

بررسی تأثیر فاصله توقف بر رفتار خوردگی اتصال انفجاری ورق‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ - فولاد کربنی CK ۴۵ در محیط دریایی

محمدرضا خانزاده قره شیران^{۱*}، حمید ناظمی^۱، سجاد سالاری^۲

^۱ استادیار، مرکز تحقیقات مهندسی پیشرفته، واحد شهرمجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

^۲ کارشناس ارشد مهندسی مواد-خوردگی، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران.

* نویسنده مسئول: m.khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۰۶

چکیده

در این تحقیق، بررسی رفتار خوردگی اتصال انفجاری ورق‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ - فولاد کربنی CK ۴۵ صورت گرفته است. جوشکاری انفجاری با بار انفجاری ثابت و در دو فاصله توقف ۴ و ۵ میلی متر انجام شده است. نتایج نمایانگر موجی - گردابه‌ای شدن فصل مشترک و تشکیل ترکیبات ذوب موضعی در اثر افزایش میزان فاصله توقف بوده است. نتایج نشان داده با نزدیک شدن به فصل مشترک اتصال در اثر سخت شدن شوکی ناشی از امواج انفجار سختی در هر دو نمونه افزایش یافته که این میزان در نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر بیشتر بوده است. نتایج آزمون‌های پلاریزاسیون و امپدانس نشان داده، بیشترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه با فاصله توقف بیشتر بوده است. تشکیل مناطق ذوب موضعی منجمد شده و افزایش انرژی جنبشی بر خورد در نمونه با فاصله توقف بیشتر باعث افزایش سرعت خوردگی شده است.

کلمات کلیدی: جوشکاری انفجاری، فاصله توقف، مناطق ذوب موضعی، انرژی جنبشی ناشی از برخورد؛

Investigation on effect of standoff distance on corrosion behavior of explosively bonded 304 stainless steel- CK45 Carbon steel plates in sea environment

M.R. Khanzadeh GharahShiran^{1*}, H. Nazemi¹, S. Salary²

¹ Center for Advanced Engineering Research, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

² Department of Material Engineering, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran.

* Corresponding Author: m.khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir

Submission: 2016, 05, 18 Acceptance: 2016, 08, 27

Abstract:

In this research, corrosion behavior of explosively bonded 304 stainless steel-Ck45 carbon steel plates was investigated. Explosive welding carried out in constant explosive ratio with 4 and 5 mm standoff distances. The results showed that by standoff distance increasing, the shape of interface transited to the wavy vortex type, and locally melted zones formed. Due to shock hardening, the hardness increased in near of the interfaces, and maximum hardness was related to the sample with 5 mm standoff distance. Polarization and impedance tests results showed that maximum corrosion rate was related to the sample with maximum standoff distance. Due to the formation of locally melted zones and increasing in impact kinetic energy in the sample with maximum standoff distance, corrosion rate was increased.

Keywords: Explosive welding, standoff distance, locally melted zone, Impact Kinetic Energy;

۱- مقدمه

جوشکاری انفجاری روشی است که در آن از انرژی کنترل شده یک ماده منفجره استفاده می‌شود تا سطوح جوش شونده که نسبت به هم در فاصله توقف معینی قرار گرفته‌اند 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 اشتراک گذاری الکترونها یک باند با پیوند متالورژیکی بین اجزا جوش شونده ایجاد می‌شود. در اثر فشار برخوردی بالا یک جفت با سرعت بالا از دو سطح اتصال تشکیل می‌شود، که موجب ایجاد سطوح اتصالی تمیز در فصل مشترک جوشکاری و حذف آلودگی‌های سطحی می‌شود. تشکیل این جفت از شرایط اساسی ایجاد پیوند مناسب در جوشکاری انفجاری است [۱ و ۲]. این فرآیند جوشکاری با اهمیت غیرذوبی بوده و از کاربردهای صنعتی آن می‌توان به اتصال‌دهی و روکش‌دهی فلزات هم‌جنس و غیرجنس متنوع به صورت دو یا چند لایه اشاره نمود. به دلیل عدم حرارت‌دهی در طول این فرآیند، جوش‌های انجام شده با این روش بسیاری از خصوصیات منفی قطعات اتصال یافته با فرایندهای جوشکاری ذوبی، نورد گرم یا آهنگری گرم شده را دارا نمی‌باشند.

تحقیقات بسیار محدودی در زمینه خوردگی اتصالات انفجاری انجام شده که به برخی از آنها اشاره می‌شود:

کتنگالا و تارلپ [۳] تأثیر ترکیبات بین فلزی بر رفتار خوردگی اتصالات سه لایه انفجاری آلومینیوم/فولاد در صنایع نظامی را مورد بررسی قرار داده‌اند. 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 آنودی نسبت به فولاد شده است. در نتیجه حمله خوردگی ترجیحی در نزدیک مرز آلومینیوم و ترکیبات بین فلزی رخ داده است. مودالی و همکاران [۴]، خوردگی اتصال انفجاری تیتانیم، فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ را بررسی نمود ه‌اند. نتایج آنها نشان داده که استجکام خمشی اتصال در محیط اسید نیتریک در حد استاندارد بوده و حمله خوردگی بیشتر در فصل مشترک اتصال متمرکز بوده است. اکاریر [۵] خوردگی اتصال انفجاری آلومینیوم به مس را بررسی نموده است. نتایج نشان داده که خوردگی گالوانیک در اتصال رخ داده و سمت آلومینیومی اتصال حالت آنودی بیشتری براساس الکترونگاتیو بالا داشته و نسبت به سمت مسی بیشتر خورده شده است.

