



Process and Macrostructural Analysis of Copper Tube Bonding to Carbon Fiber Composite Tube by Electromagnetic Joining Process

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mohammadian E.¹,
Bakhshi Jooybari M.¹,
Gorji H.^{1*},
Nourouzi S.²,

How to cite this article

Mohammadian E, Bakhshi Jooybari M, Gorji H, Nourouzi S, Process and Macrostructural Analysis of Copper Tube Bonding to Carbon Fiber Composite Tube by Electromagnetic Joining Process. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(02):65-75.

¹ Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

² Department of Material and industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

hamidgorji@nit.ac.ir

Article History

Received: December 4, 2023

Accepted: April 30, 2024

ePublished: May 10, 2024

ABSTRACT

Today, the industry's need to join dissimilar metals has increased, especially in the automotive and aircraft industries. In this regard, in order to join metals, new methods, called solid state joining, have been used, among which electromagnetic joining is performed with a lower cost and at a higher speed. In this research, firstly, the feasibility of joining copper tubes to composite tubes by electromagnetic method and the quality of the joint have been studied. Then, the effect of the welding voltage process parameter on the mechanical properties of the strength has been investigated by the ring test. Finally, in order to examine the surface hardness of the welded samples, the Vickers hardness test was performed. The results show that the joining of the copper samples to the composite tubes has been done well. It has been observed that with the increase in voltage, due to the increase in the collision energy of the two tubes, the connection force has increased by about 2 times. In the 8 kV voltage, due to the increase in the impact speed, a more severe plastic deformation has occurred than in other samples which has caused more local deformation of the weld interface and, as a result, an increase in the hardness. The hardness of the interface in this condition was about 8% higher than that of the 5 kV voltage.

Keywords Electromagnetic Joining, Ring Test, Composite-Copper Joint, Joint Strength, Joint Hardness.

CITATION LINKS

1- Effects of gases and particles in welding and soldering. 2- Occupational hazards in welding industry. 3- Analytical approach for magnetic pulse welding of sheet connections. 4- Electromagnetic impact welding of aluminum to stainless steel sheets. 5- Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminum sheets. 6- Electromagnetic pulse welding of magnesium to aluminium sheets. 7- Interfacial ultrafine-grained structures on aluminum alloy 6061 joint and copper alloy 110 joint fabricated by magnetic pulse welding. 8- On the characteristics of electromagnetic welds between aluminium and other metals and alloys. 9- Application of electromagnetic impact technique for welding copper-to-stainless steel sheets. 10- Joining of tubular carbon fiber-reinforced plastic/aluminum by magnetic pulse welding. 11- Magnetic pulse hybrid joining of polymer composites to metals. 12- Interface characteristics and performance of magnetic pulse welded copper-steel tubes. 13- Investigating the effect of magnetic pulse welding variables on the structural and mechanical properties of AA4014-AA7075 connection. 14- Aluminium to Carbon Fibre Reinforced Polymer tubes joints produced by magnetic pulse welding. 15- Study of the elaboration of a practical weldability window in magnetic pulse welding. 16- Bonding of homogeneous and non-homogeneous metals by electromagnetic method (Master's Thesis). 17- Electromagnetic pulse welding on a magnesium-aluminum joint: Role of angle of welding. 18- Fabrication and mechanical characterization of jute-coir reinforced unsaturated polyester resin hybrid composites with various fiber size using compression moulding technique. 19- Improving the microstructure and mechanical properties of Al-Cu dissimilar joints by ultrasonic dynamic-stationary shoulder friction stir welding.

تحلیل فرآیندی و ماکروساختاری اتصال لوله‌های مسی به لوله‌های کامپوزیت فیبر کربنی با فرآیند اتصال‌دهی الکترومغناطیسی

اسمعیل محمدیان^۱، محمد بخشی جویباری^۱، حمید گرجی^{۲*}، سلمان نوروزی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل.

^۲ دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل.

چکیده

امروزه نیاز صنعت به اتصال فلزات غیرهم‌جنس به خصوص در صنایع خودروسازی و هواپیماسازی افزایش پیدا کرده است. در این راستا، به‌منظور انجام اتصال بین فلزات، از روش‌های جدیدی تحت عنوان اتصال حالت جامد استفاده شده است که در میان این روش‌ها، اتصال‌دهی به روش الکترومغناطیسی از سایر روش‌ها کم هزینه‌تر و با سرعت بالاتر انجام می‌شود. در این پژوهش، ابتدا امکان‌سنجی اتصال لوله مسی به لوله کامپوزیتی به روش الکترومغناطیسی و کیفیت اتصال مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس تأثیر پارامتر فرآیندی ولتاژ جوشکاری بر خواص مکانیکی استحکام توسط آزمایش حلقه مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها هم به منظور بررسی سختی سطح نمونه‌های جوشکاری شده از آزمون سختی سنجی ویکرز استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که اتصال نمونه‌های مس به کامپوزیت به خوبی انجام گرفته است. مشاهده شده است که با افزایش ولتاژ، بدلیل بیشتر شدن انرژی برخورد دو لوله، نیروی اتصال به میزان حدود ۲ برابر افزایش پیدا کرده است. در نمونه ۸ کیلوولت، به دلیل افزایش سرعت برخورد، تغییر شکل پلاستیک شدیدی نسبت به دیگر نمونه‌ها ایجاد شده که سبب تغییر شکل موضعی بیشتر فصل مشترک جوش و در نتیجه افزایش سختی شده است. سختی فصل مشترک در این نمونه نسبت به نمونه ۵ کیلوولت حدود ۸ درصد بیشتر بوده است. **کلیدواژه‌ها:** اتصال‌دهی الکترومغناطیسی، آزمایش حلقه، اتصال کامپوزیت-مس، استحکام اتصال، سختی اتصال.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

* نویسنده مسئول: hamidgorji@nit.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه کاهش مصرف سوخت و نسبت استحکام به وزن جزء ملاحظات اصلی در صنایعی مانند خودروسازی و هواپیماسازی محسوب می‌شود. یکی از موارد مهم در این زمینه، اتصال فلزات غیرهم‌جنس می‌باشد. اگرچه بیشتر فلزات غیرهم‌جنس را می‌توان به روش‌های حالت جامد و لحیم‌کاری سخت و نرم به هم اتصال داد، ولی در انجام اتصال، در صورت استفاده از روش‌های ذوبی، فلز جوش دارای خواص متفاوتی خواهد بود که می‌تواند منجر به مشکلات دیگری همچون تنش‌های دینامیکی و استاتیکی شود^[۱]. یکی از مشکلات اصلی در اتصال فلزات غیرهم‌جنس، تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده است که در جوشکاری‌های سنتی ذوبی به علت ایجاد دماهای خیلی بالاتر، حادث‌تر است^[۲].

