مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1397، دوره 18، شماره 01، ص‌ص 85-93

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تأثیر متغیرهای جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی بر خواص ساختاری و مکانیکی اتصال AA4014-AA7075

مهدی پورعباس[1]، امیرعبداله‌زاده[2*]، مجید پورانوری[3]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
* تهران، صندوق پستی 14115143، zadeh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 مهر 1396
پذیرش: 30 آبان 1396
ارائه در سایت: 08 دی 1396

کلید واژگان:
آلومینیم
جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی
ذوب‌شدگی موضعی
استحکام برشی

چکیده

در پژوهش حاضر، اتصال‌های لوله آلومینیم 4014 به مفتول آلومینیم 7075 توسط فرایند جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی بررسی شد. برای ایجاد اتصال از سه زاویه برخورد 4، 6 و 8° و ولتاژهای جوش‌کاری 6 و 7 kV استفاده شد. ریزساختار سطح مقطع جوش توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و خواص مکانیکی به‌سیله آزمون سختی و کشش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در زاویه‌های برخورد 4 و 6°، با افزایش ولتاژ جوش‌کاری از 6 به 7 kV، مورفولوژی فصل‌مشترک از خطی به موجی تغییر می‌یابد. در زاویه برخورد 8°، افزایش ولتاژ باعث ذوب‌شدگی موضعی بیشتر و تخریب فصل‌مشترک می‌شود. در زاویه یکسان با افزایش ولتاژ، به دلیل کارسختی و تغییرشکل پلاستیک بالاتر، سختی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، اثر ولتاژ جوش‌کاری بر سختی فصل‌مشترک جوش نسبت به زاویه برخورد بیشتر است. نتایج آزمون کشش نشان داد که با افزایش ولتاژ، در زوایای برخورد کم، استحکام برشی افزایش و در زاویه برخورد بالا، به‌دلیل تشکیل حفره در فصل‌مشترک، استحکام برشی کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که اتصال لوله به مفتول، تحت زاویه برخورد 6° و ولتاژ 7 kV، دارای فصل-مشترک موجی و پیوسته بوده و بالاترین استحکام برشی را در میان نمونه‌ها دارد.

Investigation on the effects of magnetic pulse welding parameters on the structural and mechanical properties of AA4014-AA7075 joint

Mehdi Pourabbas[1], Amir Abdollah-zadeh[1*], Majid Pouranvari[2]

1- Department of Material Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115143 Tehran, Iran, zadeh@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 October 2017
Accepted 21 November 2017
Available Online 29 December 2017

Keywords:
Aluminum
Magnetic Pulse Welding
Local Melting
Shear Strength

ABSTRACT

In this work, joining of 4014 Aluminum tube to 7075 rod is studied using magnetic pulse welding process. The effect of impact angle (4, 6 and 8 degrees) and welding voltage (6 and 7 kV) on the joint are investigated. The microstructure of the weld cross section was evaluated using optical and scanning electron microscopy and mechanical properties of the welds were evaluated by microhardness and tensile tests. The results showed that, for the impact angles of 4 and 6º, the increase of welding voltage from 6 to 7 kV, leads to the change morphology of interfacial from straight to wavy. While, for the impact angle of 8º, the increase of the welding voltage increases local melting and results in the degradation of the interface. At the same angle, increasing the welding voltage increases the hardness due to the higher work hardening and severe plastic deformation. On the other hand, the effect of welding voltage on the hardness is dominant compared to the impact angle. The results of the tensile test showed that, for the low impact angles, increasing the welding voltage increases the shear strength, while, for the higher impact angles, it decreases the shear strength because of creating holes in welding interface. The results showed that joining of aluminum tube/rod with impact angle of 6º and welding voltage of 7 kV leads in uniform and wavy interface with higher shear strength in comparison with other conditions.

1- مقدمه

فلز آلومینیم و آلیاژهایش به دلیل سبک وزن بودن و خواص مقاومت به خوردگی مناسب، گزینه مطلوبی برای کاربرد در صنایع هوافضا، کشتی‌سازی، راه آهن و خودروسازی می‌باشند. امروزه تقاضا برای مواد سبک وزن در کاربردهای حمل و نقل با هدف کاهش مصرف انرژی و حداقل رساندن هزینه‌ها و آلودگی‌های محیطی افزایش یافته و از این رو استفاده از فلزات سبک وزن مانند آلومینیم در صنعت خودرو بیشتر شده است. از طرف دیگر تولید سازه‌های سبک‌وزن مدرن اغلب نیاز به استفاده از روش‌های جدید به منظور برآورده کردن معیارهایی در ارتباط با افزایش استحکام، کاهش وزن و کاهش آسیب در زمان تصادف‌ها دارد [1-4]. بنابراین سازندگان با چالش

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Pourabbas, A. Abdollah-zadeh, M. Pouranvari, Investigation on the effects of magnetic pulse welding parameters on the structural and mechanical properties of AA4014-AA7075 joint, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 85-93, 2018 (in Persian)

اتصال سری‌های مختلفی از آلیاژهای آلومینیم روبه‌رو شده‌اند. فرایند جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی، یک فرایند جوش‌کاری حالت جامد است که به حداقل رساندن یا حذف فازهای بین‌فلزی پیوسته را در جوش‌کاری فلزات غیرهمجنس میسر می‌سازد. همچنین این فرایند یک روش جوش‌کاری مناسب برای ایجاد اتصال متالورژیکی استحکام بالا بین فلزات همجنس و غیرهمجنس و آلیاژهای آن‌ها می‌باشد [3].

شکل 1 اجزای سیستم جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی را نشان می‌دهد که دارای چهار واحد شامل واحدهای تولید کننده ضربان، اتاقک کنترل، محفظه کار و واحد اجرایی می‌باشد. واحد تولید کننده ضربان، از بانک خازنی تشکیل شده است که انرژی الکتریکی را ذخیره می‌کند و آن را در سرتاسر کویل جوش‌کاری در مدت زمان بسیار کوتاه تخلیه می‌کند. اتاقک کنترل از واحد شارژ و منبع تغذیه AC تشکیل شده است. واحد محفظه کار از کویل ضربانی مغناطیسی، قطعه کار رسانا و کابل‌های الکتریکی تشکیل شده است. واحد اجرایی شامل یک کامپیوتر دیجیتال بوده و برای تنظیم خودکار فرایند استفاده می‌گردد [5]. زمانی که جریان از کویل عبور می‌کند، میدان مغناطیسی ایجاد شده در اطراف کویل یک جریان ثانویه در فلز پرنده رسانا القا می‌کند که در خلاف جهت میدان اولی است. به‌وسیله این جریان‌های مخالف هم، یک نیروی لورنتز رانشی بین قطعه‌کار و کویل به وجود آمده و فلز پرنده تا سرعت‌های چندین صد m/s به سمت فلز هدف شتاب داده می‌شود [6]. دو ماده با سرعت بالا به هم برخورد کرده و اتصال انجام گردد. این برخورد سبب ایجاد تغییرشکل پلاستیک در ماده متحرک شده و تحت شرایط کنترل شده یک جوش حالت جامد بین دو فلز ایجاد می‌شود [7]. اتصال به‌صورت ضربه‌ای در طی چند میکروثانیه انجام می‌شود و سرعت فلز پرنده در لحظه برخورد به 200 تا 500 m/s می‌رسد [8].

