

Optimizing the Joining Strength of Wire Splices using Ultrasonic Metal Welding

Mehri Gohari, Rezvan Abedini* 

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

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: August 12, 2025

Accepted: October 06, 2025

ePublished: September 07, 2025

ABSTRACT

Wire splicing using ultrasonic metal welding technology is one of the important solutions in the production of quality and modern vehicles. The important challenge in this technology is to properly adjust the important process parameters with the aim of achieving higher joint strength and desirable metallurgical properties. For this purpose, in the present study, using the Response Surface Method (RSM), the effect of two parameters, static pressure and welding energy, on the strength of the Cu wire/wire joint with a total cross-sectional area of 10 mm² has been investigated. Metallurgical examination of the welding, including optical imaging and hardness measurement at the joint section, has also been performed and used in the analysis of the results of Design of Experiment (DOE). Based on the DOE results, both static pressure and welding energy parameters were found to be effective, although the effect of welding energy is much greater than pressure. The optimal value of welding energy was found to be 930J and the maximum joint strength was found to be 782N. The minimum and maximum hardness values were 61 and 80 HV, respectively, which indicates strain hardening in the areas in contact with the horn and anvil, while thermal softening in the central areas of the wire splice.

Keywords: Ultrasonic Wire Splicing, Joining, Copper Wire, Design of Experiment (DOE), Weld Strength.

How to cite this article

Gohari A, Abedini R, Optimizing the Joining Strength of Wire Splices using Ultrasonic Metal Welding. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(10):625-634.

*Corresponding author's email: rezvanabedini@iust.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0003-2985-0853



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



شاپا: ۲۴۷۶-۷۹۰۹؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۶۳۴-۷۲۵(۱۰): ۱۴۰۴

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/mme.2025.27866

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir



بهینه‌سازی استحکام اتصال رشته سیم‌های مسی به روش جوش فراصوتی فلزات

مهری گوهری، رضوان عابدینی*

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

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

چکیده

اتصال‌دهی سیم‌های فلزی به روش فناوری فراصوت توان بالا یکی از راهکارهای مهم در تولید خودروهای با کیفیت و مدرن است. چالش مهم در این فناوری تنظیم درست پارامترهای مهم فرایند با هدف دستیابی به استحکام اتصال بالاتر و ویژگی‌های مطلوب متالورژیکی می‌باشد. بدین منظور در پژوهش حاضر، با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ اثر دو پارامتر فشار استاتیک و انرژی جوش بر استحکام اتصال سیم به سیم مسی با مجموع سطح مقطع 10mm^2 مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی متالورژیکی محل اتصال شامل تصویربرداری نوری و اندازه‌گیری سختی در مقطع اتصال نیز انجام و در تحلیل نتایج طراحی آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. براساس نتایج طراحی آزمایش هر دو معیار فشار استاتیک و انرژی جوش، تاثیرگذار شناخته شدند، هرچند تاثیر انرژی جوش به مراتب بیش از فشار می‌باشد. مقدار بهینه انرژی جوش برابر 930J و حداکثر استحکام اتصال در آن برابر 782N بدست آمد. حداقل و حداکثر مقدار سختی به ترتیب برابر 61HV و 80 بدست آمد که بیانگر کرنش سختی در نواحی در تماس با هورن و سندان و در عین حال نرم شدن حرارتی در نواحی مرکزی خسته سیم می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: جوش فراصوتی سیم، اتصال‌دهی، سیم مسی، طراحی آزمایش، استحکام اتصال

نحوه ارجاع به این مقاله

گوهری مهری، عابدینی رضوان، بهینه‌سازی استحکام اتصال رشته سیم‌های مسی به روش جوش فراصوتی فلزات، مهندسی مکانیک مدرس. ۶۳۴-۷۲۵(۱۰): ۱۴۰۴.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rezvanabedini@just.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0003-2985-0853



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

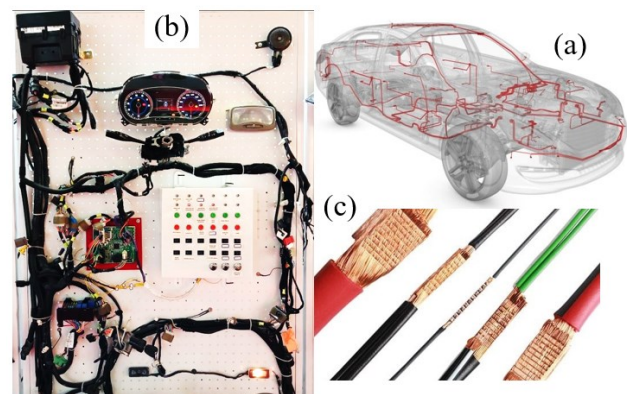
۱- مقدمه

توسعه فناوری‌های پیشرفته مانند خودرو برقی مستلزم کاربرد فناوری‌های نوین و قابل اطمینان در تولید قطعات و مجموعه‌های مورد استفاده در این محصولات می‌باشد. یکی از این مجموعه‌ها، دسته سیم خودرو است که وظیفه ارتباط قدرت و سیگنال اجزای مختلف خودروها اعم از برقی، بنزینی و دیزل را به عهده دارد. در دسته سیم خودرو سیم‌ها از سطح مقطع ۰/۳۵ الی ۴۰ میلیمتر مربع به یکدیگر و یا به تب‌هایی از جنس آلومینیوم، مس و نیکل متصل می‌شوند. در برخی نواحی و اتصالات خودرویی، ممکن است لازم باشد تعداد زیاد سیم با سطح مقطع کوچک به سیم یا سیم‌های با سطح مقطع بزرگ وصل شوند. استفاده از روش‌های متداول اتصال‌دهی مثل لحیم کاری و پرس مکانیکی به هیچ وجه کارایی لازم را در اتصال‌دهی این نوع از محصولات ندارد. در نتیجه استانداردهای خودروسازی، تولیدکنندگان را ملزم به استفاده از فناوری‌های نوین اتصال‌دهی مانند جوش فراصوتی سیم (Ultrasonic wire splicing) نموده است [۱]. شکل a-۱ نشان دهنده گستردگی سیم کشی در داخل یک خودرو [۲] و شکل b-۱ نشان دهنده بخشی از دسته سیم خودرو که اجزای مختلف را به یکدیگر متصل می‌نماید. فرایند جوش فراصوتی سیم‌ها، یک فرایند جوش حالت جامد و زیرمجموعه‌ای از فرایند اصلی جوش فراصوتی فلزات است که به طور خاص برای اتصال رشته سیم‌ها با سطح مقاطع مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل c-۱) [۱].

