

## تغییر حالت شکست از فصل مشترکی به محیطی در جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای مشابه و نامشابه فولاد دوفازی DP600 و فولاد کم کربن AISI1008

مجید پورانوری<sup>۱\*</sup> و پیروز مرعشی<sup>۲</sup>

### چکیده

این پژوهش به بررسی ارتباط ویژگی‌های ریزساختاری و مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولاد کم کربن AISI1008 (LCS) و فولاد دوفازی DP600 در آزمایش کشش- برش می‌پردازد. ارتباط بین اندازه دکمه جوش بحرانی مورد نیاز برای رسیدن به حالت شکست محیطی، ریزساختار و ویژگی‌های سختی بررسی شد. بررسی‌ها نشان دادند که اندازه دکمه بحرانی تابع ویژگی‌های نیمرخ سختی (نسبت سختی دکمه جوش به میانگین سختی فلزهای پایه) است. نتایج نشان دادند که اتصال DP600/DP600 بیش‌ترین تمایل به شکست فصل مشترکی و اتصال DP600/LCS کمترین تمایل به شکست فصل مشترکی را از خود نشان دادند. اندازه دکمه جوش بحرانی پایین اتصال نامشابه DP600/LCS ناشی از سختی FZ بالاتر آن (نسبت به اتصال LCS/LCS) و هم‌چنین، سفتی کمتر آن (نسبت به DP600/DP600) است. در نهایت، استحکام و انرژی شکست اتصالات مشابه و نامشابه مقایسه شد.

**واژه‌های کلیدی:** جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، فولاد دوفازی، حالت شکست، جوشکاری نامشابه.

1- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دزفول، ایران.  
2- استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.  
\* نویسنده مسئول مقاله: mpouranvari@yahoo.com

## پیشگفتار

شرکت‌های خودروسازی در جستجوی راههایی برای کاهش سوخت خودرو و استفاده از موادی هستند که به افزایش امنیت سرنشینان منجر می‌شود. هر ماده‌ای که کاندیدای استفاده در خودرو می‌شود باید دارای قابلیت‌های شکل‌دهی، جوشکاری، پوشش‌دهی و تعمیر مناسب باشد. امروزه استفاده از فولادهای استحکام بالای پیشرفته در صنعت خودروسازی به عنوان یک استراتژی مهم در بسیاری از شرکت‌های خودروسازی بزرگ دنبال می‌شود. استفاده از فولادهای استحکام بالا با کاهش وزن خودرو موجب کاهش سوخت مصرفی می‌شود و به این دلایل امروزه بحث بکارگیری ورق‌های فولادی استحکام بالای پیشرفته بویژه بکارگیری فولادهای دوفازی به عنوان یک بحث داغ مطرح است [1]. اگرچه تا سال 2001 از فولادهای استحکام بالای پیشرفته در بدنه خودرو استفاده نشده است، اما در سال 2005 یک سهم 12 درصدی به خود اختصاص داده است. پیش‌بینی شده است تا سال 2015 این مقدار به 50 درصد افزایش یابد [2].

استفاده از فولادهای دوفازی در صنعت خودروسازی نیازمند بررسی جوش‌پذیری آنهاست. جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اصلی‌ترین فرایند اتصال ورق‌های فلزی بویژه در صنایع خودروسازی است. خودورهای امروزی بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای دارند [3]. درک رفتار مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای در شرایط گوناگون بارگذاری اهمیت دارد. حالت شکست جوش‌های نقطه‌ای یک معیار کیفی از کیفیت جوش است. به‌طور کلی، جوش‌های نقطه‌ای در دو حالت فصل مشترکی و محیطی دچار شکست می‌شوند. شکل 1 مسیر شکست‌های مرسوم حین آزمایش مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای را نشان می‌دهد. در شکست فصل مشترکی ( $IF^1$ )، شکست از راه اشاعه ترک از میان دکمه جوش (منطقه‌ای از اتصال که در حین سیکل حرارتی جوش، ذوب شده و دوباره منجمد می‌شود) صورت می‌گیرد (مسیر A) و در حالت شکست محیطی ( $PF^2$ )، شکست با بیرون کشیده شدن دکمه جوش از یک ورق صورت می‌گیرد. در این حالت، شکست ممکن است از فلز

پایه (مسیر B)، منطقه متأثر از حرارت (مسیر C) یا از مرز دکمه جوش و منطقه متأثر از حرارت (مسیر D) صورت گیرد. از آن جایی که ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی در حالت فصل مشترکی به‌گونه قابل توجهی کم‌تر از حالت محیطی است، بنابراین برای اینکه جوش‌های نقطه‌ای در حین سرویس دچار تخریب زودرس نشوند، متغیرهای فرایند باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که از دستیابی به حالت شکست محیطی اطمینان بدست آید [4-6].

پژوهش‌های زیادی در زمینه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای استحکام بالا انجام شده است. براساس این پژوهش‌ها، مشکلات اصلی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای این فولادها عبارتند از [6-9]:

- 1- حساسیت زیاد به حالت شکست فصل مشترکی (رشد ترک از میان دکمه جوش)
- 2- حساسیت زیاد به بیرون زدگی مذاب
- 3- تشکیل حفره‌های انقباضی در دکمه جوش
- 4- سختی بالای دکمه جوش در اثر تشکیل مارتنزیت در دکمه جوش که می‌تواند در برخی شرایط بارگذاری تأثیر نامطلوبی بر حالت شکست داشته باشد.

ورود فولادهای استحکام بالای پیشرفته به صنعت خودروسازی، نیاز به‌اتصال این فولادها به فولادهای دیگر را فراهم آورده است. درک رفتار شکست جوش‌های نقطه‌ای هم‌جنس و هم‌ضخامت چندان پیچیده نیست، اما تحلیل و پیش‌بینی رفتار شکست اتصالات ناهم‌جنس به علت تفاوت ویژگی‌های فیزیکی، تفاوت استحکام تسلیم و استحکام کششی، تفاوت رفتار کارسختی و پیچیدگی تحولات ریزساختاری در منطقه ذوب شده و منطقه متأثر از حرارت دو ورق می‌تواند مشکل باشد. اگرچه اتصالات نامشابه در بدنه خودرو کاربرد زیادی دارد، اما پژوهش‌ها منتشر شده کمی در این زمینه وجود دارد. آلنیوس<sup>۳</sup> و همکارانش [10] جوش‌پذیری اتصالات نامشابه گوناگونی بین فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فولادهای غیر زنگ نزن را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که استحکام اتصالات نامشابه در آزمایش کشش- برش به وسیله استحکام و ضخامت فولاد غیر زنگ نزن کنترل می‌شود.

