تاثیر بیرون زدگی مذاب بر قابلیت جذب انرژی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی کم کربن

مجید پورانوری[۱]، پیروز مرعشی[۲]
mpouranvari@yahoo.com

دریافت مقاله: ۸۹/۰۷/۲۰ پذیرش مقاله: ۸۹/۱۱/۱۲

چکیده

در این مقاله تاثیر اندازه دکمه جوش و بیرون زدگی مذاب بر خواص مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی کم کربن در تست کشش-برش مورد بررسی قرار گرفته است. برای توصیف رفتار مکانیکی جوش‌ها، از نیروی شکست، انرژی شکست و مود شکست در تست کشش - برش استفاده شده است. تاثیر عوامل وابسته به بیرون‌زدگی مذاب شامل تخلخل و فرورفتگی الکترود بر رفتار شکست بررسی شده است. نتایج نشان داد بیرون زدگی مذاب اگرچه نیروی شکست را چندان تحت تاثیر قرار نمی‌دهد اما موجب کاهش قابل ملاحظه‌ی انرژی شکست می‌شود. کاهش انرژی شکست را می‌توان به به تغییر محل شکست جوش‌های نقطه‌ای از فلز پایه در حالت بدون بیرون زدگی به مرز دکمه‌ی جوش و منطقه متاثر از حرارت در حالتی که بیرون زدگی رخ می‌دهد، نسبت داد.

کلید واژه:

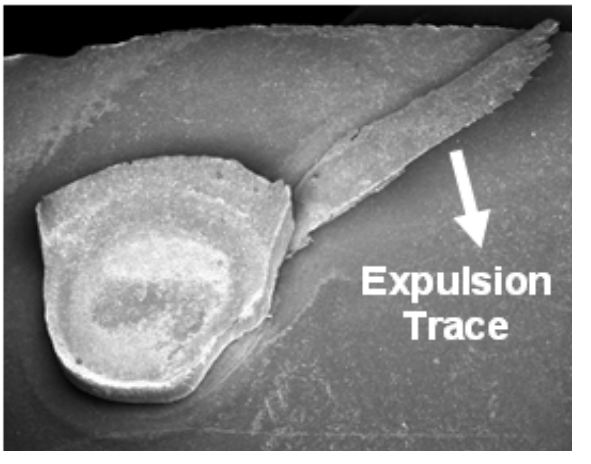
جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای - بیرون زدگی مذاب - رفتار شکست - قابلیت جذب انرژی

[۱]- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دانشکده مهندسی مواد، دزفول، ایران
[۲]- استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مواد، تهران، ایران pmarashu@aut.ac.ir

۱- مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اصلی‌ترین فرایند در اتصال ورق‌های فلزی بویژه در صنعت خودروسازی است. هر خودروی امروزی بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای دارد. قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف به طور قابل توجهی تابع رفتار مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای می‌باشد [۱ و ۲].

یکی از مشکلات معمول حین فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای وقوع بیرون زدگی مذاب (شکل (۱)) است. بیرون‌زدگی مذاب می‌تواند هم در سطح تماس دو قطعه کار و هم در فصل مشترک الکترود-قطعه کار اتفاق بیفتد. بیرون‌زدگی مذاب در فصل مشترک الکترود-قطعه کار به شدت کیفیت سطحی و عمر الکترود را تحت تاثیر قرار می‌دهد اما اگر بیرون‌زدگی مذاب فقط محدود به سطح قطعه کار باشد استحکام جوش را تحت تاثیر نمی‌دهد. اما اگر بیرون‌زدگی مذاب در فصل مشترک دو ورق رخ بدهد به علت کاهش فلز مذاب دکمه جوش (شکل (۱)) در حین این پدیده عیوبی مثل حفره و تخلخل در دکمه بوجود می‌آید. در مواردی که اتصال چسبی همراه با جوش نقطه به کار می‌رود بیرون‌زدگی مذاب با تخریب لایه چسب همراه است و تاثیر منفی را بر خواص اتصال چسبی دارد.