کهرمان و همکاران [۶]، 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 بدلیل تغییر شکل پلاستیکی شدیدتر و تشکیل لایه اکسیدی بر روی سطح افزایش یافته است. آنها همچنین [۷]، خوردگی اتصال انفجاری

صفحات Ti-6Al-4V و آلومینیوم را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آزمون خوردگی نشان داده نرخ کاهش وزن مواد در ابتدای آزمون‌های خوردگی بالا بوده و سپس کاهش یافته است. همچنین افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک در اثر افزایش میزان بار انفجاری، باعث افزایش کاهش وزن نمونه‌ها در آزمون خوردگی شده است. کرازلی و همکاران رفتار خوردگی اتصال انفجاری سه لایه ورق‌های 5083-Al-1050 فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را در محیط اسید نیتریک غلیظ در حضور ممانعت کننده و بدون حضور ممانعت کننده بررسی نمودند. نتایج نشان داده تخریب شدید آلومینیوم و ترکیبات بین فلزی فصل مشترک بدون حضور ممانعت کننده صورت گرفته و با افزودن ممانعت کننده از شدت تخریب کاسته شده است [۸]. زارعی و همکاران [۹] مقایسه رفتار خوردگی اتصال ذوبی و انفجاری اینکونل ۶۲۵ و فولاد ساده کربنی را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داده در جوشکاری ذوبی مقاومت به خوردگی اتصال غیر یکنواخت‌تر 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 یک لایه پسیو پایدار شده است. اتصالات غیر همجنس بین فولادهای زنگ نزن آستینیتی و فولادهای کربنی به شکل گسترده‌ای در سیستم‌های انتقال انرژی بامای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، اتصالات غیر همجنس در خطوط لوله بخار، راکتورهای هسته‌ای و صنایع پتروشیمی به شکل وسیعی کاربرد دارند. در این مطالعه اتصال غیر همجنس بین فولاد کربنی CK ۴۵ و فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۰۴ به روش جوشکاری انفجاری با تغییر میزان فاصله توقف انجام گرفته و ریز ساختار، تغییرات سختی در فصل مشترک مورد بررسی قرار گرفته است. خواص خوردگی، در ناحیه اتصال در محلول ۳/۵٪ NaCl مورد بررسی قرار گرفته و ارتباط مابین ریز ساختار و سختی فصل مشترک با خواص خوردگی مورد تحلیل واقع شده است.

۲- روش آزمون

در این تحقیق از ورق‌های فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با ابعاد ۲۶۰×۲۶۰ میلیمتر، ضخامت ۵ میلیمتر و فولاد CK ۴۵ با ابعاد ۲۳۰×۲۳۰ میلیمتر و ضخامت ۷ میلیمتر استفاده شده است، ترکیب شیمیایی آلیاژها به روش اسپکترومتری نشری توسط دستگاه WAS آنالیز شده است. در جدول ۱ و ۲ ترکیب شیمیایی آنها نشان داده شده است.

در این مطالعه اتصال غیر همجنس بین فولاد کربنی CK ۴۵ و فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۰۴ به روش جوشکاری انفجاری انجام گرفته است. شکل ۱ نحوه تنظیم اولیه صفحات جهت انجام جوشکاری انفجاری را نشان داده است. صفحات پرنده و پایه به ترتیب در ابعاد ۲۶۰×۲۶۰ میلیمتر و ۲۳۰×۲۳۰ میلیمتر طراحی شده و ماده منفجره از

فاصله دهنده‌های مسی با ابعاد مناسب ایجاد شده است. سرعت مواد انفجاری توسط سرعت سنج با سیستم فیبر نوری اندازه گیری شده است. کلیه آزمون‌ها در محیطی باز و خارج از منطقه مسکونی و در داخل میدان انهدام مخصوص و با حضور کارشناسان مجرب در زمینه مواد منفجره و آشنا با نحوه چاشنی گذاری و کارشناسان ایمنی انجام شده است. کل مجموعه جهت انجام آزمون انفجاری بر روی بستری از شن نرم به عنوان سندان قرار گرفت. تحریک انفجاری توسط چاشنی مناسب صورت پذیرفت.

ابعاد ورق پرنده در مقایسه با ورق پایه در حدود ۳۰ mm بزرگ‌تر در نظر گرفته شده تا حین جوشکاری انفجار به حالت پایدار خود رسیده تا لبه‌های پایین و بالایی ورق‌ها به یکدیگر کاملاً اتصال یابند.

نوع آماتول ۱۰-۹۰ با ترکیب تری نیترو تولوئن ۱۰ درصد و نیترات آمونیم ۹۰ درصد با سرعت ۲۵۰۴ متر بر ثانیه بوده است. چگالی مواد مورد استفاده ۰/۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب با دانه بندی ۲۰۰ 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 تمیز کاری قرار گرفتند.

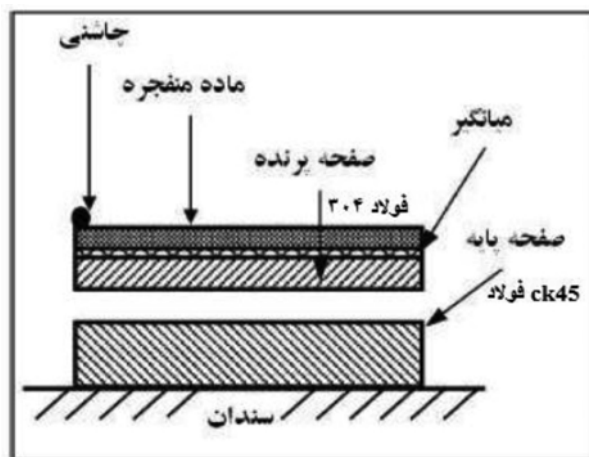
در فرایند جوشکاری دو فاصله توقف مختلف در نظر گرفته شده که این فواصل به ترتیب ۴ و ۵ میلی متر بوده است. دو ورق به صورت کاملاً موازی و هم محور نسبت به یکدیگر تحت فواصل توقف قرار داده شده‌اند، ورق فولاد ۳۰۴ بالا به عنوان صفحه پرنده و ورق فولاد CK۴۵ به عنوان صفحه پایه و فاصله توقف مابین ورق‌ها نیز به کمک

