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

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

Volume 8, Number 2, 2023



Influence of rolling on microstructure and mechanical properties of bronze-steel explosive welded sheets

Gh. Khalaj*, E. Asadian
Department of Materials Engineering, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran.

Received 16 October 2022 ; Accepted 25 November 2022

Abstract

In this paper, the microstructure and mechanical properties of interface of the explosive welded and rolled plain carbon steel-bronze sheets were investigated. Explosive welding was performed at two stand-off distances and with two different thicknesses of explosive material. Rolling of the welded composite was performed at both ambient temperature and preheat 300 °C and with a constant thickness reduction of 33.3%. The results showed that the wavy interface of the steel-bronze joint includes different parts. By rolling, the joining interface was stretched and flattened and the vortex areas were compressed together and in some cases entered the steel matrix. The steel particles separated from the base metal along the wave crest and remained as isolated islands in the bronze matrix. On the other hand, in the areas near the vortex, a part of the bronze flying metal was caught under the wave and was observed as islands separated from the bronze matrix inside the steel. As a result of rolling after joining, the porous areas at the interface have become crushed and compressed layers. The rolling force and temperature partially removed the penetration barriers and a metallic bond was formed between bronze and steel. During the connection, the voids and shrinkage pores were pressed together due to rolling and the separate borders were close to each other. Explosive welding and cold rolling had increased the hardness in the interface, and hot rolling has led to a decrease in the hardness in the interface. In the hardness test, the welding samples are arranged in the order of the highest impact energy. The effects of welding parameters remain after cold and hot rolling and the hardness rating does not change.

Keywords: Dissimilar welding, Composite, Interface, Vortex, Hardness.

Corresponding Author: gh.khalaj@srbiau.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هشتم، شماره2، پاییز و زمستان 1401



تاثیر نورد بر ریزساختار و خواص مکانیکی ورق‌های جوش انفجاری فولاد – برنز

غلامرضا خلج *، **ابراهیم اسدیان**

گروه مهندسی مواد، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

دریافت مقاله: 1401/07/24 ؛ پذیرش مقاله: 1401/09/04

چکیده

در این مقاله ریزساختار و خواص مکانیکی فصل مشترک فولاد ساده کربنی- برنز جوشکاری انفجاری و نورد شده بررسی شد. اتصال انفجاری در دو فاصله توقف و با دو ضخامت ماده انفجاری مختلف انجام شد. نورد کامپوزیت جوش شده در دو دمای محیط و پیش‌گرم 300 درجه و با کاهش ضخامت ثابت 33/3% انجام گرفت. نتایج نشان داد فصل مشترک موجی اتصال فولاد- برنز، شامل بخش‌های مختلفی است. با انجام نورد، فصل مشترک اتصال، کشیده و مسطح شده و مناطق گردابه‌ای به هم فشرده شده و در مواردی وارد زمینه فولادی شده است. ذرات فولاد جدا شده از زمینه در امتداد تاج موج و به صورت جزیره‌های مجزا در زمینه برنز باقی‌مانده است. از طرفی در مناطق مجاور گردابه‌ها، بخشی از فلز پرنده برنز در زیر موج گیرافتاده و به صورت جزیره‌های جدا شده از زمینه برنز در داخل فولاد مشاهده شد. مناطق متخلخل در اثر نورد به صورت لایه‌های خرد شده و فشرده شده درآمده است. نیرو و دمای نورد، موانع نفوذ را تاحدی برطرف کرده و پیوند فلزی بین برنز و فولاد تشکیل شده است. حفره‌ها و تخلخل‌های انقباضی در حین اتصال، دراثر نورد به هم فشرده شده و مرزهای مجزا به یکدیگر نزدیک شده است. اتصال انفجاری و نورد سرد موجب افزایش سختی در فصل مشترک شده و نورد گرم منجر به کاهش سختی در فصل مشترک گردیده است. در آزمایش سختی نمونه‌های جوشکاری به ترتیب بیشترین انرژی برخورد، مرتب می‌شوند. تاثیرات ناشی از پارامترهای جوشکاری، بعد از نورد سرد و گرم هم باقی می‌ماند و رتبه بندی سختی تغییر نمی‌کند.

کلمات کلیدی: جوش غیرهمنام، کامپوزیت، فصل مشترک، گردابه، سختی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: gh.khalaj@srbiau.ac.ir

1- مقدمه

مس و آلیاژهای آن به دلیل رسانایی الکتریکی بالا، هدایت حرارتی عالی، شکل پذیری خوب و مقاومت بالا در برابر خوردگی، به طور گسترده در صنایع متالورژی، شیمیایی و نفت مورد استفاده قرار می‌گیرند. کامپوزیت‌های آلیاژهای مس- فولاد با تلفیق مزایای مقاومت به خوردگی و چقرمگی بالا، دمای ذوب بالا، هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، ضریب انبساط حرارتی مناسب مس با استحکام، جوش پذیری و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

شکل‌پذیری فولاد، خواص و عملکرد منحصر به فردی را به نمایش می‌گذارند. این مواد لایه‌ای در صنایع الکتریکی و انتقال حرارت درکوره‌ها، کاربرد دارند [3-1].

چندین روش برای ساخت کامپوزیت‌های آلیاژهای مس/ فولاد از جمله جوشکاری انفجاری [4] ، جوشکاری پالس مغناطیسی [5] ، جوشکاری ضربه لیزری [6] و سایر روش‌ها [7–9] توسعه پیدا کرده است. در میان روش‌های اتصال با فشار و سرعت بالا، جوشکاری انفجاری به طور فزاینده‌ای برای تولید صفحات فلزی لایه‌ای با مساحت زیاد، به ویژه کامپوزیت‌های ساختاری استفاده می‌شود [10].

در فرایند جوشکاری انفجاری، برخورد مورب با سرعت بالا که ناشی از انفجار است، بین صفحه روکش شده و صفحه پایه رخ می‌دهد که درنتیجه آن از سطح تماس مواد لایه کنی اتفاق می‌افتد و به صورت یک جت فلزی به بیرون از محل اتصال پاشش می‌کند. بدلیل «خود تمیز شوندگی» ناشی از جت، سطوح فلزی تمیز و بدون آلودگی در درز اتصال قرار می‌گیرند. همزمان، این سطوح تمیز در اثر برخورد تحت فشار زیاد و دمای بالا در نقطه برخورد به هم متصل می شوند.

کنترل مناسب پارامترهای فرایند مانند بار انفجاری، زاویه صفحه پرنده- صفحه پایه و فاصله توقف و ... نقش اساسی در افزایش کیفیت پیوندها دارد. به عنوان مثال، با افزایش بارگذاری مواد منفجره، فصل مشترک اتصال از یک خط مستقیم به شکل موج‌دار تغییر می‌کند. به طور معمول، یک ساختار موجدار در فصل مشترک به دلیل استحکام پیوند بالاتر، حالت اتصال بهتری برای جوشکاری مواد منفجره است [11].

اغتشاش فلزات و اختلاف توزیع سرعت در نقطه برخورد می‌تواند ویژگی‌های موج فصل مشترک را ایجاد کند. به دلیل این فصل مشترک‌های موجی، مساحت پیوند واقعی بزرگتر می‌شود و نقص‌ها در منطقه وسیع‌تری توزیع می‌شوند. علاوه بر این، تغییرات ریز ساختار در فصل مشترک به طور قابل توجهی بر خصوصیات اتصال تاثیر می‌گذارد. یک لایه مذاب، که به دلیل پارامترهای نامناسب مانند مواد منفجره بیش از حد ایجاد می‌شود، همراه با نقص‌هایی مانند ریز ترک‌ها، حفره‌ها و اکسیدها، می‌تواند تاثیر عمیقی بر خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌ها داشته باشد. علاوه بر این، در مقایسه با مواد پایه، مشخص شده است که سختی فصل مشترک نیز به دلیل تغییر شکل قابل توجه، افزایش می‌یابد [12].

جوشکاری انفجاری به طور وسیع در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد اما مقالات کمی در مطالعه کامپوزیت آلیاژهای مس- فولاد با استفاده ازجوشکاری انفجاری انجام شده است. دورغوتلو [13-14] توانایی پیوند مس و فولاد در جوشکاری انفجاری را با استفاده از نسبت‌های مختلف مواد منفجره و فاصله های توقف مختلف بررسی کرد.

بررسی نتایج متالوگرافی نشان می‌دهد فصل مشترک جوش کیفیت بالایی دارد و اتصال بدون عیب و ترک ایجاد شده است. فصل مشترک فولاد- مس موفولوژی موجی دارد. این شکل فصل مشترک استحکام پیوند و خواص مکانیکی مواد جوشکاری شده را افزایش می‌دهد. شکل موج فصل مشترک در جوشکاری انفجاری به شدت به فاصله توقف و نسبت ماده منفجره بستگی دارد. عدم تقارن موج‌ها به اختلاف در چگالی مواد جوشکاری شده مرتبط است.

لیو و همکاران [15] اتصال انفجاری مس به فولاد زنگ نزن آستنیتی نیتروژن بالا را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش نسبت انفجاری از 0,9 به 1,6 فصل مشترک از حالت مسطح به موجی شکل تبدیل می‌شود و دامنه و طول موج فصل مشترک با افزایش نسبت انفجاری افزایش می‌یابد. همچنین مس در گردابه‌ها ذوب شده و ذرات پراکنده فولاد در فصل مشترک به درون مس وارد می‌شوند.

