

مود شکست جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد دوفازی DP780 در آزمون کشش متقاطع

مهدی منصوری حسن آبادی^{۱*}، مجید پورانوری^۲

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد، ایران

۲- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دزفول، ایران

*Mehdi_Mansouri_h@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۷/۰۴، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۱/۲۰)

چکیده

در تحقیق حاضر به بررسی ریزساختار و مود شکست اتصال جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولاد دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP780 پرداخته می‌شود. بررسی‌های متالوگرافی نوری، ریزسختی سنجی و آزمون کشش متقاطع انجام شد. نتایج نشان داد که ریزساختار دکمه جوش عمدتاً مشکل از مارتنزیت و مقداری فریت ویدمن اشتاتن و بینیت است. مقداری کاهش سختی در منطقه‌ی متأثر از حرارت نسبت به فلز پایه مشاهده شد. نتایج نشان داد که با افزایش جریان جوشکاری مود شکست جوش‌ها از فصل مشترکی به محیطی تغییر می‌کند. بررسی‌ها نشان داد که یک اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بحرانی برای حصول مود شکست محیطی لازم است. براساس مکانیزم شکست جوش‌های نقطه‌ای در آزمون کشش متقاطع، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی حداقل اندازه‌ی دکمه‌ی جوش مورد نیاز برای اطمینان از حصول مود شکست محیطی ارائه شد. براساس این مدل ارائه شده، انتقال مود شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای از فصل مشترکی به محیطی در آزمون کشش متقاطع بوسیله ضخامت ورق، نسبت سختی دکمه‌ی جوش به سختی محل شکست (HAZ)، مقدار حفره‌های انقباضی و تخلخل در دکمه‌ی جوش و پهنای HAZ کنترل می‌شود.

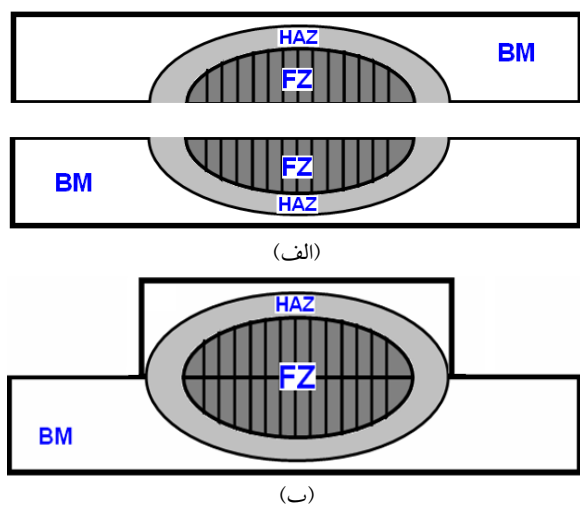
واژه‌های کلیدی:

فولاد دوفازی، جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، آزمون کشش متقاطع، مود شکست

۱- مقدمه

ترکیب عالی از استحکام و شکل‌پذیری، اجازه‌ی استفاده از ورق‌های نازک‌تر را می‌دهد و در نتیجه با توجه به کاهش وزن خودرو، در مصرف سوخت صرفه جویی می‌شود. به علاوه به علت بالاتر بودن قابلیت جذب انرژی فولادهای دوفازی، استفاده از آنها موجب افزایش امنیت سرنشینان می‌شود [۱-۴].

فولادهای استحکام بالای پیشرفته دوفازی فریتی-مارتنزیتی به علت استحکام و شکل‌پذیری مناسب، به طور قابل توجهی در صنعت خودروسازی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این فولادها حضور فاز مارتنزیت سخت، عامل استحکام بخشی و حضور زمینه فریتی نرم پیوسته، عامل شکل‌پذیری این فولادها است. این



شکل (۱): شماتیک مود شکست‌های اصلی جوش‌های نقطه‌ای حین آزمون کشش - مقاطع: الف) مود فصل مشترکی و ب) مود شکست محیطی

نشان داده شده است که فولادهای دوفازی نسبت به فولادهای کم کربن حساسیت بیشتری برای شکست در مود فصل مشترکی دارند [۴،۷،۱۰]. نشان داده شده است که معیارها و استانداردهای موجود برای تعیین اندازه دکمه جوش مناسب از جمله معیار $t^{0.5}$ (ضخامت ورق) برای حصول مود شکست محیطی در جوش نقطه‌ای فولادهای دوفازی مناسب نیست [۴،۷،۱۰]. با توجه به تاثیر مضر مود شکست فصل مشترکی بر قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف، این فاکتور در باید در تحلیل جوش‌پذیری این فولادها مد نظر قرار گیرد.

۳) حساسیت به تشکیل حفره‌های انقباضی در دکمه جوش فولادهای استحکام بالای پیشرفته به علت ترکیب شیمیایی غنی تر نسبت به فولادهای کم کربن حساسیت بیشتری به تشکیل حفره‌های انقباضی دارند [۸-۹]. حضور حفره‌های انقباضی در دکمه‌ی جوش موجب کاهش اندازه دکمه‌ی موثر و در نتیجه افزایش تمایل به شکست فصل مشترکی می‌شود [۱۰].

