

## تأثیر فاصله توقف و ضخامت ماده منفجره بر خواص اتصال انفجاری

مس - فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

محمد رضا خانزاده قره‌شیران<sup>۱\*</sup>، حمید بختیاری<sup>۲</sup> و میلاد محمدجوادی<sup>۲</sup>

۱. مرکز تحقیقات مهندسی پیشرفته، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان

۲. مهندسی مواد، جوشکاری، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۸ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۲/۰۹)

**چکیده** - در این تحقیق، تأثیر متغیرهای فاصله توقف و ضخامت ماده منفجره بر خواص متالورژیکی فصل مشترک اتصال انفجاری مس به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ بررسی شده است. بررسی‌های آزمایشگاهی با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون‌های ریزسختی سنجی و استحکام سنجی کششی برشی انجام شده است. کشیدگی دانه‌ها و ریزدانه‌گی در مجاورت فصل مشترک بر اثر تغییر شکل پلاستیکی شدید اتفاق افتاده است. با افزایش متغیرهای آزمون، مناطق مذاب موضعی در مجاورت امواج افزایش یافته که ترکیب مناطق مخلوطی از عناصر صفحات پایه و پرنده بوده است. نتایج ریز سختی نشان داده با کاهش ضخامت ماده منفجره و فاصله توقف سختی در مناطق مجاور فصل مشترک در قسمت مس از ۱۰۳/۴ ویکرز به ۹۹/۸ ویکرز کاهش یافته است. همچنین در قسمت فولاد زنگ‌نزن مقدار سختی در مجاورت فصل مشترک کاهش یافته که دلیل آن بالا رفتن دما در مجاورت فصل مشترک بوده است. همچنین در آزمایش استحکام کششی برشی در ضخامت ماده منفجره ۷۹ میلی‌متر و فاصله توقف سه میلی‌متر بالاترین استحکام در حد ۲۴۴ مگاپاسگال بوده و کمترین استحکام در ضخامت ماده منفجره ۴۶ میلی‌متر و فاصله توقف سه میلی‌متر برابر ۲۰۸ مگاپاسگال به دست آمد. با کاهش مقدار ضخامت ماده منفجره و فاصله توقف، استحکام کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری انفجاری، ضخامت ماده منفجره، فاصله توقف، ریزسختی سنجی، استحکام کششی برشی.

## Effect of Standoff Distance and Explosive Material Thickness on Properties of Explosively Welded Copper and 304 Stainless Steel

M. R. Khanzadeh Gharah Shiran<sup>1\*</sup>, H. Bakhtiari<sup>2</sup> and M. Mohammad Javadi<sup>2</sup>

1. Center for Advanced Engineering Research, Islamic Azad University, Majlesi Branch, Esfahan, Iran.
2. Faculty of Material Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad, Iran.

**Abstract:** In this research, the effect of standoff distance and explosive material thickness on metallurgical features of explosive welding connection of copper to 304 stainless steel has been investigated. Experimental analysis were performed using optical microscopy, scanning electron microscopy, microhardness test and tensile shear strength test. The results indicated that due to severe plastic deformation in welding, both grain elongation and refinement occurred near the connection. Also, increasing of welding parameters led to an increase in the locally melted zones. The results showed that chemical composition of the melted zone consisted of elements of both flyer and base plates. By decreasing the explosive material thickness and standoff distance, the hardness of copper interface zone decreased from 103.4 HV to 99.8 HV. Moreover, increasing the temperature in stainless steel connection led to decreased hardness. As such, the maximum tensile shear strength of 244 MPa was observed

\* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir

*in the sample with 79 mm explosive thickness and 3 mm standoff and the minimum tensile shear strength of about 208 MPa in the sample with 46 mm explosive thickness and 3 mm standoff. By decreasing explosive thickness and standoff, the bond strength decreased, too.*

**Keywords:** Explosive welding, Explosive material thickness, Standoff distance, Microhardness test, Tensile shear strength test.

## 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<sup>۱</sup> 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 می‌گردد. در اثر فشار برخوردی بالا یک جت با سرعت بالا از دو سطح اتصال تشکیل می‌گردد که موجب ایجاد سطوح اتصالی تمیز در فصل مشترک جوشکاری و حذف آلودگی‌های سطحی می‌شود. تشکیل این جت از شرایط اساسی ایجاد پیوند مناسب در جوشکاری انفجاری است به دلیل عدم حرارت‌دهی 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 ندارند [۱] و [۲]. در زمینه تأثیر متغیرهای فاصله توقف و بار انفجار (نسبت وزن ماده منفجره به وزن صفحه پرنده) تحقیقات مختلفی صورت گرفته که به برخی اشاره می‌شود:

اتصال انفجاری مس- فولاد زنگ‌نزن توسط دورگوتلو<sup>۲</sup> و همکاران با تغییر پارامترهای بار انفجاری و فاصله توقف نیز مورد بررسی واقع شده است. نتایج نمایانگر آن بوده که با افزایش میزان این متغیرها شکل فصل مشترک از حالت مسطح به حالت موجی تغییر نموده و همچنین دامنه و طول امواج در فصل مشترک اتصال نیز افزایش یافته است. همچنین میزان سختی در فصل مشترک اتصال و سطح خارجی ورق‌ها به دلیل تغییر شکل حاصل از برخورد صفحات افزایش نشان داده و افزایش سختی در فصل مشترک با افزایش میزان بار انفجاری و فاصله توقف، افزایش یافته است. نتایج میکروسکوپی الکترونی

رویشی نشان داده که هیچ‌گونه منطقه مذاب موضعی و ترکیب بین فلزی بین این دو فلز در فصل مشترک حاصل نشده که علت آن براساس بالا بودن هدایت حرارتی مس و توزیع گرمای حاصل از برخورد به مناطق اطراف منطقه اتصال بیان شده است. دانه‌ها در منطقه فصل مشترک تغییر شکل داده و کشیده شده گزارش شده است. همچنین ملاحظه شده با افزایش دامنه و طول امواج در فصل مشترک، استحکام برش کششی فصل مشترک به دلیل افزایش سطح اتصال افزایش یافته است [۳]. دورگوتلو و همکاران تأثیر فاصله توقف بر اتصال مس به فولاد زنگ‌نزن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نمایانگر آن بوده که با افزایش میزان این متغیر، شکل فصل مشترک از حالت مسطح به حالت موجی تغییر نموده است. در فاصله توقف بسیار بالا با افزایش طول موج، فصل مشترک به صورت مسطح دیده شده است. همچنین سختی فصل مشترک در هر دو آلیاژ متناسب با مقدار فاصله توقف در اثر برخورد افزایش یافته است. گولنج<sup>۳</sup> تأثیر تغییرات بار انفجاری بر اتصال مس- آلومینیوم را بررسی نموده است. 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. سختی در مجاورت فصل مشترک و سطوح خارجی صفحات در اثر برخورد افزایش نشان داده است. آزمون خمش سه نقطه‌ای براساس استاندارد ۹۴-ASTM۲۶۳ روی نمونه‌های اتصال یافته با بارهای انفجاری متفاوت صورت پذیرفته است. کلیه نمونه‌ها در هر دو حالت قرارگیری آلومینیوم و مس در سطح داخلی جهت خمش تا زاویه ۱۸۰ درجه خم شده‌اند. هیچ جدایشی در اتصالات پس از آزمون خمش سه نقطه‌ای مشاهده نشده است [۵]. کهرمان<sup>۴</sup> و همکاران اتصال انفجاری تیتانیم به فولاد زنگ‌نزن را بررسی نموده‌اند. این دو آلیاژ توسط هندسه مورب در بارهای انفجاری متفاوت به هم اتصال یافته‌اند. نتایج میکروسکوپی نشان داده

جدول ۱- ترکیب شیمیایی صفحات جوشکاری انفجاری (درصد وزنی)

Fe	Al	Mo	V	Cu	Ni	Ti	Cr	Te	S	P	Mn	Si	C	عنصر (درصد وزنی)
۷۰/۳	۰/۰۰۱	۰/۲۷۰	۰/۰۶۶۶	۰/۲۹۸	۸/۱۸	۰/۰۰۱۹	۱۸/۳	-	۰/۰۰۴۷	۰/۰۳۶۶	۱/۷۲	۰/۳۶۸	۰/۰۳۶۵	AISI 304
-	-	-	-	۹۹/۹۹	-	-	-	۰/۰۰۱	-	۰/۰۰۳	-	-	-	Cu

انفجاری آلیاژهای فوق مورد بررسی قرار گرفته و مقدار بهینه فاصله توقف میان ورق‌ها و نیز بار انفجاری مناسب و ارتباط خواص ریز ساختاری با خواص مکانیکی بررسی شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

آلیاژهای مورد استفاده در فرایند جوشکاری انفجاری جهت ایجاد اتصال، فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ AISI و مس خالص بوده است. جوشکاری انفجاری در این حالت به صورت دو لایه با استفاده از یک لایه از جنس مس خالص و یک لایه از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ صورت پذیرفته است. ترکیب شیمیایی صفحات جوشکاری شونده در جدول (۱) نشان داده شده است. در این تحقیق ورق مس خالص به عنوان صفحه پرنده و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به عنوان صفحه پایه با ماده منفجره آماتول ۵-۹۵ و چاشنی M۶ مطابق تنظیمات شکل (۱) و جدول (۲) به یکدیگر جوش داده شده است.