هنگامی که دو فلز در یکدیگر حلالیت نداشته باشند و در عوض ترکیبات بین فلزی ترد با یکدیگر ایجاد کنند، نمی‌توان جوش ذوبی مناسبی بین آن‌ها ایجاد کرد. در صورت ایجاد ترکیبات بین فلزی در منطقه جوش فلزات غیرهم‌جنس، خواص این ترکیبات بین فلزی مانند انعطاف‌پذیری، حساسیت به ایجاد و رشد ترک و حساسیت به خوردگی باید مورد بررسی دقیق قرار گیرد. از این رو، در صنعت برای اتصال فلزات غیرهم‌جنس، به ندرت از روش جوشکاری ذوبی استفاده می‌گردد و روش‌های جوشکاری حالت جامد گزینه‌های بهتری هستند. در این روش‌ها، فلزات اتصال، خواص اولیه خود را حفظ می‌کنند و مشکلات ناشی از ناحیه متأثر از حرارت در این فرآیندها که دمای پایین‌تری را تجربه می‌کند، کمتر است^[۲]. محققان تحقیقات وسیعی را در این زمینه انجام دادند و به روش‌های نوینی دست یافتند که در بین آن‌ها اتصال‌دهی الکترومغناطیسی (Electromagnetic Joining-EMJ) موردی مناسب و کارآمد می‌باشد که مشکلات حاصل از اتصال ضعیف را برطرف می‌کند. فرآیند اتصال‌دهی الکترومغناطیسی نوعی از جوشکاری حالت جامد است که در آن از نیروی الکترومغناطیسی با سرعت بالا جهت اتصال‌دهی استفاده می‌شود و با حذف فازهای بین فلزی پیوسته و یا به حداقل رساندن آن‌ها، اتصال‌دهی فلزات غیرهم‌جنس امکان‌پذیر می‌گردد. این فرآیند روشی مناسب برای ایجاد اتصال متالورژیکی با استحکام بالا در میان فلزات هم‌جنس، غیرهم‌جنس و آلیاژهای آن‌ها می‌باشد^[۳]. اجزای سیستم اتصال‌دهی الکترومغناطیسی، مطابق شکل ۱ شامل بانک خازن، سیم پیچ، قطعه کارها و مدار تغذیه می‌باشد. با عبور جریان الکتریکی قوی از سیم پیچ، یک میدان مغناطیسی اطراف آن تشکیل می‌شود که باعث القای جریان الکتریکی در لوله‌های رسانای اطراف آن می‌شود و نتیجه آن تولید نیروی دافعه لورنتز بین سیم پیچ و قطعه کارها می‌باشد. در اثر دور شدن از سیم پیچ، لوله‌ها با سرعت بالایی به هم برخورد می‌کنند و اتصال حالت جامد بین آن‌ها شکل می‌گیرد. به دلیل حداقل بودن تشکیل فازهای بین فلزی و عدم ذوب شدن لوله‌ها در خط اتصال، امکان اتصال مواد غیرهم‌جنس در این روش وجود دارد^[۴].

در فرآیند اتصال‌دهی الکترومغناطیسی (EMJ)، در اثر تخلیه انرژی ذخیره شده در خازن، یک میدان مغناطیسی قوی برای تولید جریان استفاده می‌گردد. هنگامی که جریان از کویل می‌گذرد، میدان مغناطیسی که در اطراف کویل ایجاد می‌شود، یک جریان ثانویه را به فلز متحرک رسانا القا کرده که مخالف جهت میدان اولیه است. جریان‌های خلاف جهت هم، موجب تشکیل نیروی لورنتز رانشی بین قطعه کار و کویل شده و فلز متحرک به سمت فلز هدف تا سرعت چند صد m/s پرتاب می‌گردد. دو قطعه با سرعت بالا به یکدیگر برخورد می‌کنند و اتصال انجام می‌شود. این برخورد موجب تغییر شکل پلاستیک در ماده متحرک می‌شود و هم‌چنین یک اتصال حالت جامد بین دو فلز ایجاد می‌گردد. از این فرآیند

نتیجه گرفتند که روش الکترومغناطیسی برای اتصال دو فلز غیر هم جنس مناسب بوده و تحت شرایط متالورژیکی و فیزیکی یک اتصال خوب حاصل می‌گردد و کیفیت این اتصال به سطح نازک و ناپیوسته آن وابسته بوده و سطح تماس اتصال نیز موثر است می‌باشد. همچنین در این پژوهش نتیجه‌گیری شد که خواص اتصال آلومینیم به تیتانیم، فولاد کم‌کربن و مس متفاوت بوده و در اتصال آلومینیم به تیتانیم و فولاد کم‌کربن، نیاز به اعمال بار بیشتری است.

کوری و همکاران^[9] به بررسی اتصال بین ورق‌های فولاد کم‌کربن و مس به روش الکترومغناطیسی پرداختند که در آن از دو ورق آلومینیمی به‌عنوان شتاب‌دهنده استفاده شده که یک ورق آن در پشت ورق فولادی و ورق دیگر در پشت ورق مسی قرار گرفته بود. آن‌ها برای شتاب‌دهی از یک فاصله‌انداز میان دو ورق مسی و آلومینیم استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که مقادیر سختی به دلیل فشردگی سازی دانه‌های نزدیک به رابط جوش، از فلز پایه بیشتر است. به‌علاوه، در محل اتصال، نواحی خالی یا حفره مشاهده شد. چوی و همکاران^[10] اتصال پلاستیک/ آلومینیم تقویت شده با فیبر کربن لوله‌ای با جوشکاری پالس مغناطیسی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با فیبر کربن (CFRP) و لوله‌های آلیاژ آلومینیم 5A02 و یک لوله مغزی از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ برای پشتیبانی از لوله CFRP استفاده گردید. لوله‌های CFRP با دیواره نازک و لوله‌های آلومینیم 5A02 با دیواره نازک با کیفیت خوبی به هم متصل شده بودند. استحکام اتصال بین لوله CFRP جدار نازک و لوله آلومینیم 5A02 با دیواره نازک که با استفاده از این روش به دست آمد، قوی‌تر از لوله آلومینیمی با فلز پایه ضعیف‌تر بود. اصطکاک و قفل‌شدگی سهم زیادی در مقاومت در برابر بار کششی داشتند. نیروی اصطکاک که بین سطح داخلی لوله آلومینیمی و سطح بیرونی لوله CFRP وجود آمده، نتیجه تنش‌های حلقوی باقی‌مانده بود. لوله بیرونی یا آلومینیمی به صورت پلاستیکی تغییر شکل داده شد، و لوله CFRP به‌صورت الاستیکی و باعث ایجاد تنش در فرآیند اتصال گردید. نیروی قفل‌کننده نتیجه جوشکاری لوله آلومینیمی و لوله هسته در هر سوراخ بود. این نیرو نقش تعیین‌کننده‌ای در مقاومت در برابر بار کششی ایفا کرد.

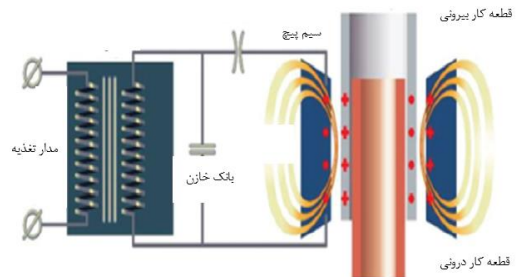
خلیل و همکاران^[11] با اعمال پالس مغناطیسی، به بررسی اتصال ورق کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف (FRPC) به ورق فولادی DC04 پرداختند. آنان با وارد کردن یک مغزی فلزی نازک در کامپوزیت یا استفاده از یک لایه فلزی بر روی کامپوزیت به امکان سنجی ایجاد اتصال به صورت تجربی پرداختند. طراحی و نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که اتصال‌دهی الکترومغناطیسی به عنوان ابزاری مناسب برای اتصال اجزای ورق فلزی و FRPC است. پاترا و همکاران^[12] با اعمال پالس مغناطیسی، اتصال لوله‌های مسی و فولادی را مورد ارزیابی قرار دادند. اتصال‌های رضایت بخش

می‌توان برای اتصال قطعات متقارن به دلیل امکان کنترل میدان مغناطیسی استفاده کرد^[4].

