

تأثیر هندسه الکتروود بر عمق فرورفتگی نقطه جوش مقاومتی در اتصال ورق فولادی و منیزیمی بدنه خودرو

علی دهقانی و محمد صدیقی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۵)

<https://doi.org/10.47176/jame.44.1.1076>

چکیده: امروزه تمایل زیادی در اتصال ورق های غیرهمجنس جهت سبک سازی در صنایع مختلف، به خصوص صنعت خودرو مشاهده می شود. نقطه جوش مقاومتی در اتصال قطعات بدنه خودرو، کاربرد فراوانی داشته و از نظر استحکام و ابعادی دارای اهمیت می باشد. در این مقاله تأثیر هندسه الکتروود با قطر ۲۰ و ۵۰ میلی متر بر عمق فرورفتگی نقطه جوش مقاومتی در اتصال ورق فولادی و آلیاژ منیزیم AZ31 مورد تحقیق قرار گرفته است. به منظور ارزیابی استحکام نقطه جوش از آزمون کششی - برشی استفاده گردید. نتایج نشان از استحکام ۵۰۰۰ نیوتن اتصال و کاهش ۵۰ درصد عمق فرورفتگی به وسیله الکتروود با قطر هندسه ۵۰ میلی متر با میانگین عمق فرورفتگی ۰/۶ میلی متر در سمت منیزیم می باشد. ساختار نقطه جوش در این اتصال، دارای سه ناحیه لحیم سخت، محلول جامد و لحیم نرم بوده و دانه های دندریتی هم محور در مرکز و دانه های دندریتی هم محور و ستونی در پیرامون هسته نقطه جوش مشاهده گردید.

واژه های کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه ای غیرهمجنس، عمق فرورفتگی نقطه جوش، هندسه الکتروود، ریزساختار اتصال.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sedighi@iust.ac.ir

The influence of electrode geometry on depth indentation of the resistance spot welding in the joining of steel and magnesium sheets in the car body

A. Dehghani and M. Sedighi*

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Nowadays, there is a desire in various industries, especially in the automotive industry, to join dissimilar sheet metals in order to reduce weight. Resistance spot welding is often applied to join body parts and its strength and dimensions of the weld are important. In this research, the influence of the electrode geometry with a diameter of 20 and 50 mm on the indentation depth of the resistance welding spot in the joining of sheet steel and the magnesium alloy AZ31 was investigated. A tensile shear test was carried out to evaluate the strength of the weld. The results showed that the strength of the joint was 5000 N and the 50% reduction in indentation depth by the electrode with a geometry diameter of 50 mm with an average indentation depth of 0.6 mm on the magnesium side. The structure of the weld in this joint had three Braze, solid solution, and solder regions. Moreover, dendritic coaxial grains in the center and coaxial and columnar grains at the periphery of the spot weld were observed.

Keywords: Dissimilar resistance spot welding, Depth of indentation spot welding, Electrode geometry, Joint structure.

۱- مقدمه

سمت فولاد و الکتروود گنبدی شکل در سمت منیزیم استفاده گردد. آن‌ها به استحکام اتصال ۵ کیلونیوتن دست یافتند. گانگ سانگ و همکاران (۲)، چالش اتصال فلزات غیرهمجنس مطالعه نمودند. اتصال ورق منیزیم با ورق فولادی با پوشش گالوانیزه با روش جوشکاری مقاومتی بررسی کردند. این تحقیق نشان داد استحکام اتصال با پوشش روی، بیشتر از نمونه بدون پوشش می‌باشد. لینگیلیو و همکاران (۳)، تکنولوژی‌های جدید برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای منیزیم با فولاد بررسی نمودند. جهت رفع بالانس حرارتی از الکتروود تخت در سمت فولاد و الکتروود با مقطع گنبدی در سمت منیزیم استفاده کرده و با تنظیم پارامترها به صورت، نیروی الکتروود ۴ کیلو نیوتن و جریان جوش ۲۰ کیلوآمپر و زمان ۱۶ سیکل به استحکام ۵ کیلونیوتن دست یافتند. پاولو پینر (۴)، در تحقیق اتصال فولاد با منیزیم با فرایند جوشکاری مقاومتی، محدوده جریان ۱۶ الی ۲۴ کیلوآمپر و زمان جوش ۸ سیکل و نیروی الکتروود ۴ کیلونیوتن روی دستگاه تنظیم نموده و در ادامه تحقیق بیان نمودند استحکام برشی با الکتروود یکسر تخت و یکسر گنبدی بیشتر می‌باشد (۶/۶ کیلونیوتن) نسبت به الکتروودهای دوسر گنبدی با استحکام برشی (۵/۴ کیلونیوتن). فینگ و همکاران (۵)، جوشکاری ورق

در راستای جهانی شدن کاهش آلودگی محیط زیست و مصرف سوخت، استفاده از فلزات سبک و سازه‌های مرکب در وسایل نقلیه مورد توجه محققین قرار گرفته است. استفاده از آلیاژهای منیزیم به عنوان یکی از فلزات سبک در صنایع مختلف از قبیل هوافضا، خودرو، با توجه به خصوصیاتی چون نسبت استحکام به چگالی بالا، رشد چشمگیری داشته است. اتصال قطعات غیرهمجنس با فرایند جوشکاری به سادگی انجام نمی‌شود. فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به علت داشتن نرخ مناسب جوشکاری، کیفیت مناسب اتصالات و هزینه کم در صنعت، همچنان متداول‌ترین فرایند اتصال در زمینه تولید وسایل نقلیه به‌ویژه خودرو می‌باشد. هدف از این تحقیق به کار بردن فرایند جوشکاری مقاومتی در اتصال قطعات غیرهمجنس (آلیاژ منیزیم با فولاد) و بررسی تأثیر هندسه الکتروود بر عمق فرورفتگی نقطه جوش می‌باشد.

