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 متالوروگرافی نوری برای توصیف ماکرو ساختار و ریز ساختار، سختی دکمه‌ی جوش و مطالعه مود شکست جوش بر روی اتصالات انجام گردید. ایجاد یک جوش مقاومت 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 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 می‌گردد و از اکسیداسیون و خورندگی فلز زیرین در شرایط محیط خورنده 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 طوری‌که 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 ازجمله 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 آستینتی 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 شیاری 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 تنشی 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].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.1.0]

فولادهای زنگ نزن فریتی– آستینتی دو فازی نام خود را از ریزساختارشان در دمای محیط گرفته‌اند که تقریباً نیمی فریت و نیمی آستینت است. فولادهای زنگ نزن دو فازی در جاهایی استفاده می‌شوند که نیاز به مقاومت به خوردگی عالی، استحکام و یا هردوی آن باشد. چون این فولادها نسبت به فولادهای آستینتی، 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 می‌شوند و در بسیاری از کاربردها که ترک خوردن به دلیل خوردگی تنشی و خوردگی حفره‌ای مهم می‌باشند، بجای آلیاژهای آستینتی استفاده می‌شوند. 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 فیلم‌های مذاب مرزدانه‌ای پیوسته کم می باشد. برخی موارد ترک خوردن تحت شرایط مهار زیاد گزارش‌شده است که نیاز به انجام برخی احتیاط‌ها می باشد. هرچند فولادهای زنگ نزن دوفازی مقاوم به ترک خوردن هیدروژنی می باشد، ولی برخی شکست‌های هزینه‌بر 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 می‌سازد و روشی دقیق و قابل اطمینان و دارای صرفه ی اقتصادی برای اتصال قطعات است. اغلب اشیاء در جامعه مدرن امروزی مانند ساختمان‌ها، پل‌ها، خودروها، کامپیوترها وسایل پزشکی بدون استفاده از جوشکاری قابل تولید نیستند.

جوشکاری نقطه‌ای یکی از انواع جوشکاری مقاومتی است که از آن به منظور جوشکاری ورق‌ها استفاده می‌شود. معمولاً ضخامت ورق‌هایی که با این روش جوشکاری می‌شوند، بین ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر است. در این نوع جوشکاری از دو الکترود مسی مشابه برای متمرکز کردن جریان بر روی قطعه کار و همچنین واردکردن فشار روی قطعه کار استفاده می‌شود. نتیجه کار نقطه‌جوشی است که به سرعت تا نقطه ذوب آن گرم می‌شود و با قطع جریان در آن نقطه، دو قطعه کار به هم متصل می‌شوند. جوشکاری نقطه‌ای می‌تواند به‌صورت دستی، رباتیک و یا توسط ماشین مخصوص جوشکاری نقطه‌ای انجام شود. همچنین می‌توان جوش‌های نقطه‌ای 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 ماشین‌های هیدرولیکی، مکانیکی و دستگاه‌های پنوماتیکی به دست می‌آید[۲]. جوشکاری مقاومت نقطه‌ای 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 نگه‌داشته شده‌اند) متصل می‌شوند. سطوح تحت تماس در منطقه تمرکز جریان توسط یک پالس کوتاه مدت با ولتاژ کم و جریان بالا حرارت می‌بینند تا یک دکمه از فلز جوش را ایجاد نمایند. وقتی جریان قطع می‌شود، فشار الکترودها ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که فلز جوش با سرعت سرد شده و منجمد گردد.

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

$$Q=I^2Rt \qquad (۱)$$

Q: گرمای تولیدشده برحسب یکای ژول (J)

R: مقاومت الکتریکی برحسب یکای اهم (Ω)

I: شدت‌جریان الکتریکی برحسب یکای آمپر (A)

t : زمان عبور جریان الکتریکی برحسب 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 می‌کنند[۳]. مقاومت کل مسیر جوشکاری را می‌توان از رابطه (۲) به دست آورد، همچنین شکل ۳ میزان مقاومت‌های الکتریکی موجود در سیکل جوش مقاومت نقطه‌ای را نشان می دهد.

$$R=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_6+R_7 \qquad (۲)$$

این مقاومت‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند:

