

مروری بر چالش های فولادهای پیشرفته خودرویی در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای

روح اله عشیری^{1*}، مرتضی شمعانیان²، حمیدرضا سلیمی جزی²، یئونگ-دو پارک³، محمدرضا سلمانی⁴

1- مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

2- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

3- گروه مهندسی پیشرفته مواد، دانشگاه دونگ-اوی، بوسان، جمهوری کره

4- گروه خودروسازی سایپا

(دریافت مقاله: 1398/08/10؛ پذیرش مقاله: 1399/06/15)

چکیده

در حال حاضر، بکارگیری فولادهای پیشرفته خودرویی در بدنه خودرو به عنوان یک استراتژی داغ و کاربردی در بسیاری از خودروسازهای بزرگ دنیا دنبال می شود. مطالعه جوش پذیری و چالش های جوشکاری این فولادها در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای به عنوان فرآیند عمده اتصال در صنعت خودرو لازمه استفاده از قابلیت های برجسته مکانیکی این فولادها در بدنه خودرو است. این مطالعه می تواند نقش بسزایی در بهبود عملکرد مکانیکی جوش های مقاومتی نقطه ای از فولادهای پیشرفته خودرویی داشته باشد. بررسی ها نشان می دهد که این فولادها حین فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای با چالش های متعدد و متفاوتی مواجه اند که این مقاله سعی دارد این چالش ها و مکانیزم و علل رخداد آنها و راهکارهای احتمالی جلوگیری یا مهار آنها را مورد بحث و بررسی قرار دهد.

کلمات کلیدی: فولادهای پیشرفته خودرویی، جوشکاری مقاومتی نقطه ای، جوش پذیری، حساسیت به عیوب و ناپیوستگی ها، جدایش.

Welding challenges facing advanced automotive steels in resistance spot welding process: A review

R. Ashiri^{1*}, M. Shamanian², H. R. Salimijazi², Y. Park³,

M. R. Salmani⁴

1- Materials and Energy Research Center, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

2- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3- Department of Engineering of Advanced Materials, DongEui University, Busan, Republic of Korea

4- AutoSteel Division, SAIPA Group, Tehran, Iran

(Received 1 November 2019 ; Accepted 5 September 2020)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: ro_ashiri@yahoo.com

Abstract

Nowadays, the use of advanced high strength steels (AHSSs) in body-in-white is one of the hot applied strategies which is followed by the most of the automakers. The study of weldability and weld challenges facing these steels in resistance spot welding process as the most widely used process in the assembly lines of the automotive industry is essential to use the outstanding mechanical responses of AHSSs. This study can result in improvement of mechanical performance of the resistance spot welds of AHSSs. Our results indicate that AHSSs experiences different welding challenges which this work aims to study them by discussing their causes, mechanisms involved and potential ways to address them.

Keywords: Advanced automotive steels; Resistance spot welding; Weldability; Susceptibility to welding defects and discontinuities; Segregation.

1- مقدمه

قابلیت تحمل نیروهای استاتیکی و دینامیکی خصوصاً در تصادفات احتمالی یکی از ملاحظات کلیدی در طراحی سازه‌ی خودرو و وسایل نقلیه است [2و1]. در این طراحی دو عامل کلیدی انتخاب ماده و طراحی هندسه خودرو نقش ایفا می‌کنند. قابلیت کارسختی بالای فولادهای استحکام بالای پیشرفته علاوه بر بهبود عملکرد مکانیکی فولادها، قابلیت شکل پذیری آن‌ها را افزایش داده است. این مزیت ساخت قطعات با اشکال پیچیده و طراحی‌های ارتقاء یافته را با فرایندهای شکل دهی امکان پذیر می‌کنند. این فولادها هم اکنون در حال بکارگیری در صنعت خودرو می‌باشند تا کارایی و ایمنی خودروها را ارتقاء دهند. از طرف دیگر کاهش مصرف سوخت خودرو و افزایش ایمنی سرنشینان از چالش‌های اساسی صنعت خودرو می‌باشد. با توجه به اینکه استفاده از فولادهای استحکام بالای پیشرفته می‌تواند پاسخی به این چالش‌ها باشد، بکارگیری این فولادها در صنعت خودرو، به عنوان یک استراتژی کاربردی در بسیاری از خودروسازهای بزرگ دنیا دنبال می‌شود [3و4]. استفاده از این فولادها با کاهش وزن خودرو، سبب کاهش مصرف سوخت خودرو شده و از طرف دیگر به جهت استحکام و چقرمگی بالا سبب افزایش قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف می‌شود. فولادسازها در پاسخ به این نیازهای صنعت خودرو گروهی از فولادها تحت عنوان فولادهای پیشرفته خودرویی را توسعه داده اند که از مهمترین آن‌ها می‌توان به فولادهای دوفازی، چند فازی (فولادها با ساختار فازی پیچیده)، فریتی - بینیتی، مارتنزیتی، تغییر فرم داغ شده و فولادهای با

تغییر فرم پلاستیک ناشی از استحاله فازی یا دوقلوئی شدن اشاره نمود [3-1].

فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای متداول‌ترین فرایند اتصال ورق‌های فلزی و فرایند اتصال حیاتی برای تولید خودرو است. با وجود تکنولوژی‌های جوش نقطه‌ای پیشرفته‌ای نظیر فرایندهای جوش نقطه‌ای قوس تنگستنی با گاز محافظ، لیزری و اصطکاکی هم‌زنی هنوز نیز جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای معمولی فرایند اصلی برای اتصال ورق‌های فلزی به‌خصوص در صنایع خودروسازی است. روندی که به نظر می‌رسد در آینده قابل تصور هم ادامه پیدا کند. در یک خودروی مدرن امروزی معمولاً از حدود 2000-5000 جوش نقطه‌ای استفاده می‌شود. این موضوع اهمیت فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در صنعت خودرو را به وضوح نشان می‌دهد. همچنین طی تصادف احتمالی، بار (نیروی ضربه ای ناشی از برخورد) از طریق گروه‌هایی از جوش نقطه‌ای بین قطعات متصل شده منتقل می‌شود. علاوه بر این، جوش‌های نقطه‌ای می‌توانند به صورت محل‌های شروع تاخوردگی عمل کنند و از این طریق انرژی تصادف را جذب نمایند. ایمنی خودرو در برابر تصادف تا حد زیادی به یکپارچگی و عملکرد مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای بستگی دارد. همچنین شکست جوش نقطه‌ای به عنوان یکی از انواع اصلی شکست در هنگام وقوع تصادف شناسایی شده است. به طور کلی شکست جوش‌های نقطه‌ای می‌تواند بر استحکام، سر و صدا، ارتعاش و راحتی خودرو اثرگذار باشد. بنابراین کیفیت، عملکرد و خصوصیات شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای برای طراحی دوام و ایمنی خودروها کاملاً مهم

نقطه‌ای پردازد. همانطور که در ادامه نشان داده خواهد شد مواردی نظیر شیمی غنی آلیاژ، کربن معادل بالا، فرآیند ترمومکانیکال پیچیده و خواص ترموفیزیکی ویژه آلیاژ عوامل اصلی زمینه ساز این چالش‌ها می‌باشند که ضرورت بازطراحی آلیاژ بر مبنای پاسخ آن به فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای یا بکارگیری فرآیندهای جوشکاری مقاومتی نقطه ای اصلاح شده یا چندپالسه برای استفاده از قابلیت های برجسته مکانیکی این فولادها در بدنه خودرو را نشان می دهد.

2- روش پژوهش

در این پژوهش از فولادهای پیشرفته خودروی نظیر فولادهای DP، TRIP، CP، SABC، TWIP استفاده شد. همچنین جهت برخی مقایسه ها از فولادهای عاری از عناصر بین نشین و فولاد استحکام بالای کم آلیاژ استفاده گردید.

کلیه آلیاژها به صورت ورق هایی مورد استفاده قرار گرفتند که جهت بهبود مقاومت به خوردگی با پوشش های پایه روی پوشش داده شده بودند. جوشکاری نمونه ها توسط ربات جوشکاری مقاومتی نقطه ای با جریان جوشکاری مستقیم انجام شد. از ربات جوشکاری مشابه ربات هایی که در خط تولید شرکت خودروسازی هوندایی (شکل 1)) بکار گرفته می شود، جهت جوشکاری ورق ها استفاده گردید.

این ربات قابلیت ثبت همزمان منحنی های جریان جوشکاری، مقاومت دینامیکی و حرارت تولیدی را حین فرآیند جوشکاری دارا بود که جهت اطمینان از اعمال پارامترهای داده شده و نیز جهت اطمینان از پدیده بیرون زدگی مذاب می توان این منحنی ها را بررسی نمود. البته پدیده بیرون زدگی مذاب حین جوشکاری از مشاهده سطح شکست نمونه های آزمون کشش جوش قابل تشخیص است ولی نوع خفیف آن بوسیله منحنی مقاومت دینامیکی قابل تشخیص می باشد.

