نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره2، پاییز و زمستان 1399، صفحه 27-13

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

روح اله عشیری[1*]، مرتضی شمعانیان[2]، حمیدرضا سلیمی جزی[2]، یئونگ-دو پارک[3]، محمدرضا سلمانی[4]

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. Shamanian[2], H. R. Salimijazi[2], Y. Park[3], M. R. Salmani[4]

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]

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 [1و2]. در این طراحی دو عامل کلیدی انتخاب ماده و طراحی هندسه خودرو نقش ایفا می کنند. 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 طراحی های ارتقاء یافته را با فرآیندهای شکل دهی امکان پذیر می کنند. این فولادها هم اکنون در حال بکارگیری در صنعت خودرو می باشند تا کارآیی و ایمنی خودروها را ارتقاء دهند. از طرف دیگر کاهش مصرف سوخت خودرو و افزایش ایمنی سرنشینان از چالش های اساسی صنعت خودرو می باشد. با توجه به اینکه استفاده از فولادهای استحکام بالای پیشرفته می‌تواند پاسخی به این چالش ها باشد، بکارگیری این فولادها در صنعت خودرو، به عنوان یک استراتژی کاربردی در بسیاری از خودروسازهای بزرگ دنیا دنبال می شود [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 می توان به فولادهای دوفازی، چند فازی (فولادها با ساختار فازی پیچیده)، فریتی- بینیتی، مارتنزیتی، تغییر فرم داغ داده شده و فولادهای با تغییر فرم پلاستیک ناشی از استحاله فازی یا دوقلوئی شدن اشاره نمود [1-3].

فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای متداول‌ترین فرآیند اتصال ورق‌های فلزی و فرآیند اتصال حیاتی برای تولید خودرو است. با وجود تکنولوژی‌های جوش نقطه‌ای پیشرفته‌ای نظیر فرآیندهای جوش نقطه‌ای قوس تنگستنی با گاز محافظ، لیزری و اصطکاکی هم‌زنی هنوز نیز جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای معمولی فرآیند اصلی برای اتصال ورق‌های فلزی به‌خصوص در صنایع خودروسازی است. روندی که به نظر می رسد 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 نقطه ای 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]

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

فولادهای پیشرفته خودرویی 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، 6-5].

این فولادها در مقایسه با فولادهای سنتی [7] با چالش های بیشتری حین جوشکاری مواجه اند. برای بکارگیری یک فولاد در صنعت خودرو می‌بایست جوش‌پذیری آن فولاد مورد بررسی قرار گیرد تا از وجود جوش‌پذیری کافی آن اطمینان حاصل شود. نیازهای اساسی صنعت خودرو برای جوش‌های حاصل از فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای 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 جوش‌های عاری از ترک و دیگر عیوب محتمل جوش [1-2].

نتایج بررسی‌های تجربی نشان داده است که عوامل متعددی جوش‌پذیری و محدوده مجاز پارامترهای جوشکاری در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای پیشرفته خودرویی را متاثر می کنند که این امر کاربرد این فولادها را در صنعت خودرو با چالش‌های جدی مواجه می‌کند. پدیده‌هایی نظیر تردی/ترکیدگی ناشی از روی مذاب، ترک های ذوبی، حساسیت به شکست فصل مشترکی، جدایش و افت انعطاف-پذیری، پدیده بیرون‌زدگی زودرس و تشکیل عیوب و ناپیوستگی های جوشکاری عواملی هستند که محدوده منحنی جوش‌پذیری فولاد را محدود می‌کنند [1-9].

این مقاله سعی دارد به پدیده شناسی این چالش‌ها برای فولادهای پیشرفته خودرویی در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بپردازد. 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 خودرویی 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.

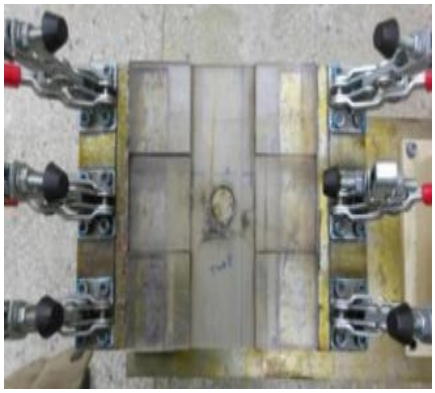
کلیه آلیاژها به صورت ورق هایی مورد استفاده قرار گرفتند که جهت بهبود مقاومت به خوردگی با پوشش های پایه روی پوشش داده شده بودند. جوشکاری نمونه ها توسط ربات جوشکاری مقاومتی نقطه ای با جریان جوشکاری مستقیم انجام شد. از ربات جوشکاری مشابه ربات هایی که در خط تولید شرکت خودروسازی هوندایی (شکل (1)) بکار گرفته می‌شود، 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 منحنی‌ها 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 نمونه‌ها استفاده گردید. شکل (2) به صورت طرح واره‌ای و جدول (1) مشخصات سیکل جوشکاری استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

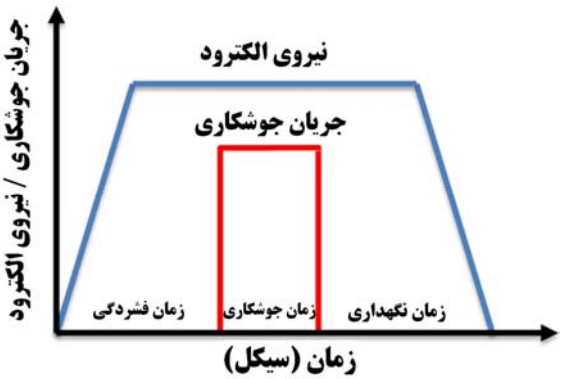
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]







شکل 1- ربات جوش مقاومتی نقطه‌ای استفاده شده در این پژوهش و نگه‌دارنده های نمونه برای جوشکاری نمونه استاندارد ارزیابی خواص مکانیکی.