هیچ ترکیب بین فلزی در فصل مشترک مشاهده نمی‌شود. در مجاور فصل مشترک دانه‌بندی مس و فولاد ریزتر شده و در جهت برخورد کشیده شده است. ریزسختی در فصل مشترک و منطقه مجاور آن بالاتر از زمینه است. سختی در هر دو طرف فصل مشترک اتصال با افزایش فاصله به تدریج کاهش می‌یابد و ثابت می‌شود.

در سال‌های اخیرتحقیقات زیادی برای ارزیابی ریزساختارها و خصوصیات فصل مشترک مس / فولاد از طریق شبیه‌سازی و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

آزمایش‌های عددی صورت گرفته است. وانگ [16] یک روش نقطه ماده ((Material Point Method (MPM) را برای گرفتن پدیده‌های اصلی فیزیکی مانند انفجار مواد منفجره و برخورد صفحات مس و فولاد توصیف کرد. ساراوانان [17] در مورد پنجره‌های قابلیت جوش‌پذیری سه محوره، تجزیه و تحلیل میکروآنالیز و استحکام مس- فولاد ضد زنگ روکش شده بحث کرد.

به منظور دستیابی به صفحات چند لایه با ابعاد دقیق، سطوح صاف و خواص مکانیکی مطلوب برای کاربرد نهایی، فرایند نورد پس از جوشکاری انفجاری، اعمال می‌شود. در فرایند نورد، تنش‌های کششی در صفحات چند لایه ایجاد می‌شود و خواص مکانیکی و تغییرات ساختاری ویژه در صفحه دوفلزی را تشدید می‌کند. عاصم آبادی و همکاران [18]، به تحقیق درمورد تاثیر نورد سرد بر خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم- مس که بوسیله فرایند جوشکاری انفجاری به یکدیگر متصل شدند پرداختند، و به این نتیجه رسیدند که فرایند نورد بطور قابل ملاحظه‌ای باعث تغییر ساختار میکروسکوپی اتصال شده و میزان حفرات ریز را کاهش می دهد و موجب افزایش استحکام برشی اتصال می‌گردد، همچنین آن‌ها دریافتند که با انتخاب نامناسب پارامترهای نورد مانند سیستم طراحی نورد، سرعت خنک کاری و غیره ممکن است مقاومت برشی اتصال تا میزان 40% کاهش یابد.

گلدکوفسکی وهمکاران [19] تاثیر جوشکاری انفجاری و نورد سرد بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال سه لایه مس/فولاد 1020 / مس را بررسی کردند. نتایج نشان داد که فصل مشترک اتصال موجی است و نورد سرد موجب سختی بیشتر ساختار کامپوزیتی سه لایه می‌شود. در اثر نورد سرد شکل موجی فصل مشترک تقریبا مسطح می‌شود.

جوشکاری و نورد سرد موجب ریزدانه شدن ساختار در اثرتبلور مجدد و چندضلعی شدن دینامیکی می‌شود. استحکام کششی کامپوزیت تا 3,5 برابر بهتر از مس اولیه است و نورد سرد باعث افزایش استحکام می‌شود. استحکام ضربه کامپوزیت در اثرجذب انرژی شکست و انحراف ترک درحین عبور از فصل مشترک افزایش می‌یابد. دیجا و همکاران [20و21]، پس از تحلیل نظری و تجربی فرایند نورد میله‌های دو فلزی مس- فولاد و مس-آلومینیوم به این نتیجه رسیدند که در طول نورد یک میله دوفلزی اندازه پهن شدگی در مقایسه با پهن شدگی یک میله همگن نورد شده از جنس فلز هسته آن، یا بسیار بزرگتر یا بسیار کوچکتر است که این مقدار به تنش‌های کششی هسته و لایه روکش بستگی دارد، همچنین نشان دادند که انجام درست فرایند نورد دستیابی به محصول اتصال انفجاری را با کیفیت پیوستگی قابل مقایسه با مواد اولیه پس از جوشکاری انفجاری تضمین می‌کند. با وجود مقالات متعددی که در زمینه جوشکاری مس به آلومینیوم چاپ شده اند[22-24]، مقالات کمی به اتصال انفجاری آلیاژهای مس و به خصوص برنز به فولاد پرداخته‌اند و از این تعداد آن‌هایی که به تغییرشکل پس ازجوش این اتصالات پرداخته اند بسیار کم هستند [25-28]. با توجه به اهمیت و کاربرد این اتصالات در سازه‌های مختلف، بررسی تاثیرات دما و کاهش ضخامت حین نورد بر خواص مکانیکی و متالورژیکی فصل مشترک اتصال برنز به فولاد مساله مهمی است.

در تحقیق حاضر، نورد گرم و سرد ورق دو لایه برنز- فولاد کم کربن جوشکاری شده در دو فاصله توقف2 و 3 میلی‌متر و دو ضخامت ماده انفجاری 46 و 79 میلی‌متر صورت گرفت. پنجره جوشکاری و فصل مشترک اتصال برنز-فولاد بررسی شد. همچنین تاثیر دما و کاهش ضخامت حین نورد بر سختی اتصال مورد بررسی قرار گرفت.

2- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورق‌های فولاد کم کربن به عنوان صفحه پایه با ابعاد 250×250×4 mm و برنز به عنوان صفحه پرنده با ابعاد 250×250×3 mm استفاده شد. ترکیب شیمیایی صفحه پرنده برنزی شامل 91 درصد مس و 9 درصد وزنی قلع بود.

نوع ماده منفجره از نوع آماتول 5-95 دارای ترکیب تری نیتروتولوئن 5 درصد و نیترات آمونیم 95 درصد بود. سرعت انفجار برابر با 2507 متر بر ثانیه بود.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

جدول 1- تقسیم بندی نمونه‌ها.

شرایط کلی نمونه	نام نمونه	چیدمان جوشکاری		شرایط نورد	
		ضخامت ماده انفجاری(mm)	فاصله توقف (mm)	دما (°C)	کاهش ضخامت (٪)
جوشکاری شده	BR1	۴۶	۳	–	–
	BR2	۷۹	۳		
	BR3	۷۹	۲		
جوشکاری شده+نورد سرد	AR1	۴۶	۳	۲۵	۳۳/۳۳
	AR2	۷۹	۳		
	AR3	۷۹	۲		
جوشکاری شده+نورد گرم	AR4	۴۶	۳	۳۰۰	۳۳/۳۳
	AR5	۷۹	۳		
	AR6	۷۹	۲		

برای بررسی تاثیر متغیرهای جوش انفجاری بر ساختار فصل مشترک، فاصله توقف 2 و 3 میلی‌متر و ضخامت ماده انفجاری برابر 46 و 79 میلی‌متر درنظرگرفته شد.به منظور بررسی تاثیر عملیات نورد بر ساختار و خواص فصل مشترک نمونه‌های جوشکاری شده، عملیات نورد سرد در دمای محیط و نورد گرم در دمای 300 °C با تغییر ضخامت 2 میلی‌متری (درصد کاهش ضخامت 33/33 درصد) انجام شد. عملیات پیش گرم قبل از نورد به مدت 30 دقیقه انجام شد. ضخامت اولیه نمونه‌ها 6 میلی‌متر بود. شرایط نمونه‌ها در جدول (1) آمده است. پسوند BR به معنی قبل از نورد (Befor Rolling) و منظور از AR بعد از نورد (After Roling) می‌باشد. برای بررسی میکروسکوپی، در ابتدا نمونه‌ها با ابعاد10×10 میلی‌متر با دستگاه وایر کات در جهت عمود بر جهت انفجار و سطح جوشکاری شده بریده و سپس مانت سرد شدند. در متالوگرافی ابتدا سطح نمونه‌ها توسط کاغذ سنباده شماره 60 تا 2500 سنباده‌زنی و با استفاده از محلول اکسید آلومینیوم پولیش زده شدند.

پس از پولیش سطح نمونه ها با الکل شسته و خشک شدند و توسط محلول $34ml\ H_2O + 33ml\ HCl + 33ml\ HNO_3$ حکاکی شیمیایی شدند. ریزساختار فصل مشترک و ترکیبات بین فلزی توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus مورد بررسی قرار گرفت و همچنین از میکروسکوپ الکترونی روبشی VEGA-TESCAN مدل MIRA با قابلیت EDS جهت بررسی ریزساختار و آنالیز شیمیایی فصل مشترک اتصال استفاده شد. فاصله کاری بین 13 تا 15 میلی‌متر (عمدتا 15 میلی‌متر) بود. به جز شکل (6-الف)، بقیه تصاویر با دتکتور الکترون برگشتی (BSE) گرفته شده است. آزمون ریزسختی سنجی ویکرز با نیروی اعمالی 50gr و به مدت 10 ثانیه انجام شد. آزمون از هر دو طرف فصل مشترک (در زمینه برنزی وفولادی) انجام شد. انجام آزمون برای هر فصل مشترک در سه نقطه مختلف انجام شد تا اعداد بدست آمده نمایانگر بهتری از سختی فصل مشترک باشند. استاندارد میکروسختی ویکرز ASTM E384-17 و متالوگرافی ASTM E3-11 بود.

