

بررسی روند جوشکاری مقاومتی فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si بر روی

بدنه خودرو

مهران جعفرپور مال امیری^۱، حسن کاوسی بلوتکی*^۱ گروه مهندسی مکانیک، واحد ایذه، دانشگاه آزاد اسلامی، ایذه، ایران

Using Al-Si Coated Hot-Stamped Boron Steel and investigating its resistance spot welding process for Automobile Body

Mehran Jafarpour Mall Amiri¹, Hasan Kavooosi Balootaki^{*1}¹ Department of Mechanical engineering, Izeh Branch, Islamic Azad University, Izeh, Iran

Abstract

In recent years, following the attention of the automobile industry to reduce the weight of cars, the use of alternative materials with lower weight and better mechanical properties has been the focus of these companies. In particular, hot-stamped boron steel has been considered as an alternative material due to its good mechanical properties. This material is used to reduce the weight of the frame due to its reduced thickness, excellent performance and good performance. Considering that hot stamping of boron steel causes oxidation and carbon deposition on the surface, the use of surface coating is necessary to prevent these cases. This coating layer itself causes side problems such as the narrowing of the weldable range and also the reduction of mechanical properties during resistance welding. Therefore, in this study, we introduce research performed to improve the weldability of Al-Si coated hot-stamped boron steel in terms of the material and process.

Keywords: hot-stamping, Boron steel, Resistance spot welding, Al-Si coating layer, Weldability, Mechanical properties, Weldable current range

Received: 12/10/2022

Accepted: 12/12/2022

چکیده

در سالهای اخیر و در پی توجه صنایع خودروسازی به کاهش وزن خودروها، استفاده از مواد جایگزین با وزن کمتر و خواص مکانیکی بالاتر مورد توجه این شرکتها قرار گرفته است. به طور خاص، ماده جایگزین فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با توجه به خواص مکانیکی خوبی که دارد مورد توجه قرار گرفته است. این ماده به دلیل عملکرد عالی، کاهش وزن فریم خودرو که به دلیل کاهش ضخامت ورق حاصل می شود و همچنین خاصیت افزایش طول قابل قبولی که دارد مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به اینکه فرآیند ضرب زنی داغ فولاد حاوی بور باعث تشکیل رسوبات اکسیداسیون و همچنین کربن زدایی سطح می شود، استفاده از پوشش سطحی برای جلوگیری از این مشکلات ضروری است. این لایه پوششی خود باعث ایجاد مشکلات جانبی مانند باریک شدن محدوده جریان قابل جوش و همچنین کاهش خواص مکانیکی در حین جوشکاری مقاومتی می شود. از این رو، در این مطالعه، تحقیقات انجام شده برای بهبود جوش پذیری فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si از نظر مواد و فرآیند معرفی خواهد شد.

واژه های کلیدی: ضرب زنی داغ، فولاد حاوی بور، جوش نقطه ای مقاومتی، جوش پذیری، لایه پوشش Al-Si، محدوده جریان قابل جوش

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

* نویسنده مسئول: حسن کاوسی بلوتکی

نشانی: ایذه، گروه مکانیک، واحد ایذه، دانشگاه آزاد اسلامی

پست الکترونیکی: Hakavoosi@yahoo.com

۱. مقدمه

در سالهای اخیر و در پی توجه صنایع خودروسازی به کاهش وزن خودروها جهت کاهش گازهای خروجی از آگروز و بهره‌وری بهتر از سوخت، استفاده از مواد جایگزین با وزن کمتر و خواص مکانیکی بالاتر مورد توجه این شرکتها قرار گرفته است [۱-۳]. به منظور کاهش وزن بدنه خودرو، مواد تشکیل دهنده قطعات خارجی بدنه مانند سپرها و کاپوت‌ها با پلاستیک تقویت شده با فیبر کربن (CFRP) و آلیاژ آلومینیوم جایگزین می‌شوند، در حالی که ستون A و ستون B (ستونهای اصلی بدنه خودرو) که مستقیماً با ایمنی سرنشین مرتبط هستند، با فولاد فوق مستحکم جایگزین می‌شوند [۲، ۴، ۵]. انواع فولادهای فوق مستحکم عبارتند از: فولاد TWIP (فولاد با پلاستیسیته القایی دوقلو)^۱، فولاد TRIP (فولاد با پلاستیسیته حاصل از استحاله)^۲ و فولاد دو فازی^۳. به طور خاص، فولاد حاوی بور^۴ ضرب داغ شده^۵ با استحکام کششی ۱/۵ گیگا پاسکال یا بالاتر به عنوان یک ماده جایگزین برای دستیابی به کاهش وزن بدنه خودرو با کاهش ضخامت و همچنین کارایی و خاصیت ازدیاد طول قابل قبول مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴-۶]. فولاد حاوی بور ضرب داغ شده از آستنیت‌زدن فولاد حاوی بور با سختی بالا در دمای بالای ۹۵۰-۸۵۰ درجه سانتیگراد یا بالاتر به مدت ۶-۴ دقیقه و به دنبال آن یک فرآیند ضرب داغ، شامل قالب‌گیری همزمان و خنک کاری سریع به مدت ۱۰-۶ ثانیه به دست می‌آید [۲]. به منظور جلوگیری از بروز مشکلاتی مانند اکسیداسیون سطح، مواد خارجی و کربن زدایی در یک محیط با دمای بالا، سطح فولاد حاوی بور در معرض گالوانیزه شدن غوطه وری-داغ^۶ یا پوشش Al-Si قبل از فرآیند ضرب داغ قرار می‌گیرد [۲، ۷، ۸]. بر روی بدنه خودرو جایی که مشکلات عدیده‌ی موجود در روش جوشکاری مقاومتی نیاز به برطرف شدن دارند و بیش از ۸۰ درصد از فرآیند مونتاژ بدنه را تشکیل می‌دهد، اعمال فرآیند جوشکاری فولاد

حاوی بور ضرب داغ شده ضروری است. مطالعات قبلی گزارش داده‌اند که فولاد حاوی بور ضرب داغ شده به دلیل ساختار نرم در ناحیه جوش، دارای محدوده جریان قابل جوش باریک تری در مقایسه با فولاد نرم یا فولاد با استحکام بالا که خواص مکانیکی آن تضعیف شده باشد است [۹-۱۱]. علاوه بر این، فولاد حاوی بور گالوانیزه گرم با شکنندگی فلز مذاب در طول جوشکاری مقاومتی همراه است، در حالی که لایه اکسید باعث گرمایش موضعی می‌شود [۱۲-۱۴]. از سوی دیگر، گزارش شده است که شکنندگی فلز مذاب در فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si رخ نداده و جوش‌پذیری مناسبی را بروز می‌دهد [۱۵]. با این حال، لایه پوشش Al-Si به دلیل وجود لایه اکسیدی در بیرونی‌ترین سطح، لایه ضخیم آلیاژی و استحکام بالای ماده به بهبود قابلیت جوشکاری نیاز دارد [۴، ۷]. اخیراً، تحقیقاتی با تمرکز بر روی مواد و فرآیندهای بهبود جوش‌پذیری در طول جوشکاری مقاومتی فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si در حال انجام است. از نظر جنس، خواص جوشکاری را می‌توان با برداشتن لایه پوشش روی سطح از طریق پرداخت مکانیکی یا حکاکی شیمیایی تا حدی بهبود بخشید، اما حذف لایه پوشش روی سطح ماده ممکن است منجر به خوردگی شود. فرآیند حذف باعث کاهش بهره‌وری خط تولید می‌شود. در همین حال، مطالعاتی صورت گرفته است که سعی دارد فرآیند ضرب داغ را با کنترل ساختار لایه بین فلزی از طریق بهینه‌سازی شرایط بهبود دهد [۸]. از نظر بهبود دادن فرآیند، روشی برای بهبود کیفیت جوش با کنترل شکل موج جوشکاری به عنوان یک جایگزین عملی با کاربرد میدانی بالا گزارش شده است [۱۶]. بنابراین، این مطالعه با هدف تحقیق بر بهبود دادن جوش‌پذیری فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si با کنترل لایه پوششی در حین جوشکاری مقاومتی، از نظر جنس و فرآیند می‌باشد.

