تاثیر ضخامت ورق بر رفتار رشد دکمه‌ی جوش در اتصالات جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه ورقه

مجید پورانوری*[۱] و پیروز مرعشی[۲]

چکیده

یکی از مسایل جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه ورقی، عدم رشد کافی دکمه‌ی جوش (منطقه‌ی ذوب شده) در فصل مشترک ورق/ ورق است، یعنی جایی که بیش‌ترین نیاز به آن وجود دارد. این امر منجر به کاهش ویژگی‌های مکانیکی و افزایش حساسیت به شکست فصل مشترکی می‌شود. در این مقاله تاثیر ضخامت ورق بر الگوی رشد دکمه‌ی جوش حین جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه ورق با ضخامت یکسان بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که یک ضخامت ورق بحرانی برای رشد دکمه وجود دارد که در آن، اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در راستای فصل مشترک ورق/ ورق و در امتداد مرکز هندسی اتصال (وسط ورق میانی) تقریبا برابر است. در ورق‌های با ضخامت کم‌تر از مقدار بحرانی، یک دکمه‌ی جوش بیضی شکل تشکیل می‌شود به گونه‌ای‌که رشد دکمه‌ی جوش در امتداد مرکز هندسی اتصال بیش‌تر از رشد دکمه در امتداد فصل مشترک ورق/ ورق است، اما در ورق‌های با ضخامت بیش‌تر از مقدار بحرانی، یک دکمه‌ی جوش غیر بیضوی تشکیل می‌شود که رشد دکمه بیش‌تر در فصل مشترک ورق/ ورق متمرکز است.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، جوش سه ورقه، رشد دکمه‌ی جوش.

۱- مربی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.

۲- استادیار، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: mpouranvari@yahoo.com

پیشگفتار

هم اکنون، فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای متداولترین فرایند اتصال ورق‌های فلزی در صنایع خودروسازی است. امروزه یک وسیله‌ی نقلیه، به گونه‌ی معمول بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای دارد. قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف به گونه‌ی قابل توجهی تابع رفتار مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای است. بنابراین، کیفیت جوش‌های نقطه‌ای بر دوام و طراحی ایمن خودرو تاثیر قابل توجهی دارد[۱ و ۲]. درک رفتار جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اتصالات دو ورقه معمولا سر راست است، اما رفتار جوشکاری اتصالات نامشابه از نظر جنس و یا ضخامت و اتصالات چند ورقه پیچیده‌تر است. اگرچه در بدنه‌ی خودرو جوش نقطه‌ای بیش‌تر برای اتصال دو ورقه بکار می‌رود، اما به علت تنگناهای طراحی اتصال(برای مثال در محل تقاطع چند ورق)، جوشکاری نقطه‌ای سه و یا حتی چهار و در برخی موارد ۵ ورقه (اگرچه تا حد امکان باید از اتصالات ۵ ورقه پرهیز کرد) اجتناب ناپذیر است؛[۳].

مهم‌ترین فراسنج کنترل کننده‌ی ویژگی‌های مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای اندازه‌ی دکمه‌ی جوش است [۴ و ۵]. در اتصالات سه ورقه دکمه‌ی جوش (منطقه‌ای از اتصال که حین جوشکاری ذوب شده و دوباره منجمد می‌شود) ممکن است در فصل مشترک ورق / ورق تشکیل و رشد کند و یا در مرکز هندسی اتصال (شکل ۱) تشکیل شود. یکی از مهم‌ترین مسایل جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه ورقه، رشد ناکافی دکمه‌ی جوش در جایی که مورد نیاز است، فصل مشترک ورق/ ورق، می‌باشد. بنابراین، بررسی رفتار رشد دکمه برای درک بهتر رفتار جوشکاری و توسعه‌ی معیارهای کنترل کیفیت این اتصالات نیازی اساسی است. از آن‌جایی که که رشد دکمه‌ی جوش در امتداد فصل مشترک ورق/ ورق تعیین کننده‌ی ویژگی‌های مکانیکی است، بنابراین در صورتی که عمده‌ی رشد دکمه در مرکز هندسی اتصال باشد و رشد دکمه در راستای فصل مشترک کافی نباشد، استحکام اتصال پایین خواهد بود و اتصال حساس به حالت شکست فصل مشترکی (رشد ترک از میان دکمه‌ی جوش) خواهد بود. با وجود کاربرد این اتصالات در صنعت، پژوهش‌های منتشر شده‌ی کمی [۱۱-۶] در این زمینه موجود است. هم‌چنین، برای اتصالات سه ورقه استانداردهای بین المللی وجود نداشته و شرایط مناسب برای جوشکاری بیش‌تر براساس سعی و خطا بدست می‌آید.