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد کربنی CK ۴۵ (بر حسب درصد وزنی)

% Ni	% Mo	% Cr	% S	% P	% Mn	% Si	% C
۰/۲۱	۰/۰۵	۰/۲۳	۰/۰۲۸	۰/۰۳۱	۰/۷۲	۰/۴۲	۰/۴۶

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI SS ۳۰۴L (بر حسب درصد وزنی)

% Ni	% Mo	% Cr	% S	% P	% Mn	% Si	% C
۷/۸۷	۰/۳۲	۱۸/۷۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۱/۰۱	۰/۵۶	۰/۰۲



شکل ۱- نحوی تنظیم اولیه صفحات جهت انجام جوشکاری انفجاری.

کد نمونه آزمون	فاصله توقف (mm)	ماده منفجره	سرعت انفجار (m/s)	بار انفجاری	ضخامت ماده انفجاری (mm)
AS1	۴	آماتول	۲۵۰۴	۲	۹۱
AS2	۵	آماتول	۲۵۰۴	۲	۹۱

جدول ۴ - مساحت سطوح نمونه‌ها.

مساحت (cm ²)	نمونه	منطقه
۰/۷	Ck45	فلز پایه
۰/۵	فولاد ۳۰۴	فلز پایه
۱	AS1	فصل مشترک اتصال
۱	AS2	فصل مشترک اتصال

پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک به منظور ارزیابی رفتار الکتروشیمیایی بر روی نمونه‌های انجام شده است. نمونه‌ها بعد از ۱۰۰۰ ساعت غوطه وری در غلظت ۳۵ گرم NaCl با الکتروود مرجع کالومل اشباع در محلول ۱۰۰۰ میلی لیتر آب مقطر با ۳۵ گرم NaCl pH برابر ۶/۸ انجام گرفته است. آزمون در محدوده ولتاژ -۱ تا ۱ نسبت به ocp با سرعت اسکن ۱ mv/s و در دمای اتاق روی تمام نمونه‌ها انجام گرفته است. نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در محلول غوطه ور شدند. تا مقادیر پایداری حاصل شود. در این تحقیق از میکروسکوپ الکترونی روبشی و مجهز به سیستم آنالیز EDS مدل VEGA\TESCAN-LMU جهت بررسی ترکیبات فصل مشترک اتصال با بزرگنمایی‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریز ساختار نمونه‌ها

۳-۱-۱- بررسی نمونه‌های AS1 و AS2

تصاویر موجهای ایجاد شده در راستای طولی اتصال در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود فصل مشترک اتصال در نمونه AS1 به صورت موجی کوتاه است. فصل مشترک اتصال در نمونه AS2 به صورت موجی گردابه ای است.

با افزایش فاصله توقف سرعت صفحه پرند بیشتر شده و تغییر شکل پلاستیک بیشتری در فصل مشترک اتصال اتفاق افتاده است همچنین انرژی جنبشی نیز افزایش یافته و شکل فصل مشترک نمونه AS2 نسبت به نمونه AS1 با فاصله توقف چهار میلیمتر، موجی تر شده است. قسمتی از انرژی جنبشی مصرفی در فصل مشترک به انرژی پتانسیل تبدیل شده و باعث شده که ورق‌ها در طول سطح برخورد تغییر شکل داده، با افزایش انرژی جنبشی مصرفی، تغییر شکل

جدول ۳ نمایانگر خصوصیات آزمون‌ها است. در این تحقیق نسبت بار انفجاری ثابت و فاصله توقف به عنوان متغیر اصلی در نظر گرفته شده است. در طراحی آزمون‌ها فاصله توقف متناسب با نیم تا یک برابر ضخامت صفحه پرند انتخاب شده است. هم چنین سرعت ماده منفجره کمتر از سرعت انتشار صوت در فلزات مورد اتصال انتخاب شده است. میزان بار انفجاری و ضخامت ماده منفجره در حدی که انرژی لازم برای تغییر شکل پلاستیک حین برخورد تأمین شود طراحی شده است.

