E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 7, Number 2, 2022



Investigation of the effect of explosive welding variables on the corrosion behavior of the joint of two explosive layers of 5000 series aluminum-copper sheets

H. Nikbakht[1], M.R. Khanzadeh[2*], H. Bakhtiari[3]

1- Department of Materials Engineering, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza,Iran
2- Department of Materials Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
3- Materials and Energy Research Center, Faculty of Materials, Karaj, Iran.

Received 12 August 2021 ; Accepted 23 September 2021

Abstract

In the present study, the corrosion behavior and microstructural changes of 5000 series aluminum and copper sheets after the explosive welding process have been investigated. Explosive welding is performed with a standoff distance and change of explosive load. Dynamic potential polarization tests and electrochemical impedance spectroscopy, light microscopy, and scanning electron microscopy were used. The results of TOEFL polarization curves show that the lowest corrosion velocity was related to the sample with an explosive load of 1.5 and the highest corrosion velocity was related to the sample with an explosive load of 2.5. The corrosion resistance of a sample with an explosive load of 2.5 is less than that of a sample with an explosive load of 1.5 due to more severe plastic deformation at the joint. The metallographic results show a wave-vortexing of the joint due to the increase in the explosive charge. The results of the impedance test in welded samples showed that the value of n (experimental power parameter) decreased with wave-vortexing of the joint and the sample with 2.5 explosive load had the highest corrosion rate. Based on the results of scanning electron microscopy, it was observed that with an increasing explosive charge, the thickness of the local melting layer gradually increases.

Keywords: Explosive welding, explosive ratio, severe plastic deformation, vortex..

Corresponding Author: khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هفتم، شماره2، پاییز و زمستان 1400

بررسی تاثیر متغیرهای جوشکاری انفجاری بر رفتار خوردگی اتصال دو لایه انفجاری ورق‌های آلومینیوم سری 5000 – مس

هومن نیکبخت[1]، محمد رضا خانزاده[2*]، حمید بختیاری[3]

1- دانشکده فنی و مهندسی، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران

2- گروه مهندسی مواد، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

3- پژوهشگاه مواد و انرژی، دانشکده مواد و سرامیک، کرج، ایران

دریافت مقاله: 1400/05/21 ؛ پذیرش مقاله: 1400/07/01

چکیده

در تحقیق حاضر به بررسی رفتار خوردگی و تغییرات ریزساختاری ورق‌های آلومینیوم سری 5000 و مس پس از فرایند جوشکاری انفجاری پرداخته‌شده است. جوشکاری انفجاری بافاصله توقف ثابت و تغییر میزان بار انفجاری انجام‌شده است. از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی، میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترون روبشی استفاده شد. نتایج منحنی‌های پلاریزاسیون تافل نشان داده، کمترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه با بار انفجاری 1/5 و بیشترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه با بار انفجاری 2/5 بوده است. مقاومت به خوردگی نمونه با بار انفجاری 2/5 کمتر از نمونه با بار انفجاری 1/5 شده است که دلیل آن تغییر شکل پلاستیکی شدیدتر در فصل مشترک است. نتایج متالوگرافی نمایانگر موجی –گردابه‌ای شدن فصل مشترک در اثر افزایش بار انفجاری بوده است. نتایج آزمون امپدانس در نمونه‌های جوش شده نشان داده با موجی- گردابه‌ای شدن فصل مشترک مقدار n (پارامتر توان تجربی) کاهش‌یافته و نمونه با بار انفجاری 2/5 بیشترین میزان خوردگی را داشته است. براساس نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترون روبشی مشاهده شد که با افزایش بار انفجاری، به‌تدریج ضخامت لایه ذوب موضعی افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: جوشکاری انفجاری، بار انفجاری، تغییر شکل پلاستیکی شدید، گردابه.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir

1- مقدمه

جوشکاری انفجاری روشی است که در آن از انرژی کنترل‌شده یک ماده منفجره استفاده می‌شود تا سطوح جوش شونده که نسبت به هم در فاصله توقف معینی قرارگرفته‌اند با سرعت بالایی به یکدیگر نزدیک شده و به هم برخورد کنند. در اثر برخورد دو سطح به یکدیگر، یک میدان خمیری موضعی در فصل مشترک اتصال ایجاد می‌شود که با اشتراک‌گذاری الکترون‌ها یک باند با پیوند متالورژیکی بین اجزا جوش شونده ایجاد می‌شود. در اثر فشار برخوردی بالا یک جت با سرعت بالا از دو سطح اتصال تشکیل می‌شود که موجب ایجاد سطوح

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]

اتصالی تمیز در فصل مشترک جوشکاری و حذف آلودگی‌های سطحی می‌شود. تشکیل این جت از شرایط اساسی ایجاد پیوند مناسب در جوشکاری انفجاری است. این فرایند جوشکاری با اهمیت غیر ذوبی بوده و از کاربردهای صنعتی آن می‌توان به اتصال دهی و روکش دهی فلزات هم‌جنس و غیر هم‌جنس متنوع به‌صورت دو یا چندلایه اشاره نمود. به دلیل عدم حرارت دهی در طول این فرایند، جوش‌های انجام‌شده با این روش بسیاری از خصوصیات منفی قطعات اتصال یافته با فرایندهای جوشکاری ذوبی، نورد گرم یا آهنگری گرم شده را دارا نمی‌باشند[2-1]. تحقیقاتی در زمینه اتصالات انفجاری مس به آلومینیوم انجام‌شده که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود: هنرپیشه و همکاران در بررسی اتصال انفجاری مس به آلومینیوم نشان دادند که مقاومت و استحکام کششی و سختی میکروسکوپی نمونه‌های با افزایش تعداد گذرها افزایش می‌یابد، در حالی‌که انعطاف‌پذیری آن‌ها کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین در تحقیقی دیگر نشان دادند که وجود ترکیبات ترد باعث ایجاد ترک‌های ریز و ترد شدن اتصال می‌شود [4-3]. گولنج تأثیر تغییرات بار انفجاری بر اتصال مس – آلومینیوم را بررسی نموده است. نتایج او نشان داد که شکل فصل مشترک اتصال با افزایش این متغیر از حالت خطی به حالت موجی با افزایش دامنه و طول امواج فصل مشترک تغییر نموده است، همچنین سختی در مجاورت فصل مشترک و سطوح خارجی صفحات در اثر برخورد افزایش نشان داده است [5]. تاج یار و همکاران هم در اتصال انفجاری لوله‌های مسی به آلومینیومی نشان دادند که هسته زدایی و انتشار میکرو ترک‌ها در طول انجام فرایند افزایش‌یافته و باعث کاهش استحکام برشی آن‌ها می‌شوند [6].