⁴ Boron Steel

⁵ Hot Stamped

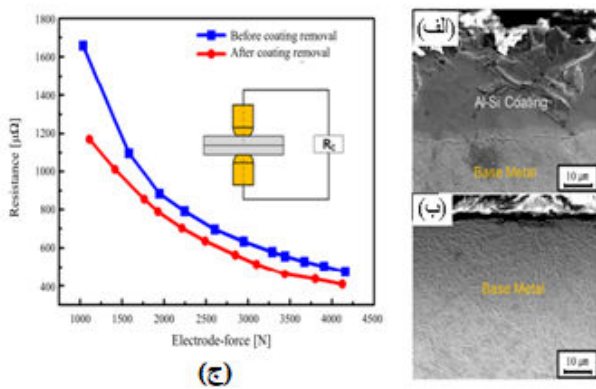
⁶ Hot-Dip

¹ TWIP: Twinning Induced Plasticity

² TRIP: transformation-induced plasticity

³ Dual-Phase

شکل ۲ تغییر مقاومت را در مورد تغییر نیروی الکتروود در حضور یا عدم حضور لایه پوشش Al-Si از فولاد حاوی بور ضرب داغ شده نشان می‌دهد. با افزایش نیروی الکتروود، مقاومت کلی به صورت خطی کاهش می‌یابد. در حضور لایه پوششی، مقاومت کلی علیرغم افزایش نیروی الکتروود نسبت به شرایط بدون لایه پوشش کاهش می‌یابد، اما تفاوت در مقاومت باقی می‌ماند. به عبارت دیگر افزایش مقاومت ناشی از لایه پوششی (لایه بین فلزی) است و حتی اگر نیروی الکتروود افزایش یابد، برای کاهش مقدار مقاومت محدودیت وجود دارد. دلیل این امر این است که سیلیس، یکی از اجزای لایه پوشش، مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به آهن دارد و در نتیجه در هنگام آستنیت‌زدن، مواد بین فلزی مانند Fe-Al-Si و Fe-Al با مقاومت بالاتر از آهن تشکیل می‌شود [۹،۲۳]. بنابراین، لایه پوشش Al-Si به عنوان عامل ایجاد گرمای بالا در طول جوشکاری مقاومتی عمل می‌کند و در نتیجه دفعات بیرون راندن را افزایش می‌دهد [۷،۱۴،۱۸].



شکل ۲- اثر پوشش Al-Si بر فولاد حاوی بور داغ، (الف) سطح مقطع صیقلی قبل از برداشتن پوشش (ب) سطح مقطع صیقلی پس از برداشتن پوشش (ج) مقاومت قبل و بعد از حذف پوشش [۲۲]

نگامی که ذرات فلز به دلیل بیرون راندن به سطح چسبیده می‌شوند، مشکلات مختلفی از جمله کاهش کیفیت پوشش و کاهش راندمان ایجاد می‌کنند. همانطور که فلز مذاب مواد پایه به دلیل بیرون راندن به خارج از قطعه تخلیه می‌شود، منافذی در مرکز قطعه ایجاد می‌شود که خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد [۶،۲۴،۲۵]. بنابراین، فرآیندی با قابلیت کنترل لایه پوشش Al-Si به منظور بهبود ویژگی‌های

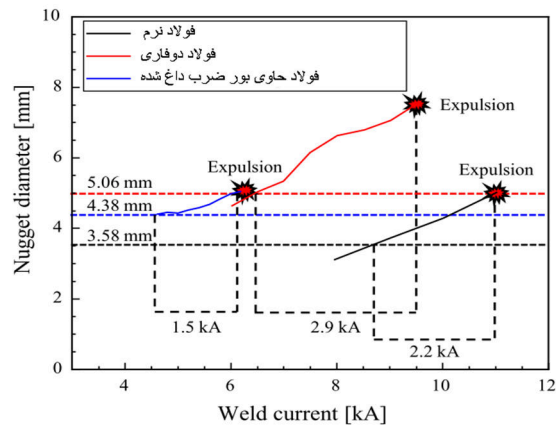
۲. ویژگی های جوشکاری مقاومتی فولاد حاوی

بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si

۱. ۲. قابلیت جوشکاری فولاد حاوی بور ضرب داغ

شده با پوشش Al-Si

قابلیت جوشکاری در حین جوشکاری مقاومتی برای هر نوع صفحه‌ای به طور کلی با محدوده جریان قابل جوش ارزیابی می‌شود که نشان دهنده محدوده حداقل جریان جوش (که ضخامت قطعه یا ضخامت دکمه را تعیین می‌کند (به عنوان مثال، $\sqrt{5t}$ یا $\sqrt{4t}$ ، t =ضخامت صفحه)) تا حداکثر جریان جوش است [۱۷،۱۸]. شکل ۱ محدوده جریان قابل جوش فولاد کم کربن، فولاد دوفازی (DP) و فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si را نشان می‌دهد. فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si به دلیل مقاومت تماسی بالا (کمپلکس لایه میان فلزی و لایه اکسید)، مقاومت در برابر افزایش حجم بالا (افزودن عناصر آلیاژی) و استحکام بالا در مقایسه با سایر فولادها، قطعات را سریعتر تولید میکند. بنابراین، بیرون راندن در بخش جریان کم رخ می‌دهد و در نتیجه یک محدوده کم جریان قابل جوش ایجاد می‌شود. با محدوده شدن جریان قابل جوش، دفع به طور تصادفی حتی در شرایطی که باعث بیرون زدگی جوش نمی‌شود، رخ می‌دهد و باعث کاهش قابلیت جوشکاری و کیفیت جوش می‌شود [۲۱].

