

## فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بررسی تأثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر خواص خوردگی فصل مشترک اتصال انفجاری ورق‌های Cu/SS 304

مقاله پژوهشی

علی ابراهیمی اکبرآبادی<sup>۱</sup>، عباس سعادت<sup>۲</sup>، محمدرضا خانزاده<sup>۳\*</sup>، حمید بختیاری<sup>۴</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مرکز فناوری مجلسی، واحد خوراسگان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد مبارکه، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۴- دانشجو دکترا، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، کرج، ایران.

\*Khanzade@gmail.com

### چکیده

در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار خوردگی و تغییرات ریزساختاری ورق‌های دو لایه فولاد زنگ نزن ۳۰۴- مس پس از فرآیند جوشکاری انفجاری پرداخته شده است. جوشکاری انفجاری به صورت موازی با بار انفجاری ۴۶ و ۶۳ میلی‌متر و فاصله توقف ۲-۳ میلی‌متر انجام شده است. پس از اعمال جوش انفجاری، فرایند عملیات حرارتی در دمای ۳۵۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و برای مدت‌زمان‌های نگهداری ۸ و ۱۶ ساعت انجام شد. از نتایج آزمون امدانس الکتروشیمیایی می‌توان دریافت که عدد n در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت کمتر از نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت است و در نتیجه جریان خوردگی در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت بیشتر است که باعث کاهش مقاومت انتقال بار می‌شود. با مقایسه نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت و عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت با دمای آئیل متغیر، زمان آئیل ثابت است و نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت با بیشتر بودن دمای آئیل دارای عدد n (۰/۸۰) بیشتر و پس از آن نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت (n=۰/۶۶) است و علت آن افزایش دمای آئیل و کاهش انرژی ذخیره شده در فصل مشترک است.

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۵

### کلید واژگان:

جوشکاری انفجاری

ضخامت بار انفجاری

تغییر شکل پلاستیکی شدید

گردابه

## Investigation of the Effect of Thermal Treatment after Welding on the Corrosion Properties of the Interconnecting Joint Wall of Cu/SS 304 Sheets

Ali Ebrahimi Akbarabadi<sup>1</sup>, Abbas Saadat<sup>2</sup>, Mohammad Reza Khanzadeh<sup>3\*</sup>, Hamid Bakhtiari<sup>4</sup>

1- PH.D. Student, Mech. Eng., Complex of Materials & Manufacturing Processes, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

2- Assic. Prof., Mech. Eng., Complex of Materials & Manufacturing Processes, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

3- Asoci. Prof., Elect. Eng., Complex of Electrical and Computer Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

\* Khanzade@gmail.com

### Article Information

Original Research Paper

Doi:

### Keywords:

Explosive Welding

Explosive Charge Thickness

Severe Plastic Deformation

Vortex

### Abstract

In the present study, the effect of thermal treatment on the corrosion behavior and microstructure changes of two-layer stainless-304-Cu sheet steel sheets after the explosive welding process has been investigated. Explosive welding has been done in parallel with an explosive layer of 46 and 63  $\mu\text{m}$  and a stop distance of 2-3 mm. After explosive welding, the heat treatment process was carried out at 350 and 450  $^{\circ}\text{C}$  for 8 and 16 hours. Explosive welding with an explosive load and variable stop distance. From the results of the electrochemical impedance test, it can be seen that the n number in the heat treatment sample at 350  $^{\circ}\text{C}$  and 8 hours is less than the heat treatment sample at 450  $^{\circ}\text{C}$  and 8 hours, and as a result, the corrosion current in the heat treatment sample The temperature is 350  $^{\circ}\text{C}$  and the time is 8 hours, which reduces the load transfer resistance. By comparing the heat treatment samples at 350  $^{\circ}\text{C}$  and 8 hours and the heat treatment at 450  $^{\circ}\text{C}$  and the time of 8 hours with varying aniline temperature, the annealing time is constant and the heat treatment sample at 450  $^{\circ}\text{C}$  and time 8 The hour with more annealing temperature has a value of n (0.80), followed by heat treatment at 350  $^{\circ}\text{C}$  and 8 hours (n = 0.66), due to annealing temperature and reduced energy storage In the chapter.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Ali Ebrahimi Akbarabadi, Abbas Saadat, Mohammad Reza Khanzadeh, Hamid Bakhtiari, Investigation of the Effect of Thermal Treatment after Welding on the Corrosion Properties of the Interconnecting Joint Wall of Cu/SS 304 Sheets, New Process in Material Engineering, 2024, 17(4), 51-65.

## 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 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 انصالی تمیز در فصل مشترک جوشکاری و حذف آلودگی‌های سطحی می‌شود. تشکیل این جت از شرایط اساسی ایجاد پیوند مناسب در جوشکاری انفجاری است [۱-۳]. این فرآیند جوشکاری با اهمیت غیر ذوبی بوده و از کاربردهای صنعتی آن می‌توان به اتصال دهی و روکش دهی فلزات همجنس و غیرجنس متنوع به صورت دو یا چند لایه اشاره نمود. به دلیل عدم حرارت دهی در طول این فرایند، 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 [۴-۵]. تحقیقات بسیار محدودی در زمینه خوردگی اتصالات انفجاری انجام شده که به برخی از آنها اشاره می‌شود:

نتایج خانزاده و همکاران [۶] در بررسی تأثیر فاصله توقف بر رفتار خوردگی اتصال انفجاری ورق‌های فولاد زنگ نزن - 304 فولاد کربنی CK 45 در محیط دریایی نشان داد که مناطق ذوب موضعی منجمد شده و افزایش انرژی جنبشی برخورد در نمونه با فاصله توقف بیشتر باعث افزایش سرعت خوردگی شده است. کتگکالا و تارلپ [۷] تأثیر ترکیبات بین فلزی بر رفتار خوردگی اتصالات سه لایه انفجاری آلومینیوم / فولاد در صنایع نظامی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آنها نشان داده است که 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 [۸]، خوردگی اتصال انفجاری تیتانیوم، فولاد زنگ نزن ۳۰۴ 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. اکابر [۹] 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 بر اساس الکترونگاتیو بالا داشته و نسبت به سمت مسی بیشتر خورده شده است.

کهرمان و همکاران [۱۰]، خوردگی اتصال انفجاری تیتانیوم به فولاد زنگ نزن را بررسی نموده‌اند، نتایج آنها حاکی از آن است که 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 افزایش یافته است. آنها همچنین [۱۱]، خوردگی اتصال انفجاری صفحات Ti-6Al-4V و آلومینیوم را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آزمون خوردگی نشان‌دهنده 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.

زارعی و همکاران [۱۲]، 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 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 یک لایه پسیو پایدار شده است.

در این پژوهش بررسی اثر عملیات حرارتی بر اتصال انفجاری مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و تأثیر آن بر ساختار متالورژیکی و رفتار خوردگی ترکیبات بین فلزی فصل مشترک صورت گرفته است. بررسی عملیات حرارتی بر خواص خوردگی

در این پژوهش مس به عنوان صفحه پرنده به ابعاد ۱۵۰mm × ۱۵۰ mm با ضخامت ۲mm و صفحه فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به عنوان صفحه پایه صفحه پایه فولادی به ابعاد ۱۵۰mm × ۱۵۰ mm با ضخامت ۴mm در نظر گرفته شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است [۱۳].

فصل مشترک اتصال انفجاری فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با استفاده از پلاریزاسیون پتانسیو داینامیک و طیف‌نگاری اِمپدانس الکتروشیمیایی مسئله نو و جدیدی می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌های آزمون ۲-۱ مواد اولیه

جدول (۱): ترکیب شیمیایی مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ (wt) [۱۳].

عناصر	Ti%	Cr%	Mn%	Ni%	Si%	Zn%	P%	Pb%	Sn%	Balance
مس	-	-	-	-	-	۰/۱۱۹	۰/۰۸۹۲	۰/۰۱۲۳	۰/۹۲	Cu
فولاد 304	۰/۱۵	۱۸	۰/۷	۸	۰/۴	۰/۲۵	-	-	۰/۰۲	Fe

در جدول (۲) پارامترهای جوشکاری انفجاری برای چهار قطعه مشخص شد. فاصله توقف ۰/۵ تا ۱ برابر صفحه پرنده تعیین شده و ضخامت ماده منفجره نیز طوری انتخاب شده تا انرژی جنبشی برخورد کافی ایجاد شود. پس از اعمال جوش انفجاری، فرایند عملیات حرارتی در دمای ۳۵۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت‌زمان‌های نگهداری ۸ و ۱۶ ساعت انجام شد.