مکانیزم شکل‌گیری اتصال در روش اتصال‌دهی الکترومغناطیسی فلز با فلز مطابق با دو تئوری مختلف بیان شده است. مکانیزم اول بر اساس تئوری مکانیک حالت جامد است که در نتیجه تغییر شکل شدید ورق‌ها اتصال مکانیکی اتفاق می‌افتد. تئوری دوم بر اساس ذوب موضعی و انجماد سریع ورق‌ها و در نتیجه ایجاد اتصال بین آن‌ها است^[5].

فرآیند اتصال‌دهی الکترومغناطیسی دارای مزایای زیر است^[6]:

۱. دستیابی به وزن کمتر و استحکام بالاتر در فلزات غیرهم جنس
 ۲. تکرار پذیری بالا و افزایش کیفی و ارتقای خواص مکانیکی در محل اتصال به دلیل سرعت بالای فرآیند
 ۳. دقت بالا و هزینه پایین نسبت به روش‌های معمول
 ۴. نبود حرارت، ماده پراکنده و گاز و همچنین سختی بیشتر محل اتصال نسبت به سختی حالت اولیه
- از جمله کاربردهای روش اتصال‌دهی الکترومغناطیسی می‌توان در صنایع دریایی، خوروسازی، هوافضا، الکتریسیته، رباتیک و هواپیماسازی نام برد.



شکل ۱) طرحواره اجزای سیستم اتصال‌دهی الکترومغناطیسی^[4]

در زمینه اتصال‌دهی فلز به فلز و فلز به کامپوزیت با روش الکترومغناطیسی و غیر الکترومغناطیسی مطالعات زیادی از سوی پژوهشگران انجام شده است. ژانگ و همکاران^[7] فصل مشترک اتصال بین آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و مس ۱۱۰ را توسط روش جوشکاری الکترومغناطیسی در انرژی شارژ ۶/۴ کیلوژول بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از تکنیک نانوسختی‌سنجی افزایش قابل توجهی را در سختی فصل مشترک اتصال ملاحظه کردند. به‌علاوه، دانه‌های بسیار ریز با اندازه ۵۰ میکرومتر در حضور مرزهایی در محدوده زاویه‌های بسیار بزرگ تا بسیار کوچک در فصل مشترک مشاهده گردید. همچنین کاهش اندازه دانه‌ها، سختی فصل مشترک را افزایش داده بود.

ماریا و همکاران^[8] جوشکاری الکترومغناطیسی بین آلومینیم و فلزات دیگر همانند تیتانیم، مس و فولاد کم‌کربن را بررسی کردند که در آن از کوئل فبری برای جوشکاری استفاده شده بود. آن‌ها

حاصل از تغییر شکل پلاستیک در فصل مشترک است، دانه‌ها تغییر شکل بیشتری در نزدیکی امواج با دامنه بالا پیدا می‌کنند. همچنین نتیجه گرفتند حفره‌های ناپوسته در فصل مشترک بدلیل فاصله زیاد قبل از برخورد ایجاد شده و یکپارچگی اتصال کاهش یافته است.

محمدیان^[16] اتصال فلزات هم‌جنس و غیرهم‌جنس همانند فولاد، آلومینیم و برنج به مس و فولاد ساده کربنی به فولاد زنگ‌زن را به روش الکترومغناطیسی تحت ولتاژها و فاصله قبل از برخوردهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگر فاصله ثابت باشد، با افزایش ولتاژ اتصال مستحکم‌تری حاصل می‌شود. با افزایش فاصله تا مقدار مشخصی با ثابت ماندن ولتاژ، استحکام زیادتر شده و اگر میزان فاصله قبل از برخورد از ۱/۵ میلی‌متر بالاتر رود استحکام شدیداً کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده گردید که در میان نمونه‌های مورد بررسی اتصال فولاد به مس نسبت به دیگر نمونه‌ها استحکام بیشتری دارد.

وانگ و همکاران^[17] به بررسی اتصال منیزیم و آلومینیم با استفاده از فرآیند جوشکاری پالس الکترومغناطیسی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که استحکام کششی اتصال زمانی که زاویه جوشکاری صفر درجه باشد، بیشترین مقدار را دارد. استحکام کششی ورق منیزیم، حرکت نقطه برخورد و جت فلزی در طی فرآیند جوشکاری پالس الکترومغناطیسی تحت تأثیر زاویه قرار گرفته و باعث تفاوت در ضخامت لایه انتشار، مورفولوژی سطح مشترک موج دار و طول ناحیه جوش داده شده می‌شود. علاوه بر این، کیفیت اتصالات با زوایای مختلف را می‌توان با افزایش انرژی تخلیه بهبود بخشید.

لازم به بیان است که در مقاله‌هایی که دیگر پژوهشگران پیرامون فرآیند الکترومغناطیس پالسی به چاپ رسانده و در این بخش مورد ارجاع قرار گرفته‌اند، از اصطلاحات مشابهی بهره گرفته‌اند که یکسان هستند. این اصطلاحات مشابه، شامل فرآیندهای اتصال-دهی الکترومغناطیسی (Electromagnetic Joining-EMJ)، جوشکاری پالس مغناطیسی (Magnetic Pulse Welding-MPW)، جوشکاری پالس الکترومغناطیسی (Electromagnetic Pulse Welding-EPW) و جوشکاری ضربه‌ای الکترومغناطیسی (Electromagnetic Impact Welding-EIW) می‌باشد. در مقاله حاضر از عبارت فرآیند اتصال‌دهی الکترومغناطیسی (Electromagnetic Joining-EMJ) استفاده شده است.

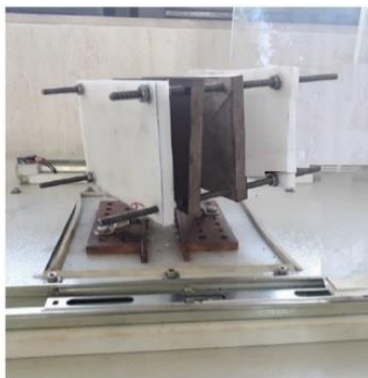
در مطالعات انجام شده، اتصال لوله‌ها و ورق‌های فلزی و غیرفلزی در جریان‌ها و تحت فاصله‌های هوایی مختلف به روش‌های اتصال‌دهی الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته ولی امکان‌سنجی اتصال لوله‌های از جنس کامپوزیت به مس به روش الکترومغناطیسی انجام نشده و تأثیر پارامترهایی همچون فاصله قبل از برخورد و ولتاژ اتصال برای جنس ورق یا لوله کامپوزیت به

با مجموعه‌ای از پارامترهای بهینه شامل ولتاژ، فاصله قبل از برخورد و زاویه برخورد اولیه به دست آمد. اثر کرنش-سختی به دلیل تأثیر انرژی بالا منجر به سختی بالاتر در سمت لوله فولادی شد. آزمایش‌های پیچشی، استحکام فصل مشترک قابل قبول را تأیید کرد زیرا شکست در ماده پایه مسی رخ داد.