شکل (۱): بیرون زدگی مذاب موجب کاهش حجم مذاب درون دکمه جوش می‌شود.

بیرون‌زدگی مذاب به فاکتورهای زیادی از جمله عوامل الکتریکی، مکانیکی، حرارتی و ماهیت متالورژیکی آلیاژ بستگی دارد. فاکتورهای دیگری مثل مورفولوژی سطح، استحکام قطعه کار (به‌ویژه استحکام تسلیم)، و شرایط حرارتی نیز بیرون‌زدگی مذاب را تحت تاثیر قرار می‌دهد. برای درک پدیده بیرون‌زدگی مذاب و پیش‌بینی بیرون‌زدگی مذاب چندین تئوری در مورد عوامل ایجاد بیرون‌زدگی مذاب ارائه شده است. برای مثال دانسیته بیش از حد جریان یا حرارت ورودی بیش از حد به عنوان دلایلی برای بیرون‌زدگی مذاب معرفی شده‌اند. آخرین تئوری که درباره بیرون‌زدگی مذاب ارائه شده است بدین صورت است که: وقتی نیروی داخل دکمه جوش که به‌واسطه فشار داخلی در دکمه مذاب ناشی از ذوب شدن، و انبساط مذاب و فاکتورهای دیگر به‌وجود می‌آید، از نیروی اعمالی توسط الکترودها بیش‌تر شود، بیرون‌زدگی مذاب رخ می‌دهد [۳].

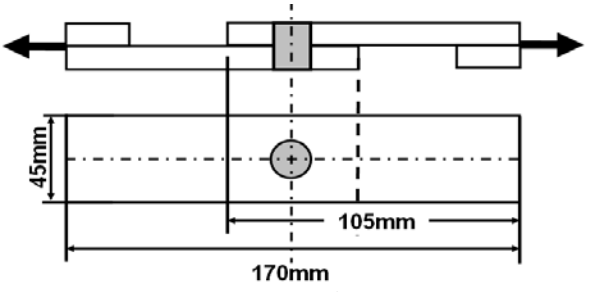
اندازه دکمه جوش مهم‌ترین پارامتر تعیین کننده کیفیت یک جوش نقطه‌ای است و متغیرهای فرایند باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که از تشکیل دکمه جوش با اندازه مناسب اطمینان حاصل شود. نتایج بسیاری از محققان بیانگر وجود یک ارتباط مستقیم بین اندازه دکمه‌ی جوش و خواص مکانیکی جوش است [۳-۱]. در صنعت برای اطمینان از تشکیل دکمه جوشی با ابعاد بزرگ، استفاده از جریان و زمان‌های جوشکاری بالا در حد بیرون زدگی مذاب مرسوم است. بنابراین بسیاری از جوش‌ها در صنعت در شرایطی انجام می‌شود که بیرون‌زدگی مذاب رخ می‌دهد. برخی محققان [۴ و ۵] نتیجه گرفته‌اند که بیرون‌زدگی مذاب تاثیری بر نیروی شکست جوش‌های نقطه‌ای در فولادها ندارد و بنابراین بر کیفیت جوش تاثیری ندارد. اما Zhang [۶] نشان داد که کیفیت جوش‌های نقطه‌ای می‌تواند به طور قابل توجهی تحت تاثیر بیرون زدگی مذاب قرار بگیرد. با این وجود توضیحات دقیقی برای این تاثیرات ارایه نشده است. هدف از کار حاضر بررسی و تحلیل تاثیر بیرون زدگی مذاب بر رفتار شکست استاتیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولادهای کم کربن است. تاثیر بیرون‌زدگی مذاب بر ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی جوش‌های نقطه‌ای فولادهای کم کربن در تست کشش-برش بررسی شده است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از ورق فولادی کم کربن St12 با ضخامت ۰/۸ میلیمتر استفاده شده است. برای جوش دادن نمونه‌ها از الکترود گروه A، مطابق کلاس ۲ دسته‌بندی RWMA استفاده شد. جنس این الکترود از آلیاژ مس-کرم-زیرکونیوم و شکل آن به‌صورت مخروط سرزده با قطر تماس ۵ میلی‌متر است.