جدول (۲): متغیرهای جوش‌های انجام شده [۱۳].

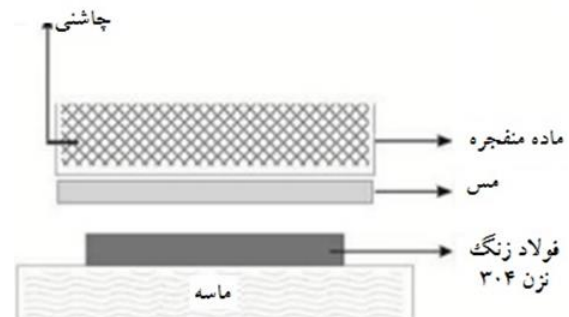
شماره نمونه	ضخامت ماده منفجره (mm)	فاصله توقف (mm)
۱	۴۶	۳
۲	۶۳	۲

## ۲-۳- آزمون‌های بررسی ریزساختاری

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای متالوگرافی ابتدا سطح نمونه‌ها توسط کاغذ سنباده شماره ۶۰ تا ۲۵۰۰ سنباده‌زنی شده است. پس از رفع خطوط و ناهمواری‌های سطحی به وسیله 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 نایتال ۲٪ حکاکی شیمیایی شدند. ریزساختار فصل مشترک و ترکیبات بین فلزی توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus در بزرگنمایی‌های مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است و همچنین از میکروسکوپ الکترونی روبشی از نوع MIRA با قابلیت EDS ساخت کمپانی VEGA// برای بررسی بیشتر استفاده شد.

## ۲-۲- فرایند جوشکاری انفجاری

در این مطالعه اتصال غیر همجنس بین مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به روش جوشکاری انفجاری انجام گرفته است. شکل (۱) نحوه تنظیم اولیه صفحات جهت انجام جوشکاری انفجاری را نشان داده است. ماده منفجره از نوع آماتول<sup>۱</sup> ۹۵/۵ با ترکیب تری نیترو تولوئن<sup>۲</sup>، ۵ درصد و نترات آمونیم ۹۵ درصد با سرعت ۲۵۰۷ متر بر ثانیه و از چاشنی M8 استفاده شد. جهت استقرار ورق‌های مورد نظر جهت انجام فرآیند جوشکاری انفجاری یک سکوی بتنی که با بستری از شن نرم به عنوان لایه بافر و واسط پوشیده شده در نظر گرفته شد. همچنین جهت ایجاد فاصله توقف‌های طراحی شده در هر آزمون، بین ورق‌های مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ از سیم‌های مسی با قطرهای مناسب و به ارتفاع فاصله‌های توقف طراحی شده استفاده شد.



شکل (۱): نحوی تنظیم اولیه صفحات جهت انجام جوشکاری انفجاری [۱۳].

## ۲-۴- آزمون الکتروشیمیایی

به منظور بررسی رفتار خوردگی قطعات جوش انفجاری شده در محلول ۳/۵٪ NaCl از یک پیل الکتروشیمیایی سه الکترودی با ظرفیت ۵۰۰ mL برای آزمایش‌های پلاریزاسیون و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شد. از الکترود کالومل فوق اشباع (SCE) به عنوان الکترود مرجع و الکترود پلاتین به منظور الکترود کمکی استفاده شد. آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک با نرخ روبش ۱ mV/s از پتانسیل ابتدایی ۲۵۰ mV- پایین تر از پتانسیل مدار باز تا پتانسیل نهایی ۲۵۰ mV بالاتر از پتانسیل مدار باز جهت تعیین پتانسیل و جریان خوردگی انجام شد [۱۴]. آزمایش طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در محدوده فرکانس ۱۰۰ KHz تا ۱۰ mHz و با دامنه ۱۰ mV حول پتانسیل مدار باز انجام شد. از نرم افزار ZSimpWin 3.22 به منظور تحلیل نتایج EIS استفاده شد. مدت زمان رسیدن به حالت پایدار ۹۰ دقیقه می‌باشد [۱۴].

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- بررسی ریزساختار نمونه‌ها توسط

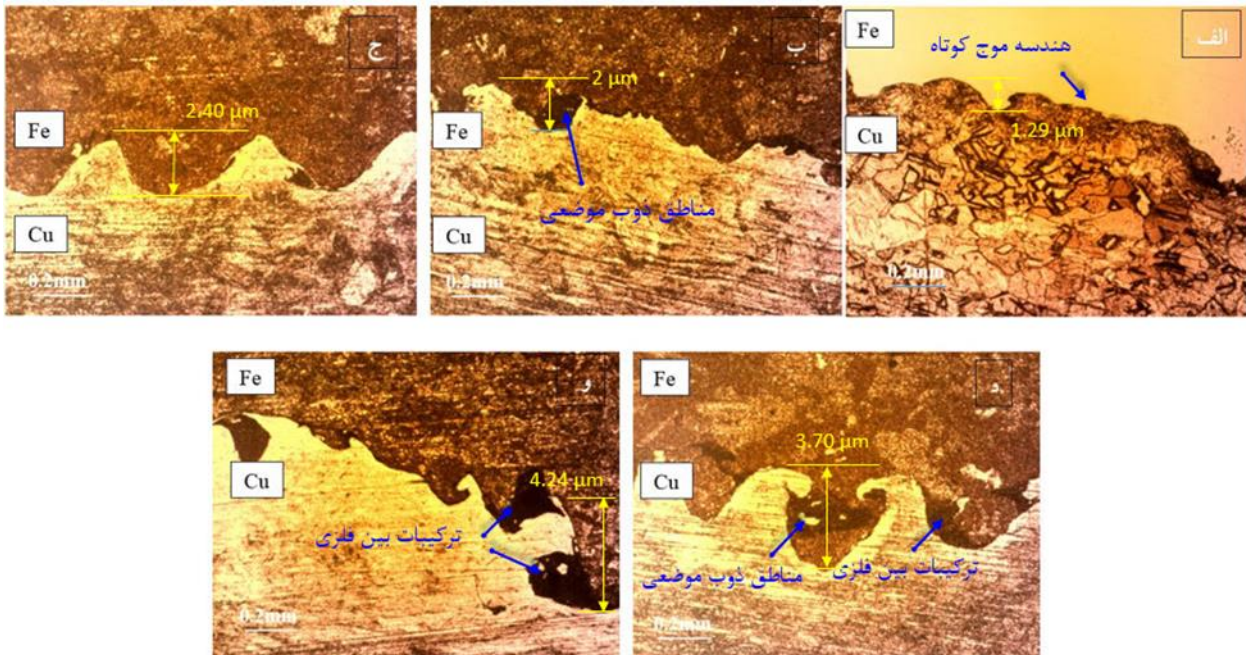
#### میکروسکوپ نوری

### ۳-۱-۱- بررسی ریزساختار نمونه‌های با ضخامت بار انفجاری ۶ و فاصله توقف ۳ میلی‌متر

تصاویر موج‌های ایجاد شده در راستای طولی اتصال در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲-الف) مشاهده می‌شود فصل مشترک اتصال در این حالت به صورت موجی با دامنه کم و ضخامت ۱/۲۹ میکرومتر است، در حین فرآیند جوش انفجاری بر اثر شدت نیروی بسیار زیاد و زمان بسیار اندک، در فصل مشترک دو فلز یک لایه به وجود آمده

که تحت تغییر فرم شدید قرار گرفته است. به علت ضخامت با انفجاری کم، تغییر شکل پلاستیکی ناشی از برخورد و در نتیجه فصل مشترک اتصال قبل از انجام عملیات حرارتی به صورت موجی کوتاه است (مقیاسه قسمت الف) شکل (۲) با دیگر قسمت‌های آن).

تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری در شکل (۲-ب) و (۲-ج) نشان‌دهنده شکل‌گیری و رشد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک مس و فولاد با افزایش زمان عملیات حرارتی از ۸ به ۱۶ ساعت و دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین لایه نفوذی ایجاد شده پس از عملیات حرارتی در دمای ۳۵۰°C و زمان ۸ ساعت برابر با ۷۷ میکرومتر می‌باشد که با افزایش زمان عملیات حرارتی تا ۱۶ ساعت این لایه نفوذی افزایش پیدا کرده و میانگین آن به ۸۹ میکرومتر رسیده است. تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری در شکل (۲-د) و (۲-و) نشان‌دهنده شکل‌گیری و رشد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک مس و فولاد با افزایش زمان عملیات حرارتی از ۸ به ۱۶ ساعت و دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین لایه نفوذی ایجاد شده پس از عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰°C و زمان ۸ ساعت برابر با ۱۰۱ میکرومتر می‌باشد که با افزایش زمان عملیات حرارتی تا ۱۶ ساعت این لایه نفوذی افزایش پیدا کرده و میانگین آن به ۱۲۲ میکرومتر رسیده است. افزایش زمان و دمای عملیات حرارتی منجر به فعال شدن مکانیزم نفوذ و تشکیل ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال می‌شود، با توجه به تشکیل ترکیبات بین فلزی هنگام جوشکاری انفجاری مطابق شکل (۲-الف) این ترکیبات باعث سهولت بیشتر نفوذ اتم‌های مس و آهن هنگام عملیات حرارتی شده است.



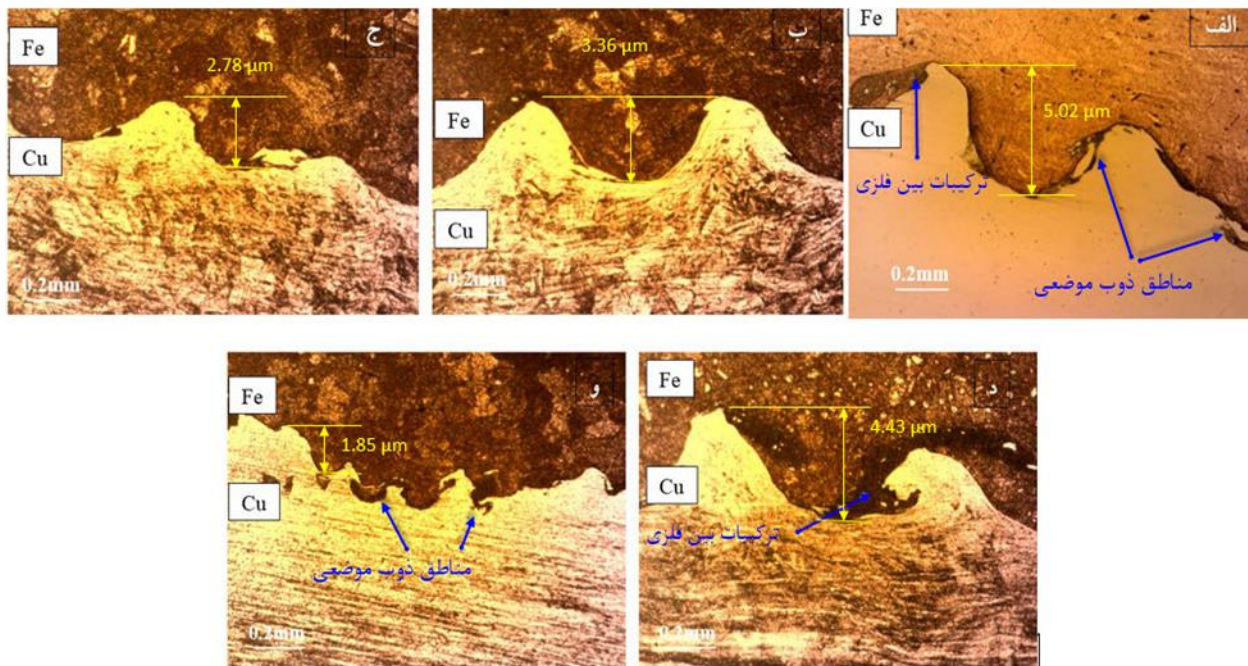
شکل (۲): تصاویر متالوگرافی نوری فصل مشترک اتصال نمونه‌های با ضخامت بار انفجاری ۴۶ و فاصله توقف ۳ میلی‌متر: (الف) نمونه بدون عملیات حرارتی، (ب) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۸ ساعت، (ج) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۶ ساعت، (د) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۸ ساعت و (و) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۶ ساعت.

با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی ضخامت لایه نفوذی افزایش یافته است. فصل مشترک دارای هندسه موجی بلند با اندازه ۵/۰۲ میکرومتر بوده و عملیات حرارتی تأثیری بر روی هندسه موجی نداشته است و بیشترین اندازه آن بعد از عملیات حرارتی در شکل (۳-د) به ۴/۴۳ میکرومتر رسیده است. در مقایسه با دیگر هندسه‌های فصل مشترک همچون صاف و مذاب پیوسته، فصل مشترک موجی برای اتصالات جوشکاری انفجاری به دلیل سطح فصل مشترک بیشتر و استحکام بالاتر ترجیح داده می‌شود [۱۵].

### ۳-۱-۲- بررسی ریزساختار نمونه‌های با ضخامت بار انفجاری ۶۳ و فاصله توقف ۲ میلی‌متر

ریزساختار نمونه‌های با ضخامت بار انفجاری ۶۳ و فاصله توقف ۲ میلی‌متر در شکل (۳) مشاهده می‌شود، در این شکل تصاویر میکروسکوپ نوری اتصال مس به فولاد قبل و بعد از عملیات حرارتی نشان داده شده است. در هنگام اتصال لایه مذاب منجمد شده موضعی به وجود آمده که با انجام عملیات حرارتی ضخامت لایه نفوذی افزایش یافته است.





شکل (۳): تصاویر متالوگرافی نوری فصل مشترک اتصال نمونه‌های با ضخامت ۶۳ بار انفجاری ۲ میلی‌متر (الف) و فاصله توقف ۲ میلی‌متر (الف) نمونه بدون عملیات حرارتی، (ب) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۸ ساعت، (ج) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۶ ساعت، (د) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۸ ساعت و (و) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۶ ساعت.

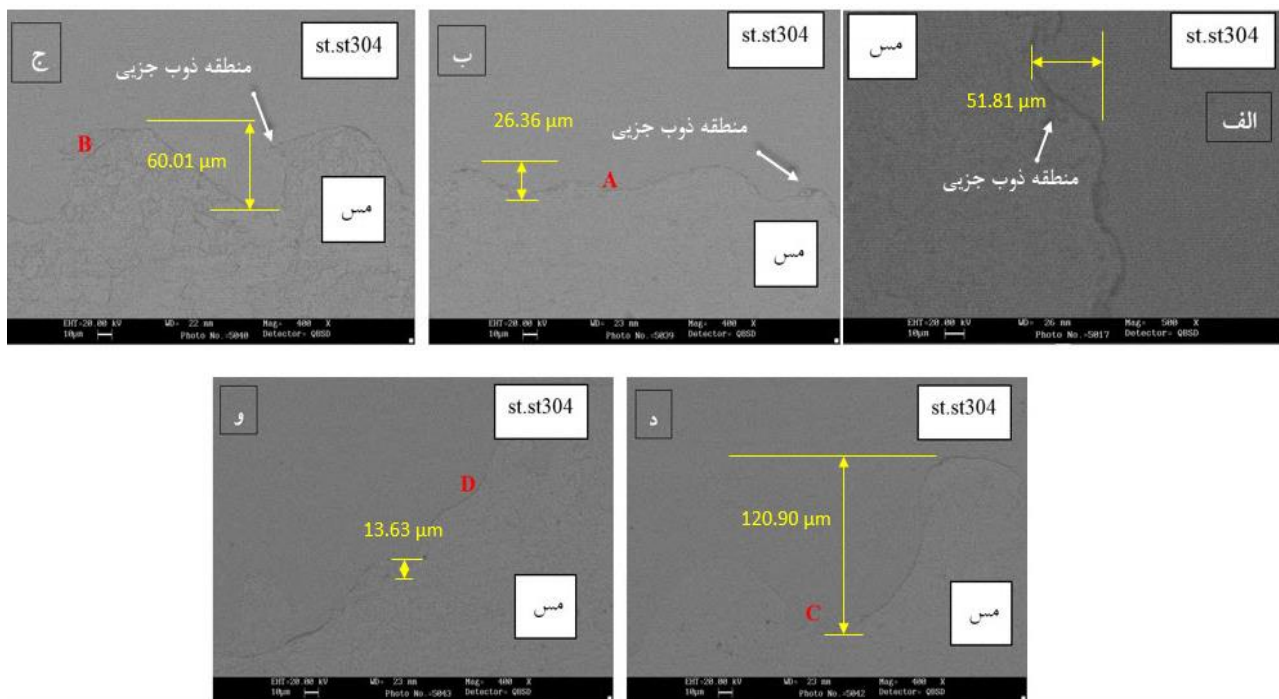
شکل (۳-الف) ایجاد شده که باعث ایجاد ترکیبات مختلف در فصل مشترک گردیده است، علت آن ایجاد حرارت موضعی و تنش برشی با نرخ بالا در فصل مشترک اتصال می‌باشد. نمونه‌های عملیات حرارتی شده به ترتیب در شکل‌های (۳-ب) و (۳-ج) مشاهده می‌شوند. در اثر عملیات حرارتی در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  و زمان ۸ و ۱۶ ساعت میانگین ضخامت لایه نفوذی به ترتیب به ۸۵ و ۹۹ میکرومتر رسیده است که در مقایسه با نمونه بدون عملیات حرارتی این ضخامت افزایش یافته است. تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری در شکل (۳-د) و (۳-و) نشان‌دهنده شکل‌گیری و رشد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک مس و فولاد با افزایش زمان عملیات حرارتی از ۸ به ۱۶ ساعت و دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین لایه نفوذی ایجاد شده پس از عملیات حرارتی در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  و زمان ۸ ساعت برابر با ۱۱۱ میکرومتر می‌باشد که با افزایش زمان عملیات حرارتی تا ۱۶ ساعت این لایه نفوذی افزایش پیدا کرده و میانگین آن به ۱۲۹ میکرومتر رسیده است.