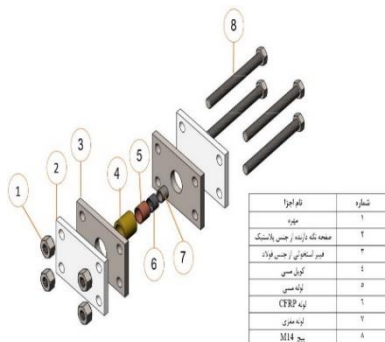
پورعباس و همکاران^[13] اثربخشی متغیرهای جوشکاری مغناطیسی بر خواص ساختاری و مکانیکی اتصال آلومینیم ۴۰۱۴ و آلومینیم ۷۰۷۵ را بررسی کردند. در این پژوهش آن‌ها برای ایجاد اتصال از سه زاویه برخورد مختلف ۴، ۶ و ۸ درجه و ولتاژهای جوشکاری ۶ و ۷ کیلوولت استفاده کردند. نتایج حاکی از آن است که در زاویه‌های برخورد ۴ و ۶ درجه، با افزایش ولتاژ جوشکاری از ۶ به ۷ کیلوولت، مورفولوژی فصل مشترک از خطی به موجی تغییر می‌یابد. افزایش ولتاژ در زاویه برخورد ۸ درجه سبب تخریب فصل مشترک و ذوب شدگی موضعی بیشتر می‌شود. در زاویه یکسان با بیشتر شدن ولتاژ، به علت تغییر شکل پلاستیک و کارسختی بیشتر، سختی افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر ولتاژ جوشکاری بر سختی فصل مشترک جوش بیشتر از زاویه برخورد است. نمونه ۷ کیلوولت - ۸ درجه دارای حداکثر سختی به میزان ۱۷۷ ویکرز می‌باشد. در نمونه فوق به دلیل افزایش همزمان ولتاژ جوشکاری و زاویه برخورد، سرعت برخورد بیشتر بوده و تغییر شکل پلاستیک شدیدتری نسبت به دیگر نمونه‌ها ایجاد شده که سبب ذوب شدگی بیشتر فصل مشترک جوش می‌گردد. سختی فصل مشترک در این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر ۲۰ - ۵ درصد بیشتر می‌باشد.

پیرا و همکاران^[14] با استفاده از جوشکاری پالس مغناطیسی، به بررسی اتصال لوله CFRP با لوله آلومینیمی ۷۰۷۵ پرداختند. حداقل انرژی تخلیه ۲/۵ کیلوژول و فاصله قبل از برخورد ایجاد شده بین دو لوله ۱ میلی‌متر بوده است. برای کاهش آسیب‌های ناشی از نیروهای ضربه و افزایش مقاومت محوری اتصال، تعداد دورهای بیشتری در سیم پیچ ایجاد شد. برای محافظت از لوله CFRP در برابر ضربه و دستیابی به جوش مناسب، یک پوشش نیکل الکترولیتی بر روی لوله CFRP قرار داده شد. ملاحظه گردید که هنگامی که یک تکیه گاه صلب برای محدود کردن جابجایی دیواره CFRP استفاده شود، این فرآیند برای اتصال این ترکیب از مواد مناسب است. به علاوه، اتصال‌های مناسب بین CFRP و لوله آلومینیمی بدون هیچ گونه ترکیبات بین فلزی در سطح مشترک در انرژی‌های تخلیه مختلف بدست آمد.

رائولیس و همکاران^[15] اتصال همجنس لوله به مفتول آلومینیم ۶۰۶۰ را با فاصله‌های قبل از برخورد و ولتاژهای مختلفی با استفاده از فرآیند اتصال‌دهی الکترومغناطیسی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش فاصله قبل از برخورد در ولتاژ ثابت، موج‌های بزرگتری در فصل مشترک تشکیل می‌شوند و تغییر شکل شدیدتری رخ می‌دهد. بدلیل آن که تشکیل موج



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲) (الف) مجموعه قالب ساخته شده جهت انجام آزمایش‌ها (ب) طرحواره انفجاری اجزای قالب (ج) کویل مسی پیچانده شده و عایق شده (د) کویل بعد از پوشیده شدن با فایبرگلاس و رزین اپوکسی.

لوله مسی و کامپوزیتی ۰/۵ میلی‌متر بوده است. شکل ۴ (الف) و (ب) نمونه‌های استفاده شده در آزمایش و جدول ۱ مشخصات مکانیکی لوله‌های مس و کامپوزیت فایبرکربنی را که با انجام آزمایش کشش بدست آمده است، نشان می‌دهد.

مس بدست نیامده است. همچنین خواص مکانیکی و بررسی سختی اتصال کامپوزیت به مس به روش اتصال‌دهی الکترومغناطیسی تاکنون انجام نگرفته است. از این رو در پژوهش حاضر، ابتدا امکان‌سنجی اتصال لوله مسی به لوله کامپوزیتی به روش الکترومغناطیسی و کیفیت اتصال مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس تأثیر پارامتر فرآیندی ولتاژ جوشکاری بر خواص مکانیکی استحکام توسط آزمایش حلقه مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها هم به منظور بررسی سختی نمونه‌های جوشکاری شده از آزمون سختی‌سنجی ویکرز استفاده گردید.

۲-مراحل آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌های اتصال‌دهی الکترومغناطیسی از یک دستگاه شکل‌دهی پالسی، یک مجموعه قالب و یک کویل استفاده شده است. دستگاه الکترومغناطیسی مورد استفاده دارای محدوده ولتاژ قابل اعمال ۳/۵ تا ۱۰/۵ کیلوولت، ظرفیت ۲۰۵ میکروفاراد، مقاومت الکتریکی ۱۰ میلی‌اهم و اندوکتانس ۱۰ نانوهرنری می‌باشد.

برای انجام آزمایش از مجموعه قالب و کویل که شامل اجزایی هم‌چون فیبر استخوانی، کویل مسی با پوشش فایبرگلاس و رزین اپوکسی است، استفاده شده است. به دلیل فشار و نیروی زیاد میدان مغناطیسی در هنگام آزمایش و برای ممانعت از افزایش قطر کویل، دور سیم پیچ با فایبرگلاس پوشانده شد. شکل‌های ۲ الف تا د به ترتیب مجموعه قالب ساخته شده جهت انجام آزمایش، طرحواره انفجاری اجزای قالب، کویل ساخته شده و کویل با پوشش فایبرگلاس و رزین اپوکسی را نشان می‌دهد.