منلادن و همکاران (۱)، جوشکاری مقاومتی غیرهمجنس بررسی نمودند. آن‌ها بیان نمودند در اتصال منیزیم با فولاد، اتصال به‌سختی صورت گرفته و نیاز به عنصر میانی بوده و جهت ایجاد تعادل حرارتی، می‌بایستی از الکتروود تخت در

مورد بررسی قرار دادند. در میکروساختار نقطه جوش مقاومتی منیزیم با فولاد، سه ناحیه وجود دارد که عبارتند از لحیم کاری سخت^۱، محلول جامد^۲ و لحیم کاری نرم^۳. با میکروسکوپ الکترونی ناحیه محلول جامد و لحیم سخت کنترل گردید، لایه ترکیبات بین فلزی مشاهده نشده و این موضوع نشان از استحکام منیزیم با فولاد نزدیک به منیزیم با منیزیم می باشد. جیانگ و همکاران (۱۲)، تأثیر مس و روی به عنوان لایه میانی در میکروساختار و استحکام جوش بین منیزیم و فولاد کم کربن مطالعه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند اتصال آهن با منیزیم بدون لایه میانی بسیار ضعیف بوده و در حدود ۳۰ مگاپاسکال می باشد. با بهینه سازی پارامترهای فرایند (جریان ۷ کیلوآمپر و زمان ۰/۵ ثانیه) و با ضخامت لایه ۰/۱ میلی متر، استحکام ۶۲ مگاپاسکال حاصل گردید. تیهانو ونگ و همکاران (۱۳)، تکنولوژی های جوشکاری آلیاژ منیزیم با فولاد را تحقیق نمودند. در فرایند جوشکاری مقاومتی با ذوب شدن پوشش گالوانیزه فولاد، تشکیل ترکیب Al_5, Fe_2 روی سطح فولاد، باعث اتصال لحیم (باندینگ^۴) بین فولاد و منیزیم می شود. لیو و همکاران (۱۴)، جوشکاری نقطه ای مقاومتی را در اتصال آلیاژهای منیزیم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان نمودند هسته جوش، دارای ساختار دندردریتی تحت شرایط حرارتی می باشد. عیوب متالورژی در این فرایند تخلخل و ترک می باشد. این ترک‌ها باعث کاهش استحکام استاتیکی و استحکام خستگی می گردد. جعفریان و همکاران (۱۵)، خواص ریزساختاری و مکانیکی اتصالات نفوذی آلیاژهای آلومینیوم به آلیاژ منیزیم (AZ31) بررسی کردند. طبق نتایج تحلیل نقطه ای، حضور ترکیبات بین فلزی Al_3Mg_2, Al_2Mg_{17} مشاهده و بیشترین میزان استحکام در حالت استفاده از آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم حاصل شده بود. کیو و همکاران (۱۶)، اتصال آلیاژ آلومینیوم و فولاد را با الکترودهای کامپوزیتی فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه ای بررسی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند از لحاظ میکروساختار یک هسته و یک حلقه اطراف هسته جوش در دو قطعه شکل می گیرد و با استفاده از الکترودهای کامپوزیتی

منیزیم AZ31 با فولاد الکتروگالوانیزه DP600 را مطالعه نمودند. آن‌ها بیان نمودند حداکثر استحکام با جریان ۱۶ کیلوآمپر، ۴۱۴۳ نیوتن حاصل شده، در حالی که با لایه میانی حداکثر استحکام ۵۴۹۳ نیوتن با جریان ۱۸ کیلوآمپر حاصل شده است. میاماتو و همکاران (۶)، اتصال منیزیم با فولاد را بررسی نمودند. تست کشش بر طبق استاندارد ژاپنی Z3140 انجام و ماکزیمم استحکام برشی ۲/۷ KN حاصل شد. و بر طبق کلاس A استاندارد اتصال رضایت بخش می باشد. تحقیق در حالت بدون پوشش روی نیز بررسی شد که استحکام اتصال ضعیف و مورد تأیید استاندارد قرار نگرفته است. منلادن و همکاران (۷) بیان نمودند در جوشکاری نقطه ای مقاومتی در حالت لحیم کاری سخت، منیزیم ذوب و روی فولاد پخش شده و هسته جوش فقط در سمت ورق منیزیم شکل می گیرد. همچنین دو ناحیه در منطقه ذوب ایجاد می شود: ناحیه پیرامون ناحیه ذوب و ناحیه ذوب. ایکس یو و همکاران (۸) بیان کردند در جوشکاری غیرهمجنس با روش لحیم کاری و جوشکاری مقاومتی نقطه ای، ناحیه ذوب در قسمت منیزیم بوده و شامل ساختار دندردریتی ستونی و هم محور می باشد و همچنین بیان شد شکست خستگی، از منطقه متأثر از حرارت می باشد. روش های اتصال غیرهمجنس منیزیم با فولاد را کازوکاوا و همکاران (۹) مطالعه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که روش جوشکاری مقاومتی، برای این موضوع مناسب بوده و با کنترل حرارت لایه میانی، اتصال مناسبی حاصل می شود. بررسی جوشکاری غیرهمجنس فلزات در ساخت بدنه خودرو را عبدالکریم و همکاران (۱۰) انجام دادند. آن‌ها اتصال منیزیم با فولاد را بررسی و بیان نمودند به دلیل پایین بودن نقطه جوش منیزیم (۱۰۹۰ درجه سانتی گراد)، در هنگام جوشکاری، بخار شدن منیزیم اتفاق می افتد و در ادامه به این نتیجه رسیدند یک اتصال متالورژی به وسیله لایه میانی اتفاق افتاده و ریسک اتصال این دو فلز به یکدیگر بدون لایه میانی، کاهش می باشد. بررسی خواص میکروساختار و خستگی جوش غیرهمجنس فولاد با منیزیم با فرایند نقطه جوش مقاومتی را لیو و همکاران (۱۱)

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق منیزیم AZ31 بر حسب درصد وزنی

Si	Fe	Cu	Mn	Al	Zn	Ni	Mg
۰/۰۰۰۹۲	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۰۷۹	۰/۴۷	۳/۱۲	۱/۰۵	۰/۰۰۰۰۸۲	Base

جدول ۲- ترکیب شیمیایی ورق فولادی بر حسب درصد وزنی

Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	Co
Base	۰/۰۸۸۱	۰/۰۳۸۵	۰/۱۸۸	۰/۰۲۵۶	۰/۰۲۴۸	۰/۱۶۹	۰/۰۰۵۸
Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	Zn	Se
۰/۰۱۲۹	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۱۱

بهبود خواص مکانیکی اتصال فولاد و منیزیم با روش جوشکاری مقاومتی پرچی شدند.

