

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 نقطه‌ای اتصال مشابه و نامشابه در فولاد زنگ نزن دوبلکس در شرایط کشش برش می‌پردازد. 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 دکمه‌ی جوش و مطالعه مود شکست جوش بر روی اتصالات انجام گردید. ایجاد یک جوش مقاوم نقطه‌ای 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 می‌یابد.

* عهده‌دار مکاتبات: alheidarym@yahoo.com

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

۱-مقدمه

فولادهای زنگ نزن، گروهی از مهم‌ترین مواد مهندسی هستند که به‌طور گسترده در صنایع و محیط‌های مختلف استفاده می‌شوند. فولادهای زنگ نزن شامل گروهی از فولادهای پرایلیژ، بر پایه Fe-Cr، Fe-Ce-C و Fe-Ni می‌باشند. این فولادها برای زنگ نزن بودن باید حاوی حداقل ۱۰/۵ درصد وزنی کرم بوده که این میزان کرم باعث ایجاد سطح غیرفعال اکسیدی می‌گردد و از اکسیداسیون و خوردگی فلز زیرین در شرایط محیط خوردنده جلوگیری می‌کند. 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 شده‌اند. 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) می‌توانند 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 یافته‌اند. فولادهای زنگ نزن دارای کاربردهای گسترده‌ای 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 به‌طور

گسترده در کاربردهای استریل مثل فرآیندهای داروسازی، تولید لبنیات و صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بیشتر فولادهای زنگ نزن قابل جوشکاری هستند ولی بسیاری از آن‌ها نیاز به دستورالعمل ویژه‌ای دارند. در بیشتر موارد، جوشکاری منجر به تغییرات قابل توجه فلز جوش و ریزساختار ناحیه‌ی متأثر از حرارت (HAZ) در مقایسه با فلز پایه می‌شود که می‌تواند منجر به تغییر در تعادل فازی مطلوب، ایجاد فازهای بین فلزی، رشد دانه‌ها، جدایی عناصر آلیاژی و ناخالصی‌ها و واکنش‌های دیگر گردد [۱].

۱-۱- فولادهای زنگ نزن دوبلکس

خواص فیزیکی این فولادها مابین فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فریتی قرار می‌گیرد، اما در مجموع خواص آن‌ها به فولادهای زنگ نزن فریتی و فولادهای کربنی شباهت بیشتری دارد. مقاومت به حفره‌دار شدن و خوردگی شیباری این فولادها تابعی از مقدار کرم، مولیبدن، تنگستن و نیتروژن و مشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI613 بوده و حتی برخی دوبلکس‌ها بهتر از فولاد زنگ نزن آستنیتی مقاوم در برابر آب دریا عمل می‌کنند. تمامی فولادهای زنگ نزن دوبلکس به‌صورت مشهودی مقاومت به خوردگی تنش کلریدی بهتری نسبت به فولادهای زنگ نزن آستنیتی داشته و همچنین استحکام و شکل‌پذیری و تافنس بالاتری از این رده فولادها دارند. بیش از ۸۰ سال است که فولادهای زنگ نزن دوبلکس با ساختاری مشتمل بر آستنیتی و فریت به‌صورت تجاری در دسترس صنایع قرار گرفته‌اند [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

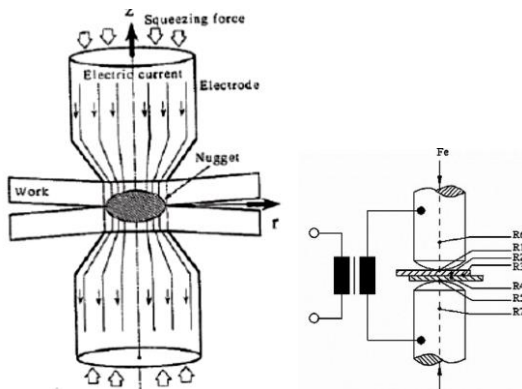
R_3 : مقاومت فصل مشترک بین دورق

R_4 : مقاومت الکتریکی ورق پایینی

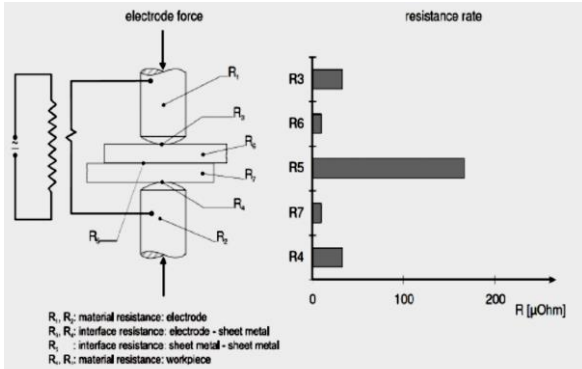
R_5 : مقاومت فصل مشترک بین الکترود ورق پایینی

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 باشد، 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 مرزخانه 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 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:

۳-۱-۳-۱- 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 پدیده 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].