تحقیقات بسیار محدودی در زمینه خوردگی اتصالات انفجاری انجام‌شده که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود: نتایج خانزاده و همکاران [7] در بررسی تأثیر فاصله توقف بر رفتار خوردگی اتصال انفجاری ورق‌های فولاد زنگ‌نزن304 فولاد کربنی CK 45 در محیط دریایی نشان داد که مناطق ذوب موضعی منجمد شده و افزایش انرژی جنبشی برخورد در نمونه بافاصله توقف بیشتر باعث افزایش سرعت خوردگی شده است. کتگکالا [8] تأثیر ترکیبات بین فلزی بر رفتار خوردگی اتصالات سه لایه انفجاری آلومینیوم /فولاد در صنایع نظامی را موردبررسی قرار داد. نتایج نشان داده تشکیل ترکیبات بین فلزی Al_3Fe، Al_5Fe_2، در فصل مشترک اتصال باعث ایجاد حالت کاتدی نسبت به آلومینیوم و حالت آندی نسبت به فولاد شده است. درنتیجه حمله خوردگی ترجیحی در نزدیک مرز آلومینیوم و ترکیبات بین فلزی رخ‌داده است.

مودالیو همکاران [9] خوردگی اتصال انفجاری تیتانیم، فولاد زنگ‌نزن 304 را بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده که استحکام خمشی اتصال در محیط اسید نیتریک در حد استاندارد بوده و حمله خوردگی بیشتر در فصل مشترک اتصال متمرکز بوده است. آکاریر [10]خوردگی اتصال انفجاری آلومینیوم به مس را بررسی نموده است. نتایج نشان داده که خوردگی گالوانیک در اتصال رخ‌داده و سمت آلومینیومی اتصال حالت آندی بیشتری براساس الکترونگاتیو بالا داشته و نسبت به سمت مسی بیشتر خورده شده است. کهرمان و همکاران [11] خوردگی اتصال انفجاری تیتانیم به فولاد زنگ نزن را بررسی نموده‌اند نتایج نشان داده در محیط خورنده با افزایش مقدار بار انفجاری، جرم صفحات اتصال یافته به دلیل تغییر شکل پلاستیکی شدیدتر و تشکیل لایه اکسیدی بر روی سطح افزایش‌یافته است. سویی و همکاران [12] مقایسه رفتار خوردگی اتصال انفجاری لوله‌های مس به فولاد زنگ نزن را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داده در جوشکاری ذوبی مقاومت به خوردگی اتصال غیریکنواخت‌تر بوده که علت آن ناهمگونی‌های شیمیایی ناشی از ریز جدایش و ایجاد فازهای مخرب ثانویه و تجمع آن‌ها در اتصال ذوبی بوده که باعث جلوگیری از شکل‌گیری یک‌لایه پسیو پایدار شده است. اتصالات غیر هم‌جنس بین فولادهای زنگ نزن آستینتی و فولادهای کربنی به شکل گسترده‌ای در دستگاه‌های انتقال انرژی با دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه براین، اتصالات غیرهم‌جنس در خطوط لوله بخار، راکتورهای هسته‌ای و صنایع پتروشیمی به شکل وسیعی کاربرد دارند.

در این مطالعه اتصال غیر هم‌جنس بین ورق‌های آلومینیوم سری

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]

5000 - مس به روش جوشکاری انفجاری با تغییر میزان فاصله توقف انجام‌گرفته و ریزساختار، تغییرات سختی در فصل مشترک موردبررسی قرارگرفته است. خواص خوردگی، در ناحیه اتصال در محلول3/5% NaCl موردبررسی قرارگرفته و ارتباط مابین ریزساختار و سختی فصل مشترک با خواص خوردگی مورد تحلیل واقع‌شده است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- انتخاب مواد

در این تحقیق از ورق‌های آلومینیوم سری 5000 با ابعاد 260×260 میلی‌متر، ضخامت 5 میلی‌متر و مس با ابعاد 230×230 میلی‌متر و ضخامت 7 میلی‌متر استفاده‌شده است. ترکیب شیمیایی این فلزات به روش اسپکترومتری نشری توسط دستگاه WAS به دست آمده و در جدول‌های (1و2) نشان داده شده است.

جدول 1- ترکیب شیمیایی برای آلومینیوم سری 5000 (برحسب درصد وزنی)

%Cr	%Cu	%Fe	%Mg	%Mn	%Si	Zn%
۰/۱	۰/۲	۰/۷۲	۰/۹	۰/۰۲۸	۰/۲۳	۰/۲۱

جدول 2- ترکیب شیمیایی برای مس (برحسب درصد وزنی)

Sn%	Pb%	P%	Zn%
۰/۹۲	۰/۰۱۲۳	۰/۰۸۹۲	۰/۱۱۹

2-2- انتخاب روش جوشکاری

در این مطالعه اتصال غیر هم‌جنس بین آلومینیوم سری 5000 و مس به روش جوشکاری انفجاری انجام‌گرفته است. شکل (1) نحوه تنظیم اولیه صفحات جهت انجام جوشکاری انفجاری را نشان داده است. ماده منفجره از نوع آماتول 10-90 با ترکیب تری نیترو تولوئن 10 درصد و نیترات آمونیم 90 درصد با سرعت 2504 متر بر ثانیه بوده است. چگالی مواد مورداستفاده 0/85 گرم بر سانتی‌متر مکعب با دانه‌بندی 200 میکرون بوده که در داخل یک جعبه چوبی با ابعاد مناسب در بالای ورق پرنده مستقر گردیدند. قبل از انجام جوشکاری نیز سطوح کلیه ورق‌ها با محلول استون مورد تمیزکاری قرار گرفتند.

دو ورق به‌صورت کاملاً موازی و هم‌محور نسبت به یکدیگر تحت فواصل توقف قرار داده شده‌اند، ورق مس بالا به‌عنوان صفحه پرنده و ورق آلومینیوم سری 5000 به‌عنوان صفحه پایه و فاصله توقف مابین ورق‌ها نیز به کمک فاصله دهنده‌های مسی با ابعاد مناسب ایجادشده است. سرعت مواد انفجاری توسط سرعت‌سنج با سیستم فیبر نوری اندازه‌گیری شده است.

جدول (3) نمایانگر خصوصیات آزمون‌ها است. در این تحقیق نسبت فاصله توقف ثابت و بار انفجاری به‌عنوان متغیر اصلی در نظر گرفته‌شده است. در طراحی آزمون‌ها فاصله توقف متناسب با نیم تا یک برابر ضخامت صفحه پرنده انتخاب‌شده است. هم‌چنین سرعت ماده منفجره کمتر از سرعت انتشار صوت در فلزات مورد اتصال انتخاب‌شده است.