همچنین طرحواره‌ای از انجام شدن فرآیند و نحوه قرارگیری لوله‌ها داخل هم در شکل ۳ نشان داده شده است. برای پشتیبانی از لوله کامپوزیتی و پرتاب نشدن آن به دلیل سرعت بالای فرآیند از یک لوله مغزی توپر از جنس فولادی استفاده گردید که به صورت انطباق پرسی در داخل لوله کامپوزیتی قرار می‌گیرد. سطح داخلی لوله مسی و سطح بیرونی لوله مغزی قبل از مونتاژ برای حذف لایه اکسید با کاغذ سنباده صیقل داده شدند. به دلیل القای الکترومغناطیسی، جریان‌های گردابی در سطح لوله بیرونی در مجاورت شکل‌دهنده میدان بر اساس قانون لورنتز تحریک می‌شوند و به سطح داخلی جریان می‌یابند. نیروی لورنتز سبب می‌شود لوله بیرونی با یک نیرو و سرعت فوق‌العاده به لوله مغزی ضربه بزند و اتصال انجام گیرد. همچنین پس از اتصال لوله مغزی با زدن یک ضربه ساده از داخل لوله کامپوزیتی بیرون می‌آید.

برای انجام آزمایش‌ها از لوله مسی با قطر خارجی ۲۳ میلی‌متر و قطر داخلی ۲۱ میلی‌متر و لوله کامپوزیتی تشکیل شده از الیاف کربن Toray T300 و رزین اپوکسی با قطر خارجی ۲۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۸ میلی‌متر و لوله مغزی فولادی توپر با قطر ۲۰ میلی‌متر، استفاده شده است. فاصله قبل از برخورد ایجاد شده بین



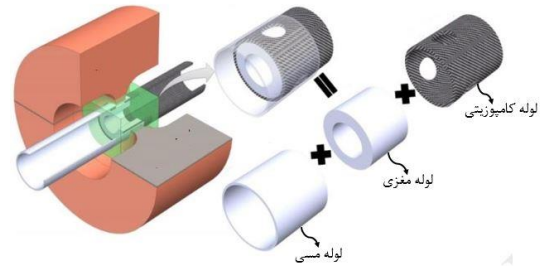
(الف)



(ب)

شکل ۵ (الف) دستگاه آزمایش اونیورسال (DMG) جهت انجام آزمایش حلقه (ب) قالب ساخته شده.

دستگاه در طول انجام آزمایش‌ها متصل به یک واحد کامپیوتری بوده و کلیه حرکات آن توسط کامپیوتر قابل کنترل می‌باشد. سرعت این دستگاه متغیر است و با استفاده از کامپیوتر متصل به آن قابل تنظیم می‌باشد. حداکثر سرعت در ماشین اونیورسال ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه است. در این دستگاه، مقدار نیرو بر حسب جابجایی در هر لحظه توسط کامپیوتر قابل ثبت می‌باشد. نمونه‌های آماده شده برای انجام آزمایش حلقه به همراه طرحواره تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۶ الف و ب نشان داده شده است. به‌منظور بررسی مقدار سختی، پس از مقطع‌زدن و مانع‌کردن، نمونه‌ها سمباده‌زنی شده و سپس با استفاده از یک دستگاه پولیش مکانیکی و به‌کارگیری نمد مخصوص، عملیات پولیش کاری انجام گردید. در حین پولیش کاری، پاشش محلول ذرات آلومینای ۱ میکرومتر انجام شد. سرعت چرخش دستگاه پولیش ۲۰۰ دور بر دقیقه بوده و به مدت ۲۰ دقیقه عملیات ادامه یافت. پس از اینکه نمونه‌ها آماده‌سازی شد، سختی آن‌ها با دستگاه



شکل ۳ طرحواره‌ای از مراحل انجام فرآیند و نحوه قرارگیری لوله‌ها داخل هم^[10].



شکل ۴ نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش.

جدول ۱) مشخصات مکانیکی مس و کامپوزیت فیبر کربنی

ماده	مس	کامپوزیت فیبر کربنی
استحکام کششی (مگاپاسکال)	۲۳۵	۷۸۰
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۸۹۴۰	۱۷۸۰
مدول الاستیسیته	۲۱۰	۸۳

برای بررسی استحکام اتصال بر حسب ولتاژ برای نمونه کامپوزیت فیبرکربنی به مس، آزمایش حلقه در فاصله قبل از برخورد ثابت ۰/۵ میلی‌متر و برای ولتاژ ۵ کیلوولت انجام شده است. آزمایش حلقه یک آزمون استاندارد است که برای بدست آوردن استحکام لوله های پلیمری از آن استفاده می‌شود. برای انجام آزمایش حلقه، از یک دستگاه آزمون اونیورسال هیدرولیکی (DMG) با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. دستگاه آزمایش حلقه به همراه قالب ساخته شده در شکل ۵ الف و ب نشان داده شده است. این

۳- نتایج و بحث

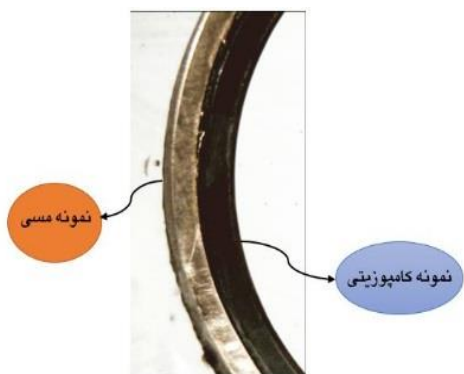
۳-۱- بررسی امکان‌سنجی اتصال مس به کامپوزیت فیبرکربنی
اتصال مس به کامپوزیت فیبرکربنی تحت ولتاژهای ۵، ۶، ۷ و ۸ کیلوولت و همچنین فاصله قبل از برخورد ۰/۵ میلی‌متر بررسی شده است. شکل ۸ (الف) اتصال جنس‌های مس به کامپوزیت تحت ولتاژهای مختلف را نشان می‌دهد. همچنین تصویر ماکروساختاری از فصل مشترک جوش با بزرگ‌نمایی $1\times$ در شکل ۸ (ب) و با بزرگ‌نمایی $40\times$ در شکل ۸ (ج) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

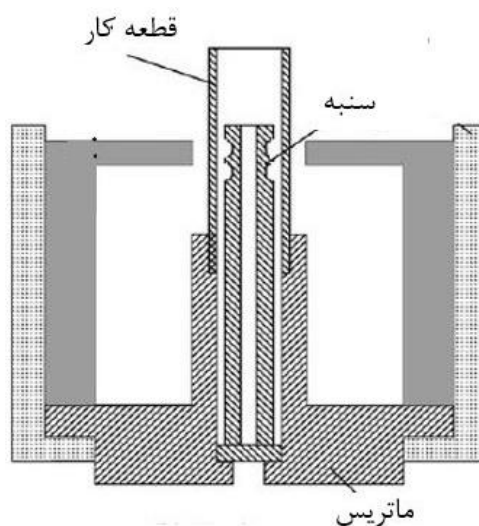


(ج)

شکل ۸ (الف) اتصال مس به کامپوزیت فیبر کربنی تحت ولتاژهای ۵، ۶، ۷ و ۸ کیلوولت. (ب) تصویر ماکروساختاری از فصل مشترک جوش با بزرگ‌نمایی $1\times$ (ج) با بزرگ‌نمایی $40\times$.



(الف)



(ب)

شکل ۶ (الف) نمونه‌های آماده شده جهت انجام آزمون حلقه (ب) طرحواره تجهیزات آزمایشگاهی.