۴) بیرون زدگی مذاب گزارش شده است فولادهای استحکام بالای پیشرفته به دلیل مقاومت الکتریکی بیشتر حساسیت بیشتری به بیرون زدگی مذاب (خروج مذاب از دکمه‌ی جوش) حین فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای دارند [۸-۱۰]. بیرون زدگی مذاب می‌تواند

استفاده از مزایای فولادهای دوفازی در صنعت خودروسازی نیازمند بررسی جوش‌پذیری فولادهای دوفازی است. بهینه‌سازی فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای دوفازی تحقیقات وسیعی را به خود اختصاص داده است. نتایج کلی این تحقیقات [۵-۱۱] نشان می‌دهد جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای دوفازی نسبت به فولادهای استحکام پایین پیچیدگی بیشتری دارد. این پیچیدگی ناشی از عوامل زیر است:

۱) توسعه‌ی ریزساختاری در دکمه جوش (Fusion Zone) و منطقه متاثر از حرارت (Heat Affect Zone)

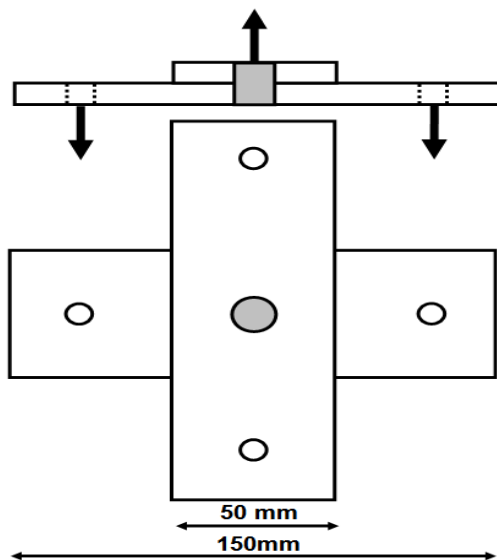
گزارش شده است که ریزساختار دکمه جوش (FZ) در فولادهای دوفازی و حتی در فولادهای کم کربن عمدتاً ماتزیتی است [۳]. نرم شدگی HAZ (کاهش سختی HAZ نسبت به سختی فلز پایه) نیز در برخی گریدهای فولادهای دوفازی (DP780 و DP980) گزارش شده است [۴، ۶، ۷ و ۱۰]. این تغییرات ریزساختار شدید رفتار شکست جوش‌های نقطه‌ای فولادهای دوفازی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و بنابراین باید در نظر گرفته شود.

۲) حساسیت زیاد به مود شکست فصل مشترکی مود شکست جوش‌های نقطه‌ای یک معیار کیفی از کیفیت جوش است. به طور کلی، جوش‌های نقطه‌ای در دو مود متفاوت دچار شکست می‌شوند [۱۲-۱۳]: مود شکست فصل مشترکی که در آن شکست از میان منطقه‌ی ذوب شده (دکمه‌ی جوش) اشاعه می‌یابد (شکل ۱-الف) و مود محیطی که در آن شکست از طریق بیرون کشیده شدن دکمه‌ی جوش از یک ورق رخ می‌دهد (شکل ۱-ب).

مود شکست محیطی به دلیل تغییر فرم پلاستیک و قابلیت جذب انرژی بالای همراه با آن مود شکست ترجیحی است. بنابراین شکست فصل مشترکی موجب کاهش شدید قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف می‌شود [۱۴-۱۵]. برای اینکه جوش‌های نقطه‌ای در حین سرویس دچار تخریب زودرس نشوند، متغیرهای فرایند باید به گونه‌ای تنظیم شوند که از دستیابی به مود شکست محیطی اطمینان حاصل گردد.

- ۱- زمان فشارش (اعمال نیرو پیش از عبور جریان): ۴۰ سیکل معادل ۰/۸ ثانیه
- ۲- جریان جوشکاری: ۱۰ سطح مختلف از ۷ تا ۱۱/۵ کیلوآمپر با فاصله‌های ۰/۵ کیلوآمپری
- ۳- زمان جوشکاری: ۲۵ سیکل معادل ۰/۵ ثانیه
- ۴- نیروی الکتروود: ۵/۱ کیلو نیوتن
- ۵- زمان نگهداری الکتروود روی دکمه‌ی جوش: ۱۰ سیکل معادل ۰/۲ ثانیه

در هر شرایط جوشکاری ۴ سری نمونه جوش داده شد که سه سری برای آزمون کشش متقاطع و یک سری برای بررسی‌های ساختاری مورد استفاده قرار گرفتند. آزمایش کشش متقاطع به وسیله‌ی دستگاه آزمایش کشش اینسترون و با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. ابعاد نمونه‌های آزمایش کشش متقاطع طبق استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 تهیه شدند [۱۶]. شکل و ابعاد نمونه‌های آزمایش کشش متقاطع در شکل (۲) نشان داده شده است. مود شکست نمونه‌ها حین آزمایش کشش متقاطع ثبت شد. مقدار نیروی ماکزیمم قابل با توجه به نمودار بار - جابجایی محاسبه شد.