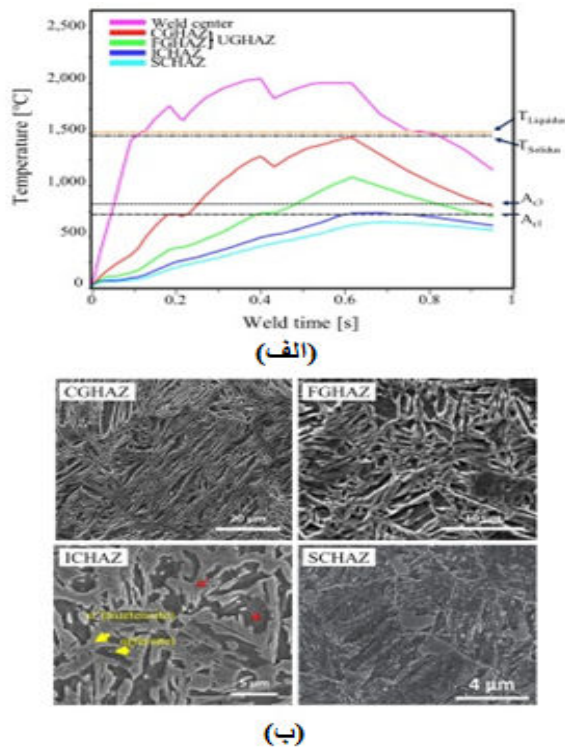


شکل ۱- محدوده جریان قابل جوش: ضخامت صفحه فولاد نرم: ۰/۸ میلی‌متر، ضخامت صفحه فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش:

۱/۲ میلی‌متر، ضخامت صفحه فولاد دوفاز: ۱/۶ میلی‌متر

[۱۴،۱۹،۲۰]

شکل ۴ توزیع دمای ناحیه جوش و ریزساختار ناحیه جوش را در مورد زمان جوش در حین جوشکاری مقاومتی از طریق برنامه شبیه سازی نشان می‌دهد. ساختارهای مارتنزیتی در منطقه متأثر از حرارت درشت دانه^۱ و منطقه متأثر از حرارت ریز دانه^۲ که تا دمای خط انجماد گرم شده مشاهده می‌شود، در حالی که فریت و مارتنزیت در منطقه متأثر از حرارت بین بحرانی^۳ که تا دمای تبدیل فاز آستنیت گرم شده است، قرار گرفته‌اند (A3). ساختارهای مارتنزیتی خشی شده در منطقه تحت تاثیر حرارت زیر بحرانی^۴، مشاهده می‌شود.



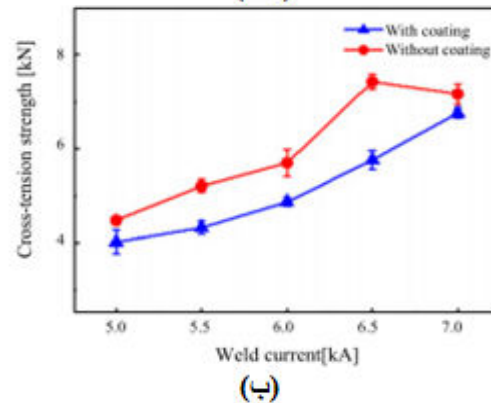
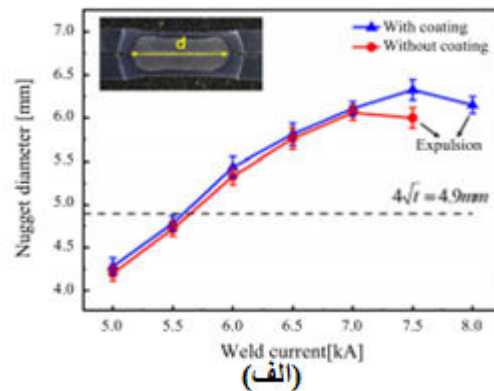
شکل ۴- (الف) مشخصات دما در مرکز قطعه جوش و چهار مکان دیگر در HAZ، (ب) ریزساختار هر HAZ [۲۷]

شکل ۵ نمودار توزیع سختی ویکرز را در ناحیه جوش فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si نشان می‌دهد. در نتیجه مقایسه ریزساختار نشان داده شده در شکل ۴ با توزیع سختی، می‌توان همبستگی بین ریزساختار و خواص مکانیکی در ناحیه جوش را تایید کرد. در حالی که ناحیه تحت تاثیر گرمای بحرانی بالا^۵ و ICHAZ سختی

^۴ SCHAZ: Sub-Critical Heat Affected Zone

^۵ UCHAZ: Upper-Critical Heat Affected Zone

جوشکاری با کاهش بیرون زدگی ضروری به نظر می‌رسد. شکل ۳ نتایج مقایسه اندازه ضخامت قطر دکمه جوش و خواص مکانیکی را با توجه به وجود یا عدم وجود لایه پوششی نشان می‌دهد. ضخامت قطعه و استحکام کشش متقاطع با افزایش جریان جوش بدون توجه به وجود یا عدم وجود لایه پوشش افزایش می‌یابد. در شرایط فعلی مشابه، ضخامت قطعه در فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با لایه پوششی به دلیل تولید حرارت بالا کمی بیشتر می‌گردد، اما استحکام کشش متقاطع آن حدود ۴۰-۱۰٪ کمتر می‌گردد. هنگامی که لایه پوشش Al-Si در ناحیه پیوند تاج (قسمت بیرونی) در طول جوشکاری مقاومتی باقی می‌ماند، گزارش شده است که در آزمایش‌های کششی به عنوان یک بریدگی عمل می‌کند و در برابر تنش متمرکز زود شکسته می‌شود و در نتیجه بر استحکام تأثیر می‌گذارد [۲۲، ۲۴].



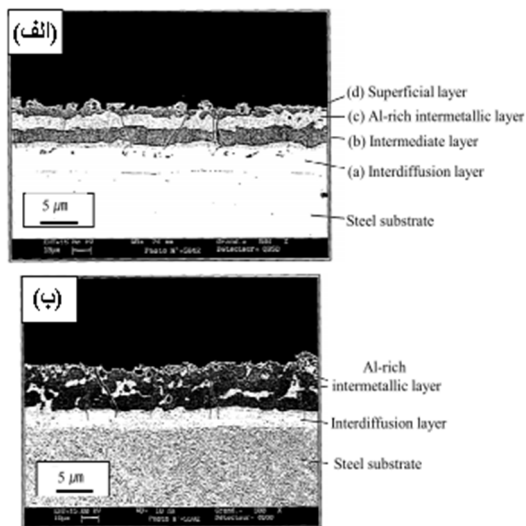
شکل ۳- پوشش Al-Si بر روی فولاد حاوی بور ضرب داغ با جریان جوش مختلف، (الف) قطر دکمه جوش، (ب) استحکام کشش متقاطع [۲۲]

^۱ CGHAZ: Coarse-Grained Heat Affected Zone

^۲ FGHAZ: Fine Grain Heat Affected Zone

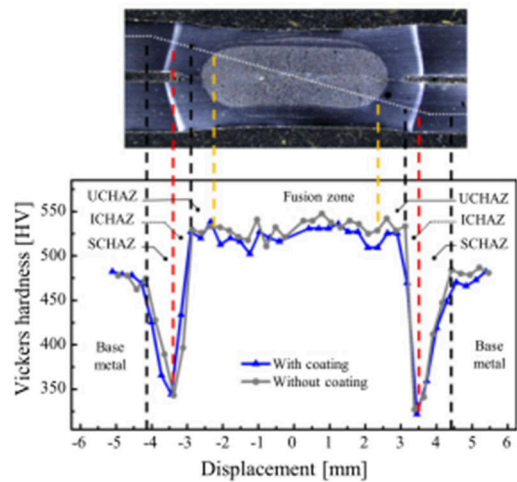
^۳ ICHAZ: Inter-Critical Heat Affected Zone