۴-۱-۱- 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 فرورفتگی الکتروود 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 تعیین‌کننده‌ی استحکام شکست جوش مقاومت نقطه‌ای عمق فرورفتگی الکتروود می‌باشد. بر این اساس هرچه عمق فرورفتگی الکتروود زیاد باشد، تمرکز تنش نیز بیشتر و در نتیجه نیروی شکست کاهش می‌یابد. عمق فرورفتگی الکتروود تابع حرارت ورودی، نیروی الکتروود و تنش نهایی فلز است [۳].

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

نکته‌ی مهم این است که عمق فرورفتگی الکتروود 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 دکمه‌ی 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 الکتروود (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 نگه 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 نقطه‌ای تابع قطر الکتروود است [۳]. و رابطه‌ی قطر حداکثر با قطر الکتروود به صورت زیر است:

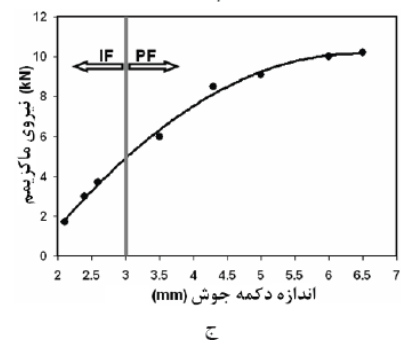
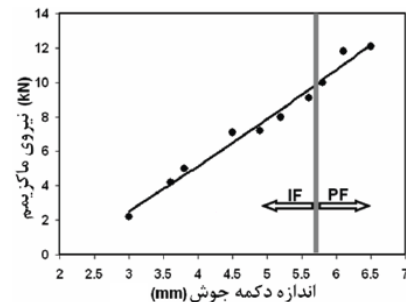
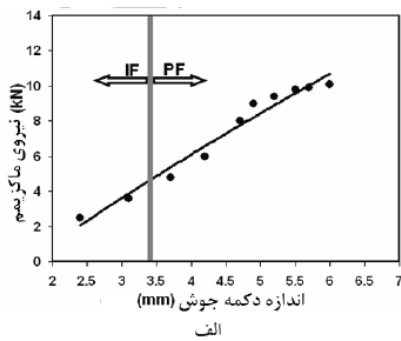
$$D_{MAX} = 1.1 D_e \quad (5)$$

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 بر حسب اندازه دکه جوش [۵]

الف- CS/CS ب- SS/SS ج- CS/SS

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

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

۱-۴-۱- تحلیل ریاضی ساده مود شکست

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

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

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

σ_{PF} : استحکام کششی محل شکست محیطی در منطقه‌ی HAZ و BM و

τ_{fz} : استحکام برشی دکمه‌ی جوش

هرچه قطر دکمه‌ی 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 دکمه‌ی جوش برای از بین بردن گشتاور و هم راستا شدن با جهت اعمال نیرو چرخش می‌کند. هر چه اندازه‌ی دکمه بیشتر باشد، چرخش دکمه بیشتر می‌شود. در شکل ۳ تغییرات قطر دکمه جوش به عنوان مهم‌ترین 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 [۷-۵].

۲- مواد و روش تحقیق

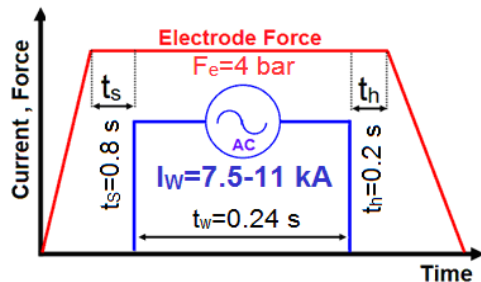
در این تحقیق از ورق فولاد زنگ نزن دوبلکس با نام تجاری 1Cr21Ni5Ti استفاده شده است؛ ضخامت این ورق یک میلی‌متر می‌باشد. ترکیب شیمیایی ورق به روش کوانتومتری تعیین و در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی ورق فولاد زنگ نزن دوبلکس 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 دوبلکس