در اثر برخورد دو فلز، برش پلاستیک قابل ملاحظه‌ای در دو سطوح برخوردی جفت‌شونده رخ می‌دهد و جت حاصل شده منجر به ایجاد سطوح تمیز روی هر دو قطعه‌کار می‌گردد. مشخص شده است که سرعت تقریبی این جت در محدوده بین 1000-2000 m/s می‌باشد. در برخورد با سرعت بالا، جت‌های فلزی از فصل‌مشترک فلزها پس زده می‌شوند. اگر سرعت فلز پرنده به اندازه کافی باشد، یک الگوی موجی شکل در فصل‌مشترک بین دو قطعه کار مشاهده می‌شود (شکل 2). ترکیب سطوح تمیز مجاور تحت فشار بسیار بالا منجر به اتصال حالت جامد می‌شود [9-11]. برای رسیدن به سرعت برخورد موردنیاز، باید فاصله قبل از برخورد مناسبی بین فلز پرنده و فلز هدف وجود داشته باشد تا هنگام اعمال فشار مغناطیسی بر فلز پرنده، انرژی جنبشی کافی برای تبدیل شدن به انرژی برخورد حاصل شود [7]. فاصله قبل از برخورد به‌طور معمول به‌عنوان ضریبی از ضخامت فلز پرنده در نظر گرفته می‌شود که بین 0.5 تا 3 برابر ضخامت آن است. زاویه برخورد در فرایند جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی، زاویه تشکیل شده بین فلز هدف و فلز پرنده قبل از برخورد می‌باشد. برای اتصال موازی لوله‌ها، مقادیر زاویه در آغاز کوچک و در انتها بزرگ است. زاویه برخورد به‌طور معمول بین 3 تا 30° می‌باشد [12].

اگر فرایند اتصال با استفاده از روش‌های جوش‌کاری ذوبی متداول انجام شود، اغلب به‌علت تغییرات ریزساختاری و مکانیکی ایجاد شده در خط جوش و منطقه متاثر از حرارت، کاهش استحکام اتصال و ایجاد ترک گرم به‌ویژه در جوش‌کاری آلیاژهای آلومینیم سری 6000 به سری 5000 رخ می‌دهد. این مشکلات می‌تواند با استفاده از روش‌های جوش‌کاری ضربه‌ای با سرعت بالا مانند فرایند جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی برطرف گردد [3]. در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی در مورد اتصال آلیاژهای همجنس آلومینیم از جمله آلیاژهای 1050، 6060 و 6061 توسط روش جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی صورت گرفته است. که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

استرن [9] و همکارانش میکروساختار فلز پایه و منطقه فصل‌مشترک در اتصال Al-1050/Al-1050 با روش جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که فلز پایه شامل میزان زیادی رسوب‌های Al_3Fe است. در حالی‌که لایه فصل‌مشترک عاری از رسوب‌ها می‌باشد. همچنین Fe به‌طور کامل به‌صورت یکنواخت در امتداد لایه فصل‌مشترک پراکنده شده است. این مشاهده‌ها مشخص کرد که ذوب موضعی در فصل‌مشترک رخ داده و انجماد سریع از رسوب ذره‌های Al_3Fe در فصل‌مشترک جلوگیری کرده است. آن‌ها همچنین گزارش کردند که مدول یانگ در عرض لایه فصل‌مشترک تغییر نکرده، در حالی‌که سختی در امتداد فصل‌مشترک افزایش یافته است.

ژانگ و همکارانش [13] فصل‌مشترک اتصال Al-6061/Al-6061 تشکیل شده توسط روش جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی در انرژی شارژ 6.4 kJ را مطالعه کردند. آن‌ها افزایش قابل توجهی در سختی فصل‌مشترک جوش را با استفاده از تکنیک نانوسختی‌سنجی مشاهده کردند. دانه‌های بسیار ریز با اندازه 50 µm در حضور مرزهایی در محدوده زاویه‌های بسیار بزرگ تا بسیار کوچک در فصل‌مشترک مشاهده کردند. همچنین افزایش دانسیته نابجایی‌ها و تشکیل ساختار سلولی را در داخل دانه‌ها گزارش کردند. کاهش اندازه دانه‌ها، سختی فصل‌مشترک را افزایش داده بود.

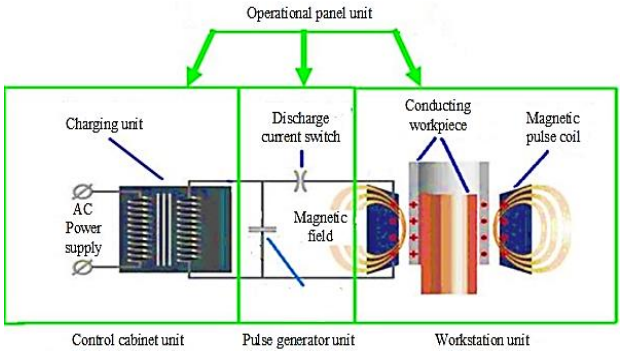


Fig. 1 MPW process set up for tubes joining [5]

شکل 1 تجهیزات فرایند جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی برای اتصال لوله‌ای [5]

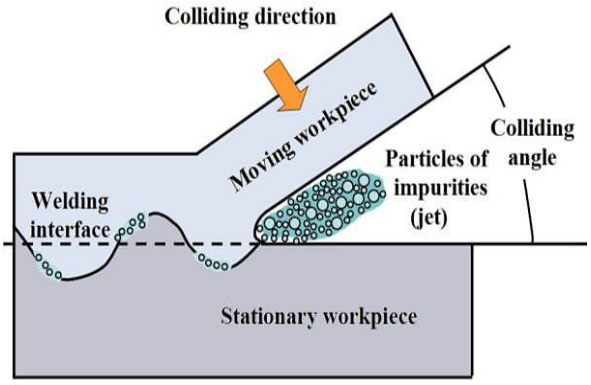


Fig. 2 Scheme of impurity removal jetting [9]

شکل 2 نمایی از حذف آلودگی‌های سطحی توسط جت [9]

رائولیسن و همکارانش [14] اتصال همجنس لوله به مفتول آلومینیم Al-6060T6/Al-6060T6 را با فاصله‌های قبل از برخورد و ولتاژهای مختلفی با استفاده از فرایند جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش فاصله قبل از برخورد در ولتاژ ثابت، موج‌های بزرگتری در فصل‌مشترک تشکیل می‌شوند و تغییرشکل شدیدتری اتفاق می‌افتد. از آنجایی که تشکیل موج شامل تغییرشکل پلاستیک در فصل‌مشترک است، دانه‌ها در نزدیکی امواج با دامنه بالا تغییرشکل بیشتری می‌یابند. آن‌ها گزارش کردند که در فاصله قبل از برخورد بسیار زیاد، حفره‌های ناپیوسته در فصل‌مشترک تشکیل شده و یکپارچگی جوش کاهش می‌یابد.

اگرچه آلیاژهای آلومینیم 4014 و 7075 در صنایع مختلف کاربرد گسترده‌ای دارند، مطالعات روی اتصال آن‌ها، توسط فرایند جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی انجام نشده است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر زاویه برخورد و ولتاژ جوش‌کاری بر ریزساختار، سختی و استحکام برشی اتصال لوله AA4014 به مفتول AA7075 به‌وسیله فرایند جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی است.

2- روش آزمایش

در پژوهش حاضر برای جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی، از لوله آلومینیمی 4014 و مفتول آلومینیمی 7075 استفاده شد. ترکیب شیمیایی این دو آلیاژ توسط آزمون کوانتومتری تعیین شد که در جدول 1 درج شده‌اند. برای انجام اتصال‌ها، لوله‌های آلومینیمی انتخاب شده به عنوان فلز پرنده به طول 10 cm در نظر گرفته شدند و 2 cm از طول آن‌ها ماشین‌کاری شد. ضخامت این قسمت از 2 به 1 mm کاهش یافت. مفتول‌های آلومینیمی مورد نظر به عنوان فلز هدف به طول 8 cm برش داده شدند و 2 cm از طول آن‌ها تحت سه زاویه 4، 6 و 8° ماشین‌کاری شدند. ابعاد لوله و مفتول آلومینیمی در جدول 2 آورده شده‌اند. زاویه برخورد به عنوان معیاری برای تغییر فاصله قبل از برخورد بین لوله و مفتول در نظر گرفته شد. جهت از بین بردن خطوط ماشین‌کاری و اکسیدهای سطحی از روی سطح مفتول‌های ماشین‌کاری شده، قبل از انجام جوش‌کاری توسط سمباده‌های کاغذی صیقلی و اکسید زدایی شدند.