از برنامه جوشکاری مطابق استاندارد ISO 18278-2: 2004(E) برای جوشکاری نمونه ها استفاده گردید. شکل (2) به صورت طرح واره ای و جدول (1) مشخصات سیکل جوشکاری استفاده شده در این پژوهش را نشان می دهد.

هستند و از این منظر کنترل کیفیت این جوش ها دارای اهمیت فراوان است.

فولادهای پیشرفته خودروی کاندیداهای مناسب برای استفاده در اجزاء ساختاری بدنه خودرو می باشد که در دهه اخیر به دلیل خواص مکانیکی جذاب و عالی آن موضوع پژوهش های بسیاری بوده اند. نکته مشترک در این تلاش ها این بوده است که توجه بیش از حد از نقطه نظرهای خواص مکانیکی و نقش عناصر آلیاژی به این فولادها سبب غفلت از یک نکته بسیار کلیدی، جوش پذیری، برای این فولادها شده است [1-2، 5-6].

این فولادها در مقایسه با فولادهای سنتی [7] با چالش های بیشتری حین جوشکاری مواجه اند. برای بکارگیری یک فولاد در صنعت خودرو می بایست جوش پذیری آن فولاد مورد بررسی قرار گیرد تا از وجود جوش پذیری کافی آن اطمینان حاصل شود. نیازهای اساسی صنعت خودرو برای جوش های حاصل از فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای عبارتند از اندازه دکمه جوش به اندازه کافی بزرگ (با عملکرد مکانیکی مطلوب تضمین کننده مود کندگی دکمه جوش)، محدوده جریان جوشکاری قابل پذیرش به اندازه کافی گسترده (حداقل 2kA) و بدست آوردن جوش های عاری از ترک و دیگر عیوب محتمل جوش [1-2].

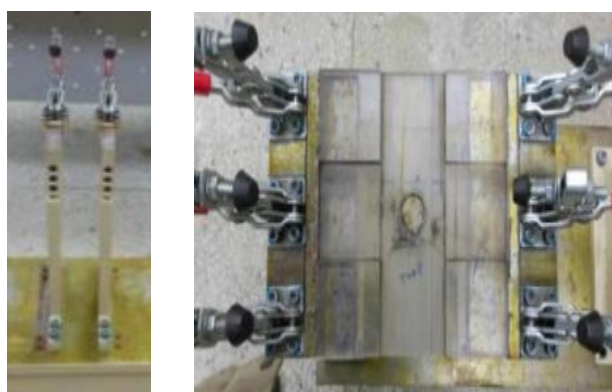
نتایج بررسی های تجربی نشان داده است که عوامل متعددی جوش پذیری و محدوده مجاز پارامترهای جوشکاری در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای فولادهای پیشرفته خودروی را متاثر می کنند که این امر کاربرد این فولادها را در صنعت خودرو با چالش های جدی مواجه می کند. پدیده هایی نظیر تردی/ترکیدگی ناشی از روی مذاب، ترک های ذوبی، حساسیت به شکست فصل مشترکی، جدایش و افت انعطاف پذیری، پدیده بیرون زدگی زودرس و تشکیل عیوب و ناپیوستگی های جوشکاری عواملی هستند که محدوده منحنی جوش پذیری فولاد را محدود می کنند [1-9].

این مقاله سعی دارد به پدیده شناسی این چالش ها برای فولادهای پیشرفته خودروی در فرآیند جوشکاری مقاومتی

توسط یک دستگاه کشش KSTM مدل KSU 10M با قابلیت اعمال بار 100 کیلونیوتن، انجام شد. نرخ کرنش برای انجام آزمون میلی متر بر دقیقه انتخاب شد. از آزمون های کشش-برش و کشش متقاطع جهت ارزیابی عملکرد مکانیکی جوش ها مطابق با مرجع [3]، استفاده گردید. جهت شبیه سازی حرارتی و تنش حین سیکل حرارتی جوشکاری از نرم افزار المان محدود SORPAS استفاده شد.

3- نتایج و بحث

در یک حادثه تصادف، نیروی اعمالی به جوش ها حاوی مولفه های کششی و برشی است. از این رو برای اطمینان از عملکرد مکانیکی مطلوب جوش های اعمالی در بدنه خودرو لازم است که جوش ها همزمان تحت آزمون های کشش-برش و کشش متقاطع قرار گیرند، زیرا نیروی اعمالی در اولی عمدتاً برشی و در دیگری عمدتاً کششی است. البته همانطور که در این مقاله نشان داده خواهد شد، فولادهای پیشرفته خودرویی به عیوب و ناپیوستگی های جوشکاری حساسند و با توجه به این مهم، برای اطمینان کامل از عملکرد مکانیکی جوش های مقاومتی نقطه ای فولادهای پیشرفته خودرویی توصیه می شود علاوه بر تست های مکانیکی استاتیکی آن ها را تحت بررسی های آزمون مکانیکی دینامیکی نیز قرارداد. شکل (3) نتایج عملکرد مکانیکی استاتیکی جوش های مقاومتی نقطه ای فولاد TRIP را در آزمون کشش-برش و کشش متقاطع نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش جریان جوشکاری و در نتیجه حرارت ورودی اندازه دکه جوش افزایش می یابد که این امر حدکثر بار قابل تحمل جوش ها را در آزمون های عملکرد مکانیکی جوش ها افزایش می دهد. ولی این روند برای نسبت CTS به TSS که به نسبت انعطاف پذیری معروف است روندی همواره افزایشی نیست و یک جریان جوشکاری بحرانی و به تبع آن یک دکه جوش بحرانی وجود دارد که بعد از آن نسبت انعطاف پذیری کاهش می یابد.



شکل 1- ربات جوش مقاومتی نقطه ای استفاده شده در این پژوهش و نگاه دارنده های نمونه برای جوشکاری نمونه استاندارد ارزیابی خواص مکانیکی.



شکل 2- شماتیک یک سیکل جوشکاری مقاومتی نقطه ای.

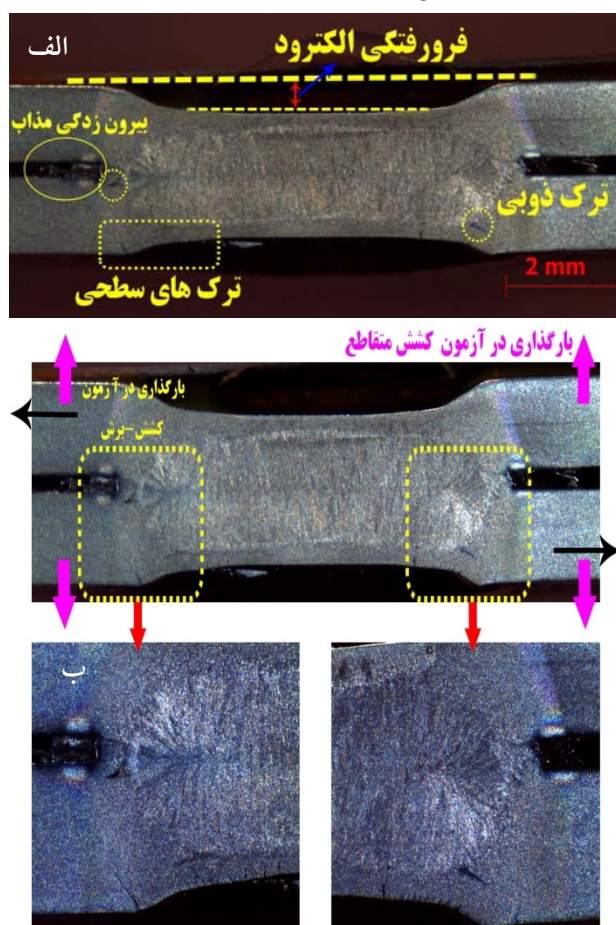
در این پژوهش، شدت جریان جوشکاری به عنوان متغیر اصلی تحقیق حاضر انتخاب گردید. در این پژوهش برای جوش دادن نمونه ها از الکترود از جنس آلیاژ مس-کروم-زیرکونیم با شکل گنبدی ناقص استفاده شد. ارزیابی عملکرد مکانیکی جوش ها

جدول 1- مشخصات سیکل جوشکاری استفاده شده در این پژوهش

سیکل جوشکاری	انجام جوشکاری با	نیروی الکترود	زمان فشردگی الکترود قبل از اعمال جریان	زمان جوشکاری	زمان نگهداری جوشکاری	جریان جوشکاری
۱*	ربات جوشکاری	۴ کیلونیوتن	۶۵ سیکل	۱۶ سیکل	۱۶ سیکل	وابسته به فولاد مورد پژوهش