هرچند که جوشکاری انفجاری فرآیندی با طبیعت حالت جامد می‌باشد، اما مناطق ذوب موضعی نیز نزدیک فصل مشترک دیده می‌شود مطابق با شکل (۳-الف) این مناطق از محو شدن شدید انرژی ضربه در کنار اصطکاک شدید بین لایه جت و سطوح تماسی سرچشمه می‌گیرد [۱۵]. بعد از عملیات حرارتی مطابق شکل‌های (۳-ج) هیچ منطقه ذوب موضعی در نزدیک فصل مشترک مشاهده نمی‌گردد. با رخ دادن یک سری تغییرات شامل بازیابی، تبلور مجدد و رشد در طرف فولاد به تدریج دانه‌ها شروع به درشت شدن نزدیک فصل مشترک در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  می‌کند که در مدت زمان ۱۶ ساعت واضح‌تر می‌باشد. این تفاوت در اندازه را می‌توان به متعادل شدن کرنش تهیج شده ریزساختارهای تولید شده به وسیله امواج شوکی<sup>۳</sup> در طی جوشکاری دانست. آکارر و همکارانش تفاوت اندازه دانه‌ها در دما و زمان یکسان را به تغییر شکل پلاستیک شدید در منطقه اتصال جوشکاری انفجاری نسبت داده‌اند [۱۶]. همچنین با توجه به اختلاف چگالی زیاد مابین مس و فولاد یک لایه نازک مذاب مطابق

رویشی و همچنین در شکل (۴-الف) برای نمونه قبل از عملیات حرارتی مشخص می‌باشد. در اثر عملیات حرارتی در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  بیشترین اندازه موج‌ها به  $60/01$  میکرون در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  به  $120/90$  میکرومتر رسیده است که در مقایسه با بیشترین اندازه موج قبل از عملیات حرارتی ( $50/81$  میکرومتر) افزایش داشته است. دلیل این امر تأثیر عملیات حرارتی و نفوذ عناصر آلیاژی بوده که در اثر آن ترکیبات بین فلزی نیز گسترش یافته است. در شکل (۵) نیز آنالیز عنصری<sup>۴</sup> ترکیبات موجود در فصل مشترک نشان داده شده است. نتایج این آنالیزها که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، 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 اعمال شده و در نتیجه گردابه تشکیل شده در عقب موج بیشتر حاوی مواد صفحه واسط و گردابه تشکیل شده 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 غیر همگن شده که در شکل (۴-الف) مشاهده شده است. مطابق شکل‌های (۴) و (۵) از نمونه آنالیز توزیع انرژی پرتوایکس گرفته شد، بر اساس درصد اتمی عناصر مشخص شده نسبت به تغییراتی که در درصد عناصر مس و فولاد مشاهده می‌گردد مشخص می‌باشد که در نمونه‌های قبل و بعد از عملیات حرارتی با افزایش زمان و دما شرایط برای نفوذ عناصر فراهم شده و ترکیبات بین فلزی ایجاد شده است [۱۸].

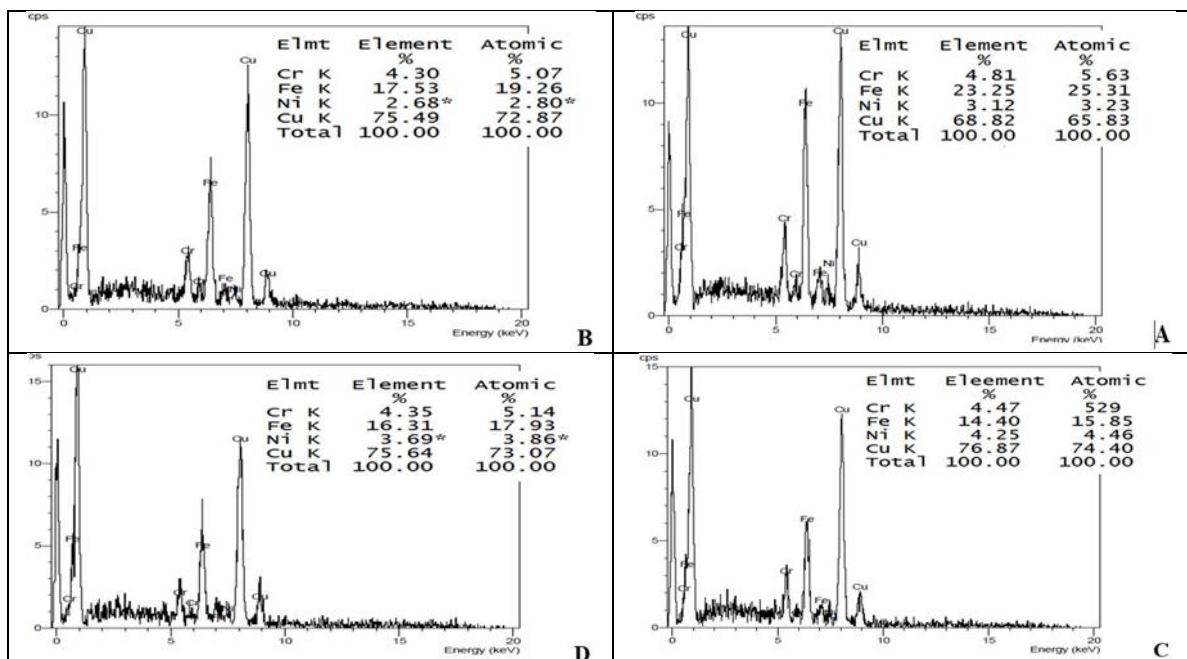
افزایش دما و زمان عملیات حرارتی منجر به فعال شدن مکانیزم نفوذ و تشکیل ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال شده است. با توجه به اینکه در هنگام جوشکاری مطابق شکل (۳-الف) ترکیبات بین فلزی تشکیل شده است لذا این امر باعث سهولت بیشتری در نفوذ اتم‌های مس و آهن هنگام عملیات حرارتی نمونه گردیده است. مطالعات ساماردزیچ و همکارانش نیز نشان داد که در اتصال انفجاری مس به فولاد با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی عرض منطقه ترکیبات بین فلزی گسترش می‌یابد [۱۷]. با مقایسه دو نمونه می‌توان دریافت که با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی، ضخامت لایه ذوب موضعی به تدریج افزایش می‌یابد (شکل ۲ و ۳). در مقایسه دو نمونه انجام شده قبل از عملیات حرارتی نمونه با ضخامت بار انفجاری  $63$  و فاصله توقف  $2$  میلی‌متر دارای فصل مشترکی موجی-بلند بوده ( $5/02$  میکرومتر) در حالی که نمونه با ضخامت بار انفجاری  $46$  و فاصله توقف  $3$  میلی‌متر دارای فصل مشترکی موجی-کوتاه ( $1/29$  میکرومتر) است. بعد از عملیات حرارتی نمونه با ضخامت بار انفجاری  $63$  و فاصله توقف  $2$  میلی‌متر دارای ضخامت ذوب موضعی بیشتری نسبت به نمونه با ضخامت بار انفجاری  $46$  و فاصله توقف  $3$  میلی‌متر است.