فلزات ابتدا به ابعاد زیر و به صورت مستطیل شکل برشکاری شده‌اند:

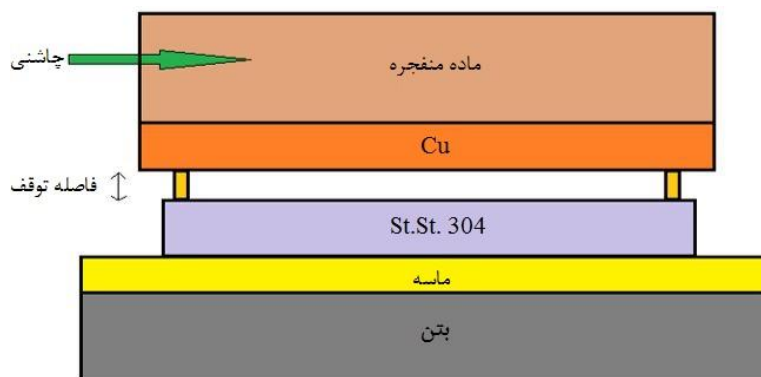
۱- صفحه پایه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به ابعاد  $۴ \times ۲۲۰ \times ۲۲۰$  میلی‌متر

۲- صفحه پرنده مس خالص به ابعاد  $۳ \times ۲۵۰ \times ۲۵۰$  میلی‌متر ورق‌ها سنباده زده و کاملاً تمیز و عاری از هرگونه آلودگی سطحی شدند. سپس ورق‌ها با محلول اتانول ۹۵ درصد یا استون شستشو داده شده و قبل آزمون با آب شسته شده و خشک شده‌اند. صفحه مسی جهت اتصال کامل لبه‌ها پس از جوشکاری و رسیدن انفجار به حالت پایدار بزرگ‌تر از ورق فولاد زنگ‌نزن در نظر گرفته شد. جهت استقرار ورق‌های مورد نظر جهت انجام فرایند جوشکاری انفجاری یک سکوی بتنی که با بستری از شن نرم یا همان ماسه بادی به عنوان لایه بافر و واسط

شده نمایانگر انتقال شکل فصل مشترک از حالت مسطح به موجی با افزایش مقدار بار انفجاری بوده است. دانه‌ها در نزدیک فصل مشترک به موازات جهت انفجار کشیده شده گزارش شده و هیچ برشی در فصل مشترک اتصال در آزمون برش کششی مشاهده نشده است. سختی متناسب با افزایش مقدار بار انفجار افزایش یافته که حداکثر سختی در نزدیک فصل مشترک مشاهده شده است [۶]. زمانی و همکاران اتصال گوه‌ای فلزات آلومینیم به مس به وسیله جوشکاری انفجاری را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که با افزایش بارگذاری انفجاری، فصل مشترک به حالت موجی شکل تغییر شکل داده و سختی اطراف فصل مشترک اتصال به دلیل موج شوک و نیز کار سرد ایجاد شده ناشی از برخورد، افزایش یافته است [۷].

در بررسی دیگر اثر تغییرات مقدار بار انفجاری بر روی اتصال مس- تیتانیم نیز ملاحظه شده که با افزایش بار انفجاری و افزایش فشار برخوردی، طول امواج و دامنه آنها در فصل مشترک زیاد شده است. همچنین با افزایش مقدار بار انفجاری، دانه‌های سمت فلز مس به سمت فصل مشترک ریزتر شده است و دانه‌ها عمدتاً موازی جهت انفجار کشیده شده‌اند [۸]. نظر به اهمیت اتصال دو لایه انفجاری فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به مس در صنعت، تأثیر هم‌زمان فاصله توقف مابین ورق‌ها و نیز میزان ضخامت ماده منفجره به عنوان جنبه نوآوری تحقیق بر روی خواص متالورژیکی فصل مشترک اتصال دو لایه انفجاری آلیاژهای فوق مورد بررسی قرار گرفته و ارتباط خواص ریزساختاری با خواص مکانیکی بررسی شده است.

نظر به اهمیت اتصال دو لایه انفجاری فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به مس در صنعت، تأثیر متغیرهای فاصله توقف مابین ورق‌ها و نیز میزان بار انفجار بر روی خواص فصل مشترک اتصال دو لایه



شکل ۱- سیستم تنظیم موازی آزمون‌های انفجاری

جدول ۲- شرایط آزمون‌های جوشکاری انفجاری مس به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

شماره آزمون	فاصله توقف (میلی‌متر)	ضخامت ماده منفجره (میلی‌متر)
۱	۳	۴۶
۲	۳	۷۹
۳	۲	۷۹

همچنین جهت ایجاد فاصله توقف‌های طراحی شده در هر آزمون، بین ورق‌های مسی و فولاد زنگ‌نزن از فاصله دهنده مسی به ارتفاع فاصله‌های توقف طراحی شده استفاده شد. جهت استقرار ماده منفجره در بالای ورق پرنده از یک جعبه با ابعاد مناسب که از جنس MDF ساخته شده و ارتفاعش معادل ضخامت ماده منفجره لازم جهت انجام آزمایش مورد نظر بود، استفاده گردید. فاصله توقف براساس ۵/۰ تا یک برابر ضخامت صفحه پرنده انتخاب شده و ضخامت ماده منفجره براساس ایجاد سرعت و فشار لازم برخوردی جهت جوشکاری انتخاب شده است.

نحوه قرارگیری نمونه‌ها به صورت سیستم آرایش موازی مطابق شکل (۱) بر روی سکوی بتنی با بستری از شن نرم به عنوان لایه بافر و واسط نشان داده شده است.

#### ۱-۲- بررسی‌های فلز شناسی فصل مشترک اتصال

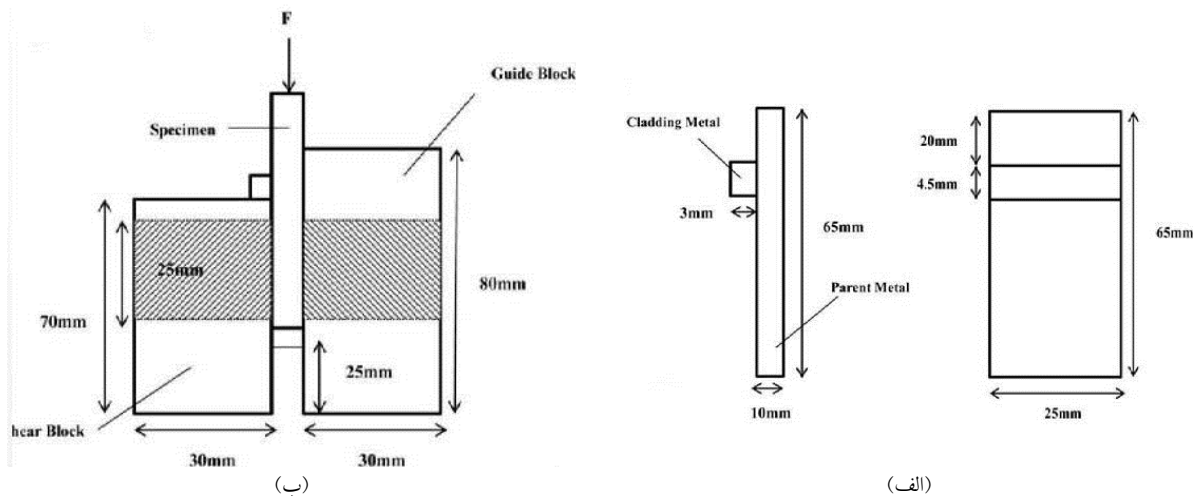
جهت اطمینان از یکنواختی و عدم وجود از هم گسیختگی جوش‌های انجام شده آزمون غیر مخرب اولتراسونیک مطابق پارامترهای جدول (۳) و براساس استاندارد ASTM A ۵۷۸ بر همه نمونه‌های جوشکاری شده انجام شد [۹].