مطالعات نشان می‌دهد تحقیقات گذشته در مورد عمق فرورفتگی نقطه جوش با فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در اتصال ورق آلیاژی منیزیم با فولاد (صنایع خودرو)، اندک می‌باشد. بدین ترتیب در این مقاله تأثیر هندسه الکتروود بر عمق فرورفتگی نقطه جوش در اتصال ورق فولادی با پوشش گالوانیزه به ورق منیزیم مورد مطالعه گرفته است. در ابتدا مواد و تجهیزات سپس روش تحقیق و در ادامه بحث و نتایج تحقیق ارائه شده است.

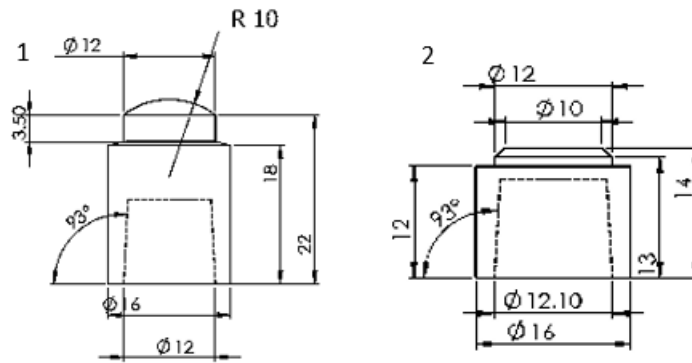
۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد و تجهیزات

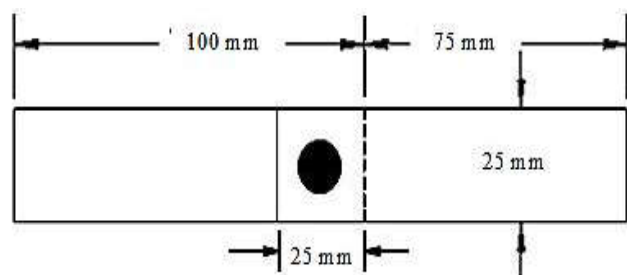
جهت انجام آزمایش‌ها از ورق منیزیم با گرید AZ31 با ضخامت دو میلی‌متر که عمدتاً در قطعات داخلی بدنه خودرو و ورق فولادی St14 با ضخامت یک میلی‌متر در بدنه خودرو کاربرد داشته، با ابعاد ۲۵×۱۰۰ میلی‌متر مربع طبق استاندارد EN ISO14273 استفاده گردید. ترکیبات شیمیایی دو ورق در جدول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

ضخامت پوشش روی استفاده شده ۱۰ میکرون با تیلرانس ± 2 میکرون در ورق فولادی می‌باشد که نقش بسزایی در استحکام اتصال دارد (۲ و ۵). برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه

ترکیبات بین‌فلزی را می‌توان مهار نمود. همچنین با جریان ۲۶ کیلوآمپر به استحکام ۵/۸۶ کیلونیوتن دست یافتند. والکر و همکاران (۱۷)، نقش لایه میانی نیکل و فولاد ضدزنگ را در اتصال منیزیم به فولاد را با روش جوشکاری التراسونیک و مقاومتی مطالعه نمودند. آن‌ها ترکیبات بین‌فلزی متفاوتی در ساختار جوش مشاهده نموده و بیان نمودند با لایه میانی فولاد ضد زنگ ترکیب بین فلزی AL-Fe با ضخامت کمتر از یک میکرون مشاهده شده که اثر بخشی بهتری در استحکام جوش نسبت به لایه میانی نیکل دارد. چن و همکاران (۱۸)، برنامه زمانی و طراحی الکتروود فرایند جوشکاری مقاومتی را در اتصال آلومینیوم و فولاد بررسی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند با برنامه زمانی چند مرحله‌ای و تمیزکاری مرتب، رشد هسته جوش مناسب بوده و همچنین با الکتروود با مقطع چندپله‌ای در سمت آلومینیوم، استحکام اتصال مناسب‌تری نسبت به الکتروود گنبدی شکل حاصل گردیده است جینگ و همکاران (۱۹)، تأثیر مورفولوژی الکتروود جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در اتصال منیزیم با فولاد را مطالعه و بیان نمودند با الکتروودهای مخروطی / مخروطی‌شکل، بیرون‌زدگی مذاب، گودی نقطه جوش و فرسایش الکتروود مناسب نبوده و مناسب‌ترین هسته جوش با الکتروود گنبدی / گنبدی شکل حاصل گردیده است. فی و همکاران (۲۰)، با افزایش لایه میانی عنصر روی، باعث کاهش منطقه متأثر از حرارت شده و با افزایش طول پرچ، باعث



شکل ۱- الکتروود تخت و گنبدی.



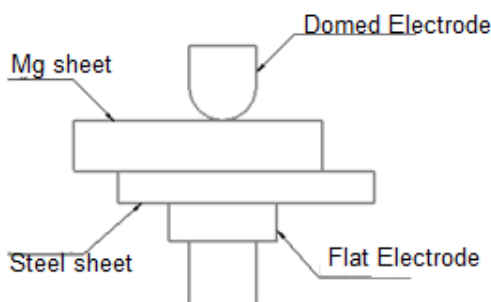
شکل ۲- نمونه تست کشش.