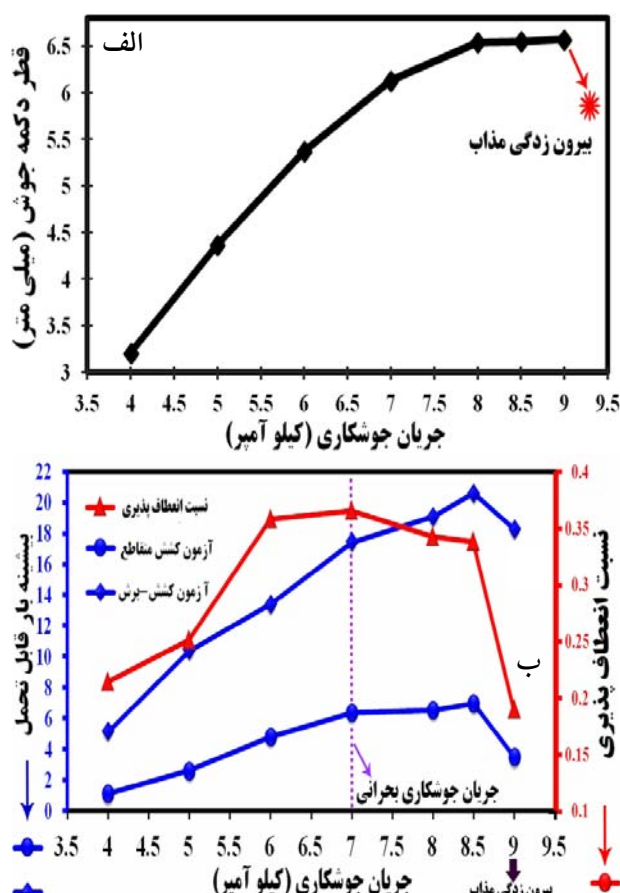
براساس استاندارد (ISO 18278-2: 2004(E))

این واقعیت به معنای کاهش محدوده جریان قابل پذیرش جوشکاری است، زیرا که برخی از این عیوب در بارگذاری دینامیکی فعال می‌شوند و می‌توانند به شکست ناشی از خستگی جوش منتهی شوند. به بیان دیگر، این جوش ها مرحله یک خستگی یعنی جوانه زنی ترک را گذرانده اند. این امر شاید بر این نکته دلالت کند که در جوش های مقاومتی نقطه ای فولادهای پیشرفته خودرویی برخلاف فولادهای خودرویی سستی نباید خیلی هم به حد بالای لوب جوش پذیری نزدیک شد [1-2 و 5-7]، زیرا در بدنه خودرو جوش ها حین سرویس تحت بارگذاری دینامیکی قرار می گیرند. همانطور که از شکل (4) مشخص است با توجه با طرز قرارگرفتن برخی عیوب، حداکثر بار قابل تحمل در آزمون کشش-برش را متاثر می‌کند و برخی دیگر حداکثر بار قابل تحمل در آزمون کشش متقاطع را تحت تاثیر قرار می دهند.



شکل 4-الف) ماکروساختار یک دکمه جوش از فولاد TRIP به همراه ع و ناپیوستگی های آن و ب) نحوه بارگذاری های کششی-برشی و کشش-متقاطع به یک جوش حاوی عیوب و ناپیوستگی های جوش.

نشان داده شده است [5] که این جریان بحرانی، جریان جوشکاری است که در بالاتر از آن عیوب جوشکاری رخ می‌دهند. از این رو، منطقه بین جریان جوشکاری بحرانی تا جریان جوشکاری منجر به پدیده بیرون زدگی را می‌توان منطقه حساسیت به عیوب جوش نامید. نتایج بررسی های در قالب این پژوهش نشان داد که فولادهای پیشرفته خودرویی با ترکیب شیمیایی غنی تر از عناصر آلیاژی و با فرآیند ترمومکانیکال پیچیده تر (که منجر به ذخیره انرژی بیشتر در آلیاژ می‌شود) دارای محدوده حساسیت به عیوب جوش وسیعتری هستند. با توجه به شکل (3-ب) می‌توان گفت که هرچند که پدیده بیرون زدگی مذاب (که حد بالای لوب جوش پذیری را تعیین می‌کند) در جریان جوشکاری 9 کیلو آمپر اتفاق می‌افتد عملاً عیوب جوش نشان داده شده در شکل (4) در جریانهای جوشکاری پایین تری حدود 7 کیلو آمپر تشکیل می‌شوند.



شکل 3- تغییر الف) اندازه دکمه جوش و ب) حداکثر بار قابل تحمل در آزمون کشش-برش (TSS) و حداکثر بار قابل تحمل در آزمون کشش متقاطع (CTS) فولاد TRIP با جریان جوشکاری.

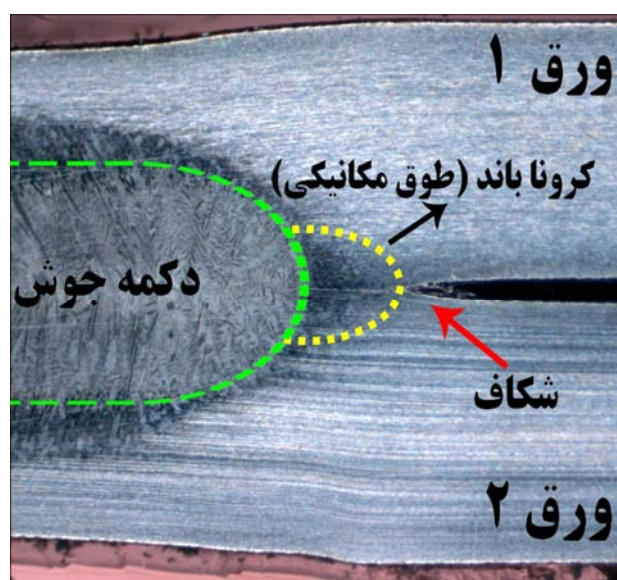
در ادامه به معرفی حساسیت‌ها و چالش‌های فولادهای پیشرفته خودرویی حین فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای پرداخته می‌شود:

1-3- پدیده بیرون زدگی زودرس

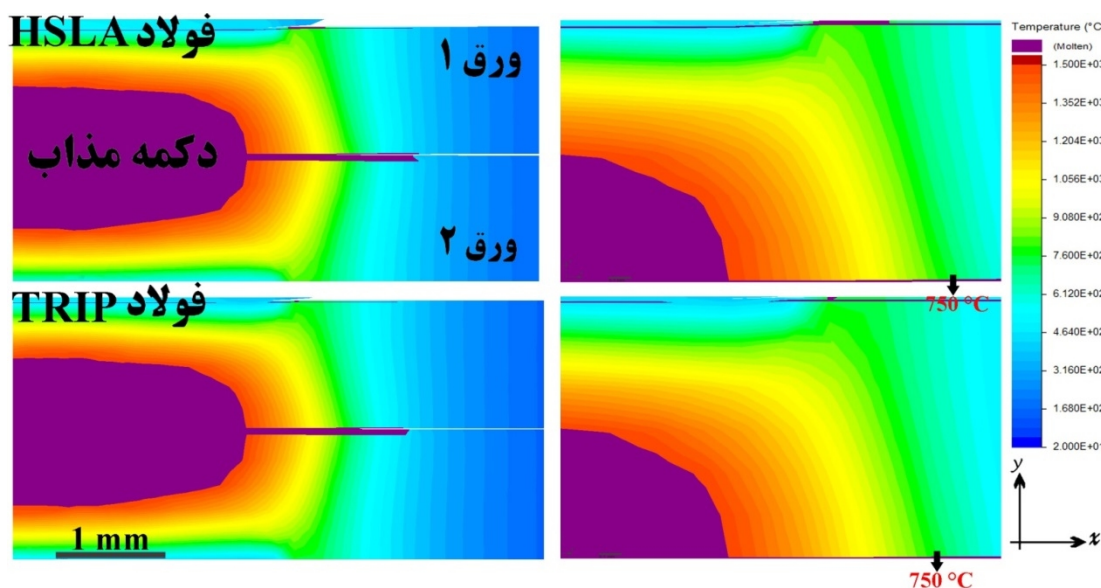
یکی از چالش‌هایی که فولادهای پیشرفته خودرویی عموماً با آن مواجه هستند پدیده بیرون زدگی زودرس یا پیش از موعد است که این امر سبب محدود شدن محدوده مجاز جریان جوشکاری می‌شود. برای محدوده مجاز جریان جوشکاری قراردادهای مختلفی وجود دارد، ولی ضرورت دارد با توجه به حساسیت به شکست فصل مشترکی فولادهای پیشرفته خودرویی تعریفی که خاص این فولادهاست ارائه شود. در هر صورت، با فرض محدوده مجاز جریان جوشکاری بین جریان جوشکاری منجر به اندازه دکمه $4\sqrt{t}$ (که در آن t ضخامت ورق مورد جوشکاری به میلی متر است) تا جریان جوشکاری منجر به پدیده بیرون زدگی به عنوان محدوده مجاز جریان جوشکاری می‌توان گفت که این محدوده برای فولادهای سنتی مانند فولادهای IF و HSLA به ترتیب برابر $4/8$ و $3/7$ کیلو آمپر است [7]. این در حالیست که این محدوده برای برخی فولادهای پیشرفته خودرویی با استحکام نهایی حدود یک گیگاپاسکال نظیر DP، TRIP و TWIP به ترتیب برابر $3/5$ ، 3 و 2 کیلوآمپر است. تفاوت این ارقام درواقع افت جوش پذیری و محدوده مجاز جریان جوشکاری این فولادها ما به ازای افزایش استحکام، غنای ترکیب شیمیایی، فرآیند ترمومکانیکال پیچیده آنهاست. لازم به اشاره است که خودروسازها عموماً از پذیرش فولادی با محدوده مجاز جریان جوشکاری کمتر از 2 کیلوآمپر به دلیل دشواری فرآیند پذیری آن در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای امتناع می‌کنند.

