

بررسی تأثیر مقدار کرنش و دمای نورد بر ریزساختار و سختی اتصال انفجاری ورق‌های فولاد ۳۰۴- مس

ابراهیم اسدیان^۱، غلامرضا خلیج^{۲*}، محمدرضا خانزاده قره‌شیران^۳، سیروس بحری^۴

۱- کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه،

۳- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرمجلسی، ۴- کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

(تاریخ وصول: ۹۸/۶/۱۶، تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۳)

چکیده

در این پژوهش تأثیر مقدار کرنش و دمای نورد بر ریزساختار و سختی اتصال انفجاری ورق‌های فولاد زنگ نزن ۳۰۴- مس بررسی شد. جوشکاری انفجاری با دو ضخامت ماده منفجره (۴۶ و ۷۹ میلی‌متر) و دو فاصله توقف (۲ و ۳ میلی‌متر) انجام شد. نتایج میکروسکوپ نوری بعد از جوش نشان داد که همه نمونه‌ها دارای فصل مشترک موجی هستند. نتایج میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDS قبل از نورد نشان داد که در همه نمونه‌ها ناحیه ذوب در فصل مشترک مشاهده شد. نتایج ریزسختی سنجی نشان داد که بیشترین سختی فصل مشترک مربوط به نمونه با بیشترین ضخامت ماده انفجاری و فاصله توقف است. عملیات نورد نمونه‌ها با میزان کاهش ضخامت ۲mm در دو حالت مختلف بدون پیش‌گرم و با پیش‌گرم در دمای ۳۰۰°C و زمان ۳۰ دقیقه انجام شد. نتایج میکروسکوپ نوری بعد از نورد نشان داد که در تمام حالت‌های بعد از نورد کاهش دامنه موج‌ها (ضخامت موج‌ها) ایجاد شده است. نتایج میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDS در شرایط بعد از نورد به همراه پیش‌گرم نشان داد که در نتیجه عملیات پیش‌گرم قبل از نورد نفوذ عناصر مس و آهن از فصل مشترک ناحیه ذوب- فلز مس اتفاق افتاده است. نتایج ریزسختی سنجی بعد از نورد در حالت بدون پیش‌گرم نشان داد که میزان سختی بعد از نورد در نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. اما در نمونه‌های پیش‌گرم شده میزان سختی کمتر از نمونه‌های قبل از نورد بود.

واژه‌های کلیدی: اتصال، جوشکاری انفجاری، فولاد زنگ نزن، مس، نورد، عملیات پیش‌گرم.

Investigating the Effect of Strain and Rolling Temperature on the Microstructure and Hardness of Explosively Bonded Copper-304 Stainless Steel Plates

E. Asadian, Gh. Khalaj*, M. R. Khanzadeh GharahShiran, S. Bahri

Saveh Branch, Islamic Azad University

(Received:9/7/2019, Accepted:9/25/2019)

Abstract

In this research, the effect of the amount of strain and rolling temperature on the microstructure and the hardness of the explosively bonded 304 stainless steel- copper sheets were investigated. Explosive welding was performed using two explosive thickness of 46 and 79 mm with a stand-off distance of 2 and 3 mm. The results of the optical microscope after welding showed that all samples had a common wavy interface. The results of scanning electron microscopy and EDS analysis showed that in all samples the melting region was observed in the joint. The results of micro-hardness tests showed that the most hardness in interface was the sample with the highest thickness of the explosive and the stand-off distance. Rolling operations were carried out with a thickness reduction of 2 mm in two different conditions without preheating and preheating at 300 °C and 30 minutes. The results of the optical microscopy after rolling showed that in all cases after rolling, a decrease in the amplitude of the waves (wavelength thickness) was created. The results of the scanning electron microscopy and EDS analysis in the post-rolling and pre-heat conditions indicated that as a result of pre-heat before rolling operation, the copper and iron elements diffused from the interface of copper melting-metal region. Investigating the results of post-rolling non-treating samples showed that hardness after rolling in all samples increased. But in pre-heated samples, the hardness was less than that of as-welded samples.