جدول 3- خصوصیات آزمون‌های جوشکاری انفجاری.

نمونه	فاصله توقف (mm)	ماده منفجره	سرعت انفجار (m/s)	بار انفجاری
۱	۲/۵	آماتول	۲۵۰۴	۱/۵
۲	۲/۵	آماتول	۲۵۰۴	۲
۳	۲/۵	آماتول	۲۵۰۴	۲/۵

2-3- آزمون‌های بررسی ریزساختاری

2-3-1- آزمون میکروسکوپ نوری

نمونه‌هایی با ابعاد 10× 10 میلی‌متر تهیه شدند. به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای متالوگرافی ابتدا سطح نمونه‌ها توسط کاغذ سنباده شماره 60 تا 2500 سنباده‌زنی شده است. پس از رفع خطوط و ناهمواری‌های سطحی، به‌وسیله دستگاه و توسط نمد و با استفاده از محلول اکسید آلومینیوم پولیش زده شدند. پس از پولیش سطح نمونه‌ها با الکل شسته و خشک شدند و بعد توسط محلول و بعد توسط محلول گلیسیرژیا (گلیسرین+اسید نیتریک+ اسیدکلریدریک) حکاکی شیمیایی شدند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]

2-3-2- آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی

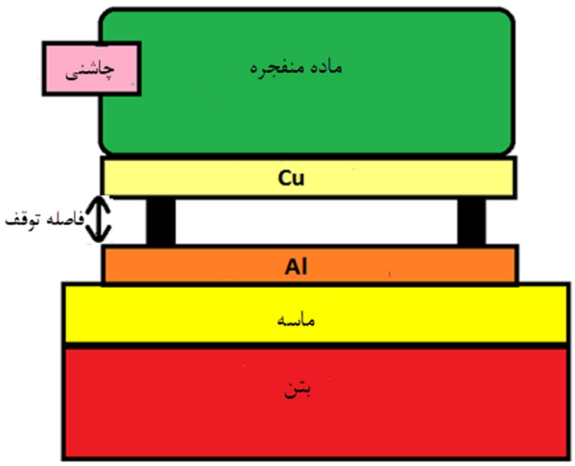
در این تحقیق از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA\\TESCAN-LMU جهت بررسی شکل لایه نفوذی و ترک‌های موجود استفاده شده است. همچنین از آنالیز EDS برای بررسی دقیق و شناسایی عناصر موجود ترکیبات و میزان آن‌ها در فصل مشترک استفاده شده است.

جدول 4- پارامترهای الکتروشیمیایی حاصل از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک حاصل از جوش در محلول% NaCl 3,5 در دمای محیط

نمونه	β_a (mV dec^{-1})	i_{corr} (μA cm^{-2})	E_{corr} (mV)	β_c (mV dec^{-1})
۱	۱۰۹	۱۱/٤٦	-۷۳۰	۲۱۰
۲	۱۰۳	۱۷/٦	-۷۵۸	۲۸۹
۳	۱٤٤	۲٦/۳	-۷۱۷	۲۲۸

2-4- آزمون الکتروشیمیایی

به‌منظور بررسی رفتار خوردگی قطعات جوش انفجاری شده در محلول3/5% NaCl از یک پیل الکتروشیمیایی سه الکترودی با ظرفیت 500 mL برای آزمایش‌ها پلاریزاسیون و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شد. از الکترود کالومل فوق اشباع (SCE) به‌عنوان الکترود مرجع و الکترود پلاتین به‌منظور الکترود کمکی استفاده شد. همه آزمایش‌ها الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه EG&G مدل M1025 ساخت کشور آمریکا و با نرم‌افزار Power suit 2.20.0 انجام شد. آزمایش‌ها پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نرخ روبش 1 mV/s از پتانسیل ابتدایی 250 mV- پایین‌تر از پتانسیل مداراز تا پتانسیل نهایی 250 mV بالاتر از پتانسیل مداراز جهت تعیین پتانسیل و جریان خوردگی انجام شد (ASTM G59-97). آزمایش طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در محدوده فرکانس 100 KHz تا 10 mHz و با دامنه 10 mV حول پتانسیل مداراز با استفاده از دستگاه EG&G مدل M1025 ساخت کشور آمریکا انجام شد. از نرم‌افزار ZSimpWin 3.22 به‌منظور تحلیل نتایج EIS استفاده شد. مدت‌زمان رسیدن به حالت پایدار 90 دقیقه است (ASTM G106).



شکل 1- نحوی تنظیم اولیه صفحات جهت انجام جوشکاری.

3- نتایج و بحث

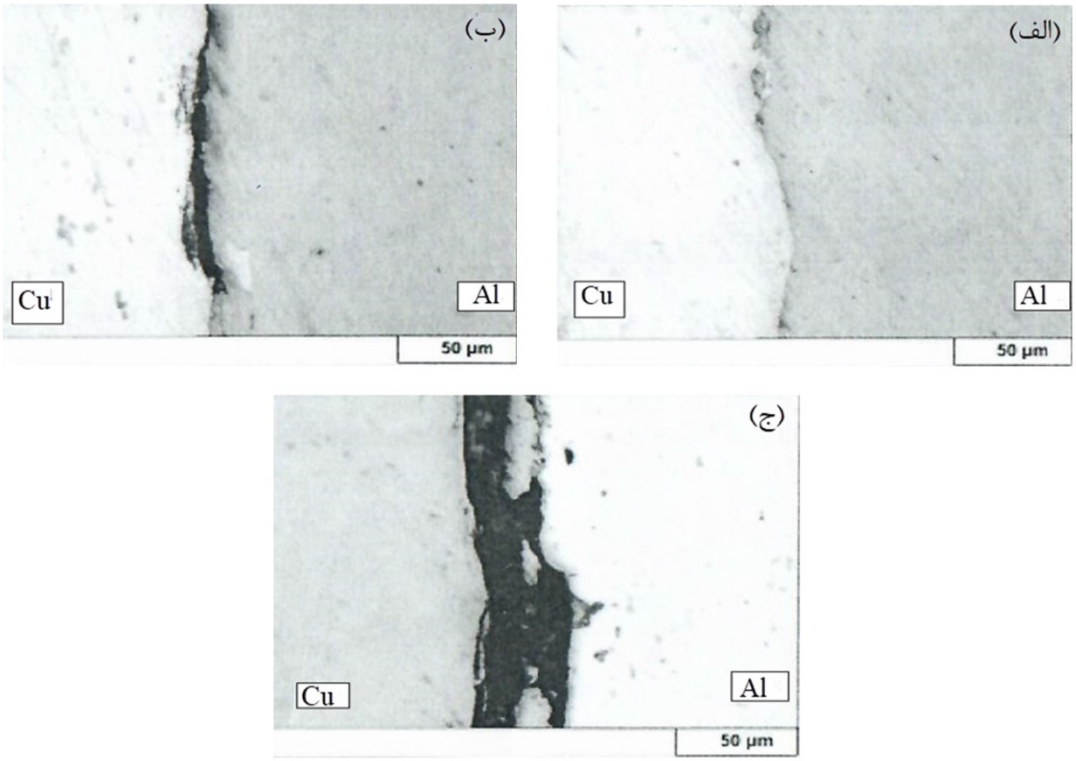
3-1- بررسی ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری

تصاویر موج‌های ایجادشده در راستای طولی اتصال در شکل(2) نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فصل مشترک اتصال در تمامی نمونه‌ها به‌صورت موجی کوتاه است. در نمونه‌ها با بار انفجاری 2 و 2/5، لایه ذوب موضعی در فصل مشترک دو فلز و به ترتیب باضخامت 9 و 41 میکرومتر دیده می‌شود.

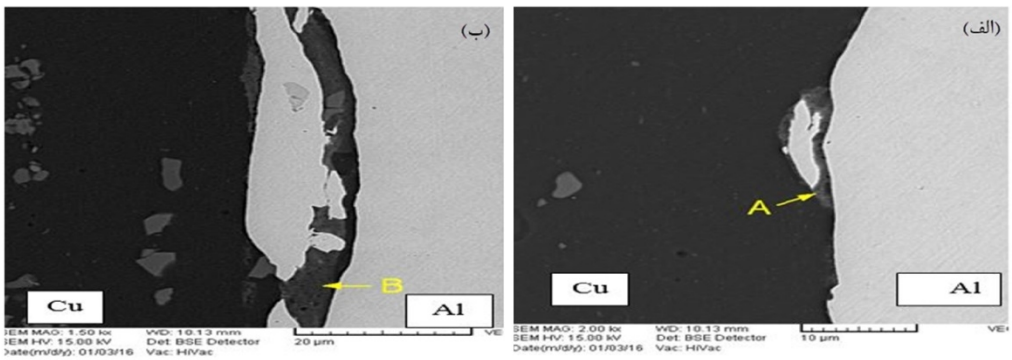
با افزایش فاصله توقف، سرعت صفحه پرنده بیشتر شده و تغییر شکل پلاستیک بیشتری در فصل مشترک اتصال اتفاق افتاده است همچنین انرژی جنبشی نیز افزایش‌یافته و ضخامت لایه ذوبی نمونه با بار انفجاری 2/5 نسبت به نمونه با بار انفجاری 1/5 بافاصله توقف 2 میلی‌متر، بیشتر شده است. قسمتی از انرژی جنبشی مصرفی در فصل مشترک به انرژی پتانسیل تبدیل‌شده و باعث می‌شود که ورق‌ها در طول سطح برخورد تغییر شکل داده، با افزایش انرژی جنبشی مصرفی، تغییر شکل پلاستیکی بیشتری در فصل مشترک ایجادشده و با این افزایش، رفتار ماده به سیالیت بیشتری میل نموده که درنهایت منجر به ایجاد موج‌هایی با طول‌موج و دامنه بیشتر در فصل مشترک شده است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]



شکل 2- تصویر میکروسکوپ نوری نمایانگرفصل مشترک اتصال: الف- نمونه اول ب- نمونه دوم ج- نمونه سوم



شکل 3- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمایانگرفصل مشترک اتصال نمونه با فاصله توقف 2/5 میلی‌متر و بار انفجاری 1/5: الف- منطقه A ب- منطقه B

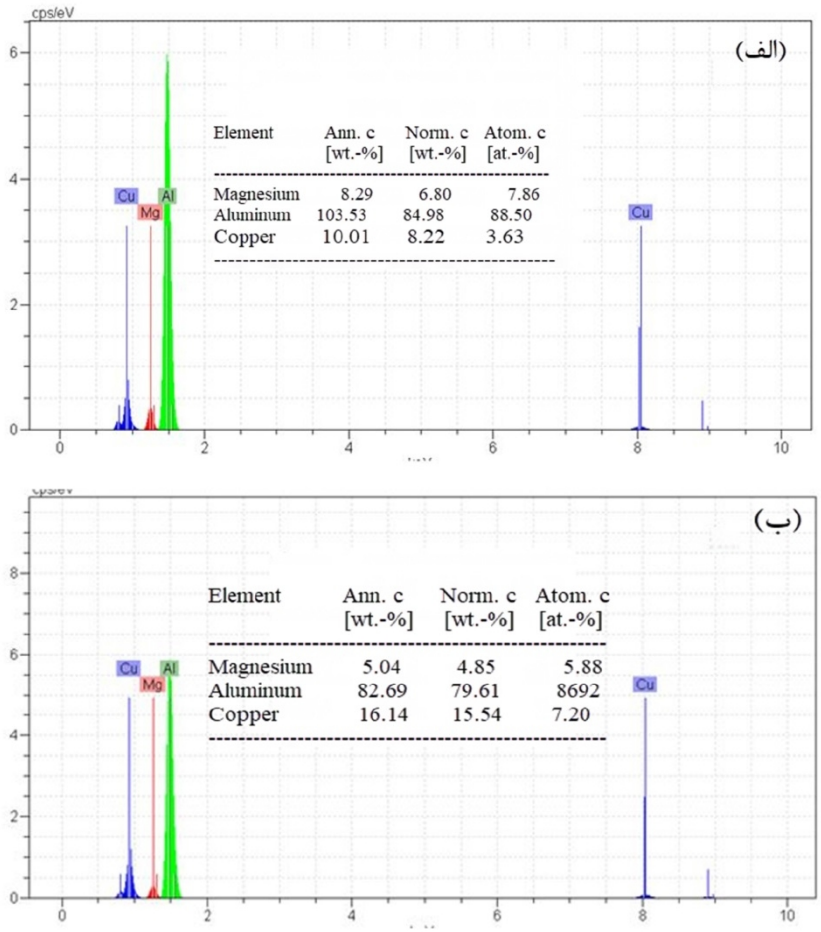
خانزاده و لوریو نیز در تحقیقات خود نشان دادند که با افزایش فاصله توقف و ضخامت بار انفجاری سرعت صفحه پرنده بیشتر شده و در اثر تغییر شکل پلاستیکی، فصل مشترک موجی‌تر می‌شود [13-14].