Harlin و همکارانش [۶ و ۷] رشد دکمه در اتصالات دو و سه ورقه را بررسی و مقایسه کردند و تاثیر نیروی الکترود بر محل تشکیل دکمه‌ی جوش را بررسی کردند. Shen و همکارانش [۸] و Ma و همکارانش [۹] رشد دکمه‌ی جوش در اتصالات سه ورقه را بوسیله‌ی شبیه‌سازی المان‌های محدود بررسی کردند. Coon و همکارانش [۱۰] جوش‌پذیری اتصالات سه ورقه در فولاد دوفازی DP600 را بررسی کردند و تاثیر فراسنجهای جوشکاری بر خواص مکانیکی اتصال را بررسی کردند اما بررسی‌های ساختاری و مکانیزمی ارایه نکردند. Choi و همکارانش [۱۱] رفتار خستگی این اتصالات را مورد بررسی قرار دادند و تلاش کردند تا عمر خستکی را با توجه به مفهوم[1] CTOD (بازشدگی دهانه‌ی ترک) پیش‌بینی کنند.

در این مقاله تاثیر ضخامت ورق بر رفتار رشد دکمه جوش در اتصال جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه ورق فولادی با ضخامت یکسان بررسی شده است.

روش پژوهش

در این پژوهش از ورق‌های فولاد کم کربن DQSK مورد استفاده در صنعت خودروسازی با ضخامت‌های ۰/۸، ۱/۲، ۱/۵ و ۲ میلیمتر به عنوان فلز پایه استفاده شده است. ترکیب شیمیایی تمامی ورق‌ها در محدوده‌ی Fe-(0.06-0.08)%wtC-(0.21-0.32)%wt Mn-(0.01-0.02)%wt Si. بودند. جوشکاری سه ورقه ۰٫۸/۰٫۸/۰٫۸، ۱٫۲/۱٫۲/۱٫۲، ۱٫۵/۱٫۵/۱٫۵ و ۲/۲/۲ به وسیله‌ی یک دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ۱۲۰kVA انجام شد. برای جوش دادن‌نمونه‌ها از الکترود گروه A، مطابق کلاس ۲ دسته‌بندی[2] RWMA استفاده شد. جنس این الکترود از آلیاژ مس-کرم-زیرکونیوم است. قطر نوک الکترود ۸ میلیمتر انتخاب شد. در حین تمام