ولتاژ جوش‌کاری و زاویه برخورد به عنوان متغیرهای فرایند جوش‌کاری در نظر گرفته شدند. متغیرهای فرایند جوش‌کاری در جدول 3 آورده شده‌اند. دستگاه جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی مورد استفاده دارای محدوده ولتاژ kV 3-11، حداکثر فرکانس 40 kHz، حداکثر ضریب خودالقایی 100 nH و دو خازن با ظرفیت 150 µF که به طور موازی نسبت به هم قرار گرفته‌اند، است. انرژی جوش‌کاری از رابطه (1) محاسبه می‌گردد:

$$U = \frac{1}{2} C_T V^2 \quad (1)$$

دستگاه جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی مورد استفاده، ساخت شرکت شتابگران فناوری گلستان می‌باشد. در شکل 3 نمایی از موقعیت قرارگیری لوله به مفتول، قبل و بعد از جوش‌کاری نشان داده شده است. کویل مورد استفاده ساخته شده از مس خالص، دارای 6 دور، سطح مقطع آن مستطیلی شکل و قطر آن 20 mm می‌باشد. شکل کویل، ابعاد آن و نحوه قرارگیری نمونه‌های اتصال در داخل کویل در شکل 4 نشان داده شده است.

به‌منظور بررسی ریزساختار جوش‌های حاصل نمونه‌های متالوگرافی آماده گردید. ابتدا نمونه‌های جوش‌کاری شده توسط دستگاه وایرکات مقطع‌زنی عرضی شدند. آماده‌سازی نمونه‌ها توسط سمباده‌های 5000-600 انجام شد. برای رسیدن به سطح صیقلی، نمونه‌ها توسط خمیر الماس 1 و 0.3 µm پولیش شدند. برای حکاکی نمونه‌ها از محلول گراف و سارگنت[1] با ترکیب شیمیایی 84 mL آب، 15.5 mL اسید نیتریک، 0.5 mL اسید فلوئوریدریک و 3 g تری اکسید کروم به مدت 10 تا 60 ثانیه استفاده شد.

برای بررسی ریزساختار فصل‌مشترک جوش، از میکروسکوپ نوری با مدل المپیوس[2] و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل فیلیپس[3] استفاده شد. برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌های جوش‌کاری از دستگاه ریز سختی سنجی با مدل ایسوس[4] استفاده شد. نیروی اعمال شده بر نمونه‌ها 25 grf و مدت

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیم (درصد وزنی)

Table 1 Chemical composition of aluminum alloys (Wt. %)

Mg	Mn	Cu	Si	Zn	Fe	Al	
2.10	0.30	1.30	0.42	5.11	0.55	91.81	AA7075
0.30	0.50	0.20	1.50	0.20	0.70	96.57	AA4114

جدول 2 ابعاد لوله آلومینیم 4014 و مفتول آلومینیم 7075

Table 2 Dimensions of Al4014 tube and Al7075 rod

قطر داخلی (mm)	قطر خارجی (mm)	طول (mm)	
16	20	100	Al4014 tube
-	18	80	Al7075 rod

جدول 3 متغیرهای فرایند جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی

Table 3 Magnetic pulse welding parameters

انرژی برخورد (kJ)	ولتاژ (kV)	زاویه برخورد (درجه)	نمونه
5.40	6	4	4°-6 kV
7.35	7	4	4°-7 kV
5.40	6	6	6°-6 kV
7.35	7	6	6°-7 kV
5.40	6	8	8°-6 kV
7.35	7	8	8°-7 kV

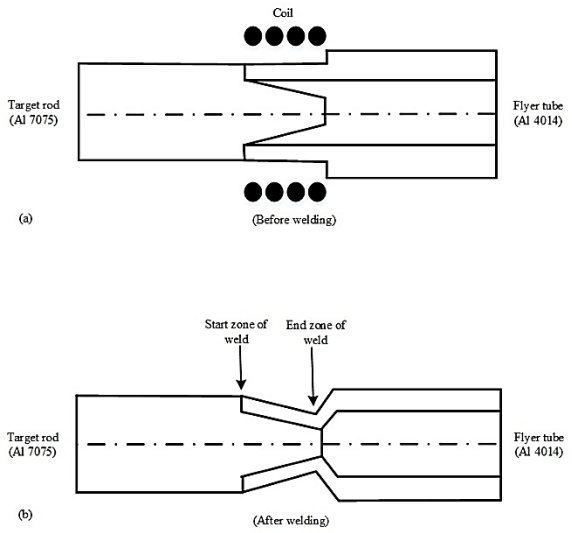


Fig. 3 Schematic illustration of tube and rod position inside the coil. a) before welding and b) after welding

شکل 3 نمای شماتیکی از قرارگیری لوله و مفتول در داخل کویل. الف) قبل از جوش‌کاری و ب) بعد از جوش‌کاری

[1] Graff/Sargent Reagent
[2] Olympus
[3] Philips
[4] Asus

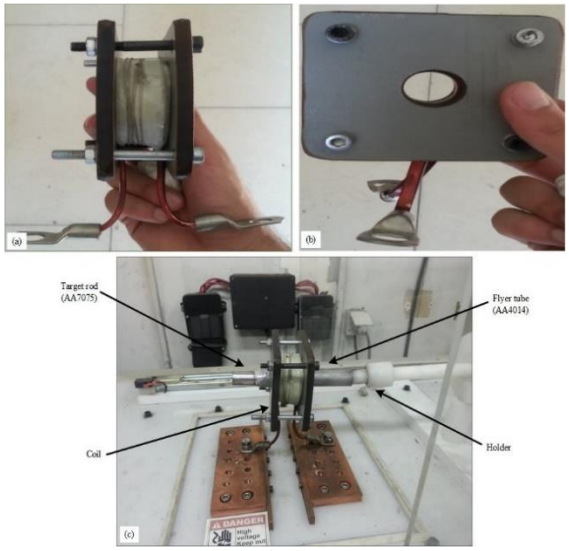


Fig. 4 a and b) the copper coil of MPW system and c) the position of samples inside the coil

شکل 4 الف و ب) کویل مسی مورد استفاده در سیتم جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی و ج) موقعیت نمونه‌ها داخل کویل

زمان اعمال نیرو 15 ثانیه بود. از دو طرف فصل‌مشترک جوش و همچنین از فلزات پایه در هر دو طرف آن سختی‌سنجی به عمل آمد. فاصله نقاط سختی‌سنجی شده از یکدیگر در نمونه‌های جوش‌کاری شده، 100 µm بود. جهت بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های جوش‌کاری شده، تمام آزمایش‌ها برای اتصال لوله به مفتول دو بار انجام شدند. آزمون کشش قطعه‌های جوش‌کاری شده با استفاده از دستگاه کشش سنتام انجام شد.