3-2- بررسی ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل‌های (3تا7) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک نمونه‌ها با بار انفجاری مختلف را نشان می‌دهد.

مطابق تصاویر نشان داده‌شده فصل مشترکی موجی-کوتاه در این آزمون‌ها ایجادشده است. با توجه به تصاویر ضخامت لایه ذوبی در فصل مشترک با افزایش بار انفجاری از 1/5 تا 2/5 به ترتیب از 10 تا 40 میکرومتر افزایش می‌یابد و این نشان‌دهنده این است که با افزایش بار انفجاری، ضخامت لایه ذوبی در فصل مشترک افزایش می‌یابد. در شکل‌های (4،5و7) نیز آنالیز عنصری با پرتوایکس ترکیبات موجود در فصل مشترک نشان داده‌شده است. ترکیبات ساختار بین فلزی در نمونه با بار انفجاری 1/5 شامل 86/92 درصد اتمی آلومینیوم و7/60 درصد

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]

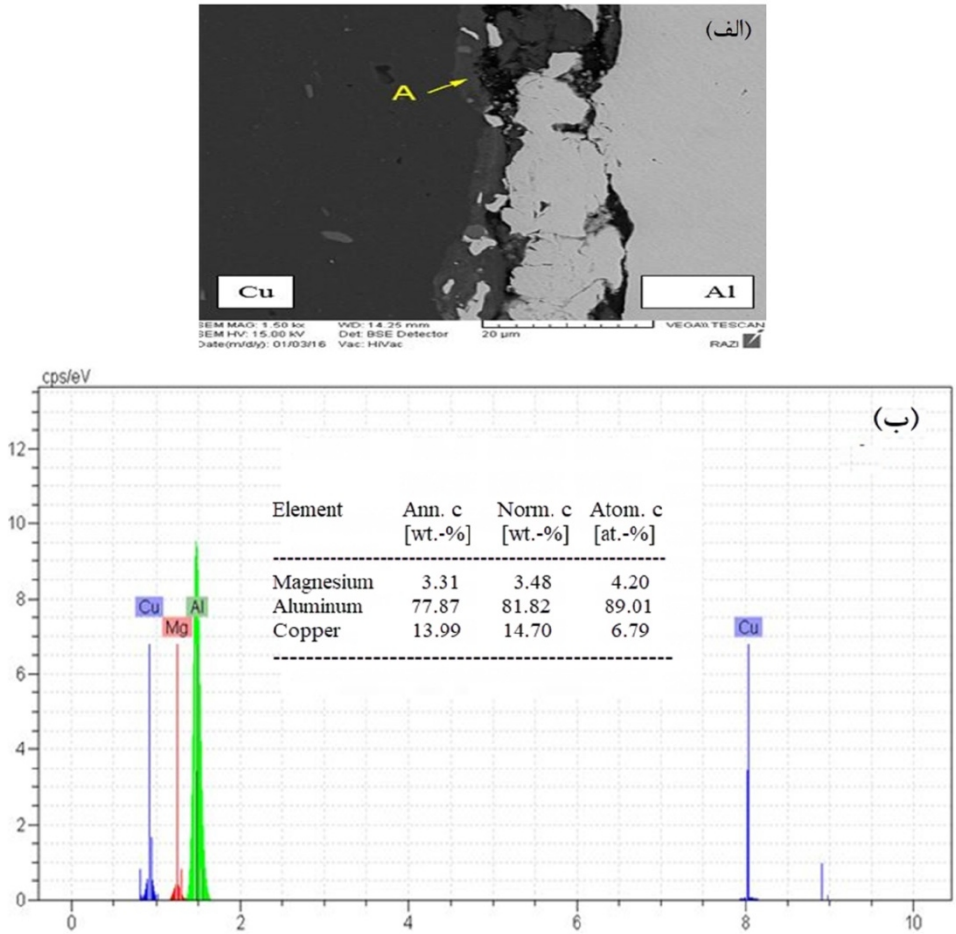


شکل 4- آنالیز EDS از ترکیبات بین فلزی مشخص‌شده نمونه در شکل 3- الف- منطقه A، ب- منطقه B.

اتمی مس، در نمونه با بار انفجاری 2 شامل 89/01 درصد اتمی آلومینیوم و 6/79 درصد اتمی مس و در نمونه با بار انفجاری 2/5 شامل 45/74 درصد اتمی آلومینیوم و 54/26 درصد اتمی مس است. نتایج این آنالیزها نمایانگر ایجاد ترکیبی در مناطق موضعی از آلیاژ، بوده است. برای ترکیبات غیر هم‌جنس بر اساس انعکاس جت از صفحه با چگالی کمتر، فشار به‌طور عمده روی صفحه با چگالی بالاتر اعمال‌شده و درنتیجه گردابه تشکیل‌شده در عقب موج بیشتر حاوی مواد صفحه واسط و گردابه تشکیل‌شده در جلوی امواج بیشتر حاوی مواد صفحه پایه است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که آنالیز این ترکیبات در مجاورت امواج مختلف با تغییر پارامترهای جوشکاری تغییر نموده و غیرهمگن‌شده که در تصاویر قابل‌مشاهده است. محققین دیگر مانند لوریو، وانگ و امینی نیز در بررسی‌های مشابه خود در جوشکاری انفجاری نشان دادند که با افزایش فاصله توقف، دما در محل برخورد بسیار افزایش یافته است و باعث نزدیک شدن دمای محل برخورد به دمای نقطه ذوب فلزات و نهایتا گردابه‌های مذاب شده است و با انجماد گردابه‌های مذاب لایه‌های بین فلزی افزایش یافته و ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی فصل مشترک اتصال نیز افزایش یافته است. تغییر در شرایط برخوردی خصوصا تغییر در زاویه دینامیکی برخورد بوده که باعث تغییر شرایط فصل مشترک و شکل آن شده است [14-16].

