بررسی تجربی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی با ضخامت نامشابه: مشخصه‌های دکمه‌ی جوش و رفتار شکست

مجید پورانوری[۱]

چکیده

با توجه به کاربرد گسترده اتصالات جوش مقاومتی نقطه‌ای با ضخامت نامشابه در صنعت خودروسازی، بررسی رفتار مکانیکی آن‌ها اهمیت قابل توجهی دارد. این مقاله به بررسی مشخصه‌های دکمه‌ی جوش، مود و مکانیزم شکست اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد کم کربن با ضخامت نامشابه حین تست کشش-برش می‌پردازد. از پارامترهای نیروی شکست، انرژی شکست و مود شکست برای توصیف رفتار مکانیکی اتصال استفاده شد. در جوش‌های با اندازه‌ی دکمه‌ی مناسب، خط انجماد نهایی در مرکز هندسی اتصال قرار دارد. در مود شکست محیطی، شکست با گردنی‌شدن فلز پایه در ورق نازک‌تر رخ داد. نتیجه گرفته شد که اندازه‌ی دکمه‌ی جوش، عمق نفوذ جوش و استحکام فلز پایه با ضخامت کم‌تر فاکتورهای اصلی کنترل کننده‌ی ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای با ضخامت نامشابه است.

کلمات کلیدی: جوش مقاومتی نقطه‌ای، رفتار شکست، ضخامت نامشابه.

۱- مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای(RSW) اصلی‌ترین فرایند در اتصال ورق‌های فلزی به‌ویژه در صنایع خودروسازی است. هر خودروی امروزی بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای دارد [۱]. در این روش برای ذوب موضعی محل اتصال از حرارت ناشی از مقاومت الکتریکی فلزات در برابر عبور جریان الکتریکی استفاده می‌شود. نیروی الکترود نیز به‌منظور تماس مناسب بین قطعات اعمال می‌شود. پس از شکل‌گیری منطقه‌ی مذاب، اجازه داده می‌شود تا دکمه‌ی تشکیل شده تحت فشار الکترود آبگرد مسی سرد شود [۲].

کیفیت جوش‌های نقطه‌ای به طور قابل توجهی قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به‌منظور حفظ سلامت سازه‌ای خودرو، دورترین احتمال وجود حتی یک یا دو جوش نقطه‌ای معیوب در محل‌های بحرانی باید حذف شود. این امر به همراه عدم اطمینان از کیفیت جوش‌های نقطه‌ای به دلیل وجود نداشتن یک روش بازرسی غیرمخرب دقیق، موجب می‌شود تا قسمت‌های مختلف اتومبیل در حدود ۳۰ درصد بیش از حد مورد نیاز جوش داده شوند. هزینه چشمگیر مربوط به این جوش‌های زیادی، نیروی محرکه‌ی قابل توجهی برای بهینه‌سازی این فرایند فراهم می‌آورد. به همین دلیل تلاش‌های زیادی برای به حداقل رساندن تعداد جوش‌های نقطه‌ای انجام می‌شود [۳].

مود شکست جوش‌های نقطه‌ای یک معیار کیفی از کیفیت جوش است. به‌طور کلی، جوش‌های نقطه‌ای در دو مود فصل مشترکی و محیطی دچار شکست می‌شوند.

۱- استاد، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس Moslemi@modares.ac.ir

در شکست فصل مشترکی، شکست از طریق اشاعه‌ی ترک از میان دکمه جوش صورت می‌گیرد و در مود شکست محیطی، شکست با بیرون کشیده شدن دکمه جوش از یک ورق صورت می‌گیرد. از آن‌جایی که ظرفیت تحمل نیرو و 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 فرایند باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که از دستیابی به مود شکست محیطی اطمینان حاصل گردد [۴].

عمده‌ی تحقیقات انجام شده در مورد جوش‌های نقطه‌ای در زمینه‌ی جوش مقاومتی نقطه‌ای ورق با ضخامت یکسان است. در عمل در بسیاری از کاربردهای عمومی مهندسی، لوازم خانگی و صنعت ساختمان این‌چنین هستند. اما در صنعت خودروسازی، بسیاری از اتصالات بین ورق‌هایی با ضخامت مختلف هستند [۵]. علی‌رغم کاربرد زیاد این اتصالات، مقالات منتشر شده‌ی بسیار کمی در مورد رفتار جوش نقطه‌ای ورق‌های با ضخامت مختلف وجود دارد. بنابراین، هدف از انجام این تحقیق، بررسی و آنالیز مشخصه‌های دکمه‌ی جوش و رفتار شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی با ضخامت مختلف می‌باشد.