- مقاومت‌های مواد (R_2 وR_4 وR_6 وR_7)
- مقاومت‌های بین الکترود و قطعه کار(R_1 وR_5)

R_1: مقاومت فصل مشترک بین الکترود ورق بالایی

R_2: مقاومت الکتریکی ورق بالایی

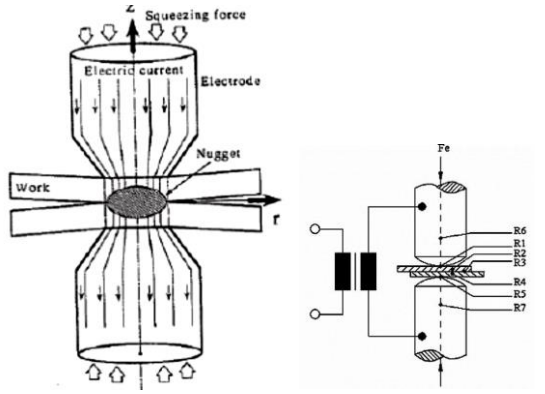
R3: مقاومت فصل مشترک بین دورق

R4: مقاومت الکتریکی ورق پایینی

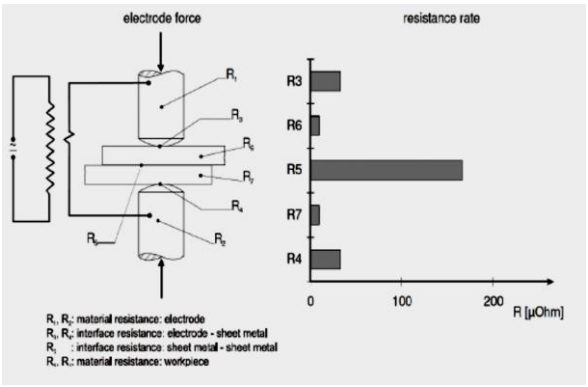
R5: مقاومت فصل مشترک بین الکترود ورق پایینی

R6: مقاومت الکترود بالایی

R7: مقاومت الکترود پایینی



شکل(۱):نمایش شماتیک جوش مقاومت نقطه‌ای و نمایش مقاومت‌های هفتگانه [۲]



شکل(۲):میزان مقاومت‌های الکتریکی موجود در سیکل جوش مقاومت نقطه‌ای [۳]

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.1.0]

مقاومت مواد ناشی از خواص فیزیکی قطعات کار(R2 وR4) و الکترودها (R6 وR7) 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 الکترود (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 نقطه ای 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- ارزیابی کیفیت نقطه جوش مقاومتی

به‌طورکلی 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 می شود (رابطه (۳)).

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi D^2}{4}} \qquad (۳)$$

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

$$D=f(Q) \qquad (۴)$$

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

$$D_{MAX}=1.1D_e \qquad (۵)$$

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

میزان قطر دکمه‌ی جوش یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین کننده‌ی 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 امریکا (AWS/ANSI/SAE) معادله زیر را برای رسیدن به شرایط ایده ال در رفتار مکانیکی جوش نقطه ای پیشنهاد می‌کند:

$$d = 4\sqrt{t} \qquad (۶)$$

که در آن d و t به ترتیب قطر دکمه جوش و ضخامت ورق برحسب میلی‌متر هستند. ولی به هرحال این رابطه همیشه بهترین نتیجه را نشان نمی دهد. 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].

۳-۳-۱- تاثیر 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 فرورفتگی الکترود در ورق‌ها به میزان زیادی است که در نهایت منجر به ایجاد تمرکز تنش شده و مجددا رفتار شکست جوش مقاومت نقطه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از پارامترهای تعیین‌کننده‌ی استحکام شکست جوش مقاومت نقطه‌ای عمق فرورفتگی الکترود می‌باشد. بر این اساس هرچه عمق فرورفتگی الکترود زیاد باشد، تمرکز تنش نیز بیشتر و در نتیجه نیروی شکست کاهش می یابد. عمق فرورفتگی الکترود تابع حرارت ورودی، نیروی الکترود و تنش نهایی فلز است[۳].