[1] -Crack Tip Opening Displacement
[2] -Resistance Welding Manufacturing

آزمایش‌ها، فشار الکترود ۳/۵ بار و جریان جوشکاری ۱۱ کیلوآمپر ثابت نگه داشته شد. بمنظور بررسی تاثیر زمان جوشکاری بر رشد دکمه‌ی جوش، زمان جوشکاری از یک سیکل (معادل ۵۰ هرتز) تا جایی که بیرون زدگی مذاب مشاهده شد، به تدریج افزایش داده شد. در هر شرایط جوشکاری یک نمونه جوش داده شد. زمان جوش لازم برای تشکیل دکمه‌ی جوش در ورق‌ها بدست آمد. برای انجام بررسی‌های ساختاری نمونه‌ها از وسط دکمه برش زده شدند. برای برش نمونه‌ها از کاتر دیسکی استفاده شد تا لبه‌ی برشی کم باشد. هم‌چنین، بر اساس استاندارد[1] AWS [۱۲] برای اطمینان از این‌که محل برش از وسط دکمه‌ی جوش عبور می‌کند، با احتساب لبه‌ی برش، دکمه‌ی جوش کمی بالاتر از وسط دکمه برش داده شد تا پس از مراحل سمباده زنی و پوبیش به محل وسط دکمه‌ی جوش برسد. برای بررسی ماکرو و میکروساختار نمونه‌ها پس از انجام عملیات مرسوم متالوگرافی آماده سازی شامل سمباده زنی و پولیش کردن نمونه‌ها به وسیله‌ی محلول نایتال ۴ درصد اچ شدند. بمنظور بررسی مشخصه‌های هندسی دکمه‌ی جوش، ماکروگراف‌هایی از تمامی نمونه‌ها تهیه و ابعاد هندسی دکمه‌ی جوش اندازه‌گیری شد. اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در راستای فصل مشترک ورق/ ورق ($FZS_{S/S}$) و اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در راستای مرکز هندسی اتصال (FZS_{GC}) بدست آمد. سپس منحنی رشد دکمه‌ی جوش (تغییرات اندازه‌ی دکمه‌ی جوش با زمان جوشکاری) برای هر نوع اتصال رسم شد ومیانگین شیب نحالتار زمان‌های جوشکاری گوناگون رسم شد.

نتایج و بحث

آنالیز منحنی رشد دکمه‌ی جوش

شکل ۲ منحنی رشد دکمه‌ی جوش برای اتصالات سه ورقه با ضخامت‌های گوناگون را نشان می‌دهد. با تجزیه و تحلیل شکل و تغییر در شیب منحنی، رشد دکمه‌ی جوش (تغییرات اندازه دکمه‌ی جوش برحسب زمان جوشکاری) در اتصالات سه ورقه با ضخامت یکسان، می‌توان موردهای زیر را استخراج کرد:

الف-در منحنی رشد دکمه‌ی جوش اتصالات سه ورقه چهار مرحله مشاهده شد:

مرحله‌ی A (دوره‌ی نهفتگی): در این مرحله حرارت تولید شده، اما به اندازه‌ای نیست که ذوب در امتداد فصل مشترک‌های دو ورق رخ دهد.

مرحله‌ی B (رشد سریع دکمه‌ی جوش): حرارت کافی تولید شده منجر به ذوب شدن فصل مشترک ورق/ ورق و رشد سریع دکمه‌ی جوش می‌شود.

مرحله‌ی C (رشد آهسته‌ی دکمه‌ی جوش): در این مرحله یک کاهش در حرارت تولید شده ناشی از کاهش مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود که منجر به کاهش نرخ افزایش اندازه‌ی دکمه‌ی جوش می‌شود.

مرحله‌ی D (رشد منفی): در این مرحله به علت کاهش مقاومت الکتریکی دکمه‌ی جوش، افزایش تلفات حرارتی و بیرون زدگی مذاب، کاهشی در اندازه‌ی دکمه‌ی جوش مشاهده می‌شود.

ب- طول دوره‌ی نهفتگی تابع ضخامت کلی اتصال می‌باشد. تاثیر ضخامت کل اتصال بر دوره‌ی نهفتگی در جدول ۱ آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، هرچه ضخامت کلی اتصال (مجموع ضخامت سه ورق) بیش‌تر شود، جرم کلی اتصال افزایش یافته و حرارت مورد نیاز برای رسیدن دما به حدی که تغییرات متالورژیکی قابل توجهی در ورق‌ها مشاهده شود، افزایش می‌یابد.

پ- تاثیر ضخامت کلی اتصال بر نرخ اولیه‌ی رشد دکمه‌ی جوش در جدول ۱ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت کلی اتصال، نرخ اولیه‌ی رشد دکمه (نرخ رشد دکمه در مرحله‌ی B) افزایش می‌یابد. این امر را می‌توان به مقاومت حجمی بالاتر اتصالات با ضخامت کلی بیش‌تر وابسته دانست.