شکل2- شماتیک یک سیکل جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای.

در این پژوهش، شدت جریان جوشکاری به عنوان متغیر اصلی تحقیق حاضر انتخاب گردید. در این پژوهش برای جوش دادن نمونه‌ها از الکترود از جنس آلیاژ مس-کروم-زیرکونیم با شکل گنبدی ناقص استفاده شد. ارزیابی عملکرد مکانیکی جوش ها 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 جوش‌ها 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 مولفه‌های 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 عمدتا برشی و در دیگری عمدتا 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 جوش‌های مقاومتی نقطه ای فولادهای پیشرفته خودرویی توصیه می‌شود علاوه بر تست‌های مکانیکی استاتیکی آن‌ها را تحت بررسی‌های 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 می‌دهد. مشاهده می شود که با افزایش جریان جوشکاری و در نتیجه حرارت ورودی اندازه دکمه 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 دکمه جوش بحرانی وجود دارد که بعد از آن نسبت انعطاف پذیری کاهش می یابد.

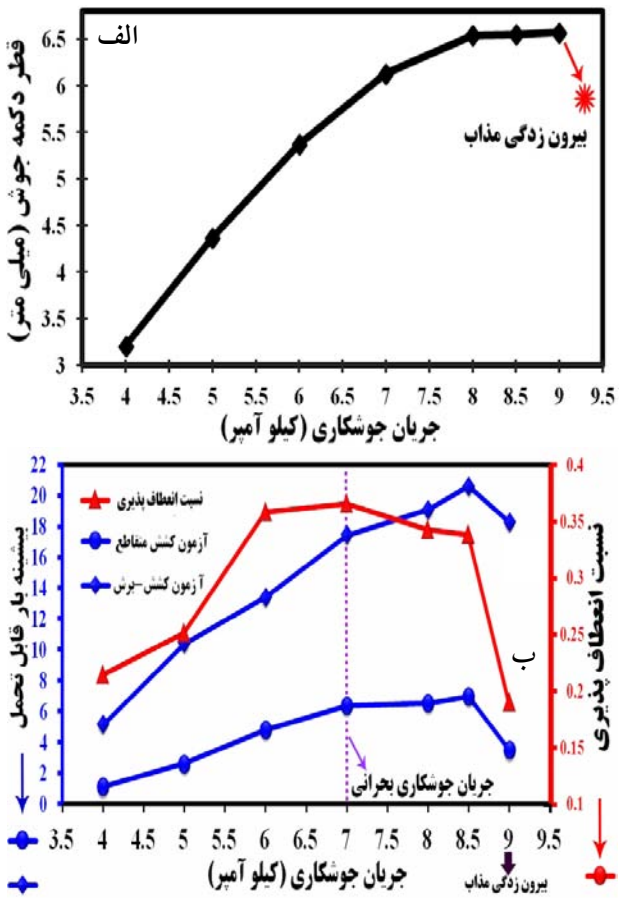
جدول1- مشخصات سیکل جوشکاری استفاده شده در این پژوهش

سیکل جوشکاری	انجام جوشکاری با	نیروی الکترود	زمان فشردگی الکترود قبل از اعمال جریان	زمان جوشکاری	زمان نگهداری	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)

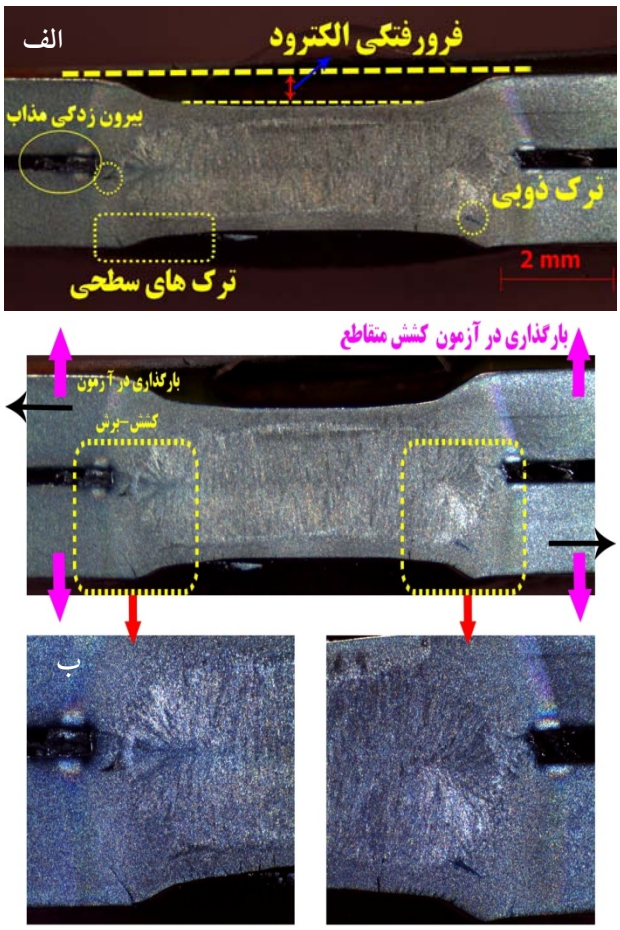
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]