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



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 کندیگی مبلمانی و یک جریان دیگر برای بررسی های ساختاری مورد استفاده قرار گرفتند. تست کشش- برش به وسیله‌ی دستگاه تست کشش SANTAM-150 و با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. ابعاد نمونه‌های تست کشش- برش طبق استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 تهیه شدند. برای جلوگیری از اعمال تنش‌های ترکیبی به نمونه در حین انجام تست کشش- برش از یک لایه فلزی با ضخامت یکسان با ضخامت ورق مصرفی، روی نمونه‌ها استفاده شد. با استفاده از نمودار نیرو- جابجایی مقدار حداکثر نیرو و حداکثر انرژی شکست (سطح زیر نمودار بار-جابجایی تا نقطه‌ی ماکزیمم نیرو) برای هر نمونه تعیین شد. برای انجام بررسی‌های ساختاری نمونه‌ها همان طور که در شکل ۳-۱۵ مشاهده می‌شود، نمونه‌ها از مقطع عرضی ورق

بیرون زدگی مذاب حتی با قطر دکمه‌ی 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 دکمه‌ی جوش نیروی حداکثر و انرژی شکست افزایش می‌یابد و با وقوع بیرون زدگی مذاب، انرژی شکست به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر دکتر پور انوری و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی ساختار و عملکرد مکانیکی جوشکاری مقاومت نقطه ای فولاد های زنگ‌نزن فریتی AISI430 نشان دادند که تاثیر

برای بررسی خواص کششی فلزهای پایه؛ آزمایش کشش استاندارد انجام شد. برای این منظور نمونه‌ی 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 دوبلکس 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 نقطه‌ای را با استفاده از دستگاه کنترل دیجیتالی را دارد. برای جوش دادن نمونه‌ها از الکتروود گروه A، مطابق کلاس ۲ دسته بندی RWMA استفاده شد.

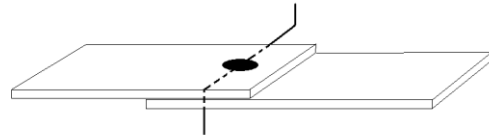
برای بررسی مشخصه های ماکرو ساختاری و ارتباط آن با مود شکست تاثیر مهم‌ترین پارامتر جوشکاری یعنی جریان جوشکاری بررسی شد. برنامه جوشکاری عبارت است از:

- 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 فاصله‌های ۰/۵ کیلوآمپری
- ۳- زمان جوشکاری ۱۲ سیکل معادل ۰/۲۴ ثانیه
- ۴- نیروی الکتروود ۴ بار (معادل ۵ کیلو نیوتن)
- ۵- زمان نگهداری الکتروود روی دکمه‌ی جوش برابر ۱۰ سیکل معادل ۰/۲ ثانیه

$$I_w = 7.5 - 11.5KA$$

در شکل ۴ شماتیک سیکل جوشکاری نشان داده شده است.

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



شکل (۵): محل برش نمونه‌ها

۲-۱- بررسی های ماکروساختاری

برای بررسی ماکرو ساختاری نمونه‌ها پس از انجام عملیات استاندارد متالوگرافی آماده سازی، نمونه‌ها 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 دکمه‌ی جوش از محلول اچ کالینگز شماره‌ی یک (1.5 g CuCl_2 , 33 mL HCl , $33 \text{ mL H}_2\text{O}$) و برای بررسی ریزساختار منطقه‌ی منائر 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

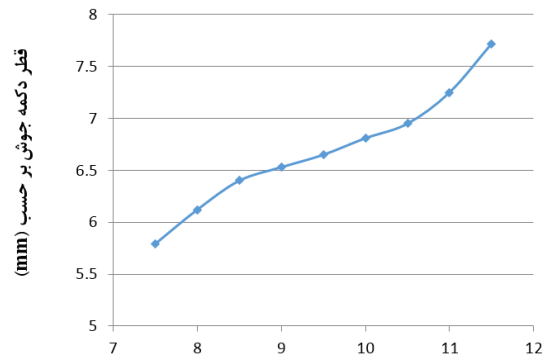
(ب) سنباده زنی از شماره ۲۴۰ تا ۲۰۰۰ سنباده زده شد