۲-روش تحقیق

از ورق‌های فولادی کم کربن St12 مورد استفاده در صنعت خودروسازی با ضخامت ۱/۲۵ و ۲/۵ میلی‌متر به عنوان فلز پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی فولادهای مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. خواص مکانیکی این فولادها در جدول ۲ آورده شده است. ریزساختار این فولادها متشکل از یک ساختار عمدتا فریتی است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولادهای مورد آزمایش

فولاد	C	Mn	Si	S	P
1.25 mm	0.08	0.01	0.21	0.05	0.007
2.5 mm	0.05	0.05	0.20	0.01	0.005

جدول (۲): خواص مکانیکی فولادهای مورد آزمایش

فولاد	YS (MPa)	UTS (MPa)	EL(%)
1.25 mm	185	324	47
2.5 mm	178	320	52

جوشکاری نقطه‌ای با استفاده از دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای AC پدالی با توان ۱۲۰ kVA کنترل شونده با یک PLC انجام شد. شکل ۱ تصویری از این دستگاه را نشان می‌دهد.

شکل (۱): دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مورد استفاده در این تحقیق

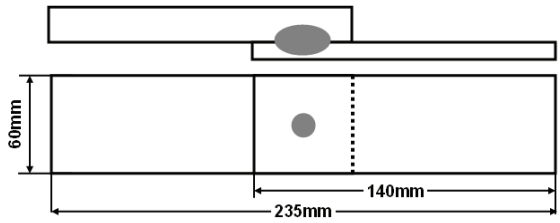
جدول (۳): متغیرهای جوشکاری مورد استفاده در این تحقیق

جریان جوشکاری	۱۰ کیلوآمپر
زمان جوشکاری	۹ تا ۱۸ سیکل
نیروی الکترود	۴/۲ سیکل
زمان اعمال فشار الکترود روی نمونه پیش از اعمال جریان	۵۰ سیکل
زمان نگهداری الکترود پس از قطع جریان	۳۰ سیکل

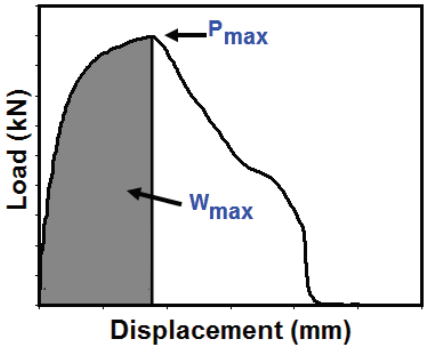
برای جوشکاری از الکترودهای الکترود گروه A، مطابق کلاس ۲ دسته‌بندی RWMA از جنس آلیاژ مس-کرم-زیرکونیوم به شکل مخروط ناقص با قطر تماس ۸ میلی‌متر استفاده شد. متغیرهای

جوشکاری مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۳ آورده شده‌اند. در این تحقیق تمامی پارامترها بجز زمان جوشکاری حین آزمایش ثابت بودند. زمان جوشکاری در ۱۰ حالت مختلف از ۹ تا ۱۸ سیکل (در بازه‌های ۲ سیکلی) تغییر داده شد. در هر شرایط جوشکاری، ۲ نمونه جوش داده شد. از یک نمونه برای بررسی‌های متالوگرافی و از یک نمونه برای تعیین خواص مکانیکی استفاده شد. نمونه‌های آزمون کشش- برش طبق استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 تهیه شدند [۶].

شکل ۲ ابعاد نمونه‌های تست کشش-برش را نشان می‌دهد. آزمون کشش-برش با سرعت فک ۲ میلی‌متر بر دقیقه با استفاده از یک دستگاه تست کشش یونیورسال اینسترون انجام شد. پس از انجام تست کشش-برش تا شکست کامل نمودارها، نمودار بار-جابجایی حاصله ثبت شد. شکل ۳ یک نمودار بار-جابجایی به همراه پارامترهای استخراج شده را نشان می‌دهد. مقدار ماکزیمم نیروی قابل تحمل توسط جوش (نیروی شکست) و قابلیت جذب انرژی (انرژی شکست) با استفاده از نمودار بار-جابجایی به‌دست آمد. انرژی شکست به صورت سطح زیر نمودار بار-جابجایی تا نیروی ماکزیمم محاسبه شد (شکل۳). مود شکست با استفاده از ظاهر نمونه‌های شکسته شده تعیین شد.