Keywords: Joining, Explosive Welding, Stainless Steel, Copper, Rolling, Preheating Treatment.

۱- مقدمه

که افزایش فاصله توقف و بار انفجار باعث تبدیل فصل مشترک از حالت صاف به حالت موجی شکل و در نهایت ایجاد قسمت‌های مذاب در فصل مشترک جوش و تشکیل ترکیبات بین فلزی در این ناحیه شده است. بناک و همکاران [۷]، به بررسی اتصال آلومینیوم - فولاد آستنیتی پرداخته و با کمک گرفتن از روش‌های متالوگرافی، سختی سنجی و نیز میکروسکوپ الکترونی روبشی بیان نمودند که ساختار در مرز مشترک اتصال بیشتر تمایل به تشکیل ترکیبات بین فلزی دارد و اتصال حاصل از نظر خواص مکانیکی و ثبات ساختاری دارای کیفیت قابل قبولی بوده است.

دیجا و همکاران [۸ و ۹]، پس از تحلیل نظری و تجربی فرآیند 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 فرآیند نورد دستیابی به محصول اتصال انفجاری را با کیفیت پیوستگی قابل مقایسه با مواد اولیه پس از جوشکاری انفجاری تضمین می‌کند.

محققان مختلف به منظور بهبود خواص مکانیکی جوش‌های انفجاری به بررسی تأثیر تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD^۱) توسط روش‌های مختلف بر روی نمونه‌های جوش انفجاری پرداختند. از جمله این روش‌ها ECAP^۲ یا تغییر شکل در کانال‌های مشابه زاویه دار، ARB^۳ یا فرآیند نورد تجمعی و ECAR^۴ یا تغییر شکل ورق در قالب به‌وسیله نورد پرداختند. غفاری و همکاران به بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار ورق دو لایه جوش انفجاری شده آلومینیوم - مس بعد از فرآیند تغییر شکل در کانال زاویه‌دار به‌وسیله نورد ECAR پرداختند. این محققان مشاهده کردند که با اعمال پاس‌های بیشتر دانه‌بندی نمونه‌ها ریزتر می‌شود. همچنین نتایج آزمون‌های مکانیکی و سختی نشان داد که با افزایش اعمال پاس‌ها خواص مکانیکی بهتری ایجاد می‌شود [۱۰ و ۱۱].

۲- روش تحقیق

۲-۱- انتخاب مواد

در این تحقیق از ورق‌های فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ به‌عنوان صفحه پایه با ابعاد ۴×۲۵۰×۲۵۰ mm و مس خالص به‌عنوان صفحه پرند با ابعاد ۳×۲۵۰×۲۵۰ mm استفاده شده است. ترکیب شیمیایی فولاد ۳۰۴ شامل ۱۸/۹۱ Cr، ۸/۴۴ Ni، ۱/۷۹ Mn، ۰/۴۸ Si و ۰/۱۵

تغییر پارامترهای جوشکاری انفجاری نظیر فاصله توقف، بار انفجار (نسبت وزن ماده منفجره به وزن صفحه پرنده) باعث تغییر شکل و ریزساختار فصل مشترک اتصال می‌شود. با افزایش این پارامترها در اتصال غیر همجنس امکان تشکیل ترکیبات بین فلزی در مجاورت گردابه امواج فصل مشترک امکان پذیر می‌گردد که بر خواص مکانیکی اتصال تأثیرگذار است [۴-۱]. همچنین با تغییر این پارامترها می‌توان حالت بهینه‌ای از اتصال با خواص مطلوب را به‌دست آورد. با انجام عملیات نورد بر روی نمونه‌های جوش انفجاری خواص ریزساختاری و مکانیکی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. با انجام نورد بر روی نمونه‌های جوشکاری انفجاری شده می‌توان تأثیر انجام عملیات نورد را بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی از جمله سختی ارزیابی کرد. همچنین با انجام عملیات پیش گرم قبل از نورد می‌توان تأثیر این عامل را نیز بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی ارزیابی نمود.