فرکانس بالا باعث ایجاد یک حرکت نسبی بین قطعات می‌گردد که ایجاد اصطکاک و بالا رفتن دمای سطح تماس را در پی دارد. این دما تا حدی بالا می‌رود که ماده در سطح تماس نرم می‌شود اما ذوب نمی‌شود. پس از آن فشار وارد شده روی قطعه‌ها باعث ایجاد نفوذ در حالت جامد و قفل دو ماده در منطقه جوش می‌شود [۳ و ۴]. نتیجه نهایی، ایجاد یک پیوند متالورژیکی بدون ذوب ناحیه جوش و تولید یک حجم یکپارچه با حداقل تخلخل معروف به خشته سیم (Welded splice nugget) است. این روش اتصال تا حدود زیادی مسائل و مشکلات موجود در روش‌های اتصال‌دهی معمول را مرتفع نموده است.

با هدف ارتقا عملکرد اتصال‌دهی فراصوتی فلزات در سالیان گذشته توجه محققان به بررسی اثر پارامترهای تاثیرگذار ورودی این فرایند اتصال‌دهی بر استحکام اتصال و ویژگی‌های متالورژیکی آن بوده است. یوسفی و همکاران اتصال ورق فلزی آلومینیوم-مس و آلومینیوم-آلومینیوم مورد استفاده در باتری‌های لیتیومی را انجام داده اند. اثر پارامترهای فرایند شامل توان، فشار استاتیکی و زمان بر استحکام اتصال مورد بررسی قرار گرفت [۴ و ۵]. در پژوهش آن‌ها توجه ویژه‌ای به پدیده‌های متالورژیکی در جوش فراصوتی شد و قفل مکانیکی و نفوذ به عنوان دو عامل مهم در ایجاد پیوند معرفی شدند. گودرزی و همکاران [۶] عملیات جوش فراصوتی ورقه‌های فلزی مس و آلومینیوم را بهینه‌سازی نمودند و مقدار پارامترهای ورودی را برای دستیابی به بالاترین استحکام اتصال تعیین نمودند. جراحی و همکاران [۷] اتصال‌دهی سیم مسی به ورق مسی را با استفاده از بهینه‌سازی تک هدفه و دو هدفه مورد بررسی قرار دادند و اثر فشار استاتیکی، درصد توان و زمان فرایند را بر روی استحکام اتصال، مقاومت الکتریکی و مقاومت به خوردگی مورد بررسی قرار گرفت. سیریوانا و همکاران [۸] اثر فشار گیربندی، دامنه هورن و مدت زمان جوش و برهمکنش دوتایی آن‌ها را در اتصال‌دهی فراصوتی ورق و سیم مسی بررسی نمودند. حداکثر استحکام جوش برای فشار جوش ۴ بار و دامنه ۷۰ میکرومتر و زمان ۴ ثانیه در حدود ۳۰MPa به دست آمد. آن‌ها بیان داشتند اضافه نمودن پوشش نیکل به مس، موجب افزایش استحکام و دستیابی به جوش با کیفیت در بازه گسترده‌تری از پارامترهای فرایند اعم از توان، دامنه و زمان شده است.

مصطفوی و همکاران اثر فشار (۱/۵-۱bar)، زمان (۱۶۰-۲۲۰msec) و دامنه ارتعاشات سونوترو (۶۰-۸۰٪) را بر استحکام برشی اتصال (توسط آزمون تی-پیل)، درصد تخلخل و توزیع دما در جوشکاری فراصوتی رشته‌های آلومینیومی نازک در کابل‌های چند رشته‌ای را بررسی نمودند. در این پژوهش تخلخل باقیمانده در خشته سیم توسط تصاویر توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس با استفاده از اسکنر میکروسی-تی بدست آمد. دامنه ارتعاش به عنوان پارامتر تاثیرگذار بر دمای محل اتصال شناسایی شد و فشار به



شکل ۱ (a) سیم بندی و اتصالات الکتریکی یک خودرو [۲]، (b) نمونه واقعی دسته سیم خودرو، (c) نمونه اتصالات سیم به سیم با اندازه‌های مختلف [۱]

Fig. 1 (a) Wiring and electrical joints of a car, (b) Car wiring harness, (c) example of wire-wire joints with different sizes

جوشکاری فراصوتی فلزات فرآیندی است با اعمال ارتعاشات فراصوتی موازی با سطح تماس و به طور همزمان اعمال فشار استاتیکی دو یا چند ورقه فلزی را به یکدیگر وصل می‌نماید.

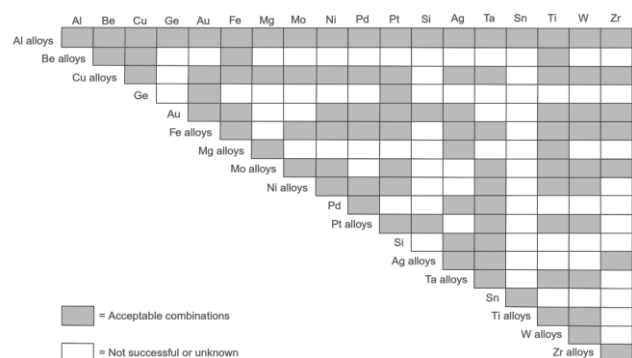
فراصوتی و اتصال سیم به سیم توسط دستگاه جوش فراصوتی سیم قابل انجام هستند. با توجه به این که در اتصال سیم به سیم، باید رشته‌های سیم از چهار جهت مقید و از بالا تحت فشار و از پایین تحت ارتعاش فراصوتی قرار گیرند (شکل ۳-ب). طراحی دستگاه جوش سیم فلزات فراصوتی پیچیده‌تر است و تحقیقات کمتری در این باره انجام شده است. از سوی دیگر مزیت مهم روش جوش سیم فراصوتی نسبت به سایر روش‌های اتصال‌دهی مانند پرس سیم و لحیم کاری، دستیابی به اتصال محکم و با حداقل فضاهای خالی بین رشته سیم‌های به هم متصل می‌باشد. زیرا در صورت وجود فضاهای خالی به هم پیوسته، علاوه بر کاهش استحکام اتصال، در طول زمان مایعات و مواد زائد به آن مافذ نفوذ کرده و بعضاً موجب سولفاته شدن و خرابی اتصال الکتریکی و اخلال در کارکرد وسیله نقلیه می‌گردند.