<sup>1</sup>- Interfacial failure

<sup>2</sup>- Pullout failure

(LCS) می‌پردازد. در این مقاله به بررسی تغییر حالت شکست از فصل مشترکی به محیطی در اتصال مشابه فولاد ساده کم کربن (LCS/LCS)، اتصال مشابه فولاد دوفازی (DP600/DP600) و اتصال نامشابه فولاد دوفازی و فولاد ساده کم کربن (LCS/DP600) پرداخته شده است. از آنجایی که حساسیت به حالت شکست فصل مشترکی در آزمایش کشش- برش نسبت به دیگر آزمایش‌ها مثل آزمایش کندی مبلمانی و آزمایش کشش متقاطع بیش‌تر است [16]. برای بررسی رفتار انتقال از حالت شکست فصل مشترکی به محیطی آزمایش کشش- برش انتخاب شد. در نهایت، ویژگی‌های مکانیکی این اتصالات با هم مقایسه شده اند.

#### روش پژوهش

در این پژوهش از ورق فولاد دو فازی DP600 و ورق کم کربن LCS با ضخامت 2 میلی‌متر استفاده شد. ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های مکانیکی این ورق‌ها به ترتیب به وسیله آزمون کوانتومتری و آزمون کشش (بر اساس استاندارد کشش ورق ASTM E8M) تعیین شد و نتایج مربوطه در جدول 1 و 2 آورده شده است.

جوشکاری به وسیله دستگاه جوش نقطه‌ای ثابت<sup>4</sup> با توان 120kVA با استفاده از الکتروود گروه A، بر اساس کلاس ۲ دسته‌بندی RWMA استفاده شد. جنس این الکتروود از آلیاژ مس- کرم- زیرکونیوم و شکل آن به صورت مخروط ناقص با قطر تماس 8 میلی‌متر است.

برای جوشکاری اتصال مشابه و نامشابه DP600 و LCS متغیرهای جوشکاری به صورت جدول 3 در نظر گرفته شدند. گفتنی است که محدوده تغییر پارامترهای جوشکاری بر اساس یک سری آزمایش‌های اولیه کارگاهی تعیین شدند. در هر جریان 4 سری نمونه جوش داده شد که 3 سری برای آزمایش کشش- برش و یک نمونه دیگر برای بررسی‌های ساختاری مورد استفاده قرار گرفتند. آزمایش کشش- برش به وسیله دستگاه آزمایش کشش اینسترون<sup>5</sup> با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. ابعاد نمونه‌های آزمایش کشش- برش بر اساس

مرعشی و همکارانش [11] ارتباط ریزساختار و رفتار شکست اتصال نامشابه جوش نقطه‌ای فولاد AISI304 و یک فولاد کم کربن را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند برای حصول حالت شکست محیطی پارامترهای جوشکاری باید به گونه‌ای تنظیم شوند که در اثر اختلاط این دو فولاد یک دکمه جوش مارتنزیتی با اندازه مناسب تشکیل شود. پوگیو<sup>1</sup> و همکارانش [12] تاثیر پارامترهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای را بر جوش‌پذیری اتصال نامشابه DP600/AISI304 بررسی کردند و پارامترهای جوشکاری بهینه شامل جریان و زمان جوشکاری و نیروی الکتروود را برای بدست آوردن بیشینه نیروی شکست تعیین کردند. دانش پور و همکارانش [13] در بررسی خود در مورد جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولاد DP780 و فولاد فرا کششی DC04 نتیجه گرفتند که استحکام کشش- برش استاتیکی اتصال نامشابه این دو فولاد در حد استحکام جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای مشابه DC04 است. خان<sup>2</sup> و همکارانش [14] استحکام خستگی اتصالات مشابه و نامشابه DP600 و HSLA350 را بررسی و دریافتند که استحکام خستگی اتصال نامشابه نزدیک به استحکام خستگی اتصال مشابه فولاد HSLA350 است. در این کارها به مسئله انتقال حالت شکست از فصل مشترکی به محیطی و مقایسه آن با اتصالات مشابه پرداخته نشده است، اما هرناندز<sup>3</sup> و همکارانش [15] حالت شکست اتصال نامشابه فولاد DP600 به فولادهای HSLA، DP780 و TRIP780 را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند در مقایسه با جوش‌های DP600/DP600 که بسیار حساس به حالت شکست فصل مشترکی است، اتصال نامشابه آن به دیگر فولادها منجر به کاهش حساسیت به حالت شکست فصل مشترکی و بدست آمدن حالت محیطی در قطر دکمه جوش‌های کمتر است. آنها این امر را به افزایش سختی دکمه جوش در اثر امتزاج دو فولاد مرتبط کردند.

این پژوهش به بررسی ریزساختار، حالت شکست و ویژگی‌های مکانیکی اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای مشابه و نامشابه فولاد دوفازی DP600 و فولاد ساده کم کربن

4 - Pedestal  
5 - Instron

1- Poggio  
2 -Khan  
3 -Hernandez

همان گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود، در هر سه حالت اتصال‌های مشابه و نامشابه سختی دکمه جوش بیش‌تر از سختی فلز پایه است. این امر به دلیل تشکیل مقدار قابل توجهی فاز مارتنزیت در دکمه جوش است. تشکیل مارتنزیت در دکمه جوش فولادهای دوفازی و حتی فولادهای کم کربن در پژوهش‌های زیادی گزارش شده است. این امر را می‌توان به سرعت سرد شدن بسیار بالا در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مرتبط کرد. گولد<sup>4</sup> و همکارانش [18] مدلی تحلیلی برای برآورد سرعت سرد شدن ارائه دادند. بنابر مدل آنها سرعت سرد شدن برای یک ورق به ضخامت 2 mm حدود 3000 درجه سانتی‌گراد بر ثانیه برآورد زده می‌شود. این سرعت سرد شدن بالا ناشی از حضور الکترودهای آبگرد مسی و اثر کوینچ آنها و هم‌چنین، زمان کوتاه سیکل حرارتی اعمال شده بر محل اتصال است.

همان گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود، سختی دکمه جوش به ترتیب از LCS/LCS به DP600/LCS و به DP600/DP600 افزایش می‌یابد. اختلاف سختی در اتصالات مشابه و نامشابه تحت تاثیر ترکیب شیمیایی FZ است. ترکیب شیمیایی FZ در اتصال نامشابه در اثر امتزاج شدن دو فلز پایه با هم حین ذوب شدن متفاوت از هر دو فلز پایه است. با فرض اینکه هر دو فولاد به نسبت یکسان ذوب شوند، ترکیب شیمیایی FZ در اتصال را می‌توان به صورت Fe-0.1C-0.742Mn-0.241Si برآورد کرد. می‌دانیم سختی محصولات غیرتعادلی در فولادها تابع درصد کربن و عناصر است. برای بررسی تاثیر کربن و عناصر آلیاژی از کربن معادل Yurioka [19] بر اساس رابطه زیر استفاده شد:

$$CE_Y = C + A(C) \left\{ 5B + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} \right\} \quad (1)$$

که در آن:

$$A(C) = 0.75 + 0.25 \tanh \{ 20(C - 0.12) \} \quad (2)$$

همان گونه که در جدول 3 مشاهده می‌شود، بین کربن معادل Yurioka و سختی FZ رابطه‌ای مستقیم وجود دارد.

استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 تهیه شدند [17]. شکل و ابعاد نمونه‌های آزمایش کشش-برش در شکل 2 آمده است. برای کاهش چرخش نمونه و اعمال تنش‌های ترکیبی به آن در حین انجام آزمایش کشش-برش از یک لایه فلزی به اندازه ضخامت ورق مصرفی، در انتهای نمونه‌ها استفاده شد. حالت شکست نمونه‌ها حین آزمایش کشش-برش ثبت گردید.

برای بررسی ماکرو ساختاری نمونه‌ها پس از انجام عملیات مرسوم آماده سازی نمونه برای متالوگرافی شامل سمباده زنی و پولیش، نمونه‌ها به وسیله محلول نایتال 4 درصد اچ شدند. ماکروساختار و ریزساختار مناطق گوناگون ریزساختاری بوسیله میکروسکوپ نوری بررسی شد.

آزمون ریزسختی سنجی به وسیله دستگاه ریز سختی سنج شیمیدزو با نیروی ۱۰۰ گرم در امتداد قطر دکمه جوش انجام گرفت. امتداد قطری به گونه‌ای انتخاب شد که مناطق گوناگون ریزساختاری شامل دکمه جوش<sup>۱</sup> (FZ)، منطقه متأثر از حرارت<sup>۲</sup> (HAZ) و فلزات پایه<sup>۳</sup> (BM) را پوشش دهد.

نتایج و بحث

### نیمرخ سختی

ویژگی‌های نیمرخ سختی یکی از مهم‌ترین فاکتورهای کنترل کننده رفتار شکست جوش‌های نقطه‌ای است. نیمرخ سختی اتصالات DP600/DP600، LCS/LCS و DP600/LCS در شکل 3 نشان داده شده است. سختی بالای دکمه جوش‌ها را می‌توان به تشکیل مارتنزیت و بینیت حین سرد شدن غیرتعادلی نسبت داد. شکل 4a ماکروساختار یک اتصال جوش نقطه‌ای DP600/LCS را به همراه ریزساختار مناطق گوناگون نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، ریزساختار دکمه جوش (مناطق b و c) یک ریزساختار پیچیده متشکل از مارتنزیت، بینیت بالایی، فریت چند وجهی و فریت ویدمنشتاتن است. ریزساختار HAZ در فولاد DP600 در مجاورت دکمه جوش (منطقه c) عمدتاً مارتنزیتی به همراه مقداری فریت مرزانه‌ای است.

<sup>1</sup> - Fusion Zone

<sup>2</sup> - Fusion Zone

<sup>3</sup> -Base Metal

<sup>4</sup> -Gould

در اینجا منظور از حالت شکست جوش‌های نقطه‌ای، حالت و چگونگی شکست ماکروسکوپی جوش‌های نقطه‌ای حین بارگذاری است. دو حالت شکست در اتصال نامشابه DP600/LCS مشاهده شد: حالت شکست فصل مشترکی (شکل 6) و حالت شکست محیطی (شکل 7). همان گونه که مشهود است، شکست محیطی از منظر ماکروسکوپی همراه با تغییر شکل پلاستیک قابل توجهی است حال آنکه در شکست فصل مشترکی تغییر شکل پلاستیک ناچیزی در دکمه جوش رخ می‌دهد. بنابراین، حالت شکست محیطی به دلیل تغییر شکل پلاستیک و قابلیت جذب انرژی بالای همراه با آن، حالت شکست ترجیحی است؛ حال آنکه شکست فصل مشترکی که یک شکست کم انرژی است، می‌تواند موجب کاهش شدید قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف شود. منحنی نیرو- جابه‌جایی مربوط به اتصال نامشابه که در حالت محیطی دچار شکسته شده است، به همراه منحنی سفتی ( $dF/dX$ ) در شکل 8 نشان داده شده است. تغییر در شیب منحنی نیرو- جابه‌جایی را می‌توان به تغییر در مسیر رشد ترک مرتبط کرد. حالت شکست محیطی در اتصال نامشابه DP600/LCS دو مشخصه جالب دارد:

1) همان گونه که در منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی و  $dF/dX$  مشخص است، شکست محیطی یک شکست دو ورقه است (یعنی شکست در هر دو ورق رخ داده است، شکل 8 را ببینید). در تمام جوش‌هایی که در حالت محیطی دچار شکست شدند، شکست به وسیله جوانه زنی ترک از حول دکمه جوش در سمت فولاد DP شروع شد (شکل 8). با رشد ترک در اطراف دکمه جوش در سمت DP، یک ترک دیگر در سمت LCS جوانه زده و رشد می‌کند. سپس شکست نهایی رخ می‌دهد.

2) یکی دیگر از پدیده‌های جالب مشاهده شده در این پژوهش، محل شروع شکست در حالت محیطی است. همان گونه که در شکل 8 مشاهده می‌شود، شکست از سمت DP600 آغاز شده است. از آن جایی که مکانیزم شکست محیطی جوش‌های نقطه‌ای در آزمایش کشش- برش گردنی شدن در جهت ضخامت است، انتظار می‌رود که شکست محیطی نمونه‌های آزمایش کشش- برش از نرم ترین منطقه جوش آغاز شود. با این وجود، در این

یکی از ویژگی‌های جالب نیمرخ سختی اتصال نامشابه وجود یک تغییر شدید در نیمرخ سختی در مرز HAZ<sub>DP</sub>/FZ است. ریزساختار این منطقه در شکل 4 نشان داده شده است. مقدار مارتنزیت تشکیل شده در مرز HAZ<sub>DP</sub>/FZ بیشتر از مقدار مارتنزیت تشکیل شده در FZ است. همان گونه که مشاهده می‌شود، سختی این منطقه 400 ویکرز است.

مارتنزیتی بودن ساختار HAZ<sub>DP</sub> در مجاورت FZ به دلیل الف) درشت بودن اندازه دانه آستنیت ناشی از سیکل حرارتی جوشکاری (افزایش اندازه دانه موجب افزایش قابلیت سختی‌پذیری و تشکیل مارتنزیت می‌شود)، ب) بالاتر بودن سختی‌پذیری فولاد DP600 نسبت به فولاد کم کربن به علت بیش‌تر بودن درصد کربن و منگنز آن و ج) بالابودن سرعت سرد شدن در این منطقه است. سختی HAZ<sub>DP</sub>/FZ در حد سختی FZ در اتصال مشابه DP600/DP600 است. امتزاج شدن فولاد DP600 ( $C=0.135$ ,  $Mn=1.28$ ) و فولاد LCS ( $C=0.065$ ,  $Mn=0.204$ ) موجب کاهش قابلیت سختی‌پذیری FZ نسبت به سختی‌پذیری HAZ طرف DP600 می‌شود. سختی HAZ<sub>DP</sub> 1/27 برابر سختی FZ است.