شکل ۳ تغییرات شکل دکمه‌ی جوش با ضخامت ورق را نشان می‌دهد. محل تشکیل ذوب اولیه و شکل‌گیری دکمه‌ی جوش تابع ضخامت ورق است. ورق‌های نازک با ضخامت ۰/۸ و ۱/۲ میلیمتر، دکمه‌ی جوش‌های با شکل بیضی شکل دارند. در مورد اتصال ۰/۸-۰/۸-۰/۸ اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در مرکز هندسی اتصال بیش‌تر از اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ ورق است. با افزایش

[1] -American Welding Society

ضخامت ورق به ۱/۲ میلیمتر، اختلاف بین اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در مرکز هندسی اتصال و در فصل مشترک دو ورق کم‌تر می‌شود. در اتصال ۲-۲-۲، رفتار رشد دکمه تغییر کرد. در این اتصال یک دکمه‌ی جوش غیر بیضوی تشکیل شد که اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ ورق بیش‌تر از مرکز هندسی اتصال است. انتقال بین این دو رفتار متفاوت در ضخامت ورق ۱/۵ میلیمتر رخ داد. در اتصال ۱/۵-۱/۵-۱/۵، اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ ورق تقریبا برابر مرکز هندسی اتصال است و دکمه‌ی جوش تشکیل شده مستطیلی شکل است.

ضخامت ورق بحرانی برای رشد دکمه در اتصالات سه ورقه به ضخامت یکسان

به گونه‌ی تجربی مشاهده شده است که در اتصالات دو ورقه، تولید حرارت اولیه و تشکیل دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ ورق، جایی که مقاومت در برابر عبور جریان ایجاد می‌شود، رخ می‌هد [۳]. تشکیل دکمه‌ی جوش تابع بالانس بین تولید حرارت و اتلاف حرارت است [۱۳]. تولید حرارت تابعی از فراسنج‌های جوشکاری (جریان جوشکاری، زمان جوشکاری و ...) است. تلفات حرارتی تابع ساز و کار انتقال حرارت است که خود تابع ضخامت ورق و چگونگی چینش ورق‌هاست. از آن‌جایی که در مراحل اولیه‌ی فرایند جوشکاری، مقاومت فصل مشترکی بیش‌تر از مقاومت فصل مشترکی است، انتظار می‌رود حرارت مقاومتی بیش‌تری در فصل مشترک ورق/ ورق ایجاد شود. بخشی از این حرارت تولید شده در فصل مشترک ورق/ ورق از راه رسانش به بخش مرکزی ورق میانی منتقل می‌شود. در صورتی که ضخامت ورق میانی کم باشد (یعنی جرم کمی داشته باشد)، حرارت جذب شده به ورق میانی می‌تواند موجب ذوب شدن ورق میانی شود. در نتیجه، در این حالت محل تشکیل دکمه‌ی جوش مرکز ورق میانی خواهد بود. اگر ضخامت ورق میانی به اندازه‌ی بالا باشد (یعنی جرم بیش‌تری داشته باشد)، این ورق پیش از این‌که ذوب شدن در آن رخ دهد، می‌تواند مقدار زیادی از این حرارت را جذب کند. در نتیجه، در این حالت محل تشکیل دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ ورق خواهد بود. همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت ورق محل تشکیل دکمه از مرکز هندسی اتصال به فصل مشترک ورق/ ورق انتقال می‌یابد.

یکی دیگر از عامل‌های دیگر که می‌تواند رفتار رشد دکمه‌ی جوش در اتصالات سه ورقه را تحت تاثیر قرار دهد، تلفات حرارتی (حرارت فروکشی) از راه الکترودهای مسی آبگرد است. در حین جوش مقاومتی نقطه‌ای سه ورق نازک، فاصله‌ی بین الکترود (جاذب حرارت) و فصل مشترک ورق/ ورق کم‌تر از حالتی است که سه ورق با ضخامت بیش‌تر جوش می‌شوند. بنابراین، تلفات حرارت تولید شده در فصل مشترک‌های ورق/ ورق از راه الکترودها در حالت جوشکاری سه ورق نازک بیش‌تر از جوشکاری سه ورق ضخیم است. این امر نیز می‌تواند منجر به کاهش رشد دکمه‌ی جوش در امتداد فصل مشترک ورق/ ورق در اتصال سه ورقه‌ی نازک شود و $FZS_{S/S}$ کم‌تر از FZS_{GC} خواهد بود.