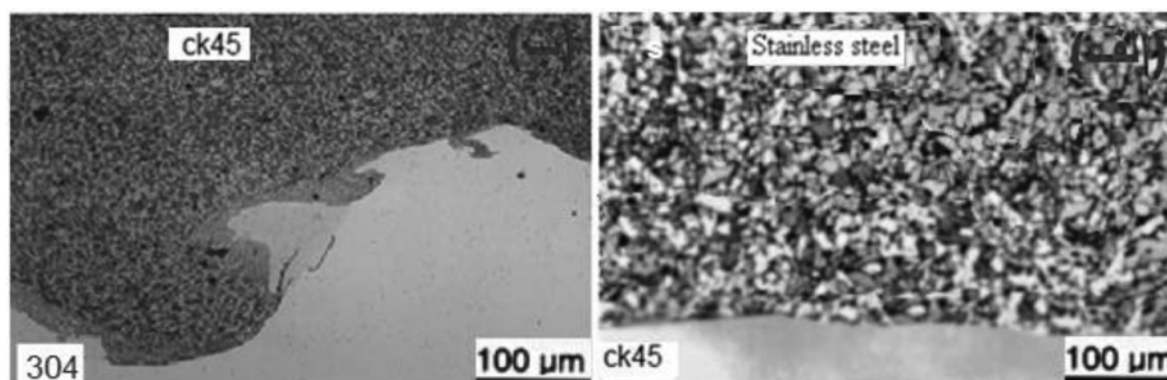
پس از جوشکاری نمونه‌هایی با ابعاد ۱۰ × ۱۰ میلیمتر تهیه شدند. در ابتدا نمونه‌ها کوچک جهت مانت با دستگاه وایر کات بریده شدند. نمونه‌ها در جهت عمود بر محور اتصال و سطح جوشکاری شده بریده و سپس مانت سرد شدند. به منظور آماده سازی نمونه‌ها برای متالوگرافی ابتدا سطح نمونه‌ها توسط کاغذ سنباده شماره ۶۰ تا ۲۵۰۰ سنباده زنی شده است. پس از رفع خطوط و ناهمواریهای سطحی، بوسیله 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 گلیسرژیا (گلیسرین + اسید نیتریک + اسید کلریدریک) حکاکی شیمیایی شدند. ریز ساختار فصل مشترک و ترکیبات بین فلزی توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus در بزرگنمایی‌های مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در این تحقیق آزمون ریز سختی بر حسب ویکرز توسط دستگاه مدل koopa انجام گرفته است نیروی اعمالی ۲۰۰ gr در مدت ۲۰ ثانیه اعمال شده است، برای هر نمونه ۹ اثر ریزسختی از مناطق مختلف جوش و فلز پایه انتخاب شده است. این آزمون برای نمونه‌های با فاصله توقف مختلف با استاندارد مرجع ASTM E384-11 در دمای آزمایشگاهی صورت پذیرفت.

آزمون‌های الکتروشیمیایی در این مطالعه با رسم منحنی‌های نایکوئیست حاصل از آزمون EIS صورت پذیرفته است. کلیه آزمون‌ها با دستگاه پتانسیواستات مدل AUTOLAB-AUT8 انجام شده است. آزمون‌ها پس از رسیدن نمونه‌ها به حالت پایا (تغییرات کمتر از ۵ mv در هر ۵ دقیقه) در محلول ۳/۵٪ NaCl انجام شده است. برای انجام آزمایش از سل سه الکترودی استفاده شده که از الکتروود اشباع کالومل SCE به عنوان الکتروود مرجع و از الکتروود پلاتین هم به عنوان الکتروود کمکی استفاده شده است. جهت انجام آزمون طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی محدوده فرکانس از ۱۰۰ KHz تا ۱۰ mHz انتخاب شده است. جدول ۴ مساحت سطوح را نشان داده شده است.

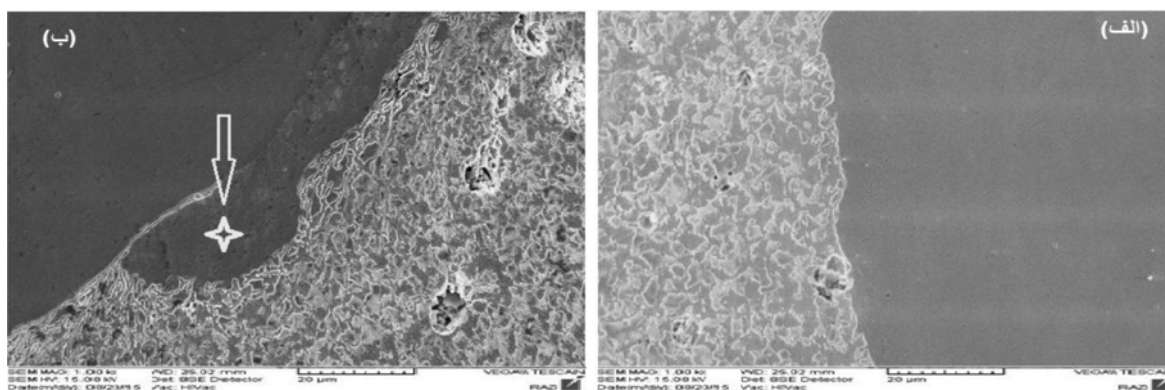
هم چنین رفتار خوردگی به وسیله آزمون پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک مورد مطالعه قرار گرفته است. این آزمون توسط دستگاه پتانسیواستات AUTOLAB-AUT8 انجام شده است. آزمون

به وجود آمده است. این لایه مذاب موضعی تحت سرعت سرد شدن بسیار بالا درحد ۱۰۵-۱۰۷ درجه کلوین بر ثانیه قرار گرفته است. در شکل ۴ نیز آنالیز عنصری با پرتو ایکس ترکیبات موجود در منطقه ذوب موضعی ایجاد شده، نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی لایه مذاب شامل ۹۱/۴۴ درصد اتمی آهن، ۴/۴۵ درصد اتمی کروم و ۲/۴۹ درصد اتمی نیکل بوده که علت به وجود آمدن منطقه ذوب موضعی و تشکیل ترکیبات بین فلزی، ترکیب شدن صفحات پایه و پرنده در اثر چرخش جت جهنده محبوس شده در فصل مشترک است [۱۰].