نکته مهمی که نباید مغفول بماند این است که پدیده بیرون‌زدگی زودرس عملاً رسیدن به دکمه جوش به اندازه کافی بزرگ را در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای با مشکل مواجه می‌کند که به تبع آن بخشی از قابلیت‌های مکانیکی جوش‌ها بالفعل نخواهد شد. در تحلیل رخ داد پیش از موعد

پدیده بیرون زدگی می‌توان گفت که وجود یک طوق مکانیکی به اندازه کافی پهن (شکل (5)) و مستحکم می‌تواند پدیده بیرون‌زدگی مذاب را به تاخیر بیندازد. در واقع این باند مکانیکی از عملکرد و تاثیر همزمان فشار الکترودها و نرم‌شدگی نسبی منطقه متأثر از حرارت بواسطه تغییر شکل پلاستیکی این منطقه تشکیل می‌شود و راه خروج دکمه مذاب را حین جوشکاری سد می‌کند. نتایج شبیه‌سازی حرارتی دو فولاد خودرویی TRIP و HSLA در پایان زمان جوشکاری با فرض اندازه دکمه جوش یکسان در شکل (6) آورده شده است. همانطورکه از شکل مشخص است فولاد HSLA دارای طوق مکانیکی بهتری در مقایسه با فولاد پیشرفته خودرویی TRIP است که در به تاخیر انداختن پدیده بیرون زدگی این فولاد موثر است. مواردی نظیر رشد سریع دکمه مذاب و گسیل آرام‌تر حرارت در منطقه متأثر از حرارت در کاهش پهنای این طوق مکانیکی و به دنبال آن بیرون زدگی زودهنگام مذاب در فولادهای پیشرفته خودرویی موثر است. البته نباید از تشکیل منطقه ذوب جزئی و افت خواص مکانیکی منطقه متأثر از حرارت فولادهای پیشرفته خودرویی، که متأثر از پیشرفت سریع‌تر پدیده‌های مرتبط با آنیل به دلیل انرژی بیشتر ذخیره شده در حین فرآیند ترمومکانیکال پیچیده تر آن‌ها و تشکیل عیوب و جدایش، غافل شد [9].



شکل 5- ماکروساختار یک جوش نقطه ای نشان دهنده مکان طوق مکانیکی در منطقه متأثر از حرارت آن.



شکل 6- مقایسه نتایج شبیه سازی حرارتی در انتهای زمان جوشکاری برای فولادهای HSLA و TRIP.

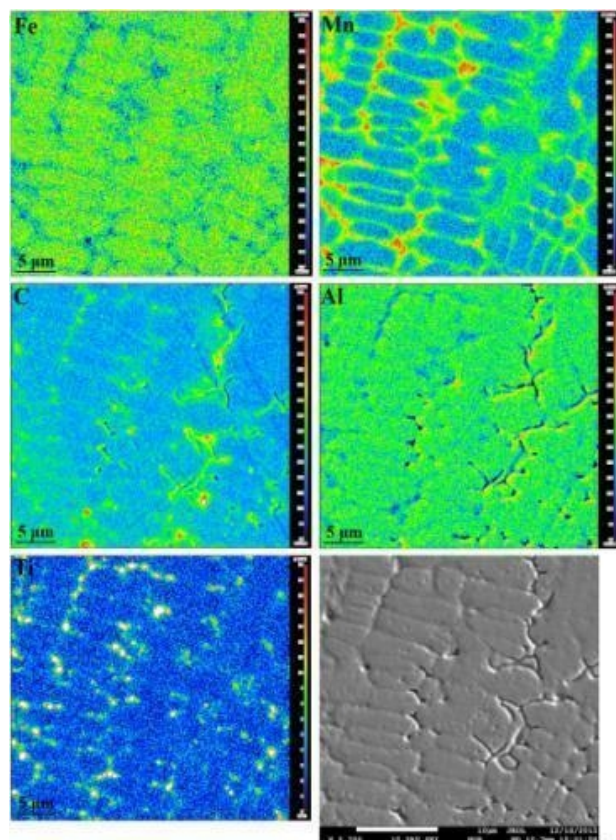
نقطه ای از فولاد پرمگنیز آستنیتی TWIP در شکل (7) دیده می شود. جدایش عناصر آلیاژی C , Mn , Ti و Al بوضوح در این تصویر یافت می شوند. لازم به اشاره است جهت بهره برداری از قابلیت های برجسته مکانیکی این آلیاژ در جوش حاصل از آن، ضرورت دارد که این عناصر که تعیین کننده میزان انرژی نقص در چیده شدن آلیاژ و حساسیت آن به ترک هیدروژنی هستند در مقیاس اتمی در کل منطقه مذاب به صورت همگن توزیع شده باشند. یکی از مشخصه های فولاد TWIP داشتن انجماد آستنیتی است. نشان داده شده است [1-2 و 9] که سرعت بسیار بالای سردشدن در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه ای (از مرتبه 10000 کلوین بر ثانیه) به همراه شیمی غنی فولاد TWIP سبب میل شدید جوش های نقطه ای این فولاد به جدایش می شود که این میل شدید انجماد آستنیتی آن را به صورت موضعی مختل می کند. این امر همانطور که در شکل (8) دیده می شود به افت شدید عملکرد مکانیکی جوش ها منجر می شود. همچنین این حساسیت سبب می شود که بیشینه بار قابل تحمل در این فولاد علی رغم وجود محتوای بسیار بیشتر عناصر آلیاژی آن حتی از فولاد HSLA نیز کمتر باشد (شکل (8) را ببینید). این شکل بوضوح بیان می کند که اگر چه افزودن عناصر آلیاژی می تواند پتانسیل های مکانیکی

هر چند که در این فضای محدود نمی توان به تفصیل به راه کارهای کنترل پدیده بیرون زدگی زودرس پرداخت، ولی به اجمال می توان به مواردی نظیر طراحی مجدد و اصلاح آلیاژ بر مبنای پاسخ آن به جوشکاری مقاومتی نقطه ای، استفاده از برنامه های جوشکاری اصلاح شده و چند پالسه، مدیریت حرارت ورودی و تنش حین سیکل حرارتی جوشکاری و رشد تدریجی دکمه جوش اشاره نمود.

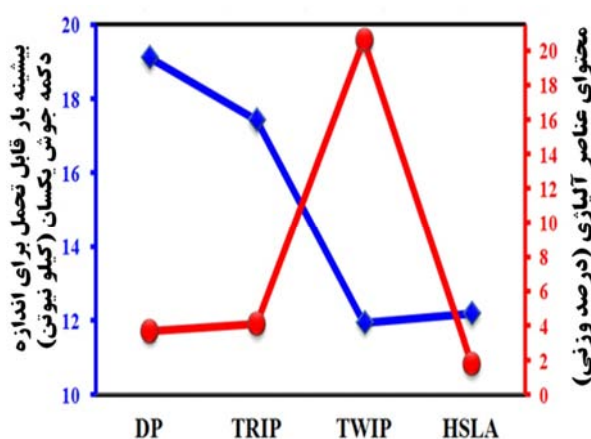
2-3- حساسیت به جدایش

رسیدن به استحکام بالا در فولادهای پیشرفته خودرویی عملاً با فعال کردن مکانیزم های متعدد و مختلف استحکام بخشی صورت می گیرد که جهت رسیدن به آن افزودن عناصر آلیاژی، طراحی مجدد و ارتقاء یافته آلیاژ و فرایند ترمومکانیکال پیچیده ضرورت دارد. این موارد از یک طرف با افزایش میزان و تنوع عناصر آلیاژی که میل به جدایش متفاوت دارند و از طرف دیگر با افزایش انرژی ذخیره شده در آلیاژ، در نهایت به وسیله جوشکاری ذوبی مقاومتی نقطه ای که ساختار به شدت کار شده آلیاژ را تبدیل به یک ساختار ریختگی می نماید موجبات حساسیت به جدایش در منطقه مذاب را فراهم می آورد. یک نمونه از این جدایش در منطقه مذاب یک جوش مقاومتی

عمرخستگی در بارگذاری دینامیکی منجر می‌شود و نهایتاً به شکست پیش از موعد جوش منتهی می‌گردند.



شکل 7- نقشه‌های توزیع عناصر آلیاژی در مرکز منطقه جوش فولاد TWIP حاصل از روش آنالیز FE-EPMA.