در اثر برخورد صفحه پرنده، انرژی جنبشی مصرفی به انرژی پتانسیل تبدیل‌شده و منجر به تغییر شکل سطوح برخوردی شده است. اگر مقدار تغییر شکل پلاستیک کافی نباشد، موج‌های کوتاه ایجادشده و منطقه ذوب موضعی پدیدار نمی‌شود. با

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]

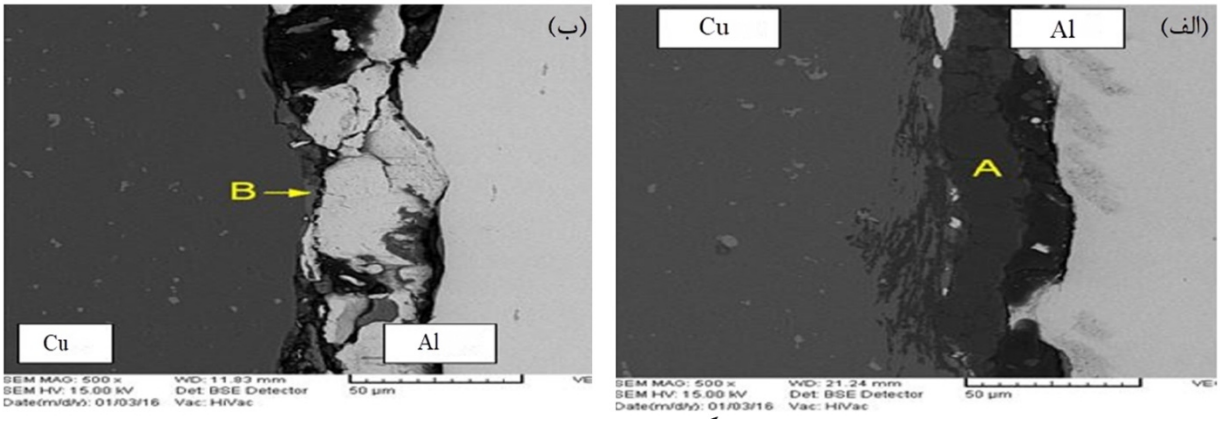


شکل 5- الف- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمایانگر فصل مشترک اتصال نمونه با فاصله توقف 2/5 میلی‌متر و بار

افزایش انرژی جنبشی برخوردی تغییر شکل شدید در زیر و تاج موج ایجادشده و درنتیجه فشارهای برخوردی بالا، گردابه‌ها در فصل مشترک اتصال ایجادشده و این گردابه‌ها ممکن است در برخی مناطق فصل مشترک ایجاد مناطق ذوب موضعی نماید. بر اساس گفته تامهانکار و همکارانش حرارت داخلی ایجادشده بر اساس فشار بالای ناشی از امواج شوکی انفجار و تغییر شکل پلاستیکی شدید و ایجاد گرمای بی‌دررو در اثر گیر افتادن گردابه در جلوی جبهه برخی امواج در اثر استحاله انرژی جنبشی به انرژی حرارتی در طول برخورد و یا حرارت آدیاباتیک ناشی از گازهای محبوس مابین صفحات ایجادشده است[17]. این مناطق موضعی با فلز سرد اطراف احاطه‌شده و تحت سرعت سرد شدن بالایی در حد 10^5-10^7k/s قرار دارند. ازآنجایی‌که به دلیل تفاوت در چگالی و سرعت اشاعه موج در دو فلز، شکل امواج دارای تقارن کامل نیستند و همچنین ضریب هدایت حرارتی آلومینیوم کمتر از ضریب هدایت حرارتی مس است، در هنگام سرد شدن، این ترکیبات در یک سمت امواج متمرکز و به جهت انتقال حرارت بیشتر در سمت مس مشاهده‌شده‌اند. آنالیز توزیع انرژی پرتوایکس نیز برای نمونه از داخل منطقه نشان داده‌شده، صورت پذیرفت. نتایج این آنالیزها نمایانگر ایجاد ترکیبی در مناطق موضعی از آلیاژ، بوده است. برای ترکیبات غیرهم‌جنس بر اساس انعکاس جت از صفحه با چگالی کمتر، فشار به‌طور عمده روی صفحه با چگالی بالاتر اعمال‌شده و درنتیجه گردابه تشکیل‌شده در عقب موج بیشتر حاوی مواد صفحه واسط و گردابه تشکیل‌شده در جلوی امواج بیشتر حاوی مواد صفحه پایه است. با افزایش میزان بار انفجاری از 1/5 تا 2/5 مشاهده می‌شود که تغییرات در میزان غلظت مس و آلومینیوم به‌شدت افزایش می‌یابد و همچنین ضخامت لایه ذوب موضعی نیز افزایش می‌یابد.

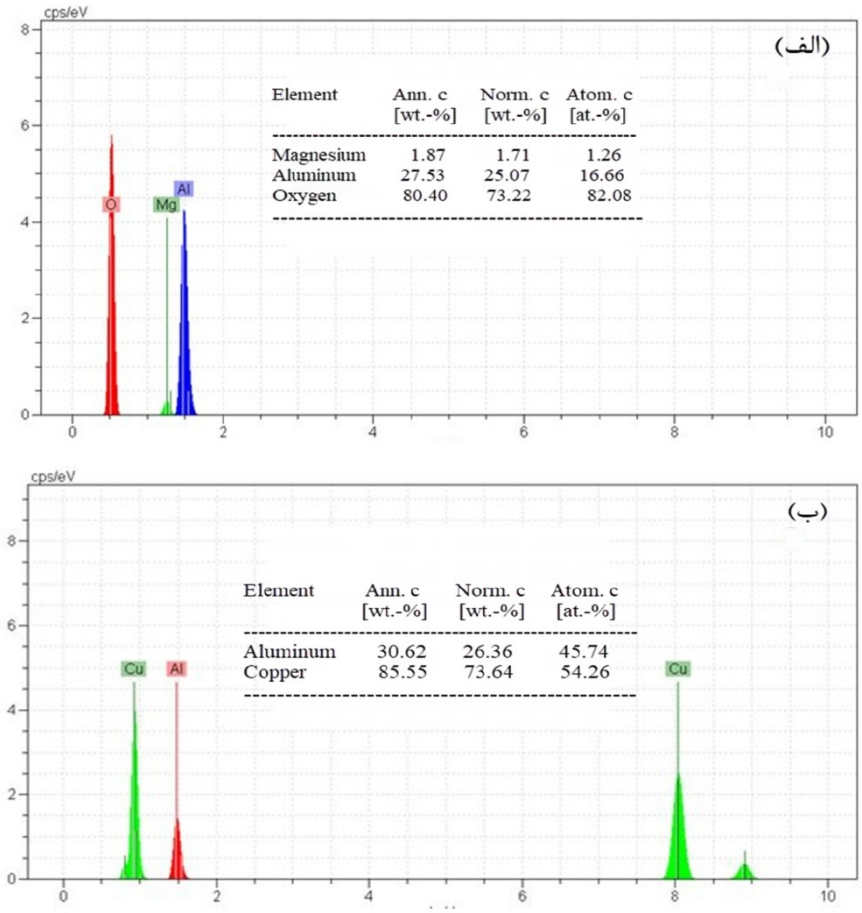
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]



شکل 6- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمایانگر فصل مشترک اتصال نمونه، فاصله توقف 2/5 میلی‌متر و بار انفجاری 2/5:

الف- منطقه A ب- منطقه B



شکل 7- آنالیز EDS از ترکیبات بین فلزی مشخص‌شده نمونه در شکل 6- الف- منطقه A ب- منطقه B

لوریو و امینی نیز در تحقیقات مشابه جوشکاری انفجاری مس و آلومینیوم نیز به نتایج مشابه دست یافتند [14و16].