**۳-۲- بررسی ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی**  
**۳-۲-۱- بررسی ریزساختار نمونه‌های با ضخامت بار انفجاری  $46$  و فاصله توقف  $3$  میلی‌متر**  
 همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ نوری، الکترونی



شکل (۴): تصاویر متالوگرافی نوری فصل مشترک اتصال نمونه‌های با ضخامت بار انفجاری ۴۶ و فاصله توقف ۳ میلی‌متر

الف) نمونه بدون عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۸ ساعت (ج) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۶ ساعت (د) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۸ ساعت (و) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۶ ساعت.



شکل (۵): آنالیز EDS از مناطق ذوب موضعی مشخص شده در شکل ۴، نمونه با ضخامت بار انفجاری ۴۶ و فاصله توقف ۳ میلی‌متر.

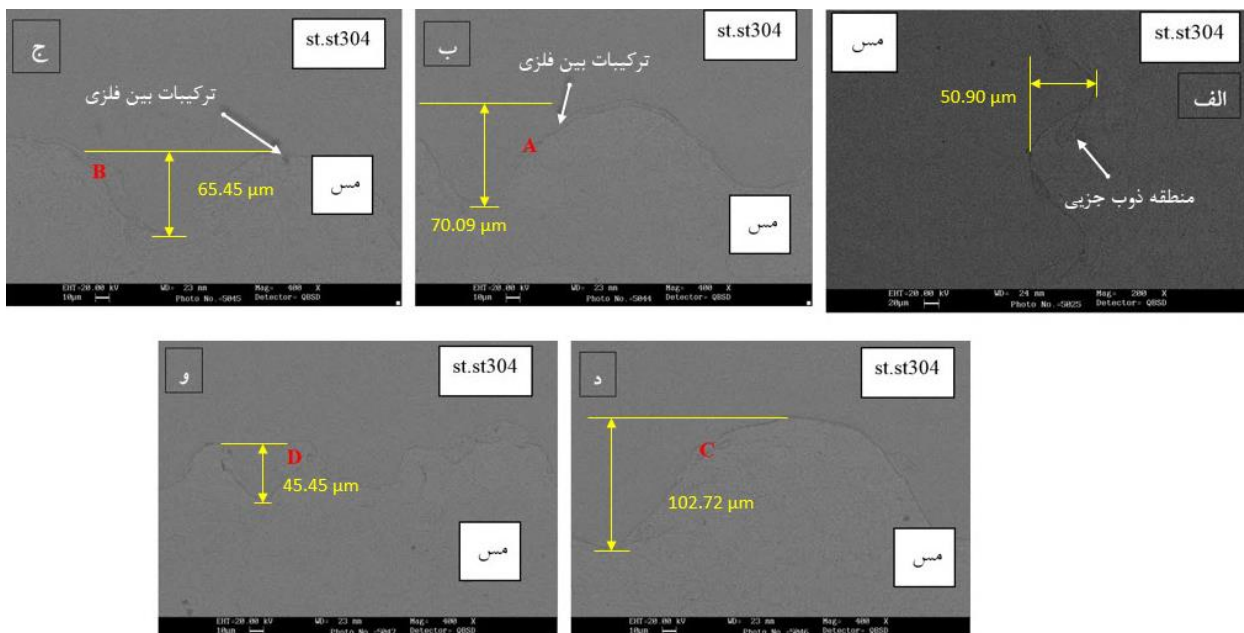


اساس فشار بالای ناشی از امواج شوکی انفجار و تغییر شکل پلاستیکی شدید و ایجاد گرمای بی‌دررو در اثر گیر افتادن گردابه در جلوی جبهه برخی امواج در اثر استحاله انرژی جنبشی به انرژی حرارتی در طول برخورد و یا حرارت آدیاباتیک ناشی از گازهای محبوس مابین صفحات ایجاد شده است [۱۳]. این مناطق موضعی با فلز سرد اطراف احاطه شده و تحت سرعت سرد شدن بالایی در حد  $10^7-10^5$  k/s قرار دارند. این مناطق کوچک در مجاورت گردابه امواج شکل (۶) مشاهده شده‌اند. از آنجایی که به دلیل تفاوت در چگالی و سرعت اشاعه موج در دو فلز، شکل امواج دارای تقارن کامل نیستند و همچنین ضریب هدایت حرارتی فولاد 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 مشاهده شده‌اند. آنالیز توزیع انرژی پرتو ایکس<sup>۶</sup> نیز برای نمونه از داخل منطقه نشان داده شده، صورت پذیرفت. نتایج این آنالیزها که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، نمایانگر ایجاد ترکیبی در مناطق موضعی از آلایژ، بوده است. برای ترکیبات غیر همجنس بر اساس انعکاس جت از صفحه با چگالی کمتر، فشار به طور عمده روی صفحه با چگالی بالاتر اعمال شده و در نتیجه گردابه تشکیل شده در عقب موج بیشتر حاوی مواد صفحه واسط و گردابه تشکیل شده در جلوی امواج بیشتر حاوی مواد صفحه پایه است. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده‌ی شکل‌گیری و رشد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک مس/فولاد با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی می‌باشد. افزایش دما و زمان عملیات منجر به فعال شدن مکانیزم نفوذ و تشکیل ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال می‌شود. در صورتی که ترکیبات بین فلزی هنگام جوشکاری انفجاری تشکیل شده باشد باعث سهولت بیشتر نفوذ اتم‌های مس و آهن هنگام عملیات حرارتی نمونه‌ها می‌شود [۱۳]. بر اساس آنالیز عنصری نمونه با ضخامت بار انفجاری ۶۳ و فاصله توقف ۲ میلی‌متر دارای تغییرات در ترکیب شیمیایی (Cu%) بیشتری نسبت به نمونه با ضخامت بار انفجاری ۴۶ و فاصله توقف ۳ میلی‌متر است.

پس از انجام عملیات حرارتی لایه نفوذی نشان داد که درصد اتمی مس به دلیل ضریب نفوذ بالاتر و همچنین ضریب هدایت حرارتی بالاتر نسبت به آهن افزایش یافته است. در فصل مشترک نمونه عملیات حرارتی شده به مدت ۸ ساعت و دمای  $350^\circ\text{C}$ ، در نقطه A در شکل (۴-ب) درصد اتمی مس و آهن به ترتیب  $65/83$  و  $25/31$  به دست آمده است. در فصل مشترک نمونه عملیات حرارتی شده به مدت ۸ ساعت و دمای  $450^\circ\text{C}$  در نقطه B در شکل (۴-ج) درصد اتمی نیکل، مس و آهن به ترتیب  $2/80$ ،  $75/49$  و  $53/17$  به دست آمده و در نقطه C در شکل (۴-د) درصد اتمی مس و آهن به ترتیب  $40/74$  و  $15/85$  می‌باشد. با افزایش دما و به دلیل هدایت حرارتی کمتر فولاد زنگ نزن آستنیتی  $304$  درصد عناصر نیکل و آهن کاهش یافته و میزان بالایی از عنصر مس موجود در قسمت مسی اتصال به درون فصل مشترک نفوذ کرده است.