همان گونه که در بالا مشاهده شد، در شرایط جوشکاری مورد استفاده در این پژوهش ضخامت ورق ۱/۵ میلیمتری را می‌توان به عنوان ضخامت ورق بحرانی در نظر گرفت. در این حالت FZS_{GC} و $FZS_{S/S}$ تقریبا برابرند. در ورق‌های با ضخامت کم‌تر از ضخامت بحرانی، رشد دکمه در مرکز هندسی اتصال بیش‌تر از رشد دکمه در فصل مشترک ورق/ ورق است. بالاتر از این مقدار بحرانی، دکمه‌ی جوش بخوبی در فصل مشترک ورق/ ورق تشکیل می‌شود. این نکته نیز شایان ذکر است که ضخامت ورق بحرانی می‌تواند تابع جنس ورق و فراسنج‌های جوشکاری باشد.

محل تشکیل دکمه‌ی جوش می‌تواند حالت شکست و ویژگی‌های مکانیکی را تحت تاثیر قرار دهد. اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ورق مهم‌ترین عامل کلیدی کنترل‌کننده‌ی ویژگی‌های مکانیکی و حالت شکست است. مقاومت دکمه‌ی جوش در برابر حالت شکست فصل مشترکی به وسیله‌ی اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ ورق کنترل می‌شود [۱۶-۱۴]. اگر ضخامت ورق کم‌تر از ضخامت ورق بحرانی باشد، رشد دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ ورق به اندازه‌ی کافی نیست و به همین دلیل انتظار می‌رود، اتصال حساسیت بیش‌تری نسبت به حالت شکست فصل

مشترکی داشته باشد. به همین دلیل ضروری است جریان جوشکاری برای زمان بیش‌تری اعمال شود تا از رشد کافی دکمه‌ی جوش در امتداد فصل مشترک ورق/ ورق و در نتیجه از حصول حالت شکست محیطی اطمینان حاصل شود.

نتایج این پژوهش می‌تواند گامی نخستین در درک بهتر رفتار رشد دکمه در اتصالات سه ورقه و توسعه‌ی خطوط راهنما برای بهینه سازی تشکیل دکمه‌ی جوش در اتصالات سه ورقه باشد، اما بررسی تاثیر دیگر متغیرهای جوشکاری از جمله جریان جوشکاری و نیروی الکترود برای دستیابی به درک بیش‌تر و عمیق‌تر این موضوع لازم است. این بررسی‌ها به همراه بررسی حالت شکست و فراسنج‌های کنترل‌کننده‌ی ویژگی‌های مکانیکی این اتصالات می‌تواند منجر به دست یافتن به خطوط راهنمایی برای بهینه‌سازی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه ورقه شود.

نتیجه گیری

بررسی رفتار رشد دکمه حین سیکل حرارتی جوشکاری و رفتار شکست آن حین بارگذاری مکانیکی نخستین گام برای درک بهتر رفتار جوشکاری جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای سه ورقه و توسعه‌ی معیار کنترل کیفیت برای این اتصالات است. در این پژوهش، تاثیر ضخامت ورق بر رفتار رشد دکمه‌ی جوش در اتصالات سه ورقه با ضخامت یکسان بررسی شد. نشان داده شد که یک ضخامت ورق بحرانی برای رشد دکمه وجود دارد که در آن اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در راستای فصل مشترک ورق / ورق و در امتداد مرکز هندسی اتصال (وسط ورق میانی) تقریبا برابر است. افزایش ضخامت ورق بیش از ضخامت ورق بحرانی موجب انتقال محل تشکیل رشد دکمه‌ی جوش به فصل مشترک‌های ورق / ورق می‌شود. اگر ضخامت ورق کم‌تر از ضخامت بحرانی باشد، رشد دکمه‌ی جوش در امتداد مرکز هندسی اتصال بیش‌تر از رشد آن در فصل مشترک ورق / ورق خواهد بود. در فراسنج‌های جوشکاری مورد استفاده در این پژوهش، ضخامت بحرانی ورق ۱/۵ میلیمتر بدست آمد. این نکته قابل ذکر است که ضخامت بحرانی ورق می‌تواند متاثر از فراسنج‌های جوشکاری و جنس ورق باشد.