تا کنون پژوهش‌های محدودی در زمینه اتصال‌دهی سیم به سیم انجام شده است و معدود پژوهش‌های انجام شده (مصطفوی و همکاران [۹]) به طور خاص تنها اثر زمان، فشار و دامنه ارتعاش را با انجام تعداد محدود آزمون مورد بررسی قرار داده‌اند. در عین حال مطالعه در زمینه اثر پارامترهای ورودی مهم مانند انرژی جوش در جوش سیم فراصوتی و برهم کنش این پارامترها مورد بررسی قرار نگرفته است. در حالی که در ماشین‌های پیشرفته جوش فراصوتی فلزات، به جای تنظیم زمان، انرژی کل اعمال شده به قطعه‌کار کنترل می‌شود. این پارامتر مستقل از تغییرات جزئی در ضخامت یا شرایط سطح است و تکرارپذیری بالاتری دارد. به علاوه مستقیم‌ترین پارامتر برای کنترل میزان حرارت وارد شده به ناحیه جوش است. از سوی دیگر برای بررسی اثر متقابل پارامترها و مدلسازی رفتار اتصال و تعیین مقدار بهینه پارامترها نیاز به طراحی آزمایش پیشرفته‌تری نظیر روش سطح پاسخ (RSM) است. در حالی که با انجام آزمون‌های محدود نمی‌توان اثر متقابل پارامترها بر یکدیگر را ارزیابی نمود.

برای پر کردن خلای موجود در تحقیقات در حوزه جوش فراصوتی سیم‌ها، در این پژوهش با استفاده از طراحی آزمایش (DOE) به روش سطح پاسخ (RSM) اثر پارامترهای ورودی (مستقل) شامل انرژی جوش و فشار استاتیک بر پارامترهای خروجی (وابسته) یعنی استحکام اتصال (Pull force) در فرایند جوشکاری فراصوتی سیم‌ها پرداخته شده است. بدین منظور اثر فشار (۲/۴-۴/۲) و انرژی جوش (۳۹۰-۱۴۷۰) بر استحکام اتصال دو سیم هرکدام با سطح مقطع 5mm^2 با مجموع سطح مقطع 10mm^2 (اتصال اندازه ۱۰) براساس استاندارد SAE USCAR-45 مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای ارزیابی بهتر نتایج آزمون‌های تجربی استحکام مکانیکی، آزمون متالورژیکی شامل تصویر برداری میکروسکوپ نوری از دو مقطع عمود بر محور اتصال و همراستا با محور اتصال انجام گرفته است. همچنین برای ارزیابی کرنش سختی در اثر

عنوان عامل مهم در کاهش تخلخل نمونه نهایی معرفی شد. آن‌ها بیان داشتند فشار زیاد مانع از لغزش رشته‌ها روی یکدیگر شده و در نتیجه انرژی اصطکاکی بین این رشته‌ها موجب تولید گرمای بیشتر در فصل مشترک رشته سیم‌ها و به تبع آن نرم شدن آن‌ها و تغییر شکل پلاستیکی بیشتر می‌گردد [۹ و ۱۰]. هندسه و زاویه پترن سر هورن نیز با استفاده از شبیه‌سازی اجزا محدود و آزمون‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفت. هندسه سر هورن بطور قابل توجهی بر توزیع فشار تماس و شروع میکروپیوندها تأثیر می‌گذارد و اثر مستقیمی در ایجاد یک اتصال سالم دارد [۹].

گستر و همکاران اثر شکل قطعات متصل به یکدیگر (علاوه بر سطح مقطع اتصال) را بر استحکام اتصال سیم مسی با سطح مقطع 50mm^2 به ترمینال آلومینیومی مورد ارزیابی قرار دادند. اندازه‌گیری دامنه هورن و سندان‌ها و رشته سیم توسط ارتعاش سنج لیزری انجام گرفت. در عین حال اندازه‌گیری انرژی جوش، دما و استحکام اتصال با تغییر زمان (۰/۲ الی ۱/۵ ثانیه) انجام گرفت. زمان بهینه ۱ ثانیه برای دستیابی به بالاترین استحکام تعیین شد. نتایج اندازه‌گیری نشان داد فشرده شدن سیم‌ها حین فرایند جوش، بیش از زمان لازم برای دستیابی به استحکام بهینه، موجب تغییر رفتار فرکانسی و دامنه ارتعاش می‌شود [۱۱]. در عین حال جنس ماده نیز یکی از چالش‌های فرایند اتصال‌دهی فراصوتی فلزات می‌باشد. شکل ۲ نمایش قابلیت جوشکاری فلزات توسط فناوری جوش فراصوتی را نمایش داده است [۱]. تقریباً تمامی فلزات به فلز هم‌نوع خودشان دارای جوش پذیری بالایی هستند. آلومینیوم و مس بالاترین جوش پذیری را با سایر فلزات دارا می‌باشند.



شکل ۲ قابلیت اتصال‌پذیری مواد مختلف در فرایند جوش فراصوتی فلزات [۱]

Fig. 2 The ability to joint different materials in the ultrasonic metal welding process

تحقیقات انجام گرفته را از حیث شکل اتصال می‌توان به اتصال ورق به ورق، اتصال سیم به ورق و اتصال سیم به سیم تقسیم‌بندی نمود. دو اتصال اول توسط دستگاه جوش فلز

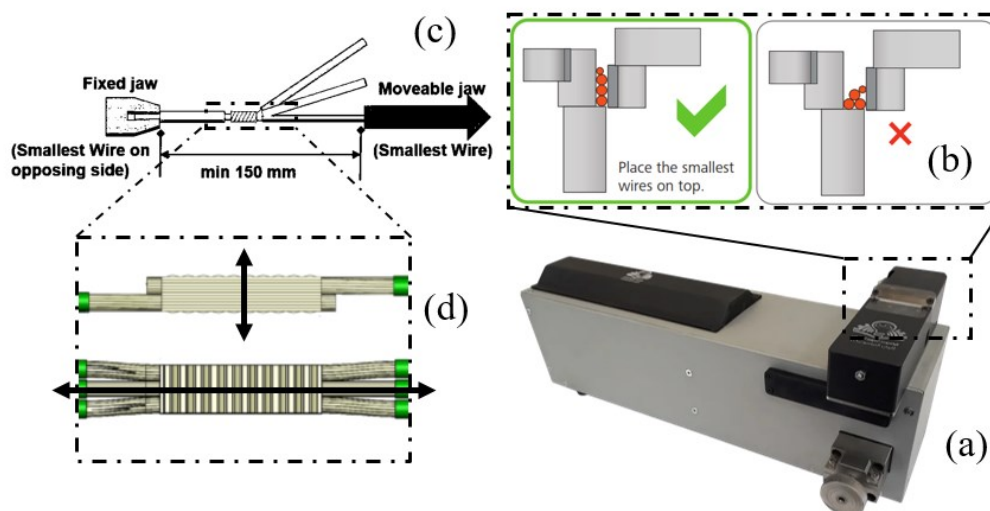
جریان ماده در مقطع اتصال، آزمون سختی‌سنجی ویکرز انجام گرفته است.