پوشیده شده است در نظر گرفته شد. جهت اتصال‌دهی از ماده منفجره آماتول<sup>۵</sup> با ترکیب ۹۵ درصد آمونیم نیترات و پنج درصد، تری نیترتولون یا همان تی‌ان‌تی<sup>۶</sup> که دارای چگالی در حدود ۸۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب و دانه‌بندی در حدود ۱۰۰ میکرون و سرعت انفجار در حدود ۲۵۰۴ متر بر ثانیه بوده است استفاده شد. انرژی برخوردی مورد نیاز بستگی به انرژی کرنشی و استحکام تسلیم دینامیکی صفحه پرنده دارد. یک حد بالایی نیز برای انرژی برخوردی در نظر گرفته می‌شود تا از گرم شدن بیش از حد فصل مشترک اتصال و احتمال ایجاد ذوب در فصل مشترک و ایجاد ترکیبات ترد و شکننده جلوگیری گردد. به طور عمده باید استفاده از مواد منفجره قوی با سرعت بالا اجتناب گردد زیرا می‌تواند وقتی صفحه پرنده در حال پرواز است باعث ایجاد موج کششی بازگشتی گردیده و پدیده شکست<sup>۷</sup> صفحه پرنده در حین پرواز رخ دهد. سرعت انفجار همچنین کمتر از سرعت انتشار صوت در فلزات جوش شونده در نظر گرفته می‌شود.

مقادیر سرعت انفجار توسط سرعت‌سنج با سیستم الیاف نوری مورد اندازه‌گیری واقع شده و دانه‌بندی مواد نیز توسط عبور از سرندهای مش معین تعیین شده است.

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در آزمون اولتراسونیک نمونه‌های جوشکاری شده

قطر پروب (میلی‌متر)	روش آزمون	نوع پرآب	فرکانس آزمون (مگاهرتز)	ماده کوپل دهنده
۲۵	تماس مستقیم پالس-اگو	نرمال	۲/۲۵	گریس



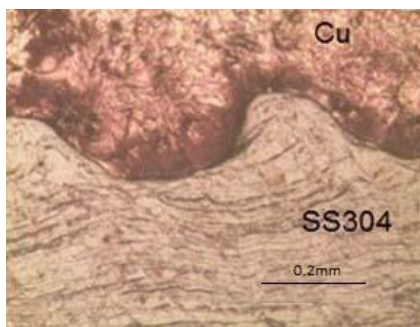
شکل ۲- روش و نمونه آزمون استحکام برشی اتصال بر اساس استاندارد DIN ۵۰۱۶۲ (الف: نمونه آزمون و ب) قید و بند و نحوه آزمون [۱۰]

پذیرفت که بدین منظور از استاندارد DIN ۵۰۱۶۲ استفاده شده است [۱۰]. شکل (۲) صورت شماتیک نمونه‌های آزمون و نیز قید و بند مورد نیاز جهت نگهداری و استقرار نمونه‌های آزمون بر روی فک‌های دستگاه فشار را نمایش می‌دهد [۱۰]. جهت تهیه نمودن نمونه‌های آزمون کشش، بلوک‌هایی به ابعاد ۲۵×۶۵ میلی‌متر از کلیه نمونه‌ها جهت بررسی استحکام اتصال قسمت مس/ فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، توسط دستگاه وایرکات برشکاری شد و سپس طبق استاندارد بیان شده و شکل (۲) نمونه‌های نهایی جهت آزمون استحکام با استفاده از ماشین ابزار فرز ساخته شدند. پس از آن نمونه‌ها بر روی فک دستگاه کشش استقرار یافته و با حرکت فک بالایی دستگاه به سمت بالا با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه آزمون فشار انجام و نیروی حداکثر شکست اتصالی برحسب نیوتن به‌دست آمده است. سپس با محاسبه دقیق مساحت زائده هر یک از نمونه‌ها، میزان تنش شکست براساس تقسیم نیروی حداکثر شکست بر مساحت زائده برای اتصالات مذکور تعیین شد.

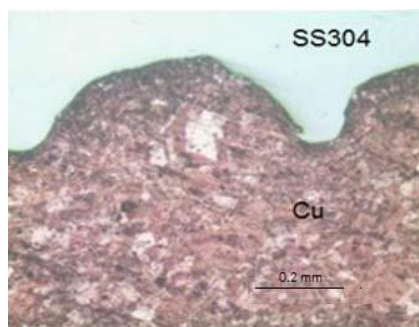
جهت انجام آزمون میکروسکوپی نوری ابتدا نمونه‌های آزمون از مناطق مورد تأیید نمونه‌های جوشکاری شده در آزمون غیرمخرب به‌وسیله دستگاه وایرکات تهیه شدند. هر یک از نمونه‌های مذکور در دو وجه عمود بر جهت انفجار و موازی با جهت انفجار با استفاده از کاغذ سنباده‌های ۶۰، ۱۲۰، ۳۲۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ سنباده‌زنی شدند و سپس توسط خمیر الماسه پولیش شدند. همچنین از محلول ۵۰ میلی‌لیتر نیتریک اسید و ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر، جهت اچ نمودن قسمت مس و محلول نیتریک اسید با خلوص ۶۵ درصد، جهت الکترو اچ نمودن قسمت فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ استفاده شد. بررسی دقیق‌تر فصل مشترک‌های اتصال نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲-۲- بررسی استحکام اتصالات انفجاری

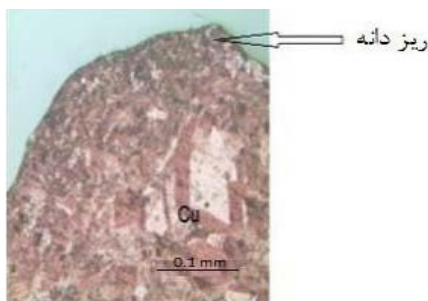
جهت بررسی میزان استحکام اتصالات حاصل از جوشکاری انفجاری، آزمون استحکام سنجی کششی- برشی صورت



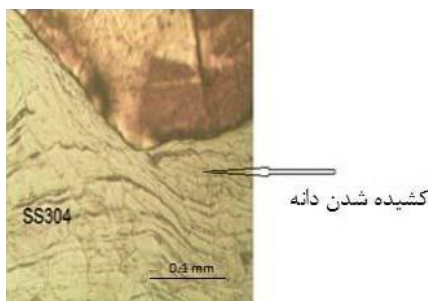
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی نوری فصل مشترک اتصال مس به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، آزمون یک: الف و ب) بزرگ‌نمایی ۱۰۰ و ج و د) بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر

### ۳-۲- بررسی سختی مقاطع عرضی اتصالات

به‌منظور بررسی تأثیر فرایند اتصال انفجاری بر میزان سختی نمونه‌ها آزمون ریزسختی‌سنجی<sup>۸</sup> بر طبق استاندارد ۱۱-۳۸۴ ASTM به‌روش سختی‌سنجی ویکرز به شرح زیر صورت گرفت [۱۱]. جهت انجام آزمون ریز سختی بار ۱۰۰ گرم استفاده شد و در دو طرف فصل مشترک‌های نمونه‌ها، سه آزمون سختی با موقعیت ۳۵، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومتر فاصله از فصل مشترک به‌صورت زیگزاگ‌وار به‌گونه‌ای که حوزه تنش‌ی هر یک از آزمون‌های سختی تأثیری بر روی آزمون سختی بعدی نداشته باشد، صورت پذیرفت.