2-1- محاسبه پنجره جوشکاری

پنجره جوش پذیری از چهار مرز تشکیل شده است. صفحه پرنده و صفحه پایه توسط برخورد با سرعت زیاد و زاویه کوچک بین صفحات برخورد کننده در طول فرایند جوشکاری انفجاری جوش داده می‌شوند. تحقیقات نشان داده است که وقتی تغییر شکل پلاستیک روی سطح تماس به طور کامل ایجاد شود و جت تشکیل شود، می توان یک پیوند محکم بین فلزات ایجاد کرد[29و30]. این شرایط توسط مرز پایین ناحیه جوش در صفحه مختصات زاویه برخورد (β)- سرعت برخورد (Vc) محدود می‌شود. بنابراین، مرز پایین جوشکاری انفجاری را می‌توان برای برآوردن شرایطی تعریف کرد که فشار ضربه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

در نقطه برخورد باید بیشتر از تنش تسلیم ماده باشد تا تغییر شکل پلاستیک مواد جوشکاری ایجاد شود. زاخارنکو و زلوبین [29] در نظر گرفتند که زاویه برخورد β توسط سختی ویکرز H_V، چگالی ρ، حداقل سرعت نقطه برخورد Vc و یک k1 ثابت تعیین می‌شود (معادله (1)). هنگامی که تفاوت بین خواص مواد کوچک است، H_V سختی ویکرز صفحه پرنده است. هنگامی که خواص مواد جوش داده شده بسیار متفاوت است، H_V میانگین سختی ویکرز دو ماده جوش داده شده است. ρ چگالی صفحه پرنده است. به طور خاص، ثابت k1 از 0,6 تا 1,2 است. هنگامی‌که سطح فلز به خوبی از قبل پردازش شده باشد، ثابت k1 را می‌توان 0,6 در نظر گرفت.

$$\beta = \frac{k_1}{V_c}\left(\frac{H_v}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

برای همین منظور، معادله دیگری برای محاسبه زاویه برخورد ایجاد شد [30].

$$\beta = 1.8\left[\frac{1}{V_c}\sqrt{\frac{\sigma_b}{\rho}} + 0.1\left(\frac{V_c}{C_b + 1550}\right)^2\right] \quad (2)$$

که در آن σ_b و C_b به ترتیب استحکام کششی و سرعت صوت در صفحه پرنده هستند. حد بالایی این ناحیه نشان دهنده حداکثر سرعت برخورد بین صفحه پرنده و صفحه پایه است، یعنی حداکثر بار در جوشکاری انفجاری. اگر سرعت برخورد بالاتر از این خط باشد، به دلیل ذوب شدن بیش از حد سطح اتصال، شکست ناحیه جوش رخ می دهد. معادله حداکثر سرعت برخورد Vp (معادله (3)) را از اثر حرارتی سطح اتصال به دست آمده است. فرمول محاسبه زاویه برخورد β را می توان با استفاده از رابطه (4) تعیین کرد. در این معادله: Tm دمای ذوب ماده، Kضریب هدایت حرارتی، Cpگرمای ویژه در فشار ثابت، t_f ضخامت صفحه پرنده، N ثابت ابعادی است که برای فلزات مختلف براساس نتایج Rosset مقدار 0,11 می‌گیرد [31].

$$V_p = \frac{1}{N}\frac{(T_m C_b)^{\frac{1}{2}}}{V_c}\left(\frac{KC_pC_b}{\rho t_f}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{V_p}{2V_c} = \frac{1}{2N}\frac{(T_m C_b)^{\frac{1}{2}}}{V_c^2}\left(\frac{KC_pC_b}{\rho t_f}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

با این حال، برای محاسبه مرز بالایی، دریباس معادله متفاوتی را با ارتباط پارامترهای سینماتیکی با پارامترهای فیزیکی و هندسی حرارتی مواد برخورد کننده، ارایه کرد(معادله (5)) [30]. در این معادله tp ضخامت صفحه پایه است، سایر موارد مانند قبل است.

$$\sin\frac{\beta}{2} = 14.7V_c^{\frac{-5}{4}}\sqrt{\frac{T_m K/a}{\rho t_f^{\frac{1}{2}} t_p/(t_f+t_p)}} \quad (5)$$

$$a = \sqrt{K/(\rho C_p)} \quad (6)$$

حد راست پنجره جوش پذیری نتیجه تشکیل جت است. سرعت نقطه برخورد Vc در این مورد، سرعت بحرانی تشکیل جت است. به منظور ارضای این شرط، والش و همکاران [32] در نظر گرفتند که Vc باید کوچکتر از Cb مواد جوش داده شده باشد (معادله 7).

$$V_c < C_b \quad (7)$$

در فرایند جوشکاری انفجاری، اتصالات موجی شکل معمولاً استحکام پیوند بالایی را به دست می‌آورند. هنگامی که سرعت نقطه برخورد Vc کوچکتر از مقدار معینی باشد، ناحیه پیوند به جای یک فصل مشترک موجی، یک فصل مشترک خطی است. مقدار معینی به عنوان سرعت انتقال از جریان آشفته به آرام تعریف می شود و حد سمت چپ پنجره جوش‌پذیری است. کوان و همکاران [33]. نشان دادند که سرعت به خواص فلزاتی که باید جوش داده شوند بستگی دارد. بر اساس تئوری دینامیک سیالات، سرعت نقطه برخورد Vc را می‌توان تابعی از سختی و چگالی دو فلز توصیف کرد (معادله 8).

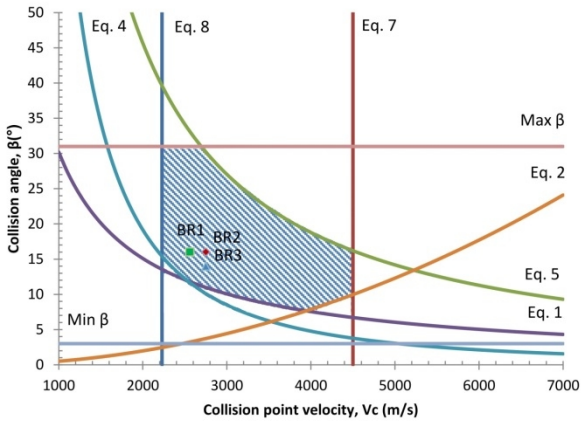
$$V_c = \sqrt{\frac{2R_e(H_{V,p}+H_{V,f})}{\rho_p+\rho_f}} \quad (8)$$

هنگامی‌که پیکربندی جوش انفجاری نامتقارن است، عدد رینولدز Re حدود 8,0 تا 13,0 است، ρ_fو ρ_p به ترتیب چگالی صفحه پرنده و صفحه پایه هستند، $H_{V,p}$ و $H_{V,f}$ سختی ویکرز آن‌ها هستند. در تحقیق حاضر از برنز و فولاد به عنوان مواد صفحه پرنده و پایه استفاده شد. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مربوط به مواد جوشکاری در جدول (2) نشان داده شده است. پنجره جوش‌پذیری برنز و فولاد با استفاده از معادلات (1-8) محاسبه شده است (شکل1).

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

جدول2- پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مربوط به مواد جوشکاری.

ماده	C_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	K ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	T_m (K)	C_b (m/s)	σ_b (MPa)	H_v (HV)	ρ ($g.cm^{-3}$)
برنز	380	350	1000	4500	293	96	8.78
فولاد	460	16	1460	5150	1030	300	7.8



شکل1- پنجره جوشکاری انفجاری محاسبه شده برای برنز و فولاد با استفاده از معادلات (8-1).

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ساختار نمونه‌ها بعد از جوش(قبل از نورد)

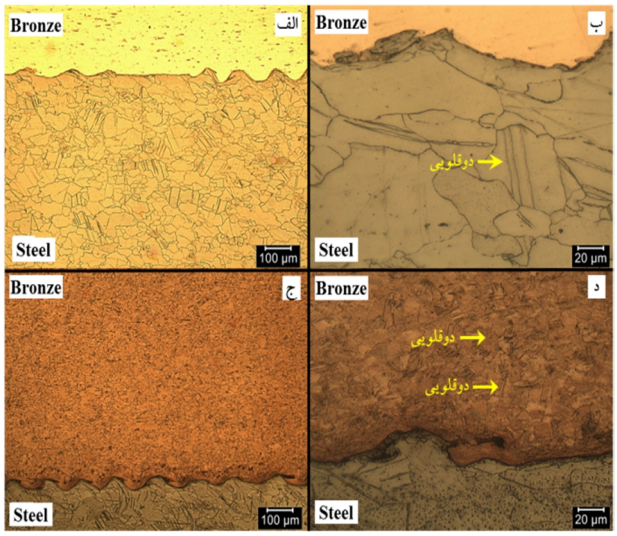
شکل (2) تصویر ریزساختار زمینه برنز و فولاد (فلزپایه و پرنده، به ترتیب) و فصل مشترک اتصال را نشان می‌دهد. زمینه فولاد شامل دانه های هم محور فریت با اندازه دانه 20 میکرون دارای دوقلویی است. زمینه برنز دارای اندازه دانه بسیارکوچکتر (زیر میکرون) و دوقلویی‌های بیشتری است. تغییرشکل و سیلان برنز در نزدیکی فصل مشترک قابل مشاهده است. فصل مشترک موجی شکل در مقطع اتصال فولاد/ برنز مشاهده می‌شود. همچنین مناطق گردابه در جلو موج‌ها وجود دارد.