برای بررسی همزمان اندازه دکمه‌ی جوش و بیرون زدگی مذاب بر خواص مکانیکی جوش‌ها، جوش‌کاری تحت شرایط مختلف انجام شد. پارمترهای جوشکاری منجر به بیرون زدگی مذاب ثبت شدند. جریان جوشکاری از ۷ تا ۱۱ kA، زمان جوشکاری از ۵ تا ۹ سیکل و نیروی الکترود از ۲/۸ تا ۴/۵ kN تغییر داده شدند. ابعاد تست کشش-برش طبق استاندارد AWS [۷] تهیه شد (شکل ۲).

تست-کشش - برش به وسیله دستگاه تست کشش اینسترون و با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد و نمودار نیرو - جابجایی حاصل به صورت همزمان ثبت گردید. با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی مقدار ماکزیمم نیرو و انرژی شکست (برابر با سطح زیر نمودار تا نقطه‌ی ماکزیمم) و با استفاده از نمونه‌های شکسته شده مود شکست و قطر دکمه‌ی جوش برای هر نمونه تعیین شد. برای بررسی دقیق‌تر رفتار شکست، از نمونه‌های تست کشش - برش پس از شکست کامل مقطع متالوگرافی تهیه شد و محل شکست بررسی شد. برای بررسی تغییرات سختی در امتداد محل اتصال از تست ریزسختی سنجی در مقیاس ویکرز با بار ۱۰۰ گرم استفاده شد.



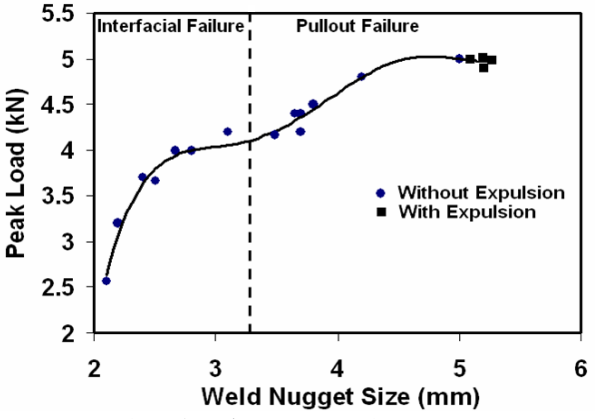
شکل(۲): ابعاد تست کشش-برش

۳- نتایج و بحث

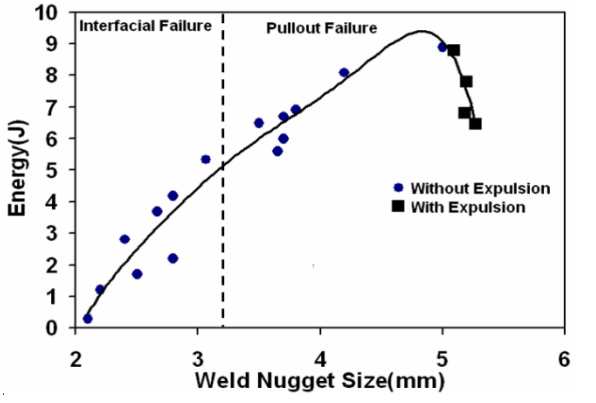
۳-۱-تاثیر اندازه دکمه‌ی جوش بر خواص مکانیکی

ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی یک جوش‌نقطه‌ای به مشخصه‌های فیزیکی به ویژه اندازه دکمه جوش، مود شکست و استحکام محل شکست وابسته است. برای بررسی تاثیر اندازه دکمه جوش بر استحکام و انرژی شکست جوش‌های نقطه‌ای، تغییرات این خواص بر حسب اندازه دکمه جوش رسم شده و یک منحنی از آنها عبور داده شد تا ارتباط کلی آنها مشخص شود (شکل ۳ و ۴). در اینجا ابتدا به بررسی رفتار شکست جوش‌های عاری از بیرون زدگی مذاب و سپس به بررسی رفتار شکست جوش‌هایی که بیرون زدگی مذاب را تجربه کرده‌اند، پرداخته می‌شود.