$$T_i = f(Q, F_e, \sigma y) \qquad (۷)$$

نکته‌ی مهم این است که عمق فرورفتگی الکترود باید کمتر از ۲۰٪ ضخامت ورق باشد.

$$t_i<20\%t \qquad (۸)$$

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 آنجایی‌که 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.1.0]

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 گلویی 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).

$$F_{Pf} = \pi D t \sigma_{PFl} \qquad (۹)$$

$$F_{If} = \frac{\pi D^2}{4} \tau_{fZ} \qquad (۱۰)$$

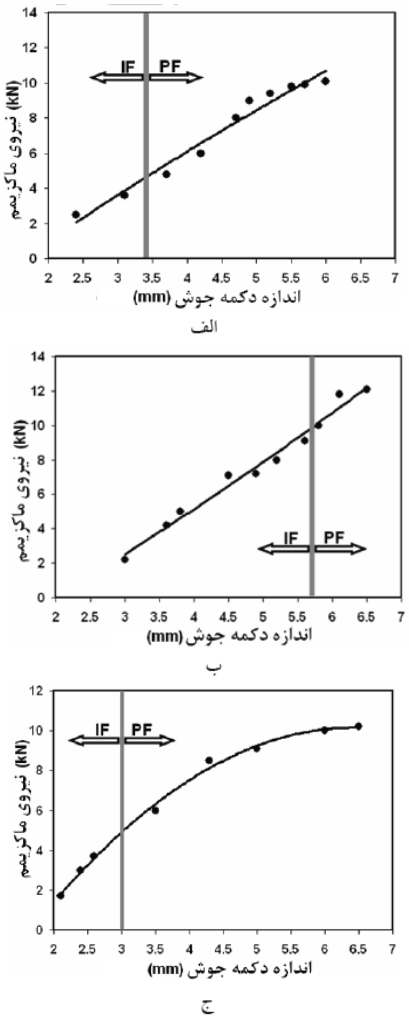
σ_{PFl} :استحکام کششی محل شکست محیطی در منطقه‌ی HAZ و BM

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 جوش های 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 می شود. در شکل ۳ تغییرات قطر دکمه جوش به عنوان مهم ترین پارامتر کنترل کننده ی استحکام مکانیکی جوش نقطه‌ای بر حسب جریان جوشکاری نشان داده شده است.



شکل(۳):تغییرات نیروی ماکزیمم و مود شکست برحسب اندازه دکمه 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 می باشد. با افزایش جریان، قطر دکمه‌ی جوش افزایش می‌یابد در نتیجه عمق فرورفتگی الکترود 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 قرارگرفته 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 دکمه ی جوش بیشتر باشد، مقاومت فصل مشترکی به برش بیشتر می‌شود و در مود محیطی با افزایش قطر دکمه ی جوش، مقاومت دکمه ی جوش در برابر چرخش دکمه ی جوش و درنتیجه نیروی لازم برای گردنی شدن محل شکست افزایش می‌یابد. با این حال افزایش قطر دکمه ی جوش سبب افزایش نیروی لازم جهت شکست جوش می‌شود. بنابراین الزاماً ارتباط مستقیمی بین اندازه دکمه ی جوش و نیروی حداکثر و انرژی شکست وجود ندارد. انرژی شکست برخی جوش‌ها با بیرون‌زدگی مذاب کمتر از انرژی شکست جوش‌هایی بدون

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.1.0]

بیرون‌زدگی مذاب حتی با قطر دکمه ی جوش کمتر است. گرامی و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی ارتباط ساختار و خواص مکانیکی جوشکاری مقاومت نقطه ای فولاد زنگ نزن آستینتی نشان دادند که با افزایش قطر دکمه ی 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 زنگ‌نزن فریتی AISI430 نشان دادند که تاثیر 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 می باشد. 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	-

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 ۱۲۰KVA 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 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 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 الکترود ۴ بار (معادل ۵ کیلو نیوتن)

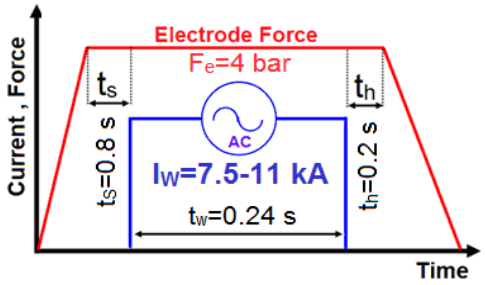
۵-زمان نگهداری الکترود روی دکمه‌ی جوش برابر ۱۰ سیکل معادل ۰/۲ ثانیه

$$I_W = 7.5 - 11.5KA$$

در شکل ۴ شماتیک سیکل جوشکاری نشان داده شده است.