لایه میانی، آهن، آلومینیوم و سیلیس در لایه بین فلزی غنی از آلومینیوم ترکیب می شوند [۲۸، ۲۹]. لایه پوششی با جوش پذیری بهبود یافته شامل یک لایه سطحی، یک لایه بین فلزی غنی از آلومینیوم، یک لایه میانی و یک لایه نفوذی به ترتیب از بیرونی ترین لایه تا داخلی ترین لایه بود که لایه بین فلزی غنی از آلومینیوم تشکیل یک لایه پیوسته را می دهد. لایه پوشش با جوش پذیری ضعیف از یک لایه آلیاژ بین فلزی از نوع جزیره ای غنی از آلومینیوم^۱ و یک لایه انتشار میانی تشکیل شده است [۲۹، ۳۰]. به عبارت دیگر، تفاوت هایی در ترکیب لایه ای لایه پوشش و شکل لایه بین فلزی غنی از آلومینیوم وجود دارد. اگرچه علت بهبود جوش پذیری به وضوح مشخص نشده است، اما گزارش شده است که لایه بین فلزی غنی از آلومینیوم و لایه سطحی با تأثیر خواص منحصر به فرد و زبری آن بر مقاومت لایه پوشش تأثیر می گذارد. علاوه بر این، مقاومت تماس زمانی افزایش می یابد که یک پیوند بین فلزی با آهن و آلومینیوم وجود داشته باشد. بنابراین، به نظر می رسد جوش پذیری به دلیل تأثیر لایه سطحی و لایه بین فلزی غنی از آلومینیوم بر جریان، گرمایش سطح و تشکیل قطعه در مراحل اولیه جوشکاری مقاومتی بهبود یافته است.



شکل ۶- لایه ها در فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si (22MnB5) پس از عملیات حرارتی و مهر زنی [۲۹]، (الف) نتایج برتر در RSW، (ب) نتایج پایین تر در RSW 28

بالاتری نسبت به فلز پایه نشان می دهند، در ناحیه SCHAZ سختی را نشان می دهد که حدود ۲۶٪ کمتر از فلز پایه است. برخی از مطالعات نشان می دهند که δ-فریت در ناحیه SCHAZ رسوب کرده و خواص مکانیکی جوش کاهش می یابد. به عبارت دیگر، ماده مذاب به دلیل تفاوت در ضریب انبساط حرارتی و نقطه ذوب لایه پوشش به ناحیه پیوند تاج رانده می شود. بر این اساس، در SCHAZ نسبت به دمایی که در آن فریت و سیمانیت تشکیل می شود دارای سابقه حرارتی کمتریست (Ac1)، نرم شدن مرز همجوشی متشکل از فاز δ-فریت و ساختار مارتنزیت تمپر شده رخ می دهد و سختی و یکپارگی را کاهش می دهد.



شکل ۵- نمایه سختی برای جوش ساخته شده با جریان جوش ۶ کیلو آمپر در فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با روکش Al-Si [۲۷]

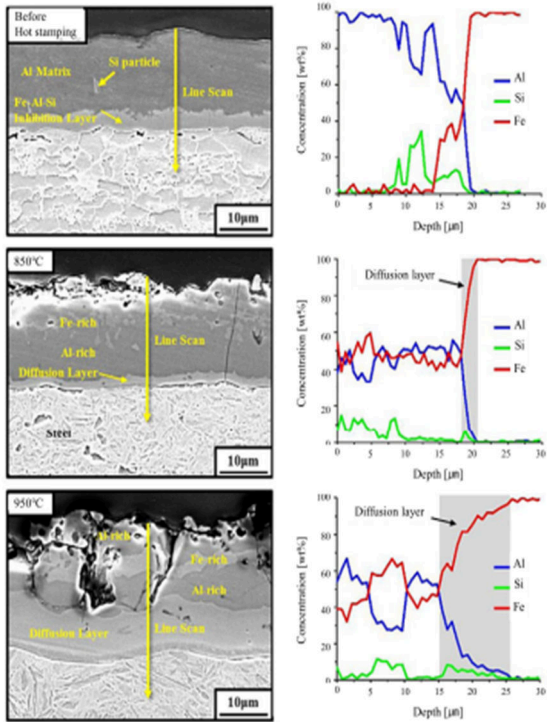
۲.۲. روند بهبود جوش پذیری از نظر مواد

لایه پوششی Al-Si بر روی فولاد حاوی بور ضرب داغ شده به شکل یک ترکیب پیچیده بین فلزی تشکیل می شود زیرا آهن ماده پایه در طی آستنیت شدن در Al و Si که اجزای لایه پوشش هستند پخش می شود [۲۶]. بنابراین، ترکیب و ضخامت لایه بین فلزی در لایه پوشش را می توان با ترکیب متغیرهایی مانند دما، سرعت افزایش دما و زمان عملیات حرارتی کنترل کرد.

شکل ۶ سطح مقطع لایه پوشش را با جوش پذیری بهبود یافته و سطح مقطع لایه بدون پوشش را در حین جوشکاری مقاومتی نشان می دهد. آهن و آلومینیوم در لایه سطحی و

^۱ Al-Rich

مشاهده نشد. به عبارت دیگر، گزارش شده است که به دلیل لایه انتشار ضخیم تشکیل شده در شرایط عملیات حرارتی 950°C ، بیرون راندن جوش حتی در جریان جوش کم رخ می دهد و ویژگی های جوشکاری حرارتی ضعیفی را نشان می دهد [۲۳].



شکل ۷- میکروگراف مقطعی SEM و مشخصات اسکن خط عنصری پوشش با 30MnB5 قبل از ضرب داغ در 850°C و 950°C [۲۳]

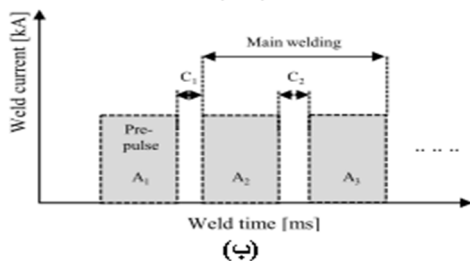
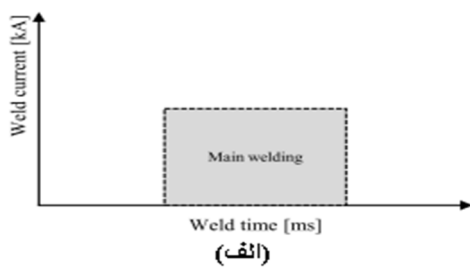
با ترکیب نتایج دو مطالعه که جوش پذیری را با توجه به نرخ افزایش دما و دمای عملیات حرارتی برای آستنیت شدن فولاد حاوی بور ضرب داغ شده ارزیابی می کنند، به نظر می رسد که می توان از طریق کنترل لایه پوشش از نظر ماده با القای تشکیل یک لایه بین فلزی غنی از آلومینیوم در لایه پوشش یا بهینه سازی شرایط فرآیند ضرب داغ برای به حداقل رساندن کاهش ضخامت لایه انتشار، خاصیت جوش پذیری را بهبود بخشید.