۲-۲- روش تحقیق

به صورت کلی اتصال فلزات غیرهمجنس دارای چالش‌هایی می‌باشد. با توجه به تفاوت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی فلز منیزیم و فولاد از قبیل عدم حلالیت آن‌ها و نقطه ذوب پایین منیزیم (۶۵۰ درجه سانتی‌گراد)، انتقال حرارت بالای فلز منیزیم (۹۶ W/(m K) برای منیزیم و ۲۷ W/(m K) برای فولاد، حرارت ایجاد شده حاصل از پروسه جوشکاری باید کنترل گردد در غیر این صورت باعث ذوب و بخار شدن ورق منیزیم می‌شود (۵). در شکل (۳) فرایند شماتیکی از جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای منیزیم به فولاد را نشان می‌دهد. قبل از فرآیند جوشکاری نمونه‌ها با محلول استون برای رفع چربی‌ها و آلودگی‌های سطحی شست‌وشو شدند. بعد از مطالعه مقالات مرتبط و آزمون‌های اولیه، سه پارامتر جریان و زمان جوشکاری و نیروی الکتروود که تأثیر بسزایی در کیفیت جوش داشته، انتخاب و مقدار پارامترها جهت استحکام ۵۰۰۰ نیوتن مشخص گردید. تعداد شش آزمایش با پارامترهای جریان الکتریکی ۱۷ کیلوآمپر،

جوش مقاومتی نقطه‌ای جریان AC پدالی ساخت شرکت تیسبا با ماکزیمم جریان جوش ۲۲ کیلوآمپر و با توان ۳۰۰ KVA به کار گرفته شده است. قبل از انجام آزمایش‌ها، ورق‌های اتصال با محلول استون تمیز و دستگاه جوش کالیبره گردید.

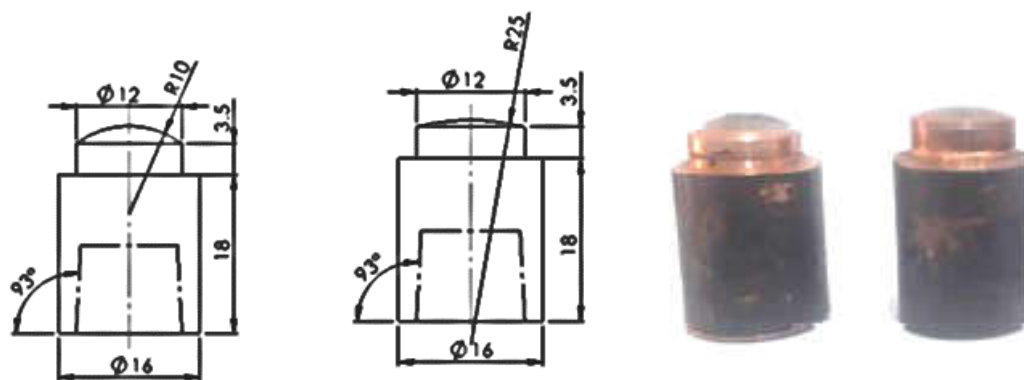
پیرو مطالعات انجام شده و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی منیزیم و فولاد، جهت ایجاد تعادل حرارتی از الکتروودهای غیر مشابه تخت سمت فولاد و گنبدی سمت منیزیم با متریال آلیاژ مس و کروم و زیرکونیم استفاده گردید (۱، ۲ و ۷). شکل (۱)، الکتروود (۱) سمت منیزیم و الکتروود (۲) سمت فولاد را نشان می‌دهد. جهت تست کششی- برشی نمونه‌ها با دستگاه کشش STM50 دارای ظرفیت پنج تن با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده و شکل (۲) تست کشش و نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در این تحقیق از میکروسکوپ نوری مدل Copa و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ مدل Mira3 جهت تحلیل ساختار جوش استفاده شده که در ادامه به شرح آن پرداخته شده است.



شکل ۳- شماتیک جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد و منیزیم.



شکل ۴- اتصال سمت منیزیم (الف) سمت فولاد (ب) نمونه‌های نقطه جوش مقاومتی (ج).



شکل ۵- هندسه الکتروودها.

می‌دهد. جهت بررسی مناسب‌تر عمق فرورفتگی نقطه جوش، تعداد ۱۰ آزمایش با شرایط یکسان و قطر هندسه متفاوت انجام گردید. پارامترها شامل جریان الکتریکی ۲۱ کیلوآمپر، زمان جوش ۱۴ سیکل و نیروی الکتروود ۱۷۰ دکانیوتن و با دو الکتروود با قطر هندسه ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر، به کار گرفته شد. شکل (۵)، الکتروودهای مورد استفاده را نشان می‌دهد.

نیروی الکتروود ۱۷۰ دکانیوتن و زمان جوشکاری ۱۲ سیکل، با الکتروودهای شکل (۱) انجام و عمق فرورفتگی نقطه جوش به وسیله کولیس، اندازه‌گیری و مشاهده گردید در سمت ورق منیزیم، عمق فرورفتگی نقطه جوش می‌بایستی ملاحظاتی صورت گیرد. شکل (۴)، نمونه نقطه جوش سمت منیزیم (الف)، نمونه سمت فولاد (ب) و نمونه‌های نقطه جوش مقاومتی (ج) را نشان

جدول ۳- عمق فرورفتگی در منیزیم و فولاد در استحکام ۴۰۰۰ نیوتن

انحراف معیار	مقدار متوسط ۶ نمونه	
(mm)	(mm)	
۰/۰۶۸	۰/۷۶	عمق فرو رفتگی منیزیم
۰/۰۱	۰/۰۳	عمق فرو رفتگی فولاد

جدول ۴- عمق فرو رفتگی با الکتروود قطر ۲۰ و ۵۰ میلی متر (میانگین استحکام ۵۰۰۰ نیوتن)