شکل (۲): ابعاد نمونه تست کشش-برش



شکل (۳): نمودار بار-جابجایی و پارامترهای مستخرج از آن

تست متالوگرافی نوری به منظور تعیین اندازه دکمه جوش و بررسی ساختار جوش انجام شد. برای انجام بررسی‌های ساختاری نمونه‌ها از وسط دکمه جوش در راستای طولی ورق برش زده وسپس مانت گرم شدند. برای بررسی ماکرو و میکروساختاری، عملیات متالوگرافی نمونه‌ها شامل سمباده‌زنی، پولیش و اچ کردن انجام گردید. برای اچ ماکروسکوپی از محلول اچ نایتال ۴ درصد و برای اچ میکروسکوپی از محلول اچ نایتال دو درصد استفاده شد.

برای بررسی نحوه‌ی شکست، پس از شروع شکست (متناظر با افت نیرو در نمودار بار-جابجایی) و همچنین پس از توسعه‌ی بیشتر شکست نمونه، تست کشش متوقف شد و سپس از وسط دکمه‌ی جوش در امتداد طول نمونه‌ی تست کشش-برش، برش زده شد. سپس این مقطع مانت گرم شد و بوسیله‌ی میکروسکوپ نوری محل شکست مورد بررسی قرار گرفت.

برای بررسی توزیع سختی در محل اتصال و به‌دست آوردن پروفیل سختی، تست ریزسختی سنجی ویکرز در امتداد قطری دکمه جوش با استفاده از یک دستگاه شیمیدزو تحت بار ۱۰۰ گرم انجام شد.

۳-نتایج و بحث

۳-۱-رشد دکمه‌ی جوش

شکل ۴ منحنی رشد دکمه‌ی جوش (تغییرات اندازه دکمه‌ی جوش بر حسب زمان جوشکاری) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ رشد دکمه ثابت نیست. به‌طور کلی سه مرحله برای رشد دکمه‌ی جوش در نظر گرفته می‌شود [۷].

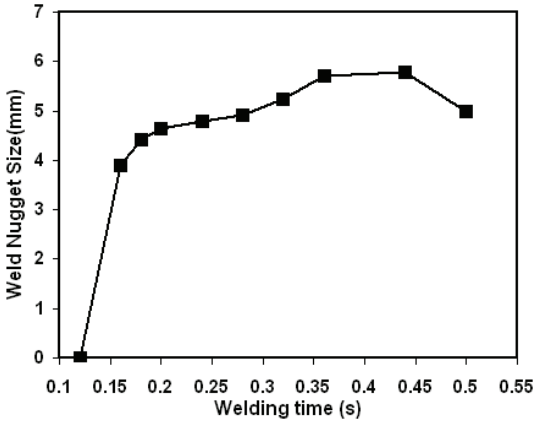
۱) دوره‌ی نهفتگی، در این مدت ذوب شدن در فصل مشترک دو ورق رخ نمی‌دهد.

۲) دوره رشد دکمه‌ی سریع

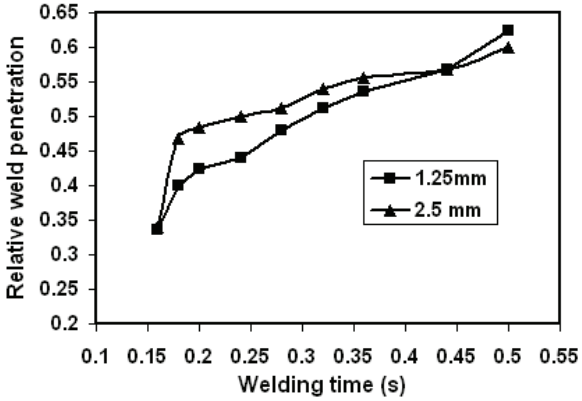
۳) دوره رشد دکمه‌ی آهسته

شکل ۵ تغییرات عمق نفوذ جوش نسبی (عمق نفوذ تقسیم بر ضخامت ورق) با زمان جوشکاری را برای هر دو طرف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد عمق نفوذ در ورق

ضخیم‌تر بیشتر است. این امر را می‌توان به مقاومت بیشتر ورق ضخیم‌تر مربوط کرد.