هنگامی که مواد منفجره منفجر می شود، موج انفجار با بار ضربه ای فشار بالا از سطح صفحه پرنده عبور می کند و صفحه بالایی به سرعت خم می شود. نرخ کرنش 10^6-10^7 کیلومتر بر ثانیه و فشار بالا تا 10^4 مگاپاسکال [3] در نزدیکی نقطه برخورد ایجاد می‌شود که مقادیر آن تا حد زیادی از حد تسلیم دینامیکی برنز و فولاد فراتر می رود. مطالعات مختلف در مورد مکانیسم تشکیل موج در سطح مواد جوشکاری انفجاری شده انجام شده است و رفتار سیال مانند مواد در فصل مشترک می‌تواند شکل گیری امواج سطحی را توضیح دهد.

مناطق گردابه به دلیل نوسانات شدید موضعی جریان مواد در فصل مشترک، در جلوی امواج تشکیل می‌شوند. شکل (3) بسته‌های مذاب را در قسمت فصل مشترک نشان می‌دهد. به دلیل انرژی زیاد ضربه ای که در هنگام برخورد ایجاد می‌شود، تلاطم شدید بین جریان برنز و فولاد به صورت موضعی اتفاق می افتد و در نتیجه مواد با هم مخلوط می‌شوند. حفرات و ذرات فولاد جدا شده از زمینه در بسته‌های مذاب وجود دارد. همچنین در ترکیب شیمیایی این مناطق، مس و آهن هر دو به طور همزمان وجود دارند.

ترکیب اصلی در گردابه، مس است و بخشی از مذاب فولاد به دلیل اختلاط جریان‌ها در فاز مس به طور همزمان توزیع شده است. به علاوه، کسر جرمی آهن دراطراف ذرات فولاد شکسته و جدا شده بیشتر است و شیب غلظتی تشکیل می‌دهد. انرژی مکانیکی در فشار سریع به تجمع گرما تبدیل می‌شود که بخشی از زمینه‌های فولاد و برنز را ذوب می‌کند. ذرات فولاد و هوا با جت فلزی حرکت می‌کنند و در نهایت بسته مذاب را تشکیل می‌دهند. در فرایند تشکیل فصل مشترک، تغییر شکل شدید در منطقه گردابه به دانه‌های کشیده کمک می‌کند. در همین حال، در زمینه برنز، دوقلویی‌های نزدیک فصل مشترک وجود دارد. با این حال، چند ساختار دوقلو در فلزپایه مس وجود دارد، همانطور که در شکل (2) نشان داده شده است. دلیل این امر این است که پس از برخورد شدید، زمینه برنز تنش داخلی زیادی ایجاد کرده و منجر به لغزش می‌شود. مرزهای زاویه کم و گروه‌های تجمع نابجایی‌ها به تدریج شکل گرفته و سپس، هسته‌های دوقلویی با کمک گروه‌های تجمع یافته همراه با غلظت بالای تنش ایجاد می‌شود.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]



شکل 2- تصویر ریزساختار زمینه برنز(فلز پرنده) و فولاد (فلزپایه) و فصل مشترک اتصالBR2

(الف) و (ب) زمینه فولاد و (ج) و (د) زمینه برنز در بزرگنمایی‌های مختلف.

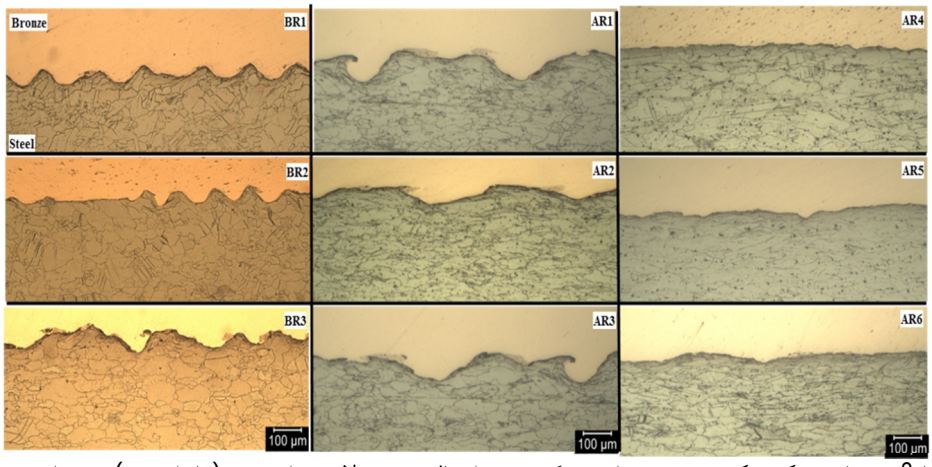
شکل (3) فصل مشترک موجی اتصال برنز- فولاد را نشان می‌دهد که در حین جوشکاری انفجاری ایجاد شده است. این فصل مشترک مساحت پیوند بین برنز و فولاد را بسط می‌دهد و مانع رشد ترک می‌شود؛ و یک اتصال جوش شده مناسب برای بهبود خواص کامپوزیتی است. در نمونه BR1 میانگین طول موج (L) برابر 202µm و میانگین دامنه موج (H) برابر 57µm اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری L و H توسط نرم افزارهای ImageJ و Digitizer انجام پذیرفت. بین 10 تا 15 درصد انحراف معیار در میانگین طول و دامنه امواج اندازه‌گیری شده وجود داشت. در نمونه BR2 میانگین طول موج برابر 280µm و میانگین دامنه موج برابر 80µm اندازه‌گیری شد. بزرگ‌تر بودن موج‌های ایجاد شده به علت بیشتر بودن ضخامت ماده منفجره در نمونه BR2 نسبت به نمونه BR1 است. موج‌های ایجاد شده منظم تر از موج‌های نمونه BR1 می‌باشند. در نمونه BR3 میانگین طول موج برابر 271µm و میانگین دامنه موج برابر 75µm اندازه‌گیری شد. همانطور که مشاهده می‌شود موج‌های ایجاد شده در نمونه BR3 کوچکتر از موج‌های نمونه BR2 هستند که به علت کمتر بودن فاصله توقف نمونه BR3 نسبت به نمونه BR2 است.

شکل‌گیری فصل مشترک موج دار را می‌توان با گرادیان فشاری زیاد در فصل مشترک ناشی از خود نوسانی در نزدیک نقطه ضربه توضیح داد [33]. زمینه‌های برنز و فولاد در فصل مشترک ویژگی‌های سیال را به دلیل فشار زیاد ایجاد شده در مجاورت فصل مشترک نشان می‌دهند که مقدار آن‌ها تا حد زیادی از حدتسلیم دینامیکی برنز و فولاد فراتر می‌رود.

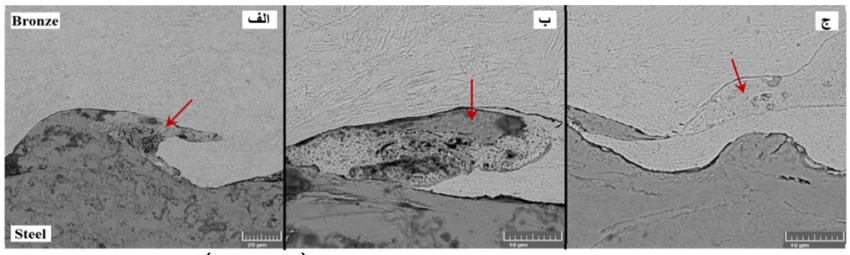
علاوه بر این، همانطور که در شکل (3) نشان داده شده است، یک مورفولوژی شبه جزیره یا جزیره‌ای با گردابه فازهای در حال چرخش به دلیل نیروی انفجار و جریان فلز در فصل مشترک ایجاد شده و مقدار زیادی ذرات فولاد شکسته در آن پراکنده شده است. با افزایش انرژی برخورد مقدار بیش از حد فلز مذاب در فصل مشترک تشکیل می‌شود. جت‌ها سطح صفحه را اسپری می‌کنند تا ذرات خرد شده را تشکیل دهند و شکستگی‌های قله موج به سایر قسمت‌های گردابه خرد می‌شود. در طول انجماد سریع (با سرعت 10^5 بر ثانیه)، فلز مذاب در منطقه گردابه با این ذرات شکسته توزیع شده در آن منجمد می‌شود.

میزان اعوجاج فصل مشترک موجی شکل تابع نسبت چگالی‌های مواد $\rho1/\rho2$ بوده و کم بودن این نسبت باعث بیشتر شدن انحراف از حالت موجی شکل سینوسی می‌شود و بر طبق نتایج این نظریه، نسبت دامنه به طول موج تشکیلی در اتصال فلزات غیرهم جنس کمتراز فلزات هم‌جنس بوده و طول موج فصل مشترک اتصال فلزات غیرهم‌جنس بیشتر از حالت اتصال فلزات هم‌جنس می‌باشد [12]. با کاهش نسبت $\rho1/\rho2$ اختلاف در سرعت جریان در نزدیک نقطه برخورد افزایش یافته و باعث تغییر در الگوی موج می‌شود و در اثر کاهش نسبت چگالی‌ها، شکل موج می‌تواند به طور سریعی تغییر نموده و تغییر از حالت سینوسی شکل موج تسریع شود. همانطور که در نمونه‌های جوش مشاهده شد به دلیل اختلاف چگالی برنز و فولاد (چگالی برنز برابر $8/78\ g/cm^3$ و چگالی فولاد برابر $7/81\ g/cm^3$) موج‌های ایجاد شده به صورت سینوسی کامل نیستند و دامنه موج کوچکتر از طول موج می‌باشد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]



شکل3 – تصاویر میکروسکوپ نوری فصل مشترک موجی اتصال برنز- فولاد بعد از جوش(قبل از نورد) و بعد از نورد سرد و گرم.