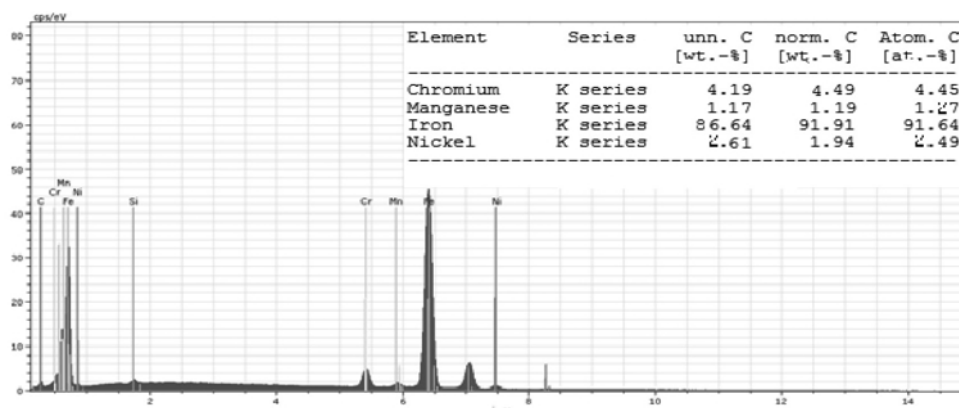
پلاستیکی بیشتری در فصل مشترک ایجاد شده و با این افزایش، رفتار ماده به سیالیت بیشتری میل نموده که در نهایت منجر به ایجاد موج‌هایی با طول موج و دامنه بیشتر در فصل مشترک شده است. شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ها تشکیل لایه ذوب موضعی در فصل مشترک را نشان داده است. همانطور که در شکل ۴-۶-الف برای نمونه با فاصله توقف ۴ میلی متر نشان داده شده، هیچ گونه حفره و منطقه ذوبی در فصل مشترک بوجود نیامده است. همچنین در نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر شکل ۳-ب به دلیل افزایش فاصله توقف، یک لایه مذاب در فصل مشترک



شکل ۲- فصل مشترک اتصال نمونه‌های جوشکاری با فاصله توقف (الف) ۴ میلی متر و (ب) ۵ میلی متر.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک نمونه‌های جوشکاری (الف) نمونه با فاصله توقف ۴ میلی متر (ب) نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر.



شکل ۴- آنالیز از لایه ذوب موضعی به وجود آمده در نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر نشان داده شده در شکل ۳.

۳-۱- نتایج آزمون ریز سختی سنجی

در جوشکاری انفجاری، صفحه پرنده و صفحه پایه در معرض موج تنشی شدید حاصل از انفجار ماده منفجره است. این امواج تنشی شدید موجب تغییرات متالورژیکی می‌شوند و در نهایت منجر به افزایش در ریز سختی می‌شوند. ریز سختی تابعی از بار انفجار و فاصله توقف است [۱۱-۱۵].

ریز سختی سنجی از محل و دو طرف ناحیه جوش در فلزات پایه انجام پذیرفته است. سختی اولیه فولاد ۱۷۷ ۳۰۴ و یکرز، فولاد کربنی CK ۲۲۰ و یکرز بوده است. شکل ۵ نمایانگر تغییرات سختی در اتصالات است. نتایج نشان داده به دلیل سخت شدن شوکی ناشی از انفجار با نزدیک شدن به فصل مشترک سختی افزایش یافته است. این افزایش سختی در نمونه با فاصله توقف بزرگتر به دلیل افزایش سرعت حرکت صفحه پرنده و انرژی جنبشی بر خوردی بالاتر، بیشتر بوده است. بیشینه سختی در نمونه با فاصله توقف ۴ میلی‌متر ۲۷۰/۹ و یکرز و در نمونه با فاصله ۵ میلی‌متر ۲۷۹ و یکرز بوده است. افزایش فاصله توقف باعث می‌شود سرعت حرکت صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد افزایش یافته و در نتیجه انرژی جنبشی برخوردی نیز افزایش یافته و تغییر شکل پلاستیکی شدیدی در فصل مشترک اتصال ایجاد و سخت شدن ناشی از امواج انفجار ایجاد شود. افزایش ریز سختی فصل مشترک اتصال با افزایش فاصله توقف توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [۱۱-۱۵].

۴- آزمون خوردگی الکتروشیمیایی

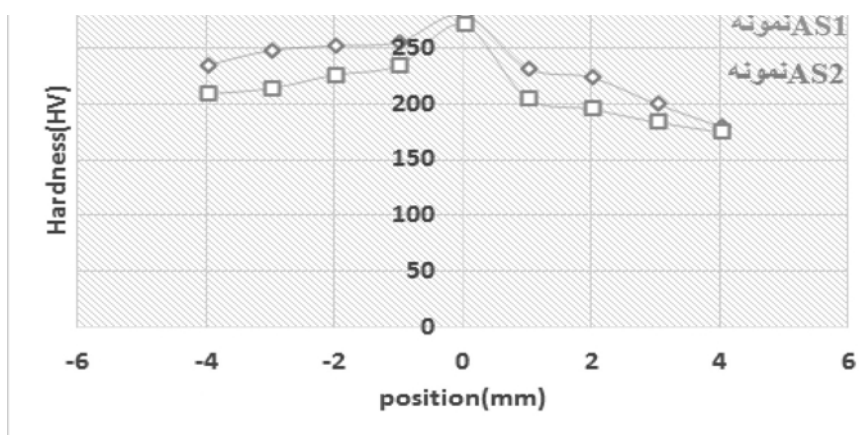
۴-۱- پلاریزاسیون تافل

رفتار پلاریزاسیون الکتروشیمیایی اتصال فولاد CK ۴۵ - فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ و فلزات پایه در محلول آب دریا در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر پتانسیل خوردگی (E_{corr}) که از روی نمودار و چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) که با استفاده از روش برون یابی