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 می توان 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 می شود) دارای محدوده حساسیت به عیوب جوش وسیعتری هستند. با توجه به شکل (3-ب) می توان گفت که هرچند که پدیده بیرون‌زدگی مذاب (که حد بالای لوب جوش پذیری را تعیین می‌کند) در جریان جوشکاری 9 کیلو آمپر اتفاق می افتد عملاً عیوب جوش نشان داده شده در شکل (4) در جریان‌های جوشکاری پایین تری حدود 7 کیلو آمپر تشکیل می‌شوند.



شکل3- 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.

این واقعیت به معنای کاهش محدوده جریان قابل پذیرش جوشکاری است، زیرا که برخی از این عیوب در بارگذاری دینامیکی فعال می‌شوند و می توانند 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 سنتی نباید خیلی هم به حد بالای لوب جوش پذیری نزدیک شد [1-2و 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 می‌کنند و برخی دیگر حداکثر بار قابل تحمل در آزمون کشش متقاطع را تحت تاثیر قرار می دهند.



شکل4-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.

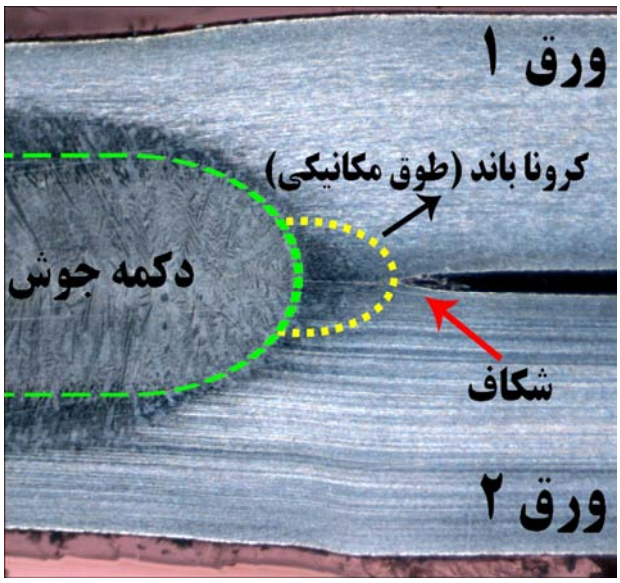
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]

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

3-1- پدیده بیرون زدگی زودرس

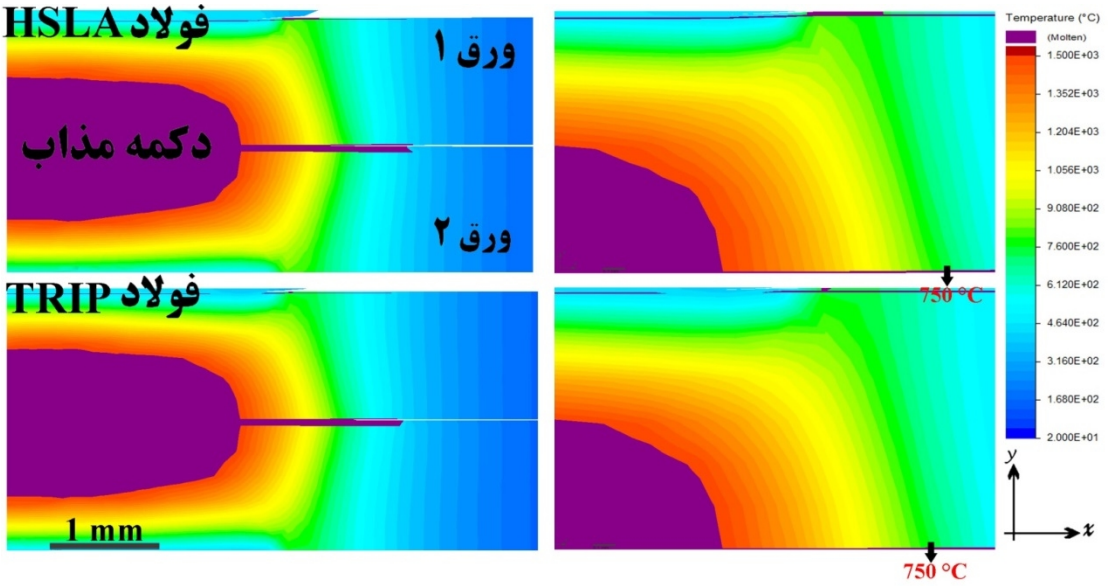
یکی از چالش هایی که فولادهای پیشرفته خودرویی عموماً با آن مواجه هستند پدیده بیرون زدگی زودرس یا پیش از موعد است که این امر سبب محدود شدن محدوده مجاز جریان جوشکاری می شود. برای محدوده مجاز جریان جوشکاری قراردادهای مختلفی وجود دارد، ولی ضرورت دارد با توجه به حساسیت به شکست فصل مشترکی فولادهای پیشرفته خودرویی تعریفی که خاص این فولادهاست ارائه شود. در هر صورت، با فرض محدوده 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 می توان 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 می کنند.