جدول (۲): ابعاد نمونه استاندارد دوبلکس

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



شکل(۴): شماتیک سیکل جوشکاری

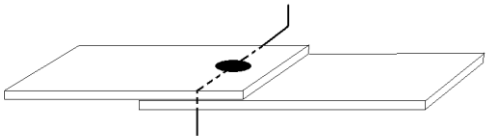
در هر جریان ۳ سری نمونه جوش داده شده است که یک جریان برای تست کشش- برش و جریان دیگر برای آزمون کندگی مبلمانی و یک جریان دیگر برای بررسی های ساختاری مورد استفاده قرار گرفتند.

تست‌کشش- برش به‌وسیله‌ی دستگاه تست کشش SANTAM-150 و با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام‌شد. 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 ۳-۱۵مشاهده می‌شود، نمونه‌ها از مقطع عرضی ورق

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.1.0]

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 نمونه ها

۲-۱- بررسی های ماکروساختاری

برای بررسی ماکرو ساختاری نمونه ها پس از انجام عملیات استاندارد متالوگرافی آماده سازی، نمونه‌ها توسط محلول Vilella (4 g $CuSO_4$, 20 mL HCl, 20mL H_2O) اچ شده و عکس ماکرو تهیه شد.

۲-۲- بررسی های میکروساختاری

برای انجام بررسی‌های 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 mL Ethanol, 33 mL H_2O) و برای بررسی ریزساختار منطقه‌ی متاثر از حرارت از محلول اچ الکترولیتی KOH (56 g KOH and 100 mL H_2O) 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

د) اچ نمودن قطعات

ه) عکس برداری توسط میکروسکوپ نوری MEIJI ساخت کشور ژاپن

و) سختی سنجی توسط دستگاه INNOVA TEST ساخت کشور ژاپن

۳- نتایج

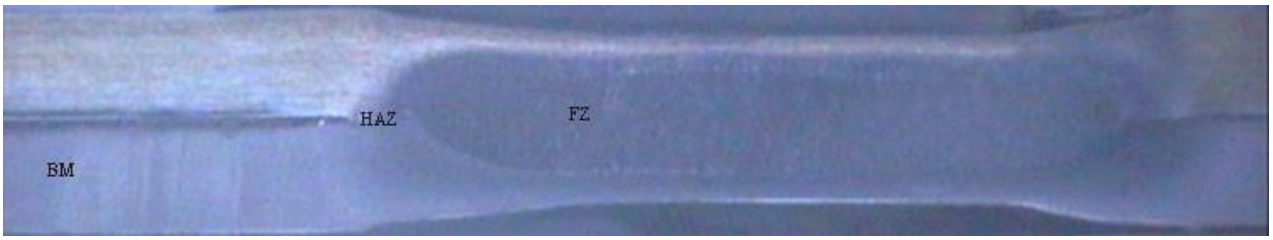
تشکیل یک جوش موجب ایجاد تغییرات ساختاری و هندسی در ورق فلز پایه می شود. ایجاد یک جوش نقطه‌ای از نظر هندسی موجب ایجاد یک شیار طبیعی در محل اتصال دو ورق می شود که رفتار مکانیکی جوش را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این فشار الکترود به هنگام سیکل حرارتی جوش موجب ایجاد فرورفتگی می‌گردد. به علت وجود سیکل حرارتی فرایند جوشکاری مقاومت نقطه ای یک ساختار ناهمگن در محل اتصال تشکیل می شود. محل اتصال از سه ناحیه ریز ساختاری مختلف تشکیل شده است:

(الف) منطقه ذوب شده (FZ) یا دکمه جوش که طی فرایند جوشکاری ذوب و منجمد شده و ساختار ریختگی نشان می‌دهد.