مقدار متوسط ۵ نمونه (mm) الکتروود ۵۰	مقدار متوسط ۵ نمونه (mm) الکتروود ۲۰	
۰/۶۵	۱/۴۵	عمق فرو رفتگی منیزیم
۰/۰۵	۰/۰۸۶	انحراف معیار سمت منیزیم mm
۰/۲۵	۰/۱۶	عمق فرو رفتگی فولاد
۰/۰۳۵	۰/۰۵۴	انحراف معیار سمت فولاد mm

۳- نتایج و بحث

نقطه جوش، تاثیرگذار است. جدول (۳)، میانگین عمق فرو رفتگی شش آزمایش جوشکاری در سمت فولاد و سمت منیزیم، در شرایط یکسان با پارامترهای ۱۷ کیلوآمپر جریان الکتریکی، ۱۷۰ دکانیوتن نیروی الکتروود و ۱۲ سیکل زمان جوشکاری با استحکام میانگین ۴۰۰۰ نیوتن نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود عمق گودی هسته جوش در سمت فولاد (میانگین ۰/۰۳ میلی متر) و سمت منیزیم (میانگین ۰/۷۶ میلی متر) می‌باشد. با توجه به نتایج، عمق گودی سمت منیزیم می‌بایستی کنترل و کاهش یابد.

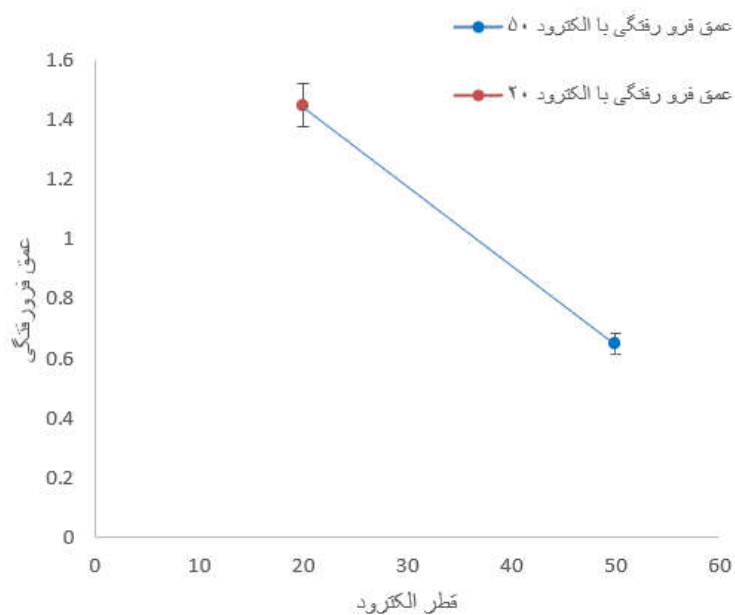
جهت کاهش فرورفتگی از الکتروود با قطر هندسه ۵۰ میلی متر استفاده گردید. تعداد ۱۰ نمونه آزمایش با الکتروود با قطر هندسه ۲۰ و ۵۰ میلی متر با شرایط یکسان (۲۱ کیلوآمپر جریان الکتریکی، زمان جوش ۱۴ سیکل و نیروی الکتروود ۱۷۰ دکانیوتن) انجام گردید. جدول (۴) میانگین عمق فرورفتگی و انحراف معیار در سمت فولاد و منیزیم را نشان می‌دهد.

نمودار شکل (۶)، نتایج عمق گودی سمت منیزیم با قطر هندسه الکتروودهای ۵۰ و ۲۰ میلی متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود فرورفتگی در سمت منیزیم (میانگین ۰/۶۵ میلی متر با الکتروود قطر ۵۰ و میانگین ۱/۴۵ میلی متر با الکتروود قطر ۲۰ میلی متر) حاصل شده است. با افزایش

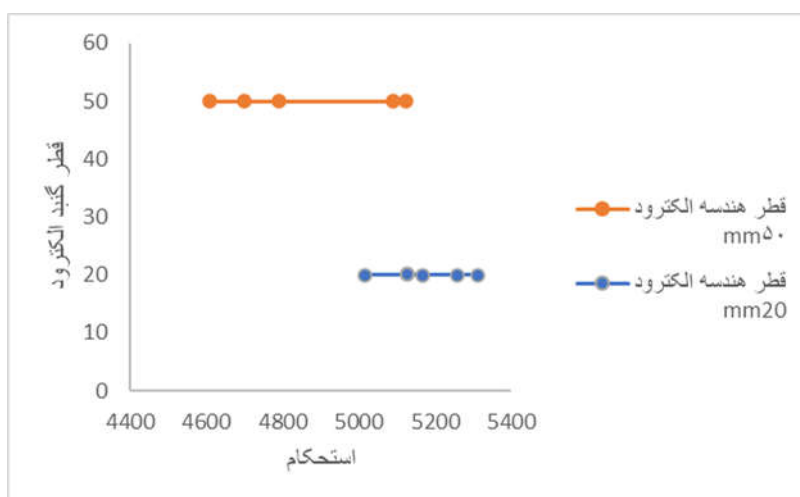
در عملیات نقطه جوش مقاومتی، پارامترهای اصلی شامل جریان، زمان جوشکاری و نیروی الکتروود می‌باشد. قطعات لازم است به‌طور کامل به یکدیگر در محل جوش چسبیده تا جریان الکتریکی قادر باشد از آن‌ها عبور نماید. با افزایش فشار الکتروود بیش از حد، مقاوت تماسی و حرارت تولید شده در فصل مشترک کاهش می‌یابد و همچنین کاهش فشار بیش از اندازه نیروی الکتروود، باعث می‌گردد سطح تماس واقعی دو فلز کم شده در نتیجه دانسیته جریان عبوری بالا رفته و حرارت بیش از اندازه تولید گردد. هر دو مورد ذکر شده تأثیر منفی روی استحکام جوش دارد. افزایش زمان و جریان الکتریکی باعث افزایش مقاومت جوش خواهد شد ولی اگر بیش از اندازه گردد حرارت در ناحیه جوش بسیار بالا رفته و ذوب فلز تا سطح فلز گسترش می‌یابد. کم بودن زمان جوش نیز باعث می‌گردد ناحیه ذوب به دمای مناسب نرسد و در نتیجه عدسی جوش در حد مطلوب تشکیل نشود.