برای انجام آزمون کشش، سمت مفتول توسط یک فک نگه داشته شده و سمت لوله توسط فک دیگر کشیده می‌شود. زمانی که مقطع جوش‌کاری شده از سمت لوله در معرض نیروی کششی قرار می‌گیرد، به‌علت شیبدار بودن سطح مقطع جوش، این نیرو به دو مولفه تجزیه می‌گردد. همچنین به‌منظور جلوگیری از لهیدگی لوله در اثر فشار فک‌های دستگاه کشش، یک مفتول آلومینیمی در داخل آن قرار داده شد. همان‌طور که در شکل‌های 5a و b مشاهده می‌شود، نیروهایی که بر مقطع جوش‌کاری وارد می‌شوند شامل نیروی مماسی برشی F_t، نیروی قائم N و حداکثر نیروی کششی وارد شده از فک دستگاه (حداکثر نیرو در نمودار نیرو-جابجایی) F می‌باشند. برای محاسبه استحکام برشی اتصال‌ها از رابطه (2) استفاده می‌شود. با توجه به این‌که نیروی F، پیک نیرو در نمودار نیرو- جابجایی بوده و زاویه α نیز برای هر مقطع جوش مشخص می‌باشد، می‌توان نیروی F_t را از رابطه (5) برای نمونه‌های اتصال محاسبه نمود.

$$\tau = \frac{F_t}{A} \tag{2}$$

با توجه به شکل 5b برای برآیند نیروها در راستای x و y می‌توان نوشت:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_t \cos\alpha + N \sin\alpha = F \tag{3}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow N\cos\alpha = F_t \sin\alpha \Rightarrow N = F_t \tan\alpha \tag{4}$$

از روابط (3) و (4) می‌توان رابطه (5) را نتیجه‌گیری کرد:

$$F_t = \frac{F}{\cos(\alpha) + \tan(\alpha)\ \sin(\alpha)} \tag{5}$$

از آنجایی که سطح مقطع جوش‌کاری شده مانند شکل c-5 به شکل یک مخروط ناقص است، برای محاسبه مساحت سطح مقطع جوش‌کاری شده از رابطه (6) استفاده می‌شود.

$$A = \pi[s(R_1 + R_2)] \tag{6}$$

3- نتایج و بحث

3-1- مشخصه‌های ظاهری اتصال‌ها

شکل 6 تصاویر ماکروسکوپی از مقطع برشی نمونه‌های جوش‌کاری شده را نشان می‌دهد. از آنجا که اتصال بین لوله و مفتول به‌صورت مورب انجام شده بود، مشاهده می‌شود که در قسمت ابتدایی منطقه جوش (نشان داده شده در شکل 3-b) به علت پایین بودن زاویه برخورد، حداقل فاصله لازم بین فلز پرنده و فلز هدف جهت ایجاد جوش برقرار نشده است. بنابراین اتصالی بین دو فلز در این منطقه برقرار نمی‌شود. در واقع شتاب گرفتن لوله بیرونی در منطقه‌ای با فاصله پایین در قسمت ابتدایی اتصال، به علت این‌که تمرکز فشار مغناطیسی در این محل کمتر بوده، میسر نبوده و فلز بیرونی تحرک لازم را نخواهد داشت [15].

در نتیجه کم بودن فاصله قبل از برخورد در مناطق ابتدایی اتصال، سرعت برخورد در مناطق ابتدایی فصل‌مشترک پایین بوده و به‌دلیل تغییرشکل پلاستیک پایین انجام شده، میزان جت تشکیل شده جهت ایجاد اتصال کافی نبوده است. نواحی عدم اتصال در شکل 6 نشان داده شده‌اند.

3-2- ریزساختار

تصاویر میکروسکوپ نوری ازسطح مقطع اتصال‌های انجام شده در شرایط مختلف در شکل 7 نشان داده شده است. در نمونه 4º-6 kV در شکل a-7 در همه محل‌ها بین لوله و مفتول شکاف مشاهده می‌شود و جوش صورت نگرفته است. علت آن کم بودن زاویه برخورد و در نتیجه کم بودن فاصله قبل از برخورد بین دو فلز پرنده و فلز هدف است که باعث شده است فلز پرنده سرعت برخورد لازم را برای تغییرشکل پلاستیک و تولید جت بین دو فلز نداشته باشد. در نتیجه فصل‌مشترک جوش تشکیل نشود. در نمونه 4º-7 kV در شکل b-7 اتصال‌های ناپیوسته و نقطه‌ای در برخی از محل‌های فصل-مشترک مشاهده می‌شود. به علت پایین بودن زاویه برخورد و در نتیجه آن کم شدن سرعت برخورد در لحظه اتصال دو فلز به همدیگر، فصل‌مشترک جوش فقط در برخی از محل‌های اتصال تشکیل شده و دارای مورفولوژی خط راست می‌باشد. این نشان‌دهنده اعوجاج و تغییرشکل پلاستیک پایین در فصل‌مشترک می‌باشد. در واقع اتصال مکانیکی ضعیفی بین دو فلز برقرار شده است. نواحی اتصال و عدم اتصال بین دو فلز در شکل‌های a-7 و b با پیکان-های سفید نشان داده شده‌اند.

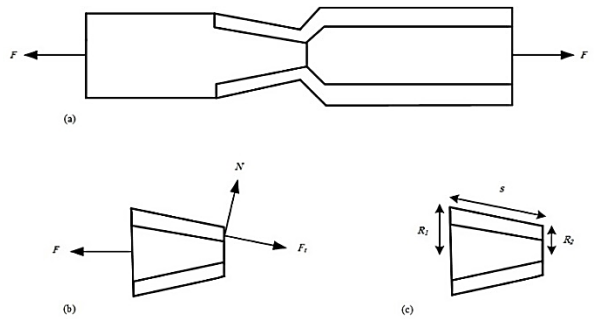


Fig. 5 a and b) The force vectors during tensile testing and c) welded area of two metals

شکل 5 الف و ب) بردارهای نیرو در حین آزمون کشش و ج) سطح مقطع جوش دو فلز

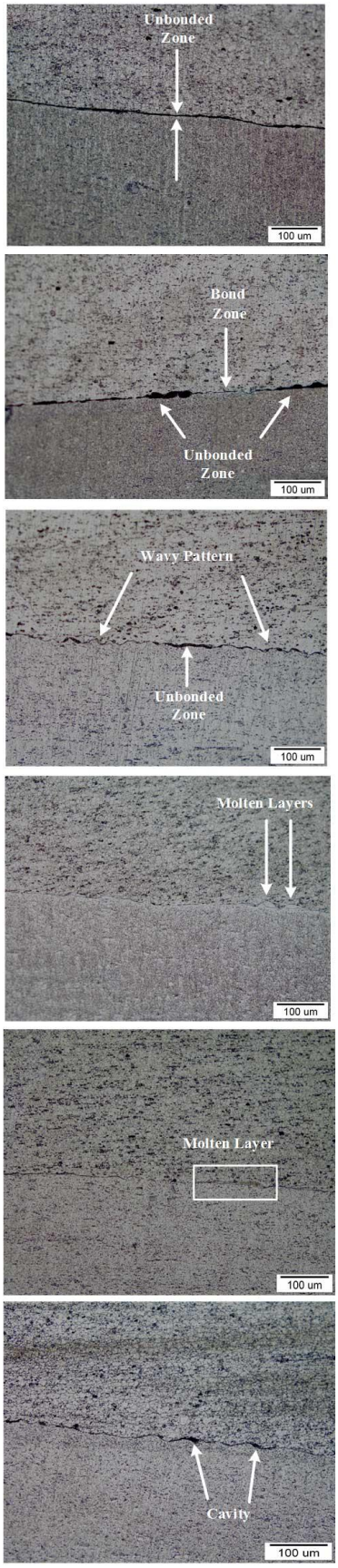
Fig. 6 Macroscopic images of section of weld samples

شکل 6 تصاویر ماکروسکوپی از مقطع نمونه‌های جوش‌کاری شده

در نمونه 6°-6 kV در شکل c-7 فصل‌مشترک اتصال دارای مورفولوژی موجی‌شکل می‌باشد. مشاهده می‌شود با افزایش زاویه برخورد از 4 به 6°، فصل‌مشترک شروع به تغییرشکل برشی می‌نماید. با این حال در برخی نقاط فصل‌مشترک نواحی عدم اتصال مشاهده می‌گردد. فصل‌مشترک موجی نشان می‌دهد که اتصال در خارجی‌ترین سطوح لوله و مفتول صورت گرفته است. با این حال منطقه عدم اتصال بین دو ناحیه موجی‌شکل (مشخص شده توسط پیکان) موجب کاهش یکپارچگی و استحکام فصل‌مشترک جوش می‌شود.