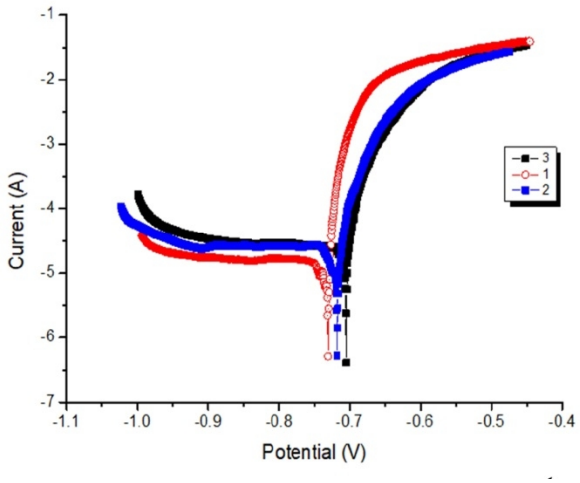
3-3- آزمون خوردگی الکتروشیمیایی

3-3-1- آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

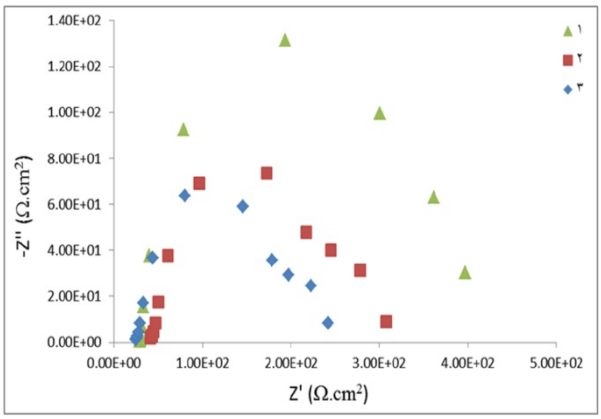
رفتار پلاریزاسیون الکترو شیمیایی اتصال آلومینیوم – مس در محلول آب دریا در شکل (8) نشان داده‌شده است. مقادیر پتانسیل خوردگی (E_{corr}) که از روی نمودار و چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) که با استفاده از روش برون‌یابی تافل محاسبه‌شده است، در جدول (4) گزارش‌شده است. نتایج نشان داده که با افزایش بار انفجاری چگالی جریان خوردگی از 11/46 به 26/3 میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع افزایش‌یافته است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

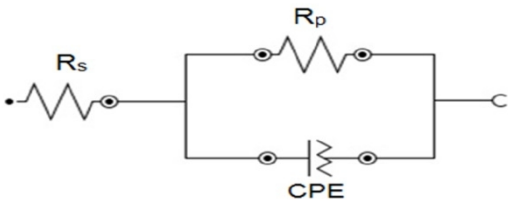
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]



شکل 8- مقایسه نمودار پلاریزاسیون تافل نمونه‌های اتصال و فلزات پایه



شکل 9- منحنی‌های نایکوئیست نمونه‌های حاصل از جوش انفجاری



شکل 10- دیاگرام مدار معادل الکتریکی استفاده شده برای مدل‌سازی رفتار فصل مشترک فلز/محلول

سرعت حرکت صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد با افزایش فاصله توقف افزایش‌یافته و درنتیجه انرژی جنبشی برخوردی نیز افزایش‌یافته است. افزایش انرژی این نمونه باعث افزایش سرعت خوردگی شده است.محققان دیگر مانند مودالی، کهرمان و نوربخش نیز در بررسی خوردگی اتصالات انفجاری فلزات غیرهم‌جنس نشان دادند که سرعت حرکت صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری افزایش یافته و در نتیجه انرژی جنبشی برخوردی افزایش می‌یابد. فاصله توقف و بار انفجاری بیشتر نمایانگر افزایش میزان انرژی جنبشی برخوردی انتقال یافته به فصل مشترک است و افزایش انرژی باعث افزایش سرعت خوردگی شده است [18-20].

3-3-2- آزمون طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی

طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) به‌منظور بررسی لایه سطحی ایجادشده توسط نمونه‌ها در محیط خورنده به کار گرفته شد. نمودارهای نایکوئیست مربوط به نمونه‌های جوشکاری انفجاری شده در شکل (9) نشان داده‌شده است. داده‌های EIS با استفاده از مدار معادل ارائه‌شده در شکل(10) که به‌طور مطلوبی با نتایج تجربی تطابق داشت حاصل‌شده و در جدول (5) مشاهده می‌شوند.

جدول 5- داده‌های EIS حاصل‌شده از جوش انفجاری در محلول3,5% NaCl در دمای محیط.

نمونه	C_{dl} ($\mu F\ cm^{-}$	R_p ($\Omega\ cm^2$)	R_s (Ω)	n
۱	۵۳/۷۱	۴۰۰/۳	۵/۰۱	۰/۸۸
۲	۴۲/۲۱	۳۰۴/۴	۶/۷۶	۰/۸۳
۳	۴۴/۰۵	۲۵۷/۶	۵/۸۲	۰/۸۰

n در جدول (5) نشان‌دهنده همگنی سطح است، هرچقدر سطح همگن‌تر باشد این عدد به یک نزدیک‌تر است و هرچقدر این عدد بزرگ‌تر باشد انتظارمی رود جریان خوردگی کمتر باشد. با توجه به شکل‌های (3) تا (7) مشاهده می‌شود نمونه با بار انفجاری 1/5 ضخامت لایه ذوبی کمتری نسبت به دیگر نمونه‌ها داشته، در نتیجه در جدول (5) مدار مقدار n آن بیشتر است. با افزایش بار انفجاری، سرعت برخورد بالاتر، انرژی جنبشی بالای فصل مشترک و کار سختی شدیدتر شده و درنتیجه نمونه با بار انفجاری بیشتر دارای مقاومت به خوردگی کمتری بوده که

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]

در نمودار شکل پلاریزاسیون و جدول (4) این موضوع در تطابق با شکل (9) و جدول (5) است. با توجه به تصاویر میکروسکوپ نوری، با افزایش بار انفجاری ضخامت لایه ذوب موضعی به‌تدریج افزایش می‌یابد و همچنین با توجه به نتایج آنالیز عنصری، با افزایش میزان بار انفجاری میزان تغییر در ترکیب شیمیایی لایه ذوب موضعی با زمینه افزایش می‌یابد که منجر به افزایش پتانسیل خوردگی گالوانیک می‌شود که درنتیجه مقاومت به پلاریزاسیون فلز را کاهش می‌دهد [21].