۲- روش اجرای کار

۲-۱- جوش فرا صوتی سیم

تجهیز مورد استفاده در این پژوهش به منظور انجام آزمایش‌های طراحی شده دستگاه جوش سیم فراصوتی FTI-UWS-3 محصول شرکت دانش بنیان فراصوت با حداکثر توان خروجی ۳ کیلووات و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد (شکل ۳-ا) [۱۱]. این دستگاه

قابلیت اتصال سیم‌ها در محدوده سطح مقطع ۱/۵ الی ۲۰ میلیمترمربع و تنظیم توان در بازه ۵ الی ۱۰۰ درصد و دارای عملگر جک نیوماتیک با قابلیت اعمال فشار از ۰/۸ تا ۶ bar است. شکل ۳-ب نحوه صحیح قرارگیری سیم‌ها در فضای بین هورن (در پایین) و سه سندان دیگر (در دو طرف و بالا) را نشان داده است [۱۲]. برای اجرای درست عملیات لازم است همیشه سیم با کوچکترین اندازه در بالاترین نقطه قرار بگیرد. در اینجا با توجه به استفاده از دوسیم اندازه ۵، دو سیم بر روی هم (نه در کنار هم) قرار گرفته‌اند.



شکل ۳ (a) دستگاه جوش سیم فراصوتی [۱۲]، (b) موقعیت هورن و سندان‌ها و نحوه قرارگیری صحیح سیم‌ها، (c) چیدمان آزمون کشش سیم و (d) مقاطع متالوگرافی خسته سیم در محل اتصال [۱۳ و ۱۴]

Fig. 3 (a) Ultrasonic wire splicing machine [11], (b) Position of horn and anvils and correct placement of wires, (c) Splicing tensile test setup, and (d) Metallographic sections of the welded splice nugget [12, Error! Bookmark not defined.]

در اتصالات با چند سیم با اندازه‌های متفاوت، لازم است سیم با کوچکترین اندازه (سطح مقطع) در دو سمت توسط دو فک دستگاه، کشیده شوند. استحکام اتصال برحسب نیرو و براساس واحد نیوتن گزارش شده است. هرگونه ناپیوستگی و فضای خالی در محل اتصال می‌تواند عاملی برای کاهش استحکام اتصال باشد. بدین منظور مقاطع اتصال، با هدف تشخیص ناپیوستگی و ترک‌ها، مشاهده پیوند بین رشته سیم‌ها در محل جوش و همچنین آشکار شدن حفره‌های داخل محل اتصال و مرزهای اتصالی بین رشته سیم‌ها پس از جوشکاری فراصوتی مورد بررسی قرار گرفتند. برای این هدف و به منظور درک عمیق از ریز ساختار اتصال در جوشکاری فراصوتی، از روش میکروسکوپ نوری (LOM) استفاده شد. تصاویر میکروسکوپی در دو مقطع (۱) عمود بر محل اتصال و (۲) در راستای اتصال دو سیم مورد ارزیابی قرار گرفتند (شکل ۳-د). همچنین برای ارزیابی مقدار کارسختی در مقطع اتصال، از آزمون میکروسختی ویکرز بهره گرفته شد. آزمون

طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM) در نرم افزار مینی‌تب انجام شده است. جدول ۱ سطوح پارامترهای ورودی شامل فشار (۴/۲-۲/۴bar) و انرژی جوش (۱۴۷۰-۳۹۰J) را برای اتصال با مجموع سطح مقطع 10mm^2 ارائه نموده است.

جدول ۱ سطوح پارامترهای ورودی فشار و انرژی در طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM)

Table 1 Levels of welding pressure and energy input parameters in the DOE using the RSM

Symbol	Parameter	-α	+α	-1	+1	0
A	Pressure	2.40	4.20	2.66	3.94	3.30
B	Energy	390	1470	548	1312	930

۲-۲- آزمون ارزیابی استحکام مکانیکی و متالورژیکی

شکل ۳-ج ابعاد و اصول صحیح قراردادی سیم‌ها در آزمون کشش سیم را براساس استاندارد SAE USCAR-45 نشان داده است [۱۳].

میکرو ویکرز با بار ۲۵ گرم و زمان ماند ۱۵ ثانیه در ده نقطه از مقطع اتصال (در راستای رشته سیم‌ها) انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج طراحی آزمایش

جدول ۲ پارامترهای ورودی فرایند جوش سیم فراصوتی با اندازه ۱۰ و نتایج آزمون استحکام کششی را ارائه نموده است. مشاهده می‌شود بیشترین استحکام اتصال (۷۸۲ نیوتن) در فشار ۳/۳ بار و انرژی جوش ۹۳۰ ژول، یعنی همان فشار و انرژی متوسط در طراحی آزمایش (جدول ۱) بدست آمده است. به طور خلاصه در سیم با اندازه ۱۰ به ترتیب بیشترین و کمترین استحکام برابر با ۷۸۳/۳ و ۳۴۰ نیوتن (نسبت بیشترین به کمترین ۳/۳) بوده است. استحکام مناسب برای اتصال سیم مسی با مجموع سطح مقطع ۱۰ میلی‌متر مربع (اندازه ۱۰) براساس استاندارد SAE 45-USCAR برابر ۶۸۰ نیوتن می‌باشد [۱۳]. در نتیجه تقریباً نیمی از اتصالات انجام شده در جدول ۲ دارای استحکام کافی اتصال نیستند. این نشان دهنده اهمیت انتخاب درست پارامترهای ورودی مانند انرژی جوش و فشار استاتیک در دستیابی به یک جوش با استحکام بالا است.

جدول ۲ پارامترهای ورودی فرایند جوش سیم فراصوتی اندازه ۱۰ و نتایج آزمون استحکام کششی

Table 2 Input parameters of the ultrasonic wire splicing of size 10 and joint strength results

Joint Strength (N)	Energy (J)	Pressure (bar)	Run (No.)
738	930	3.3	1
340	1470	3.3	2
622	930	4.2	3
723	930	3.3	4
504	1312	3.93	5
782	930	3.3	6
642	548	3.93	7
493	390	3.3	8
650	1312	2.66	9
751	930	2.4	10
710	930	3.3	11
721	548	2.66	12
725	930	3.3	13

جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس پارامترهای فشار و انرژی در طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM) برای سیم اندازه ۱۰ را نشان داده است. مطابق جدول ۳، مدل انتخاب شده به عنوان یک مدل

"قابل قبول" (Significant) شناسایی شده است و معیار عدم تطابق (Lack of Fit)، بیانگر میزان هماهنگی داده‌های تجربی با مدل پیش‌بینی شده، "بی‌اهمیت" گزارش شده است. این موضوع تأییدکننده انطباق مناسب مدل با داده‌های آزمایشی می‌باشد. براساس رابطه ۱، پارامترهای انرژی (B) و فشار (A) و توان دوم انرژی (B²) به دلیل مقدار P-value < 0.05 به عنوان پارامترهای "موثر" (بر استحکام در آزمون کشش-برش معرفی شدند. در عین حال، برهم‌کنش انرژی و فشار (AB) و توان دوم فشار (B²)، به دلیل مقدار P-value > 0.05، "غیرموثر" ارزیابی شده است.

جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس پارامترهای فشار و انرژی در طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM) برای سیم اندازه ۱۰

Table 3 ANOVA results of pressure and energy parameter in the DOE using the RSM for wire size 10

Source	Mean Square	F-value	p-value
Model	36481	16.48	0.0009 significant
A-PRESSURE	20.689	9.34	0.0184
B-ENERGY	22606	10.21	0.0152
AB	1142	0.516	0.4958
A ²	179	0.081	0.7843
B ²	1.376+E5	61.75	0.0001
Lack of Fit	41.33	5.34	0.0697 not significant

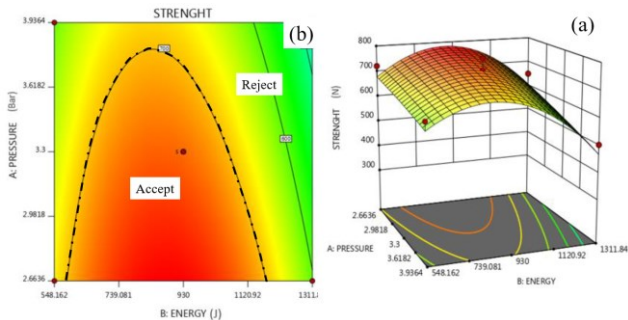
رابطه ۱ پیش بینی استحکام کشش-برش را براساس پارامترهای فشار استاتیک (A)، انرژی جوش (B) و توان دوم فشار (A²) و انرژی جوش (B²) نمایش داده است.

$$Strenght = +735.66 - 50.85A - 53.16B + 5.07A^2 + 140.20B^2 \quad (1)$$

اثر مستقل پارامترها

شکل ۴ تأثیر مستقل (الف) انرژی جوش و (ب) فشار استاتیک را بر استحکام اتصال جوش فراصوتی سیم اندازه ۱۰ نمایش داده است. در مقدار انرژی ۹۳۰ ژول، بیشترین استحکام اتصال بدست آمده است اما در مقادیر کمتر و بیشتر از این مقدار بهینه، استحکام کاهش یافته است. کاهش استحکام اتصال در انرژی کمتر را می‌توان با پیوند ضعیف‌تر بین رشته‌های سیم در اثر ایجاد حرارت و تغییر شکل کمتر نسبت داد. همچنین کاهش دوباره استحکام اتصال در انرژی‌های بالاتر را می‌توان به پدیده ایجاد حرارت، تغییر شکل بیش از حد، کاهش سطح مقطع و سوختن رشته سیم‌ها نسبت داد [۹]. اما اثر افزایش فشار، موجب کاهش استحکام با شیب ملایم شده است. مقدار این تغییرات به اندازه ای نیست که بتوان به طور مستقیم آن را به پدیده‌ای نسبت داد. به نظر می‌رسد، حضور فشار برای ایجاد پیوند بین رشته سیم‌ها ضروری است اما افزایش آن تأثیری قابل ملاحظه‌ای بر استحکام اتصال ندارد. در جوش فراصوتی فلزات فشار کافی برای ایجاد

مورد (آزمون ۱۲)، تنها در انرژی جوش ۹۳۰J مقدار قابل قبول برای استحکام براساس استاندارد SAE USCAR-45 (بیش از ۶۸۰ نیوتن) بدست آمده است که ناحیه میانه محدوده یاد شده می‌باشد. محدوده قابل قبول از نظر استحکام در شکل b-5، با خط چین مشخص شده است و با عنوان (قابل قبول) نامگذاری شده است. خارج از ناحیه خط چین، استحکام اتصال کمتر از مقدار تعیین شده توسط استاندارد است و اتصال حاصل در این محدوده، رد خواهد شد.



شکل ۵ اثر متقابل انرژی جوش و فشار بر استحکام اتصال جوش فراصوتی سیم اندازه ۱۰

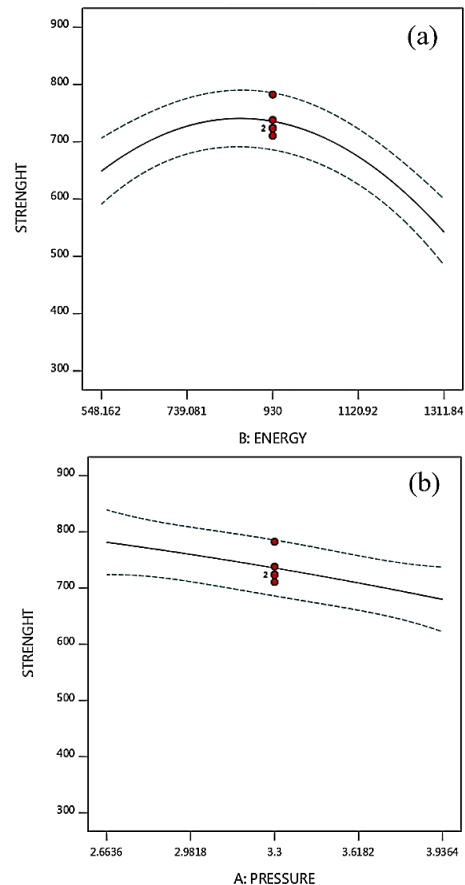
Fig. 5 Interaction of welding energy and pressure on the shear strength of ultrasonic wire splicing joints with size 10

۳-۲- نتایج بررسی میکروساختاری

تصاویر میکروسکوپ نوری

برای بررسی نحوه اتصال رشته سیم‌ها در جوش سیم فراصوتی، سطح مقطع اتصال در دو جهت عمود و همراستا با طول رشته سیم‌ها، برش داده شده (شکل ۳-d) و توسط میکروسکوپ نوری مشاهده شده است. شکل ۶ مقطع میکروسکوپی اتصال رشته سیم‌ها در جهت عمود بر محور مجموعه رشته سیم (کابل) را نشان داده است. ملاحظه می‌شود محل اتصال رشته سیم‌ها، اتصال مکانیکی با ایجاد جریان و تغییر شکل ماده برقرار شده است. جریان ماده و تغییر شکل در محل اتصال رشته سیم‌ها در شکل ۶-b و c با بزرگنمایی بیشتری نشان داده شده است. تغییر شکل مقاطع سیم‌ها در جوش فراصوتی فلزات را می‌توان به دو عامل نسبت داد: (۱) ایجاد حرارت موضعی به دلیل حرکت عرضی القا شده از هورن و اصطکاک بین رشته سیم‌ها و به تبع آن ایجاد حرارت اصطکاکی و (۲) کاهش تنش تسلیم به دلیل پدیده نرم شدگی آکوستیکی (Acoustic Softening) [۱۳].

اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک ضروری است. فشار کم باعث می‌شود ارتعاش به خوبی منتقل نشود و اصطکاک ناکافی ایجاد شود. اما فشار زیاد می‌تواند قطعه کار را له کند (مخصوصاً در سیم‌ها) و انرژی ارتعاش را پیش از انتقال به ناحیه تماس، هدر دهد [۱].

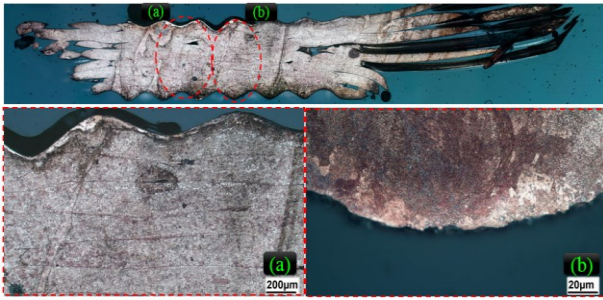


شکل ۴ تاثیر مستقل (a) انرژی جوش و (b) فشار استاتیک بر استحکام اتصال جوش فراصوتی سیم با اندازه ۱۰

Fig. 4 Effect of (a) welding energy and (b) static pressure on the joint strength of ultrasonic welded wire (size 10)

برهمکنش انرژی جوش و فشار استاتیک

برهمکنش پارامترهای فشار و انرژی جوش (AB) در تحلیل ANOVA، بدلیل مقدار P-value بیش از ۰/۰۵۰ تاثیرگذار شناخته نشده است (شکل ۵). همانطور که در بخش اثر مستقل پارامترها بیان شد و در نمودار اثر متقابل پارامترها نیز مشاهده می‌شود، در تمامی محدوده انرژی جوش، افزایش فشار موجب کاهش تدریجی و با شیب ملایم استحکام اتصال شده است. اما در تمامی فشارها، مقدار بهینه انرژی جوش برای دستیابی به بالاترین استحکام قابل مشاهده است. بطوریکه بیشترین استحکام در محدوده انرژی جوش ۸۰۰-۱۰۰۰ و فشار استاتیک ۲/۶bar رخ داده است. همانطور که از نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود، بجز در یک

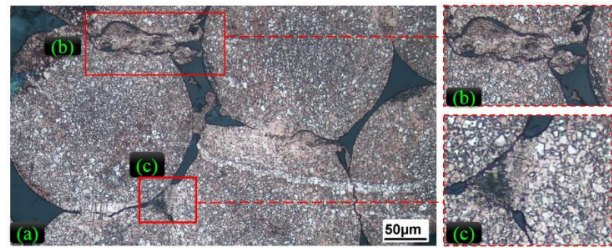


شکل ۸ برش طولی محل اتصال نمونه سیم اندازه ۱۰ (فشار ۳/۳ bar و انرژی جوش ۱۴۷۰ J) و (a) و (b) نقاط منتخب جهت بررسی ریزساختار

Fig. 8 Longitudinal section of the joint of the sample of wire size 10 (Pressure of 3.3 bar and welding energy of 1470J) and (a) and (b) selected points for microstructure investigation

میکرو سختی ویکرز

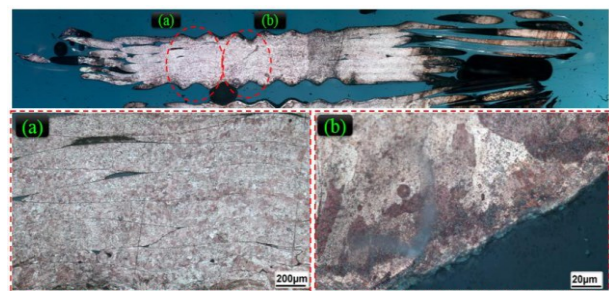
برای ارزیابی میزان کرنش سختی در مقطع اتصال، آزمون میکروسختی ویکرز انجام گرفت. مقادیر سختی در نقاط ده گانه برای نمونه سیم اندازه ۱۰ با مقدار فشار ۳/۳ bar و انرژی جوش (الف) ۹۳۰ J و (ب) ۱۴۷۰ J در شکل ۹ نشان داده شده است. انتخاب نقاط با توجه به بررسی دره‌ها بعنوان محل‌هایی با بیشترین میزان تغییر شکل پلاستیک و قله‌ها به عنوان محل‌هایی در تماس مستقیم با هورن و سندان انجام شد. بدین منظور در فاصله بین دو قله در خشته سیم، پنج نقطه و در فاصله بین دو دره، ۳ نقطه و دو نقطه نیز بر روی سطح بین دو قله اندازه گیری شد (در مجموع ده نقطه در هر مقطع). در فرآیند جوش فراصوتی نقاط دره روی خشته سیم نخستین نقاطی هستند که در تماس با دندان‌های الگوی کنگره‌ای سر هورن گرفته و دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند (با متوسط سختی ۷۰HV). در ادامه فرآیند و با طی شدن زمان همراه با ادامه نفوذ هورن به داخل قطعه، نقاط مجاور این نواحی بدلیل افزایش و تجمع تنش موضعی دچار تغییر شکل بیشتری شده و به داخل فضای خالی بین دندان‌های سر هورن نفوذ کرده و فرم قله مانند روی قطعه را پدید می‌آورند (با متوسط سختی ۸۰HV). همانطور که در تصاویر مشخص است، بیشترین مقدار سختی مربوط به این نواحی می‌باشد. در عین حال نواحی داخلی خشته سیم کمترین تاثیر را از جریان ماده و کرنش سختی می‌پذیرند (با سختی حدود ۶۱HV).



شکل ۶ (a) تصویر ریزساختار حاصل از نمونه جوش سیم و (b) و (c) تراشه‌های مواد در اطراف مرزهای اتصال رشته سیم

Fig. 6 a) Optical image of the wire weld cross section and b and c) Material chips around the wire joint boundaries.