در نمونه 6°-7 kV در شکل d-7 مشاهده می‌شود که فصل‌مشترک جوش‌کاری دارای مورفولوژی موجی شکل است. لایه‌های مذاب در فصل-مشترک تشکیل شده‌اند. تشکیل این لایه‌های مذاب به دلیل ولتاژ بالای جوش‌کاری می‌باشد. این لایه‌ها با پیکان‌ها نشان داده شده‌اند. برای تشکیل لایه مذاب، بیشتر انرژی جنبشی حاصل از لوله پرنده در لحظه برخورد، به حرارت در فصل‌مشترک جوش تبدیل می‌شود. در نتیجه دمای فصل‌مشترک به‌طور موضعی افزایش یافته و از دمای ذوب فلز بیشتر شده و ذوب موضعی در فصل‌مشترک جوش رخ می‌دهد. همچنین ممکن است دما در فصل‌مشترک از دمای ذوب ماده بالاتر نرفته باشد. با این حال، اگر سرعت فلز پرنده بسیار بالا باشد، مقداری ذوب‌شدگی موضعی در فصل‌مشترک مشاهده می‌گردد [16].

در نمونه 8°-6 kV در شکل e-7، مورفولوژی فصل‌مشترک خط راست بوده و به تدریج با نزدیک شدن به قسمت میانی فصل‌مشترک، مورفولوژی موجی شکل مشاهده می‌شود. با افزایش زاویه برخورد، تغییرشکل برشی بیش از حدی در فصل‌مشترک ایجاد می‌گردد و دانه‌ها بیشتر کشیده می‌شوند. علاوه بر برش محوری، منطقه میانی جوش متحمل تغییرشکل بیشتری شده و به دلیل کرنش شدید فصل‌مشترک موجی‌شکل می‌شود. لایه مذاب ناشی از ذوب‌شدگی موضعی در نزدیکی بلندی‌های موج تشکیل می‌شود. لایه ذوب شده در این نمونه در شکل مشخص شده است.



a) 4°-6 kV

b) 4°-7 kV

c) 6°-6 kV

d) 6°-7 kV

e) 8°-6 kV

f) 8°-7 kV

Fig. 7 optical microscope images of welded interfaces of samples. upper side of interface is Al 7075 rod and lower side is Al 4014 tube

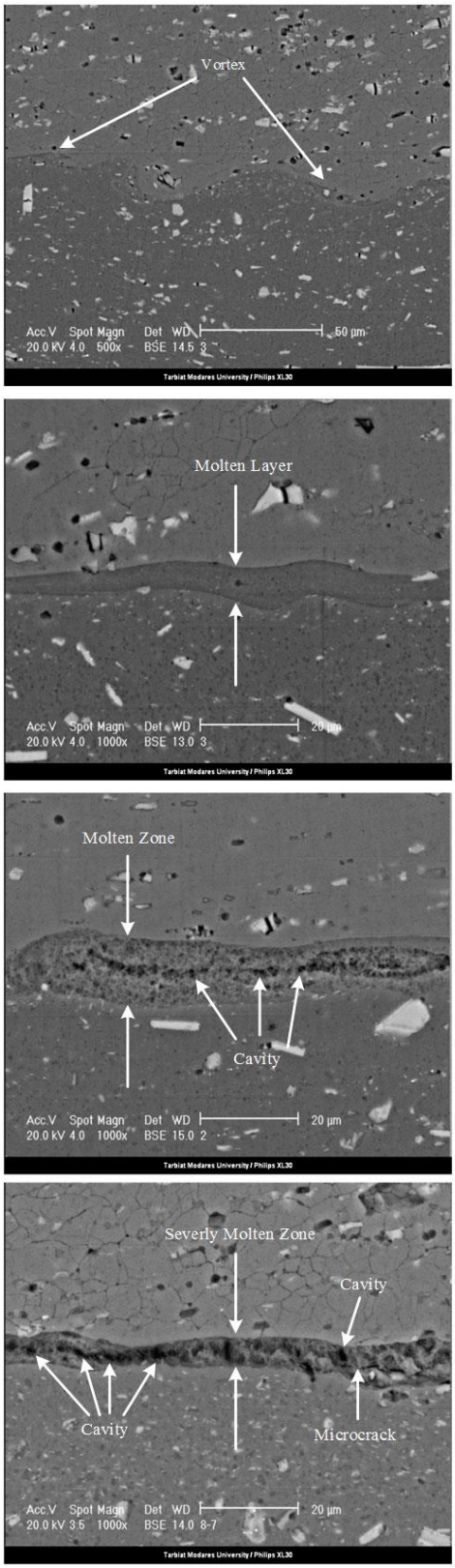
شکل 7 تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل‌مشترک جوش نمونه‌ها. سمت بالای فصل‌مشترک مفتول آلومینیم 7075 و سمت پایین لوله آلومینیم 4014 می‌باشد.

در نمونه 8º-7 kV در شکل f-7 و به دلیل انرژی بالای برخورد، فصل‌مشترک دارای مورفولوژی موجی بوده ولی به دلیل زاویه برخورد و ولتاژ جوش‌کاری بالا و در نتیجه آن سرعت بیش از حد در لحظه برخورد منجر به ذوب‌شدگی شدید و درنتیجه تخریب فصل‌مشترک شده و اتصال مطلوبی انجام نشده است. همچنین حفره‌هایی در فصل‌مشترک جوش تشکیل شده‌اند که به‌دلیل سرعت بالای برخورد می‌باشند. حفره‌ها در این نمونه با پیکان نشان داده شده است.

شکل 8 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل‌مشترک نمونه‌های 6º-6 kV، 6º-7 kV، 8º-6 kV و 8º-7 kV نشان داده شده است. درنمونه 6º-6 kV (شکل a-8) اتصال به‌صورت پیوسته و دارای فصل‌مشترک موجی شکل می‌باشد. مشاهده می‌شود که مورفولوژی موجی فصل‌مشترک با تشکیل گرداب همراه شده است. گرداب‌ها توسط پیکان در شکل نشان داده شده‌اند. پیدایش گرداب را می‌توان توسط پدیده ناپایداری کلوین- هلمهولتز[1] توضیح داد. این پدیده زمانی رخ می دهد که سیال در حال جریان، تحت تنش برشی قرار گیرد یا دو سیال با سرعت‌های مختلف با هم برخورد کنند. زمانی که فصل‌مشترک در معرض برخورد از نوع برشی قرار می‌گیرد، اختلاف سرعت مماسی بین فلز پرنده متحرک و فلز هدف ساکن سبب ایجاد سیلان جنبشی چرخشی می‌گردد که گرداب را تشکیل می‌دهد. فصل‌مشترک در درون گرداب پیچ و تاب خورده و به صورت موضعی نورد می‌شود، به‌طوری که تولید حرارت به دلیل تغییرشکل پلاستیک می‌تواند باعث ذوب موضعی ماده گردد [17].