شکل لایه بین فلزی غنی از آلومینیوم توسط نرخ افزایش دما در طول عملیات حرارتی آستنیتیزه کنترل می شود. با افزایش دما با نسبت ۳۰ درجه سانتیگراد در ثانیه به 930°C درجه سانتیگراد، می توان یک لایه آلیاژی پیوسته ایجاد کرد و هنگامی که دما با نسبت ۱۰ درجه در ثانیه افزایش یافت، یک لایه آلیاژی جزیره ای شکل تشکیل می شود. در آینده، بررسی علت بهبود جوش پذیری بسته به شکل لایه بین فلزی ضروری خواهد بود.

شکل ۷ سطح مقطع فولاد حاوی بور ضرب داغ شده (30MnB5) را روی دمای عملیات حرارتی آستنیت و نتیجه آنالیز EDS نشان می دهد. محتوای آلومینیوم قبل از عملیات حرارتی در سراسر بیرونی ترین لایه به مواد پایه توزیع شد و یک لایه بازدارنده از آلومینیوم، آهن و سیلیس تشکیل شد. لایه بازدارنده برای جلوگیری از واکنش سریع آهن در ماده پایه به لایه پوشش عمل می کند، اما لایه بازدارنده در طول عملیات حرارتی از بین می رود، در حالی که آهن از مواد پایه به لایه پوشش پخش می شود تا یک لایه انتشار ایجاد کند [۲۳]. هنگامی که عملیات حرارتی در دمای نسبتاً بالا انجام می شود، درجه آلیاژسازی توسط انتشار افزایش می یابد [۲۸]. بنابراین، یک لایه انتشار با ضخامت حدود $5\ \mu\text{m}$ در طول آستنیت شدن در دمای 850°C تشکیل شد، اما یک لایه انتشار با ضخامت $10\ \mu\text{m}$ از طریق عملیات حرارتی در دمای 950°C تشکیل شد.

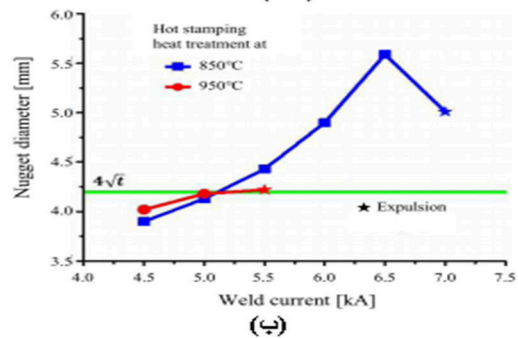
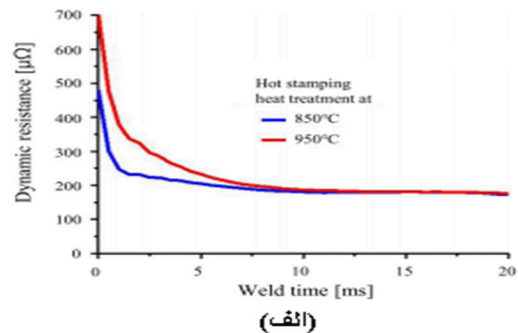
شکل ۸ منحنی مقاومت دینامیکی و محدوده جریان قابل جوش را در دمای آستنیت برای مقایسه قابلیت جوشکاری با توجه به ضخامت لایه انتشار نشان می دهد. در شکل ۸-الف، لایه پوشش ذوب می شود و با افزایش زمان جوش، علی رغم تفاوت های جزئی در مقاومت دینامیکی تماس اولیه به دلیل تأثیر لایه پوشش، رفتار مشابهی از خود نشان می دهد. شکل ۸-ب محدوده جریان قابل جوش را بر اساس آستنیت کردن نشان می دهد. محدوده جریان قابل جوش حدود $1/8$ کیلو آمپر در شرایط عملیات حرارتی 850°C بود، در حالی که محدوده جریان قابل جوش تضمین شده ای تحت شرایط عملیات حرارتی 950°C

اعمال می‌کند و شکل ۹-ب شرایط کنترل شکل موج پالس دو مرحله‌ای برای کنترل جریان جوش شامل یک پیش پالس به شکل یک پالس است. در مورد شرایط کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالس دو مرحله‌ای، برخلاف کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالس یک مرحله‌ای، دو یا چند پالس با جریان و زمان جوش کنترل شده اعمال می‌شود، که در آن هر پالس نقش مشخصی را ایفا می‌کند، پالس اول برای کنترل یا حذف لایه پوشش و پالس دوم برای جوش اصلی جهت تولید قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۹- (الف) جوش سنتی (۱ مرحله‌ای)، (ب) جوش پالس- کنترل

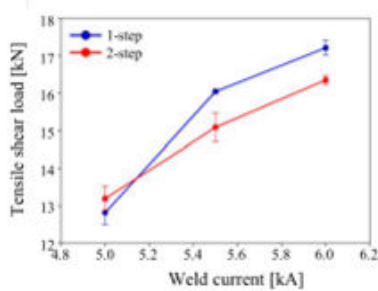
شکل ۱۰ نتایج مقایسه ضخامت قطعه و بار برشی کششی کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالس یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای را نشان می‌دهد. هنگام اعمال کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالس دو مرحله‌ای در همان جریان جوشکاری، ضخامت قطعه بزرگتر از ضخامتی بود که توسط کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالس یک مرحله‌ای تولید می‌شد. در مورد بار برشی کششی، کنترل شکل موج جریان جوشکاری یک مرحله‌ای با ضخامت قطعه نسبتاً کوچک دارای بار کششی بالاتری نسبت به کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالس دو مرحله‌ای بود و همچنین در شکل شکست نیز تفاوت وجود داشت (شکل ۱۱).



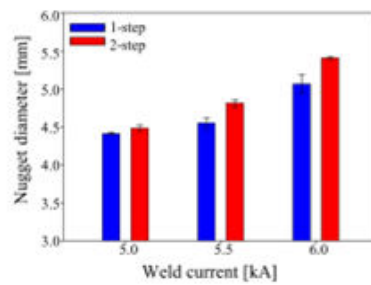
شکل ۱۰- ۸- Al-10% Si پوشش داده شده 30MnB5 عملیات حرارتی در دمای ۸۵۰°C و ۹۵۰°C، (الف) منحنی مقاومت دینامیکی با زمان جوش برای جوشکاری نقطه ای مقاومت، (ب) محدوده جریان قابل جوش [۲۳]