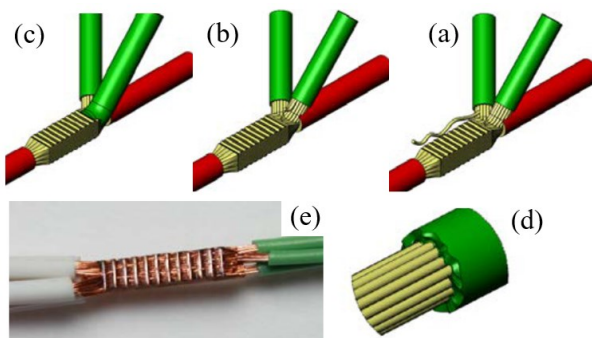
شکل ۷ و شکل ۸ برش طولی محل اتصال نمونه سیم اندازه ۱۰ در فشار ۳/۳ bar به ترتیب در انرژی جوش ۹۳۰ و ۱۴۷۰ ژول را نشان داده اند. با مقایسه تصویر بزرگنمایی (a) در هر دو تصویر، مشاهده می‌شود نمونه با انرژی جوش بالاتر (شکل ۸) دارای تخلخل کمتری در مقطع اتصال نسبت به نمونه با انرژی جوش کمتر (شکل ۷) می‌باشد. با مقایسه استحکام نمونه‌های آزمون در فشار یکسان (جدول ۲) مشاهده می‌شود، در فشار یکسان، در ابتدا با افزایش انرژی جوش، استحکام اتصال افزایش می‌یابد. اما با افزایش انرژی بیش از ۹۳۰ ژول، در عین این که تخلخل کمتری در مقطع اتصال مشاهده شده است، به نظر می‌رسد به واسطه کاهش ضخامت اتصال و برش بیشتر رشته سیم‌ها و سوختگی در پی آن، استحکام اتصال کاهش می‌یابد. در نتیجه باید توجه داشت تنها مقدار فضای خالی در مقطع اتصال، تعیین کننده استحکام اتصال نیستند، بلکه عوامل دیگری نظیر ابعاد خشته سیم، تعداد سیم‌های بریده شده و بیرون زدگی از محل جوش نیز بر استحکام نهایی و کیفیت جوش تاثیرگذار هستند. بدین منظور لازم است علاوه بر بررسی میکروسکوپی مقطع اتصال، ویژگی‌های ظاهری اتصال نیز مورد ارزیابی و پایش قرار گیرند.



شکل ۷ برش طولی محل اتصال نمونه سیم اندازه ۱۰ (فشار ۳/۳ bar و انرژی جوش ۹۳۰ J) و (a) و (b) نقاط منتخب جهت بررسی ریزساختار

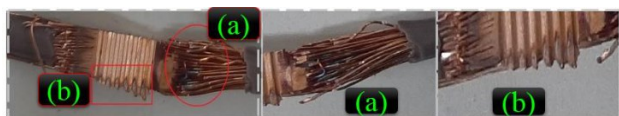
Fig. 7 Longitudinal section of the joint of the sample of wire size 10 (Pressure of 3.3 bar and welding energy of 930J) and (a) and (b) selected points for microstructure investigation

مهمترین معایب مشاهده شده عبارتند از: (۱) بیرون زدگی ماده به زیر هورن و سندان، (۲) رشته سیم‌های پاره شده در ابتدا و انتهای محل اتصال هورن و رشته سیم‌ها، (۳) ابعاد (ضخامت و عرض) نادرست مقطع اتصال و (۴) سوختگی و تغییر رنگ در سیم و سیم اطراف محل اتصال.



شکل ۱۰ نواقص ظاهری اتصال جوش سیم فرا صوتی براساس استاندارد SAE-USCAR-45

Fig. 10 Welded bond appearance criteria based on SAE-USCAR-45 standard



شکل ۱۱ نمونه جوش سوخته با جوش بیش از حد: (a) سوختن رشته سیم‌ها و (b) نازک شدن محل اتصال

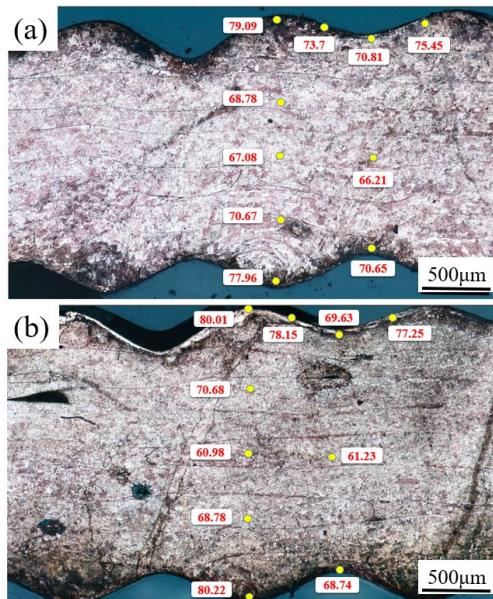
Fig. 11 Example of a burnt weld with over welding: (a) burnt wire strand and (b) thinning of the joint

در سمت مقابل نمونه‌های با جوش بیش از حد، در جوش‌های ضعیف، دامنه و توان بسیار کم باعث عدم ایجاد اصطکاک و حرارت کافی می‌شود و عدم اتصال رشته سیم‌ها به یکدیگر و ضعف اتصال را در پی دارد. لازم به ذکر است، اگر چه فرایند جوش فرا صوتی سیم‌ها دارای قابلیت بالایی در شکستن لایه‌های اکسیدی نازک است، اما حضور مواد روانکار باقیمانده از مرحله تولید سیم، اثر نامطلوب بر قابلیت جوش‌پذیری فرا صوتی می‌گذارد.

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر تعیین اثر پارامترهای فرایند جوش سیم فرا صوتی شامل انرژی جوش و فشار استاتیک بر استحکام اتصال براساس استاندارد SAE-USCAR-45 مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور برای بررسی اثر تکی و متقابل پارامترها از طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ (RSM) بهره گرفته شده است. خلاصه نتایج به شرح ذیل ارائه گردیده است:

- فشار استاتیک به عنوان یک معیار تاثیرگذار در طراحی آزمایش شناخته شد. در عین این که حضور فشار استاتیک در فرایند اتصال‌دهی فلزات ضروری است اما تغییر آن اثری با



شکل ۹ مقادیر سختی در نقاط ده گانه برای نمونه سیم اندازه ۱۰ با مقدار فشار ۳/۳ bar و انرژی جوش (a) ۹۳۰J و (b) ۱۴۷۰J

Fig. 9 Hardness values at ten points for the wire of size 10 under 3.3 bar pressure with (a) 930J and (b) 1470J welding energy