منابع

1- M. Pouranvari., and S.P.H. Marashi., Key factors influencing mechanical performance of dual phase steel resistance spot welds, Sci Technol Weld Join, Vol15,pp.149-155, 2010.

2- 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.

3- N. T. Williams., and J. D. Parker., Int. Mater. Rev., Review of resistance spot welding of steel sheets: Part 1 - Modelling and control of weld nugget formation, Vol.49, p.45 -75, 2004.

4- 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, Eng. Fail. Anal., Vol.15, pp. 356-367,2008.

5- M. Pouranvari., A. Abedi., P. Marashi., and 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

6- N. Harlin., T. B. Jones., and J. D. Parker., Sci. Technol. Weld. Join, Weld growth mechanisms during resistance spot welding of two and three thickness lap joints, Vol.7, pp.35-41, 2002.

7- N. Harlin., T. B. Jones, and J. D. Parker, Weld growth mechanism of resistance spot welds in zinc coated steel ,J. Mater. Proc. Tech, Vol.143-144, pp.448-45, 2003.

8- M.A. Ninshu., and H. Murakawa., Numerical and experimental study on nugget formation in resistance spot welding for three pieces of high strength steel sheets, J. Mater. Proc. Tech , Vol.210,pp.2045-2052, 2010.

9- J. Shen., Y. Zhang., X. Lai., and P.C. Wang., Modeling of resistance spot welding of multiple stacks of steel sheets, Materials & Design,Vol.32,pp.550-560. 2011.

10- T. Coon., A. Elliott., A. Joaquin., R. Koganti., A. Wexler., R. Bhatnagar., and S.

Galvanized Steel, SAE technical paper, SAE, Detroit, Michigan, SAE 2007-01-1363.
11- B.H. Choi., D.H. Joo., and S.H. Song., Observation and prediction of fatigue behavior of spot welded joints with triple thin steel plates under tensile-shear loading, Int. J. Fatigue, Vol.29, pp.20-627, 2007.
12- 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.
13- J. C. Feng., Y. R. Wang., and Z. D. Zhang., Nugget growth characteristic for AZ31B magnesium alloy during resistance spot welding, Sci. Technol. Weld. Joining, Vol. 11, pp.154-162, 2006.
14- M. Marya., K. Wang., L. G. Hector., and X. Gayden, Tensile-Shear Forces and Fracture Lalam., Resistance Spot Weldability of Three Metal Stack Dual Phase 600 Hot-dipped Modes in Single and Multiple Weld Specimens in Dual-Phase Steels, J. Manufact. Sci. Eng., Vol.128, pp. 287-298, 2006.
15- X. Sun., E. V. Stephens., R. W. Davies., M. A. Khaleel., and D. J. Spinella., Effects of fusion zone size on failure modes and static strength of aluminum resistance spot welds, Weld. J., Vol.83, pp.88s-195s, 2004.
16- P. Marashi., M. Pouranvari., S. Amirabdollahian., A. Abedi., and M. Goodarzi., Microstructure and Failure Behavior of Dissimilar Resistance Spot Welds between Low Carbon Galvanized and Austenitic Stainless Steels, Mater. Sci Eng. A, Vol.480, pp.175-180, 2008.