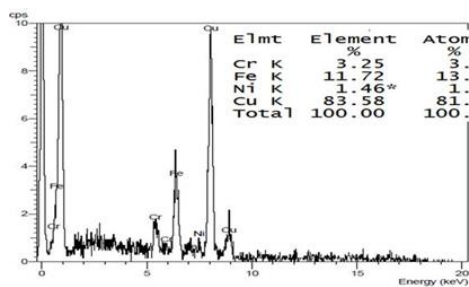
### ۳-۲-۲- بررسی ریزساختار نمونه‌های با ضخامت بار انفجاری ۶۳ و فاصله توقف ۲ میلی‌متر

شکل (۶) ریزساختار فصل مشترک و لایه بین فلزی نمونه دو را نشان داده است. بیشترین ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی همان‌گونه که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمایش داده شده  $50/90$  میکرومتر قبل از عملیات حرارتی می‌باشد. آنالیز EDS در شکل (۷) آمده است. فصل مشترک اتصال مس به فولاد به دلیل اختلاف چگالی دو آلایژ موجی گردابه‌ای نامتقارن است. در اثر برخورد صفحه پرنده، انرژی جنبشی مصرفی به انرژی پتانسیل تبدیل شده و منجر به تغییر شکل سطوح برخوردی شده است. اگر مقدار تغییر شکل پلاستیک کافی نباشد، موج‌های کوتاه ایجاد شده و منطقه ذوب موضعی پدیدار نمی‌شود. با افزایش انرژی جنبشی برخوردی تغییر شکل شدید در زیر و تاج موج ایجاد شده و در نتیجه فشارهای برخوردی بالا، گردابه‌ها در فصل مشترک اتصال ایجاد شده و این گردابه‌ها ممکن است در برخی مناطق فصل مشترک ایجاد مناطق ذوب موضعی نماید. بر اساس گفته تامهانکار و همکارانش<sup>۵</sup> حرارت داخلی ایجاد شده بر



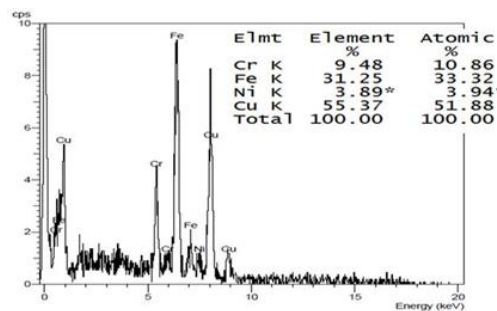
شکل (۶): تصاویر متالوگرافی نوری فصل مشترک اتصال نمونه‌های با ضخامت بار انفجاری ۶۳ و فاصله توقف ۲ میلی‌متر

(الف) نمونه بدون عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۸ ساعت (ج) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۶ ساعت (د) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۸ ساعت (و) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۶ ساعت.

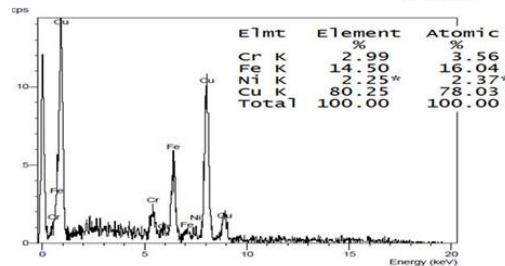


شکل (۷): آنالیز EDS از مناطق ذوب موضعی مشخص شده (شکل ۶)،

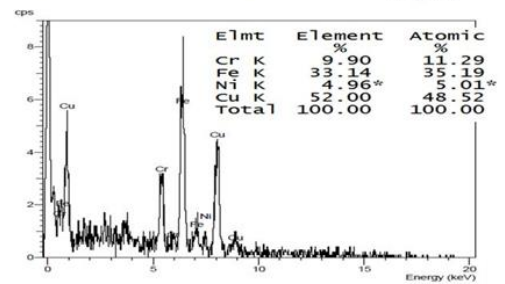
نمونه ضخامت بار انفجاری ۶۳ و فاصله توقف ۲ میلی‌متر.



A



B

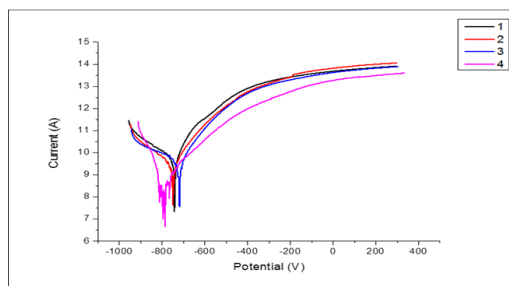


C

### ۳-۳- نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

شکل (۸) منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌های جوشکاری

انفجاری شده را نشان می‌دهد.



شکل (۸): منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های حاصل از

جوش انفجاری.

با استفاده از روش اکستراپولاسیون تافل حاصل شدند، در جدول (۳) گزارش شده است.

پارامترهای الکتروشیمیایی استخراج شده از این منحنی ها از قبیل پتانسیل خوردگی ( $E_{corr}$ )، دانسیته جریان خوردگی ( $i_{corr}$ ) (سرعت خوردگی)، شیب های تافل آنودی و کاتدی که

جدول (۳): پارامترهای الکتروشیمیایی حاصل شده از منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک به دست آمده از جوش انفجاری در محلول 3.5% NaCl در دمای محیط.

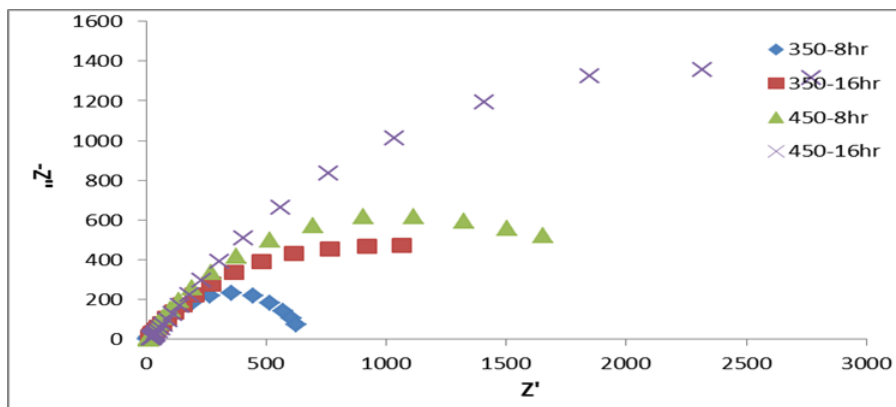
شماره نمونه	$\beta_c$ (mV dec <sup>-1</sup> )	$\beta_a$ (mV dec <sup>-1</sup> )	$E_{corr}$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A.m^{-2}$ )	زمان (hr)	دما (C°)	ضخامت ماده منفجره (mm)	فاصله توقف (mm)
۱	۲۲۷	۵۲	-۷۱۸	۳/۴۷	۸	۳۵۰	۴۶	۳
۲	۷۵	۴۸	-۷۳۸	۱/۳۴	۱۶	۳۵۰	۴۶	۳
۳	۱۵۱	۷۲	-۷۵۴	۰/۸۶	۸	۴۵۰	۴۶	۳
۴	۱۹۵	۵۲	-۸۰۵	۰/۵۶	۱۶	۴۵۰	۴۶	۳

میلی متر با افزایش زمان عملیات حرارتی، میزان مس موجود در فصل مشترک افزایش می یابد و در نتیجه اثر خوردگی ناشی از پیل گالوانیک کاهش می یابد.

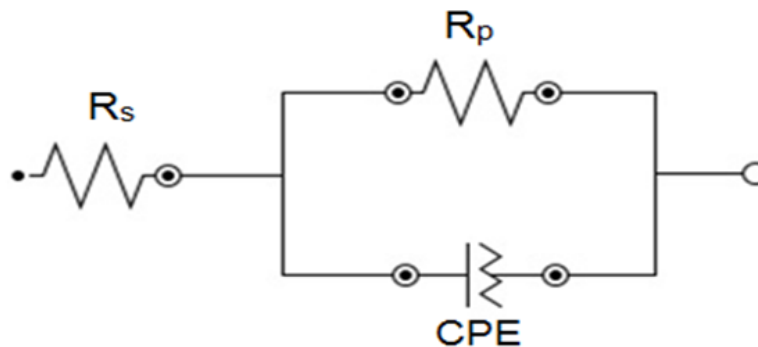
به طور کلی، موازی بودن شاخه های تافل کاتدی در شکل (۸) نشان می دهد که تصاعد هیدروژن تحت کنترل اکتیواسیون بوده و مکانیزم احیای یون های  $H^+$  بر روی سطح نمونه ها چندان تحت تأثیر عملیات اتصال قرار نمی گیرد. شاخه های آنودی در شکل (۸) متفاوت بوده و متأثر از پارامترهای مختلف عملیات حرارتی است. نتایج جدول (۳) نشان داده که با افزایش دما و زمان آنیل، پتانسیل خوردگی تقریباً ثابت مانده و چگالی جریان خوردگی از ۳/۴۷ به ۰/۵۶ میکروآمپر بر سانتی متر مربع کاهش یافته است و علت آن کاهش انرژی فصل مشترک ناشی از آزاد شدن انرژی ذخیره شده که باعث کاهش خوردگی می شود. در نمونه با ضخامت بار انفجاری ۴۶ و فاصله توقف ۳ میلی متر تغییرات ترکیب شیمیایی چندان در فصل مشترک دیده نشد اما در نمونه با ضخامت بار انفجاری ۶۳ و فاصله توقف ۲

### ۳-۴- بررسی نتایج طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی

طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) به منظور بررسی لایه سطحی ایجاد شده توسط نمونه ها در محیط خورنده به کار گرفته شد. نمودارهای نایکوئیست مربوط به نمونه های جوشکاری انفجاری شده در شکل (۹) نشان داده شده است. داده های EIS با استفاده از مدار معادل ارائه شده در شکل (۱۰) که به طور مطلوبی با نتایج تجربی تطابق داشت حاصل شده و در جدول (۴) مشاهده می شوند.