۳-۳- بررسی ظاهری و آسیب حرارتی

علاوه بر اندازه‌گیری استحکام برشی اتصال سیم توسط آزمون استاندارد کشش-برش، که مهمترین معیار ارزیابی اتصال در جوش سیم فرا صوتی است، بازرسی چشمی ویژگی‌های جوش نیز ضروری است. یک اتصال ایده‌آل به گونه‌ای است که: (۱) تمام رشته سیم‌ها جوش خورده باشند، (۲) برای اطمینان از اتصال مناسب طول اتصال به اندازه کافی بلند باشد، (۳) همه رشته سیم‌ها از داخل خشته جوش عبور کنند و (۴) اتصال دارای سوختگی و آلودگی و مواد اضافی نباشد. بر این اساس استاندارد SAE-USCAR-45 مهمترین معایب ظاهری اتصال سیم به سیم فرا صوتی را بیان نموده است (شکل ۱۰). براساس شکل ۱۰ مهمترین این معایب به ترتیب عبارتند از: (a) رشته سیم جوش نخورده، (b) رشته سیم شکسته یا بریده شده، (c) جلوآمدگی عایق در محل جوش، (d) ذوب عایق در اثر حرارت جوش و (e) ظاهر سوخته یا تغییر رنگ یافته [۱۳]. در این زمینه شکل ۱۱ نشان‌دهنده برخی معایب مشابه در نمونه‌های جوش سیم فرا صوتی با مقطع ۱۰ میلی‌متر مربع می‌باشد. در نمونه‌های جوش فرا صوتی فلزات، اعم از ورق به ورق [۴] و یا سیم به ورق [۷]، در انرژی و فشار جوشکاری زیاد، به طور معمول پدیده جوش بیش از حد رخ می‌دهد که باعث کاهش ضخامت ورق‌ها و بریدگی سیم‌ها و در نتیجه کاهش استحکام اتصال می‌شود. در اتصال سیم به سیم فرا صوتی انرژی بیش از حد (حاصل توان و زمان زیاد) موجب تردی و حتی ذوب موضعی می‌شود. براساس تصویر نوری از محل اتصال سیم به سیم (شکل ۱۱)

کارسختی نپذیرفته است احتمالاً به دلیل افزایش حرارت، آنیل رخ داده و سختی به مقدار نزدیک به ماده مس آنیل شده کاهش یافته است.

- بررسی ظاهری جوش بیانگر وجود نواقصی نظیر سوختگی و تغییر رنگ، بیرون زدگی ماده و بریدن رشته سیم‌ها در جوش با انرژی بالا می‌باشد که وضعیت جوش بیش از حد در جوش فلز فراصوتی را تداعی می‌نماید.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله کمال تشکر و امتنان خود را از همکاری شرکت دانش بنیان فراصوت تجهیز ایرانیان در انجام فرایند جوش فراصوتی سیم و شرکت الکتریک خودرو شرق (EKS) به جهت تامین مواد اولیه می‌ذول می‌دارند. امید است نتایج پژوهش حاضر در جهت پیشبرد فناوری و اعتلای کشور عزیزمان ایران به کار آید.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مد نظر قرار داده اند.

تعارض منافع: این مقاله تعارض منافعی ندارد.

منابع

- Aluminum Sheet. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2024; 77(9):2499-508. doi:10.1007/s12666-024-03336-6.
- [8] Srinivasan V, Balamurugan S, Balakarthick B, Darshan SD, Prabhu AD. Experimental investigation on ultrasonic metal welding of copper sheet with copper wire using Taguchi method. Materials Today: Proceedings. 2021; 45:495-501. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.100.
- [9] Mostafavi S, Hesser DF, Markert B. Effect of process parameters on the interface temperature in ultrasonic aluminum wire bonding. Journal of Manufacturing Processes. 2018; 36:104-14. doi:10.1016/j.jmapro.2018.09.020.
- [10] Mostafavi S, Markert B. Ultrasonic weld strength and weld microstructure characteristics in multi-strand aluminum cables (EN AW-1370) – Effect of process parameters. Journal of Manufacturing Processes. 2020; 57:893-904. doi:10.1016/j.jmapro.2020.07.054.
- [11] site adress:https://iranultrasonic.com/ultrasonic-wire-splicer. 2025.
- [12] Ultrasonic metal welding: Quality guidelines, ultrasonic wire splicing, TELSONIC Ultrasonics Co. 2025.
- [13] Abedini R, Abdullah A, Alizadeh Y, Fartashvand V. A Roadmap for Application of High Power Ultrasonic Vibrations in Metal Forming. Modares Mechanical Engineering. 2017; 16(10):323-34.

شیب ملایم بر استحکام اتصال داشته است. در عین حال، انرژی جوش به عنوان یک معیار تاثیرگذار شناخته شده است و یک مقدار بهینه برای انرژی جوش (J۹۳۰) در دستیابی به استحکام بالای اتصال بدست آمده است. لازم به ذکر است اثر متقابل انرژی جوش و فشار، معنی‌دار شناخته نشده است.

- بررسی میکروساختاری در مقطع عمود بر اتصال و همراستای اتصال، بیانگر جریان و تغییر شکل ماده در محل اتصال رشته سیم‌ها می‌باشد. اگرچه افزایش انرژی جوش موجب کاهش تخلخل در مقطع اتصال می‌گردد، اما افزایش بیش از حد آن موجب ایجاد ایرادات ظاهری و کاهش ضخامت شده که کاهش استحکام اتصال را در پی دارد.
- بیشترین مقدار سختی در قله‌های مقطع جوش (با متوسط سختی ۸۷HV) و کمترین مقدار سختی (با متوسط سختی ۵۴HV) در مرکز خسته اتصال مشاهده شده است. با مقایسه مقادیر سختی حاصل با سختی ماده سیم آنیل شده و کار سخت شده در منابع می‌توان نتیجه گرفت، افزایش سختی در قله‌ها به واسطه جریان ماده و کارسختی در فرایند جوش سیم فراصوتی حاصل شده است. اما در مرکز ماده که تاثیری از

- [1] Matheny MP, Graff KF. 11 - Ultrasonic welding of metals. In: Gallego-Juárez JA, Graff KF, editors. Power Ultrasonics. Oxford: Woodhead Publishing; 2015. p. 259-93.
- [2] wire splicing and terminal Welding catalogue, Telsonic Co., 2024.
- [3] Sahoo, S.K., & Satpathy, M.P. (2020). Ultrasonic Welding of Metal Sheets (1st ed.). CRC Press. doi:10.1201/9780429294051
- [4] Yusefi A, Kokabi AH, Abedini R, Fartashvand V, Allahverdizadeh V. Microstructure evolution and mechanical properties analysis in dissimilar ultrasonic metal welding of aluminum to copper. Journal of Materials Research and Technology. 2024; 30:2922-35. doi:10.1016/j.jmrt.2024.04.037.
- [5] Yusefi A, Kokabi AH, Abedini R, Fartashvand V, Allahverdizadeh V. Investigation of Process Parameters on the Mechanical Strength in Ultrasonic Metal Welding of Aluminum to Copper Dissimilar Joints. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2024; 77(11):3707-18. doi:10.1007/s12666-024-03443-4.
- [6] Goodarzi N, Hashemi R, Abedini R. Microstructure investigation and optimization of process parameters of ultrasonic welding for Al-Cu dissimilar joints using design of experiment. Journal of Materials Research and Technology. 2024; 31:2236-48. doi:10.1016/j.jmrt.2024.06.198.
- [7] Jarahi F, Vahdati M, Abedini R. Modeling and Optimization of Shear Strength of the Welded Joint Produced by Ultrasonic Welding of Copper Wire to