شکل (۲): ابعاد نمونه آزمون کشش - متقاطع

برای بررسی ماکرو ساختاری نمونه‌ها پس از انجام عملیات

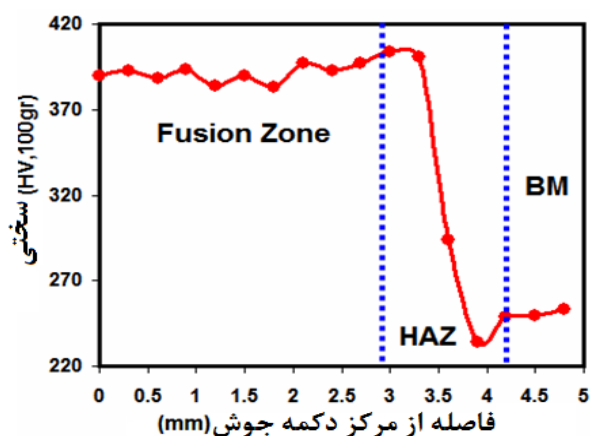
موجب افت خواص مکانیکی جوش شود [۱۲]. با توجه به توسعه و تجاری شدن گریدهای جدید فولادهای دوفازی در صنعت خودروسازی، نیاز شدیدی به مطالعه‌ی رفتار جوش‌پذیری مقاومتی نقطه‌ای این مواد وجود دارد. کارهای زیادی روی جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد دوفازی DP600 انجام شده است [۴-۵، ۸-۹]، اما کارهای منتشر شده‌ی کمی در مورد گریدهای بالاتر این فولادها مثل DP780 و DP980 انجام شده است. در این مقاله مود شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولاد دوفازی فریتی - مارتنزیتی DP780 در آزمون کشش متقاطع بررسی شده است. همان‌طور که ذکر شد در مورد فولادهای دوفازی، تنظیم پارامترهای جوشکاری براساس استانداردهای صنعتی موجود منجر به تولید دکمه جوشی با نوع شکست محیطی نمی‌شود. بنابراین در این تحقیق سعی شد یک مدل تحلیلی برای تخمین حداقل اندازه دکمه‌ی جوش لازم برای حصول مود شکست محیطی در آزمون کشش متقاطع ارایه شود. در این مدل برخلاف استانداردهای صنعتی، اندازه دکمه جوش مورد نیاز علاوه بر ضخامت ورق به فاکتورهای متالورژیکی جوش نیز مرتبط شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ورق فولاد دوفازی DP780 (تولید شده توسط عملیات حرارتی آنیل بین بحرانی) با ضخامت ۲ میلی‌متر به عنوان فلز پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد دوفازی به صورت $Fe-0.16C-0.24Si-0.52Mn$ است.

جوشکاری توسط دستگاه جوش نقطه‌ای ثابت (Pedestal) با توان ۱۲۰kVA با استفاده از الکتروود گروه A، مطابق کلاس ۲ دسته بندی RWMA انجام گردید. جنس این الکتروود از آلیاژ مس - کرم - زیرکونیوم و شکل آن به صورت مخروط ناقص با قطر تماس ۸ میلی‌متر است. برای بررسی مشخصه‌های ماکروساختاری و ارتباط آن با خواص مکانیکی و مود شکست، تاثیر مهم‌ترین پارامتر جوشکاری یعنی جریان جوشکاری بررسی شد. برنامه‌ی جوشکاری به صورت زیر است:

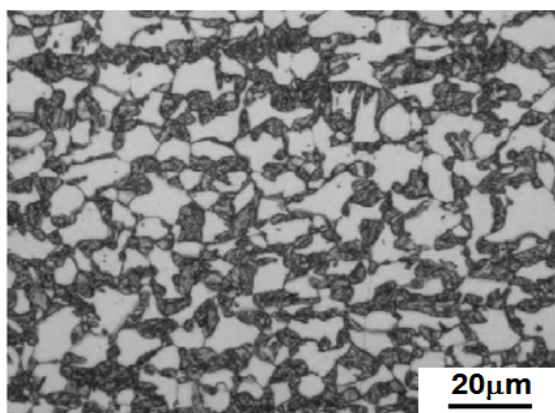
که ملاحظه می‌شود پروفیل سختی از ۳ منطقه متناظر با مناطق ریزساختاری دکمه‌ی جوش (FZ)، منطقه‌ی متأثر از حرارت (HAZ) و فلز پایه (BM) تشکیل شده است. در ادامه دلایل تغییرات سختی در امتداد محل اتصال با توجه به ریزساختار مربوطه توضیح داده شده است.



شکل (۴): پروفیل سختی در امتداد محل اتصال

۳-۲-۱- فلز پایه

شکل (۵) ریزساختار میکروسکوپی فولاد دوفازی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ساختار این فولاد متشکل از دو فاز فریت و مارتنزیت است. در تصویر میکروسکوپ نوری فاز فریت به رنگ روشن و فاز مارتنزیت به رنگ تیره است. سختی فلز پایه حدود ۲۵۴ ویکرز است که با ریزساختار آن همخوانی دارد.



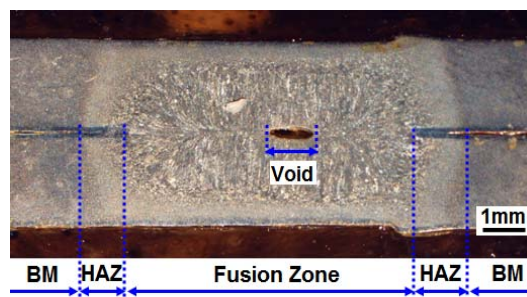
شکل (۵): ریزساختار میکروسکوپ نوری فلز پایه DP780

مرسوم آماده سازی، نمونه برای متالوگرافی شامل سمباده زنی و پولیش، توسط محلول نایتال اچ شدند. ماکروساختار و ریزساختار مناطق مختلف ریزساختاری بوسیله‌ی میکروسکوپ نوری بررسی شد. آزمون ریزسختی سنجی توسط دستگاه ریزسختی سنج شیمیدزو با نیروی ۱۰۰ گرم به موازات فصل مشترک ورق‌ها (۲۰ میکرومتر بالاتر از فصل مشترک) انجام شد. فاصله‌ی نقاط سختی ۰/۳ میلی‌متر بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ماکروساختار منطقه‌ی اتصال

شکل (۳) ماکروساختار نمونه یک جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد DP780 را نشان می‌دهد. سیکل گرمایش و سرمایش ناشی از سیکل حرارتی جوشکاری موجب تغییرات شدید ریزساختاری در منطقه‌ی اتصال می‌شود و یک ساختار ناهمگن در محل اتصال تشکیل می‌شود.