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 می کند که به تبع آن بخشی از قابلیت های مکانیکی جوش ها بالفعل نخواهد شد. در تحلیل رخ داد پیش از موعد پدیده بیرون زدگی می توان گفت که وجود یک طوق مکانیکی به اندازه کافی پهن (شکل (5)) و مستحکم می تواند پدیده بیرون‌زدگی مذاب را به تاخیر بیندازد. در واقع این باند مکانیکی از عملکرد و تاثیر همزمان فشار الکترودها و نرم شدگی نسبی منطقه متاثر از حرارت بواسطه تغییر شکل پلاستیکی این منطقه تشکیل می‌شود و راه خروج دکمه مذاب را حین جوشکاری سد می کند. نتایج شبیه سازی حرارتی دو فولاد خورویی 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 پهنتری 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 متاثر 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 جزیی و افت خواص مکانیکی منطقه متاثر از حرارت فولادهای پیشرفته خودرویی، که متاثر 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].



شکل5- ماکروساختار یک جوش نقطه ای نشان دهنده مکان طوق مکانیکی در منطقه متاثر از حرارت آن.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]



شکل6- مقایسه نتایج شبیه سازی حرارتی در انتهای زمان جوشکاری برای فولادهای HSLA و TRIP.

هر چند که در این فضای محدود نمی توان به تفصیل به راه‌کارهای 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 کارشده آلیاژ را تبدیل به یک ساختار ریختگی می نماید موجبات حساسیت به جدایش در منطقه مذاب را فراهم می آورد.

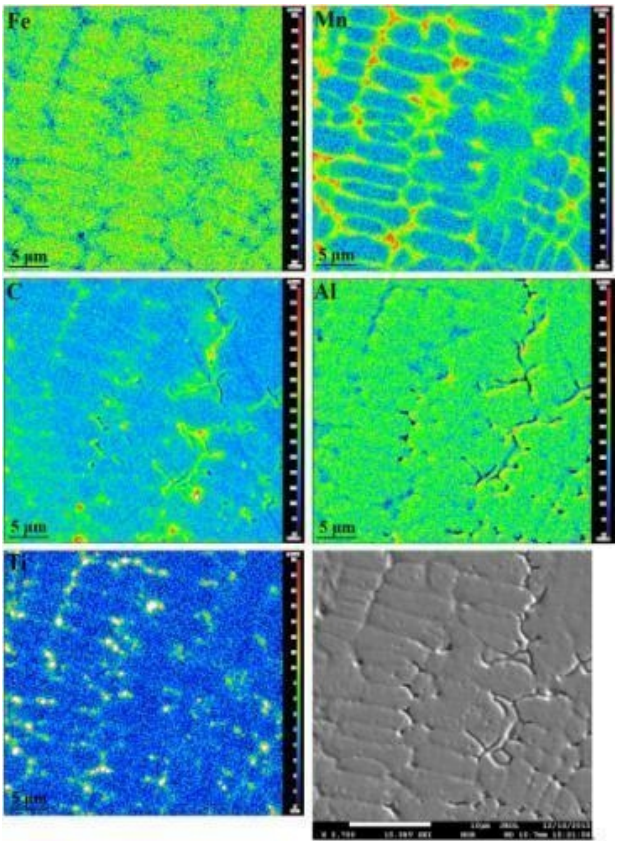
یک نمونه از این جدایش در منطقه مذاب یک جوش مقـاومتی نقطه ای از فولاد پرمنگنز آستنیتی TWIP در شکل (7) دیده می‌شود. جدایش عناصر آلیاژی Mn، C، Ti و Al بوضوح در این تصویر یافت می شوند. لازم به اشاره است جهت بهره برداری از قابلیت های برجسته مکانیکی این آلیاژ در جوش حاصل از آن، ضرورت دارد که این عناصر که تعیین 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 [1-2و 9] که سرعت بسیار بالای سردشدن در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (از مرتبه 10000 کلوین بر ثانیه) به همراه شیمی غنی فولاد TWIP سبب میل شدید جوش های نقطه ای این فولاد به جدایش می‌شود 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 جوش‌ها 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 پتانسیل‌های مکانیکی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]