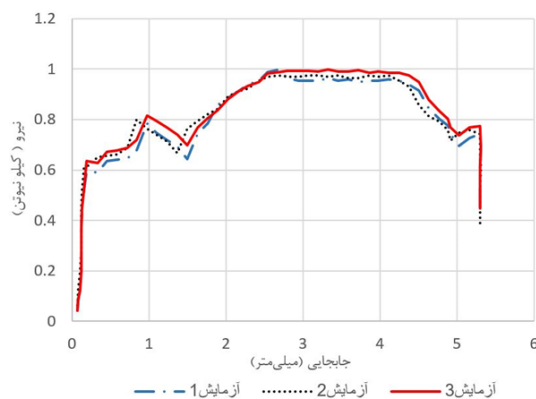
سختی‌سنجی میکروویکرز مدل MH3 اندازه‌گیری شد که شکل ۷ دستگاه سختی سنجی جهت اندازه‌گیری سختی نمونه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷ دستگاه سختی سنجی میکرو ویکرز مدل MH3.

شکل ۱۰ منحنی تغییرات نیروی اتصال بر حسب جابجایی را در ولتاژ ۵ کیلوولت نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد در هر ۳ آزمایش نتایج نمودار نیرو - جابجایی به هم نزدیک است و مقادیر ماکزیمم نیرو در ۳ آزمایش انجام شده به ترتیب ۹۹۷، ۹۸۰ و ۹۷۵ نیوتن بوده که میانگین نیروی اتصال تقریباً ۹۸۴ نیوتن می‌باشد. در اتصال الکترومغناطیسی کامپوزیت فیبرکربنی به مس به علت تغییر شکل شدید پلاستیک و سرعت بالای برخورد، اتصال خوبی انجام شده است. در این نمودارها نیروی اتصال به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش اول نیروی حاصل از اتصال مکانیکی که بر اثر جمع شدن لوله ایجاد می‌شود و بر اثر فشار و اصطکاک این اتصال برقرار می‌شود. نیروی اصطکاکی که بین سطح داخلی لوله مسی و سطح بیرونی لوله CFRP بوجود می‌آید نتیجه تنش‌های حلقوی باقی‌مانده می‌باشد که سبب شده نیرو بین بازه ۰/۸ تا ۱/۵ میلی‌متر کاهش یابد. نوع دوم اتصال بر اثر ایجاد پدیده جوش می‌باشد که نیروی اتصال را افزایش می‌دهد و در آزمون حلقه نیرو تا یک منطقه افزایش یافته و پس از جدا شدن قطعه از آن با کاهش نیرو تا نیروی اصطکاک مکانیکی کاهش می‌یابد و از آن پس مشاهده می‌شود که نیروی اتصال با نرخ زیاد کاهش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که نتایج این نمودار با نتایج چوی و همکاران مطابقت دارد [10].

شکل ۱۱ منحنی تغییرات نیروی اتصال بر حسب جابجایی در ولتاژهای ۵، ۶، ۷ و ۸ کیلوولت و در فاصله قبل از برخورد ۰/۵ میلی‌متر توسط آزمایش حلقه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد هرچه انرژی اتصال بیشتر شود اتصال مستحکم‌تر و قوی‌تری حاصل می‌گردد. اتصالی که حاصل ولتاژ جوشکاری بالاتری است و انرژی برخورد بیشتری دارد، بدلیل سطح درگیری بیشتر لوله‌ها در این حالت استحکام بیشتری هم دارد. بنابراین افزایش ولتاژ جوشکاری، سبب افزایش تغییر شکل پلاستیک و کارسختی در فصل مشترک جوش شده و در نتیجه استحکام فصل مشترک جوش افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰) منحنی تغییرات نیروی اتصال بر حسب جابجایی در ولتاژ ۵ کیلوولت.

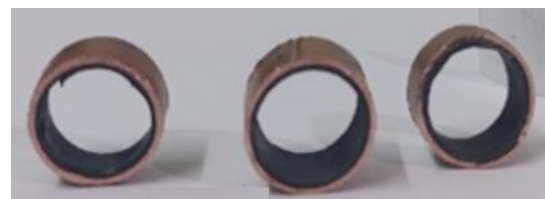
با مشاهده نمونه‌های شکل ۸ این نتیجه حاصل شده است که اتصال نمونه‌های مس به کامپوزیت به خوبی انجام گرفته است. اتصال در تمامی ولتاژها و فاصله قبل از برخورد ۰/۵ میلی‌متر مناسب و بدون نقص بوده است. سطح اتصال صاف و چروکی در آن ایجاد نشده است. بدین ترتیب، امکان جوش تحت تأثیر اندوکتانس یا ظرفیت القای مغناطیسی کوئل تأیید شده است.

۳-۲- بررسی استحکام اتصال بر حسب ولتاژ برای نمونه کامپوزیت فیبرکربنی به مس

برای بررسی استحکام اتصال بر حسب ولتاژ برای نمونه کامپوزیت فیبرکربنی به مس، آزمایش حلقه در فاصله قبل از برخورد ثابت ۰/۵ میلی‌متر و برای ولتاژهای مختلف انجام شده است. ابتدا جهت تکرارپذیری انجام آزمایش، سه بار آزمون حلقه در ولتاژ ۵ کیلوولت انجام شده که شکل ۹ الف و ب نمونه‌های آماده شده جهت انجام آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۹ ج) تصویر نمونه‌ها بعد از آزمون حلقه را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

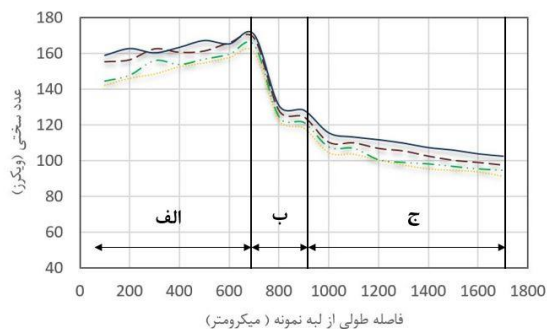


(ج)

شکل ۹) (الف) نمونه‌های آماده شده در ولتاژ ۵ کیلوولت جهت تکرارپذیری آزمایش (ب) رینگ‌های آماده شده از نمونه‌ها جهت انجام آزمایش حلقه (ج) تصویر نمونه‌ها بعد از آزمون حلقه.

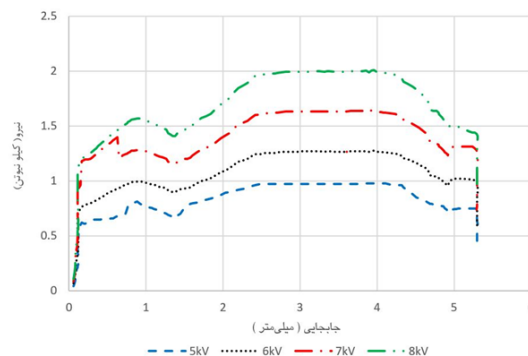
همانطور که مشاهده می‌شود، پراکندگی سختی منحنی مس قابل قبول است و بیشترین میزان سختی ۱۳۷ ویکرز می‌باشد. همچنین بیشترین سختی نمونه کامپوزیتی هم ۸۶ ویکرز می‌باشد. بالاتر بودن میزان سختی مس نسبت به کامپوزیت به دلیل این واقعیت است که مدول الاستیسیته مس بالاتر از CFRP است که مربوط به مقاومت ماده در برابر تغییر شکل تحت رفتار فرورفتگی است. علت آن‌که در نمونه کامپوزیتی برخی از نقاط در مقایسه با نقاط دیگر مقدار کمی سختی ایجاد می‌کنند به دلیل وجود منطقه غنی از رزین در محل معینی در کامپوزیت و مشکل در همگن‌سازی کامل در مواد کامپوزیت می‌باشد. نتایج این تحلیل با نتایج یاکوب و همکاران مطابقت دارد [18].