### ۳- نتایج و بحث

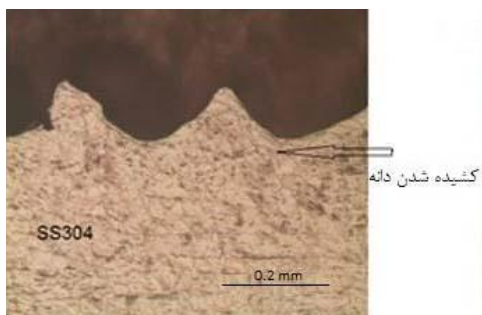
#### ۳-۱- نتایج بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری

شکل (۳) نمایانگر تصاویر میکروسکوپی نوری فصل مشترک اتصال شماره یک است. فصل مشترک حاصله موجی شکل است. با افزایش میزان ضخامت ماده منفجره و فاصله توقف،

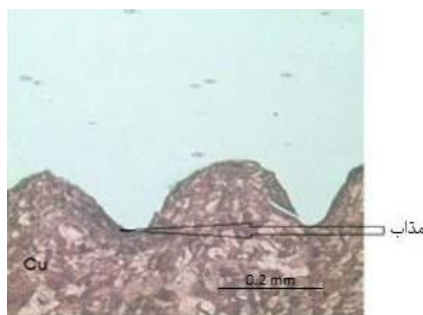
سرعت حرکت صفحه پرنده جهت برخورد افزایش می‌یابد. همچنین انرژی جنبشی مصرفی ناشی از برخورد از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۲]:

$$\Delta KE = \frac{m_D m_C V_p^2}{2(m_D + m_C)} \quad (1)$$

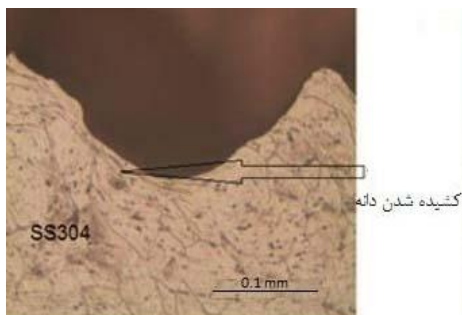
که در این رابطه  $m_D$  و  $m_C$  جرم صفحات پرنان و پایه در واحد سطح می‌باشند. با افزایش میزان ضخامت ماده منفجره و افزایش سرعت برخوردی صفحه پرنده، انرژی جنبشی مصرفی ناشی از برخورد در فصل مشترک اتصال براساس رابطه (۱) افزایش یافته و شکل فصل مشترک به سمت گردابه‌ای شدن با افزایش طول و دامنه امواج تغییر شکل داده است. با افزایش میزان بار انفجاری، تغییر شکل صفحه پرنان و فصل مشترک در حین برخورد بیشتر شده است. با بالا رفتن فشار از استحکام تسلیم دینامیکی دو فلز در نقطه برخورد و همچنین به‌علت تفاوت موثتم فشاری در دو سمت فصل مشترک که در نتیجه تفاوت در چگالی و سرعت حرکت موج دو فلز است، نقطه



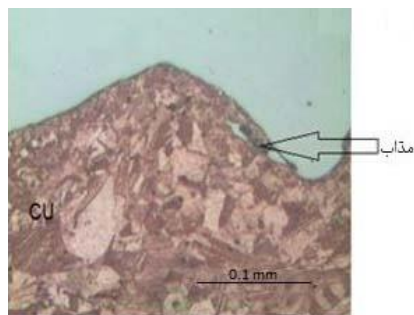
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی نوری فصل مشترک اتصال مس به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، آزمون دو:

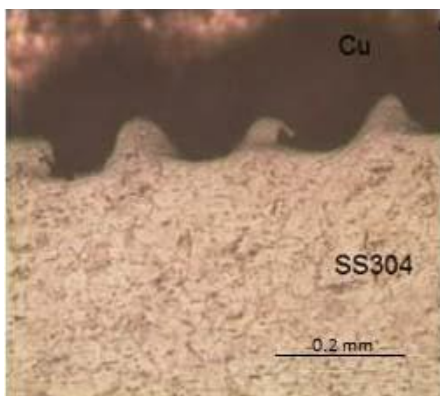
الف و ب) بزرگ‌نمایی ۱۰۰ ج و د) بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر

کرنش بالا در حین فرایند و کرنش پلاستیک شدید و پیک دمایی بالا در جلوی موج شوک می‌تواند باعث ایجاد شرایط بازیابی و یا تبلور مجدد دینامیکی در ساختار شود و به‌عنوان نیروی محرکه این سازوکارها عمل کند. در زمان‌های بسیار کوتاه عبور شوک از ریزساختار، تبلور مجدد دینامیکی براساس مکانیزم مهاجرت مرزهای دانه<sup>۹</sup> نمی‌تواند در حین تغییر شکل سریع رخ دهد. تحقیقات میر در زمینه تغییرات ریزساختار در اثر عبور موج شوک نشان داده که مکانیزم تبلور مجدد چرخشی<sup>۱۰</sup> می‌تواند به‌عنوان مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی در فرایندهای با نرخ تغییر شکل بالا و در زمان‌های بسیار کوتاه نظیر برخورد و جوشکاری انفجاری معرفی شود. تبلور مجدد چرخشی هم‌زمان با تغییر شکل پلاستیک در محدوده دمایی ۰/۴-۰/۵ دمای ذوب اتفاق می‌افتد [۱۳-۱۶].

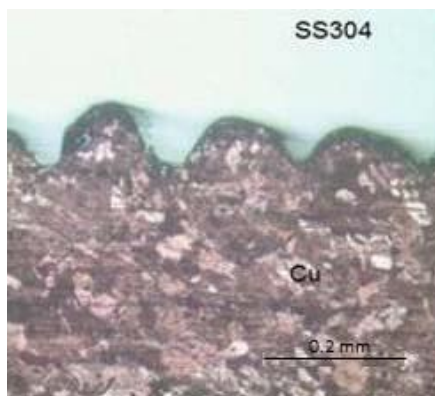
شکل (۴) نمایانگر تصاویر میکروسکوپی نوری فصل مشترک اتصال شماره دو است، طول موج میانگین برابر ۰/۴۵۱۹ میلی‌متر و ارتفاع میانگین برابر ۰/۰۶۱۲ میلی‌متر است که نزدیک بودن چگالی مس به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، باعث

برخورد در هنگام اتصال دچار نوسان شده و این نوسانات با افزایش سرعت برخورد افزایش یافته و مواد در مجاورت نقطه برخورد در حجم بزرگ‌تری استحکام خود را از دست داده و رفتار پلاستیک شبه سیال از خود نشان می‌دهند. در نتیجه طول موج در فصل مشترک اتصال با افزایش سرعت برخورد افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر زاویه برخورد، قله موج در حرکت موج انفجاری تغییر شکل پیدا نموده و فصل مشترک گردابه‌ای ایجاد شده است [۱۲]. متفاوت بودن شکل امواج در فصل مشترک، ناشی از تغییر زاویه دینامیکی برخورد حین فرایند جوشکاری است. در این نمونه، طول موج و ارتفاع میانگین امواج به‌ترتیب برابر با ۰/۱۸۳۱ و ۰/۰۲۹۹ میلی‌متر است. همچنین شکل (۳) نشان می‌دهد که کشیدگی دانه‌ها و ریزدانه‌ها در اثر تغییر شکل پلاستیکی شدید ناشی از برخورد ایجاد شده است. این نتایج در تحقیقات کهرمان و همکاران نیز دیده می‌شود [۶]. اندازه دانه به‌ندرت با عبور موج شوک در ساختار تغییر می‌کند مگر آنکه دمای موج شوکی منجر به آنیل نمودن و یا تبلور مجدد و رشد دانه‌ها شود. وجود نرخ

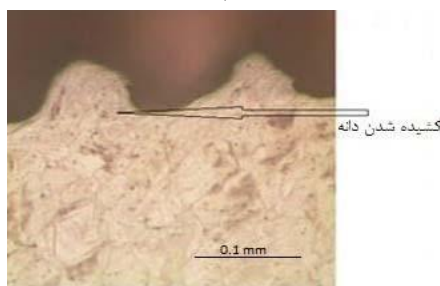




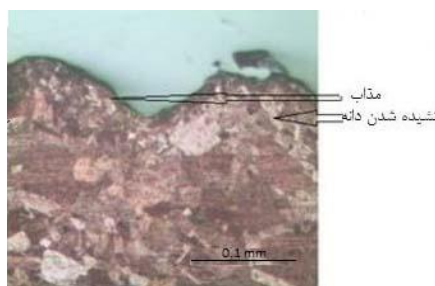
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی نوری فصل مشترک اتصال مس به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ بعد از اج، آزمون سه:

(الف و ب) بزرگ‌نمایی ۱۰۰ ج و (د) بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر

### ۳-۲- نتایج بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپی الکترونی روبشی

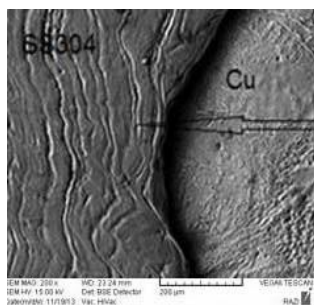
شکل (۶) نمایانگر تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه شماره یک است. همان‌طور که تصاویر نشان می‌دهند فصل مشترکی موجی در اتصال مس به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در این آزمون ایجاد شده است. همچنین در شکل‌های (۶-ب) و (۶-ج) به ترتیب کشیدگی دانه و مناطق ذوب موضعی منجمد شده مشاهده می‌شود. علت آن چرخش و گیر افتادن جت جهنده در مجاورت امواج است. هرچه ضخامت ماده منفجره افزایش یابد، انرژی برخوردی افزایش یافته و باعث تشکیل مذاب در مجاورت امواج می‌شود.

