش

مود شکست جوش های نقطه ای یک معیار کیفی از کیفیت جوش است. به طور کلی، جوش های نقطه ای در دو مود فصل مشترکی (IF) و محیطی (PF) دچار شکست می شوند. مود فصل مشترکی با رشد ترک از میان دکه ی جوش رخ می دهد و مود محیطی با بیرون کشیده شدن دکه جوش از یک ورق و تولید یک سوراخ در ورق دیگر همراه است. با توجه به تغییر فرم پلاستیک ناچیز مود فصل مشترکی، وقوع این نوع شکست بیانگر انرژی شکست پایین اتصال می باشد. بنابراین تغییر فرم پلاستیک قابل توجهی همراه با شکست محیطی منجر به تولید یک شکست پر انرژی می شود و این موضوع از منظر قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف برای خودرو و سرنشینان اهمیت بالایی دارد. از آنجایی که ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی در مود فصل مشترکی به طور قابل توجه کمتر از مود محیطی است، بنابراین برای اینکه جوش های نقطه ای در حین سرویس دچار تخریب زودرس نشوند، متغیرهای فرایند باید به گونه ای تنظیم شوند که از دستیابی

به مود شکست محیطی اطمینان حاصل گردد. در جوشهای نقطه ای یک قطر دکه ی بحرانی (DCR) وجود دارد که در اندازه ی دکه ی جوش های کمتر از آن مود شکست فصل مشترکی و در اندازه ی دکه ی جوش بیشتر از آن مود شکست محیطی حاکم است. در مورد (PF) اطراف دکه ی جوش در جایی که سختی کمتری دارد گردنی شدن صورت می گیرد و ترک از آن منطقه جوانه می زند. سپس ادامه فرایند شکست شامل رشد ترک حول دکه ی جوش و بیرون کشیده شدن کامل دکه جوش است. در (PP-PT) مشابه با مود (PF) یک ترک حول دکه ی جوش ایجاد شده سپس هنگام رشد نمی تواند به طول کامل حول دکه ی جوش رشد کند و ترک از مسیر اولیه منحرف شده و به صورت مورب در دکه ی جوش وارد می شود. در نتیجه حین جدایش نهایی ورق ها از یکدیگر، قسمتی از جوش در راستای ضخامت ورق نیز خارج می شود که به صورت جزئی می باشد.

مهمترین پارامتر کنترل کننده توزیع تنشی در جوش نقطه ای اندازه دکه ی جوش است. با کاهش قطر دکه ی جوش تنش برشی بوجود آمده پیش از آن که تنش کششی موجب گردنی شدن شود، به مقدار بحرانی خود می رسد و در نتیجه شکست در مود فصل مشترکی رخ می دهد. جدول (۴) تاثیر جریان جوشکاری بر مود شکست اتصال نقطه ای فولاد دبلکس را نشان می دهد. نتایج تجربی در این تحقیق نشان داد که جوش های مقاومتی نقطه ای دبلکس در جریانهای ۷/۵ تا ۱۱/۵ کیلو آمپر می باشد که به صورت-PT-PP شکسته شدند. در مود PF اطراف دکه ی جوش در جایی که سختی کمتری دارد (LTHAZ یعنی) گردنی شدن صورت گرفته و ترک از آن منطقه جوانه می زند. سپس ادامه فرایند شکست شامل رشد ترک حول دکه ی جوش و بیرون کشیده شدن کامل دکه ی جوش است. در مود PT-PP مشابه با مود PF، یک ترک از حول دکه ی جوش ایجاد شده، سپس هنگام رشد، نمی تواند به طور کامل حول دکه ی جوش رشد کند و ترک از مسیر اولیه منحرف شده و به صورت مورب در دکه ی جوش وارد می شود و در نتیجه حین جدایش نهایی ورق ها از هم، قسمتی از جوش در راستای ضخامت ورق نیز خارج می شود.