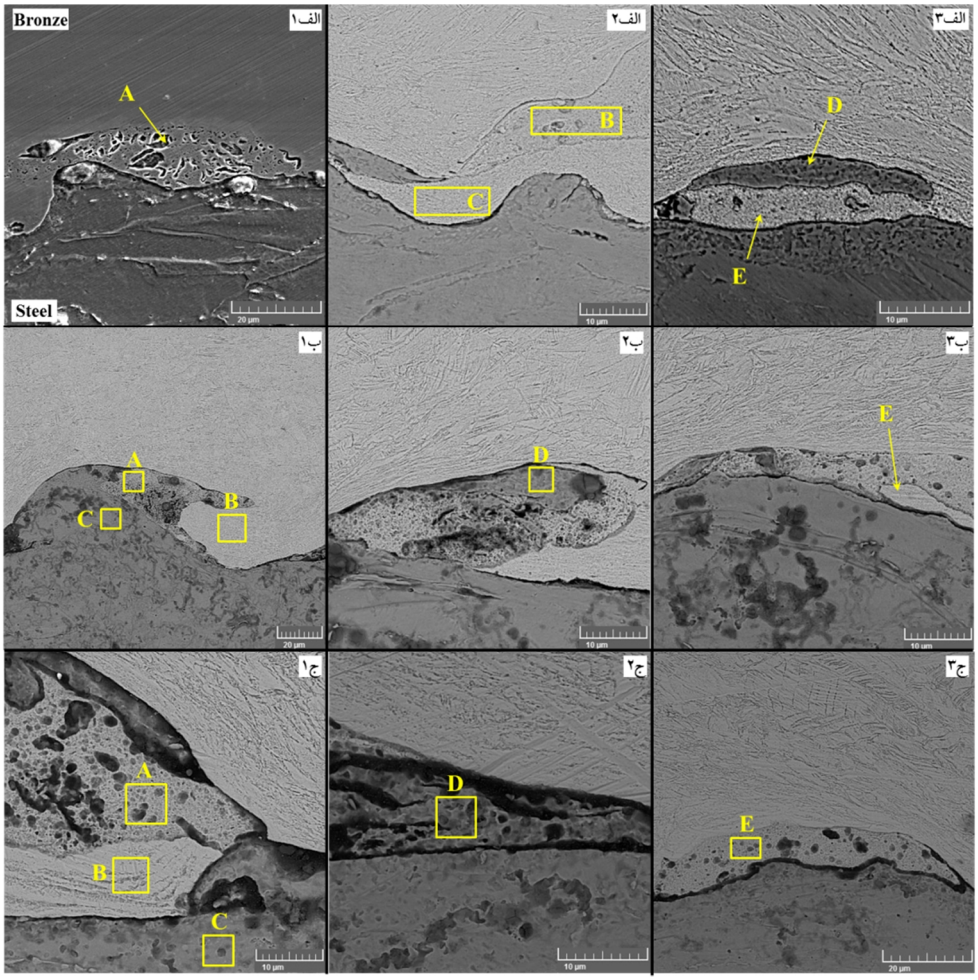
شکل4- انواع ساختار در فصل مشترک اتصال برنز- فولاد بلافاصله بعد از جوش(قبل از نورد) الف- مناطق موضعی ذوب شده در گردابه(BR2)، ب- ذرات فولاد جدا شده از ناحیه گردابه(BR2)، ج- گسترش لایه مذاب در امتداد تاج موج(BR1)

ازنظر ریزساختار انواع ساختار داخلی در فصل مشترک موجی مشاهده می شود. به ویژه مناطق گردابه ای با مشخصات سیلان خاصی در جلو جبهه هر موج مشاهده می شود که از قله تا جلو جبهه کشیده شده است(شکل4-الف).

همچنین، ذرات فولاد در داخل ناحیه گردابه ای مشاهده می‌شود که این مشخصه پیشنهاد می‌دهد که گردابه یک ناحیه ذوب شده است (شکل4-ب). اگرچه رسانایی حرارتی آلیاژ مس (برنز) بسیار زیاد است، اما زمان کمی برای جذب گرمای تولید شده ناشی از برخورد در لحظه انفجار وجود داشته است. انرژی انباشته باعث ذوب بخشی از برنز و فولاد در فصل مشترک می‌شود. نقطه ذوب برنز در حدود1000 درجه سانتی‌گراد است، در حالی که فولاد در حدود 1500 درجه سانتی‌گراد است. در نتیجه، بخشی از ریزساختارهای به شدت تغییر شکل یافته برنز ابتدا ذوب می‌شوند و برنز مذاب بیشتری با فولاد مذاب مخلوط می‌شود که می تواند غلبه آلیاژ مس(برنز) را در منطقه گردابه توضیح دهد. سپس برنز و فولاد ذوب شده در امتداد تاج موج قرار گرفتند و به تدریج در ناحیه گرداب که کمترین فشار جبهه موج در آن است، مجتمع شدند [5]. با افزایش نسبت مواد منفجره، گردابه با شدت بیشتری هم زده می‌شود و مقایسه (شکل4- ج) نشان می‌دهد؛ همزمان لایه مذاب با عرض 20 میکرون در تاج موج، طویل‌تر می‌شود. اگرچه آهن و مس در حالت مذاب دارای حلالیت نامحدود هستند؛ در حالت جامد اختلاط پذیری متقابل بسیار کمی دارند و ترکیب بین فلزی تشکیل نمی‌دهند.

بررسی نتایج آنالیز EDS نمونه‌ها بلافاصله بعد از جوش تشکیل چند نوع ترکیب شیمیایی مختلف در فصل مشترک اتصال را نشان می دهد نتایج آنالیز EDS از مناطق مختلف فصل مشترک اتصال در شکل (5) و جدول (1) نشان داده شده است. اولین مناطق مشاهده شده در فصل مشترک، ناحیه گردابه همراه با ذوب موضعی شامل مخلوط محلول جامد مس در آهن فریتی و آهن در مس (فاز ε) و نیز ذرات فولاد تشکیل شده در نتیجه شکستن و جدا شدن است. شکستن و جدا شدن حین اتصال انفجاری شامل خرد شدن ماده در حجم‌های میکرونی و با پیوند ضعیف نسبت به فلزپایه است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]



شکل 5 – تصاویر SEM و آنالیز EDS از مناطق مختلف فصل مشترک اتصال؛ الف- BR1؛ ب- BR2 ، ج-BR3

بررسی‌های ساختاری ورود ذرات فولاد به ذوب مس را در همه نمونه‌ها نشان می‌دهد. اندازه ذرات فولاد از بیش از 25 میکرون تا زیرمیکرون تغییرمی کند. همچنین ریزحفرات دراین ناحیه مشاهده می شوند که در نتیجه انقباض درحین بلوری شدن مذاب است. ساختار منطقه اختلاط شامل دانه‌های کریستالی زیرمیکرونی و در مواقعی نانویی است [3]. تشکیل مناطق موضعی با ساختار کریستالی بسیار ریز درنتیجه حرارت‌دهی با سرعت بالا و سرد کردن شتاب یافته به دلیل هدایت بالای مس در طی فرایند جوش انفجاری است. براساس نتایج محققان [1-3] شکستن و جدا شدن ذرات همراه با آزادسازی حجم زیادی از حرارت و درنتیجه ذوب بخش‌های با نقطه ذوب و استحکام کمتر در زوج انفجاری می‌شود. در این تحقیق حرارت آزاد شده باعث ذوب موضعی مس همراه با ذرات جداشده از فولاد با ابعاد مختلف شده است.(شکل5 نقطه Dدر نمونه الف3، ب2، ج2).

همچنین در مناطق گردابه ای؛ نتایج آنالیز EDS نشان می‌دهد که میزان آهن بین 15 تا 20 درصد، مس 73 تا 77 و قلع بین 7 تا 8 (درصد وزنی) می باشد. (شکل5 نقطه Bدر نمونه الف2؛ نقطه A در نمونه ب1). که با نتایج سایر محققان تایید می‌گردد. براساس نتایج [1-3] در اتصال برنز-فولاد غلظت مس در گردابه حدود 70 درصد (وزنی) است. از طرفی، در گردابه‌ها و مناطق مجاور ترکیبات با غلظت آهن کمتر هم مشاهده می‌شود. در این مناطق؛ میزان آهن بین 8 تا 10 درصد، مس 82 تا 84 و قلع بین 7 تا 9 (درصد وزنی) می‌باشد (شکل 5 و جدول3؛ نقطه E در نمونه الف3؛ نقطه A در نمونه ج1 و نقطه E در نمونه ج3).