در نمونه 6º-7 kV (شکل b-8)، لایه ذوب شده در فصل‌مشترک جوش تشکیل شده است. لایه مذاب (نشان داده شده با پیکان) تشکیل شده روی فصل‌مشترک موج عاری از هرگونه حفره می‌باشد. در واقع ذوب‌شدگی در این محل شدید نبوده و باعث تخریب فصل‌مشترک نشده است. ویژگی‌های میکروساختاری در این شکل نشان‌دهنده این می‌باشد که ماده برای یک مدت زمان بسیار کوتاهی در حین فرایند جوش‌کاری، ذوب شده است. این ذوب‌شدگی موضعی در یک منطقه سطحی بسیار نازک آلومینیم می‌تواند ناشی از انرژی برخورد بالا در طی فرایند جوش‌کاری باشد. این انرژی صرف تغییرشکل ماده اولیه شده و منجر به گرمایش آدیاباتیکی می‌شود [18]. در نمونه 8º-6 kV (شکل c-8)، ذوب‌شدگی در فصل‌مشترک جوش رخ داده است. ذوب‌شدگی در قسمت مرکزی لایه بیشتر بوده و در نواحی اطراف لایه کمتر می‌باشد. از این‌رو حفره‌ها در قسمت مرکزی لایه مذاب بیشتر مشاهده می‌شوند. دلیل تشکیل حفره‌ها سرعت بالای برخورد و در نتیجه کنده شدن قسمتی از سطوح فصل‌مشترک می‌باشد. حفره‌ها و منطقه ذوب شده در این شکل با پیکان نشان داده شده‌اند.

در نمونه 8º-7 kV (شکل d-8)، ذوب‌شدگی شدید در فصل‌مشترک اتفاق افتاده و در نتیجه تخریب صورت گرفته است. دلیل تخریب می‌تواند ناشی از پدیده حالت جامد مانند ترک انجمادی یا تردی موضعی در اثر تکه تکه شدن و جتینگ ذرات ناشی از برش شدید فصل‌مشترک باشد [17]. علاوه براین، وجود میکروترک روی لایه مذاب نشان‌دهنده یک تنش حرارتی شدید در طی انجماد می‌باشد. به‌طور کلی میکروترک‌ها تحت شرایط شیب دمایی بالا، تنش حرارتی بالا و تغییرشکل پلاستیک شدید می‌توانند تشکیل شوند [19]. با افزایش همزمان زاویه و ولتاژ جوش‌کاری، حفره‌ها به طور فزاینده‌ای پدیدار شده و حفره‌های به هم پیوسته‌ای را تشکیل می‌دهند. در



a) 6º-6 kV

b) 6º-7 kV

c) 8º-6 kV

d) 8º-7 kV

Fig 8 Cross-sectional SEM images of the welding interfaces of different samples. upper side of interface is Al 7075 rod and lower side is Al 4014 tube

شکل 8 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل‌مشترک‌های جوش نمونه‌های مختلف. سمت بالای فصل‌مشترک مفتول آلومینیم 7075 و سمت پایین آن لوله آلومینیم 4014 می‌باشد.

[1] Kelvin-Helmholtz

نتیجه فصل‌مشترک دارای ساختار متخلخل شده است. مشاهده جوانه‌زنی منافذ در فصل‌مشترک می‌تواند در نتیجه گازهای حل شده به دلیل سرعت بالا درنظر گرفته شود. از این رو گازهای به دام افتاده به‌صورت حباب جوانه می‌زنند و در اثر سرمایش سریع ماده ذوب شده در طی برخورد، رشد می‌کنند. جوانه‌زنی و رشد منافذ می‌تواند ناشی از پدیده حفره‌زایی توسط تبخیر یا تنش سطحی سیال باشد. در واقع تحت شرایط فشار بالا، تبخیرآلومینیم می‌تواند در دمای پایین‌تر از دمای تبخیر در شرایط محیط رخ دهد [20]. حفره‌ها و میکروترک در شکل با پیکان نشان داده شده‌اند.

3-3- سختی

شکل 9 نمودار پیک سختی برای همه اتصال‌های لوله به مفتول را نشان می‌دهد. در اتصال‌های با زاویه یکسان، سختی بیشتر برای اتصالی می‌باشد که دارای ولتاژ جوش‌کاری بالاتر و در نتیجه انرژی برخورد بیشتری است. می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش ولتاژ جوش‌کاری، کارسختی و تغییرشکل پلاستیک بیشتری در فصل‌مشترک جوش رخ داده و منجر به افزایش سختی فصل‌مشترک می‌شود. پیک سختی بیشترین پیک سختی مربوط به نمونه 8°-7 kV برابر با 177 HV می‌باشد. در این نمونه به علت بالا بودن همزمان زاویه برخورد و ولتاژ جوش‌کاری، سرعت برخورد بالاتر بوده و تغییرشکل پلاستیک بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر رخ داده که منجر به ذوب‌شدگی شدید فصل‌مشترک جوش شده است. سختی فصل‌مشترک در این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر 20-5 درصد بیشتر می‌باشد.

تغییرشکل پلاستیک و کارسختی شدید می‌تواند باعث افزایش سختی در فصل‌مشترک شود. همچنین همان‌طور که در شکل 10 نشان داده شده است، برخی ترکیبات بین‌فلزی در فلزهای پایه قابل مشاهده هستند. ریز شدن این ترکیبات به‌دلیل ذوب موضعی و انجماد سریع در فصل‌مشترک جوش اتفاق می‌افتد که باعث افزایش سختی فصل‌مشترک می‌شود [21].

4-3- استحکام

در شکل 11 منحنی نیرو–جابجایی برای نمونه‌های 6°-6 kV، 6°-7 kV، 8°-6 kV و 8°-7 kV و در شکل 12 سطح شکست ماکروسکوپی حاصل از آزمون کشش برای این نمونه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، نمونه 6°-6 kV در مراحل اولیه بارگذاری نیرو، در جابجایی‌های پایین افت سریع نیرو دارد. هیچ تغییرشکل پلاستیکی برای انجام جوش رخ نداده و فقط تغییرشکل کمی در محدوده الاستیک صورت گرفته است. افت سریع نیرو بدون هیچ گونه تغییرشکل پلاستیک نشان‌دهنده

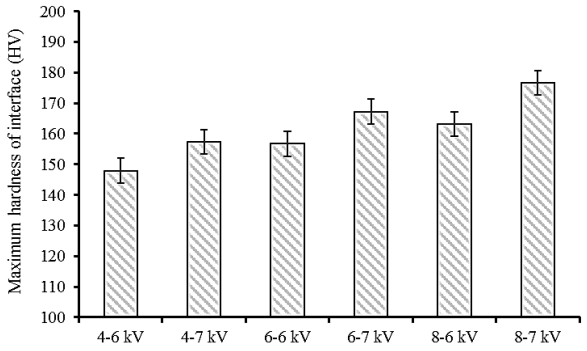


Fig. 9 Maximum hardness of interface of welded samples

شکل 9 حداکثر سختی فصل مشترک نمونه‌های جوش‌کاری شده

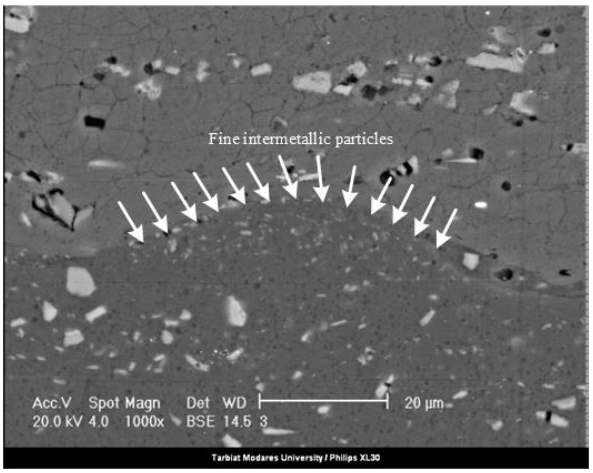


Fig. 10 Fragmentation of intermetallic compounds at the welding interface in sample 6°-6 kV

شکل 10 ریز شدن ترکیبات بین‌فلزی در فصل‌مشترک جوش‌کاری در نمونه 6°-6 kV

عدم یکپارچگی فصل‌مشترک جوش در این نمونه می‌باشد. در سطح شکست این نمونه در شکل 12-a کنده شدن قسمتی از لوله مشاهده می‌گردد.