(ج) پالیش کردن نمونه‌ها 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 (شبه فلز پایه مورد استفاده) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود انجماد آلیاژ با تشکیل فاز فریت دلتا آغاز می‌شود و سپس در حین یک استحاله حالت جامد فاز آستینیت از آن تشکیل می‌شود و در نهایت هنگام آهسته سرد شدن، باقیمانده به مخلوطی از فریت و کاربید تبدیل می‌شود. شکل (۷) ریزساختار فلز پایه فولاد دوبلکس را نشان می‌دهد. در این شکل زمینه بیانگر آستینیت و رگه‌های موجود در شکل بیانگر فریت هستند. همان طور که مشاهده می‌شود ریز ساختار فلز پایه حدوداً شامل ۵۰ درصد فریت و ۵۰ درصد آستینیت است.

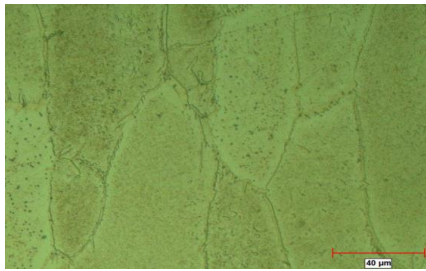


شدت جریان الکتریکی بر حسب (KA)

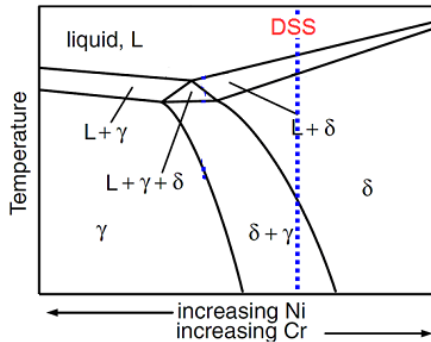
نمودار (۱) تاثیر جریان جوشکاری بر اندازه دکمه جوش (دوبلکس - دوبلکس)

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

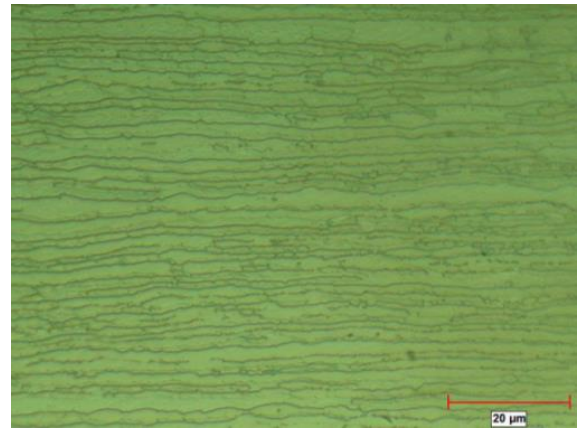
شیب دمایی شدید و سرعت سرد شدن بالای فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ریز ساختار محل اتصال را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. برای بررسی ریز ساختار محل اتصال، دیاگرام تعادلی شبه



شکل (۹): ریز ساختار دکمه‌ی جوش فولاد دوبلکس

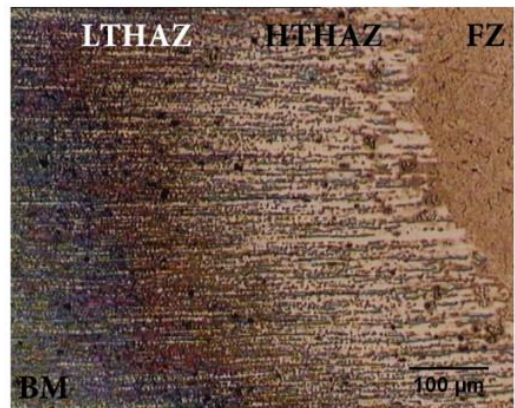


شکل (۱۰): شماتیک تحولات فازی در فولاد دوبلکس



شکل (۷): ریز ساختار فلز پایه فولاد دوبلکس

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



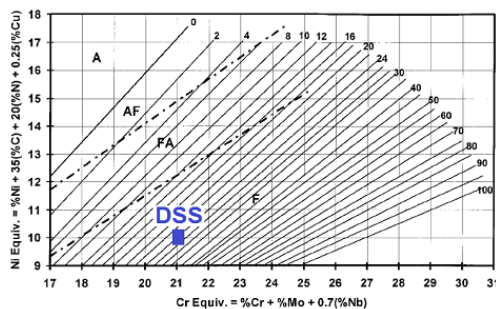
شکل (۸): ریز ساختار منطقه‌ی متأثر از حرارت (HAZ) فولاد دوبلکس