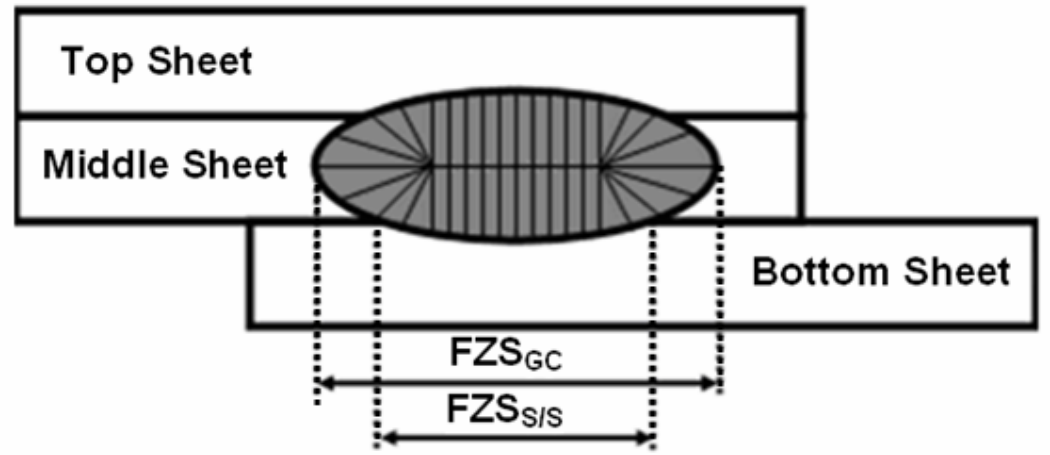
پیوست‌ها

جدول ۱-مشخصه‌های منحنی رشد دکمه‌ی جوش

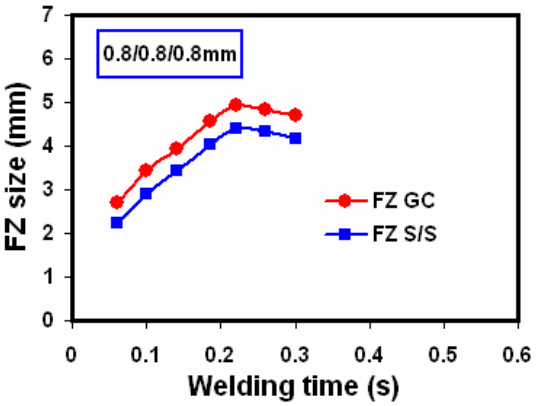
اتصال	زمان نهفتگی* (ثانیه)	نرخ رشد دکمه در مرحله B ** (میلیمتر بر ثانیه)
۰٫۸/۰٫۸/۰٫۸	۰/۰۶	۱۶
۱٫۲/۱٫۲/۱٫۲	۰/۱	۲۴/۵
۱٫۵/۱٫۵/۱٫۵	۰/۱۴	۳۳/۳
۲/۲/۲	۰/۱۸	۴۵/۶

* زمان مورد نیاز برای تشکیل دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ورق

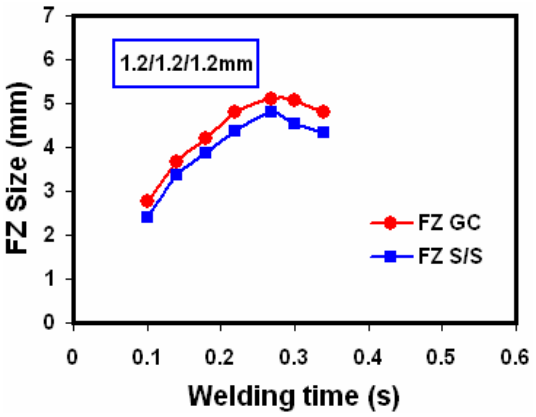
** نرخ رشد دکمه‌ی جوش (شیب منحنی رشد دکمه) در مرحله‌ی اول رشد دکمه در فصل مشترک ورق/ورق