۳.۲. روند بهبود جوش پذیری از نظر فرآیند

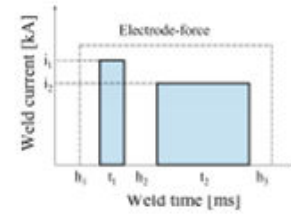
از نظر مواد، جوش پذیری با کنترل ترکیب یک لایه خاص در لایه پوشش بهبود یافت، اما مشکلاتی مانند اختلاط مواد خارجی و ضخامت ناهموار لایه پوشش ممکن است اغلب در طول ساخت فولاد با غوطه وری داغ رخ دهد. علاوه بر این، ممکن است کنترل لایه پوشش به دلیل عوامل محیطی مختلف در فرآیند عملیات حرارتی دشوار باشد. بر این اساس، اخیراً تحقیقاتی در مورد فناوری کنترل رفتار ذوب لایه پوششی به منظور بهبود جوش پذیری در فرآیند تولید مواد ضرب داغ شده انجام شده است [۱۰، ۱۶، ۲۷، ۳۶]. این روشی برای بهینه‌سازی خواص جوشکاری از طریق کنترل متغیر فرآیند در طول جوشکاری مقاومتی، با نیروی الکتروود، جریان جوش و زمان جوش به عنوان متغیر است. یک مثال معمولی تکنیکی برای کنترل شکل موج جریان جوشکاری است که جریان جوش و زمان جوش را کنترل می‌کند. شکل ۹ انواع کنترل شکل موج جریان جوشکاری را با توجه به زمان جوش نشان می‌دهد. شکل ۹-الف کنترل شکل موج پالس یک مرحله‌ای است که جریان پیوسته را



(ب)



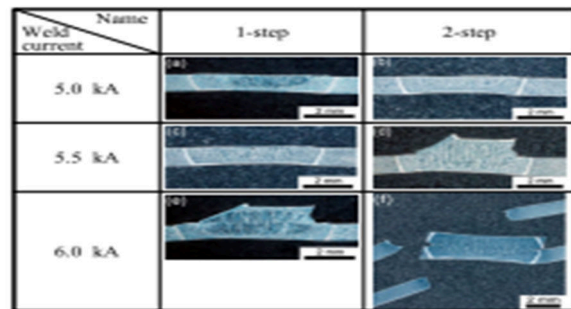
(ف)



شکل ۱۰- الف) قطر قطعه برنامه جوش یک مرحله ای و دو مرحله ای (ب) خواص مکانیکی برنامه جوش یک مرحله ای و دو مرحله ای [۱۰]

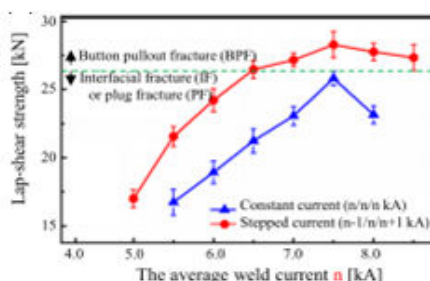
جوش مشاهده می شود [۳۸]. گزارش شده است که مقدار فریت و کاربید تولید شده در هنگام جداسازی افزایش می یابد و این ناحیه به علت خواص مکانیکی پایین به عنوان یک بخش ضعیف شناخته می شود [۳۹]. بنابراین، در رابطه بین حالت شکست شناخته شده و خواص مکانیکی، لازم است فرآیند با در نظر گرفتن جنبه ریزساختاری نیز بهینه شود [۳۷، ۴۰].

شکل ۱۲ نتایج مقایسه جوش پذیری شرایط پالس ثابت و پلکانی را نشان می دهد. در نتیجه مقایسه وضعیت پالس ثابت و شرایط پالس پلکانی، که در آن جریان جوش گام به گام افزایش می یابد، بخش جریان قابل جوش ۳/۰ کیلو آمپر یا بیشتر با کنترل جریان پالس پلکانی است که جوش پذیری بهتری را در مقایسه با شرایط ثابت فعلی نشان می دهد (شکل ۱۲-الف). در نتیجه مقایسه مقاومت برشی در شکل ۱۲-ب، ضخامت قطعه کافی برای ایجاد BPF در شرایط جوشکاری ۶/۵ کیلو آمپر توسط کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالس پلکانی ایمن شد.

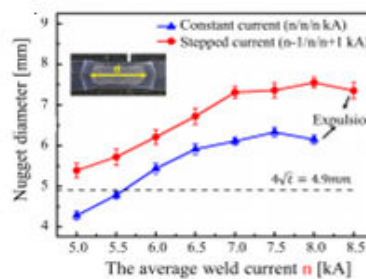


شکل ۱۱- کلان ساختارهایی که حالت شکست را در جریان های مختلف جوش نشان می دهند [۱۰]

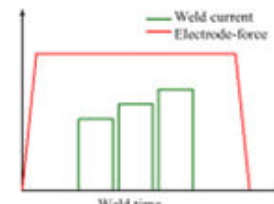
در حالی که به طور کلی مقاومت مکانیکی شکست سطحی^۱ کمتر از شکست بیرون کش دکمه^۲ شناخته شده است، به این دلیل که فریت در ناحیه نیمه ذوب شده تشکیل شد و شکست در ناحیه نسبتاً نرم شده افزایش یافت، نتایج معکوسی در حالت شکست کنترل های شکل موج جریان جوشکاری یک و دو مرحله ای به دست آمد [۳۷، ۱۰]. در طول جوشکاری مقاومتی، قطعه دارای نرخ انجماد بالایی است، و زمان کافی برای حل شدن اتم های املاح با نقطه ذوب پایین در ماتریس وجود ندارد و جداسازی در ناحیه



(ب)



(ف)

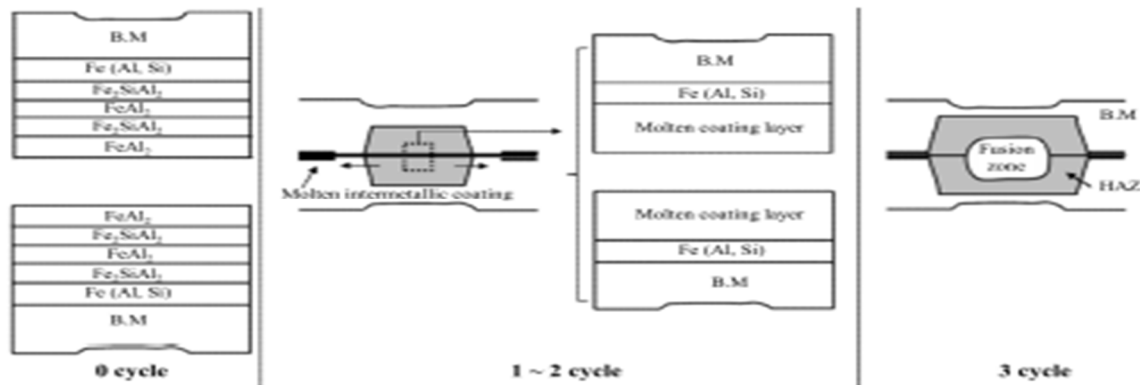


شکل ۱۲- مقایسه اثر زمان بندی های جوش پالسی پلکانی و ثابت، الف) قطر قطعه، ب) مقاومت لب-برشی [۲۷]

² BFP: Button Pullout Fracture

¹ IF: Interfacial Fracture

ماده رانده می‌شود [۴]. از طریق کنترل شکل موج مثل کنترل پیش پالس، شرایط فرآیندی که می‌تواند لایه پوشش را به سمت خارج فشار دهد باید کنترل شود و سپس ناحیه تماس باید ایمن گردد. هدف از این کار این است که ناحیه تماس را تا حد امکان ایمن کند و در عین حال مقاومت تماس را با فشار دادن لایه پوششی اتصال به سمت بیرونی تا حد ممکن به حداقل برساند تا اثر حذف لایه پوشش القاء شود [۳۶]. چنین رفتاری از لایه پوششی در جوشکاری پیش بینی شده نیز مشاهده می‌شود [۷]. نتایج تحقیقات مختلفی برای بهبود ویژگی‌های جوشکاری از طریق کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالسی در طول جوشکاری مقاومتی فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si گزارش شده است که نیاز هست در آینده در خصوص تنظیم فرآیند و شرایط جوشکاری بحث عمیق‌تری صورت پذیرد دارد.