شکل (۴): منحنی رشد دکمه‌ی جوش برای اتصال ضخامت نامشابه



شکل (۵): تاثیر زمان جوشکاری بر عمق نفوذ نسبی

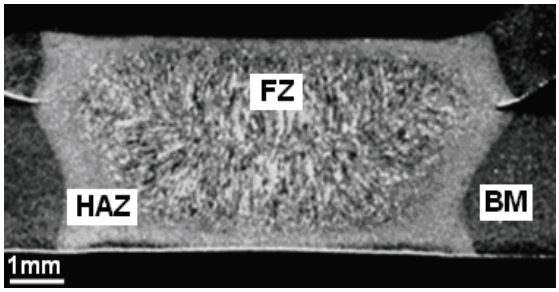
۳-۲-مشخصه‌های دکمه‌ی جوش

شکل ۶ یک ماکروساختار از جوش مقاومتی نقطه‌ای بین دو ورق با ضخامت متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منطقه‌ی اتصال را می‌توان به ناحیه‌های زیر تقسیم کرد:

۱-دکمه جوش (منطقه‌ای که در حین فرایند جوشکاری ذوب شدن را تجربه کرده و سپس دوباره منجمد شده است.). ماکروساختار این قسمت متشکل از دانه‌های ستونی است.

۲-منطقه‌ی متاثر از حرارت (منطقه‌ای که حین فرایند جوشکاری ذوب نشده بلکه دچار تغییرات ریزساختاری شده است) و

۳-فلز پایه



شکل (۶): ماکروساختار جوش مقاومتی نقطه‌ای دو ورق فولادی با ضخامت متفاوت

دو مشخصه‌ی جالب دکمه‌ی جوش عبارتند از:

۱-گلابی شکل بودن دکمه‌ی جوش به علت عدم تعادل حرارتی

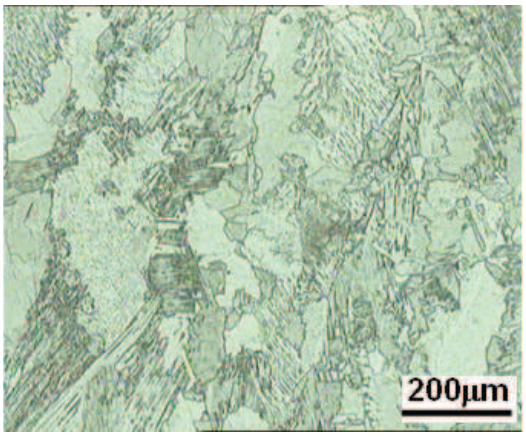
در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، در صورتی که سیکل حرارتی تجربه شده توسط هر دو ورق یکسان باشد، به این حالت، تعادل حرارتی گفته می‌شود [۸]. در این حالت یک جوش متقارن در فصل مشترک دو ورق تشکیل می‌شود. بالانس حرارتی حین جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای تحت تاثیر ضرایب هدایت حرارتی و هدایت الکتریکی نسبی دو ورق، هندسه جوش و هندسه الکترودها دارد. در مورد جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای دو ورق با ضخامت مختلف، مقاومت بالک ورق ضخیم‌تر بیشتر است. این امر منجر به تشکیل یک دکمه‌ی جوش نامتقارن می‌شود. این امر را می‌توان با استفاده از الکترودهایی با قطرهای مختلف و یا جنس‌های مختلف در دو ورق حل کرد. استفاده از الکترود با قطر کوچک‌تر و یا از جنسی با مقاومت الکتریکی بیش‌تر در طرف ورق نازک‌تر می‌تواند منجر به تشکیل یک دکمه جوش متقارن کرد [۸].

۲-محل خط نهایی انجماد

در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای دو ورق هم جنس با ضخامت یکسان، خط نهایی انجماد (محل تقاطع دانه‌های ستونی در دکمه‌ی جوش) در فصل مشترک ورق/ورق قرار دارد. اما در مورد اتصالات با ضخامت مختلف، در دکمه جوش‌هایی که به خوبی شکل گرفته‌اند، خط انجماد نهایی در مرکز هندسی اتصال قرار دارد و نه در فصل مشترک ورق/ورق.

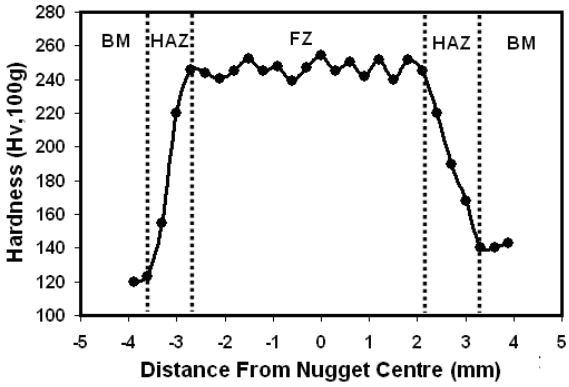
۳-۳-ریزساختار جوش و پروفیل سختی

شکل ۷ ریزساختار دکمه‌ی جوش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ریزساختار دکمه‌ی جوش شامل عمدتا مارتنزیت به همراه فریت (فریت مرزدانه‌ای و فریت ویدمنشتاتن) است.