شکل (۹): منحنی های نایکوئیست نمونه های حاصل از جوش انفجاری.



شکل (۱۰): دیاگرام مدار معادل الکتریکی استفاده شده برای مدل‌سازی رفتار فصل مشترک فلز/محلول.

جدول (۴): داده‌های EIS حاصل شده از جوش انفجاری در محلول 3.5% NaCl در دمای محیط.

شماره نمونه	$n$	$C_{dl}$ ( $\mu F cm^{-2}$ )	$R_p$ ( $\Omega cm^2$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )	زمان (hr)	دما ( $^{\circ}C$ )	ضخامت ماده منفجره (mm)	فاصله توقف (mm)
۱	۰/۶۶	۸۲/۴۸	۷۱۱/۷	۸/۲۲	۸	۳۵۰	۴۶	۳
۲	۰/۸۱	۲۹/۵۷	۱۶۷۷	۱۰/۸	۱۶	۳۵۰	۴۶	۳
۳	۰/۸۰	۴۲/۴۳	۲۰۳۶	۸/۷	۸	۴۵۰	۴۶	۳
۴	۰/۸۲	۳۱/۷۳	۵۹۱۳	۱۰/۲۲	۱۶	۴۵۰	۴۶	۳
۱	۰/۶۶	۸۲/۴۸	۷۱۱/۷	۸/۲۲	۸	۳۵۰	۴۶	۳

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. CPE به ازای مقادیر  $n = 0$ ، ۱ و ۱- به ترتیب رفتار مقاومتی خالص، ظرفیتی خالص و القایی خالص نشان می‌دهد [۱۹]. در این تحقیق، قطر منحنی‌های نایکوئیست (شکل ۹) که به عنوان مقاومت پلاریزاسیون ( $R_p$ ) در نظر گرفته می‌شود، به عبارت دیگر، تنها حلقه‌های ظرفیتی موجود، مربوط به مقاومت انتقال بار بین فلز و لایه هلمهولتز خارجی (OHP) می‌باشند. این مشاهدات نشان می‌دهد که خوردگی فلز توسط یک فرایند انتقال بار کنترل می‌گردد. لایه دوگانه الکتریکی را می‌توان با کمک یک مدار معادل و ارائه مدلی مناسب از فصل مشترک فلز/محلول به‌خوبی توصیف نمود. مدار معادل الکتریکی متناظر برای نمونه‌ها در محلول در شکل (a- ۱۱) با ارائه یک مدل شماتیکی از توزیع‌های پتانسیل در فصل مشترک فلز/محلول (شکل b- ۱۱) و مقاومت‌های مربوط به لایه دوگانه (شکل c- ۱۱) مشاهده می‌شود.

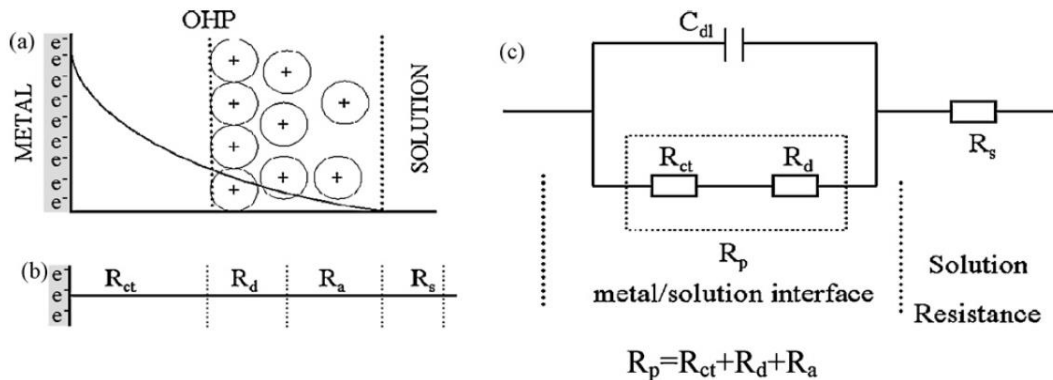
از شکل (۹) نمایان است که حلقه‌های امپدانس به‌دست آمده در منحنی نایکوئیست نسبت به یک نیم دایره کامل دارای اندکی له شدگی می‌باشند که این پدیده به عنوان اثر پایین افتادگی شناخته می‌شود. به‌طور کلی، انحراف از نیم دایره کامل به پراکندگی فرکانس و نیز ناهمگنی‌های سطح و مقاومت انتقال جرم نسبت داده می‌شود. این اختلاف توسط رفتار غیر ایده‌آل لایه دوگانه به عنوان یک خازن توصیف می‌شود؛ بنابراین، نیاز به بکارگیری یک عنصر فاز ثابت (CPE) به‌جای رفتار خازنی غیر ایده‌آل لایه دوگانه، به علت توزیع زمان‌های آسایش ناشی از غیریکنواختی‌های موجود در سطوح میکرو یا نانو همچون خشنی، لایه متخلخل، ناخالصی‌ها، جذب بازدارنده، نفوذ و غیره به‌منظور حصول همخوانی دقیق‌تر نتایج ضروری است. امپدانس یک عنصر فاز ثابت توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$Z_{CPE} = [Y_0(j\omega)^n]^{-1} \quad (1)$$

که در این رابطه  $Y_0$  فاکتور نسبی (ادمیتانس) و  $n$  ضریب غیریکنواختی سطح (اختلاف فاز) می‌باشند و هر چه عدد  $n$  بزرگ‌تر باشد، به معنی پیوستگی و یکنواختی بیشتر در فصل مشترک جوش است. در این صورت جریان خوردگی کمتر

محلول ( $R_a$ ) و مقاومت لایه نفوذی ( $R_d$ ) می باشد ( $R_p = R_{ct} + R_f + R_a + R_d$ ) [۱۹].

در حضور بازدارنده‌ها، مقاومت پلاریزاسیون ( $R_p$ ) شامل مقاومت انتقال بار ( $R_{ct}$ )، مقاومت لایه بازدارنده بر روی سطح فلز ( $R_f$ )، تمامی ذرات انباشته شده (مولکول‌های بازدارنده، محصولات خوردگی و ...) در فصل مشترک فلز



شکل (۱۱): توزیع‌های پتانسیل در فصل مشترک فلز/محلول (a)، مقاومت‌های مربوط به لایه دوگانه (b) و مدار معادل الکتریکی پیشنهادی برای محلول بدون بازدارنده [۱۹].

نمونه با ضخامت بار انفجاری ۶۳ و فاصله توقف ۲ میلی‌متر با افزایش زمان عملیات حرارتی، میزان مس موجود در فصل مشترک افزایش می‌یابد و در نتیجه اثر خوردگی ناشی از پیل گالوانیک کاهش می‌یابد. اتصال انتقالی (As-clad) آلایژ آلومینیوم AA5083 و فولاد با لایه واسط آلومینیوم خالص به روش جوشکاری انفجاری در کارخانه کشتی‌سازی تایلند مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. نتایج نشان داده که ترکیبات بین فلزی FeAl3 و Fe2Al5 در مجاورت گردابه امواج فصل مشترک تشکیل شده‌اند که در این تحقیق ترکیبات بین فلزی مشابهی ایجاد شد. در بررسی صورت پذیرفته بر روی اتصال ورق فولاد کم کربن به فولاد آستنیتی ۳۰۴ آنیل شده با استفاده از جوشکاری انفجاری تحت نسبت بارهای انفجاری مختلف مشاهده گردیده است که بهترین و مناسب‌ترین زمان عملیات حرارتی، دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۴ ساعت پیشنهاد شده است، زیرا در این زمان نسبت به زمان‌های کمتر، کاهش انرژی ذخیره شده بیشتری در بر خواهد داشت که در نتیجه باعث افزایش مقاومت به خوردگی می‌شود [۲۰] که با نتایج حاصل از این تحقیق مطابقت دارد.