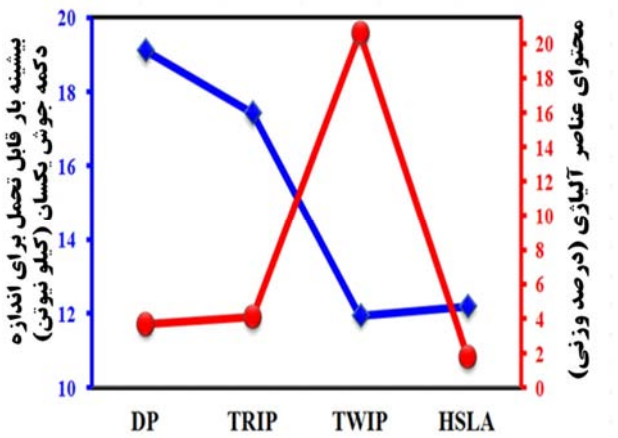
بیشتری را در فولاد ایجاد یا فعال کند، ولی از منظر عملکرد مکانیکی جوش عناصر آلیاژی بیشتر عموماً به چالش های جوشکاری بیشتر و افت جوش پذیری منجر می‌شوند. شکل(8) بوضوح نشان می‌دهد که بیشینه بار قابل تحمل فولاد TWIP در آزمون کشش-برش به مراتب کمتر از فولادهایی نظیر فولادهای DP و TRIP با استحکام مشابه است علی رغم 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 می کند 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 ترک ها و ذوب شدن موضعی در منطقه متاثر از حرارت آن‌ها نیز می شود. مطالعات اخیر [1-2، 5 و 9] بر این نکته دلالت دارد که رد حساسیت به جدایش در اکثر عیوب و ناپیوستگی های 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 دکمه مذاب و انجام فرآیند تمپر درجا توصیه می شود که این موارد از راهگذر اصلاح برنامه جوشکاری قابلیت عملیاتی شدن دارند.

3-3- حساسیت به ترک ها و حفرات

یکی دیگر از چالش های فولادهای پیشرفته خودرویی، حسیاسیت به ترک هایی نظیر ترک ناشی از روی مذاب(LME) برای فولادهای با پوشش پایه روی، ترک هیدروژنی، ترک ذوبی، ترک (حفره) انقباضی (انجمادی) و حفرات بین دندریتی است که در شکل (9) عمده آن‌ها نشان داده شده اند. این ترک‌ها از این منظر که ناپیوستگی هستند، مسیر رشد ترک منجر به شکست را کوتاه تر می کنند 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 عمرخستگی در بارگذاری دینامیکی منجر می‌شود و نهایتا به شکست پیش از موعد جوش منتهی می‌گردند.



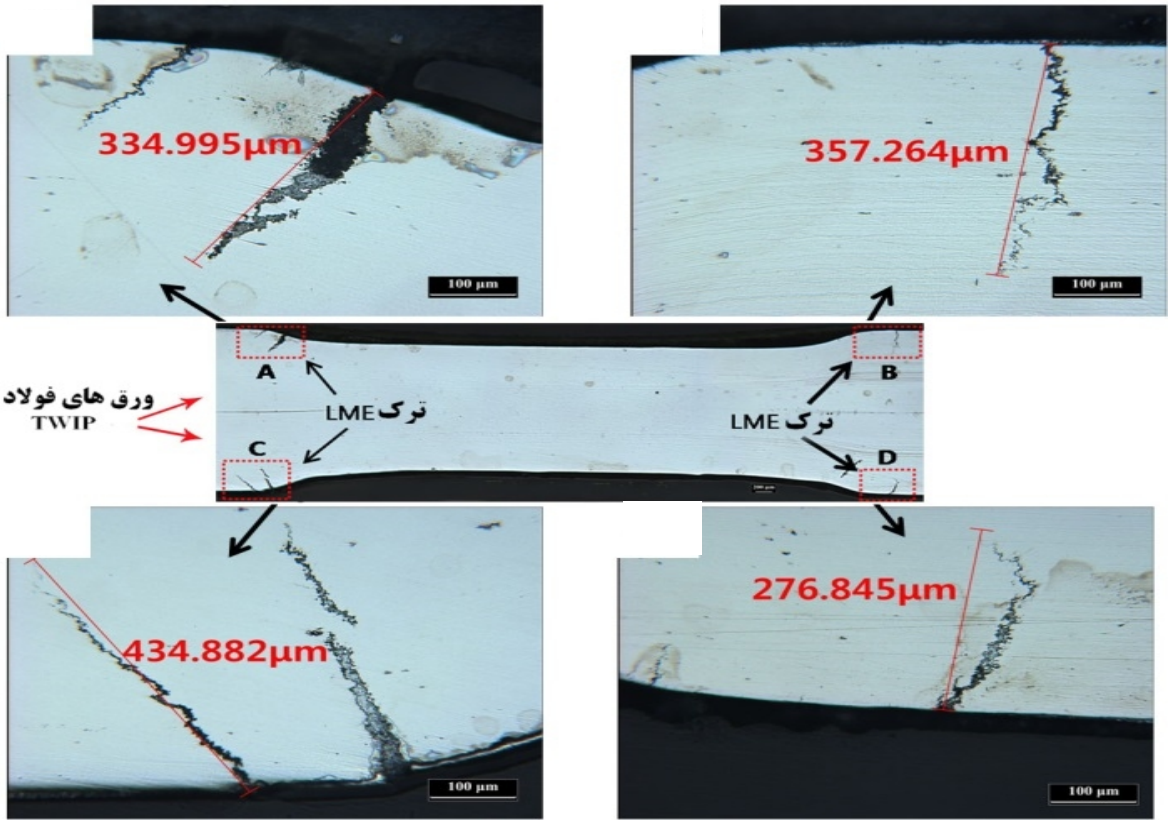
شکل 7- نقشه‌های توزیع عناصر آلیاژی در مرکز منطقه جوش فولاد TWIP حاصل از روش آنالیز FE-EPMA.