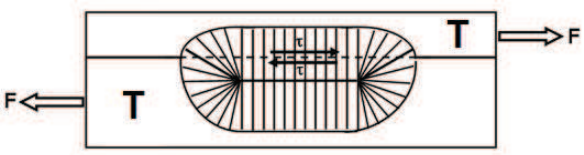


شکل (۷): ریزساختار دکمه‌ی جوش

پروفیل سختی جوش‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سختی فلز جوش نسبت به فلز پایه بسیار بالاست. تشکیل مارتنزیت در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای کم کربن نشان‌دهنده‌ی سرعت سرد شدن بسیار بالاست [۹].



شکل (۸): پروفیل سختی در اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای با ضخامت مختلف



شکل (۹): یک مدل ساده برای توضیح توزیع تنش حین آزمون کشش-برش یک جوش نقطه‌ای با ضخامت مختلف: τ تنش برشی، T تنش نرمال کششی است.

شکل (۱۰): بیرون کشیده شدن دکمه‌ی جوش از ورق نازک‌تر حین تست کشش-برش

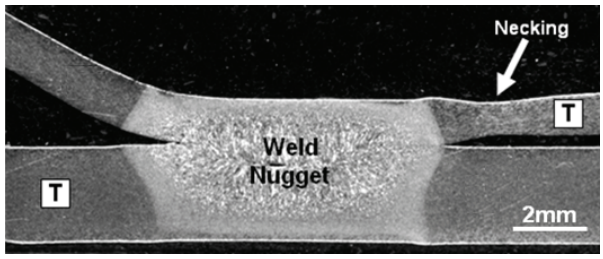
۴-۳-رفتار شکست

شکل ۹ یک تحلیل تنشی ساده در فصل مشترک و اطراف دکمه‌ی جوش حین بارگذاری کشش-برش یک اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای با ضخامت نامشابه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش در فصل مشترک ورق/ورق عمدتا از نوع برشی است در حالی‌که در حول دکمه‌ی جوش، تنش نرمال تولید می‌شود. نیروی محرکه برای شکست فصل مشترکی، تنش برشی در فصل مشترک ورق/ورق است در حالی‌که نیروی محرکه برای شکست در مود محیطی تنش‌های کششی ایجاد شده در اطراف دکمه‌ی جوش می‌باشد. هر نیروی محرکه یک مقدار بحرانی دارد و شکست در مودی رخ می‌دهد که در حین بارگذاری زودتر به نیروی محرکه‌ی بحرانی برسد. اندازه دکمه‌ی جوش مهمترین پارامتر در تعیین توزیع تنش در یک جوش نقطه‌ای است. در جوش‌هایی که اندازه‌ی دکمه‌ی جوش کوچکی دارند، تنش برشی پیش از آن‌که تنش‌های کششی در حول دکمه‌ی جوش منجر به گردنی شدن و شکست محیطی شوند، به مقدار بحرانی خود می‌رسند و دکمه‌ی جوش در مود فصل مشترکی دچار شکست می‌شوند. بنابراین یک اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بحرانی وجود دارد که مود شکست محیطی حاکم می‌شود. وجود یک اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بحرانی برای وقوع شکست محیطی در منابع مختلفی آمده است [۱۲-۱۰].

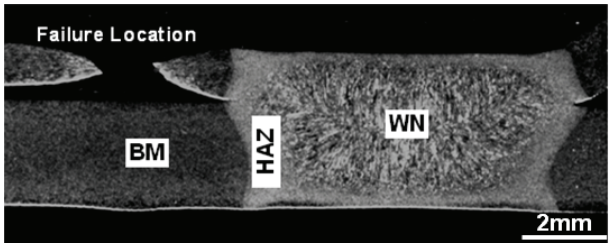
در این تحقیق تنها نمونه‌ای که در زمان جوشکاری ۰/۶۱ ثانیه جوش داده شده بود، حین آزمون کشش-برش دچار شکست

فصل مشترکی شد. دیگر نمونه‌ها تماما در مود محیطی دچار شکست شدند. شکل ۱۰ یک شکست مود محیطی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دکمه‌ی جوش از ورق نازک‌تر به بیرون کشیده شده است.