همانطور که مشاهده می‌شود پیش از وقوع بیرون زدگی مذاب، یک رابطه‌ی مستقیم بین اندازه دکمه‌ی جوش و استحکام (و انرژی) شکست وجود دارد. نقطه‌ی ماکزیمم در نمودار بار- جابجایی تست کشش-برش در مود شکست فصل مشترکی (رشد ترک از میان دکمه‌ی جوش)، متناظر با اشاعه ترک درون دکمه جوش و در مود محیطی متناظر با گردنی شدن در محل شکست است. در مود شکست فصل مشترکی هرچه اندازه دکمه بیشتر باشد، مقاومت فصل مشترک به برش بیشتر می‌شود و در مود محیطی (رشد ترک از اطراف دکمه‌ی جوش) با افزایش قطر دکمه، مقاومت دکمه در برابر چرخش دکمه و در نتیجه نیروی لازم برای گردنی شدن محل شکست افزایش می‌یابد. به هر حال افزایش قطر دکمه موجب افزایش نیرو و انرژی لازم برای شکست می‌شود. بنابراین پیش از وقوع بیرون زدگی مذاب، اندازه دکمه جوش اصلی‌ترین فاکتور کنترل کننده‌ی استحکام و انرژی شکست جوش‌های نقطه‌ای است. اما با وقوع بیرون زدگی مذاب رفتار متفاوتی مشاهده شد: استحکام جوش‌ها تغییر چندانی نکرد و ثابت ماند، اما انرژی شکست آن‌ها علیرغم ثابت بودن اندازه دکمه جوش کاهش می‌یابد.



شکل(۳): تاثیر قطر دکمه و بیرون زدگی مذاب بر ظرفیت تحمل بار جوش‌های نقطه‌ای



شکل(۴): تاثیر قطر دکمه و بیرون زدگی مذاب بر قابلیت جذب انرژی جوش‌های نقطه‌ای

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، انرژی شکست برخی جوش‌های با بیرون زدگی مذاب کمتر از انرژی شکست جوش‌هایی بدون بیرون زدگی مذاب حتی با قطر دکمه‌ی کمتر است. همانطور که مشاهده می‌شود در حالتی که بیرون زدگی مذاب رخ می‌دهد،

رابطه‌ی مستقیمی بین اندازه دکمه جوش و استحکام (و انرژی) شکست وجود ندارد. برای مثال در قطر دکمه جوش حدود ۵ میلی‌متر، استحکام شکست جوش‌های بدون بیرون زدگی و همراه با بیرون زدگی تقریبا یکسان است اما انرژی شکست این جوش‌ها اختلاف زیادی دارد به طوریکه انرژی شکست در حالت همراه با بیرون زدگی در برخی موارد حدود ۳۰٪ نسبت به حالت بدون بیرون زدگی کاهش می‌یابد. این امر را می‌توان به پدیده‌های همراه با بیرون زدگی مذاب مثل تشکیل تخلخل و حفره در دکمه‌ی جوش و افزایش فرورفتگی الکترود در ورق نسبت داد. در بخش‌های زیر تاثیر این دو عامل بر استحکام و انرژی شکست جوش‌های نقطه‌ای مورد بحث قرار گرفته و عامل اصلی این کاهش در انرژی شکست معرفی می‌شود.