شکل 5 تغییرات اندازه دکمه جوش و حالت شکست اتصالات مشابه و نامشابه را بر حسب جریان جوشکاری در اتصال مشابه فولاد ساده کم کربن (LCS/LCS)، اتصال مشابه فولاد دوفازی (DP600/DP600) و اتصال نامشابه فولاد دوفازی و فولاد ساده کم کربن (LCS/DP600) نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش جریان جوشکاری به دلیل افزایش حرارت تولیدی در فصل مشترک دو ورق، اندازه دکمه جوش افزایش می‌یابد. همان گونه که مشاهده می‌شود، به دلیل اختلاف مقاومت الکتریکی دو فولاد مقداری تفاوت در اندازه دکمه جوش‌ها وجود دارد. حضور مارتنزیت در فولاد DP600 موجب افزایش مقاومت الکتریکی آن می‌شود [20] که این موجب افزایش نرخ رشد دکمه جوش می‌شود.

#### حالت شکست اتصال نامشابه DP600/LCS

تابع نوع اتصال است. جوش‌های LCS/LCS هنگامی که اندازه دکمه جوش بیش‌تر از 7/9 میلیمتر باشد، در حالت محیطی دچار شکست می‌شوند. جوش‌های DP600/DP600 هنگامی که اندازه دکمه جوش بیش‌تر از 9/1 میلی‌متر باشد، در حالت محیطی دچار شکست می‌شوند. جوش‌های DP600/LCS، کمترین تمایل به شکست فصل مشترکی را از خود نشان می‌دهند. اندازه دکمه جوش بحرانی برای این اتصال از دیگر اتصالات کمتر است. برای تحلیل رفتار یاد شده باید به چند نکته توجه کرد:

1) در آزمایش کشش- برش، نیروی محرکه حالت IF تنش‌های برشی در فصل مشترک ورق/ ورق است. مقدار تنش‌های برشی اعمالی به فصل مشترک تابع اندازه دکمه جوش در فصل مشترک ورق/ ورق است. مقاومت دکمه در برابر شکست فصل مشترکی یک جوش نقطه‌ای با یک اندازه دکمه جوش معین تابع سختی FZ است. سختی بیش‌تر FZ منجر به تمایل کمتر به شکست فصل مشترکی می‌شود.

2) نیروی محرکه حالت شکست PF در آزمایش کشش- برش، تنش‌های کششی در اطراف دکمه جوش هستند. تنش‌های کششی عمدتاً ناشی از ممان خمشی ناشی از لب به لب سوار شدن دو ورق و چرخش دکمه جوش حین بارگذاری است. در واقع، تنش‌های خمشی- کششی، نقشی مهم در حالت شکست محیطی بازی می‌کنند. بین مقدار زاویه چرخش حین آزمایش کشش- برش و تمایل به حالت شکست فصل مشترکی رابطه وجود دارد. هرچه نمونه سفتی<sup>1</sup> بالاتری داشته و در نتیجه، تمایل به چرخش نمونه کمتر باشد، تمایل به شکست فصل مشترکی بیش‌تر است. در نتیجه، فلزات پایه با استحکام تسلیم و استحکام کششی بیش‌تر تمایل به شکست در حالت فصل مشترکی بیش‌تری دارند. بنابراین، هرچه نمونه سفت‌تر باشد، تمایل به شکست محیطی کمتر است. برای یک برآورد اولیه می‌توان سفتی نمونه را به میانگین سختی فلزات پایه نسبت داد.

پژوهش، مشاهده شد که شکست از سمت مستحکم‌تر یعنی فولاد DP600 شروع می‌شود. گزارش‌های کمی در مورد این پدیده نامعمول وجود دارد. Baltazar و همکارانش [15] گزارش کردند که شکست محیطی اتصال نامشابه DP600/DP780 در آزمایش کشش- برش از سمت مستحکم‌تر، یعنی DP780 آغاز می‌شود. آنها این پدیده را به اختلاف رفتار کارسختی دو فولاد DP600 و DP780 مرتبط کردند. در این کار، پدیده مشاهده شده را می‌توان به صورت زیر توضیح داد: ورق LCS استحکام تسلیم کمتری نسبت به DP600 دارد. بنابراین، حین بارگذاری، ورق LCS ابتدا تسلیم شده و سپس شروع به کارسختی می‌کند. کارسختی LCS می‌تواند موجب انتقال کرنش به سمت DP600 شود. افزون بر این، سختی بالای FZ/HAZ<sub>DP</sub> می‌تواند به صورت یک شیار متالورژیکی عمل کرده و موجب تمرکز تنش در سمت DP600 شود. این امر می‌تواند، توزیع کرنش را تحت تاثیر قرار داده و شروع شکست از سمت DP600 را تشویق کند.

### انتقال حالت شکست از فصل مشترکی به محیطی در اتصال مشابه و نامشابه

حالت شکست جوش‌های نقطه‌ای در شرایط گوناگون جوشکاری با بررسی سطح شکست اتصالات مشابه و نامشابه تعیین شد. براساس شکل 5 برای هر کدام از اتصالات مشابه و نامشابه، با افزایش جریان جوشکاری حالت شکست از IF به PF تغییر می‌کند. کمترین جریان جوشکاری برای جلوگیری از شکست فصل مشترکی هر یک از اتصالات DP600/DP600، LCS/LCS و DP600/LCS به ترتیب 10/5، 11/5 و 10/5 کیلوآمپر است.

کمترین اندازه دکمه جوش لازم برای اطمینان از رسیدن به حالت شکست محیطی و بیش‌ترین اندازه دکمه جوشی که در حالت فصل مشترکی دچار شکست شده است، برای این سه اتصال در جدول 3 آورده شده است. قطر دکمه بحرانی بین این دو مقدار قرار دارد. اندازه دکمه جوش بحرانی برای هر اتصال در شکل 5 آورده شده است. همان گونه که مشخص است، اندازه دکمه جوش بحرانی

<sup>1</sup> -Stiffness

شکست یک جوش نقطه‌ای به صورت مساحت زیر نمودار بار-جابه‌جایی تا نقطه بیشینه محاسبه می‌شود [7]:

(4)

$$\text{Energy Absorption} = \int_0^{l_{\max}} F dl \propto P_{\max} \times L_{\max}$$

در رابطه بالا  $P_{\max}$  نیروی بیشینه و  $L_{\max}$  جابه‌جایی بیشینه، متناظر با نیروی بیشینه است.  $L_{\max}$  بیانگر شکل پذیری جوش است که تابع شکل پذیری محل شکست است. بنابراین، مقدار انرژی جذب شده حین شکست تابع فاکتورهای کنترل کننده استحکام شکست و شکل پذیری محل شکست است.

در اندازه دکمه جوش‌های بدست آمده در این شرایط جوشکاری، هر سه اتصال در حالت محیطی دچار شکست شدند. همان گونه که در شکل 9 مشاهده می‌شود، استحکام جوش‌های DP600/DP600 بیشتر از استحکام جوش‌های LCS/LCS است. این امر به دلیل استحکام بالاتر فلز پایه DP600 نسبت به فلز پایه فولاد کم کربن است. استحکام DP600/DP600 و DP600/LCS تقریباً نزدیک به هم هستند. دلیل این امر این است که شکست محیطی اتصال DP600/LCS از فولاد DP600 شروع می‌شود و بنابراین، استحکام اتصال DP600/LCS به وسیله استحکام فلز پایه DP600 کنترل می‌شود.