شکل ۱۱ مراحل مختلف شکست محیطی حین آزمون کشش- برش را نشان می‌دهد. شکل۱۱-الف مقطع یک جوش نقطه‌ای حین مراحل اولیه شکست محیطی در آزمون کشش-برش را نشان می‌دهد. تنش نرمال در مکان‌هایی که با علامت T نشان داده شده است کششی است. همان‌طور که در شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود یک طرف از ورق نازک‌تر و یک طرف ورق ضخیم‌تر تحت تنش کششی قرار گرفته‌اند و تمایل به گردنی شدن وجود دارد. در مود شکست محیطی محل شکست با توجه به رقابت بین گردنی شدن ورق نازک و ضخیم تعیین می‌شود. از آن‌جایی که ورق نازک‌تر نیروی کم‌تری برای گردنی شدن لازم دارد، این ورق یک گردنی شدن شدید را حین تست تجربه می‌کند. گردنی شدن و تغییر فرم پلاستیک در ورق نازک‌تر قابل مشاهده است. بررسی‌های انجام شده توسط روش المان محدود نشان داده است که تنش در ورق نازک‌تر متمرکز می‌شود [۱۳].



(الف)



(ب)

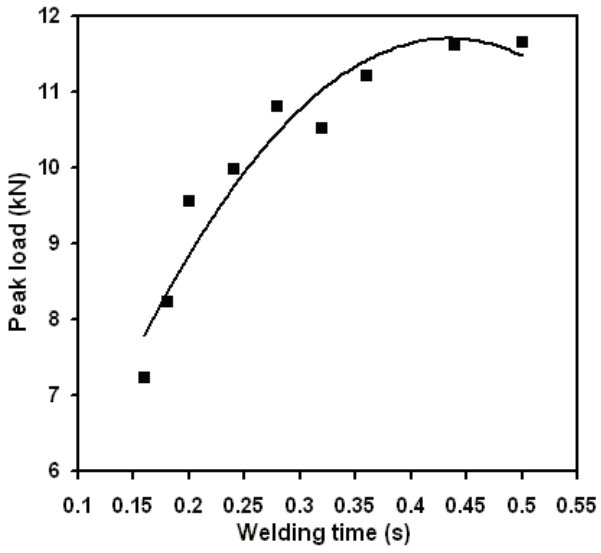
شکل (۱۱): مسیر شکست و محل شروع گردنی شدن و شکست در اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای با ضخامت نامشابه الف) در مراحل اولیه‌ی گردنی شدن ب) گردنی شدن شدید که منجر به ایجاد ترک در ورق نازک‌تر شده است.

شکل۱۱-ب ماکروگراف سطح مقطع یک جوش نقطه‌ای را پس از گسترش بیشتر شکست نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکست از طریق گردنی شدن ورق نازک‌تر گسترش پیدا کرده است. همان‌طور که در شکل۱۱-ب نشان داده شده است، محل شکست در BM است. این امر را می‌توان به سختی پایین BM نسبت به FZ و HAZ مرتبط کرد. سختی پایین BM یک مسیر ترجیحی برای شروع گردنی شدن حین تست کشش- برش فراهم می‌کند.