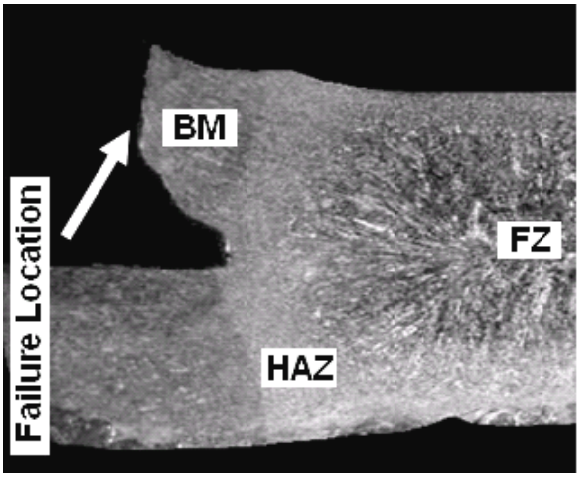
۳-۲-تاثیر حفره و تخلخل بر خواص مکانیکی

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 دکمه جوش و در منطقه متاثر از حرارت متمرکز می‌شوند [۸]. این به دلیل هندسه منحصر بفرد جوش نقطه‌ای و وجود یک ترک خارجی در محل اتصال است و درنتیجه این محل به عنوان یک محل تمرکز تنش عمل می‌کند. بنابراین وجود تخلخل در مرکز دکمه جوش تاثیر چندانی بر توزیع تنش و نیروی شکست جوش‌های نقطه‌ای نخواهد داشت. اما در مود فصل مشترکی، وجود تخلخل به علت کاهش سطح تحمل‌کننده نیرو، موجب کاهش نیروی شکست جوش‌های نقطه‌ای می‌شود. در مورد فولادهای کم کربن بیرون زدگی مذاب و درنتیجه تشکیل تخلخل عمدتاً در شرایطی بوجود می‌آید که دکمه جوش رشد نسبتاً زیادی داشته باشد. از آنجایی که جوش‌های با اندازه دکمه زیاد، تحت بارگذاری دچار شکست محیطی می‌شوند، تخلخل تاثیر چندانی بر استحکام آنها نخواهد داشت. اما در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای آلومینوم که بسیار حساس به بیرون زدگی مذاب است (به گونه‌ای که در جریان‌های جوشکاری پایین که مود شکست فصل مشترکی حاکم است نیز بیرون‌زدگی مذاب رخ می‌دهد) حضور تخلخل می‌تواند بطور قابل توجهی استحکام و انرژی جوش‌ها را کاهش دهد [۹].

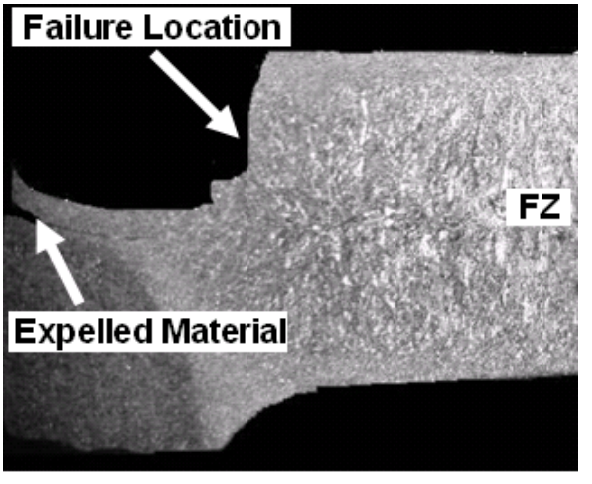
۳-۳-تاثیر فرورفتگی الکترود بر خواص مکانیکی

بیرون زدگی مذاب معمولا همراه با افزایش عمق فرورفتگی الکترود در ورق می‌باشد. افزایش عمق فرورفتگی الکترود موجب جابجا شدن محل شکست از فلزپایه در حالت بدون بیرون زدگی مذاب (شکل۵-الف) به مرز WN/HAZ در حالت همراه با بیرون زدگی مذاب (شکل۵-ب) می‌شود.

از آنجایی که مکانیزم شکست محیطی جوش‌های نقطه‌ای حین تست کشش-برش، گردنی شدن موضعی است [۱۰]، انتظار می‌رود محل شکست در جایی باشد که سختی کمتر است. همانطور که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود محل شکست در فلز پایه قرار دارد، جایی که سختی نسبت به WN و HAZ کمتر است. با افزایش عمق فرورفتگی الکترود، به علت افزایش تمرکز تنش در لبه‌ی دکمه‌ی جوش، شکست ترجیحاً از این منطقه (مرز WN/HAZ)



الف



ب

شکل (۵): محل شکست جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد کم کربن در تست کشش-برش الف) در حالت بدون بیرون زدگی مذاب (مقدار فرورفتگی الکترود حدود ۸٪ ضخامت ورق) ب) در حالت همراه با بیرون زدگی مذاب (مقدار فرورفتگی الکترود حدود ۲۲٪ ضخامت ورق).