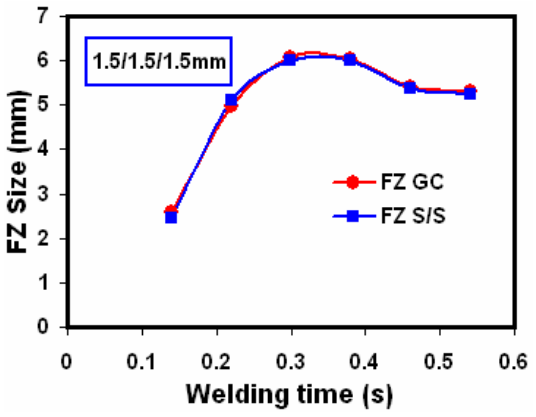
شکل ۱-ماکروساختار شماتیک یک اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای سه ورقه (FZS_{GC}: اندازه دکمه‌ی حوش در امتداد مرکز هندسی اتصال، $FZS_{S/S}$ اندازه دکمه‌ی جوش در امتداد فصل مشترک ورق/ورق)



(الف)

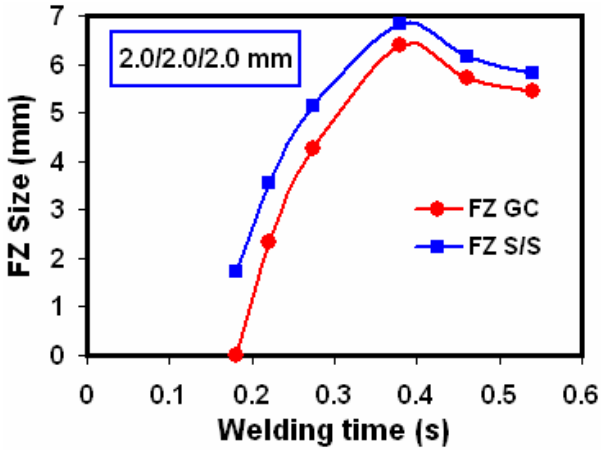


(ب)



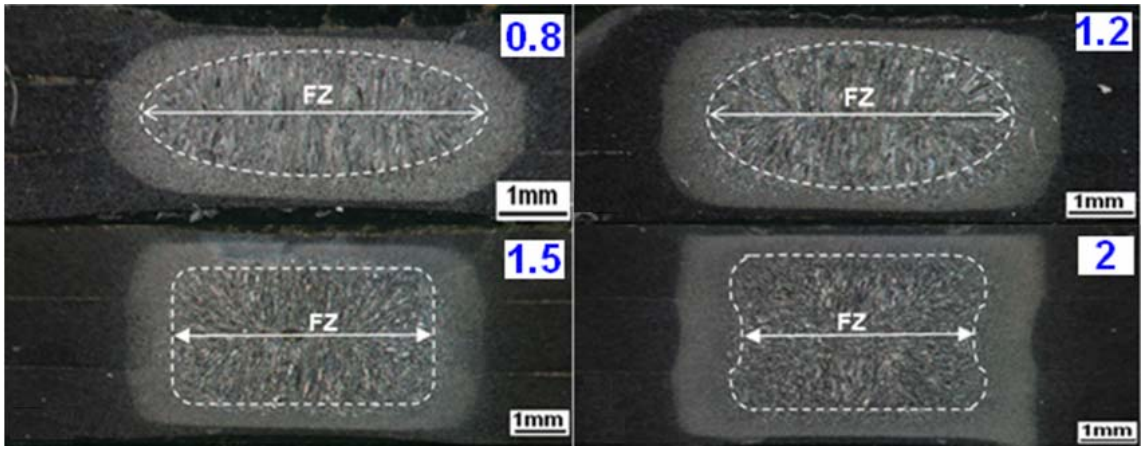
(ج)

شکل ۲-منحنی رشد دکمه‌ی جوش برای اتصالات الف) ۰٫۸/۰٫۸/۰٫۸ ب) ۱٫۲/۱٫۲/۱٫۲ ج) ۱٫۵/۱٫۵/۱٫۵



(د)

شکل ۲-منحنی رشد دکمه‌ی جوش برای اتصال د)۲/۲/۲



شکل ۳-تاثیر ضخامت ورق بر نحوه‌ی رشد دکمه‌ی جوش در اتصالات سه تایی