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

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

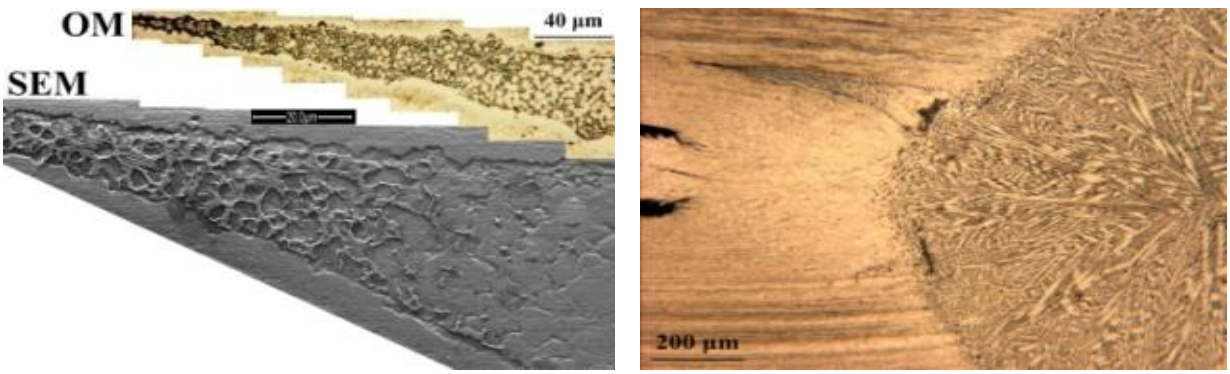
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]



الف



ب



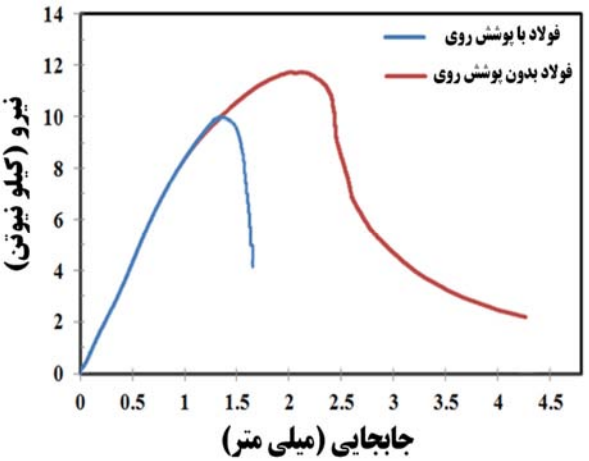
ج

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 خودرویی.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]

روی مذاب، ترک هیدروژنی، ترک ذوبی در منطقه متاثر 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 جوش‌پذیری و کاهش پهنای محدوده مجاز جوشکاری آلیاژ منتهی می‌شوند. 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 متاثر 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 می‌شود 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.

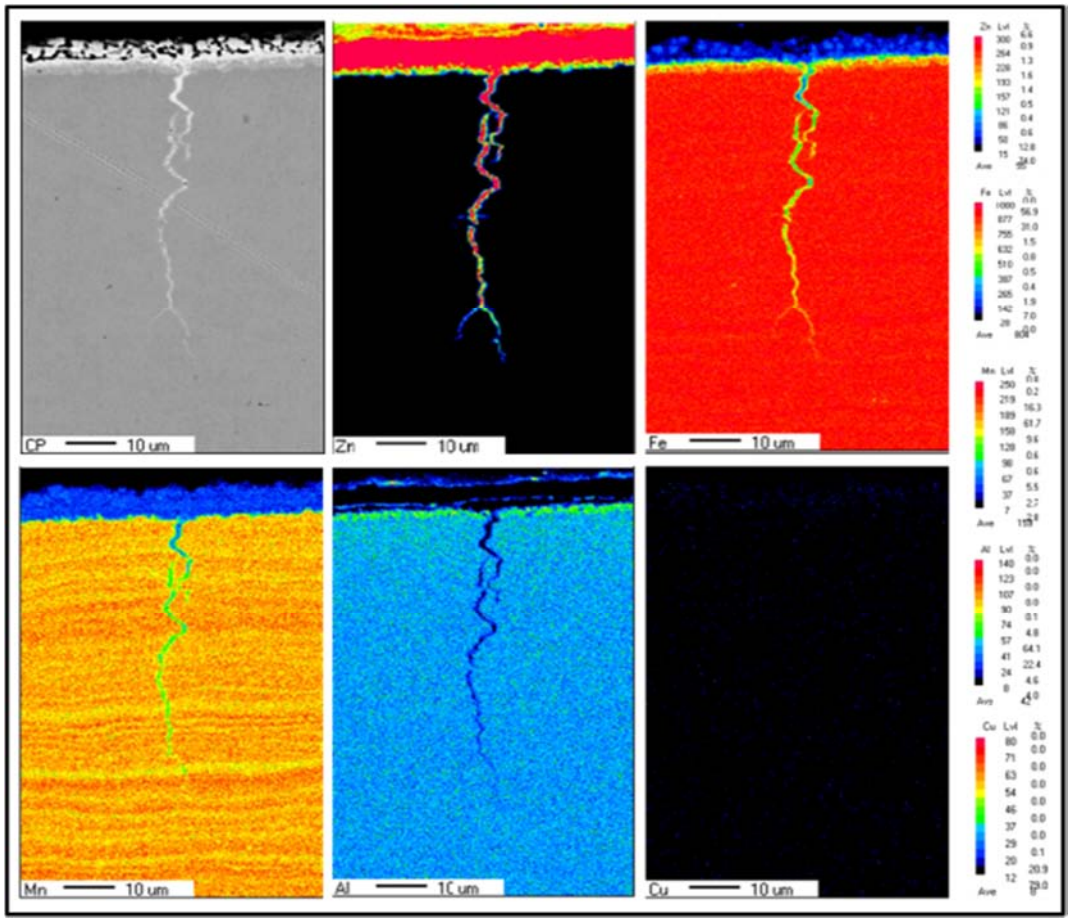
تردی-ترکیدگی ناشی از روی مذاب از این جهت در فولادهای پیشرفته خودرویی شایع است که عمده آن‌ها به جهت افزایش عمر کاری به واسطه لایه ای از روی پوشانده شده اند. این ترکیدگی همانطور که شکل (10) دیده می شود از دو جنبه افت استحکام جوش و افت انعطاف پذیری جوش به شکست زودرس جوش با جذب انرژی کمتر (تردی) منجر می شود. نتایج بررسی آنالیز عنصری این ترک حاکی از این واقعیت است که اینگونه ترک ها بواسطه روی مذاب پرشده اند (شکل(11)).