فاضل و همکاران، اثر بارگذاری انفجاری متغییر بر خواص فصل مشترک اتصال انفجاری مس به فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۱۰ را بررسی کردند و دریافتند که با افزایش میزان بار انفجاری، دامنه و طول موج در فصل مشترک افزایش یافته و همچنین مناطق ذوب موضعی منجمد شده بیشتر می‌شود. در نتیجه سختی در هر دو سمت فولاد و مس بیشتر می‌گردد [۱].

دورغوتلو و همکاران [۲]، تغییر پارامترهای جوشکاری، اتصال فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را به مس خالص بررسی کردند، بررسی‌های آن‌ها نشان داد که در جوشکاری این دو نوع فلز با افزایش فاصله توقف، فصل مشترک از حالت صاف به موجی تبدیل می‌شود و با زیاد شدن این فاصله دامنه و طول موج فصل مشترک افزایش یافته و در نتیجه سختی به‌طور محسوسی زیاد می‌گردد.

عاصم آبادی و همکاران [۳]، به تحقیق در مورد تأثیر نورد سرد بر خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم - مس که به‌وسیله فرآیند جوشکاری انفجاری به یکدیگر متصل شدند پرداختند، و به این نتیجه رسیدند که فرآیند نورد به‌طور قابل ملاحظه‌ای باعث تغییر ساختار میکروسکوپی اتصال شده و میزان حفرات ریز را کاهش می‌دهد و موجب افزایش استحکام برشی اتصال می‌گردد، همچنین آن‌ها دریافتند که با انتخاب نامناسب پارامترهای نورد مانند سامانه طراحی نورد، سرعت خنک کاری و غیره ممکن است مقاومت برشی اتصال تا میزان ۴۰٪ کاهش یابد.

در پژوهشی که در مورد فاصله توقف ورق‌ها نسبت به یکدیگر توسط موسوی و همکاران [۵ و ۶] در اتصال انفجاری سه لایه آلومینیوم ۵۰۸۳، آلومینیوم ۱۲۵۰ و فولاد دریایی انجام گرفت، پس از بررسی‌های ریزساختاری و استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص شده

1- Severe Plastic Deformation
2- Equal Channel Angular Pressing
3- Accumulative Roll Bonding
4- Equal Channel Angular Rolling

محلول اکسید آلومینیوم پولیش زده شدند. پس از پولیش سطح نمونه‌ها با الکل شسته و خشک شدند و توسط محلول $33\text{ml HNO}_3 + 33\text{ml HCL} + 34\text{ml H}_2\text{O}$ 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. آزمون ریزسختی سنجی ویکرز توسط دستگاه مدل Koopa با نیروی اعمالی 50 gr و به مدت 10 ثانیه انجام شد. آزمون از مناطق مختلف فصل مشترک (هم ناحیه مسی و هم ناحیه فولاد زنگ نزن) انجام شد. انجام آزمون برای هر فصل مشترک در سه نقطه مختلف انجام شد تا اعداد به دست آمده نمایانگر بهتری از سختی فصل مشترک باشند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نمونه‌های جوش قبل از عملیات نورد

۳-۱-۱- بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری

ریزساختار میکروسکوپ نوری نمونه BR1 در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فصل مشترک به صورت موجی ایجاد شده است. ناحیه ذوب در فصل مشترک به خوبی قابل تشخیص نیست و بنابراین وجود این ناحیه باید در تصاویر SEM و از طریق آنالیز EDS تشخیص داده شود. فاصله L نشان داده شده در شکل (۱-ب) طول موج بوده و فاصله H برابر دامنه موج است. این فواصل از طریق چندین عکس متالوگرافی در بزرگنمایی‌های مختلف برای نمونه BR1 اندازه‌گیری شده است. میانگین طول موج L برای این نمونه جوش برابر $202\text{ }\mu\text{m}$ و میانگین دامنه موج H برابر $57\text{ }\mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری L و H توسط نرم‌افزارهای ImageJ و Digitizer انجام پذیرفت.