با وجود استحکام تقریباً مشابه اتصالات DP600/DP600 و DP600/LCS، انرژی شکست اتصال نامشابه DP600/LCS بیشتر است (شکل 10). دلیل این امر را می‌توان به شکل پذیری بالاتر فولاد LCS نسبت فولاد DP600 دانست. این امر به افزایش تغییر شکل پلاستیک حین فرایند شکست محیطی دو سوپه اتصال DP600/LCS کمک کرده و انرژی شکست اتصال افزایش می‌یابد. انرژی شکست بالای جوش‌های LCS/LCS ناشی از شکل پذیری بالای LCS نسبت به DP600 می‌باشد.

نتیجه گیری

3) بنابراین تمایل به شکست در حالت محیطی متناسب است با نسبت سختی FZ به میانگین سختی فلزهای پایه، یعنی

$$D_{Cr} \propto \frac{H_{FZ}}{0.5(H_{BM1} + H_{BM2})} \quad (3)$$

بنابر تحلیل بالا، مهم‌ترین فاکتور متالورژیکی کنترل کننده حالت شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای حین آزمایش کشش- برش، نسبت سختی دکمه جوش به میانگین سختی دو فلز پایه است. بنابراین، برای تحلیل انتقال حالت شکست از حالت فصل مشترکی به حالت محیطی در اتصالات مشابه و نامشابه لازم است نیمرخ سختی اتصال بررسی و مقایسه شود. مقادیر نسبت سختی برای سه نوع اتصال در جدول 3 داده شده است. براساس این جدول، اندازه دکمه بحرانی بالای اتصال DP600/DP600 را می‌توان به نسبت سختی پایین آن مرتبط کرد. همچنین، اندازه دکمه جوش بحرانی پایین اتصال نامشابه DP600/LCS ناشی از سختی بالاتر آن (نسبت به اتصال LCS/LCS) و همچنین سفتی کمتر آن (نسبت به DP600/DP600) است.

### مقایسه ویژگی‌های مکانیکی اتصالات مشابه و نامشابه

برای ارزیابی بیشتر ویژگی‌های مکانیکی اتصال نامشابه، استحکام و انرژی شکست اتصالات مشابه و نامشابه مقایسه شد. برای این کار ویژگی‌های مکانیکی اتصالات در جریان جوشکاری 11/5 کیلوآمپر که هر سه نوع اتصال حالت شکست محیطی داشتند، مقایسه گردید. برای در نظر گرفتن اختلاف در اندازه دکمه جوش در سه نوع اتصال و مقایسه ویژگی‌های مکانیکی این اتصالات، مقادیر استحکام و انرژی شکست با تقسیم کردن بر اندازه دکمه جوش (D) نرماله شدند. شکل‌های 9 و 10 به ترتیب مقایسه استحکام و انرژی شکست اتصالات مشابه و نامشابه DP600 و LCS را نشان می‌دهند.

استحکام یک جوش نقطه‌ای به فاکتورهای گوناگونی از جمله مشخصه‌های هندسی دکمه جوش (اندازه دکمه جوش، عمق فرورفتگی الکتروود در ورق و ...)، حالت شکست و استحکام محل شکست بستگی دارد. انرژی

4- اتصال DP600/DP600 بیش‌ترین تمایل به شکست فصل مشترکی و اتصال DP600/LCS کمترین تمایل به شکست فصل مشترکی را از خود نشان دادند. اندازه دکمه بحرانی بالای اتصال DP600/DP600 را می‌توان به نسبت سختی پایین آن مرتبط کرد. هم‌چنین، اندازه دکمه جوش بحرانی پایین اتصال نامشابه DP600/LCS ناشی از سختی FZ بالاتر آن (نسبت به اتصال LCS/LCS) و هم‌چنین، سفتی کمتر آن (نسبت به DP600/DP600) است.

5- با وجود استحکام تقریباً مشابه اتصالات DP600/DP600 و DP600/LCS، انرژی شکست اتصال نامشابه DP600/LCS بیش‌تر است. دلیل این امر را می‌توان به شکل پذیری بالاتر فولاد LCS نسبت به فولاد DP600 دانست. این امر به افزایش تغییر شکل پلاستیک حین فرایند شکست محیطی دو سویه اتصال DP600/LCS کمک کرده و انرژی شکست اتصال افزایش می‌یابد. انرژی شکست بالای جوش‌های LCS/LCS ناشی از شکل پذیری بالای LCS نسبت به DP600 می‌باشد.

### References

- 1- A. Bag, K. Ray K, Dwarakadasa E.S., "Influence of martensite content and morphology on the toughness and fatigue behavior of high-martensite dual-phase steels", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol.32, pp. 2207-2217, 2001.
- 2- M. D.Tumuluru, "Resistance spot welding of coated high-strength dual phase steels", *Weld J.*, Vol. 87, pp.31-37, 2007
- 3- H. Zhang, J. Senkara, *Resistance welding: fundamentals and applications*, Taylor & Francis CRC press, 2005.
- 4- 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.
- 5- Y. J. Chao, "Failure Mode of Resistance Spot Welds: Interfacial Versus Pullout", *Sci. Technol. Weld. Joining*, Vol. 8, pp. 133-137, 2003.
- 6- M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadeh, P. H. Marashi and M. Goodarzi, "Effect of Weld Nugget Size on Overload

1- ریزساختار و سختی FZ اتصال ناهمجنس جوش مقاومتی نقطه‌ای DP600/LCS تابع امتزاج شدن دو فلز پایه در هم و سرعت سرد شدن بالای این فرآیند می‌باشد. ریزساختار FZ شامل مارتنزیت، مقداری فریت آلوتریمورفیک، فریت ویدمن اشتاتن و بینیت است. مقدار بیشینه سختی در HAZ سمت فولاد DP600 بیش‌تر از سختی FZ است زیرا سختی‌پذیری FZ به علت امتزاج شدن دو فلز پایه و کاهش درصد کربن و منگنز آن نسبت به قسمت درشت دانه HAZ سمت DP600 کاهش می‌یابد.

2- بر خلاف انتظار اولیه، محل شکست در حالت محیطی از منطقه نرم‌تر (یعنی طرف فولاد کم کربن) نبود و شکست از سمت DP600 رخ داد. این امر را می‌توان به اختلاف رفتار کارسختی دو فلز پایه و تمرکز تنش ناشی از پیک سختی در HAZ سمت DP600 نسبت داد.

3- یک اندازه دکمه جوش بحرانی برای رسیدن به حالت شکست محیطی وجود دارد. این اندازه دکمه بحرانی تابع ویژگی‌های نیمرخ سختی (نسبت سختی FZ به میانگین سختی فلزهای پایه) است.