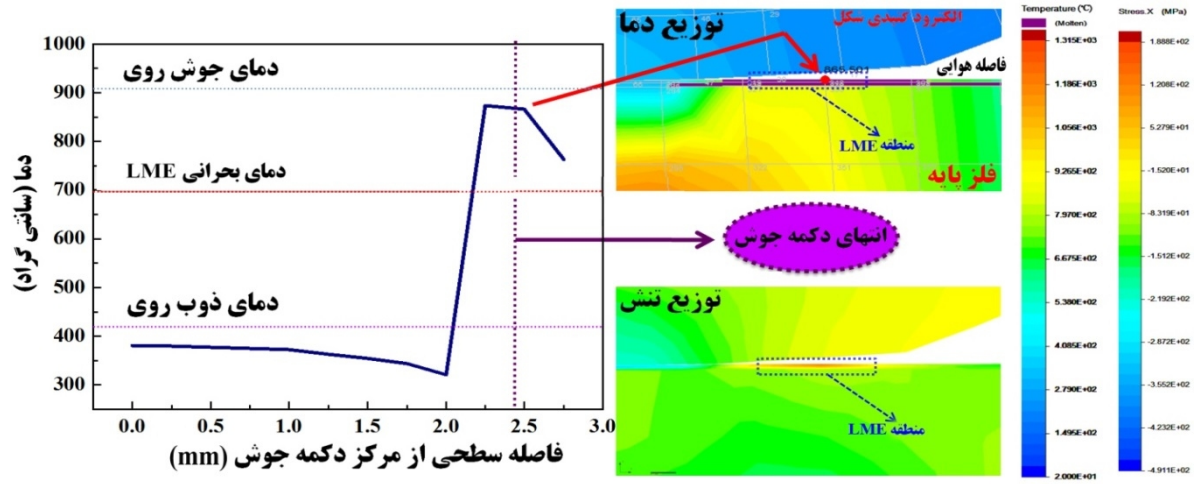
شکل 10- مقایسه نمودار کشش- برش جوش‌های مقاومتی نقطه ای فولاد TWIP با و بدون پوشش روی.

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 می‌آورد. با توجه به منحنی تغیرات دما در شکل (12) در خصوص فراهم آمدن این سه در منطقه مجاور محل تماس الکترود با سطح ورق می توان گفت که در منطقه تماس الکترود به دلیل سردشدن بواسطه الکترود آبگرد 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 می‌زند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]



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 (درتماس با مرکز الکترود) به سمت بیرون در انتهای سیکل جوشکاری و توزیع دما و تنش برای منطقه فوق بحرانی ترکیدگی.

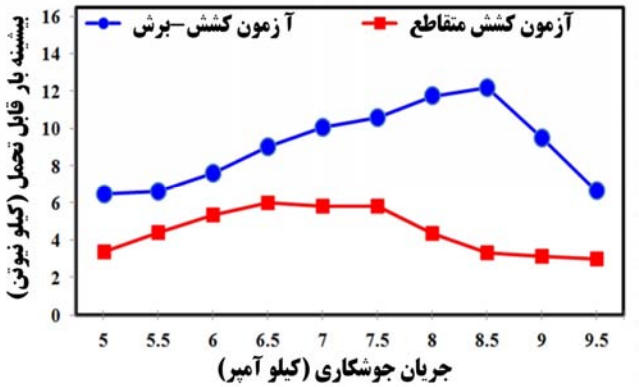
از مهمترین رویکردهای کاهش حساسیت به ترکیدگی‌های اشاره شده در فوق می توان به اصلاح آلیاژ جهت رسیدن به آلیـاژ با حـساسیت کمتر به جـدایـش، آلیـــاژ با مقـاومت ویژه الکتریکی کمتر و آلیاژ با خواص ترموفیزیکی اصلاح شده اشاره نمود. از دیگر راهکارهای مقابله با انواع ترکیدگی ها می‌توان کاهش حرارت ورودی، مدیریت حرارت و تنش در حین سیکل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]