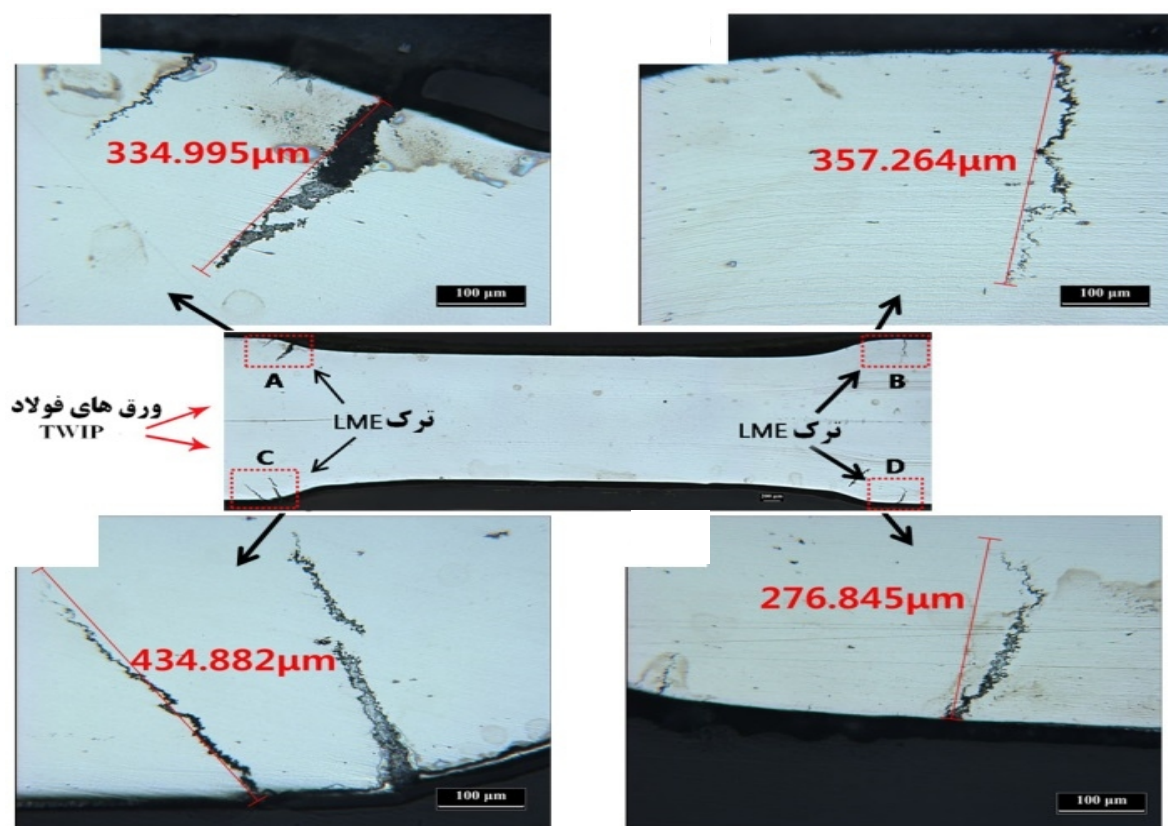
شکل 8- مقایسه محتوای عناصر آلیاژی فولاد TWIP با فولادهای DP، TRIP و HSLA و عملکرد مکانیکی جوش‌های آنها.

برخی از این ترک‌ها نظیر ترک انقباضی و حفرات بین دندردیتی در منطقه جوش رخ می‌دهند و برخی دیگر نظیر ترک ناشی از

بیشتری را در فولاد ایجاد یا فعال کند، ولی از منظر عملکرد مکانیکی جوش عناصر آلیاژی بیشتر عموماً به چالش‌های جوشکاری بیشتر و افت جوش پذیری منجر می‌شوند. شکل (8) بوضوح نشان می‌دهد که بیشینه بار قابل تحمل فولاد TWIP در آزمون کشش-برش به مراتب کمتر از فولادهایی نظیر فولادهای DP و TRIP با استحکام مشابه است علی‌رغم اینکه محتوای عناصر آلیاژی آن‌ها به مراتب کمتر از فولاد TWIP است. این موارد به دلیل حساسیت بسیار بالاتر فولاد TWIP به جدایش است. این نمودار به وضوح بیان می‌کند یک انتخاب هوشمندانه اقتصادی برای بدنه خودرو استفاده بیشتر از فولاد دوفازی است. البته حساسیت بیشتر فولادهای پیشرفته خودرویی به جدایش در مقایسه با فولادهای سنتی خودرویی سبب پیامدهای بیشتری نظیر تشکیل منطقه ذوب جزیی، حساسیت به ترک‌ها و ذوب شدن موضعی در منطقه متأثر از حرارت آن‌ها نیز می‌شود. مطالعات اخیر [1-2، 5 و 9] بر این نکته دلالت دارد که رد حساسیت به جدایش در اکثر عیوب و ناپیوستگی‌های جوش مشهود است که در ادامه این مقاله به برخی از آنها اشاره می‌شود. برای کاهش آثار مخرب جدایش، کنترل حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، کنترل سرعت انجماد دکه مذاب و انجام فرآیند تمبر درجا توصیه می‌شود که این موارد از راه‌گذر اصلاح برنامه جوشکاری قابلیت عملیاتی شدن دارند.

3-3- حساسیت به ترک‌ها و حفرات

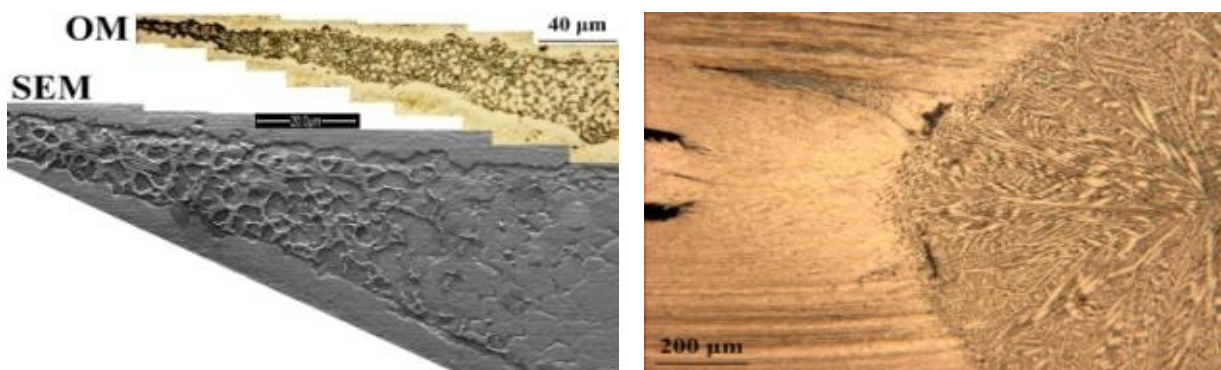
یکی دیگر از چالش‌های فولادهای پیشرفته خودرویی، حساسیت به ترک‌هایی نظیر ترک ناشی از روی مذاب (LME) برای فولادهای با پوشش پایه روی، ترک هیدروژنی، ترک ذوبی، ترک (حفره) انقباضی (انجمادی) و حفرات بین دندردیتی است که در شکل (9) عمده آن‌ها نشان داده شده‌اند. این ترک‌ها از این منظر که ناپیوستگی هستند، مسیر رشد ترک منجر به شکست را کوتاه‌تر می‌کنند و از این منظر که عاری از ماده‌ای است که در مقابل نیروی خارجی مقاومت کند عموماً به افت عملکرد مکانیکی در بارگذاری استاتیکی و به کاهش



الف



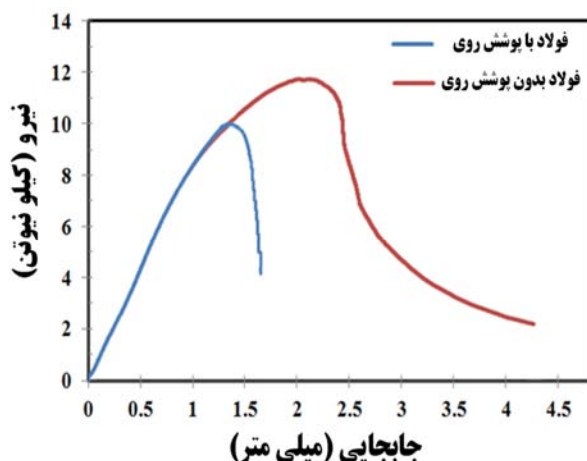
ب



ج

شکل 9- الف) ترک ناشی از روی مذاب، ب) ترک انقباضی و حفره بین دندریتی و ج) ترک ذوبی در جوش های مقاومتی نقطه ای از فولادهای پیشرفته خودروبی.

نتایج بررسی آنالیز عنصری این ترک حاکی از این واقعیت است که اینگونه ترک ها بواسطه روی مذاب پر شده اند (شکل 11)).