- Failure Mode of Resistance Spot Welds", *Sci. Technol. Weld. Joining*, Vol. 12, pp. 217-225, 2007.
- 7- M. Pouranvari, 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.
- 8- X. Sun, E.V. Stephens, 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.
- 9- M. Marya, K. Wang, L. G. Hector, X. Gayden, Tensile-Shear Forces and Fracture Modes in Single and Multiple Weld Specimens in Dual-Phase Steels, *J. Manufact. Sci. Eng.*, Vol.128, pp. 287-298, 2006.
- 10- M. Alenius, P. Pohjanne, Somervuori M., Hanninen H., " Exploring the Mechanical Properties of Spot Welded Dissimilar Joints for Stainless and Galvanized Steels", *Weld. J.*, Vol.85, pp.305s-313s, 2006.
- 11- P. Marashi, M. Pouranvari, S.



- Amirabdollahian, A. Abedi, M. Goodarzi, "Microstructure and Failure Behavior of Dissimilar Resistance Spot Welds between Low Carbon Galvanized & Austenitic advanced high strength steel DP600, Super High Strength Steels. Proc. 1st International Conference, Rome, pp.1-13, 2005.
- 13- S. Daneshpour, S. Riekehr, M. Kocak and C. H. J. Gerritsen, Mechanical and fatigue behaviour of laser and resistance spot welds in advanced high strength steels, Sci. Technol. Weld. Joining, 14, 20-25, 2009.
- 14- M.S. Khan, S.D. Bhole, D.L. Chen, E. Biro, G. Boudreau, J. van Deventer, "Welding behaviour, microstructure and mechanical properties of dissimilar resistance spot welds between galvanized HSLA350 and DP600 steels", Sci. Technol. Weld. Joining, Vol.14, pp.616-625, 2009.
- 15- V. H. B. Hernandez, M. L. Kuntz, M. I. Khan, Y. Zhou, "Influence of weld size and microstructure of dissimilar AHSS resistance spot welds", Sci. Technol. Weld. Joining, Vol.13, pp.769-776, 2008.
- Stainless Steels", Mater. Sci Eng. A, Vol.480, pp.175-180, 2008.
- 12- S. Poggio, M. Ponte, C. Gambaro, J. Adamowski, Resistance spot welding of 16-Mn steel, 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, pp.197s-204s, 2005.
- 17- 'Recommended practices for test methods and evaluation the resistance spot welding behavior of automotive sheet steels', ANSI/AWS/SAE D8.9-97, 1997.
- 18- 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.
- 19- M. Milititsky, E. Pakalnins, C. H. Jiang A. Thompson, "On characteristics of DP600 resistance spot welds", SAE Report 2003-01-0520, Warrendale, PA, USA, 2003.
- 20- <http://homepage3.nifty.com/yurioka/> exp. Html

پیوست‌ها

جدول 1- ترکیب شیمیایی ورق فولاد دوفازی DP600 و فولاد کم کربن LCS (درصد وزنی)

	C	Mn	Si	S	P	Fe
DP600	0.135	1.28	0.388	0.004	0.038	Base
LCS	0.065	0.204	0.095	0.017	0.018	Base

جدول 2- ویژگی‌های مکانیکی ورق فولاد دوفازی DP600 و فولاد کم کربن LCS\*

	YS (MPa)	UTS (MPa)	n	EL(%)	Hardness (HV <sub>0.1</sub> )
DP600	345	615	0.18	22	200
LCS	185	330	0.24	43	123

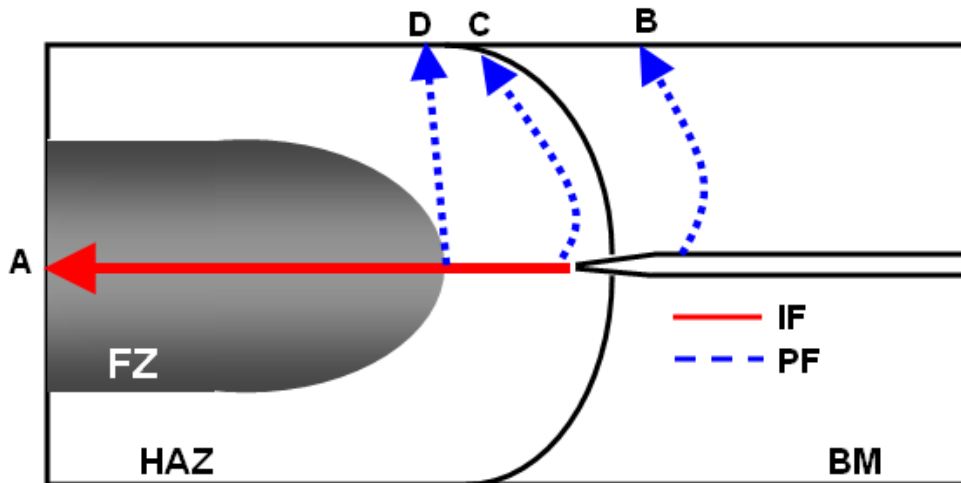
\*YS: استحکام تسلیم، UTS: استحکام کششی نهایی، n: ضریب کارسختی، EL: درصد ازدیاد طول در لحظه‌ی شکست

جدول 3- برنامه جوشکاری

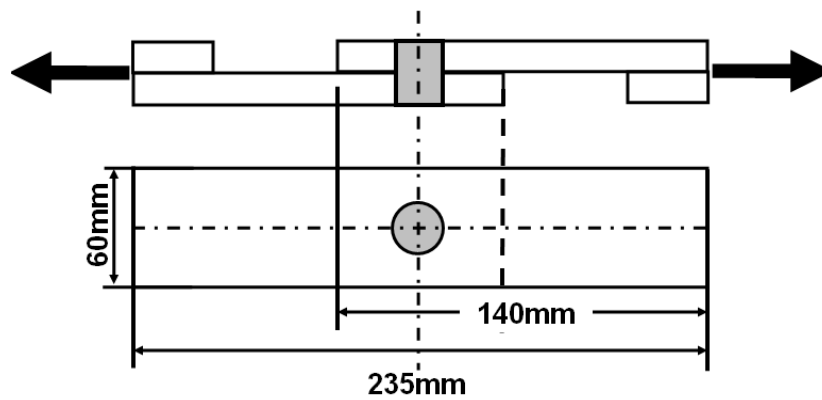
Welding Current (kA)	7.5-11.5
Welding Time (s)	0.5
Electrode Force (kN)	5.1
Holding Time (s)	0.2