در جوشکاری انفجاری دو فصل مشترک فلز به فلز و فلز به مذاب ایجاد یافته می‌تواند در فصل مشترک حاصل شود. در اثر برخورد صفحه پرنده، انرژی جنبشی مصرفی به انرژی

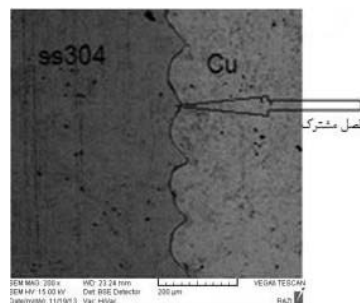
ایجاد فصل مشترک موجی متقارن شده است. با افزایش میزان ضخامت ماده منفجره طول و ارتفاع امواج نسبت به آزمون یک به دلیل افزایش سرعت برخوردی و انرژی جنبشی برخوردی، افزایش یافته است. همچنین این نمونه به دلیل بالا بودن مقدار متغیرهای آزمون دارای بالاترین طول موج در جوشکاری است.

شکل (۵) نمایانگر تصاویر میکروسکوپی نوری فصل مشترک اتصال شماره سه است. در این نمونه، طول موج و ارتفاع میانگین امواج به ترتیب برابر با ۰/۳۷۷۵ و ۰/۰۸۳۳ است. به علت تغییر شکل پلاستیک شدید، کشیدگی دانه‌ها رخ داده است. با کاهش فاصله توقف میزان طول موج در این نمونه به نسبت نمونه شماره دو کاهش یافته است. علت کاهش ارتفاع موج نمونه دوم نسبت به نمونه سوم می‌تواند براساس مکانیزم بازگشت امواج شوکی در فصل مشترک اتصال در نمونه شماره دو که میزان فاصله توقف و انرژی جنبشی برخوردی آن بیشتر است توجیه شود [۲].

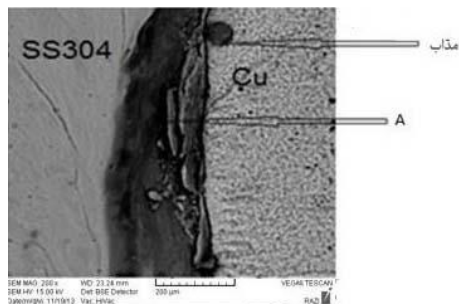




(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فصل مشترک، آزمون یک: الف) فصل مشترک (ب) کنشیدگی دانه و ج) منطقه ذوب موضعی A

نتیجه احتمال تشکیل ترکیبات بین فلزی متصور است [۱، ۲ و ۱۷]. نتایج آزمون طیف‌سنجی تفریق انرژی از منطقه ذوب موضعی A، در شکل (۶-ج) در جدول (۴) و شکل (۷) آمده است. نتایج این ارزیابی‌ها نمایانگر ایجاد ترکیبی مخلوط در این مناطق موضعی از دو آلیاژ براساس حرکت تلاطمی و چرخشی جت گیر افتاده تشکیل شده از هر دو صفحه پایه و پرنده در این مناطق است.

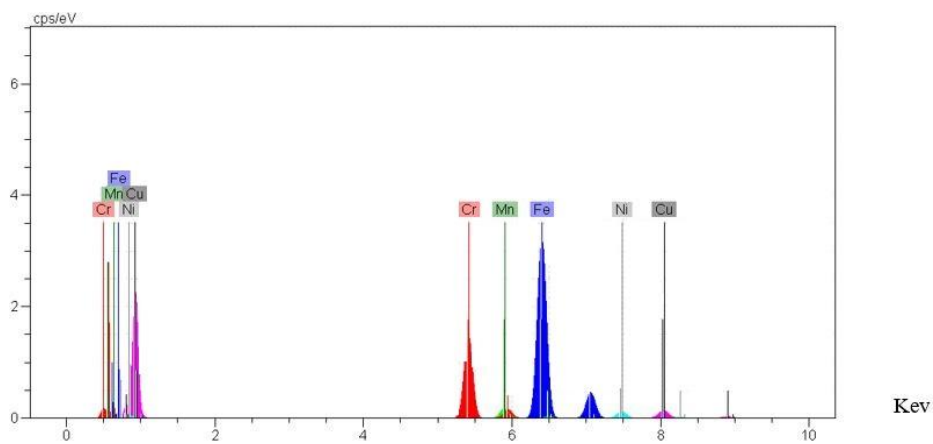
شکل (۸) نمایانگر تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از فصل مشترک اتصال دو است. همان‌طور که مشخص است مذاب منجمد شده موضعی در مجاورت فصل مشترک تشکیل شده است.

همچنین به دلیل ماهیت ترد ترکیبات تشکیل شده در این مناطق ترک در داخل این مناطق مطابق شکل (۸-ب) مشاهده می‌شود. مقایسه شکل‌های (۸-الف) و (۶-الف) نشان می‌دهد با افزایش ضخامت ماده منفجره به دلیل افزایش انرژی برخوردی بر میزان این مناطق در مجاورت امواج فصل مشترک افزوده

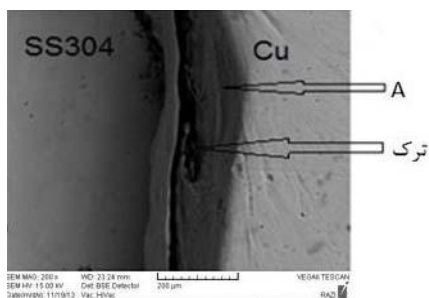
پتانسیل تبدیل شده و منجر به تغییر شکل سطوح برخوردی می‌شود. اگر مقدار تغییر شکل پلاستیک کافی نباشد موج‌های کوتاه ایجاد شده و منطقه ذوب موضعی پدیدار نمی‌شود. با افزایش انرژی جنبشی برخوردی تغییر شکل شدید در زیر و تاج موج ایجاد می‌شود و در نتیجه فشارهای برخوردی بالا، گردابه‌ها می‌توانند در فصل مشترک اتصال ایجاد شوند و این گردابه‌ها ممکن است در برخی مناطق فصل مشترک ایجاد مناطق ذوب موضعی نمایند. این مناطق توسط حرارت داخلی ایجاد شده براساس فشار بالای ناشی از امواج شوکی انفجار و تغییر شکل پلاستیکی شدید و ایجاد گرمای آدیاباتیک (بی‌درو) 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 می‌تواند ایجاد شده باشد. این مناطق موضعی با فلز سرد اطراف احاطه شده و تحت سرعت سرد شدن بالایی در حد  $10^5 - 10^7$  کلوین بر ثانیه قرار دارند، در

جدول ۴- درصد عناصر در آزمون طیفسنجی تفریق انرژی از منطقه ذوب موضعی A در شکل ۶- ج

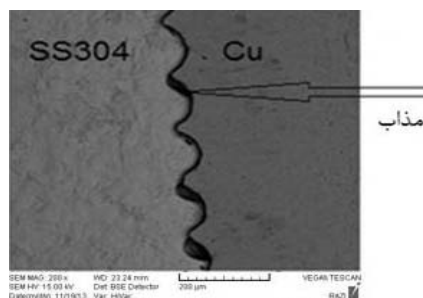
عنصر	درصد اتمی	درصد وزنی
Cr	۱۶/۸	۱۵/۵
Mn	۲/۷	۲/۶
Fe	۶۹/۷	۶۹/۱
Ni	۳/۹	۴/۱
Cu	۶/۷	۷/۶



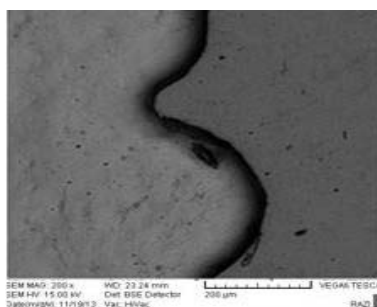
شکل ۷- آزمون طیفسنجی تفریق انرژی از منطقه ذوب موضعی A در شکل ۶- پ