شکل ۱۳ منحنی تغییرات سختی بر حسب فاصله طولی از لبه نمونه برای ولتاژهای مختلف نمونه‌های جوشکاری‌شده در سه ناحیه نمونه مسی (الف)، ناحیه فصل مشترک (ب) و ناحیه کامپوزیتی (ج) را نشان می‌دهد. همانطور که اشاره گردید، اولین مقدار سختی نمونه در فاصله طولی ۵۰ میکرومتر از لبه نمونه اندازه‌گیری شد. فاصله یک نقطه از نقطه بعد برای اندازه‌گیری میزان سختی، ۱۰۰ میکرون در نظر گرفته شد. در نمونه‌های اتصال داده شده، در ۱۷ نقطه اندازه‌گیری سختی انجام شد که شامل ۷ نقطه در نمونه مسی، ۳ نقطه در ناحیه فصل مشترک و ۷ نقطه در ناحیه کامپوزیتی بوده است. در نواحی نزدیک به ناحیه فصل مشترک، برای نمونه کامپوزیتی هم تا حدودی افزایش سختی وجود داشته است که این افزایش به دلیل کار سختی فلز و نوع اتصال و سرعت بالای فرآیند می‌باشد.



شکل ۱۳ منحنی تغییرات سختی بر حسب فاصله طولی از لبه نمونه برای ولتاژهای مختلف.

مهمترین عوامل تأثیر گذار بر روی سختی محل اتصال، پارامترهای فرآیند از جمله ولتاژ جوشکاری می‌باشد. با تغییر در پارامترهای فرآیند اتصال، حرارت ورودی و اندازه ریز ساختار اتصال تغییر می‌کند و به دنبال آن سختی محل اتصال دستخوش تغییر می‌شود.

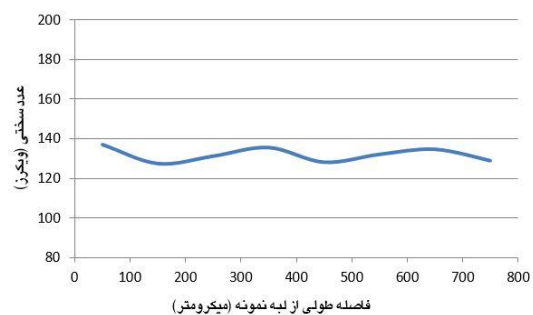


شکل ۱۱ منحنی تغییرات نیروی اتصال بر حسب جابجایی در ولتاژهای مختلف.

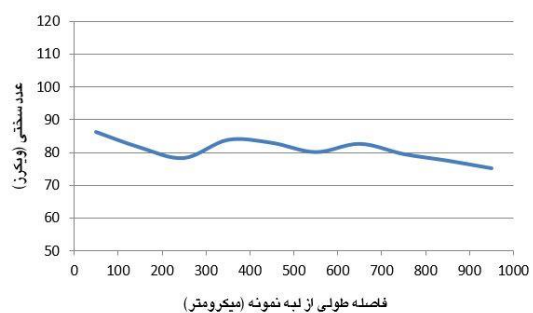
با افزایش ولتاژ از ۵ کیلوولت به ۸ کیلوولت نیروی اتصال به میزان تقریباً ۲ برابر افزایش یافته است.

۳-۳- بررسی سختی نمونه‌های جوشکاری‌شده از آزمون سختی سنجی ویکرز

شکل ۱۲ الف و ب منحنی سختی ویکرز نمونه اولیه مس و کامپوزیت بر حسب فاصله طولی از لبه نمونه قبل از جوشکاری را نشان می‌دهد. اولین مقدار سختی نمونه در فاصله طولی ۵۰ میکرومتر از لبه نمونه اندازه‌گیری شد و فاصله نقطه بعد برای اندازه‌گیری میزان سختی، به اندازه ۱۰۰ میکرومتر از نقطه قبلی بوده است. برای نمونه مسی در ۹ نقطه و برای نمونه کامپوزیتی در ۷ نقطه اندازه‌گیری شد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲ منحنی تغییرات سختی ویکرز بر حسب فاصله طولی از لبه نمونه (الف) مس (ب) کامپوزیت.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، امکان سنجی فرآیند و بررسی ماکروساختاری اتصال لوله‌های مسی به لوله‌های کامپوزیت فیبرکربنی با فرآیند الکترومغناطیس پالسی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داده است که :

۱- اتصال نمونه‌های مس به کامپوزیت به خوبی انجام گرفته است. اتصال در تمامی ولتاژها و فاصله قبل از برخورد ۰/۵ میلی‌متر خوب و بدون نقص بوده است. سطح اتصال صاف و چروکی در آن ایجاد نشده است. ملاحظه گردید که امکان سنجی جوش تحت تأثیر اندوکتانس یا ظرفیت القای مغناطیسی کویل است.

۲- منحنی تغییرات نیروی اتصال بر حسب ولتاژهای ۵، ۶، ۷ و ۸ کیلوولت در فاصله قبل از برخورد ۰/۵ میلی‌متر توسط آزمایش حلقه نشان می‌دهد که اتصال که تحت ولتاژ جوشکاری بالاتری ایجاد شد، استحکام بیشتری هم دارد. با افزایش ولتاژ از ۵ کیلوولت به ۸ کیلوولت نیرو به میزان تقریباً ۲ برابر افزایش یافته است.

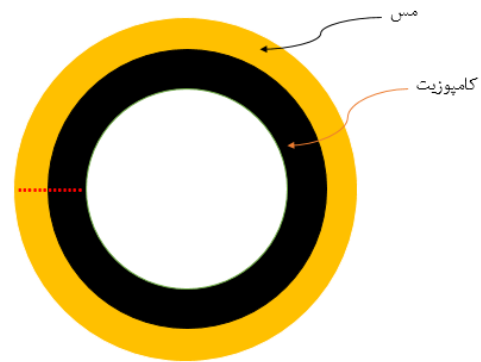
۳- منحنی تغییرات سختی بر حسب جابجایی نمونه‌های جوشکاری شده برای ولتاژهای مختلف نشان می‌دهد که بیشترین سختی مربوط به نمونه ۸ کیلوولت بوده و به میزان ۱۷۰ ویکرز می‌باشد. در نمونه ۸ کیلوولت، به دلیل افزایش سرعت برخورد، تغییر شکل پلاستیک شدیدتری نسبت به دیگر نمونه‌ها ایجاد شده و کارسختی در فصل مشترک جوش بیشتر شده که سبب ذوب‌شدگی بیشتر فصل مشترک جوش و در نتیجه افزایش سختی شده است. سختی فصل مشترک بر حسب ویکرز در این نمونه نسبت به نمونه ۵ کیلوولت حدود ۸ درصد بیشتر می‌باشد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافع برای اظهار وجود ندارد.