شکل (۳): ماکروساختار یک جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد DP780

محل اتصال را می‌توان به ۳ منطقه فلز جوش (دکمه جوش)، منطقه‌ی متأثر از حرارت و فلز پایه تقسیم کرد:

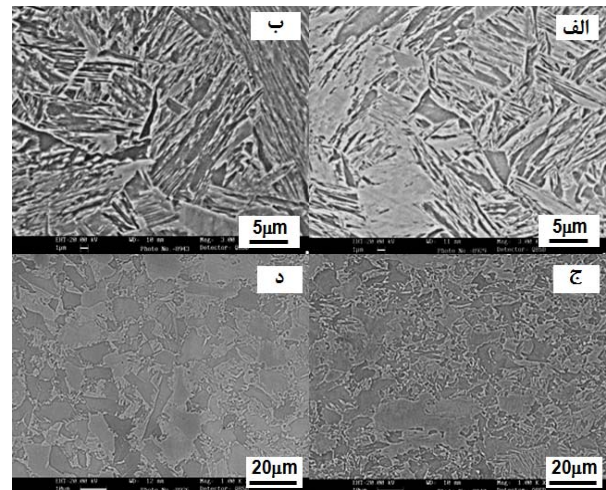
۱- دکمه جوش (منطقه‌ای که در حین فرایند جوشکاری ذوب شدن را تجربه کرده و سپس دوباره منجمد شده)، ۲- منطقه متأثر از حرارت (منطقه‌ای که حین فرایند جوشکاری ذوب نشده اما دچار تغییرات ریزساختاری شده) و ۳- فلز پایه است.

۳-۲- پروفیل سختی و ریزساختار منطقه‌ی جوش

پروفیل سختی معیاری برای تغییرات خواص مکانیکی در امتداد محل اتصال است. سختی هر نقطه تابع ریزساختار آن نقطه است. پروفیل سختی اتصال در شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور

۳-۲-۲-۵ دکمه‌ی جوش

شکل (۶-الف) ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی دکمه‌ی جوش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ریزساختار دکمه‌ی جوش عمدتاً متشکل از مارتنزیت و مقداری فریت ویدمن اشتاتن و بینیت است. ریزساختار تابعی از ترکیب شیمیایی و سرعت سرد شدن است.



شکل (۶): ریزساختار: الف) FZ، ب) HAZ درشت دانه، ج) HAZ بین بحرانی و د) HAZ زیر بحرانی

گولد و همکارانش [۳] یک مدل تحلیلی برای تخمین سرعت سرد شدن در روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ارائه دادند. براساس محاسبات آن‌ها، سرعت سرد شدن در جوش مقاومتی نقطه‌ای ورق فولادی به ضخامت ۲ میلی‌متر، حدود ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه است. مقدار سرعت سرد شدن بحرانی برای تشکیل مارتنزیت در فولادها را می‌توان از رابطه‌ی (۱) تخمین زد [۱۷]:

$$\text{Log } V = 7.42 - 3.13C - 0.71Mn - 0.37Ni - 0.34Cr - 0.45Mo \quad (1)$$

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 دکمه‌ی جوش در فلز جوش برابر ۸۶۴ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه محاسبه می‌شود. از آنجایی که سرعت سرد شدن تجربه شده حین جوشکاری ورق فولادی دوفازی به

ضخامت ۲ میلی‌متر بیشتر از سرعت سرد شدن بحرانی است، تشکیل مارتنزیت در دکمه جوش غیر قابل انتظار نیست.

۳-۱-۳-۳ ریزساختار HAZ

منطقه متأثر از حرارت (HAZ) را می‌توان به ۳ منطقه تقسیم کرد:

(۱) درشت دانه

(۲) HAZ بین بحرانی

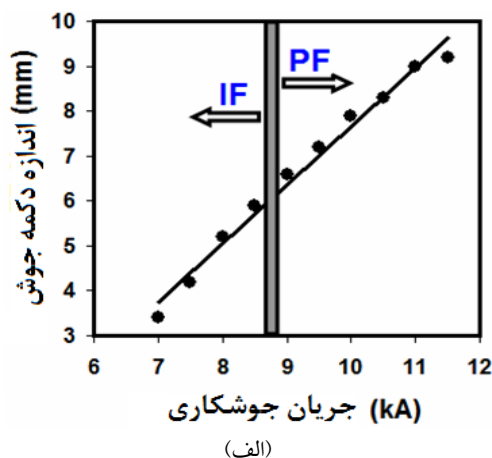
(۳) HAZ زیر بحرانی

HAZ درشت دانه چسبیده به دکمه‌ی جوش است. در این منطقه دما بالاتر از دمای A₃ است و حین سیکل جوشکاری کاملاً آستنیتی شده و هم‌چنین به دلیل دمای بالای تجربه شده ساختار درشت دانه می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، سختی این منطقه معادل و حتی مقداری بیشتر از سختی دکمه‌ی جوش است. در این منطقه به دلیل آستنیت شدن کامل فولاد و هم‌چنین بالا بودن سرعت سرد شدن، مارتنزیت تشکیل می‌شود. از طرف دیگر درشت دانه شدن این منطقه حین سیکل جوشکاری منجر به افزایش سختی پذیری و تشکیل بیشتر مارتنزیت می‌شود. ریزساختار این منطقه که در شکل (۶-ب) نشان داده شده است، مویذ تشکیل یک ساختار عمدتاً مارتنزیتی در این منطقه است. شکل (۶-ج) ریزساختار HAZ بین بحرانی را نشان می‌دهد. این منطقه حین سیکل جوشکاری، دمای بین A₁ و A₃ را تجربه می‌کند و حین سیکل گرمایش به یک ریزساختار فریتی-آستنیتی تبدیل می‌شود. با سرد شدن مجدد این منطقه، آستنیت مجدداً تبدیل به مارتنزیت می‌شود. البته باید توجه داشت که اگرچه سرعت سرد شدن در این منطقه کمتر از HAZ درشت دانه است، اما به دلیل توزیع مجدد کربن در منطقه‌ی دو فازی فریت+آستنیت، فاز آستنیت از کربن غنی شده و سختی پذیری آن افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۶-ج) مشاهده می‌شود، ریزساختار این منطقه یک ساختار فریتی-مارتنزیتی است. شکل (۶-د) ریزساختار HAZ زیر بحرانی را نشان می‌دهد. در این منطقه فولاد حین سیکل گرمایش جوشکاری، دمایی کمتر از A₁ را تجربه می‌کند. همان‌طور که در پروفیل سختی نشان داده شده در شکل (۴)