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

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

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



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

در شکل (۱۲) پروفیل سختی فولاد دوبلکس نشان داده شده است، همان‌گونه که در نمودار مشاهده می‌شود، تغییرات سختی در امتداد محل اتصال زیاد نیست، با این وجود تغییرات سختی در منطقه‌ی متأثر از حرارت با دمای

۳-۲- ریز ساختار FZ

شکل (۹) ریز ساختار دکمه‌ی جوش فولاد دوبلکس را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود. ساختار فلز پایه که دارای بالانس فازی بین فریت و آستنیت بوده، پس از جوشکاری به یک ریز ساختار غیر بالانس تبدیل می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود درصد فریت در دکمه‌ی جوش بسیار بالاست و مقدار کمی آستنیت در مرز دانه‌های فریت به همراه رسوبات زیادی در درون دانه‌های فریتی در ریز ساختار مشاهده می‌شود. برای تحلیل ریز ساختار دکمه‌ی جوش باید مسیر استحاله‌های فازی در آن مشخص شود. بر اساس شکل (۱۰) می‌باشد.

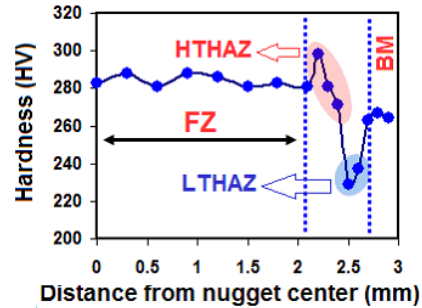
به مود شکست محیطی اطمینان حاصل گردد. در جوشهای نقطه ای یک قطر دکمه ی بحرانی (DCR) وجود دارد که در اندازه ی دکمه ی جوش های کمتر از آن مود شکست فصل مشترکی و در اندازه ی دکمه ی جوش بیشتر از آن مود شکست محیطی حاکم است. در مورد (PF) اطراف دکمه ی جوش در جایی که سختی کمتری دارد گردنی شدن صورت می گیرد و ترک از آن منطقه جوانه می زند. سپس ادامه فرایند شکست شامل رشد ترک حول دکمه ی جوش و بیرون کشیده شدن کامل دکمه جوش است. در (PP-PT) مشابه با مود (PF) یک ترک حول دکمه ی جوش ایجاد شده سپس هنگام رشد نمی تواند به طول کامل حول دکمه ی جوش رشد کند و ترک از مسیر اولیه منحرف شده و به صورت مورب در دکمه 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 دکمه ی جوش است. با کاهش قطر دکمه 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 دوبلکس را نشان می دهد. نتایج تجربی در این تحقیق نشان داد که جوش های مقاومتی نقطه ای دوبلکس در جریانهای ۷/۵ تا ۱۱/۵ کیلو آمپر می باشد که به صورت-PT-PP شکسته شدند. در مود PF اطراف دکمه 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 دکمه ی جوش و بیرون کشیده شدن کامل دکمه ی جوش است. در مود PT-PP مشابه با مود PF، یک ترک از حول دکمه ی جوش ایجاد شده، سپس هنگام رشد، نمی تواند به طور کامل حول دکمه ی جوش رشد کند و ترک از مسیر اولیه منحرف شده و به صورت مورب در دکمه 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

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

بالا (HTHAZ) از سختی دکمه 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 دوبلکس

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 دکمه ی جوش رخ می دهد و مود محیطی با بیرون کشیده شدن دکمه 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 کمتری 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

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 دکمه جوش، از میزان ورود ترک به دکمه‌ی جوش حین فرآیند شکست کاسته می‌شود. استاندارد (AWS/ANSI/SAE) نمی‌تواند قطر دکمه‌ی بحرانی را برای حصول مودشکست محیطی در ورق فولاد زنگ نزن دوبلکس در آزمایش کشش- برش مشخص نماید. اندازه دکمه‌ی 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 دکمه‌ی جوش زیاد می‌شود ولی در جریان‌های بالا قطر دکمه‌ی 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 دکمه‌ی جوش و استحکام شکست وجود ندارد. با افزایش جریان الکتریکی، نیروی ماکزیمم جوش زیاد شده و در نتیجه قطر دکمه 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 دکمه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بر ورق مورد استفاده در صنعت کشتی سازی با استفاده از طراحی آزمایش‌ها، 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.