شروع می‌شود. برای توضیح اثر این پدیده موارد زیر را باید در نظر گرفت:

الف-استحکام شکست یک جوش نقطه‌ای در مود محیطی تابع قطر دکمه‌ی جوش، ضخامت محل شکست و استحکام محل شکست.

ب- افزایش عمق نفوذ الکترود در ورق موجب کاهش ضخامت ماده‌ی تحمل کننده‌ی نیرو شده و در نتیجه نیروی شکست افت می‌یابد.

ج-محل شکست در حالت بدون بیرون زدگی در BM و در حالت همراه با بیرون زدگی در مرز WN/HAZ قرار دارد.

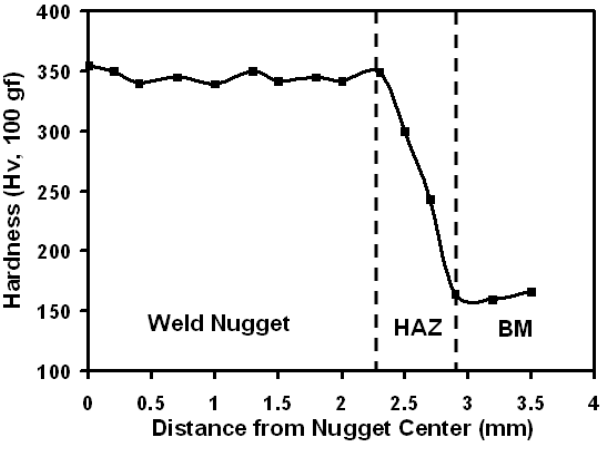
د-استحکام محل شکست تابع ریزساختار و سختی آن محل است.

شکل ۶ پروفیل سختی یک جوش‌نقطه‌ای(در راستای افقی در امتداد طول ورق، از مرکز جوش به سمت فلز پایه) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سختی دکمه‌ی جوش بسیار بالاتر (حدود ۲ برابر) سختی فلز پایه است. این به دلیل تشکیل فازهای غیرتعادلی از جمله مارتنزیت در این منطقه می‌باشد.

ه- از آنجایی که نیروی شکست به استحکام (یا سختی) محل شکست نیز مرتبط است، شکست از مرز FZ/HAZ که نسبت به فلز پایه سختی بیشتری دارد نیاز به نیروی بیشتری دارد. بنابراین نیروی شکست افزایش می‌یابد.

با در نظر داشتن موارد فوق، ثابت بودن نیروی شکست را می‌توان در نتیجه رقابت و مصالحه‌ی دو عامل دانست: یکی کاهش نیروی لازم برای گردنی شدن در اثر کاهش ضخامت محل شکست ناشی از افزایش عمق فرورفتگی الکترود و دیگری افزایش نیروی لازم برای گردنی شدن به علت افزایش سختی محل شکست (مرز WN/HAZ). و از طرف دیگر، قابلیت جذب انرژی تابع استحکام و داکتیلیتی جوش‌های نقطه‌ای است. از آنجایی که استحکام شکست ثابت است، در نتیجه افت انرژی شکست در جوش‌های با بیرون زدگی مذاب را می‌توان، به کاهش مقدار تغییر شکل پلاستیک در این حالت به علت بالاتر بودن سختی لبه‌ی دکمه‌ی جوش نسبت به سختی فلز پایه (در حدود ۲ برابر) نسبت داد.