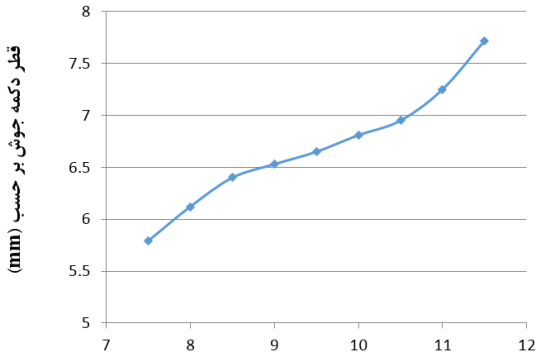
(ب) منطقه متاثر از حرارت (HAZ) که حین سیکل حرارتی جوشکاری ذوب نشده ولی تغییرات ریزساختاری در آن بوجود آمده است.

(ج) فلز پایه (BM) که هیچ تغییر متالورژیکی در اثر سیکل حرارتی جوش در آن بوجود نیامده است.

نمودار (۱) تاثیر جریان جوشکاری بر روی اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در اتصال جوش نقطه ای را نشان می دهد.



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



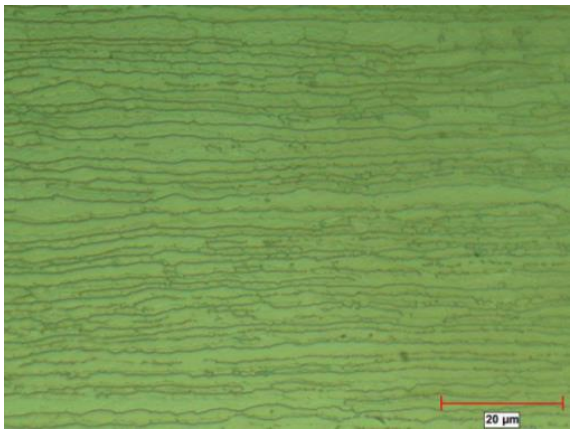
نمودار (۱)تاثیر جریان جوشکاری بر اندازه دکمه جوش(دوبلکس – دوبلکس)

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 می دهد. برای بررسی ریز ساختار محل اتصال، دیاگرام تعادلی شبه دوتایی Fe-C در ۱۳ درصد کروم (شبیه 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 آستینت 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 آستینت 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 آستینت است.

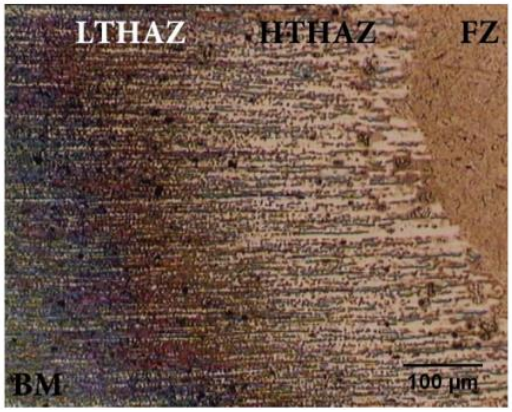
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.1.0]



شکل (۷):ریز ساختارفلز پایه فولاد دوبلکس

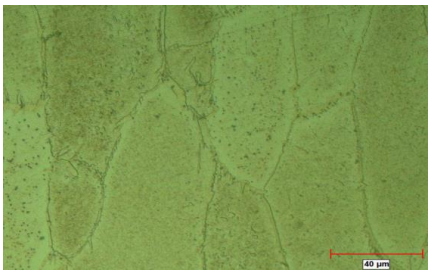
شکل (۸) نمایی از ریز ساختار HAZ فولاد دوبلکس را نشان می دهد. با توجه به این شکل، ناحیه‌ی متاثر از حرارت (^{HAZ}) به دو ناحیه‌ی با دمای بالا (HTHAZ) و با دمای پایین (LTHAZ) تقسیم شده است. در ناحیه متاثر از حرارت با دمای بالا که به منطقه‌ی (FZ) چسبیده است. ساختار آستینتی بیشتری مشاهده می شود ولی در LTHAZ 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.