در منحنی نیرو–جابجایی در شکل 11 برای نمونه 6°-7 kV مشاهده می‌شود، این اتصال محدوده تغییرشکل پلاستیک بالایی دارد. محدوده تغییرشکل پلاستیک بالا نشان دهنده این است که بعد از نقطه تسلیم شدن با افزایش نیرو و در نتیجه افزایش تنش برشی وارد شده بر سطح مقطع جوش، هیچ شکستی در آن رخ نمی‌دهد. همچنین در سطح شکست این نمونه در شکل 12-b، هیچ‌گونه گسیختگی در مقطع جوش ایجاد نمی‌شود که نشان دهنده استحکام بالای آن است. می‌توان نتیجه گرفت که شکست فقط ناشی از کرنش پلاستیک لوله می‌باشد. این منحنی، رفتار متعارف فلز آلومینیم را نشان می‌دهد.

در منحنی نیرو–جابجایی در شکل 11 برای نمونه 8°-6 kV مشاهده می‌شود که در این نمونه تغییرشکل پلاستیک صورت گرفته و افت نیرو در جابجایی‌های بالا رخ داده است. از سطح شکست این نمونه در شکل 12-c می‌توان نتیجه گرفت، شکست ناشی از گسیختگی مقطع بسیار کوچکی از سطح جوش بوده و هم ناشی از کرنش پلاستیک لوله می‌باشد که نشان‌دهنده

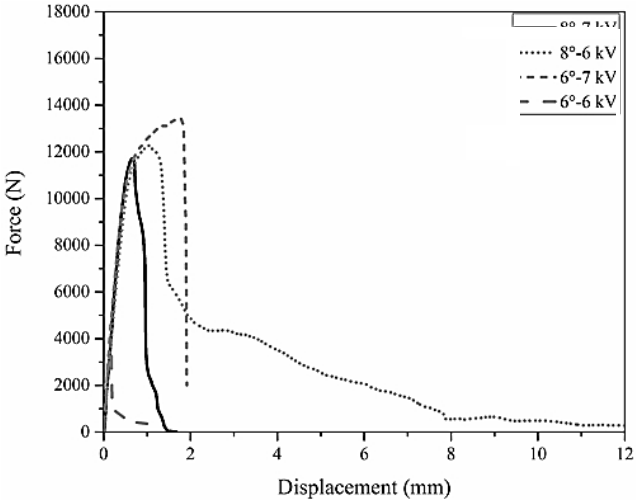


Fig. 11 Uniaxial tension curve of joints

شکل 11 منحنی تنش تک محوره برای اتصال‌های انجام شده

a) 6º-6 kV

b) 6º-7 kV

c) 8º-6 kV

d) 8º-7 kV

Fig. 12 Macroscopic images of the fracture surface given by the tensile test

شکل 12 تصاویر ماکروسکوپی از سطح شکست ایجاد شده توسط آزمون کشش

همان‌طور که در شکل 11 می‌شود، در نمونه 8º-7 kV تغییرشکل پلاستیک در منحنی نیرو-جابجایی کم است. سطح شکست این نمونه در شکل d-12 نشان می‌دهد که قسمتی از فصل‌مشترک کنده شده و دلیل عمده شکست در اثر گسیختگی مقطع جوش می‌باشد. البته کرنش پلاستیک لوله نیز تا حدودی در شکست موثر است. در واقع به علت یالا بودن همزمان زاویه برخورد و ولتاژ جوش‌کاری و در نتیجه بالا بودن سرعت در لحظه برخورد در این جوش‌کاری، ذوب‌شدگی شدید در فصل‌مشترک جوش باعث کاهش استحکام آن شده است.

در جدول 4، نیروها، مساحت سطح مقطع و استحکام برشی اتصال‌های انجام شده درج شده است. مشاهده می‌شود برای اتصال‌های با زوایای 4 و 6º، با افزایش ولتاژ جوش‌کاری، استحکام جوش افزایش یافته است. پایین بودن زاویه برخورد، منجر به کم شدن سرعت در لحظه برخورد شده و در نتیجه استحکام اتصال کاهش می‌یابد. افزایش ولتاژ جوش‌کاری در زاویه‌های برخورد 4 و 6º باعث افزایش سرعت برخورد و تغییرشکل پلاستیک بیشتر در منطقه جوش شده و در نتیجه استحکام اتصال را بهبود می‌بخشد. از طرف دیگر مشاهده می‌شود برای اتصال‌های با زاویه 8º، با افزایش ولتاژ جوش‌کاری، استحکام جوش کاهش می‌یابد. در فصل‌مشترک جوش نمونه 8º-6 kV مقدار جزئی ذوب‌شدگی مشاهده می‌شود. در حالی‌که در نمونه 8º-7 kV، ذوب-شدگی در فصل‌مشترک جوش تشدید گردیده و باعث تخریب محل‌هایی از آن می‌شود. در واقع افزایش ولتاژ در زاویه‌های برخورد بالا، منجر به افزایش بیشتر سرعت در لحظه برخورد شده و با ایجاد ذوب‌شدگی شدید می‌تواند استحکام اتصال را کاهش دهد.

در شکل 13 سطح شکست نمونه 6º-7 kV نشان داده شده است. زمانی-که اتصال در معرض کشش قرار می‌گیرد، فصل‌مشترک جوش دچار شکست شده و یک اثر پسمانده ایجاد می‌کند. مشاهده می‌شود، تغییر شکل پلاستیک برای جوش قبل از شکست رخ داده است. به طور کلی، تجمع میکروحفره‌ها توسط تنش برشی ناشی از بارگذاری کششی انجام می‌شود. جهت برش از بالا به پایین یا بالعکس می‌باشد که نشان دهنده سطح شکست نرم برای جفت فلزات آلومینیم متشابه می‌باشد.

جدول 4 نتایج آزمون استحکام برشی نمونه‌های جوش‌کاری شده

Table 4 Results of shear strength test of welded samples

نمونه	نیروی فک (N)	نیروی برشی مماسی (N)	مساحت (mm^2)	استحکام برشی (MPa)
6 kV-4º	1372.2	1368.8	1042.4	1.3
7 kV-4º	4116.5	4106.4	1042.4	3.9
6 kV-6º	5348.5	5319.2	1003.5	5.3
7 kV-6º	13442.2	13368.6	1003.5	13.3
6 kV-8º	12301.7	12181.9	964	12.6
7 kV-8º	11716.8	11602.8	964	12

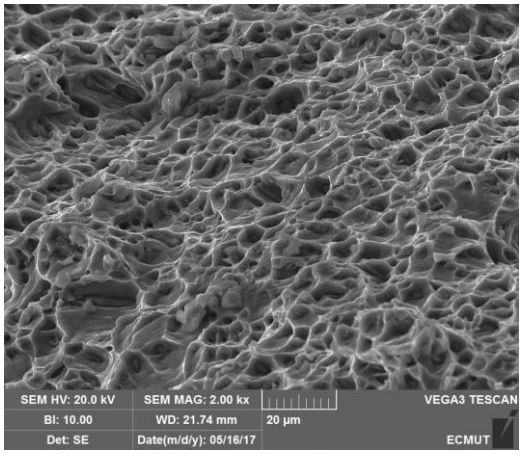


Fig. 13 SEM image of fracture surface of sample 6º-7 kV

شکل 13 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه 6º-7 kV

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اتصال‌های لوله آلومینیم 4014 به مفتول آلومینیم 7075 تحت دو متغیر زاویه برخورد (4، 6 و 8°) و ولتاژ جوش‌کاری (6 و7 kV) توسط فرایند جوش‌کاری ضربانی مغناطیسی انجام شد. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشند.