شکل ۱۳- تصویری از رفتار لایه پوشش در فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si در جریان جوش: ۴ کیلو آمپر [۴]

مشترک ورق/ورق در طول جوشکاری یا ناحیه نرم شده به دلیل تولید فریت در قسمت نیمه مذاب نزدیک خط مذاب، خواص مکانیکی کاهش می‌یابد.

از نظر مواد، جوش پذیری را می‌توان با ایجاد یک لایه بین فلزی پیوسته غنی از آلومینیوم در لایه پوشش Al-Si با بهینه سازی متغیرهای فرآیند مانند نرخ افزایش دما بین عملیات حرارتی آستنیت‌دهی و دمای عملیات حرارتی و با کنترل ضخامت لایه انتشار به زیر $5\mu\text{m}$ بهبود بخشید.

از نظر فرآیند، قابلیت جوش پذیری را می‌توان با کنترل شکل موج برای اعمال پیش پالس بهبود بخشید. پیش پالس

با توجه به قانون ژول، به نظر می‌رسد تفاوت زیادی در اندازه ضخامت قطعه و بار کششی ناشی از کنترل گرمای ورودی در شرایط پالس پلکانی به جای کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالس جریان ثابت رخ داده است [۲۷]. با ترکیب شرایط کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالس معرفی شده در بخش ۳.۲، ویژگی‌های جوش با حداکثر افزایش ضخامت قطعه با کاهش تأثیر لایه پوشش Al-Si، قبل از جوشکاری اصلی با استفاده از فرآیندهایی مانند کنترل‌های پیش پالس و پالس پلکانی برای اعمال جریان بهبود یافت.

شکل ۱۳ رفتار لایه پوششی را در حالت مذاب در طول جوشکاری مقاومتی فولاد حاوی بور ضرب داغ شده Al-Si برای درک اصل کنترل شکل موج جریان جوشکاری پیش پالس نشان می‌دهد. در مرحله اولیه گرمای ورودی، لایه پوشش Al-Si از فاز جامد به فاز مایع ذوب می‌شود و لایه پوشش مذاب به دلیل نیروی الکتروود در جهت سطح

۳. نتیجه گیری

تحقیقات با هدف بهبود جوش پذیری در حین جوشکاری مقاومتی فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si از نظر مواد و فرآیند خلاصه و بررسی شده‌اند.

در طول جوشکاری مقاومتی فولاد حاوی بور ضرب داغ شده با پوشش Al-Si، به دلیل اینکه اجزای لایه پوشش دارای مقاومت بالاتری نسبت به آهن هستند، دارای محدوده جریان قابل جوش باریکتری نسبت به فولادهای دیگر است. علاوه بر این، با باقی ماندن لایه پوشش در شکاف سطح

- [11] H.T. Lee, Y.C. Chang "Effect of double pulse resistance spot welding process on 15B22 hot stamped boron steel." *Metals*, **10** (2020) 1279.
- [12] O. Sherepenko, N. Holtschke, S. Jüttner. Microstructural Imperfections in the HAZ of Resistance Spot Welded Ultra High Strength Steel 22MnB5 and Their Impact on Joint Fracture. *In Proceedings of the 5th International Conference on Steels in Cars and Trucks Steels in Cars and Trucks*, Amsterdam, The Netherlands (2017) 18-22.
- [13] Y. Hwang, C.W. Lee, G.Y. Shin, J.H. Yoo, M. Choi. "Study of the Corrosion Behaviour, Liquid Metal Embrittlement and Resistance Spot Weldability of Galvannealed Hot Stamping Steel." *Korean Journal of Metals and Materials*, **3** (2019) 193-201.
- [14] S.P. Murugan, V. Vijayan, C. Ji, Y.D. Park. "Four types of LME cracks in RSW of Zn-coated AHSS." *Weld J.*, **3** (2020) 75-92.
- [15] C.W. Ji, I. Jo, H. Lee, I.D. Choi, Y. Do Kim "Effects of surface coating on weld growth of resistance spot-welded hot-stamped boron steels." *Journal of Mechanical Science and Technology*. **11** (2014) 4761-4769.
- [16] S.P. Murugan, V. Vijayan, C. Ji, Y.D. Park. "Four types of LME cracks in RSW of Zn-coated AHSS." *Weld J.* **3** (2020) 75-92.
- [17] J.W. Kim, S.P. Murugan, J.H. Yoo, R. Ashiri. "Enhancing nugget size and weldable current range of ultra-high-strength steel using multi-pulse resistance spot welding." *Science and Technology of Welding and Joining*, **3** (2020) 235-242.
- [18] S.M. Lee, Y.D. Park. "A study on the resistance spot weldability of 590 MPa grade DP Steel with modified electrode tip." *Korean Journal of Metals and Materials*, **1** (2010). 71-76.
- [19] D.C. Saha, C.W. Ji, Y.D. Park. "Coating behaviour and nugget formation during resistance welding of hot forming steels." *Science and Technology of Welding and Joining*, **8** (2015) 708-720.
- [20] M. Yunwu, A. Takikawa, J. Nakanishi, K. Doira, T. Shimizu, Y. Lu, and N. Ma. "Measurement of local material properties and failure analysis of resistance spot welds of advanced high-strength steel sheets." *Materials & Design* **201** (2021) 109505.
- [21] M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizad, P. H. Marashi & M. Goodarzi. "Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds." *Science and Technology of Welding and Joining*, **3** (2007) 217-225.
- [22] H. Oikawa, G. Murayama, S. Hiwatashi, K. Matsuyama. "Resistance spot weldability of high strength steel sheets for automobiles and the quality assurance of joints." *Welding in the World*, **3** (2007): 7-18.
- [23] R. Chen, C. Zhang, M. Lou, Y. Li, B. Carlson. "Effect of Al-Si coating on weldability of press-hardened steels." *Journal of Materials Engineering and Performance* **29**, **1** (2020) 626-636.
- [24] S.G. Son, Y. Hwang, C.W. Lee, J.H. Yoo, M. Choi. "Effect of Hot Stamping Heat Treatment Temperature on Resistance Spot Weldability of Al-10% Si Coated 30MnB5 Steel." *Korean Journal of Metals and Materials*. **12** (2019) 778-786.
- [25] H.S. Choi, G.H. Park, W.S. Lim, B. Kim. "Evaluation of weldability for resistance spot welded single-lap joint between GA780DP and hot-stamped 22MnB5 steel sheets." *Journal of Mechanical Science and Technology*, **6** (2011) 1543-1550.
- [26] V. Vijayan, S.P. Murugan, S.G. Son, Y.D. Park "Shrinkage void formation in resistance spot welds: its effect on advanced high-strength-steel weld strength and failure modes." *Journal of Materials Engineering and Performance*, **12** (2019) 7514-7526.
- [27] Y. Lu, A. Peer, T. Abke, M. Kimchi, W. Zhang. "Subcritical heat affected zone softening in hot-stamped boron steel during
- اولیه لایه پوشش Al-Si را به بیرون رانده می کند و تأثیر لایه پوشش را به حداقل می رساند تا به پالس بعدی اجازه دهد تا تشکیل و رشد قطعات فلزی را القا کند، بدین ترتیب محدوده جریان قابل جوشکاری و خواص مکانیکی در مقایسه با کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالسی یک مرحله ای تحت شرایط جوشکاری یکسان بهبود می یابد. با کنترل دو مرحله ای شکل موج جریان جوشکاری، این مشکل وجود دارد که خواص مکانیکی به دلیل افزایش ناحیه نرم شده به دلیل تولید فریت کاهش می یابد. از سوی دیگر، کنترل شکل موج جریان جوشکاری پالس سه مرحله ای که به تدریج جریان جوش را افزایش می دهد، ناحیه تماس را در اولین پالس ایمن کرده و به تدریج جهت رشد قطعه پالس را القا کند تا محدوده جریان قابل جوش ۳/۰ کیلو آمپر یا بیشتر و افزایش خواص مکانیکی تا ۴۰٪ را تضمین کند.