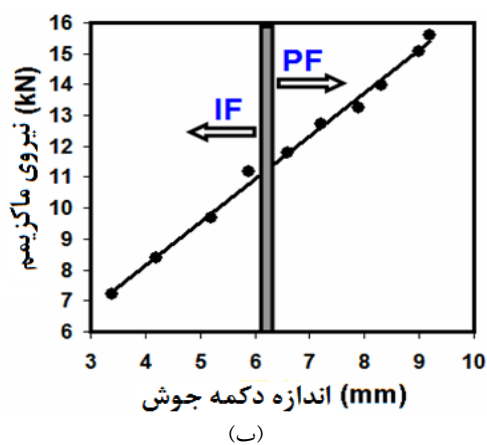
در مود فصل مشترکی دچار شکست شدند و جوش‌های نقطه‌ای با اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بیشتر از ۶/۶ میلی‌متر در مود محیطی دچار شکست شدند.



شکل (۷): (الف) سطح شکست در مود فصل مشترکی، (ب) نمونه شکسته شده در مود محیطی



(الف)



(ب)

شکل (۸): (الف) تاثیر جریان جوشکاری بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش، (ب) تاثیر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بر نیروی شکست. تغییرات مود شکست با جریان جوشکاری و اندازه‌ی دکمه‌ی جوش نشان داده شده‌اند

مشاهده می‌شود، یک مقدار افت سختی در این قسمت نسبت به فلز پایه مشاهده می‌شود. به این پدیده نرم‌شدگی در HAZ گفته می‌شود. نرم‌شدگی HAZ در جوشکاری فولادهای دوفازی در مراجع دیگر نیز گزارش شده است [۶-۷، ۱۰]. محل کمترین سختی مشاهده شده در HAZ متناظر با HAZ زیر بحرانی است یعنی جایی که دما زیر دمای بحرانی A1 است [۷]. این امر در منابع بخوبی آورده شده است که نرم‌شدن HAZ در فولادهای دوفازی بدلیل تمپر شدن مارتزیت در منطقه‌ی HAZ زیر بحرانی است.

۳-۳-۳ مود شکست

۳-۳-۱-۱ مود شکست‌های مشاهده شده

همان‌طور که در شکل (۷-الف و ب) مشاهده می‌شود، دو مود شکست اصلی حین آزمون کشش متقاطع مشاهده شد: مود شکست فصل مشترکی و مود شکست محیطی. مشخص شده است که اندازه‌ی دکمه‌ی جوش، مهم‌ترین مشخصه‌ی فیزیکی کنترل‌کننده‌ی مود شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای است [۵-۱۲]. شکل (۸-الف) تاثیر جریان جوشکاری بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش و مود شکست فولاد DP780 را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش جریان جوشکاری به دلیل افزایش حرارت تولید شده، اندازه‌ی دکمه‌ی جوش افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۸-الف) مشاهده می‌شود، افزایش جریان جوشکاری منجر به تغییر مود شکست از فصل مشترکی به محیطی می‌شود. برای جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای در DP780، انتقال مود شکست از فصل مشترکی به محیطی در جریان جوشکاری ۹ کیلو آمپر رخ داد. شکل (۸-ب) تاثیر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بر نیروی شکست و مود شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اولاً یک رابطه‌ی مستقیم بین اندازه‌ی دکمه‌ی جوش و نیروی شکست وجود دارد، ثانیاً یک حداقل اندازه‌ی دکمه‌ی جوش وجود دارد که بالاتر از آن مقدار، جوش در مود شکست محیطی دچار شکست می‌شوند. براساس نتایج تجربی جوش‌های نقطه‌ای با اندازه‌ی دکمه جوش کمتر از ۵/۹ میلی‌متر

۳-۲-۳- تحلیل مود شکست

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده‌ی مود شکست جوش‌های نقطه‌ای، اندازه دکه‌ی جوش است. به همین علت استانداردهای مختلف صنعتی برای هر ضخامت ورق مشخص، یک حداقل قطر دکه پیشنهاد کرده‌اند. در صنعت خودروسازی اندازه‌ی دکه‌ی جوش عمدتاً براساس قاعده‌ی $4t^{0.5}$ (ضخامت ورق) تنظیم می‌شود [۱-۶]. براساس این معیار حداقل قطر دکه‌ی جوش برای فولاد با ضخامت ۲ میلی‌متر باید برابر ۵/۶ میلی‌متر باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندازه‌ی دکه‌ی جوش پیشنهاد شده توسط این معیار نمی‌تواند منجر به شکست در مود محیطی شود.