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی رفتار خوردگی و تغییرات ریزساختاری دولایه ورق‌های آلومینیوم 5000- مس با فرایند جوشکاری انفجاری با بار انفجاری مختلف انجام و نتایج زیر حاصل شد:

- نتایج نشان داده که فصل مشترک تمامی نمونه‌ها به شکل موجی کوتاه است. با افزایش بار انفجاری ضخامت لایه ذوبی در فصل مشترک افزایش می‌یابد.

- در بررسی‌های انجام‌گرفته توسط منحنی‌های پلاریزاسیون تافل در نمونه‌های جوش شده، کمترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه با بار انفجاری 1/5 و بیشترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه با بار انفجاری 2/5 است، دلیل این امر آن است که در نمونه با بار انفجاری 2/5، با افزایش بار انفجاری درنتیجه انرژی جنبشی برخوردی نیز افزایش‌یافته و تغییر شکل پلاستیکی شدیدی در فصل مشترک اتصال ایجادشده است. این موضوع باعث شده که مقاومت خوردگی نمونه با بار انفجاری 2/5 کمتر از نمونه با بار انفجاری 1/5 باشد.

- نتایج آزمون امپدانس در نمونه‌های جوش شده نشان داده با افزایش ضخامت لایه ذوبی در فصل مشترک و افزایش تغییر شکل پلاستیک مقدار n کاهش‌یافته و نمونه با بار انفجاری 2/5 بیشترین میزان خوردگی را داشته است.

منابع

1-B. Crossland, "Explosive Welding of Metals and Its Applications", 1982.

2- M. Benak, M. Turna, M. Ozvold, P. Nesvadba, J. Lokaj, L. Caplovic, F. Kovac, V. Stoyka, "Study of Al-austenitic steel boundary formed by explosion welding", Roznov pod Radhostem Czech Republic, EU, Vol. 18, 2010.

3- M. Honarpisheh, M. Asemabadi, M. Sedighi, "Investigation of annealing treatment on the interfacial propertice of explosive weldedAl/Cu/Al multilayer method", Materials and Design, Vol. 37, pp. 122-127, 2012.

4- M. Honarpisheh, M. Asemabadi, M. Sedighi, "Investigation of cold rolling influence on the mechanical properties of explosive-welded Al/Cu bimetal", Materials science and Engineering A, Vol. 37, pp. 144-149, 2012.

5- B. Gulenc, "Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method", Materials and Design, Vol. 29, pp. 275-278, 2008.

6- A. Tajyar, A. Masoumi, "Investigation of mechanical properties of bimetallic square tubes produced by shape rolling of Al/Cu circular pipes", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 30, pp. 4299-4306, 2016.

7- M. R. Khanzadeh, S. J. Mohammadi Baygi, S. R. Kiahoseyni, H. bakhtiyari, M. Allahdadi. "Effects of heat treatment on the microstructure and metallurgical properties of the explosively boned 304 stainless steel-Ck45 steel", International Journal of Damage Mechanics, pp. 275-278, 2016.

8- N. Kengkla, N. Tareelap, Proc Conf 1stMae Fah Luang University, 2012.

9-U. Kamachi Mudali, B. M. Ananda Rao, K. Shanmugam, R. Natarajan, B. Raj, "Corrosion and microstructural aspects of dissimilar joints of titanium and type 304L stainless steel", Journal of Nuclear Materials, Vol. 321, pp. 40–48, 2003.

10- M. Acarer, "Electrical, Corrosion, and Mechanical Properties of Aluminum-Copper Joints Produced by Explosive Welding", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 21, pp. 2375-2379, 2012.

11-N. Kahramana, B. Gulenc, "Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 169, pp. 127–133, 2005.

12-G. Sui, J. Li, H. Li, F. Sun, T. Zhang, H. Fu. "Investigation on the explosive welding mechanism of corrosion-resisting aluminum and stainless steel tubes through finite element simulation and experiments", International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, Vol. 19, pp. 151-158, 2012.

13- M. R. K. G. Shiran, H. Bakhtiari, S. A. A. Mousavi, G. Khalaj, S. M. Mirhashemi, "effect of stand-off distance on the mechanical and metallurgical properties of explosively bonded 321 austenitic stainless steel-1230 aluminum alloy tubes", Materials Research, Vol. 20, pp. 291-302, 2017.

14- A. Loureiro, R. Mendes, J. B. Ribeiro, R. M. Leal, "Effect of explosive ratio on explosive welding quality of copper to aluminium", Ciência Tecnologia dos Materiais, Vol. 29, pp. 46–50, 2017.

15- H. Wang, Y. Wang**,** "High-velocity impact welding process: A Review"**,** Metals, Vol. 144, pp. 2-18, 2019.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]

16-H. Amani, M. Soltanieh, "Intermetallic phase formation in explosively welded Al/Cu bimetals", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 47, pp. 2524–2534, 2016.
17-M.Acarer, B. Demir, "An investigation of mechanical and metallurgical properties of explosive welded aluminum–dual phase steel", Materials Letter, Vol. 62, pp. 4158-4160, 2008.
18- U. K. Mudali, B. M. A. Rao, K. Shanmugam, R. Natarajan, "Corrosion and microstructural aspects of dissimilar joints of titanium and type 304L stainless steel", Journal of Nuclear Materials, Vol. 321, pp. 40–48, 2003.
19- B. Kahramana, G¨ulenc, "Corrosion and mechanical-microstructural aspects of dissimilar joints of Ti–6Al–4V and Al plates", International Journal of Impact Engineering 34, pp.1423–1432, 2007.
20- A. Norbakhsh , M. R. Khanzadeh GharahShiran, A. Saadat, H. Bakhtiari, " Investigating the effect of explosive welding variables on the corrosion behavior of explosive joint of two-layered inconel 718-AISI H13 hot work to steel plates in salty environment", Journal of Environmental Friendly Materials, Vol. 2, pp. 21-27, 2018.
21- M. Meyers, V. F. Nesternko, "Shear localization in dynamic deformation of materials: micro structural evolution and self-organization", Materials Science and Engineering A, Vol. 317, pp. 204–225, 2001.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.4.7]