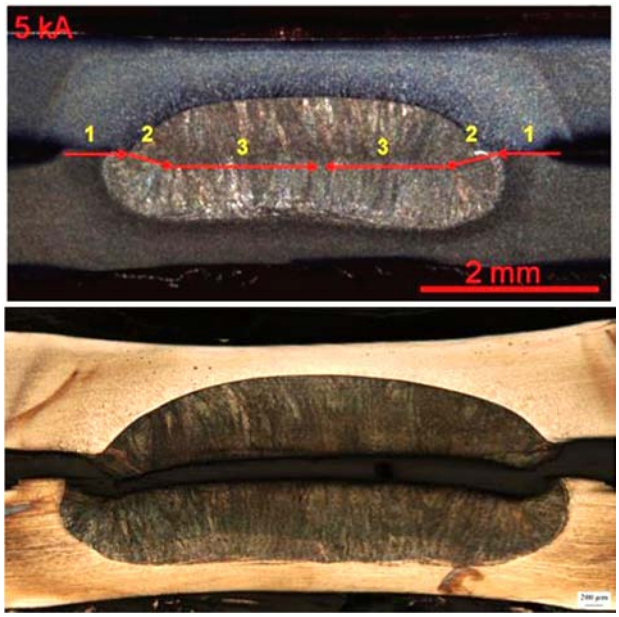
جوشکاری و رشد تدریجی دکمه جوش و استفاده از سیکل‌های جوشکاری دو یا چند پالسه ابداعی اشاره نمود [1-2، 5 و 9].

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 می‌شوند اهمیت قابل توجه جوشکاری نامشابه فولادهای پیشرفته خودرویی را در مقایسه جوشکاری مشابه آن‌ها نشان می دهد. به بیان دیگر می‌توان 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 می‌شود. 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 انعطاف‌پذیری 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 می‌توان گفت که هرچند شکل نامتقارن دکمه جوش در ورود مسیر ترک به دکمه جوش در آزمون 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 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 اجراء 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 آزمون‌های مکانیکی کشش-برش و کشش متقاطع برای جوش‌های 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]

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

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

IF شکست فصل مشترکی، PF شکست محیطی، PIFشکست فصل مشترکی جزیی و EXPبیرون 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 کندگی 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 تغیر فرم آن‌ها و اتساع ترک می شود. این زمان برای مودهای شکست فصل مشترکی و کندگی در شکل (10) به ترتیب 37 و 141 ثانیه است. این زمان‌ها بر این مهم دلالت دارد که شکست فصل مشترکی در مقایسه با مود کندگی دکمه جوش شکست سریعتر و با جذب انرژی بسیار کمتری را تجربه می کند. به این دلیل وقوع مود شکست کندگی 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 کندگی 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 چالش‌های 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 دندریتی، 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 سریع‌تر و با جذب انرژی کمتر در جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولادهای پیشرفته خودرویی می شوند. بر این اساس می‌توان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]

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، ناپیوستگی ها و ناهمگونی های شیمیایی در ارتباط است [9].

3-6- ضعیف شدن استحاله‌ای و حساسیت ها در فرایندهای جوشکاری قوسی

از دیگر چالش های فولادهای پیشرفته خودرویی می توان به مواردی نظیر افت عملکرد مکانیکی مناطق جوش در اثر رخداد استحاله در آن مناطق اشاره نمود. از مهمترین آن‌ها می توان به نرم شوندگی مارتنزیت در منطقه متاثر از حرارت فولادهای DP و TRIP، نرم شوندگی در اثر پدیده‌های مرتبط با آنیل، نرم‌شوندگی ناشی از رشد و ذوب رسوبات و مرز دانه ها در این منطقه و منطقه ذوب جزیی اشاره نمود. در خصوص بکارگیری ورق های ضخیم تر از جنس فولادهای پیشرفته خودرویی در بدنه یا دیگر اجزای خودرو، استفاده از روش های جوشکاری قوسی و لیزر معمول است که از مهمترین چالش‌های آن‌ها می توان 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 جوش ها اشاره نمود [10-12].

4- نتیجه‌گیری

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 خودرویی را متاثر می کنند که این امر کاربرد این فولادها را در صنعت خودرو با چالش مواجه می کند. برخی از مهمترین حساسیت‌های این فولادها در فرآیند 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 جوشکاری نامشابه فولادهای پیشرفته خودرویی و حساسیت به شکست فصل مشترکی آن‌ها. این موارد محدوده منحنی جوش‌پذیری فولاد را محدود می کنند و مانع از انتقال قابلیت‌های برجسته مکانیکی این فولادها به جوش های آن‌ها می‌شوند. این مقاله به پدیده شناسی این چالش ها 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 چالش ها می باشند که ضرورت بازطراحی آلیاژ بر مبنای پاسخ آن به فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه ای یا بکارگیری فرآیندهای جوشکاری مقاومتی نقطه ای اصلاح شده یا چندپالسه را برای استفاده از قابلیت های برجسته مکانیکی این فولادها در بدنه خودرو نشان می دهد.

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 twining 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[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 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19]