چاو [۱۴] رابطه‌ای برای پیش‌بینی مود شکست جوش‌های نقطه‌ای در آزمون کشش متقاطع ارائه داد. از آنجایی که شکست فصل مشترکی پیش از تغییر فرم پلاستیک قابل توجه اتفاق می‌افتد، این محقق مود فصل مشترکی در آزمون کشش متقاطع را به صورت رشد ترک در مود I و با استفاده از مکانیک شکست مدل کرد. هم‌چنین برای مدل کردن مود شکست محیطی فرض کرد، شکست هنگامی رخ می‌دهد، که میانگین تنش‌های وارده به اطراف دکه‌ی جوش برابر با تنش تسلیم برشی روی فلز پایه شود. وی رابطه‌ی ۲ را برای مشخص کردن تغییر مود شکست در آزمون کشش متقاطع پیشنهاد داد:

$$D_C = 0.86 \left(\frac{\tau_{yHAZ}}{K_C} \right)^{\frac{2}{3}} t^{\frac{4}{3}} \quad (2)$$

که در آن τ_{yHAZ} استحکام برشی HAZ و K_C چقرمگی شکست دکه جوش است. اگرچه رابطه‌ای که وی ارائه داده است قطر بحرانی را به چقرمگی شکست دکه جوش و استحکام شکست برشی HAZ مرتبط می‌کند، اما او تلاش کرد تا نشان داد مدل او وابسته به ماده نیست و در نهایت با توجه به نتایج موجود در منابع رابطه‌ای ارائه داد که تنها وابسته به ضخامت ورق است. در واقع او سعی کرد نشان دهد، نسبت $\left(\frac{\tau_{yHAZ}}{K_C} \right)$ برای فولادهای مختلف

ثابت است. او رابطه‌ی (۳) را برای پیش‌بینی مود شکست پیشنهاد داد.

$$D_C = 3.65t^{\frac{4}{3}} \quad (3)$$

با جایگزین کردن ضخامت ورق (برابر ۲ میلی‌متر) در رابطه‌ی ۳، مقدار قطر دکه‌ی بحرانی برابر ۹/۲ محاسبه می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود این مدل مقدار بسیار بالاتری نسبت به مقدار تجربی پیشنهاد می‌کند.

در این قسمت یک تحلیل ریاضی ساده برای مود شکست در آزمون کشش متقاطع ارائه می‌شود. شکل (۹) یک مدل ساده از توزیع تنش در فصل مشترک و محیط دکه‌ی جوش را نشان می‌دهد. در فصل مشترک جوش، تنش‌ها عمدتاً کششی هستند. در محیط دکه‌ی جوش تنش‌ها در محل‌های مشخص شده عمدتاً برشی هستند. شکست جوش‌های نقطه‌ای در نتیجه‌ی رقابت بین دو مود شکست است بدین معنی که شکست در مودی رخ می‌دهد که نیاز به نیروی کمتری داشته باشد. برای آزمون کشش متقاطع نیروی محرکه مود محیطی برشی و نیروی محرکه مود فصل مشترکی تنش کششی در خط مرکز جوش است. از نقطه نظر مهندسی، می‌توان گفت هر نیروی محرکه یک مقدار بحرانی دارد و رخ دادن هر مود شکست به این بستگی دارد که کدام نیروی محرکه زودتر به مقدار بحرانی‌اش می‌رسد. در واقع مود شکست جوش‌های نقطه‌ای حین آزمون کشش متقاطع را می‌توان به صورت رقابت بین تغییر فرم پلاستیک برشی HAZ (شکست محیطی) و شکست دکه‌ی جوش در اثر تنش‌های کششی (شکست فصل مشترکی) در نظر گرفت.

مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده‌ی توزیع تنشی در جوش نقطه‌ای، اندازه دکه جوش است. با کاهش قطر دکه جوش، تنش کششی بوجود آمده در فصل مشترک ورق - ورق پیش از آن که تنش برشی موجب تغییر فرم پلاستیک برشی ماده‌ی اطراف دکه‌ی جوش در HAZ شود، به مقدار بحرانی خود می‌رسد و

فولادهای استحکام بالای پیشرفته، تخلخل و حفره‌های انجمادی است. تاثیر حفره و تخلخل بر استحکام شکست، وابسته به محل توزیع تخلخل‌ها و مود شکست جوش دارد. تخلخل‌ها و حفره‌های ناشی از بیرون زدگی مذاب یا انقباض انجمادی، عمدتاً در مرکز جوش تشکیل می‌شوند. در مود شکست محیطی، عمده تنش‌ها و در نتیجه کرنش‌های پلاستیک در لبه دکه جوش، در منطقه متاثر از حرارت و یا در فلز پایه متمرکز می‌شوند. این به دلیل هندسه منحصر بفرد جوش نقطه‌ای و وجود یک ترک خارجی در محل اتصال است و در نتیجه این محل به عنوان یک محل تمرکز تنش عمل می‌کند. بنابراین وجود تخلخل در مرکز دکه جوش تاثیر چندانی بر توزیع تنش و نیروی شکست جوش‌های نقطه‌ای نخواهد داشت [۱]. اما در مود فصل مشترکی، وجود تخلخل به علت کاهش سطح تحمل کننده نیرو، موجب کاهش نیروی شکست جوش‌های نقطه‌ای می‌شود. این نکته باید ذکر شود که فولادهای استحکام بالای پیشرفته بسیار مستعد به تشکیل حفره‌ی انقباضی هستند. این فاکتور به عنوان یکی عوامل موثر بر شکست فصل مشترکی این فولادها شناخته شده است. بنابراین مقدار تخلخل و حفره‌های انقباضی را باید در مدل کردن نیروی شکست در مود شکست فصل مشترکی در نظر گرفت. برای این کار یک فاکتور حفره و تخلخل (P) به صورت زیر در نظر گرفته شد:

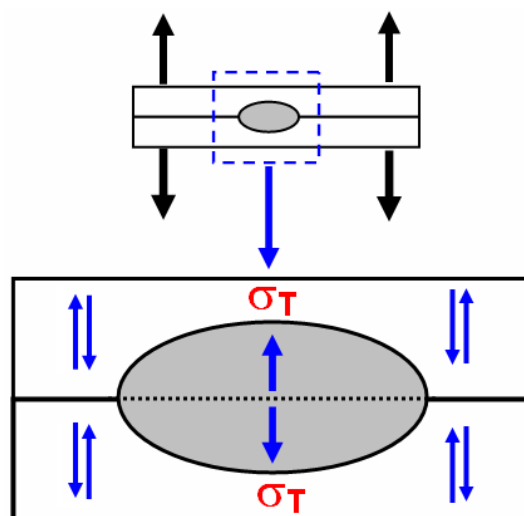
$$P = \frac{A_{total} - A_{Porosity}}{A_{total}}, \quad 0 < P \leq 1 \quad (5)$$