۳-۱- عمق فرورفتگی نقطه جوش

عمق فرورفتگی طبق استاندارد AWS D8 IM 2021، باید کمتر از ۳۰ درصد ضخامت ورق باشد و بر خوردگی و استحکام



شکل ۶- تغییرات عمق گودی نقطه جوش سمت منبسط.



شکل ۷- نمودار پراکنندگی نتایج استحکام با قطر هندسه الکتروودهای ۲۰ و ۵۰ (mm).

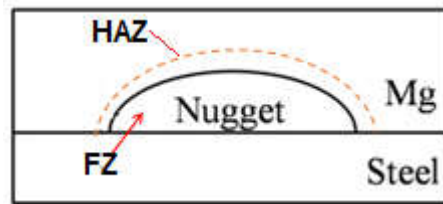
قطر ۲۰ میلی‌متر میانگین استحکام ۵۲۰۰ نیوتن حاصل شده است. با توجه به نزدیکی نتایج می‌توان با الکتروود با قطر هندسه بزرگ‌تر (۵۰ میلی‌متر) عمق نفوذ را کاهش داده و استحکام مناسب نیز حاصل گردد.

۲-۳- میکروساختار

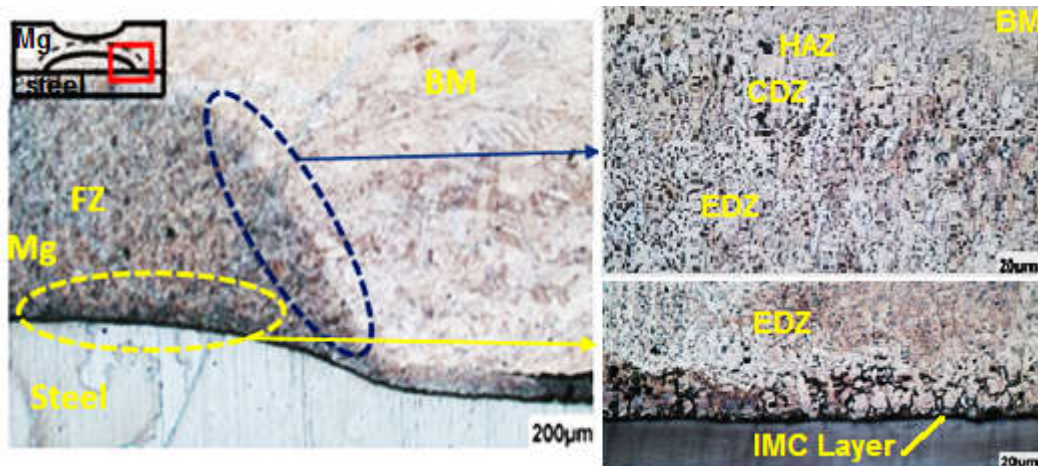
شکل (۸)، قسمت‌های نقطه جوش مقاومتی را نشان می‌دهد.

قطر هندسه الکتروود (۵۰ mm) باعث کاهش عمق گودی نقطه جوش شده و به حدود ۰/۶ میلی‌متر می‌رسد که نشان از کاهش بیش از ۵۰ درصدی عمق گودی هسته جوش در سمت منبسط می‌باشد.

شکل (۷)، نمودار رابطه قطر هندسه الکتروود با استحکام نقطه جوش را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با الکتروود با قطر ۵۰ میلی‌متر میانگین استحکام ۵۰۰۰ نیوتن و با



شکل ۸- نواحی نقطه جوش مقاومتی.



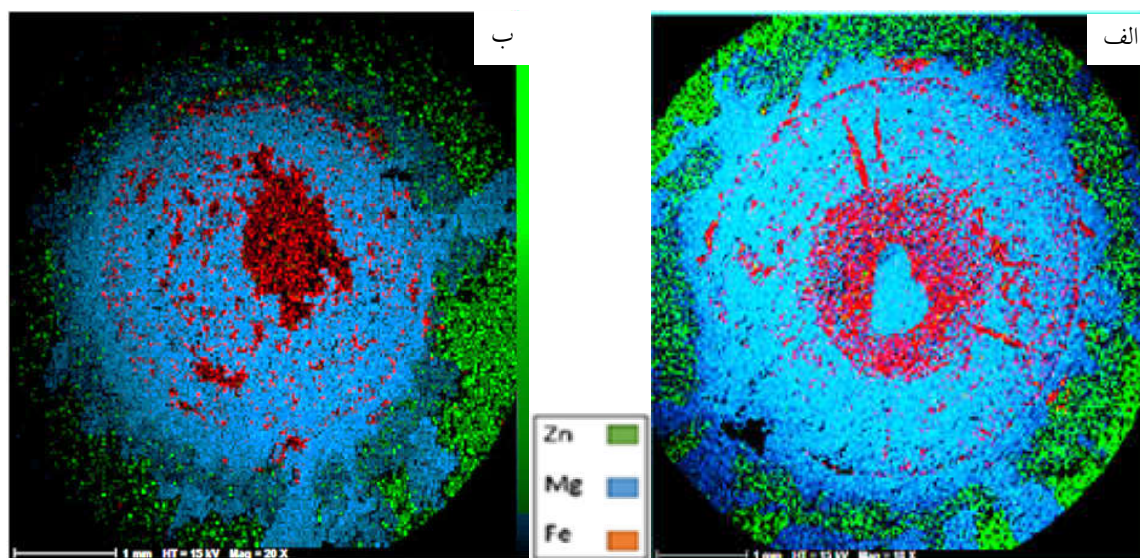
شکل ۹- ساختار نقطه جوش.