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

جدول 3- نتایج آنالیز EDS از مناطق مختلف فصل مشترک اتصال در شکل 5

BR1	A	B	C	D	E
Fe	88.08	15.75	3.52	97.46	9.90
Cu	5.24	76.41	88.25	1.81	82.30
Sn	0.86	7.85	8.24	0.73	7.80
O (wt%)	5.82	--	--	--	--
BR2	A	B	C	D	E
Fe	19.94	1.27	98.68	96.91	2.25
Cu	72.59	89.28	0.57	1.84	88.17
Sn	7.47	9.45	0.75	1.24	9.58
BR3	A	B	C	D	E
Fe	9.01	1.73	98.41	97.64	8.19
Cu	82.67	89.93	1.09	1.45	83.64
Sn	8.32	8.34	0.50	0.91	8.16

نوع دیگر مناطقی که در فصل مشترک برنز- فولاد مشاهده می‌شود با نفوذ آهن در مس در مجاورت گردابه‌ها شکل می‌گیرد که به وضوح با توزیع غلظت در لایه مذاب متفاوت است. این مناطق چنین توصیف می‌شوند که زمینه فولاد و برنز در حین برخورد در تماس نزدیک با یکدیگر قرار می‌گیرند؛ این مناطق در طی فرایند اتصال ذوب نمی‌شوند که ناشی از ساختار موجی فصل مشترک است. در موقعیت پشت موج نیروی برخورد کمتر از تاج موج است و دما با همان سرعت ناحیه گردابه متمرکز نمی‌شود و در نتیجه ذوبی در این ناحیه تشکیل نمی گردد. اگرچه این ناحیه انتقالی ذوب نمی‌شود، عناصر مس و آهن به سرعت در دمای بالا نفوذ می کنند و شیب غلظتی را ایجاد می کنند عمق نفوذ اتم‌های مس و آهن در حد 20 میکرون گزارش شده است. دراین مناطق میزان آهن بین 1 تا 3/5 درصد، مس 88 تا 89 و قلع بین 8 تا 9/5 (درصد وزنی) می باشد.(شکل 5 و جدول1؛ نقطه Cدر نمونه الف2؛ نقطه B در نمونه ب1 و نقطه E در نمونه ب3 و نقطه B در نمونه ج1)

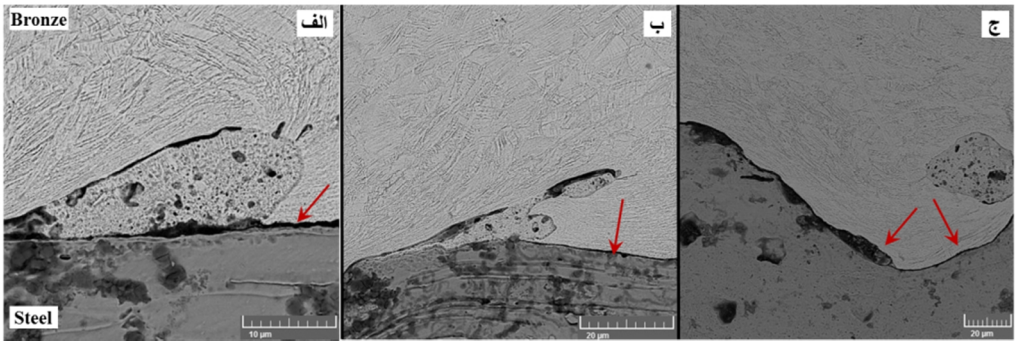
اگرچه فصل مشترک موجی در اتصال انفجاری حاصل شد؛ عیوب زیادی در محل جوش برنز- فولاد وجود دارد که شامل ریز حفره‌ها، تخلخل‌های انقباضی و ذرات فولاد در فصل مشترک است. همچنین، ترک های مختلفی در فصل مشترک موجی بعضی از نمونه ها وجود دارد که انتخاب نامناسب پارامترها و فرایند عملیات ناکافی موجب چنین ضعفی می‌شود. در این مناطق میزان اکسیژن بین 5 تا 6 درصد، آهن بین 70 تا 88 درصد (درصد وزنی) می‌باشد. (شکل 5 و جدول1؛ و نقطه A در نمونه الف1)

درشکل 6 مرزهای مجزای بین برنز و فولاد مشاهده می‌شود. در این مناطق لایه انتقالی (نفوذی) وجود ندارد و زمینه‌های برنز و فولاد در تماس نزدیک نیستند و فاصله‌های هوایی در مناطق مختلف فصل مشترک یافت می‌شود. بنابراین، نفوذ عنصری در این بخش از فصل مشترک وجود ندارد و لایه‌های اکسید صفحات برنز و فولاد با جت تشکیل شده در حین انفجار برداشته نشده‌اند و زمینه برنز و فولاد نمی‌توانند در ارتباط نزدیک با یکدیگر قرار گیرند. در شرایط معمول، اتم‌های مس و آهن برای شکستن موانع نفوذ در سطح فلزپایه مشکل دارند و فاصله بین دو زمینه باید کمتر از یک مقدار مشخص شود. درنتیجه در این نوع فصل مشترک پیوند مناسبی تشکیل نمی‌شود. در ادامه تحقیق مشاهده می شود با استفاده از نورد و دمای بالا، تا حدودی این موانع برطرف می‌شود و پیوند فلزی بین برنز و فولاد تشکیل می‌شود.

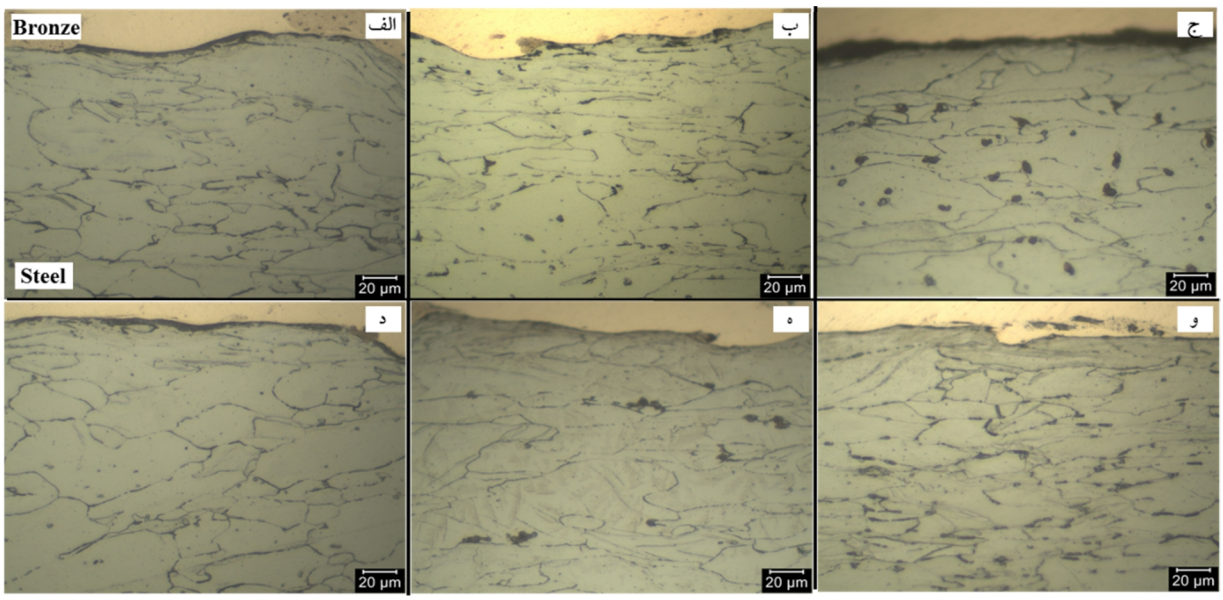
3-2- بررسی ساختار نمونه‌ها بعد از عملیات نورد سرد و گرم

همان طور که در شکل (2) مشاهده می‌شود؛ برنز اولیه قبل از اتصال؛ شامل دانه های هم محور فاز α است. دوقلویی‌های آنیل به شکل خطوط راست و موازی درمقطع دانه‌های بزرگ مشاهده می‌شود. بعد از جوش انفجاری، ریزساختار برنز درمرکز ضخامت ورق تقریبا بدون تغییر باقی مانده است. اعوجاج ضعیف در مرزهای دوقلویی نشان دهنده این است که صفحات تحت تغییرشکل پلاستیک کمی در حین جوشکاری انفجاری قرار گرفته اند. بعد از نورد سرد، ساختار زمینه برنز به شدت ریزدانه می‌شود و این مطلب برای نورد گرم هم صادق است. نشان داده شده است که در آلیاژ مس- قلع، تشکیل دانه‌های تبلورمجدد دینامیکی یافته عمدتا با مهاجرت مرزدانه‌ها ناشی از کرنش اتفاق می‌افتد و در حین فرایند پیش‌گرم در نورد، دوقلویی‌های آنیل در زمینه برنز شکل می‌گیرند [13].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]



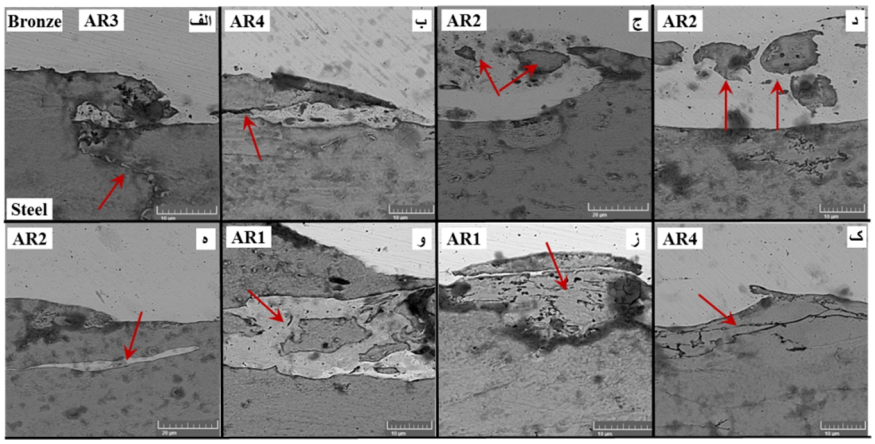
شکل 6- مرزهای مجزای در فصل مشترک برنز و فولاد بعد از جوشکاری (قبل از نورد) ؛ الف-BR1؛ ب- BR2 ، ج-BR3