منابع

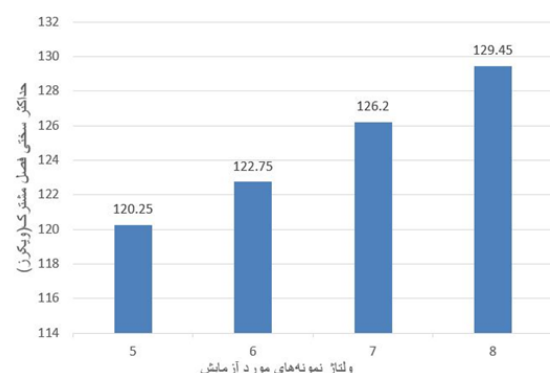
- 1- Sjögren B. Effects of gases and particles in welding and soldering. Occupational Medicine. 3rd ed. Chicago, IL: Mosby-Year Book. 1994:917-23.
- 2- Loukzadeh Z, Torab Jahromi M. Occupational hazards in welding industry. Occupational Medicine Quarterly Journal. 2013 Nov 10;5(3):95-114.
- 3- Hahn M, Weddeling C, Lueg-Althoff J, Tekkaya AE. Analytical approach for magnetic pulse welding of sheet connections. Journal of Materials Processing Technology. 2016 Apr 1;230:131-42.
- 4- Kore SD, Date PP, Kulkarni SV. Electromagnetic impact welding of aluminum to stainless steel sheets. Journal of materials processing technology. 2008 Nov 21;208(1-3):486-93.



شکل ۱۴) طرحواره ماکرو از اتصال نمونه‌های مس و کامپوزیت و نقطه اثرگذاری از نمونه‌ها جهت بدست آوردن سختی ویکرز.

نتایج حاصل آزمون سختی محل اتصال نشان داد که بیشترین سختی مربوط به نمونه ۸ کیلوولت و به میزان حدود ۱۳۰ ویکرز می‌باشد. زیرا به دلیل نحوه قرارگیری مس و کامپوزیت بصورت لب روی هم، نرخ کار مکانیکی و تولید حرارت کم در سرعت بالای فرآیند، ذرات مسی جدا شده از فلز پایه در بستر لوله کامپوزیتی پخش می‌شوند و سبب می‌شوند تا سختی محل اتصال بالاتر روند. نتایج این تحلیل با نتایج یو و همکاران مطابقت دارد [19].

همچنین شکل ۱۵ حداکثر سختی فصل مشترک نمونه‌های جوشکاری شده مس به کامپوزیت فیبر کربنی بر حسب ولتاژهای مورد آزمایش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد اتصالی دارای سختی بیشتری است که تحت ولتاژ جوشکاری بالاتری ایجاد شده است. زیرا با افزایش ولتاژ، انرژی برخورد بیشتر شده و در نتیجه سختی هم بیشتر می‌شود. در نمونه ۸ کیلوولت، به دلیل افزایش سرعت برخورد، تغییر شکل پلاستیک شدیدتری نسبت به دیگر نمونه‌ها ایجاد شده و کارسختی در فصل مشترک جوش بیشتر شده که سبب تغییر شکل موضعی بیشتر فصل مشترک جوش و در نتیجه افزایش سختی شده است. سختی فصل مشترک بر حسب ویکرز در این نمونه نسبت به نمونه ۵ کیلوولت حدود ۸ درصد بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۵) حداکثر سختی فصل مشترک نمونه‌های جوشکاری شده بر حسب ولتاژهای مورد آزمایش.

size using compression moulding technique. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2021;10:233-41.

19- You J, Zhao Y, Dong C, Su Y. Improving the microstructure and mechanical properties of Al-Cu dissimilar joints by ultrasonic dynamic-stationary shoulder friction stir welding. Journal of Materials Processing Technology. 2023 Jan 1;311:117812.

5- Kore SD, Date PP, Kulkarni SV. Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminum sheets. International journal of impact engineering. 2007 Aug 1;34(8):1327-41.

6- Kore S, Imbert J, Zhou Y, Worswick M. Electromagnetic pulse welding of magnesium to aluminium sheets. In Welding and Joining of Magnesium Alloys 2010 Jan 1 (pp. 367-379). Woodhead Publishing.

7- Zhang Y, Babu SS, Daehn GS. Interfacial ultrafine-grained structures on aluminum alloy 6061 joint and copper alloy 110 joint fabricated by magnetic pulse welding. Journal of Materials Science. 2010 Sep;45:4645-51.

8- Marya M, Marya S, Priem D. On the characteristics of electromagnetic welds between aluminium and other metals and alloys. Welding in the World. 2005 May;49:74-84.

9- Kore SD, Date PP, Kulkarni SV, Kumar S, Rani D, Kulkarni MR, Desai SV, Rajawat RK, Nagesh KV, Chakravarty DP. Application of electromagnetic impact technique for welding copper-to-stainless steel sheets. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011 Jun;54:949-55.

10- Cui J, Li Y, Liu Q, Zhang X, Xu Z, Li G. Joining of tubular carbon fiber-reinforced plastic/aluminum by magnetic pulse welding. Journal of Materials Processing Technology. 2019 Feb 1;264:273-82.

11- Khalil C, Marya S, Racineux G. Magnetic pulse hybrid joining of polymer composites to metals. Metals. 2021 Dec 11;11(12):2001.

12- Patra S, Arora KS, Shome M, Bysakh S. Interface characteristics and performance of magnetic pulse welded copper-steel tubes. Journal of Materials Processing Technology. 2017 Jul 1;245:278-86.

13- PourAbbas M, Abdullah Zadeh A, Pouranuri M. Investigating the effect of magnetic pulse welding variables on the structural and mechanical properties of AA4014-AA7075 connection. Madras Mechanical Engineering. 2018 Mar 10;18(1):85-93 (in persian)

14- Pereira D, Oliveira JP, Santos TG, Miranda RM, Lourenço F, Gumpinger J, Bellarosa R. Aluminium to Carbon Fibre Reinforced Polymer tubes joints produced by magnetic pulse welding. Composite Structures. 2019 Dec 15;230:111512.

15- Raoelison RN, Buiron N, Rachik M, Haye D, Franz G, Habak M. Study of the elaboration of a practical weldability window in magnetic pulse welding. Journal of Materials Processing Technology. 2013 Aug 1;213(8):1348-54.

16- M. Mohammadian, M. Bakhshi, H. Georgia, M. Selahshor, bonding of homogeneous and non-homogeneous metals by electromagnetic method, master's thesis, Noshirvani University of Technology, Babol, 2017. (in persian)

17- Wang P, Ning X, Du J, Li C. Electromagnetic pulse welding on a magnesium-aluminum joint: Role of angle of welding. Materials and Manufacturing Processes. 2023 Mar 12;38(4):371-8.

18- Sarukasan D, Thirumavalavan K, Prahadeeswaran M, Muruganandhan R. Fabrication and mechanical characterization of jute-coir reinforced unsaturated polyester resin hybrid composites with various fiber