طریق نیروی الکتروودها به سمت پیرامون نقطه جوش فشرده می‌شود و ناحیه لحیم نرم تشکیل می‌شود. نفوذ روی در منیزیم باعث تشکیل ترکیبات بین‌فلزی مانند $MgZn_2$, $Mg_{11}Al_5$ و Zn_4 در ناحیه ذوب و عمدتاً حول نقطه جوش شده و تأثیر مثبتی در ساختار و استحکام دارد (۲، ۷ و ۹).

در ادامه بررسی‌ها، ساختار نقطه جوش با میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه قرار گرفت. همان‌طور که شکل (۱۰) نشان می‌دهد دو نمونه سطح شکست با الکترودهای ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر با استحکام حدود ۵۰۰۰ نیوتن بررسی گردید. شکل (۱۰-الف) نمونه سطح شکست اتصال با الکتروود ۲۰ میلی‌متر با استحکام ۴۹۱۲ نیوتن و شکل (۱۰-ب) نمونه سطح شکست اتصال با الکتروود ۵۰ میلی‌متر با استحکام ۴۸۲۰ نیوتن و سه عنصر منیزیم، آهن و روی را نشان می‌دهد. سطح آبی‌رنگ منیزیم چسبیده شده به فولاد، سطح قرمز رنگ سطح فولاد و سطح سبز رنگ عنصر روی می‌باشد. در شکل (۱۰-الف) با توجه به اندازه کوچک‌تر الکتروود، دانسیته جریان الکتریکی

منطقه^۶ ناحیه ذوب و منطقه^۷ ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه^۸ فلز پایه منیزیم می‌باشد.

پیرو مطالعات انجام شده، ساختار نقطه جوش مقاومتی منیزیم با فولاد، دارای سه ناحیه می‌باشد که عبارتند از لحیم سخت، محلول جامد و لحیم‌کاری نرم. اتصال لحیم سخت، ذوب منیزیم و اتصال به فولاد می‌باشد و اتصال محلول جامد، اتصال منیزیم با فولاد بوده و لحیم‌کاری ذوب عنصر روی و اتصال به منیزیم می‌باشد (۱ و ۲). در شکل (۹) ساختار نقطه جوش با الکتروود قطر ۵۰ میلی‌متر نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود خط‌چین آبی‌رنگ ناحیه محلول جامد و دارای ساختاری ستونی^۹ و هم‌محور^{۱۰} می‌باشد و خط‌چین زرد رنگ ناحیه ذوب و دارای ساختار دندردیتی با دانه‌های هم‌محور و ناحیه لحیم سخت می‌باشد و دارای استحکام بیش‌تری نسبت به ناحیه محلول جامد است. با توجه به نقطه ذوب عنصر روی و منیزیم و فولاد، در ابتدا پروسه جوشکاری، عنصر روی ذوب شده و عمده مذاب روی از



نمونه ب

نمونه الف

شکل ۱۰- تصاویر آنالیز نقشه نمونه‌های شکست سمت فولاد برای دو نمونه با استحکام مختلف الف: استحکام ۴۹۱۲ ب: استحکام ۴۸۲۰ نیوتن.

درصد آهن و ۱۹/۴۹ درصد عنصر روی مشاهده گردید که نشان از چسبیدن مقدار زیادی منیزیم به فولاد و عنصر روی داشته و نشان از استحکام بالا اتصال (۴۸۲۰ نیوتن) می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق بیان می‌کند. به علت همجنس نبودن این دو قطعه، بحث تعادل حرارتی حائز اهمیت بوده و شکل هندسی الکتروودها نقش بسزایی دارد. با توجه به توان دستگاه جوش مورد استفاده، با الکتروود با هندسه گنبدی شکل، با قطر ۵۰ میلی‌متر، استحکام ۵۰۰۰ نیوتن و عمق فرورفتگی مناسب حاصل شده است.

۱. جهت ایجاد تعادل حرارتی بین منیزیم و فولاد گالوانیزه باید از الکتروودهای غیرمشابه استفاده نمود.
۲. بیش‌ترین استحکام کششی و برشی اتصال، در جریان الکتریکی ۲۱ کیلوآمپر، زمان ۱۴ سیکل و نیروی ۱۷۰ دکانیوتن حدود ۵۰۰۰ نیوتن حاصل شده است.
۳. با استفاده از الکتروود با قطر هندسه ۵۰ میلی‌متر، بیش از ۵۰ درصد کاهش عمق فرورفتگی هسته جوش (۰/۶ میلی‌متر) نسبت به الکتروود با قطر هندسه ۲۰ میلی‌متر (۱/۵ میلی‌متر)

بزرگ‌تر و حرارت بیش‌تری در ناحیه جوشکاری شده ایجاد شده است. بدین ترتیب اندازه قطر هسته جوش، سطح منیزیم چسبیده به فولاد (سطح آبی‌رنگ) بزرگ‌تر بوده، لذا استحکام آن نسبت به نمونه (۱۰-ب) مقداری بیشتر می‌باشد. همچنین حلقه سبز رنگ، عنصر روی می‌باشد که عمده آن در پیرامون نقطه جوش شکل گرفته است. در شکل نمونه (۱۰-ب) با توجه حرارت کمتر، ذوب کم‌تری صورت گرفته، بنابراین هسته جوش کوچک‌تری شکل گرفته، منیزیم کم‌تری در هسته جوش مشاهده می‌شود (سطح آبی‌رنگ). همچنین در نمونه (۱۰-ب) عنصر روی، (لایه پوششی، حلقه سبزرنگ) را نشان می‌دهد که مقداری در هسته جوش و عمده آن با فشار الکتروودها به پیرامون نقطه جوش فشرده شده و ناحیه اتصال لحیم بزرگ‌تری نسبت به نمونه (۱۰-الف) ایجاد کرده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نمونه (۱۰-الف) حرارت بیش‌تری ایجاد شده در نتیجه عنصر روی با منیزیم حلالیت بیش‌تری داشته و مقدار کم‌تری در محیط جوش فشرده شده و ناحیه اتصال لحیم (حلقه سبزرنگ) نسبت به نمونه (۱۰-ب) کوچک‌تری شکل گرفته است. مقدار عناصر در سطح شکست نمونه با الکتروود ۵۰ میلی‌متر، ۶۷/۵۰ درصد منیزیم و ۳/۰۲ درصد آلومینیوم و ۹/۹۹

حاصل گردید.