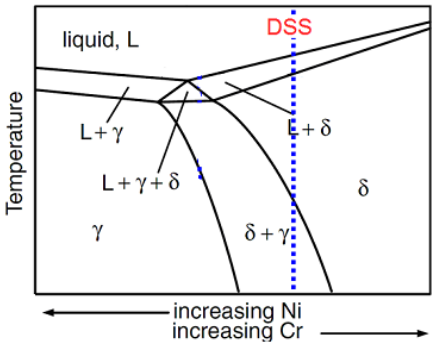
شکل (۸): ریزساختار منطقه ی متاثر از حرارت (HAZ) فولاد دوبلکس

۳-۲- ریز ساختار FZ

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



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



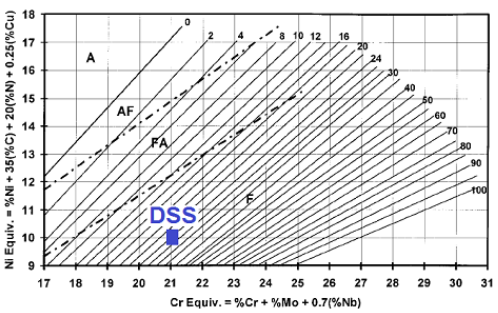
شکل(۱۰): شماتیک تحولات فازی در فولاد دوبلکس

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 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 آستینت 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 می شود.

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



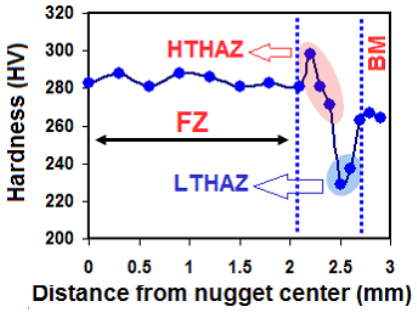
شکل(۱۱): پیش بینی میزان فریت در فلز جوش توسط دیاگرام WRC-1992

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.1.0]

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 آستینت را مستحکم می‌کند 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 نقطه‌ای یک معیار کیفی از کیفیت جوش است. به طورکلی، جوش های 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 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 توجه‌ای همراه با شکست محیطی منجر به تولید یک شکست پر انرژی می‌شود 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 جوش‌های نقطه‌ای 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 دکمه ی بحرانی (DCR) وجود دارد که در اندازه‌ی دکمه‌ی جوش های کمتر از آن مود شکست فصل مشترکی و در اندازه ی دکمه‌ی 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 می‌گیرد و ترک از آن منطقه جوانه می‌زند. 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 نمی‌تواند 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 می‌شود. 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 می‌دهد. جدول (۴) تاثیر جریان جوشکاری بر مود شکست اتصال نقطه‌ای فولاد دوبلکس را نشان می دهد. نتایج تجربی در این تحقیق نشان داد که جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای دوبلکس در جریانهای ۷/۵ تا ۱۱/۵ کیلو آمپر می باشد که به صورت PT-PP شکسته شدند. در مود PF اطراف دکمه‌ی جوش در جایی که سختی کمتری دارد (یعنی LTHAZ) گردنی شدن صورت گرفته و ترک از آن منطقه جوانه می زند. سپس ادامه فرایند شکست شامل رشد ترک حول دکمه‌ی جوش و بیرون کشیده شدن کامل دکمه‌ی جوش است. در مود PT-PP مشابه با مود PF، یک ترک از حول دکمه‌ی جوش ایجاد شده، سپس هنگام رشد، نمی‌تواند به طور کامل حول دکمه‌ی جوش رشد کند و ترک از مسیر اولیه منحرف شده و به صورت مورب در دکمه‌ی جوش وارد می‌شود و در نتیجه حین جدایش نهایی ورق‌ها ازهم، قسمتی از جوش در راستای ضخامت ورق نیز خارج می‌شود.

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.1.0]

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 جریان های بالا، با افزایش فرورفتگی شدید الکترود 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 هئیت علمی دانشگاه صنعتی شریف، انتشارات آزاده.

۲-دالانی کمیل، جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپر آلیاژهای اینکونل ۷۱۸، پایان نامه کارشناسی متالورژی، دانشکده معدن و متالوروژی، 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 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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.1.0]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.1.0] [Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]