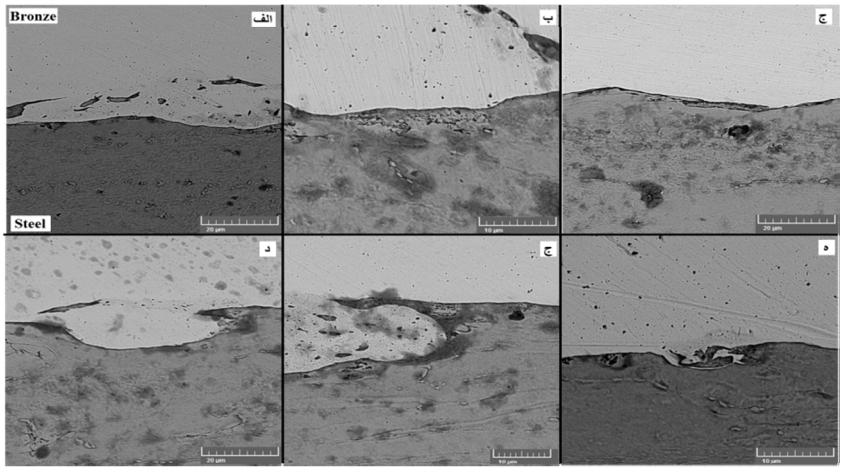
شکل7- ریزساختار زمینه فولاد و فصل مشترک اتصال انفجاری بعد از نورد سرد و گرم؛
الف-AR1، ب- AR2، ج- AR3، د- AR4، ه- AR5، و- AR6

نورد سرد بعد از جوشکاری به شدت ریزساختار فولاد را تغییرداده است (شکل7). دانه‌ها شکل هم محور خود را از دست داده و تحت تغییرشکل برشی در جهت نورد کشیده شده‌اند. در نورد گرم، تبلورمجدد دینامیکی؛ غیریکنواختی ساختار درحجم فلز را افزایش می‌دهد و ساختار فولاد بعد ازنوردشامل دانه‌های کشیده و تغییرشکل داده و نیز دانه‌های تبلورمجددیافته است. نشان داده شده است در آلیاژ مس- قلع تشکیل دانه‌های تبلور مجدد دینامیکی یافته عمدتا با مهاجرت مرزدانه ناشی از کرنش صورت می‌گیرد[27]. در طی فرایند پیشگرم در نورد، دوقلوهای آنیل در زمینه برنز تشکیل می‌شوند. با انجام نورد، مناطق گردابه ای که در جلو جبهه موج کشیده شده است(شکل4)، مسطح شده و در مواردی در داخل زمینه فولادی فرو می رود (شکل8 الف، ب). با روی هم قرار گرفتن موج ها، مناطق فصل مشترک به هم فشرده می‌شوند اما با یکدیگر جوش نمی‌خورند و در عمل مانند یک ناپیوستگی (در شکل 8 با فلش مشخص شده) در ساختار باقی می‌مانند. ذرات فولاد جدا شده از زمینه در امتداد تاج موج و در داخل ناحیه گردابه ای مشاهده می‌شود و تایید کننده ذوب بخشی از برنز و فولاد در فصل مشترک است (شکل4 الف). در اثر نورد و تغییر شکل فصل مشترک، ارتباط این ذرات فولاد جدا شده بادنباله موج قطع شده و به صورت جزیره‌های مجزا در زمینه برنز باقی می‌مانند (شکل8 ج ، د). در مناطق مجاور گردابه‌ها، احتمال گیرافتادن بخشی از فلز پرنده برنز در زیر موج پیش رونده فولاد وجود دارد. دراین مناطق براساس مقدار ذوب و نفوذ؛ ترکیبات با غلظت آهن از 10 تا 20 درصد مشاهده می‌شود (شکل 5 و جدول3؛ نقطه A در نمونه ج1 و نقطه E در نمونه ج3).

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]



شکل 8- تغییرشکل فصل مشترک اتصال انفجاری در اثر نورد سرد و گرم؛
الف، ب- مناطق گردابه مسطح شده و فرورفته در داخل زمینه فولادی، ج، د- ذرات فولاد وارد شده در زمینه برنز، ه، و- جزیره‌های جدا شده از زمینه برنز، ز، ک- مناطق متخلخل فشرده شده در اثر نورد



شکل 9- تشکیل پیوند فلزی بین مس و فولاد در فصل مشترک اتصال انفجاری در اثر نورد؛
الف-AR1، ب- AR2، ج- AR3، د- AR4، ه- AR5، و- AR6

با انجام عملیات نورد و مسطح شدن فصل مشترک اتصال موجی، این نواحی به صورت جزیره‌های جدا شده از زمینه برنز مشاهده می‌شوند(شکل 8-ه، 8-و). مناطق متخلخل که عمدتا شامل اکسیژن و آهن هستند و ناشی از حبس شدن هوا و اکسیدشدن فولاد در حین اتصال است(شکل 5 و جدول3؛ نقطه A در نمونه الف1)؛ در اثر نورد به صورت لایه‌های خرد شده و فشرده شده در می‌آیند. (شکل 8-ز، 8-ک).

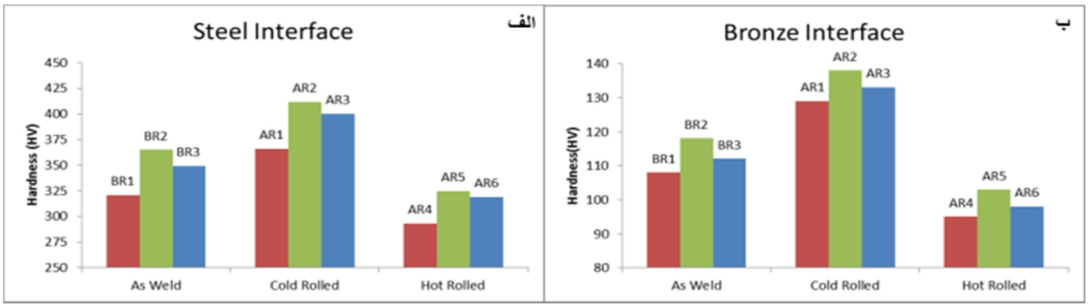
در حالت بلافاصله بعد از جوش، مرزهای مجزای بین برنز و فولاد مشاهده می‌شود(شکل 6). در این مناطق لایه انتقالی (نفوذی) وجود ندارد و زمینه‌های برنز و فولاد در تماس نزدیک نیستند و فاصله‌های هوایی در مناطق مختلف فصل مشترک یافت می‌شود.

با استفاده از نورد و دمای بالا، تا حدودی این موانع برطرف می‌شود و پیوند فلزی بین برنز و فولاد تشکیل می شود. حفره‌ها و تخلخل‌های انقباضی در حین اتصال، دراثر نورد به هم فشرده شده و مرزهای مجزا به یکدیگر نزدیک می‌شوند (شکل 9).

3-3-سختی سنجی

نتایج اندازه گیری سختی درمقطع نمونه‌های جوشکاری شده قبل و بعداز نورد در شکل (10) آورده شده است. مقادیر سختی در مجاورت فصل مشترک در زمینه فولاد (شکل10-الف) و در مجاورت فصل مشترک در زمینه برنز (شکل10-ب) نشان داده شده است. سختی برنز و فولاد در حالت اولیه به ترتیب 80 و 250 ویکرز است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]



شکل10- نتایج اندازه گیری سختی درمقطع نمونه‌های جوشکاری شده قبل و بعد از نورد

الف- در زمینه فولاد، ب- در زمینه برنز

بعد از جوشکاری انفجاری سختی فولاد و برنز حداقل 28 درصدافزایش یافته است. دلیل افزایش سختی لایه‌ها، کرنش سختی ایجاد شده به وسیله برخورد با سرعت بالای صفحات در حین جوشکاری انفجاری است. لازم به ذکر است افزایش سختی در فاصله 50 میکرونی فصل مشترک لایه‌های برنز و فولاد نیز مشاهده می‌شود. افزایش سختی با دور شدن ازفصل مشترک اتصال مقداری کاهش دارد.

کرنش سختی اتصال برنز - فولاد در حین نورد سرد همراه با افزایش سختی بیش از 13 و 17 درصد برای فولاد و برنز، به ترتیب است. با انجام نوردگرم، بازیابی و تبلورمجدد درساختار لایه ها صورت میگیرد و باعث می شود سختی نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده و نورد سرد شده بیش از12 و 25درصد برای برنز و 8 و 20 درصد برای فولاد کاهش داشته باشد. داده‌های سختی به دست آمده نشان می‌دهد که مقدار افزایش سختی دراثر جوشکاری و نورد سرد برای برنز درمقایسه با فولاد بیشتر است (میانگین% 4/5). همچنین مقدار کاهش سختی در اثر تبلورمجدد حین نورد گرم در برنز بیشتر از فولاد است (میانگین %5/6).