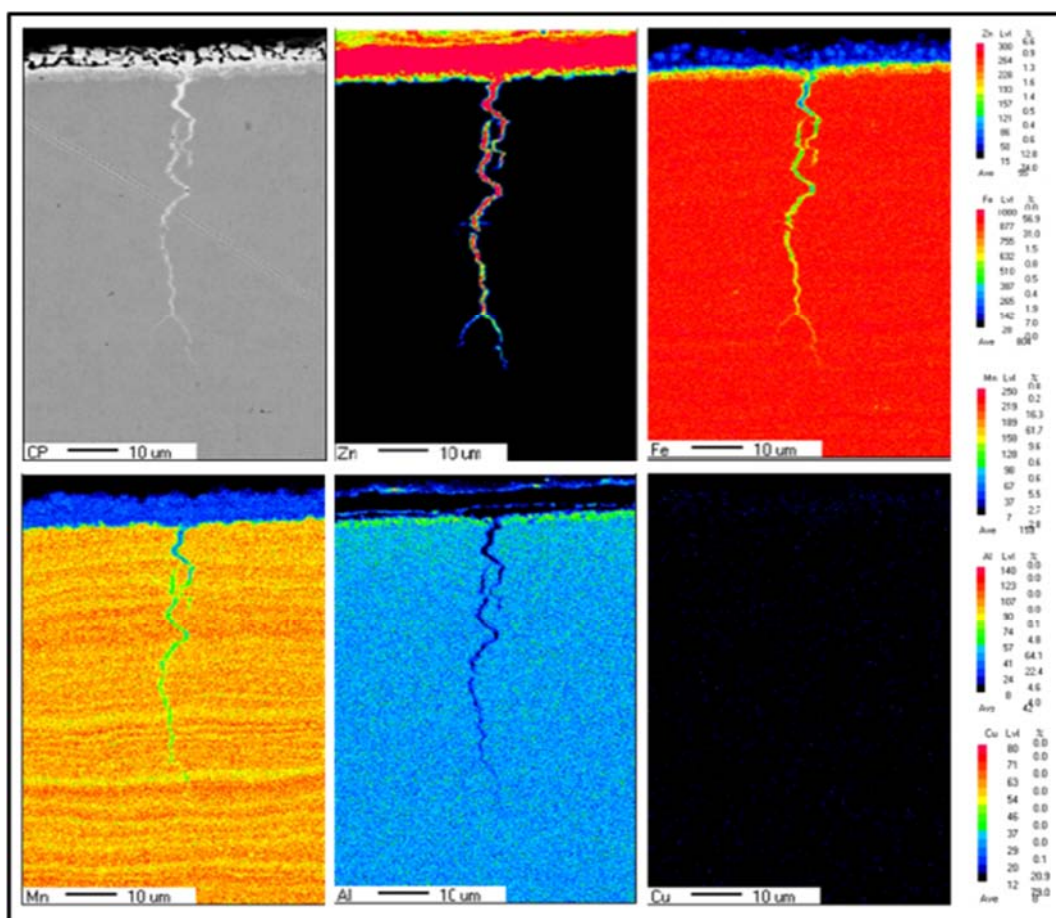


شکل 10- مقایسه نمودار کشش - برش جوش های مقاومتی نقطه ای فولاد TWIP با و بدون پوشش روی.

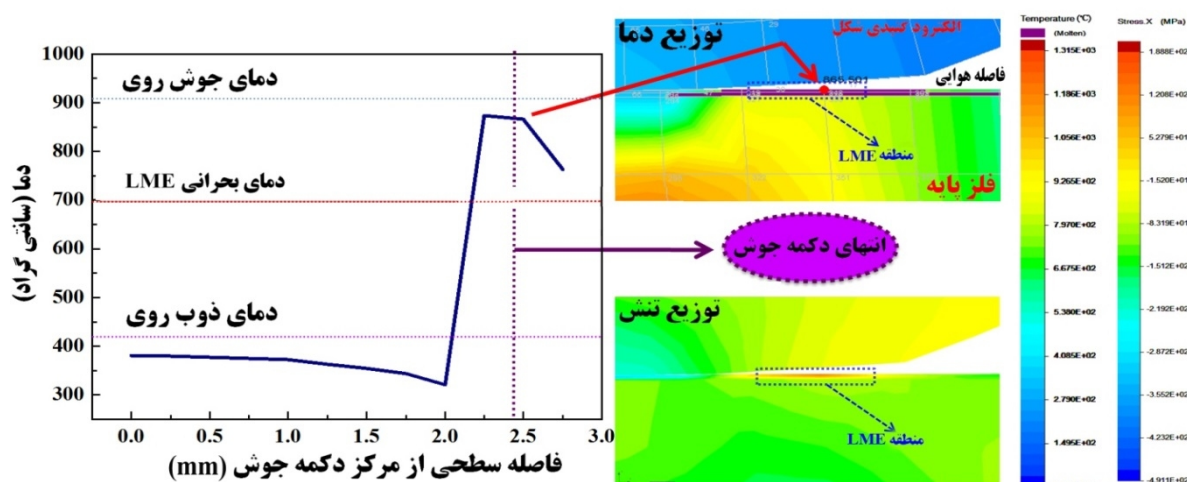
در خصوص ساز و کار تشکیل این نوع ترک ها می توان گفت که وجود همزمان دما و تنش کششی به حد کافی بالا و روی مذاب در سطح ورق مورد جوشکاری در تشکیل این ترکیدگی نقش حیاتی ایفا می کنند. نتایج شبیه سازی توزیع حرارت و تنش در مکان حساسیت به ترکیدگی در شکل (12) نشان داده شده است. این تصویر بوضوح نشان می دهد که در منطقه حساس به ترکیدگی که در شکل (9-الف) نشان داده شده است دمای کافی، روی مذاب و تنش کششی به حد کافی بالا وجود دارند. وجود همزمان این سه، موجبات ترکیدگی را فراهم می آورد. با توجه به منحنی تغییرات دما در شکل (12) در خصوص فراهم آمدن این سه در منطقه مجاور محل تماس الکتروود با سطح ورق می توان گفت که در منطقه تماس الکتروود به دلیل سرد شدن بواسطه الکتروود آبرگرد دما پایین باقی می ماند، ولی در مجاور این منطقه از یک طرف ذخیره و تجمع حرارت رخ داده و از طرف دیگر به دلیل وجود یک فاصله هوایی خنک شوندگی کافی رخ نمی دهد که منجر افزایش دما در این منطقه و در نتیجه ذوب پوشش روی و واکنش با مرزدانه های سطحی و نیز تنش های کششی ناشی از حرارت می شود و ترکیدگی را رقم می زند.

روی مذاب، ترک هیدروژنی، ترک ذوبی در منطقه متأثر از حرارت جوش ها رخ می دهند. مطابق استاندارد GWS-5A وجود ترک های بزرگتر از 10 میکرومتر در جوش های مقاومتی نقطه ای مجاز نیست و لذا این ترک ها به افت جوش پذیری و کاهش پهنای محدوده مجاز جوشکاری آلیاژ منتهی می شوند. البته وجود ترک آثار دیگری نیز دارد برای نمونه وجود ترک ها در منطقه مذاب می تواند به حساسیت به شکست فصل مشترکی منجر شود. همچنین وجود ترک در منطقه متأثر از حرارت از طریق افت خواص مکانیکی آن می تواند به پدیده بیرون زدگی زودرس دکمه مذاب و در نتیجه افت جوش پذیری منجر شود. رد حساسیت به جدایش فولادهای پیشرفته خودرویی در حساسیت آنها به انواع ترکیدگی ها بوضوح دیده شده است [1-2، 5 و 9]. عمده این ترک ها بعد از یک جریان جوشکاری بحرانی و در نتیجه یک اندازه دکمه جوش بحرانی و در یک مکان مخصوص آن ترکیدگی تشکیل می شوند که اندازه دکمه جوش بحرانی نشان دهنده حداقل حرارت ورودی (انرژی حرارتی) لازم برای تشکیل ترک می باشد. برای مثال، اندازه دکمه جوش بحرانی برای ترک ذوبی عموماً از اندازه دکمه جوش بحرانی برای تشکیل ترک ناشی از روی مذاب کمتر است. مکان خاص تشکیل هر کدام از ترک ها نیز به واسطه لوازم تشکیل ترک ها نظیر تشکیل فاز مذاب موضعی، رخداد جدایش، دما و تنش کافی جهت رخداد ترکیدگی تعیین می شود. نظر به اینکه مبانی بیشتر این ترکیدگی ها کمابیش برای جامعه علمی شناخته شده است در این قسمت سعی می شود به ترکیدگی ناشی از روی مذاب که مبانی آن کمتر شناخته شده است و عمده فولادهای آمده در روش پژوهش به آن حساسند، پرداخته شود.

تردی-ترکیدگی ناشی از روی مذاب از این جهت در فولادهای پیشرفته خودرویی شایع است که عمده آنها به جهت افزایش عمر کاری به واسطه لایه ای از روی پوشانده شده اند. این ترکیدگی همانطور که شکل (10) دیده می شود از دو جنبه افت استحکام جوش و افت انعطاف پذیری جوش به شکست زودرس جوش با جذب انرژی کمتر (تردی) منجر می شود.