ظرفیت لایه دوگانه  $C_{dl}$  از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f(-Z''_{max}) = \frac{1}{2\pi C_{dl} R_{ct}} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $-Z''_{max}$  ماکزیمم مقدار مؤلفه موهومی امپدانس می‌باشد. با توجه به جدول (۴) عدد  $n$  در نمونه ۱ کمتر از نمونه ۳ است و در نتیجه جریان خوردگی در نمونه ۱ بیشتر است که باعث کاهش مقاومت انتقال بار می‌شود. با مقایسه نمونه‌های ۱ و ۳ با دمای آنیل متغیر، زمان آنیل ثابت است و نمونه ۳ با بیشتر بودن دمای آنیل دارای عدد  $n$  (۰/۸۰) بیشتر و پس از آن نمونه ۱ ( $n=0/66$ ) است و علت آن افزایش دمای آنیل و کاهش انرژی ذخیره شده در فصل مشترک است. بر اساس نتایج حاصل از درصد اتمی لایه‌های ذوب موضعی (شکل ۵ و ۷) و نتایج حاصل از آزمون‌های الکتروشیمیایی (جدول ۳ و ۴) می‌توان دریافت که با افزایش دما و زمان فرآیند عملیات حرارتی، مقاومت به خوردگی به دلیل کاهش تغییر ناگهانی غلظت در لایه ذوب موضعی و همچنین کاهش ضخامت این لایه، پتانسیل خوردگی ناشی از پیل گالوانیک به تدریج کاهش می‌یابد. در نمونه با ضخامت بار انفجاری ۴۶ و فاصله توقف ۳ میلی‌متر تغییرات ترکیب شیمیایی چندانی در فصل مشترک دیده نشد اما در



#### ۴- نتیجه گیری

بر اساس نتایج حاصل از میکروسکوپ نوری، ضخامت لایه ذوب موضعی با افزایش دما و زمان فرآیند عملیات حرارتی به تدریج افزایش می‌یابد و درصد اتمی مس به تدریج کاهش یافته اما درصد اتمی آهن و کروم افزایش یافت.

۱- تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده‌ی شکل‌گیری و رشد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک مس/فولاد با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی می‌باشد. افزایش دما و زمان عملیات منجر به فعال شدن مکانیزم نفوذ و تشکیل ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال می‌شود. در صورتی که ترکیبات بین فلزی هنگام جوشکاری انفجاری تشکیل شده باشد باعث سهولت بیشتر نفوذ اتم‌های مس-آهن هنگام عملیات حرارتی نمونه‌ها می‌شود.

۲- با افزایش دما و زمان فرآیند عملیات حرارتی، مقاومت به خوردگی به دلیل کاهش تغییر ناگهانی غلظت در لایه ذوب موضعی و همچنین کاهش ضخامت این لایه، پتانسیل خوردگی ناشی از پیل گالوانیک به تدریج کاهش می‌یابد.

۳- از نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی می‌توان دریافت که عدد  $n$  در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $350^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت کمتر از نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $450^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت است و در نتیجه جریان خوردگی در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $350^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت بیشتر است که باعث کاهش مقاومت انتقال بار می‌شود. با مقایسه نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای  $350^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت و عملیات حرارتی شده در دمای  $450^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت با دمای آنیل متغیر، زمان آنیل ثابت است و نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $450^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت با بیشتر بودن دمای آنیل دارای عدد  $n$  ( $0/80$ ) بیشتر و پس از آن نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $350^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و زمان ۸ ساعت ( $n=0/66$ ) است و علت آن افزایش دمای آنیل و کاهش انرژی ذخیره شده در فصل مشترک است. در نمونه با ضخامت بار انفجاری ۴۶ و فاصله توقف ۳ میلی‌متر تغییرات ترکیب شیمیایی

چندانی در فصل مشترک دیده نشد اما در نمونه با ضخامت بار انفجاری ۶۳ و فاصله توقف ۲ میلی‌متر با افزایش زمان عملیات حرارتی، میزان مس موجود در فصل مشترک افزایش می‌یابد و در نتیجه اثر خوردگی ناشی از پیل گالوانیک کاهش می‌یابد.

#### ۵- مراجع

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

[2] T. Z. Blazynski, "Explosive Welding, Forming and Compaction", 1983.

[3] 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.

[۴] م. ر. خانزاده قره شیران، ا. اکرامی، ح. عربی، "بررسی تأثیر فاصله توقف بر مورفولوژی و خواص مکانیکی فصل مشترک اتصال انفجاری صفحات سه لایه ضخیم AlMg5-Al-Steel"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۹، شماره ۳، صفحه ۶۷-۷۷، ۱۳۹۴.

[۵] م. ر. خانزاده قره شیران، س. ع. ا. اکبری موسوی، ح. بختیاری، "تأثیر عملیات حرارتی بر روی ریزساختار، سختی و استحکام فصل مشترک جوش انفجاری فولاد زنگ نزن ۳۲۱ به آلومینیوم ۱۲۳۰"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۹، شماره ۴، صفحه ۴۱-۲۷، ۱۳۹۴.

[۶] م. ر. خانزاده قره شیران، ح. ناظمی، س. سالاری، "بررسی تأثیر فاصله توقف بر رفتار خوردگی اتصال انفجاری ورق‌های فولاد زنگ نزن ۳۰۴- فولاد کربنی CK 45 در محیط دریایی"، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، سال ۱۰، شماره ۹، صفحه ۴۹-۳۹، ۱۳۹۵.

[7] N. Kengkla & N.Tareelap, Proc Conf 1stMae Fah Luang University, 2012.

[8] 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.

[9] M. Acarer, "Electrical, corrosion, and mechanical properties of aluminum-copper joints produced by explosive welding", Journal of

welding and effect on interface", Journal of Materials Processing Technology, vol. 169, pp. 127-133, 2005.

[20] D. Jaramillo & A. Szecket, "On the transition from a waveless to wavy interface in explosive welding", Materials science and engineering, 1987.

## ۶- پی نوشت

- [1] Amatol
- [2] TNT
- [3] Shock Waves
- [4] Energy-dispersive spectroscopy-(EDS)
- [5] Tamhankar
- [6] Energy-dispersive spectroscopy-(EDS)

Materials Engineering and Performance, vol. 21, pp. 2375-2379, 2012.

[10] 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.

[11] N. Kahramana & B. Gulenc, "Corrosion and mechanical-microstructural aspects of dissimilar joints of Ti-6Al-4V and Al plate", International Journal of Impact Engineering, vol. 34, pp. 1423-1432, 2007.

[12] H. R. Zareie Rajani, S. A. A. Akbari Mousavi & F. Madani Sani, "Comparison of corrosion behavior between fusion cladded and explosive cladded Inconel 625/plain carbon steel bimetal plates", Materials and Design, vol. 43, pp. 467-474, 2013.

[13] E. E. Stansbury & R. A. Buchanan, "Fundamentals of electrochemical corrosion, asm international", 2000.

[14] A. Davoodi, Z. Esfahani & M. Sarvghad, "Microstructure and corrosion characterization of the interfacial region in dissimilar friction stir welded AA5083 to AA7023", Corrosion Science, vol. 107, pp. 133-144, 2016.

[15] E. Esquivel & L. E. Murr, "Observations of common micro structural issues associated with dynamic deformation phenomena: Twins, micro bands, grain size effects, shear bands, and dynamic recrystallization", Journal of Materials Science, vol. 39, pp. 1153-1168, 2004.

[16] M. Meyers, J. C. Lasalvia & V. F. Nesternko, "Dynamic recrystallization in high strain rate deformation", Proceeding of third international conference on recrystallization and related phenomena, pp. 279-286, 1997.

[17] M. A. Meyers, Y. B. Xu, & Q. Xue, "Micro structural evolution in adiabatic shear localization in stainless steel", Acta Materialia, vol. 51, pp. 1307-1325, 2003.

[18] L. E. Murr, E. Ferreyra, S. Pap, J. M. Rivas, C. Kennedy, A. Ayapu, E. I. Garcia, J. C. Sanchez, W. Huang, & C. S. Niou, "Novel deformation processes and microstructures involving ballistic penetrator formation and hypervelocity impact and penetration phenomena", Materials Characterization, vol. 37, pp. 245-276, 1996.

[19] N. Kahraman, B. Gulence, & F. Findik, "Joining of titanium/stainless steel by explosive