4- نتیجه گیری

بررسی ریزساختارها و رفتار مکانیکی فصل مشترک‌های مختلف موجی برنز/فولاد انجام شد. با توجه به تغییرات در ریزساختار و توزیع عناصر، فصل مشترک های کامپوزیت های برنز/فولاد تولید شده توسط پارامترهای مختلف به چهار دسته تقسیم شدند: فصل مشترک موجی و گردابه‌ای همراه با ناحیه ذوب موضعی (اتصال سالم)، مناطق با نفوذ آهن در مس در مجاورت گردابه‌ها، فصل مشترک‌های با نقص (شامل ریز حفره‌ها، تخلخل‌های انقباضی و ذرات فولاد در فصل مشترک) و فصل مشترک بدون پیوند فلزی. در زیر خلاصه‌ای از نتایج اصلی آمده است. در مناطق گردابه‌ای؛ میزان آهن بین 15 تا 20 درصد، مس 73 تا 77 و قلع بین 7 تا 8 (درصد وزنی) است. در گردابه ها و مناطق مجاور ؛ میزان آهن بین 8 تا 10 درصد، مس 82 تا 84 و قلع بین 7 تا 9 (درصد وزنی) می‌باشد. با نفوذ آهن در مس در مجاورت گردابه‌ها مناطق با آهن بین 1 تا 3/5 درصد، مس 88 تا 89 و قلع بین 8 تا 9/5 (درصد وزنی) تشکیل می‌گردد. در مناطق معیوب که شامل ترک‌ها، ریز حفره‌ها، تخلخل‌های انقباضی و ذرات فولاد در فصل مشترک است میزان اکسیژن بین 5 تا 6 درصد، آهن بین 70 تا 88 درصد (درصد وزنی) می‌باشد. در آزمایش سختی نمونه‌های جوشکاری به ترتیب بیشترین انرژی برخورد، مرتب می‌شوند. حداکثر سختی برای نمونه‌های BR2، AR2 و AR5 به ترتیب 118، 138 و 103 ویکرز به دست آمد. تاثیرات ناشی از پارامترهای جوشکاری، بعد از نورد سرد و گرم هم باقی می‌ماند و رتبه‌بندی سختی تغییر نمی‌کند. یعنی نمونه‌های BR2، BR3 و BR1 به ترتیب سختی از زیاد به کم قرار می‌گیرند و همین ترتیب پس ازنورد سرد و گرم نیز وجود دارد.

منابع

1- Zhang, H., Jiao, K.X., Zhang, J.L. and Liu, J., 2019. Comparisons of the microstructures and micro-mechanical properties of copper/steel explosive-bonded wave interfaces. Materials Science and Engineering: A, 756, pp.430-441.

2- Zhang, H., Jiao, K.X., Zhang, J.L. and Liu, J., 2018. Microstructure and mechanical properties investigations

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

of copper-steel composite fabricated by explosive welding. Materials Science and Engineering: A, 731, pp.278-287.
3- Zhang, H., Jiao, K.X., Zhang, J.L. and Liu, J., 2018. Experimental and numerical investigations of interface characteristics of copper/steel composite prepared by explosive welding. Materials & Design, 154, pp.140-152.
4- Mousavi, S.A. and Sartangi, P.F., 2009. Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel. Materials & Design, 30(3), pp.459-468.
5- Ben-Artzy, A., Stern, A., Frage, N., Shribman, V. and Sadot, O., 2010. Wave formation mechanism in magnetic pulse welding. International Journal of Impact Engineering, 37(4), pp.397-404.
6- Wang, H. and Wang, Y., 2019. High-velocity impact welding process: A review. Metals, 9(2), p.144.
7-Liu, B.X., Huang, L.J., Geng, L., Wang, B., Liu, C. and Zhang, W.C., 2014. Fabrication and superior ductility of laminated Ti–TiBw/Ti composites by diffusion welding. Journal of Alloys and Compounds, 602, pp.187-192.
8- Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., 2005. Friction stir welding and processing. Materials science and engineering: R: reports, 50(1-2), pp.1-78.
9-Kraetzsch, M., Standfuss, J., Klotzbach, A., Kaspar, J., Brenner, B. and Beyer, E., 2011, October. Laser beam welding with high-frequency beam oscillation: welding of dissimilar materials with brilliant fiber lasers. In International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (Vol. 2011, No. 1, pp. 169-178). Laser Institute of America.
10-Mokhtarishirazabad, M., Simpson, C., Horne, G., Kabra, S., Truman, C., Moffat, A. and Mostafavi, M., 2019, July. Study of the fracture toughness in electron beam welds. In Pressure Vessels and Piping Conference (Vol. 58974, p. V06AT06A053). American Society of Mechanical Engineers.
11-Wronka, B., 2010. Testing of explosive welding and welded joints: joint mechanism and properties of explosive welded joints. Journal of materials science, 45(15), pp.4078-4083.
12-Bazarnik, P., Adamczyk-Cieślak, B., Gałka, A., Płonka, B., Snieżek, L., Cantoni, M. and Lewandowska, M., 2016. Mechanical and microstructural characteristics of Ti6Al4V/AA2519 and Ti6Al4V/AA1050/AA2519 laminates manufactured by explosive welding. Materials & Design, 111, pp.146-157.
13-Durgutlu, A., Okuyucu, H. and Gulenc, B., 2008. Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel. Materials & Design, 29(7), pp.1480-1484.
14-Durgutlu, A., Gülenç, B. and Findik, F., 2005. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding. Materials & design, 26(6), pp.497-507.
15-Liu, Y., Li, C., Hu, X., Yin, C. and Liu, T., 2019. Explosive welding of copper to high nitrogen austenitic stainless steel. Metals, 9(3), p.339.
16-Wang, Y., Li, X., Wang, X. and Yan, H., 2018. Fabrication of a thick copper-stainless steel clad plate for nuclear fusion equipment by explosive welding. Fusion Engineering and Design, 137, pp.91-96.
17-Saravanan, S. and Raghukandan, K., 2012. Weldability windows for explosive cladding of dissimilar metals. In Advanced Materials Research (Vol. 445, pp. 729-734). Trans Tech Publications Ltd.
18-Asemabadi, M., Sedighi, M. and Honarpisheh, M., 2012. Investigation of cold rolling influence on the mechanical properties of explosive-welded Al/Cu bimetal. Materials Science and Engineering: A, 558, pp.144-149.
19-Gladkovsky, S.V., Kuteneva, S.V. and Sergeev, S.N., 2019. Microstructure and mechanical properties of sandwich copper/steel composites produced by explosive welding. Materials Characterization, 154, pp.294-303.
20-Dyja, H., Mróz, S. and Stradomski, Z., 2003. Properties of joint in the bimetallic rods Cu-Al and Cu-steel after explosive cladding and the process of rolling. Metalurgija, 42(3), pp.185-191.
21-Dyja, H., Mróz, S. and Milenin, A., 2004. Theoretical and experimental analysis of the rolling process of bimetallic rods Cu-steel and Cu-Al. Journal of Materials Processing Technology, 153, pp.100-107.
22-نیکبخت هومن، خانزاده محمد رضا، بختیاری حمید. بررسی تاثیر متغیرهای جوشکاری انفجاری بر رفتار خوردگی اتصال دو لایه انفجاری ورق های آلومینیوم سری 5000 - مس. علوم و فناوری جوشکاری ایران 1400، 7 (2) :24-13
23-نریمانی رحیم، الیاسی مجید، حسین زاده مرتضی، آقاجانی درازکلا حامد. تاثیر رزوه پین ابزار برروی جریان مواد و خواص مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ 6065 آلومینیوم و مس خالص. علوم و فناوری جوشکاری ایران 1398، 5 (1) :136-125
24- قربانی امیر یاسر، ذوالریاستین اشکان، ترابیان حسین. تأثیر متغیرهای فرایند جوش اصطکاکی چرخشی بر خواص مکانیکی و فیزیکی اتصال لوله آلومینیوم به مس. علوم و فناوری جوشکاری ایران 1399، 6 (2) :39-29
25-Livne, Z. and Munitz, A., 1987. Characterization of explosively bonded iron and copper plates. Journal of materials science, 22(4), pp.1495-1500.
26-Khanzadeh Gharahshiran, M.R., Khoshakhlagh, A., Khalaj, G., Bakhtiari, H. and Banihashemi, A.R., 2018. Effect of postweld heat treatment on interface microstructure and metallurgical properties of

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

30-Lysak, V.I. and Kuzmin, S.V., 2012. Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas. Journal of Materials Processing Technology, 212(1), pp.150-156.
31-De Rosset, W.S., 2006. Analysis of explosive bonding parameters. Materials and manufacturing processes, 21(6), pp.634-638.
32-Walsh, J.M., Shreffler, R.G. and Willig, F.J., 1953. Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions. Journal of Applied Physics, 24(3), pp.349-359.
33-Cowan, G.R., Bergmann, O.R. and Holtzman, A.H., 1971. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals. Metallurgical and Materials Transactions B, 2(11), pp.3145-3155.
explosively welded bronze—Carbon steel. Journal of Central South University, 25(8), pp.1849-1861.
27-Shiran, M.R.K.G., Razazi, M., Bakhtiari, H. and Tavira, A., 2017. Evaluation of Welding Parameter's Effects on Corrosion Behavior of Bronze-Carbon Steel Dual-Layer Explosion Welded Joint at Salt Enviroment. Materials Research, 21.
28-Szulc, W., Pietrzyk, M., Dyja, H. and Pilarczyk, J.W., 1994. Theoretical and experimental analysis of drawing of steel rods covered with copper. Journal of materials processing technology, 45(1-4), pp.401-406.
29- Zakharenko, I.D. and Zlobin, B.S., 1984. Effect of the hardness of welded materials on the position of the lower limit of explosive welding. Combust., Explos. Shock Waves (Engl. Transl.);(United States), 19(5).

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]