شکل 11- تصاویر نقشه‌های توزیع عنصری FE-EPMA از ترک‌ها ناشی از روی مذاب در فولاد TWIP با پوشش گالوانیزه.

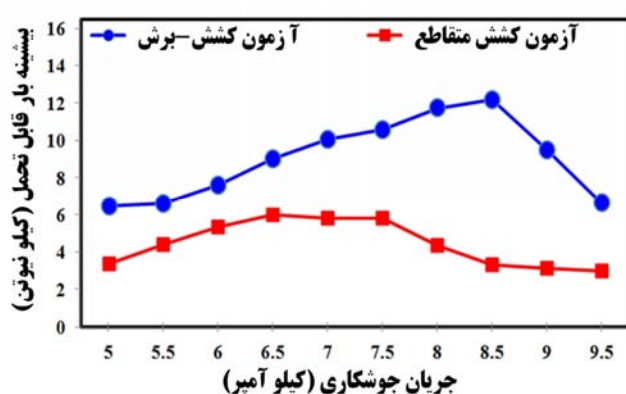


شکل 12- منحنی تغییر دمای سطح ورق مورد جوشکاری از مرکز (در تماس با مرکز الکترود) به سمت بیرون در انتهای سیکل جوشکاری و توزیع دما و تنش برای منطقه فوق بحرانی ترکیدگی.

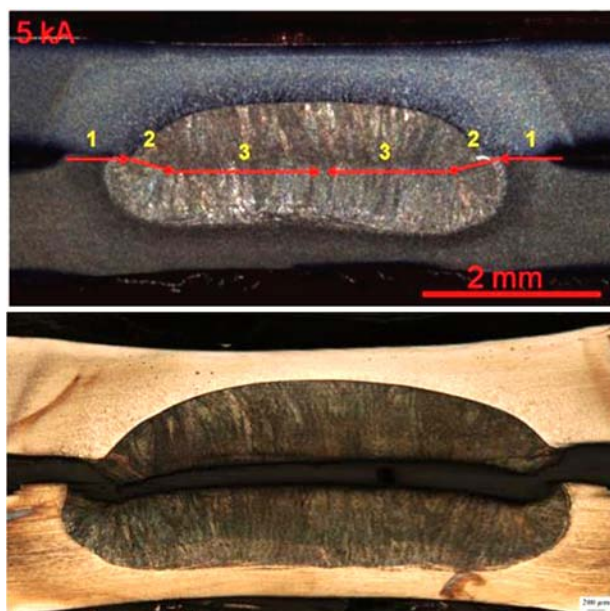
الکتریکی کمتر و آلیاژ با خواص ترموفیزیکی اصلاح شده اشاره نمود. از دیگر راهکارهای مقابله با انواع ترکیدگی ها می‌توان کاهش حرارت ورودی، مدیریت حرارت و تنش در حین سیکل

از مهمترین رویکردهای کاهش حساسیت به ترکیدگی‌های اشاره شده در فوق می‌توان به اصلاح آلیاژ جهت رسیدن به آلیاژ با حساسیت کمتر به جدایش، آلیاژ با مقاومت ویژه

کشش متقاطع موثر است، ولی حساسیت بیشتر فولاد TWIP به جدایش در جوشکاری نامشابه نسبت به جوشکاری مشابه آن در القا کردن مسیر رشد ترک بسیار موثرتر است. برای پاسخ به این چالش مهم فولادهای پیشرفته خودرویی فراهم آوردن شرایط دمایی/زمانی برای رخ داد پدیده نفوذ برای کاهش از میزان ناهمگونی های شیمیایی در منطقه جوش ضرورت دارد. این راهکار با پالس های ثانویه کوتاه طولانی و نیز با تمپر درجا قابلیت اجرا دارد. هر چند که اصلاح طراحی آلیاژ و استفاده از جفت اتصال با اختلاف پتانسیل شیمیایی کمتر نیز از دیگر راهکارها هستند [9].



شکل 13- مقایسه نتایج آزمون های مکانیکی کشش-برش و کشش متقاطع برای جوش های نامشابه TWIP/HSLA.



شکل 14- مطابقت یک نمونه جوش نامشابه TWIP/HSLA شکسته شده در آزمون کشش متقاطع با شکل دکمه جوش متناظر جهت پیدا کردن مسیر رشد ترک.

جوشکاری و رشد تدریجی دکمه جوش و استفاده از سیکل های جوشکاری دو یا چند پالس ابداعی اشاره نمود [1-2، 5 و 9].

3-4- افت انعطاف پذیری در جوشکاری نامشابه فولادهای

پیشرفته خودرویی

عمده اجزاء ساختاری بدنه خودرو از یک ساختار سه لایه تشکیل شده اند که عبارتند از لایه بیرونی که از ورق های نازک (نیم تا هفت دهم میلی متر) با بیشترین قابلیت کشش عمیق در بیرون، فولادهای استحکام بالا با ضخامت متوسط (یک تا یک و دو دهم میلی متر) در میان و فولادهای پیشرفته استحکام بالا با ضخامت زیاد (بیش از یک و نیم میلی متر) در درونی ترین لایه عمدتاً برای ستون ها، این چینش ورق ها که به واسطه فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه ای به هم متصل می شوند اهمیت قابل توجه جوشکاری نامشابه فولادهای پیشرفته خودرویی را در مقایسه جوشکاری مشابه آن ها نشان می دهد. به بیان دیگر می توان گفت که بیش از 90 درصد جوش ها در بدنه خودرو از نوع جوش های نامشابه اند. پیشتر اشاره شده بود (شکل 3-ب) که بیشینه بار قابل تحمل در آزمون کشش متقاطع در فولادهای پیشرفته خودرویی بسیار کمتر از بیشینه بار قابل تحمل در آزمون کشش-برش است. به بیان دیگر نسبت این دو کمیت که به نسبت انعطاف پذیری پذیری شناخته می شود، برای فولادهای پیشرفته کمتر از فولادهای خودرویی سنتی است. این نسبت در جوشکاری نامشابه این فولادها افت شدیدتری پیدا می کند. به بیان دیگر جوش های نامشابه فولادهای پیشرفته خودرویی دارای انعطاف پذیری بسیار کمی هستند (شکل 13)). چنین روندی برای جوش های نامشابه TWIP/DP و TWIP/TRIP نیز مشاهده شد. این چالش اگر به نحو مناسبی پاسخ داده نشود می تواند عمر و یکپارچگی بدنه خودرو را به شدت تهدید کند. بررسی نمونه شکست این جوش نامشابه پس از آزمون کشش متقاطع نشان می دهد که این جوش به شکست فصل مشترکی (شکل 14)) حساس هستند. در تحلیل این شکست با انرژی کم می توان گفت که هرچند شکل نامتقارن دکمه جوش در ورود مسیر ترک به دکمه جوش در آزمون

جدول 2- نتایج سه بار تکرار ارزیابی مود شکست در آزمون کشش متقاطع جوش های نامشابه TWIP/DP.

5.0 kA	5.5 kA	6.0 kA	6.5 kA	7.0 kA	جریان جوشکاری	
-	-	-	-	-	سری اول آزمون	بیرون زدگی مذاب
-	-	-	-	-	سری دوم آزمون	
-	-	-	-	-	سری سوم آزمون	
IF	IF	IF	IF	IF	سری اول آزمون	مود شکست
IF	IF	IF	IF	IF	سری دوم آزمون	
IF	IF	IF	IF	IF	سری سوم آزمون	
7.5 kA	8.0 kA	8.5 kA	9.0 kA		جریان جوشکاری	
-	-	Exp.	Exp.		سری اول آزمون	بیرون زدگی مذاب
-	-	-	Exp.		سری دوم آزمون	
-	-	-	Exp.		سری سوم آزمون	
IF	IF	IF	IF		سری اول آزمون	مود شکست
IF	IF	IF	IF		سری دوم آزمون	
IF	PF (سوراخ) کنندگی بر روی ورق (TWIP)	IF	PIF (سوراخ) کنندگی بر روی ورق (TWIP)		سری سوم آزمون	
-	3.84 mm	-	3.60 mm		قطر دکمه کنندگی	

IF شکست فصل مشترکی، PF شکست محیطی، PIF شکست فصل مشترکی جزئی و EXP بیرون زدگی مذاب