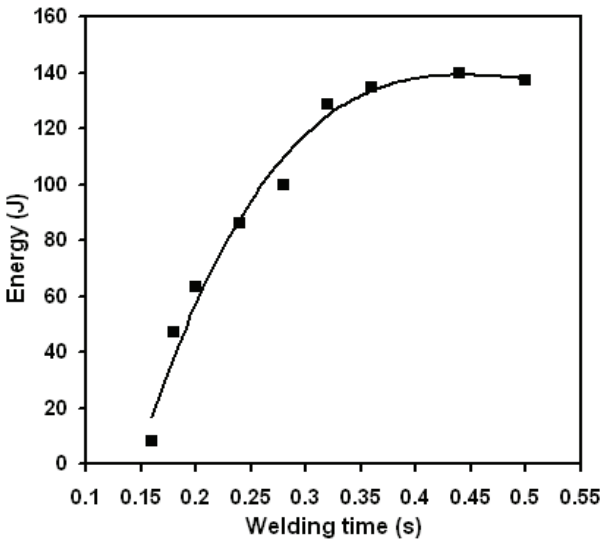
در نهایت ذکر این نکته جالب است که ساختار دانه‌ای دکمه‌ی جوش و موقعیت خط نهایی انجماد (محل برخورد دانه‌های ستونی درFZ) می‌تواند بر مود شکست تاثیر بگذارد. همان‌طور که می‌دانیم خط انجماد نهایی از منظر خواص مکانیکی یک محل ضعیف است (به دلیل جدایش عناصر ناخالصی در این محل). همان‌طور که در بالا ذکر شد در زمان‌های جوشکاری پایین خط انجماد نهایی در فصل مشترک ورق/ورق قرار دارد. نیروی محرکه شکست فصل مشترکی تنش برشی در فصل مشترک ورق/ورق است. در این شرایط بیشترین مقدار تنش برشی بر خط انجماد نهایی (فصل مشترک ورق/ورق) وارد می‌شود. براین اساس، مود شکست فصل مشترکی مشاهده شده در زمان جوشکاری ۰/۱۶ ثانیه را می‌توان به این فاکتور و همچنین اندازه‌ی دکمه‌ی جوش کم آن که موجب اعمال تنش برشی بالایی به فصل مشترک حین تست کشش-برش می‌شود، وابسته کرد. با افزایش زمان جوشکاری، خط انجماد نهایی به مرکز هندسی اتصال منتقل می‌شود. در این شرایط، مشابه با حالت قبلی، ماکزیمم تنش برشی در فصل مشترک ورق/ورق رخ می‌دهد. اما در این حالت، خط انجماد نهایی در فصل مشترک ورق/ورق نیست. بنابراین در این حالت، علاوه بر افزایش اندازه‌ی دکمه‌ی جوش، جابه‌جا شدن خط نهایی انجماد (که یک محل ضعیف است) به سمت مرکز هندسی اتصال (که تنش برشی کمتری به آن وارد می‌شود) می‌تواند موجب کاهش تمایل جوش نقطه‌ای برای شکست در مود فصل مشترکی می‌شود.

۳-۵-خواص مکانیکی

شکل ۱۲ (الف و ب) نشان می‌دهد که زمان جوشکاری تاثیر قابل توجهی بر ماکزیمم نیروی قابل تحمل توسط جوش‌های نقطه‌ای و قابلیت جذب انرژی آن‌ها دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان جوشکاری، ماکزیمم نیروی قابل تحمل و انرژی جذب شده حین شکست افزایش می‌یابد. علی‌رغم این واقعیت که اندازه‌ی دکمه‌ی جوش ایجاد شده در زمان جوشکاری ۰/۵ ثانیه کمتر از اندازه‌ی دکمه‌ی جوش ایجاد شده در زمان جوشکاری ۰/۴۶ ثانیه است، نیرو و انرژی شکست آن کم‌تر است. این امر را می‌توان به عمق نفوذ بیش‌تر در این حالت وابسته کرد.



(الف)



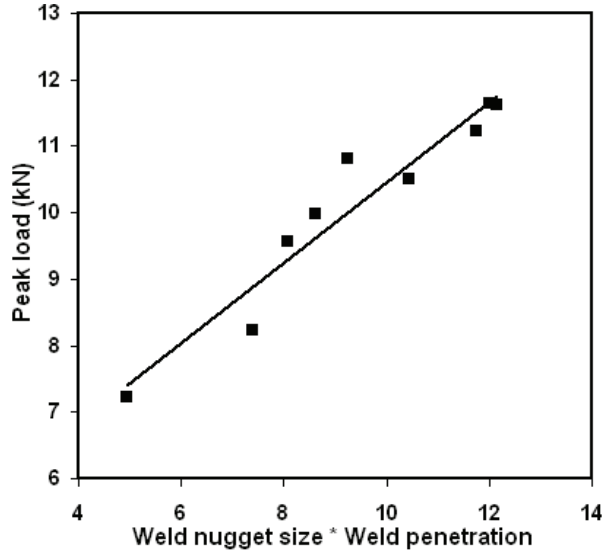
(ب)

شکل (۱۲): تاثیر زمان جوشکاری بر الف-نیروی شکست ب-انرژی شکست

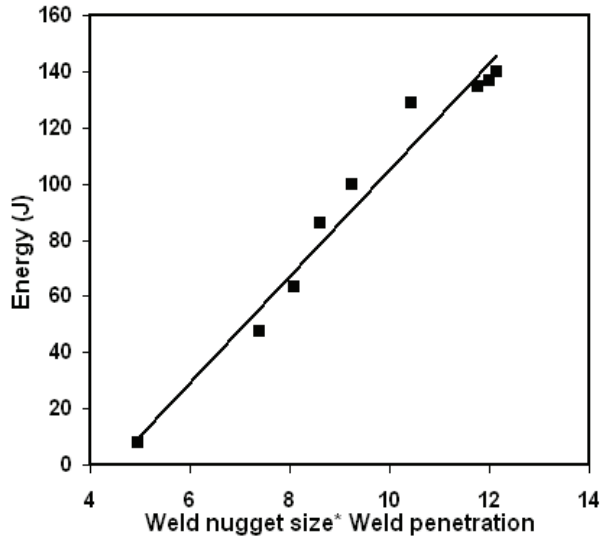
شکل ۱۳ (الف وب) تغییرات نیروی شکست و انرژی شکست با حاصلضرب اندازه‌ی دکمه‌ی جوش (d) در کل عمق نفوذ جوش (P) را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، یک رابطه‌ی خطی بین نیروی شکست با d×P وجود دارد. همچنین یک رابطه‌ی خطی بین انرژی شکست و d×P وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اندازه‌ی دکمه‌ی جوش و عمق نفوذ جوش مهمترین پارامترهای کنترل کننده‌ی