جدول 4- مشخصه‌های سختی و حالت شکست اتصالات مشابه و نامشابه

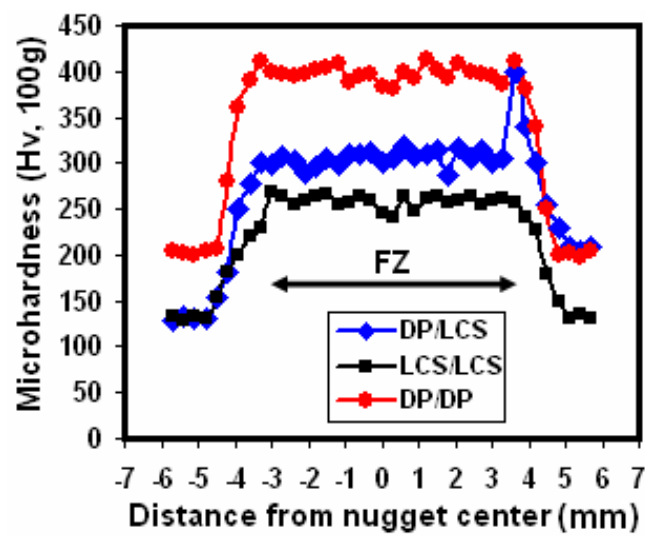
Materials combinations	FZ C <sub>eq</sub>	FZ hardness (HV <sub>0.1</sub> )	H <sub>FZ</sub> /0.5(H <sub>BM1</sub> +H <sub>BM2</sub> )	Failure Mode	
				IF	PF
LCS/LCS	0.085	242	1.98	D≤7.3mm	D≥7.9mm
DP/DP	0.323	382	1.91	D≤8.4mm	D≥9.1mm
DP/LCS	0.187	313	2.34	D≤6.65mm	D≥7.2mm



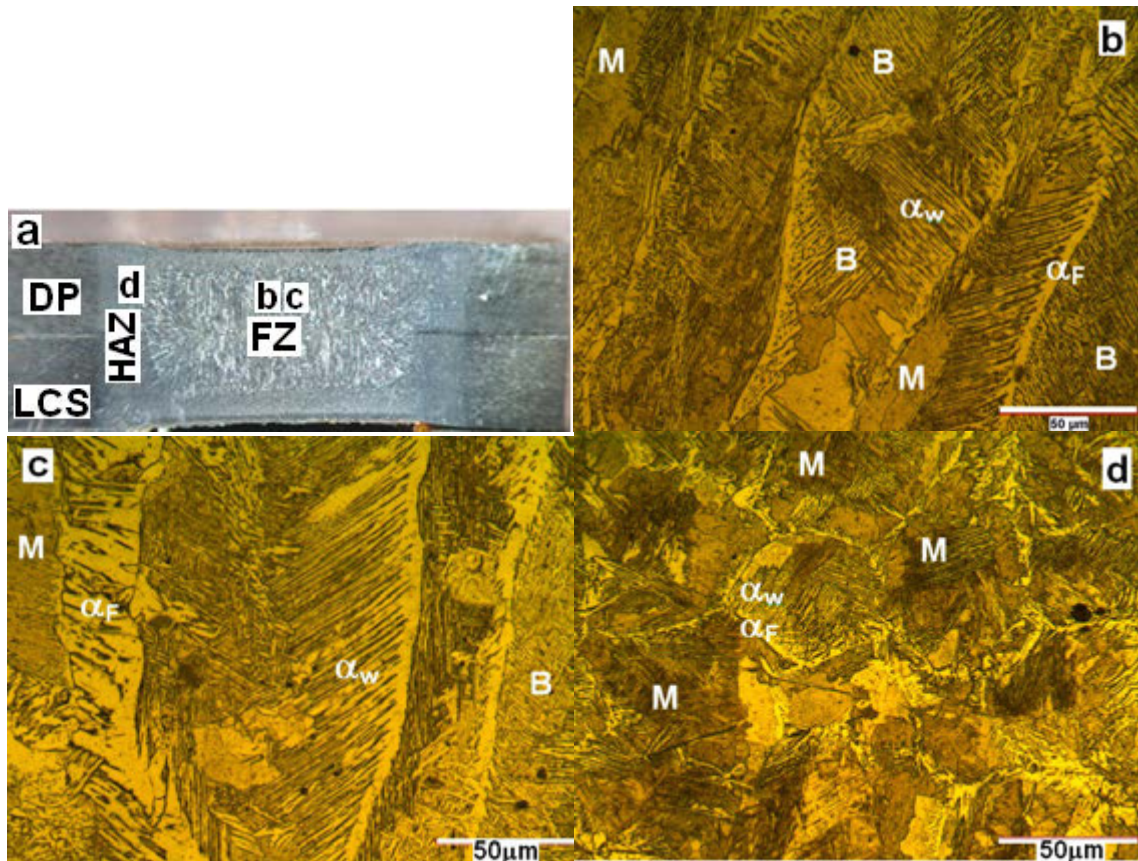
شکل 1- شماتیک مسیر شکست های گوناگون در آزمون مکانیکی جوش های مقاومتی نقطه ای



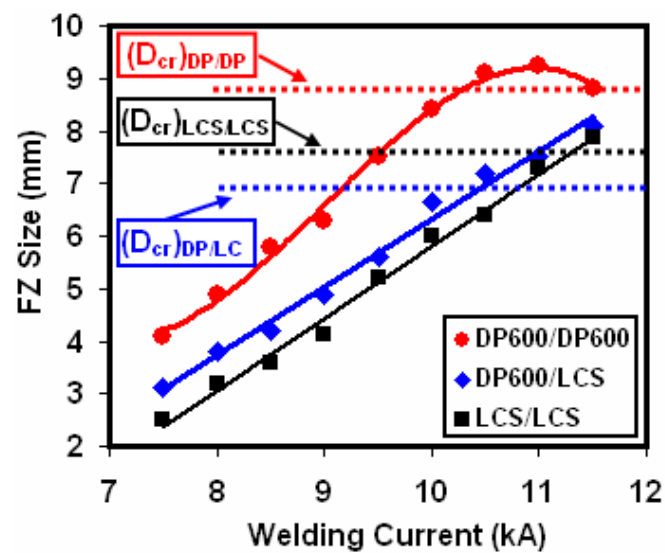
شکل 2- ابعاد آزمایش کشش-برش



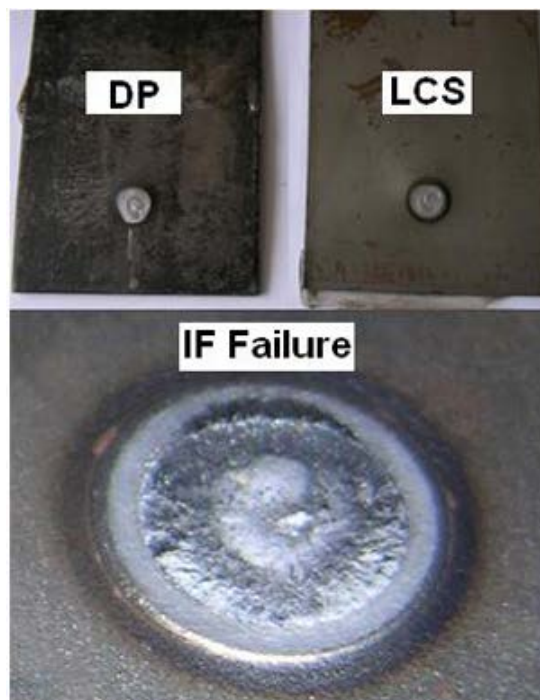
شکل 3- نیمرخ سختی اتصالات مشابه و نامشابه ( جریان جوشکاری در تمام حالات 10 کیلوآمپر است)



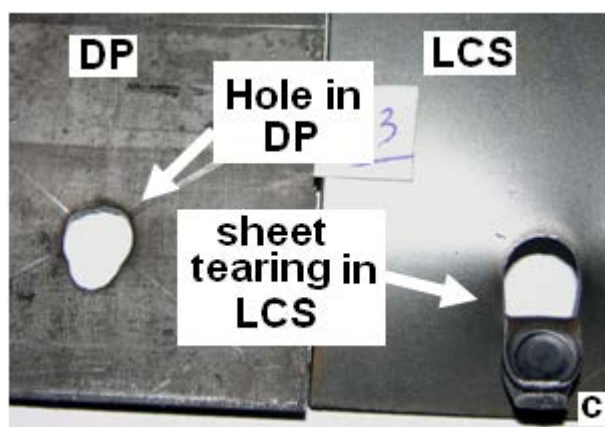
شکل 4- گرادیان ریزساختاری در جوش مقاومتی نقطه‌ای DP600/LCS (جریان جوشکاری 11 کیلوآمپر).