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

۴. ساختار هسته جوش در اتصال فولاد و منیزیم، در ناحیه ذوب ساختار دندریتی هم‌محور و در ناحیه محلول جامد ساختار دندریتی هم‌محور و ستونی مشاهده گردید.
۵. با نفوذ لایه پوششی روی در ناحیه اتصال و انحلال آن با منیزیم، تأثیر مثبتی در ساختار و استحکام اتصال مشاهده گردید.

واژه‌نامه

1. brazing
2. solid state
3. soldering
4. bonding
5. scanning electron microscope (SEM)
6. fusion zone (FZ)
7. heat affected zone (HAZ)
8. base metal (BM)
9. columnar dendritic zone (CDZ)
10. equiaxed dendritic zone (EDZ)

مراجع

1. Manladan S, Yusof F, Ramesh S, Fadzil M. A review on resistance spot welding of magnesium alloys. *Int J Adv Manu Tech.* 2016; 86: 1805-25. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8258-9>
2. Song G, Li T, Yu J, Liu L. A review of bonding immiscible Mg/steel dissimilar metals. *Mater.* 2018; 11(12): 2515. <https://doi.org/10.3390/ma11122515>
3. Liu L, Xiao L, Feng J, Tian Y, Zhou S, Zhou Y. The mechanisms of resistance spot welding of magnesium to steel. *Metall Mater Trans A.* 2010; 41: 2651-61. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0333-0>
4. Penner P. Resistance spot welding of Al to Mg with different interlayers: University of Waterloo; 2013. <http://hdl.handle.net/10012/7723>
5. Feng Y, Li Y, Luo Z, Ling Z, Wang Z. Resistance spot welding of Mg to electro-galvanized steel with hot-dip Galvanized steel interlayer. *J Mat Proc Tech.* 2016; 236: 114-22. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.05.015>
6. Miyamoto K, Nakagawa S, Sakamoto H, Iwatani S, Hojo S, Tachibana T, et al. Dissimilar Joining of Magnesium Alloy and Steel by Resistance Spot Welding. *Trans Soc Automot Eng Jpn.* 2012; 43(6). <https://doi.org/10.18910/23065>
7. Manladan S, Yusof F, Ramesh S, Zhang Y, Luo Z, Ling Z. Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded in welding-brazing mode and resistance element welded magnesium alloy/austenitic stainless steel joints. *J Mat Proc Tech.* 2017; 250: 45-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.006>
8. Xu W, Chen D, Liu L, Mori H, Zhou Y. Microstructure and mechanical properties of weld-bonded and resistance spot welded magnesium-to-steel dissimilar joints. *J Mat Sci Eng A.* 2012; 537: 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.096>
9. Kasukawa M, Nakagawa S, Miyamoto K. Dissimilar metal joining method for magnesium alloy and steel. Google Patents; 2015.
10. Karim MA, Park Y-D. A review on welding of dissimilar metals in car body manufacturing. *J Weld Join.* 2020; 38(1): 8-23. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2020.38.1.1>
11. Liu L, Xiao L, Chen D, Feng J, Kim S, Zhou Y. Microstructure and fatigue properties of Mg-to-steel dissimilar resistance spot welds. *Mater Des.* 2013; 45: 336-42. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.018>
12. Jiang X, Yu H, Lin Q, Xu R, editors. Effects of Cu-Zn alloy additions on microstructure and strength of welded joints between magnesium alloy and mild steel. Proceedings of the 2015 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC-15); 2015. Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/meic-15.2015.140>
13. Wang T, Upadhyay P, Whalen S. A review of technologies for welding magnesium alloys to steels. *Int J Precis Eng Manuf-Green Technol.* 2021; 8: 1027-42. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00247-x>
14. Liu L, Feng J, Zhou Y. Resistance spot welding of magnesium alloys. *Welding and Joining of Magnesium Alloys*; Elsevier; 2010. p. 351-67e. <https://doi.org/10.1533/9780857090423.2.351>
15. Jafarian M, Paidar M. The comparison of microstructure and mechanical properties of diffusion joints of 5754, 6061, and 7039 aluminum alloys to

- AZ31 magnesium alloy. *J Adv Mater Eng (Esteghlal)*. 2022; 35(1): 11-21. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jame.35.1.11>
16. Qiu R, Li J, Shi H, Yu H. Characterization of resistance spot welded joints between aluminum alloy and mild steel with composite electrodes. *J Mater Res Technol*. 2023; 24: 1190-1202. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.069>
17. Walker L, Fink C, Hilla C, Lu Y, Zhang, W. Peculiar roles of nickel diffusion in intermetallic compound formation at the dissimilar metal interface of magnesium to steel spot welds. *Mater Des*. 2023; 230: 111980. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111980>
18. Chen N, Wang HP, Wang M, Carlson BE, Sigler DR. Schedule and electrode design for resistance spot weld bonding Al to steels. *J Mater Process Technol*. 2019; 265: 158-172. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.011>
19. Guo J, Bi J, Wang S, Li Y, Manladan SM, Luo Z. Modeling the effect of electrode morphology on Mg/steel resistance spot welding. *Int J Adv Manuf Tech*. 2022; 120(1): 137-148. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08547-5>
20. Fei L, Jiang F, Zhang P, Chen C, Zheng Z, Li J, Ma N. Strategies of reducing the heat-affected zone in Mg/steel resistance riveting welding joints for improving joint quality. *J Manuf Processes* 2024; 124: 1316-1329. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.06.070>