تافل محاسبه شده است. نتایج جدول ۵ نشان داده، که با افزایش فاصله توقف پتانسیل خوردگی از ۰/۴۱۵- به ۰/۷۲۵- کاهش یافته و چگالی جریان خوردگی از ۱۱۴ به ۱۹۳ میکروآمپر بر سانتی متر مربع افزایش یافته است. در بررسی‌های انجام گرفته توسط منحنی‌های پلاریزاسیون تافل در نمونه‌های جوش شده، کمترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه AS1 با ۱/۶۷ mpy و بیشترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه AS2 با ۱/۹۸ mpy است. سرعت حرکت صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد با افزایش فاصله توقف افزایش یافته و در نتیجه انرژی جنبشی برخوردی نیز افزایش یافته است. افزایش سختی نمونه با فاصله توقف بیشتر نمایانگر افزایش میزان انرژی جنبشی برخوردی انتقال یافته به فصل مشترک است. افزایش انرژی این نمونه باعث افزایش سرعت خوردگی شده است. هم‌چنین در محلول بک کوپل گالوانیکی ایجاد می‌شود، در نمونه AS2 فولاد زنگ‌زن علی‌رغم آنکه در محیط‌های حاوی یون کلراید به خوردگی حفره‌ای حساس است، به عنوان کاتد عمل نموده و مناطق ذوب موضعی منجمد شده به صورت ترکیبات بین فلزی در مجاورت امواج مطابق شکل ۳-ب به عنوان آند عمل می‌نمایند. فولاد زنگ‌زن باعث افزایش نسبت سطح کاتد به آند شده و باعث افزایش تمرکز خوردگی در فصل مشترک اتصال این نمونه شده است.

۴-۲- نتایج آزمون طیف نگاری امپدانس

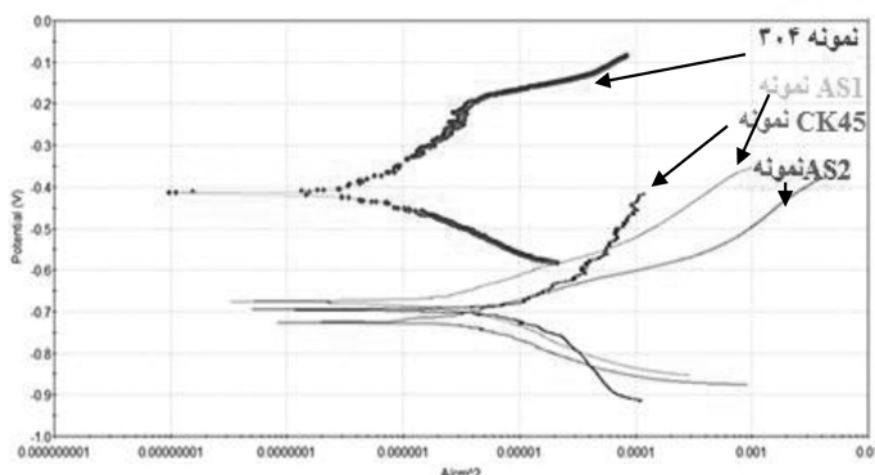
شکل‌های ۷ تا ۹ نتایج حاصل از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌های اتصال یافته پس از غوطه وری در محلول NaCl نشان داده است، جدول ۶ داده‌های حاصل از انطباق مدار معادل $R(Q(R(QR)))$ با نتایج EIS نشان داده است. در این مدار معادل، R_s مقاومت محلول، Q_f عنصر فاز ثابت (CPE) در فیلم سطحی، R_f مقاومت فیلم سطحی، Q_{dl} عنصر فاز ثابت در لایه دو گانه (d_1) و R_{ct} مقاومت انتقال بار را نشان داده است. شکل ۱۰ نیز مدار معادل نمونه‌های اتصال یافته را نشان می‌دهد.



شکل ۵- مقایسه پروفیل ریز سختی فصل مشترک‌های اتصال نمونه‌ها، نمودار پایین نمونه AS1، نمودار بالا نمونه AS2.

یکنواختی فصل مشترک بوده، ایجاد نشده است. در نتیجه برای نمونه AS1 عدد n_{dl} بزرگ‌تر از نمونه AS2 است. در نتیجه جریان خوردگی آن کمتر است. هم چنین مقاومت انتقال بار نمونه AS2 کمتر از نمونه AS1 بوده که نشانگر خوردگی بیشتری آن می‌باشد. افزایش انرژی جنبشی برخوردی انتقال یافته در نمونه با فاصله توقف بیشتر نیز بر افزایش میزان خوردگی این نمونه موثر بوده است.

هر چه عدد n_{dl} بزرگ‌تر باشد، به معنی پیوستگی و یکنواختی بیشتر در فصل مشترک جوش است. در این صورت جریان خوردگی کمتر است. زیرا جریان خوردگی متناسب با سطح تماس محلول با فلز است. هر چه عیوب و ناپیوستگی‌ها بیشتر باشد، سطح تماس مؤثر محلول و فلز بیشتر شده و در نتیجه جریان خوردگی افزایش می‌یابد. در نمونه AS1 با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ هیچ ترکیب بین فلزی ناشی از تشکیل مناطق ذوب موضعی که نمایانگر غیر