(ب)

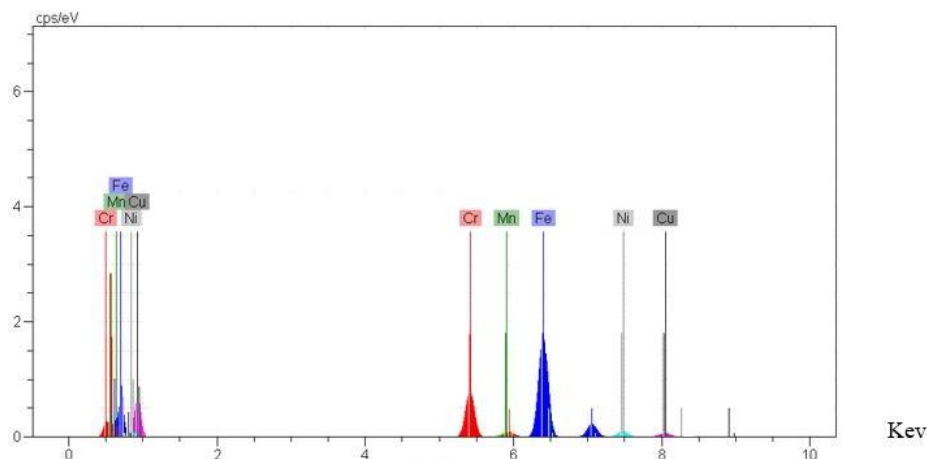


(الف)



(ج)

شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، آزمون دو: الف) فصل مشترک، ب) ترک و منطقه ذوب موضعی A، ج) منطقه گردابه مجاور امواج در بزرگ‌نمایی بیشتر



شکل ۹- آزمون طیف‌سنجی تفریق انرژی از منطقه ذوب موضعی A در شکل (۸-ب)

جدول ۵- درصد وزنی عناصر آزمون طیف‌سنجی تفریق انرژی از منطقه ذوب موضعی A در شکل (۸-ب)

عنصر	درصد اتمی	درصد وزنی
Cr	۵/۱۶	۹/۱۴
Mn	۲/۲	۹/۱
Fe	۳/۷۰	۱/۶۴
Ni	۶/۵	۴/۵
Cu	۵/۵	۸/۵

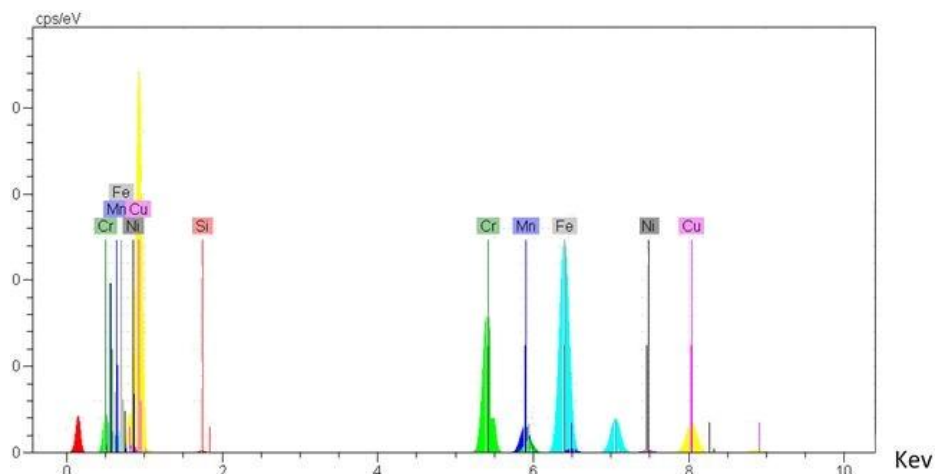
به دلیل بالا بودن ضخامت ماده منفجره در این نمونه مناطق ذوب موضعی در مجاورت امواج مشاهده می‌شوند. نتایج این آزمون‌ها نمایانگر ایجاد ترکیبی مخلوط در این مناطق موضعی از دو آلیاژ براساس حرکت تلاطمی و چرخشی جت گیر افتاده تشکیل شده از هر دو صفحه پایه و پرنده در این مناطق است.

نتایج ارزیابی منطقه ذوب موضعی نشان می‌دهد ترکیب شیمیایی در نقاط مختلف مناطق ذوب موضعی متفاوت بوده که علت آن سرعت بالای انجماد منطقه ذوب موضعی است که اجازه اختلاط کامل مذاب و ایجاد یک ترکیب شیمیایی یکنواخت را نمی‌دهد در نتیجه تفاوت آنالیزی در نقاط مختلف مشاهده می‌شود.

### ۳-۳- نتایج ریزسختی سنجی

در جوشکاری انفجاری صفحه پرنده تحت یک موج شدید

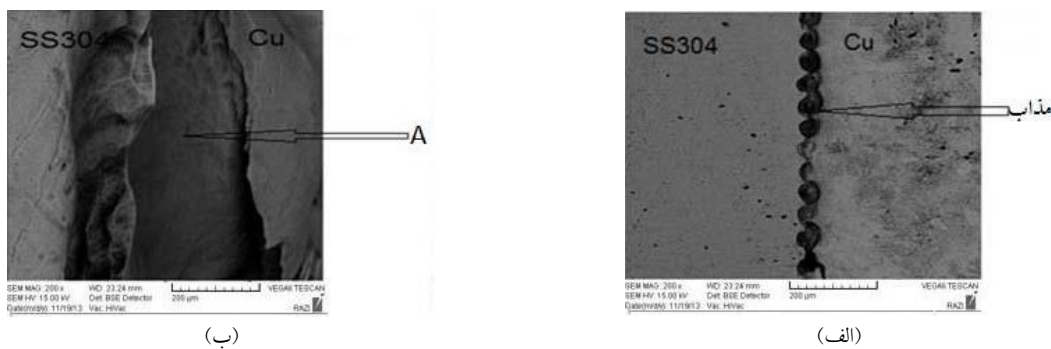
شده است. شکل (۹) بیانگر نتایج آزمون طیف‌سنجی تفریق انرژی از منطقه ذوب موضعی شکل (۸-ب)، است که نتایج حاصل از آن در جدول (۵) آمده است. شکل (۱۰) و جدول (۶) نیز نمایانگر نتایج آنالیز نقطه‌ای از قسمت دیگر همان منطقه ذوب موضعی شکل (۸-ب) می‌باشند. نتایج این آنالیزها نمایانگر ایجاد ترکیبی مخلوط در این مناطق موضعی از دو آلیاژ براساس حرکت تلاطمی و چرخشی جت گیر افتاده تشکیل شده از هر دو صفحه پایه و پرنده در این مناطق است. شکل (۱۱) نمایانگر تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال سه است. در جدول (۷) و شکل (۱۲) نتایج آزمون طیف‌سنجی تفریق انرژی حاصل از منطقه ذوب موضعی A که در شکل (۱۱-ب) مشخص شده، آمده است. همچنین شکل (۱۳) و جدول (۸) نیز نمایانگر نتایج آنالیز نقطه‌ای از قسمت دیگر همان منطقه ذوب موضعی شکل (۱۱-ب) می‌باشند.