خواص مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای ورق‌های فولادی کم کربن با ضخامت نامشابه هستند.



(الف)



(ب)

شکل (۱۳): تاثیر حاصلضرب اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در عمق نفوذ جوش بر

الف-نیروی شکست ب-انرژی شکست

۴-نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر دست یافت:

۱-شکل دکمه‌ی جوش در اتصالات جوش نقطه‌ای با ضخامت نامشابه نامتقارن و گلابی‌شکل است.

۲- با افزایش زمان جوشکاری خط انجماد نهایی از فصل مشترک ورق/ورق به مرکز هندسی اتصال جابه‌جا می‌شود. این امر می‌تواند منجر به کاهش تمایل به شکست در مود فصل مشترکی در تست کشش-برش شود.

۳-اندازه‌ی دکمه‌ی جوش، عمق نفوذ جوش و استحکام فلز پایه با ضخامت کم‌تر، فاکتورهای اصلی کنترل کننده‌ی استحکام و انرژی شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی کم کربن با ضخامت نامشابه هستند.

۴-شکست محیطی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های با ضخامت نامشابه با گردنی شدن فلز پایه‌ی نازک‌تر کنترل می‌شود.

تشکر و قدردانی

در این تحقیق برای جوشکاری نمونه‌ها از دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای دانشگاه علم و صنعت ایران استفاده شده است. همچنین بررسی‌های ساختاری و ریزسختی‌سنجی در آزمایشگاه متالوگرافی دانشگاه صنعتی امیرکبیر و آزمون‌های کشش-برش در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است. از مسوولین مربوطه این آزمایشگاه تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

مراجع

1- Pouranvari M., Abedi A., Marashi P., Goodarzi M., " Effect of expulsion on peak load and energy absorption of low carbon steel resistance spot welds ", Science and Technology of Welding and Joining, Vol.13, pp. 39-43, 2008.

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, pp. 356-367, 2008.

3- Williams, N. T and Parker J. D., " Review of resistance spot welding of steel sheets: Part 1 -Modelling and control of weld nugget formation", International Materials Review, Vol.49, pp. 45 -75, 2005.

4- Marya M.and Gayden X.Q., Marya, M., Gayden,X.Q.," Development of requirements for resistance spot welding dual-phase (DP600) steels part 2: Statistical analyses and process maps", Welding Journal, Vol. 84, pp. 197s–204s, 2005.

5- Zhang H., Senkara J., Resistance welding: fundamentals and applications, Taylor & Francis CRC press, pp. 196-201. 2005

6- 'Recommended practices for test methods and evaluation the resistance spot welding behavior of automotive sheet steels', ANSI/AWS/SAE D8.9-97, 1997.

7- Gould, J.E., " Examination of nugget development during spot welding using both experimental and analytical techniques", Welding Journal, Vol. 66, pp. 1s -10s, 1987.

8- P. T. Houldcroft, "Welding process technology", 3rd ed, Cambridge University Press, 2004.

9- Gould J. E., Khurana S. P., Li T.," Predictions of microstructures when welding automotive advanced high-strength steels". Welding Journal, Vol.86, pp. 111s-116s, 2006.

10- Chao Y. J., " Failure mode of spot welds: Interfacial versus pullout ", Science and Technology of Welding and Joining, Vol.8, pp. 133-137, 2003.

11- 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, pp. 217-

12- Marashi P., Pouranvari M., Amirabdollahian S., Abedi A., Goodarzi M., " Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steels", Materials Science Engineering A, Vol.480, pp. 175-180, 2008.

13- Darwish S. M., Al-Samhan A. M., " Peel and shear strength of spot-welded and weld-bonded dissimilar thickness joints", Journal of Matterials Processing and Technology, Vol.147, pp. 51-59, 2004.