- افزایش ولتاژ از 6 به 7 kV در زاویه برخورد 4° بر ریزساختار فصل-مشترک تأثیر زیادی ندارد و شکاف ناشی از عدم اتصال در فصل‌مشترک، در هر دو نمونه مشاهده می‌شود.

- افزایش ولتاژ از 6 به 7 kV در زاویه‌های برخورد 6 و 8° باعث می‌شود تا سرعت در لحظه برخورد بالا رفته و ذوب‌شدگی در فصل‌مشترک به دلیل تغییرشکل پلاستیک بیشتر رخ دهد.

- در اتصال‌های با زاویه یکسان، با افزایش ولتاژ از 6 به 7 kV به‌دلیل افزایش ولتاژ جوش‌کاری، سختی افزایش بیشتری می‌یابد که نشان‌دهنده کارسختی و تغییرشکل پلاستیک بیشتری در فصل‌مشترک جوش است.

- افزایش ولتاژ جوش‌کاری در زاویه برخورد 4°، باعث افزایش سرعت برخورد و تغییرشکل پلاستیک بیشتر در منطقه جوش شده و باعث افزایش استحکام اتصال شود. در حالی‌که در زاویه‌های برخورد 6 و 8° منجر به ذوب-شدگی شدید گردیده و استحکام اتصال را کاهش دهد.

- بیشترین استحکام برشی مربوط به نمونه 7-6° kV می‌باشد. از آنجا که هیچ گسیختگی در فصل‌مشترک جوش مشاهده نمی‌شود، می‌توان شکست این اتصال را فقط ناش

5- فهرست علائم

A	مساحت (mm^2)
C_T	ظرفیت مجموع خازن (μF)
F	حداکثر نیروی وارد شده از فک (N)
F_t	نیروی برشی مماسی (N)
R_1	شعاع قاعده بزرگ مخروط (mm)
R_2	شعاع قاعده کوچک مخروط (mm)
s	طول شیب مخروط (mm)
U	انرژی برخورد (kJ)
V	ولتاژ جوش‌کاری (kV)

علایم یونانی

τ	استحکام برشی (MPa)

6- مراجع

[1] S. Mishra, S. K. Sharma, S. Kumar, K. Sagar, M. Meena, and A. Shyam, 40kJ magnetic pulse welding system for expansion welding of aluminium 6061 tube, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 240, pp. 168-175, 2017.

[2] S. Chen, G. S. Daehn, A. Vivek, B. Liu, S. Hansen, J. Huang and S. Lin, Interfacial microstructures and mechanical property of vaporizing foil actuator welding of aluminum alloy to steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 659, pp. 12-21, 2016.

[3] M. Hahn, C. Weddeling, J. Lueg-Althoff, and A. E. Tekkaya, Analytical approach for magnetic pulse welding of sheet connections, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 230, pp. 131-142, 2016.

[4] J. Bellmann, J. Lueg-Althoff, G. Goebel, S. Gies, E. Beyer, and A. Tekkaya, Effects of surface coatings on the joint formation during magnetic pulse welding in tube-to-cylinder configuration, *Proceedings of 7th International Conference on High Speed Forming*, April 27th-28th, *Dortmund, Germany*, pp. 159-171. 2016.

[5] A.K. Jassim, Magnetic pulse welding technology. *Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Power and Control (EPC-IQ)*,Basrah, Iraq: IEEE, pp. 363-373, 2010.

[6] C. Weddeling, M. Hahn, G. Daehn, A. Tekkaya, Uniform pressure electromagnetic actuator–An innovative tool for magnetic pulse welding, *Procedia CIRP*, Vol. 18, pp. 156-61, 2014.

[7] B. M. C. Tomás, *Magnetic Pulse Welding*, Ph.D. Thesis, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

[8] J.-G. Lee, J.-J. Park, M.-K. Lee, C.-K. Rhee, T.-K. Kim, A. Spirin, V. Krutikov, S. Paranin, End closure joining of ferritic-martensitic and oxide-dispersion strengthened steel cladding tubes by magnetic pulse welding, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 46, No 7, pp. 3132-9. 2015.

[9] O. Becher, M. Nahmany, D. Ashkenazi, V. Shribman, A. Stern, On bond formation in magnetic pulse welded joints, The annals of dunarea de jos university of galati fascicle XII: *Welding Equipment and Technology*, Vol. 25, p. 23, 2014.

[10] A. Tomokatsu, Interfacial observation of parallel seam welded aluminum sheets by magnetic pulse welding method with collision between metal jets, *Qarterly Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 33, No 2, pp. 130-4, 2015.

[11] A. Nassiri, G. Chini, and B. Kinsey, Spatial stability analysis of emergent wavy interfacial patterns in magnetic pulsed welding. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol 63, No 1, pp. 245-248,2014.

[12] J. Verstraete, W. De Waele, K. Faes, Magnetic pulse welding: lessons to be learned from explosive welding, *Sustainable Construction and Design (SCAD)*, Vol. 2. No. 3, pp. 458-464, 2011.

[13] Y. Zhang, S.S. Babu, and G.S. Daehn, Interfacial ultrafine-grained structures on aluminum alloy 6061 joint and copper alloy 110 joint fabricated by magnetic pulse welding, *Journal of Materials Science*, Vol. 45, No. 17, pp. 4645-4651, 2010.

[14] R.N. Raoelison, N. Buiron, M. Rachik, D. Haye, G. Franz, and M. Habak, Study of the elaboration of a practical weldability window in magnetic pulse welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213,No. 8, pp. 1348-1354, 2013.

[15] A. Stern, O. Becher, M. Nahmany, D. Ashkenazi, and V. Shribman, Jet composition in magnetic pulse welding: Al-Al and Al-Mg couples, *Weld Journal*, Vol 94, pp.257-284, 2015.

[16] Y. Zhang, *Investigation of Magnetic Pulse Welding on Lap Joint of Similar and Dissimilar Materials*, Ph.D. Thesis, The Ohio State University, Columbus, 2010.

[17] R. Raoelison, T. Sapanathan, N. Buiron, M. Rachik, Magnetic pulse welding of Al/Al and Al/Cu metal pairs: Consequences of the dissimilar combination on the interfacial behavior during the welding process, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 20, pp. 112-27, 2015.

[18] S. Sharafiev, C. Pabst, M. F. Wagner, and P. Groche, Microstructural characterisation of interfaces in magnetic pulse welded aluminum/aluminum joints, *Proceedings of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 118, No. 1, p. 012016, 2016.

[19] X. Wu, J. Shang, An investigation of magnetic pulse welding of Al/Cu and interface characterization, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 136, No 5, p. 051002, 2014.

[20] T. Sapanathan, R. N. Raoelison, N. Buiron, and M. Rachik. In situ metallic porous structure formation due to ultra high heating and cooling rates during an electromagnetic pulse welding, *Scripta Materialia*, Vol 128, pp. 10-13, 2017.

[21] A. Stern, M. Aizenshtein, G. Moshe, S. Cohen, N. Frage, The nature of interfaces in Al-1050/Al-1050 and Al-1050/Mg-AZ31 couples joined by magnetic pulse welding (MPW), *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, No 7, pp. 2098-103, 2013.