شکل ۱۰- آزمون طیف‌سنجی تفریق انرژی از قسمت دیگری از منطقه ذوب موضعی A در شکل (۸-ب)

جدول ۶- درصد وزنی عناصر آزمون طیف‌سنجی تفریق انرژی از قسمت دیگر منطقه ذوب موضعی A در شکل (۸-ب)

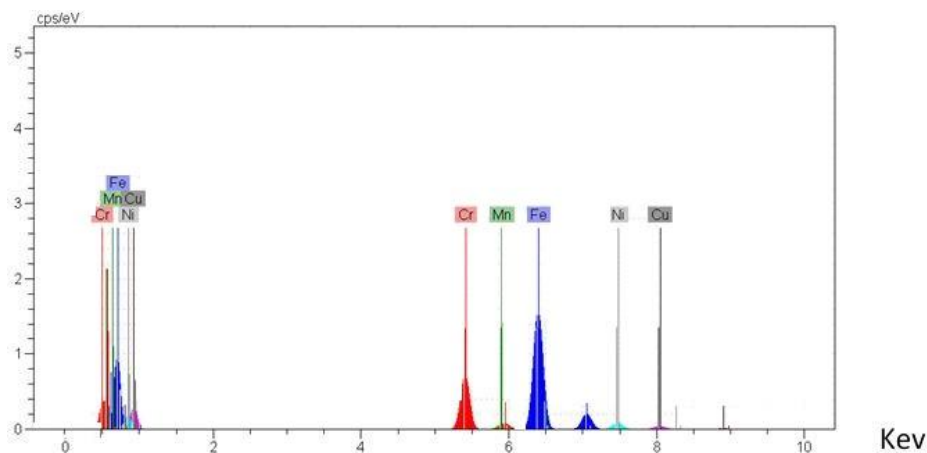
عنصر	درصد اتمی	درصد وزنی
Cr	۲۰/۱	۱۸/۶
Mn	۵/۳	۵/۲
Fe	۵۷/۱	۵۶/۷
Ni	۰/۲	۰/۲
Cu	۱۶/۸	۱۹



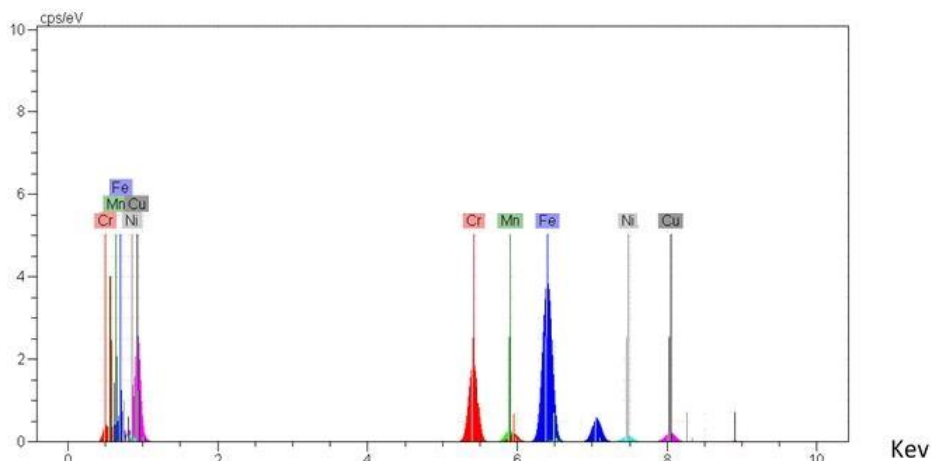
شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی آزمون سه: الف) فصل مشترک و ب) منطقه ذوب موضعی A

جدول ۷- درصد وزنی عناصر آزمون طیف‌سنجی تفریق انرژی از منطقه ذوب موضعی A در شکل (۱۱-ب)

عنصر	درصد اتمی	درصد وزنی
Cr	۱۷/۵	۱۴/۷
Mn	۱/۹	۱/۷
Fe	۷۰/۸	۶۳/۹
Ni	۵/۵	۵/۲
Cu	۴/۱	۴/۲



شکل ۱۲- آزمون طیفسنجی تفریق انرژی از منطقه ذوب موضعی A در شکل (۱۱-ب)



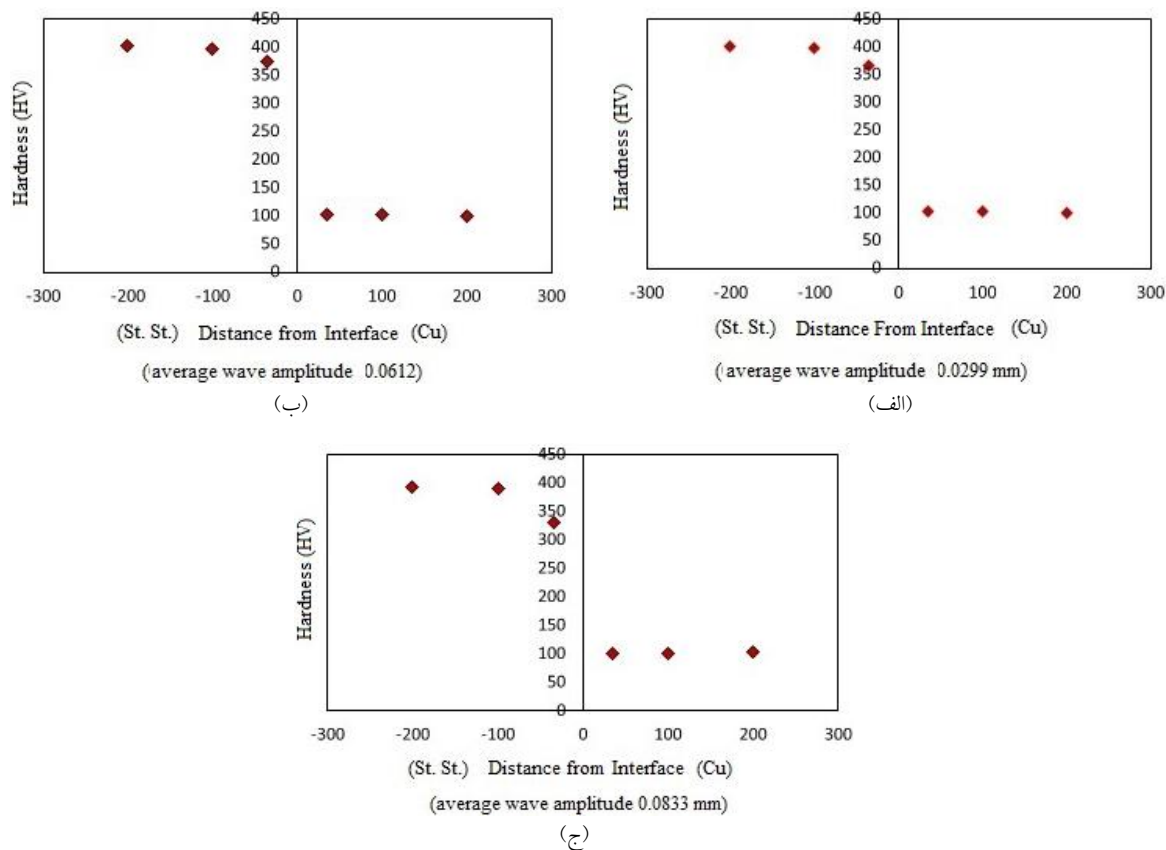
شکل ۱۳- آزمون طیفسنجی تفریق انرژی از قسمت دیگر منطقه ذوب موضعی A در شکل (۱۱-ب)

جدول ۸- درصد وزنی عناصر آزمون طیفسنجی تفریق انرژی از قسمت دیگر منطقه ذوب موضعی A در شکل (۱۱-ب)

درصد وزنی	درصد اتمی	عنصر
۱۶/۸	۱۸/۱	Cr
۳/۵	۳/۵	Mn
۶۷/۹	۶۷/۸	Fe
۳/۶	۳/۴	Ni
۸	۷	Cu

سختی و پدیده سخت شدن شوکی<sup>۱۱</sup> می‌شوند. پروفیل‌های سختی نمونه‌های اتصال یافته در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود. در نمونه، یک سختی سمت فولادی در نزدیک فصل مشترک ۳۶۵/۵ ویکرز و در سمت مسی ۱۰۳/۳ ویکرز بوده است. در

تنشی ناشی از انفجار ماده منفجره در تماس با آن قرار گرفته و هر دو صفحه پرنده و صفحه پایه یک موج شدید تنشی را در اثر برخورد با شدت و سرعت بالا تحمل می‌کنند. این موج‌های شدید تنشی باعث ایجاد تغییرات متالورژیکی و ازدیاد میزان



شکل ۱۴- پروفیل ریز سختی در نزدیک فصل مشترک اتصالات: الف) آزمون یک، ب) آزمون دو، ج) آزمون سه

نسبت به نمونه یک به دلیل کاهش فاصله توقف و در نتیجه کاهش سرعت برخوردی صفحه پرنده و افزایش دما ناشی از افزایش ضخامت ماده منفجره در مجاورت فصل مشترک دارای سختی پایین تری است. نتایج در کلیه نمونه‌ها نشان می‌دهد با که این کاهش ممکن است در اثر ایجاد حرارت ناشی از فشار برخوردی بالاتر در مناطق مجاور فصل مشترک صفحه پایه و انجام عمل آنیل در منطقه فصل مشترک اتصال به وجود آید.