که در آن A_{total} : کل سطح مقطع FZ در فصل مشترک ورق/ورق، $A_{Porosity}$: سطح تصویر تخلخل و حفره در FZ در فصل مشترک ورق - ورق است. بنابراین رابطه‌ی (۴) را می‌توان به صورت زیر اصلاح کرد:

$$F_{IF} = P \frac{\pi}{4} D^2 \sigma_{FZ} \quad (6)$$

حال نیروی ماکزیمم در مود شکست محیطی را در نظر بگیرید. همانطور که ذکر شد مود شکست محیطی در اثر تنش‌های برشی رخ می‌دهد. در این حالت فرض می‌شود، شکست هنگامی رخ

در نتیجه شکست در مود فصل مشترکی رخ می‌دهد. در صورتی که اندازه دکه‌ی جوش از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد، تنش برشی بوجود آمده روی فصل مشترک به حدی نخواهد بود که موجب رشد ترک از میان دکه‌ی جوش شود و در نتیجه جوش نقطه‌ای در اثر تنش‌های برشی تولید شده در اطراف دکه‌ی جوش، در مود محیطی دچار شکست خواهد شد.



شکل (۹): یک مدل ساده از توزیع تنش در فصل مشترک و محیط دکه جوش در آزمون کشش متقاطع

بنابراین برای ساختن یک مدل برای پیش بینی مود شکست نیاز است ابتدا روابطی برای بیان ریاضی نیروی شکست در دو مود فصل مشترکی و محیطی بدست آورده شود: نیروی شکست در مود فصل مشترکی (P_{IF}) را می‌توان با فرض توزیع یکنواخت تنش کششی بر دکه‌ی جوش، که به صورت یک استوانه با قطر D و ارتفاع $2t$ فرض می‌شود، به صورت رابطه ۴ بیان کرد:

$$P_{IF} = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \sigma_{FZ} \quad (4)$$

که در آن σ_{FZ} استحکام برشی دکه‌ی جوش است. یکی از عیوب بسیار محتمل در جوش مقاومتی نقطه‌ای

شکست محیطی و K نسبت سختی دکمه‌ی جوش به سختی محل شکست است. بنابراین رابطه (۸) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$D_C = \frac{2tf}{PK} \left[1 + \left(1 + \frac{2PKx}{ft} \right)^{0.5} \right] \quad (10)$$

برای یک تخمین کمی از اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بحرانی، پارامترهای زیر در رابطه‌ی ۱۰ جایگذاری می‌شود:

- سختی دکمه‌ی جوش: ۳۸۰ ویکرز

- سختی محل شکست در مود محیطی: ۲۳۰ ویکرز (محل

شکست در قسمت نرم شده‌ی HAZ قرار دارد)

- نسبت سختی (K): ۱/۶۵

- عرض HAZ (x): ۱ میلی‌متر (با توجه به تصاویر متالوگرافی)

- فاکتور تخلخل (P): ۰/۸ یعنی ۲۰ درصد مساحت محل اتصال را حفره‌های انقباضی تشکیل داده است. این مقدار بوسیله‌ی سطح شکست نمونه‌های شکسته شده در مود فصل مشترکی محاسبه شد. مقدار گزارش شده یک مقدار میانگین است.

- ضخامت ورق (t): ۲ میلیمتر

- ضریب f در مورد فولادها بین ۰/۷ تا ۰/۸ گزارش شده است.

در اینجا مقدار میانگین ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود.

براساس رابطه‌ی (۱۰)، اندازه دکمه جوش بحرانی برابر ۶/۱ میلی‌متر محاسبه می‌شود. همان‌طور که در شکل (۸-ب) مشاهده می‌شود این مقدار با اندازه دکمه‌ی بحرانی تجربی همخوانی خوبی دارد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- ریزساختار FZ عمدتاً شامل مارتنزیت و مقداری فریت ویدمن اشتاتن و بینیت است. یک مقدار افت سختی در HAZ نسبت به فلز پایه مشاهده شد. این امر در فولادهای دوفازی بدلیل تمپر شدن مارتنزیت در منطقه‌ی HAZ زیر بحرانی است.

۲- معیار $4t^{0.5}$ مرسوم در صنعت خودروسازی برای حصول مود شکست محیطی در آزمون کشش متقاطع فولاد DP780 با ضخامت ۲ میلی‌متر مناسب نیست.

می‌دهد که تنش برشی در محیط یک نیمه استوانه‌ای شکل دکمه به استحکام برشی محل شکست برسد. نشان داده شده است که در آزمون کشش متقاطع هنگامی که نرم شدگی در HAZ وجود دارد، شکست از این منطقه رخ می‌دهد. بنابراین قطر قسمتی از جوش که از ورق بیرون کشیده می‌شود، برابر قطر FZ به علاوه‌ی پهنای منطقه‌ی HAZ اطراف آن است. بنابراین در اینجا رابطه‌ی زیر برای برای شکست محیطی جوش‌های نقطه‌ای در آزمون کشش متقاطع ارایه می‌شود:

$$F_{PF} = \pi(D + 2x) t \tau_{PFL} \quad (7)$$

که در آن τ_{PFL} استحکام برشی محل شکست مود محیطی می‌باشد که در این حالت منطقه‌ی HAZ نرم شده است و x عرض HAZ است. شرط اینکه جوش نقطه‌ای در مود محیطی دچار شکست شود این است که نیروی شکست در مود محیطی کم‌تر از نیروی لازم برای شکست در مود فصل مشترکی باشد. بنابراین قطر بحرانی دکمه‌ی جوش با مساوی قرار دادن رابطه‌ی (۶) و (۷) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D_C = \frac{2t\tau_{PFL}}{P\sigma_{FZ}} \left[1 + \left(1 + \frac{2Px}{t} \times \frac{\sigma_{FZ}}{\tau_{PFL}} \right)^{0.5} \right] \quad (8)$$