مرجع ها

- [1] W. Kim, C. Ji. "Trend of Resistance Spot Welding Technology of Al-Si Coated Hot-Stamped Boron Steel for Automobile Body." *Journal of Welding and Joining*, **2** (2022) 187-197.
- [2] Hot-Stamped Boron Steel for Automobile Body". *Journal Name*, **1**(5), May, pp. 1-3.
- [3] H. Karbasian, A.E. Tekkaya. "A review on hot stamping." *Journal of Materials Processing Technology*, **15** (2010) 2103-2118.
- [4] Thiel, Christian, Johannes Schmidt, Arnold Van Zyl, and Erwin Schmid. "Cost and well-to-wheel implications of the vehicle fleet CO2 emission regulation in the European Union." *Transportation Research Part A: policy and practice* **63** (2014) 25-42.
- [5] C.W. Ji, I. Choi, Y.D. Kim, Y.D. Park. "Study on coating melting behavior on weld growth mechanism for Al-Si coated hot-stamped boron steels in resistance spot welding." *korean journal of metals and materials*. **11** (2014) 931-941.
- [6] y.Uk Jun, J.H. Kim, J.Y. Cheon, Y.G. Kim, Y.D. Kim, C. Ji. "The Effect of Pre-Welding on Nugget Growth Behavior and Weldability for the Resistance Spot Welding of A6014-T4 Alloy." *Journal of Welding and Joining*, **2** (2020) 203-210.
- [7] J.P. Kong, C.Y. Kang. "Expulsion of Electric Resistance Spot Welding in Advanced High Strength Steels for Automobile." *Journal of Welding and Joining*, **6** (2011) 26-32.
- [8] J.H. Kim, H.U. Jun, J.Y. Cheon, Y.D. Kim, C. Ji. "Effect of the Melting Behavior of the Coating Layer on Weldability in the Bolt Projection Resistance Welding of Al-Si Coated Hot-Stamped Boron Steel." *Journal of Welding and Joining*, **1** (2020) 33-40.
- [9] D.W. Fan, B.C. De. Cooman. "State-of-the-knowledge on coating systems for hot stamped parts." *Steel research international*, **5** (2012) 412-433.
- [10] J.P. Kong, C.Y. Kang. "Expulsion of Electric Resistance Spot Welding in Advanced High Strength Steels for Automobile." *Journal of Welding and Joining* **6** (2011) 26-32.

- [35] F. Jenner, M. E. Walter, R. Mohan Iyengar, R. Hughes. "Evolution of phases, microstructure, and surface roughness during heat treatment of aluminized low carbon steel." *Metallurgical and Materials Transactions A*, **6** (2010) 1554-1563.
- [36] Taniguchi, U.S. Patent No. US 2014/0305912 A1. *Washington, DC: U.S Patent and Trademark office*, 2014.
- [37] J.Y. Cheon, V. Vijayan, S. Murgun, Y.d. Park, J. H. Kim, J. Y. Yu, Ch. Ji, "Optimization of pulsed current in resistance spot welding of Zn-coated hot-stamped boron steels." *Journal of Mechanical Science and Technology*, **4** (2019) 1615-1621.
- [38] W. Kim, C. Ji. "Trend of Resistance Spot Welding Technology of Al-Si Coated Hot-Stamped Boron Steel for Automobile Body." *Journal of Welding and Joining*, **2** (2022) 187-197.
- [39] O. Sherepenko, S. Jüttner. "Transient softening at the fusion boundary in resistance spot welded ultra-high strengths steel 22MnB5 and its impact on fracture processes." *Welding in the World*, **1** (2019) 151-159.
- [40] S.S. Rao, R. Chhibber, K.S. Arora, M. Shome. "Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial free steel." *Journal of Materials Processing Technology*, **246** (2017) 252-261.
- [41] I. Choi, J. Park, J.W. Kim, M. Kang, D.Ch. Kim, J.K. Kim, Y. D. Park, "A study on tensile shear characteristics for weld-bonded 1.2 GPa grade TRIP steels with changes in nugget diameter for automotive body application." *Journal of Welding and Joining*, **2** (2015) 69-77.
- resistance spot welding." *Materials & Design* **155** (2018) 170-184.
- [28] R. Chen, M. Lou, Y. Li, B.E. Carlson. "Improving weldability of Al-Si coated press hardened steel using stepped current pulse schedule." *Journal of Manufacturing Processes* **48** (2019) 31-43.
- [29] L. Mejlbro. "The complete solution of Fick's second law of diffusion with time-dependent diffusion coefficient and surface concentration." *Durability of concrete in saline environment* (1996) 127-158.
- [30] P.U.S. Drillet. "Patent No. US 8307680 B2. Washington." *DC: US Patent and Trademark office* (2008).
- [31] M. Suehiro, J. Maki, K. Kusumi, M. Ohgami, T. Miyakoshi. "Properties of aluminum coated steels for hot-forming." *Shimittetsu Giho* (2003) 15-20.
- [32] A. Afzal, M. Hamed, C.V. Nielsen. "Effects of Al-Si Coating on Static and Dynamic Strength of Spot-Welded Hot-Stamping Steel Joints." *Metals*, **6** (2021) 976.
- [33] Z.X. Gui, W.K. Liang, Y.S. Zhang. "Enhancing ductility of the Al-Si coating on hot stamping steel by controlling the Fe-Al phase transformation during austenitization." *Science China Technological Sciences*, **9** (2014) 1785-1793.
- [34] D.W. Fan, H.S. Kim, J.K. Oh, K.G. Chin, D.C. BC. "Coating degradation in hot press forming." *ISIJ international*, **4** (2010) 561-568.