#### ۴-۳- نتایج استحکام کششی برشی

جدول (۹) نتایج آزمون استحکام کششی برشی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بیشترین فاصله توقف و ضخامت ماده منفجره مربوط به نمونه شماره دو بوده و بالاترین استحکام برشی ۲۴۴/۴۲ نزدیک شدن به فصل مشترک سختی سمت فولادی کاهش یافته مگاپاسکال نیز در همین نمونه به دست آمده است که این

نمونه دو، در سمت فولادی نزدیک فصل مشترک، سختی ۳۷۵/۵ ویکرز و در سمت مسی سختی در حد ۱۰۳/۷ ویکرز بوده است. با افزایش میزان ضخامت ماده منفجره و افزایش انرژی جنبشی برخوردی سختی نسبت به نمونه یک در مجاورت فصل مشترک افزایش نشان می‌دهد. همچنین این نمونه به دلیل بالا بودن فاصله توقف و ضخامت ماده منفجره نسبت به تمامی نمونه‌ها دارای سختی بیشتری در مجاورت فصل مشترک صفحه پایه و پرنده است. در قطعه سه سختی در نزدیکی فصل مشترک در سمت فولادی ۳۲۹/۰ ویکرز در قسمت فولادی و ۱۰۰/۴ ویکرز در نزدیک فصل مشترک قسمت مسی بوده است. این نمونه نسبت به نمونه دو با فاصله توقف بیشتر دارای سختی کمتری در مجاورت فصل مشترک در صفحات پایه و پرنده است که علت آن کاهش سرعت و انرژی جنبشی برخوردی با کاهش فاصله توقف است. نمونه سه

#### جدول ۹- نتایج آزمون استحکام کششی برشی نمونه‌ها

شماره آزمون	استحکام کششی برشی (مگاپاسکال)
۱	۲۰۸/۴
۲	۲۴۴/۴۲
۳	۲۴۲/۴۴

ماده منفجره بر خواص متالورژیکی فصل مشترک اتصال انفجاری ورق‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴- مس صورت گرفته و نتایج زیر حاصل شد:

۱- به دلیل تغییر شکل پلاستیکی شدید در فصل مشترک اتصال کشیدگی دانه‌ها و ریز شدن دانه‌ها در اثر تبلور مجدد دینامیکی ایجاد شده است.

۲- با افزایش فاصله توقف و ضخامت ماده منفجره گردابه‌ای شدن امواج و به همراه تشکیل مناطق ذوب موضعی در فصل مشترک رخ داده است که ترکیب این مناطق مخلوطی از عناصر صفحات پایه و پرنده مسی و فولادی بوده است. همچنین ترک در داخل این مناطق به دلیل ماهیت ترد آن تشکیل شده است.

۳- بیشینه سختی در مجاورت فصل مشترک نمونه با فاصله توقف سه میلی‌متر و ضخامت ماده منفجره ۷۹ میلی‌متر بوده که این افزایش سختی به دلیل افزایش سرعت حرکت صفحه پرنده و تغییر شکل پلاستیک شدید در حین برخورد بوده است.

۴- سختی صفحه پایه فولادی در کلیه نمونه‌ها با نزدیک شدن به نزدیک فصل مشترک کاهش نشان داده است.

استحکام بیشینه در نمونه با فاصله توقف ۳ میلی‌متر و ضخامت ماده منفجره ۷۹ میلی‌متر بوده و نتایج نشان داده در فاصله توقف یکسان با افزایش ضخامت ماده منفجره و در ضخامت ماده منفجره یکسان با افزایش فاصله توقف به دلیل افزایش سرعت برخورد و انرژی جنبشی برخوردی، کار سختی بیشتری در فصل مشترک ایجاد شده و استحکام افزایش یافته است.

موضوع به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید در فصل مشترک مس- فولاد است به طوری که فصل مشترک موجی‌تر از جوش‌های دیگر طبق شکل‌های (۴) و (۸) ایجاد شده است که در این فصل مشترک موجی یک قفل مکانیکی به وجود آمده که بر افزایش استحکام مؤثر بوده است. نتایج نشان می‌دهد در فاصله توقف یکسان با افزایش ضخامت ماده منفجره و در ضخامت ماده منفجره یکسان با افزایش فاصله توقف به دلیل افزایش سرعت برخورد و انرژی جنبشی برخوردی، کار سختی بیشتری در فصل مشترک ایجاد شده و استحکام افزایش یافته است. میزان استحکام در نمونه‌های دو و سه نزدیک به یکدیگر است علت این موضوع افزایش ارتفاع امواج در نمونه سه نسبت به نمونه شماره دو است که باعث ایجاد قفل مکانیکی بیشتر و افزایش میزان استحکام تا نزدیک سطح نمونه دو شده است. همچنین با مقایسه شکل‌های (۸) و (۱۱) مشاهده می‌شود میزان مناطق ذوب موضعی در فصل مشترک اتصال نمونه دو به نسبت کمتر بوده که این موضوع نیز بر افزایش استحکام این نمونه مؤثر بوده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بررسی تأثیر متغیرهای فاصله توقف و ضخامت

#### واژه‌نامه

1. standoff distance
2. Durgutlu
3. Gulenc
4. Kahraman
5. Ammatol
6. Trinitrotoluene (TNT)

7. spalling
8. microhardness
9. grain boundary migration
10. rotational recrystallization
11. shock hardening



- Blazynski, T. Z., *Explosive Forming, Welding and Compaction*, Applied Science Publisher: London and New York, p. 402, 1983.
- Crossland, B., *Explosive Welding of Metals and its Application*, Clarendon Press: Oxford, p. 233, 1982.
- Durgutlu, A., Gulenc, B., and Findik, F., "Examination of Copper/Stainless Steel Joints Formed by Explosive Welding", *Materials & Design*, Vol. 26, pp. 497-507, 2005.
- Durgutlu, A., Okuyucu, H., and Gulenc, B., "Investigation of Effect of the Stand-off Distance on Interface Characteristics of Explosively Welded Copper and Stainless Steel", *Materials & Design*, Vol. 29, pp. 1480-1484, 2008.
- Gulenc, B., "Investigation of Interface Properties and Weldability of Aluminum and Copper Plates by Explosive Welding Method", *Materials & Design*, Vol. 29, pp. 275-278, 2008.
- Kahraman, N., Gulenc, B., and Findik, F., "Joining of Titanium/Stainless Steel by Explosive Welding and Effect on Interface", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169, pp. 127-133, 2005.
- زمانی، ج.، باقری، س. م. و مهدی پور عمرانی، ع.، "اتصال گوه‌ای فلزات آلومینیوم و مس به وسیله جوشکاری انفجاری و بررسی فصل مشترک اتصال"، *مجله مکانیک هوافضا*، سال ۵، شماره ۳، ص ۲۷-۳۹، ۱۳۸۸.
- Kahraman, N., and Gulenc, B., "Microstructural and Mechanical Properties of Cu-Ti Plates Bonded through Explosive Welding Process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169, pp. 67-71, 2005.
- ASTM A578, *Standard Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Rolled Steel Plates for Special Applications*, Book of Standards, p. 5, Vol. 01.04, 2012.
- DIN Standard Number 50162, *Determination of Shear Strength between Cladding Metal and Parent Metal in Shear Test*, Book of Standards, 1975.
- ASTM 384-11, *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*, Book of Standards, p.43, 2011.
- خانزاده قره‌شیران، م.، اکبری موسوی، س. ا. ا.، آماده، ا. ع.، و لیاقت، غ.، "بررسی جوشکاری انفجاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به فولاد گرم کار H13"، رساله دکتری مهندسی مواد دانشکده مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۳۹۱.
- Montheillet, F., and Thomas, J. P., "Dynamic Recrystallization of Low Stacking Fault Energy Metals" *Metallic Materials with High Structural Efficiency*, pp. 357-367, 2004.
- Meyers, M., and Nesternko, V. F., "Observation and Modeling of Dynamic Recrystallization in High Strain and High Strain Rate Deformation of Metals", *Journal of Physics*, Vol. 10, pp. 51-56, 2000.
- Meyers, M. A., Xu, Y. B., and Xue, Q., "Microstructural Evolution in Adiabatic Shear Localization in Stainless Steel", *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 1307-1325, 2003.
- Meyers, M., and Nesternko, V. F., "Shear Localization in Dynamic Deformation of Materials: Microstructural Evolution and Self-Organization", *Materials Science and Engineering*, Vol. 317, pp. 204-225, 2001.
- Song, J., Kostka, A., Veehmayer, M., and Raabe, D., "Hierarchical Microstructure of Explosive Joints: Example of Titanium to Steel Cladding", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, pp. 2641-2647, 2011.