اگر در یک جوش نقطه‌ای $D < D_C$ آنگاه $F_{IF} < F_{PF}$ است، بنابراین در حین آزمون در مود فصل مشترکی دچار شکست می‌شود و اگر در یک جوش نقطه‌ای $D > D_C$ آنگاه $F_{PF} < F_{IF}$ است و بنابراین جوش در مود محیطی دچار شکست می‌شود. به علت کوچک بودن ابعاد جوش نقطه‌ای، به‌دست آوردن استحکام کششی و برشی مناطق مختلف آن به روش اندازه‌گیری مستقیم مشکل است. نسبت استحکام برشی و استحکام کششی را می‌توان به صورت یک ضریب f نشان داد. از طرف دیگر استحکام کششی فلزات با سختی ویکرز آن‌ها متناسب است بنابراین داریم:

$$\frac{\sigma_{FZ}}{\tau_{PFL}} = \frac{\sigma_{FZ}}{f\sigma_{PFL}} = \frac{1}{f} \frac{H_{FZ}}{H_{PFL}} = \frac{K}{f} \quad (9)$$

که در آن H_{FZ} سختی دکمه‌ی جوش، H_{PFL} سختی محل

- [6] 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.
- [7] M. I. Khan, M. L. Kuntz and 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.
- [8] M. Milititsky, E. Pakalnins, C. H. Jiang and A. Thompson, "On Characteristics of DP600 Resistance Spot Welds", SAE Report 2003-01-0520, Warrendale, PA, USA, 2003.
- [9] Ma C., Chen D.L., Bhole S.D., Boudreau G., Lee A., Biro E., Microstructure and Fracture Characteristics of spot-welded DP600 steel, *Mater. Sci. Eng. A*, 485: 334-346, 2008.
- [10] Pouranvari M., Marashi S.P.H., Key Factors Influencing Mechanical Performance of Dual Phase Steel Resistance Spot Welds, *Sci Technol Weld Join*, 15: 149-155, 2010.
- [11] Baltazar Hernandez V. H., Kuntz M. L., Khan M. I. and Zhou Y., Influence of Weld Size and Microstructure of Dissimilar AHSS Resistance Spot Welds, *Science and Technology of Welding and Joining*, 13: 769-776, 2008.
- [12] M. Pouranvari, A. Abedi, P. Marashi, M. Goodarzi, "Effect of Expulsion on Peak Load and Energy Absorption of Low Carbon Resistance Spot Welds", *Sci. Technol. Weld. Joining*, Vol. 13, pp.39-43, 2008.
- [13] 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.
- [14] Y. J. Chao, "Failure Mode of Resistance Spot Welds: Interfacial Versus Pullout", *Sci. Technol. Weld. Joining*, Vol. 8, pp. 133-137, 2003.
- [15] X. Sun, E. V. Stephens, R. W. Davies, M. A. Khaleel, D. J. Spinella, "Effects of Fusion Zone Size on Failure Modes and Static Strength of Aluminum Resistance Spot Welds", *Weld. J.*, Vol. 83, pp.88-s-195-s, 2004.
- [16] 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.
- [17] 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.

۳- سطح شکست نمونه‌های شکسته شده در مود فصل مشترکی حاوی حفره‌های انقباضی است. این حفره‌ها با کاهش اندازه‌ی دکمه‌ی جوش موثر موجب افزایش تمایل به شکست فصل مشترکی و همچنین کاهش خواص مکانیکی می‌شود.

۴- براساس مکانیزم شکست جوش‌های نقطه‌ای در آزمون کشش متقاطع، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی حداقل اندازه‌ی دکمه‌ی جوش مورد نیاز برای اطمینان از حصول مود شکست محیطی به صورت زیر ارائه شد.

$$D_C = \frac{2tf}{PK} \left[1 + \left(1 + \frac{2PKx}{ft} \right)^{0.5} \right]$$

که در آن H_{FZ} سختی دکمه‌ی جوش، H_{PFL} سختی محل شکست در مود محیطی، t ضخامت ورق، P فاکتور تخلخل و حفره و f یک ضریب ثابت (برای تبدیل استحکام برشی به استحکام کششی می‌باشد).

۵- براساس مدل ارائه شده، انتقال مود شکست جوش‌های مقاوم‌تی نقطه‌ای در آزمون کشش متقاطع بوسیله ضخامت ورق، نسبت سختی دکمه‌ی جوش به سختی محل شکست (HAZ)، مقدار حفره‌های انقباضی و تخلخل در دکمه‌ی جوش و پهنای HAZ کنترل می‌شود.

۵- مراجع

- [1] H. Zhang, J. Senkara, *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*, Taylor & Francis CRC Press, 2005.
- [2] M. D. Tumuluru, "Resistance Spot Welding of Coated High-Strength Dual Phase Steels", *Weld J.*, Vol. 87, pp. 31-37, 2007.
- [3] 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.
- [4] 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.*, pp. 287-298, 2006.
- [5] M. Marya and X.Q. Gayden, "Development of Requirements for resistance Spot Welding Dual-Phase (DP600) Steels Part 2: Statistical Analyses and Process Maps", *Weld J.*, Vol.84, 2005, 197s-204s, 2005.