3-5- حساسیت به شکست فصل مشترکی

با نگاه مجدد به شکل (10) می توان تفاوت نمودارهای کشش - برش برای دو مود شکست فصل مشترکی و کنندگی دکمه جوش را یافت. ولی این همه تفاوت این دو مود شکست نیست. آنچه که بسیار مهم است و به اقتضای محورهای موجود در این شکل نشان داده نشده است، زمان آزمون کشش است. با توجه به اینکه سرعت کرنش در همه آزمون های کشش یکسان بود، می توان گفت که جوش ها حین آزمون کشش با نرخ ثابتی در حال جذب انرژی هستند که این انرژی صرف تغییر فرم آنها و اتساع ترک می شود. این زمان برای مودهای شکست فصل مشترکی و کنندگی در شکل (10) به ترتیب 37 و 141 ثانیه است. این زمان ها بر این مهم دلالت دارد که شکست فصل مشترکی در مقایسه با مود کنندگی دکمه جوش شکست سریعتر و با جذب انرژی بسیار کمتری را تجربه می کند. به این دلیل وقوع مود شکست کنندگی در آزمون های کشش در صنعت خودرو تا حد زیادی تعیین کننده اطمینان از عملکرد مکانیکی جوش هاست. مشاهدات نشان داد که فولادهای HSLA و IF

در کل محدوده مجاز جوشکاری خود مود شکست کنندگی دکمه جوش را از خود نشان می دهند. ولی حساسیت به شکست فصل مشترکی خصوصاً در جوشکاری نامشابه (جدول 2)) فولادهای پیشرفته خودرویی یکی از چالش های اساسی این فولادها در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای است. در تحلیل این نتایج می بایست به این نکته مهم اشاره نمود که مسیر پیشرفت ترک در آزمون کشش عمدتاً به وسیله میزان انرژی لازم برای رشد ترک القاء می شود. اینکه ترک مسیر بین دو ورق را طی کند یا دکمه جوش را دور بزند به این سوال مهم بر می گردد که کدام مسیر انرژی کمتری نیاز دارند؟ وجود عیوب جوش، ترک ها، حفرات انقباضی و بین دندرتی، جدایش و ناهمگونی های شیمیایی در منطقه مذاب، اندازه دکمه جوش کوچک و پهنای کم طوق مکانیکی اطراف دکمه جوش همگی به کاهش طول مسیر رشد ترک و افت انرژی مکانیکی لازم جهت رشد ترک کمک می کنند و منجر به شکست سریع تر و با جذب انرژی کمتر در جوش های مقاومتی نقطه ای فولادهای پیشرفته خودرویی می شوند. بر این اساس می توان

جوشکاری نامشابه فولادهای پیشرفته خودرویی و حساسیت به شکست فصل مشترکی آنها. این موارد محدوده منحنی جوش‌پذیری فولاد را محدود می‌کنند و مانع از انتقال قابلیت‌های برجسته مکانیکی این فولادها به جوش‌های آنها می‌شوند. این مقاله به پدیده شناسی این چالش‌ها برای فولادهای پیشرفته خودرویی در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای پرداخت. مشاهده شد که مواردی نظیر شیمی غنی آلیاژ، کربن معادل بالا، فرایند ترمومکانیکال پیچیده و خواص ترموفیزیکی ویژه این فولادها عوامل اصلی زمینه ساز این چالش‌ها می‌باشند که ضرورت بازطراحی آلیاژ بر مبنای پاسخ آن به فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای یا بکارگیری فرایندهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اصلاح شده یا چندپالسه را برای استفاده از قابلیت‌های برجسته مکانیکی این فولادها در بدنه خودرو نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] Rouholah Ashiri, Md Anwarul Haque, Chang-Wook Ji, Morteza shamanian, Hamid Reza Salimijazi, Yeong-Do Park, Supercritical area and critical nugget diameter for liquid metal embrittlement of Zn-coated twinning induced plasticity steels, Scripta Materialia, 2015, vol. 109, pp. 6–10.
- [2] Rouholah Ashiri, Morteza Shamanian, Hamid Reza Salimijazi, Md Anwarul Haque, Jin-Hee Bae, Chang-Wook Ji, Kwang-Geun Chin, Yeong-Do Park, Liquid metal embrittlement-free welds of Zn-coated twinning induced plasticity steels, Scripta Materialia, 2016, vol. 114, pp. 41–47.
- [3] R. Ashiri, S. P. H. Marashiri, Y.-D. Park, Weld Processing and Mechanical Responses of 1-GPa TRIP Steel Resistance Spot Welds, Welding Journal, 2018, vol. 97, pp. 157–69.
- [4] R. Ahsan, Y. Kim, R. Ashiri, Y. J. Cho, C. Jeong, Y. D. Park, Cold metal transfer (CMT) GMAW of zinc-coated steel, Welding Journal, 2016, vol. 95, pp. 120–132.
- [5] R. Ashiri, H. Mostaan, Y.-D. Park, A Phenomenological Study of Weld Discontinuities and Defects in Resistance Spot Welding of Advanced High Strength TRIP Steel, Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, vol. 49A, pp. 6161–72.
- [6] Iman Hajiannia, Morteza Shamanian, Masoud Atapour, Rouholah Ashiri, Evaluation of Weldability and Mechanical Properties in Resistance Spot Welding of Ultrahigh-Strength TRIP1100 Steel, SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2019, vol. 12, pp. 5–17.

گفت که حساسیت جوش به شکست فصل مشترکی بیشتر حساسیت آن به تشکیل عیوب، ناپیوستگی‌ها و ناهمگونی‌های شیمیایی و افت قابلیت جذب انرژی در منطقه جوش بر می‌گردد. و از این منظر، راهکارهای جلوگیری از این مود شکست نیز اساساً با راهکارهای پیشگیری از رخداد عیوب، ناپیوستگی‌ها و ناهمگونی‌های شیمیایی در ارتباط است [9].

3-6- ضعیف شدن استحاله‌ای و حساسیت‌ها در فرایندهای جوشکاری قوسی

از دیگر چالش‌های فولادهای پیشرفته خودرویی می‌توان به مواردی نظیر افت عملکرد مکانیکی مناطق جوش در اثر رخداد استحاله در آن مناطق اشاره نمود. از مهمترین آنها می‌توان به نرم شوندگی مارتنزیت در منطقه متأثر از حرارت فولادهای DP و TRIP، نرم شوندگی در اثر پدیده‌های مرتبط با آنیل، نرم‌شوندگی ناشی از رشد و ذوب رسوبات و مرز دانه‌ها در این منطقه و منطقه ذوب جزئی اشاره نمود. در خصوص بکارگیری ورق‌های ضخیم‌تر از جنس فولادهای پیشرفته خودرویی در بدنه یا دیگر اجزای خودرو، استفاده از روش‌های جوشکاری قوسی و لیزر معمول است که از مهمترین چالش‌های آنها می‌توان به تشکیل تخلخل و حبس سرباره در منطقه جوش و نیز در سطح گرده جوش و حساسیت آهن به تشکیل ترکیبات بین فلزی و در نتیجه افت انعطاف‌پذیری جوش‌ها اشاره نمود [10-12].

4- نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌های تجربی نشان داده است که عوامل متعددی جوش‌پذیری و محدوده مجاز پارامترهای جوشکاری در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای پیشرفته خودرویی را متأثر می‌کنند که این امر کاربرد این فولادها را در صنعت خودرو با چالش مواجه می‌کند. برخی از مهمترین حساسیت‌های این فولادها در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای عبارتند از حساسیت به پدیده بیرون زدگی پیش از موعد، تشکیل دکمه جوش کوچک، حساسیت به جدایش، حساسیت به ترک‌ها و حفرات، افت انعطاف‌پذیری در

cold metal transfer (CMT) gas metal arc welding (GMAW) of zinc coated steels, Science and Technology of Welding and Joining, 2016, vol. 21, pp209-215.

[11] Md. R. U. Ahsan, Muralimohan Cheepu, Rouholah Ashiri, Tae-Hoon Kim, Chanyoung Jeong, Yeong-Do Park, Mechanisms of weld pool flow and slag formation location in cold metal transfer (CMT) gas metal arc welding (GMAW), Welding in the World, 2017, vol. pp. 1275-1285.

[12] C. H. Muralimohan, M. Ashfaq, Rouholah Ashiri, V. Muthupandi, K. Sivaprasad, Analysis and Characterization of the Role of Ni Interlayer in the Friction Welding of Titanium and 304 Austenitic Stainless Steel, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 2016, vol. 47, 347-359.

[7] Sajad Salimi Beni, Masoud Atapour, Mohammad Reza Salmani, Rouholah Ashiri, Resistance Spot Welding Metallurgy of Thin Sheets of Zinc-Coated Interstitial-Free Steel, Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, vol. 50, pp. 2218-2234.

[8] I. Hajiannia, M. Shamanian, M. Atapour, E. Ghassemali, R. Ashiri, A microstructure evaluation of different areas of resistance spot welding on ultra-high strength TRIP1100 steel, Cogent Engineering, 2018, vol. 5, pp. 1-13.

[9] روح اله عشیری، ارزیابی مکانیزم پدیده های ترک خوردن و جدایش در فولاد پرمنگنز آستنیتی حین جوشکاری مقاومتی نقطه ای، رساله دکتری مهندسی مواد- جوشکاری، دانشگاه صنعتی اصفهان، 1395.

[10] Md. R. U. Ahsan, Y. R. Kim, C. H. Kim, J. W. Kim, R. Ashiri, Y. D. Park, Porosity formation mechanisms in