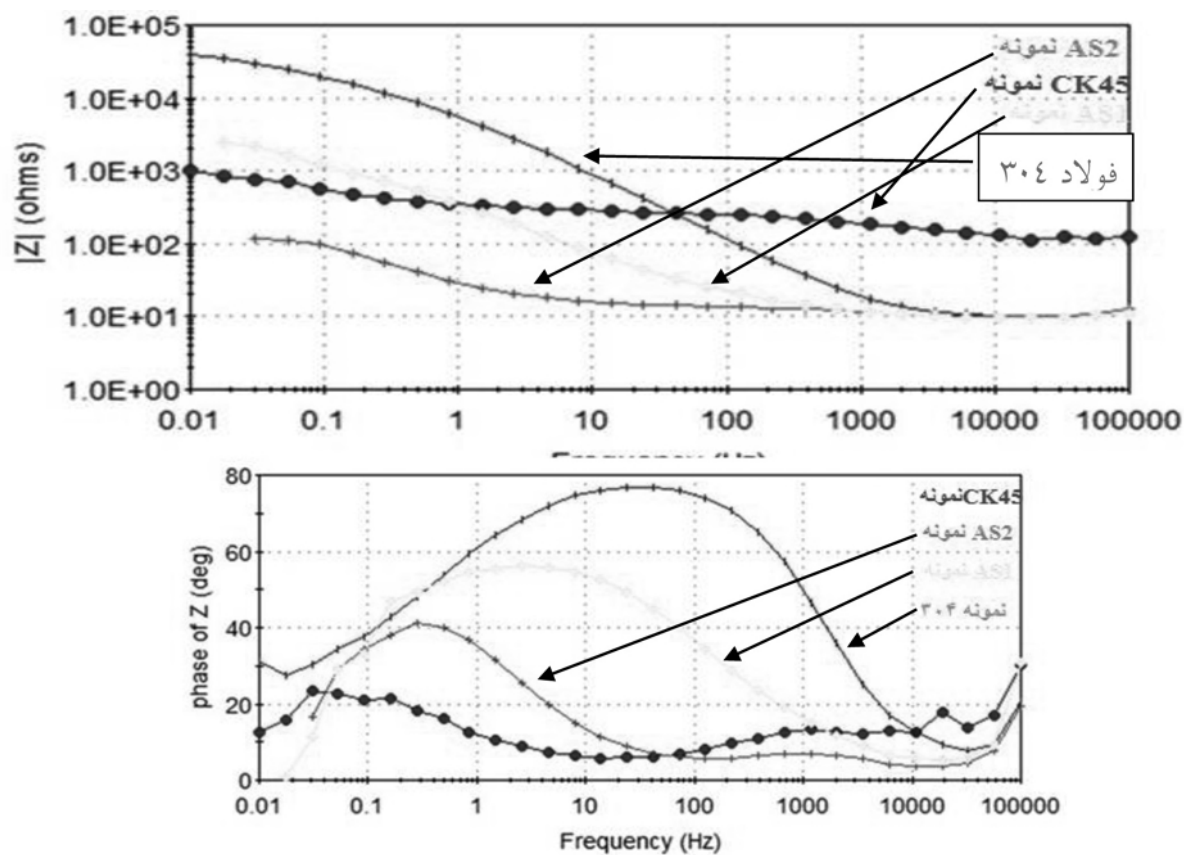
شکل ۶- مقایسه نمودار پلاریزاسیون تافل نمونه‌های اتصال و فلزات پایه.

جدول ۵- نتایج حاصل از پلاریزاسیون تافل نمونه‌ها و فلزات پایه

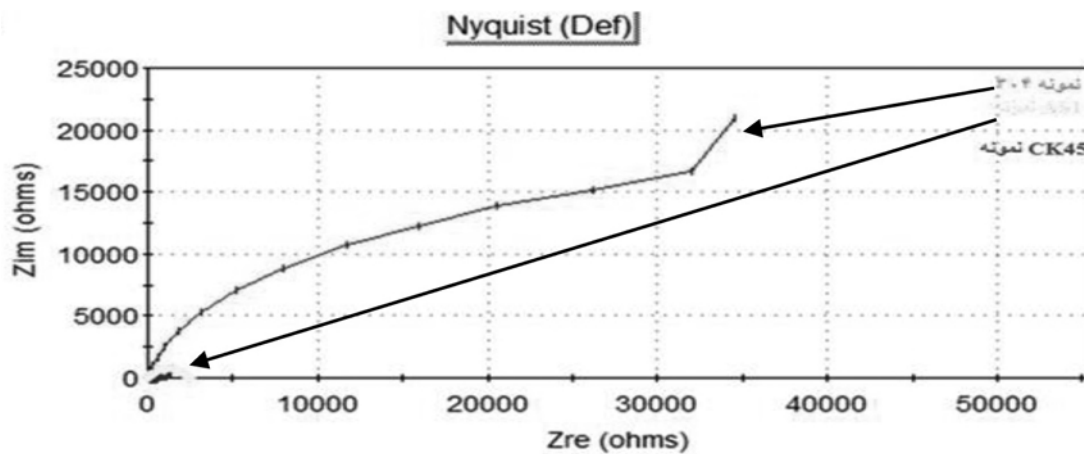
نمونه	C.R(mpy)	E corr(v)	Icorr(A/cm ²)
فولاد ck45	۱/۸	۰/۶۷۴	۱۸۴
فولاد ۳۰۴	۱/۴۲	۰/۴۱۵	۱۱۴
AS1	۱/۶۷	-۰/۶۴۱	۱۷۸
AS2	۱/۹۸	-۰/۷۲۵	۱۹۳

جدول ۸- نتایج حاصل از مدار معادل منطبق بر داده‌های آزمون EIS در محلول ۵/۳ NaCl

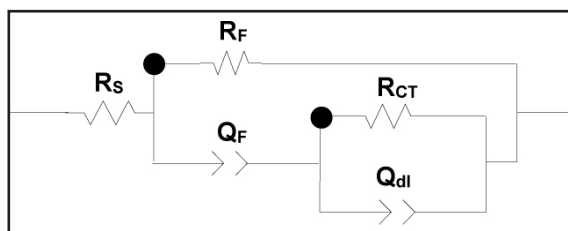
پارامتر	$R_s(\Omega)$	$Q_f(S.sec)$	$nf(0 < n < 1)$	$R_f(\Omega)$	$Q_{dl}(S.sec)$	$ndl(0 < n < 1)$	$R_{ct}(\Omega)$
نمونه AS2	5/52	1/22E-5	0/73	6	3/42E-4	0/77	1/81E4
نمونه AS1	4/41	4/32E-4	0/23	6/63	9/57E-5	0/98	1/ 0E5



شکل ۷- مقایسه نمودار فازی اتصالات و فلزات پایه.