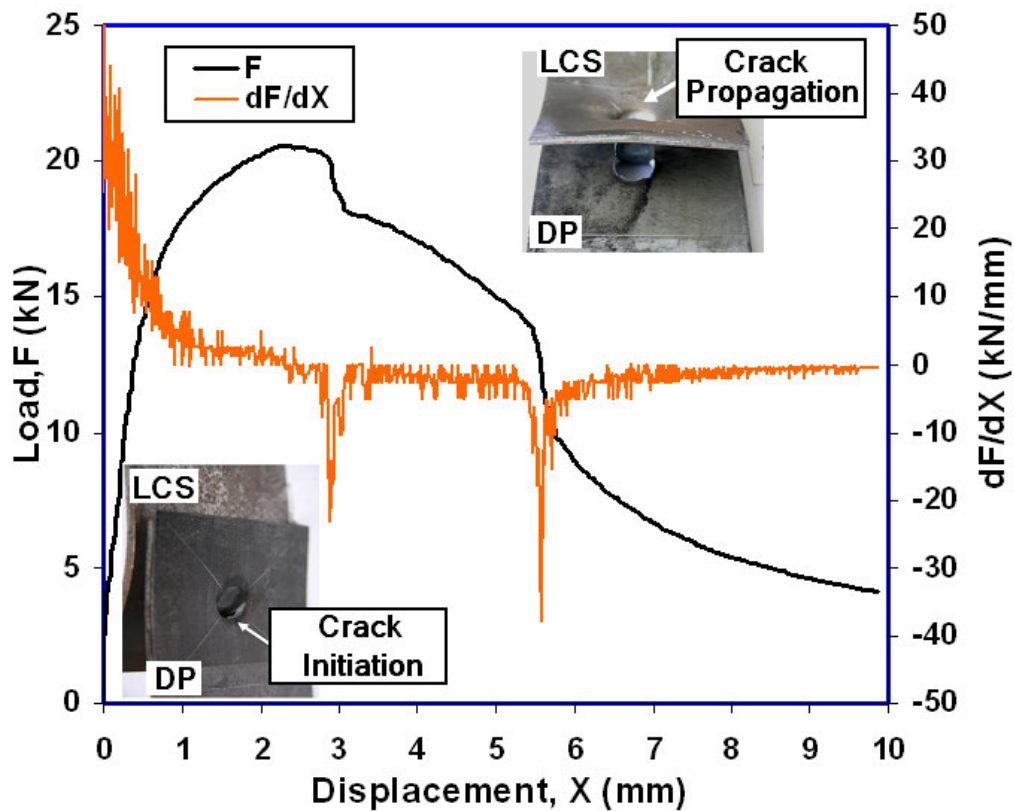
شکل 5- تاثیر جریان جوشکاری بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش و حالت شکست جوش‌های مشابه و نامشابه



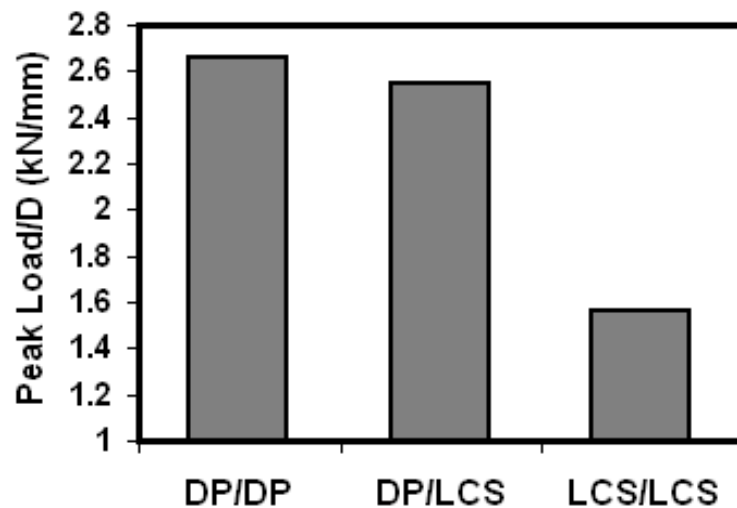
شکل 6- حالت شکست فصل مشترکی ( جریان جوشکاری 8/5 کیلوآمپر است )



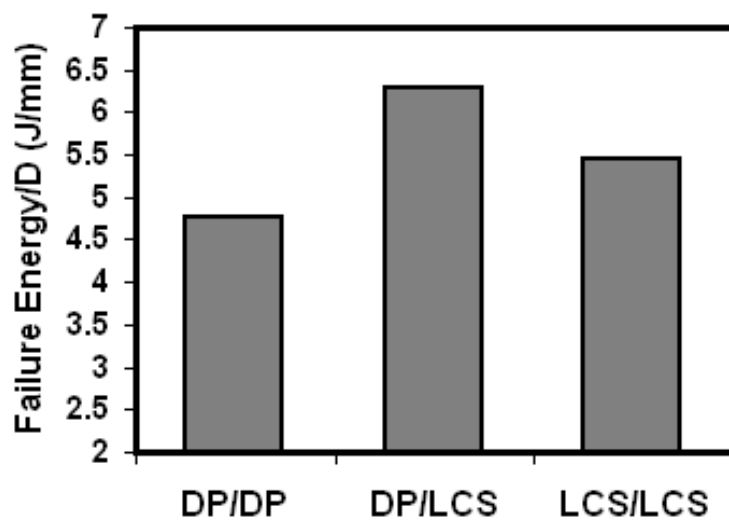
شکل 7- حالت شکست محیطی ( جریان جوشکاری 11 کیلوآمپر است )



شکل 8- منحنی نیرو-جابجایی یک اتصال نامشابه DP600/LCS شکسته شده در حالت محیطی به همراه منحنی سفتی  $(dF/dX)$  - جریان جوشکاری در تمام حالات 10 کیلوآمپر است.



شکل 9- مقایسه استحکام جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای اتصالات مشابه و نامشابه



شکل 10- مقایسه انرژی شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای اتصالات مشابه و نامشابه