بنابراین برخلاف برخی تحقیقات قبلی[۴ و ۵] که تاثیر بیرون زدگی مذاب بر کارایی جوش را ناچیز گزارش کرده‌اند، در اینجا دیده می‌شود که اگرچه بیرون زدگی مذاب بر استحکام تاثیر چندانی ندارد اما انرژی شکست را کاهش می‌دهد. توجه کنید در صورتیکه برای توصیف رفتار مکانیکی جوش فقط از نیروی شکست، استفاده می‌شد، این تاثیر منفی بیرون زدگی مذاب آشکار نمی‌شد. بنابراین برای توصیف کامل‌تر رفتار مکانیکی یک جوش نقطه‌ای علاوه بر نیروی شکست، باید از انرژی شکست استفاده شود. نشان داده شده است [۱۱] که بین انرژی شکست بدست آمده در تست کشش- برش استاتیکی و مقدار بدست آمده در تست کشش-برش در شرایط ضربه‌ای رابطه‌ی مستقیمی برقرار است. بنابراین هرچه انرژی شکست (قابلیت جذب انرژی) استاتیکی یک جوش بیشتر باشد، اطمینان به جوش در شرایط ضربه‌ای مثل تصادفات بیشتر است.



شکل(۶): پروفیل سختی جوش نقطه‌ای

۴- نتیجه‌گیری

۱-علاوه بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش، استحکام محل شکست که بطور قابل توجهی می‌تواند تحت تاثیر عمق فرورفتکی الکترود قرار بگیرد، می‌تواند کارایی جوش‌های نقطه‌ای را تحت تاثیر قرار دهد.

۲- تا هنگامی که بیرون زدگی مذاب رخ نداده است، ارتباط مستقیمی بین قطر دکمه‌ی جوش و ماکزیمم نیروی قابل تحمل و انرژی شکست وجود دارد.

۳- قابلیت جذب انرژی جوش‌هایی که در آنها بیرون زدگی مذاب رخ داده است، ممکن است کمتر از جوش‌هایی با قطر دکمه یکسان و حتی کمتر اما بدون بیرون زدگی مذاب باشد. علت این امر را می‌توان به تغییر محل شکست با افزایش عمق فرورفتگی الکترود از فلز پایه به مرز HAZ/FZ مرتبط کرد.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول جهت انجام این طرح تحقیقاتی تشکر و قدردانی کنند.

۶-مراجع

[1] Pouranvari, M., Asgari H. R., Mosavizadeh, S. M., Marashi, P. H., Goodarzi, M., "Effect of Weld Nugget Size on Overload Failure Mode of Resistance Spot Welds", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 12, No. 3, 2007, pp. 217-225.

[2] Sun, X., Stephens, E. V., Khaleel, M.A., "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, No. 4, 2008, pp. 356-367.

[3] Zhang, H., Senkara, J., "Resistance Welding: Fundamentals and Applications", Taylor & Francis CRC press; 2005, chap. 5

[4] Kimichi, M., "Spot Weld Properties When Welding with Expulsion-A Comparative Study", Welding Journal, Vol. 63, No. 6, 1984, pp. 58-65.

[5] Newton, C. J., Browne, D. J., Thornton, M. C., Boomer, D. R., Keay, B. F., "The Fundamentals of Resistance Spot Welding Aluminum", Proceeding of AWS sheet Metal welding Conf. VI, Detroit (MI), 1994. Paper No. E2

[6] Zhang H., J., "Expulsion and Its Influence on Weld Quality", Welding Journal, Vol. 78, No. 11, 1999, pp. 373s-380

[7] 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.

[8] Deng X., Chen W., Shi G.,"Three-dimensional finite element analysis of the mechanical behavior of spot welds ", Finite element in analysis and design, Vol. 35, No. 12, 2000, pp. 17-39

[9] Sun, X., Stephens, E. V., Davies R. W., Khaleel M. A., Spinella D. J., "Effects of Failure Modes on Strength of Aluminum Resistance Spot Welds ", Welding Journal, Vol. 83, No. 11, 2004, pp. 188-195

[10] Zuniga, S. and Sheppard, S. D., "Resistance Spot Weld Failure Loads and Modes in Overload Conditions", Proceeding of Fatigue and fracture mechanics, edited by R. S. Piascik et al., Vol. 27, ASTM, 1997, pp. 469-489.

[11] Zhang, H., Zhou, M., Hu, S. J., "Impact Strength Measurement of Spot Welds ", Proceedings of the institution of Mechanical Engineering, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 215, No. 3, 2001, pp. 403-414