شکل ۸- نمودار نایکوئیست نمونه AS۱ و فلزات پایه.



شکل ۹- مدار معادل نمونه‌های اتصال یافته.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی رفتار خوردگی و تغییرات ریز ساختاری دو لایه ورق‌های فولاد ۳۰۴- فولاد کربنی CK ۴۵ با فرآیند جوشکاری انفجاری با فاصله توقف مختلف انجام و نتایج زیر حاصل شد:

(۱) نتایج نشان داده در فاصله توقف ۴ میلی متر فصل مشترک به صورت موجی کوتاه بوده که با افزایش فاصله توقف به ۵ میلی متر فصل مشترک موجی گردابه ای با تشکیل مناطق ذوب موضعی منجمد شده، شده است.

(۲) نتایج سختی سنجی نشان داده با نزدیک شدن به فصل مشترک اتصال به دلیل سخت شدن شوکی ناشی از برخورد سختی نسبت به سختی پایه فلزات افزایش یافته است. این سختی در نمونه با فاصله توقف بزرگتر بیشتر بوده است. این حد برای نمونه با فاصله توقف ۴ میلی متر ۲۷۰ و یکرز و در نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر ۲۷۷ و یکرز بوده است.

(۳) در بررسی‌های انجام گرفته توسط منحنی‌های پلاریزاسیون تافل در نمونه‌های جوش شده، کمترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه با فاصله توقف ۴ میلی متر در حد ۱/۶۷ mpy و بیشترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر در حد ۱/۹۸ mpy است، دلیل این امر آنست که در نمونه با فاصله توقف ۵ میلیمتر، با افزایش فاصله توقف در نتیجه انرژی جنبشی برخوردی نیز افزایش یافته و تغییر شکل پلاستیکی شدیدی در فصل مشترک اتصال ایجاد شده است. این موضوع باعث شده که مقاومت خوردگی نمونه با فاصله توقف بیشتر، کمتر باشد.

(۴) تشکیل ترکیبات بین فلزی و مناطق ذوب موضعی منجمد شده در فصل مشترک اتصال نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر باعث ایجاد منطقه آندی در فصل مشترک شده و فولاد زنگ نزن با افزایش نسبت سطح کاتد به آند، باعث افزایش تمرکز خوردگی در فصل مشترک اتصال این نمونه شده است.

(۵) نتایج آزمون امپدانس نشان داده که بدلیل عدم تشکیل مناطق ذوب موضعی در نمونه با فاصله توقف کمتر، عدد ndl آن بزرگتر از نمونه اتصال یافته با فاصله توقف بیشتر بوده است. هم چنین مقاومت انتقال بار نمونه با فاصله توقف بیشتر کمتر بوده است.

مراجع

- [1] B. Crossland, Explosive Welding of Metals and Its Applications, 1982.
- [2] T.Z. Blazynski, Explosive Welding, Forming and Compaction, 1983.
- [3] N. Kengkla, N. Tareelap, Proc Conf 1st Mae Fah Luang University, 2012.
- [4] 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, 2003, Pp. 40-48.
- [5] M. Acarer, Electrical, Corrosion, and Mechanical Properties of Aluminum-Copper Joints Produced by Explosive Welding, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 21, 2012, Pp 2375-2379.
- [6] N. Kahramana, B. Gulenc, Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface Journal of Materials Processing Technology, Vol. 169, 2005, Pp. 127-133.
- [7] N. Kahramana, B. Gulenc, Corrosion and mechanical-microstructural aspects of dissimilar joints of Ti-6Al-4V and Al plates " International Journal of Impact Engineering, Vol. 34, 2007, Pp. 1423-1432.
- [8] م. کزازی، م. محمدی غزنوی، م. دادفر، مجموعه مقالات سیزدهمین کنگره ملی خوردگی ایران، ۱۳۹۱.
- [9] H.R. Zareie Rajani, S.A.A. Akbari Mousavi, F. Madani Sani, Comparison of corrosion behavior between fusion clad and explosive clad Inconel 625/plain carbon steel bimetal plates, Materials and Design, Vol. 43, 2013, Pp 467-474.
- [10] م. خازنده قره شیران، س.ع.ا. اکبری موسوی، ا.آ. آماده، غ. لیاقت، رساله دکتری مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ۱۳۹۱.

- [11] N. Kahraman, B. Gulenc, Microstructural and mechanical properties of Cu-Ti plates bonded through explosive welding process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 169, 2005, Pp.67-71.
- [12] A. Durgutlu, B. Gulenc, F. Findik, Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding, Materials and Design, Vol. 26, 2005, Pp. 497-507.
- [13] A. Durgutlu, H. Okuyucu, B. Gulenc, Investigation of effect of the stand-off distance on interface Characteristics of explosively welded copper and stainless steel", Materials and Design, Vol. 29, 2008, Pp. 1480-1484.
- [14] B. Gulenc, Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method", Materials and Design, Vol. 29, 2008, Pp. 275-278.
- [15] N. Kahraman, B. Gulenc, F. Findik, Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 169, 2005, Pp.127-133.