جدول (۴) تغییرات جریان و اثر آن در مود شکست مود شکست در اتصال جوش نقطه ای مقاومتی برای نمونه های تحت آزمایش کشش-برش

جریان الکتریکی	۷/۵	۸	۸/۵	۹	۹/۵	۱۰	۱۰/۵	۱۱	۱۱/۵
مود شکست در اتصال جوش نقطه ای فولاد دبلکس	PT-PP	PT-PP	PT-PP	PT-PP	PT-PP	PT-PP	PT-PP	PT-PP	PT-PP
قطر دکه جوش	۵/۷۹	۶/۱۲	۶/۴	۶/۵۳	۶/۶۵	۶/۸۱	۶/۸۹	۶/۹۷	۷/۱۱

۴- نتیجه گیری

در ورق دوبلکس تمامی شکست‌ها به صورت جزئی ضخامت و جزئی محیط اتفاق افتاد زیرا با افزایش جریان جوشکاری و در نتیجه افزایش قطر دکه جوش، از میزان ورود ترک به دکه‌ی جوش حین فرآیند شکست کاسته می‌شود. استاندارد (AWS/ANSI/SAE) نمی‌تواند قطر دکه‌ی بحرانی را برای حصول مودشکست محیطی در ورق فولاد زنگ نزن دوبلکس در آزمایش کشش- برش مشخص نماید. اندازه دکه‌ی جوش اصلی ترین فاکتور کنترل کننده‌ی استحکام و انرژی شکست جوش‌های نقطه‌ای است. در جریان‌های بالا، با افزایش فرورفتگی شدید الکتروود در ورق، بیرون زدگی مذاب شدید ایجاد شده که منجر به کاهش انرژی شکست می‌گردد. با افزایش جریان جوشکاری، قطر دکه‌ی جوش زیاد می‌شود ولی در جریان‌های بالا قطر دکه‌ی جوش کاهش پیدا می‌کند. با افزایش جریان جوشکاری حداکثر نیرو افزایش پیدا می‌کند. ظرفیت و قابلیت جذب انرژی در شکست جوش، در مود فصل مشترکی خیلی کمتر از مود محیطی است. ارتباط مستقیمی بین اندازه دکه‌ی جوش و استحکام شکست وجود ندارد. با افزایش جریان الکتریکی، نیروی ماکزیمم جوش زیاد شده و در نتیجه قطر دکه جوش زیاد می‌شود.

منابع

۱- فناوری جوشکاری ترجمه و تألف: دکتر امیرحسین کوکبی عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف، انتشارات آزاده.

۲- دالانی کمیل، جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپر آلیاژهای اینکونل ۷۱۸، پایان نامه کارشناسی متالورژی، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، سال ۱۳۹۱

3- M. Pouranvaria, S.P.H. Marashib, Critical review of automotive steels spot welding: Process, structure and properties, Science and Technology of Welding & Joining 18(5), 2013, 361-403.

۴- مجید اویسی، نصرالله بنی مصطفی عرب، غلامحسین پایگاه، پیش بینی و بهینه سازی اندازه قطر دکه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بر ورق مورد استفاده در صنعت کشتی سازی با استفاده از طراحی آزمایش ها، اولین همایش ملی توسعه سواحل مکران و اقتدار دریایی جمهوری اسلامی ایران بهمن ۱۳۹۱.

5- M. Pouranvari, S.P.H. Marashi, Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part I. factors, Materials Science and Engineering A, 528, 2011, 8337-8343.

6-M. J. M. Gerami, M. Farajpour, M. Poranvari, E. Ranjbar. Structure-Mechanical Properties Relationship in Resistance Spot Welding of AISI304 Austenitic Stainless Steel, Journal of Materials Science, Vol.2, No.3, 2010, 50-63.

7- M. Pouranvaria, S.P.H. Marashib, Ferritic-austenitic stainless steels dissimilar resistance spot welds: Metallurgical and failure characteristics, Science and Technology of Welding & Joining 21(6), 2016, 1-8.