در جوشکاری انفجاری دو فصل مشترک فلز به فلز و فلز به مذاب ایجاد یافته می‌تواند در فصل مشترک حاصل شود. در کنار یک سرعت حداقل صفحه پرده، یک مقدار حداقل انرژی جنبشی برخوردی برای اتصال دهی وجود دارد، در اثر برخورد صفحه پرده، انرژی جنبشی مصرفی به انرژی پتانسیل تبدیل شده و منجر به تغییر شکل سطح 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 بر اساس فشار بالای ناشی از امواج شوکی انفجار و تغییر شکل پلاستیکی شدید و ایجاد گرمای بی دررو در اثر گیر افتادن گردابه در جلوی جبهه برخی امواج در اثر استحاله انرژی جنبشی به انرژی حرارتی در طول برخورد و با حرارت

C (درصد وزنی) و ترکیب مس شامل 0.15 Al ، 0.05 Fe ، 0.03 Cr ، 0.03 Ni بود.

نوع ماده منفجره از نوع آماتول $95/5$ بود که دارای ترکیب تری نیترو تولوئن 5 درصد و نیترات آمونیم 95 درصد است. سرعت انفجار برابر با 2507 متر بر ثانیه بود.

شرایط آزمون‌ها در جدول (۱) با پسوند BR به معنی قبل از نورد (Befor Rolling) آمده است. بار انفجاری در جدول (۱) نمایانگر نسبت وزن ماده منفجره به وزن صفحه پرده می‌باشد که از عبارت (چگالی ماده منفجره \times ضخامت ماده منفجره) \div (چگالی صفحه پرده \times ضخامت صفحه پرده) حاصل می‌شود. سرعت ماده منفجره 3650 m/s است.

۲-۲- عملیات نورد

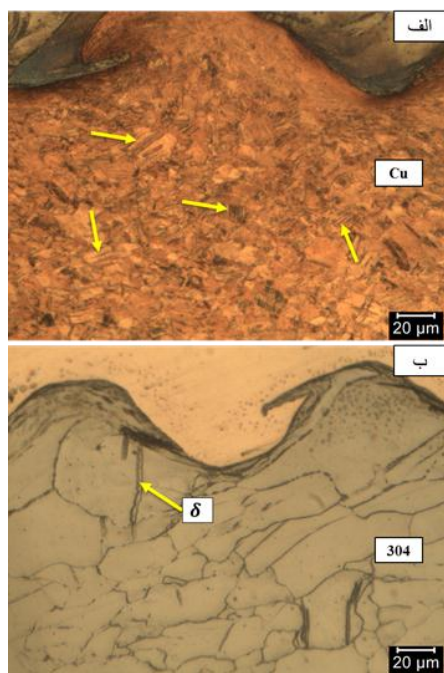
به منظور بررسی تأثیر عملیات نورد بر روی ریزساختار و خاصیت مکانیکی سختی نمونه‌های جوش انفجاری شده، هر سه نمونه با دو متغیر مختلف تحت عملیات نورد قرار گرفتند. متغیرهای نورد عبارتند از دمای پیش گرم و میزان تغییر ضخامت. ۳ نمونه جوش بدون پیش گرم و با میزان تغییر ضخامت 2 میلی‌متری تحت عملیات نورد قرار گرفتند. ۳ نمونه دیگر با میزان پیش گرم 300°C و با همان میزان تغییر ضخامت 2 میلی‌متری (درصد کاهش ضخامت $33/33$ درصد) نورد شدند. عملیات پیش گرم قبل از نورد به مدت 30 دقیقه انجام شد. ضخامت اولیه نمونه‌ها 6 mm بود. در جدول (۱) منظور از AR بعد از نورد (After Roling) است.

جدول ۱- تقسیم بندی نمونه‌های تحقیق

نمونه (آزمون)	جوشکاری		نورد
	ضخامت ماده انفجاری (mm)	فاصله توقف پیش گرم (mm)	
BR1	۴۶	۳	-
	۷۹	۳	
	۷۹	۲	
BR2	۴۶	۳	۲
	۷۹	۳	
	۷۹	۲	
BR3	۴۶	۳	۲
	۷۹	۳	
	۷۹	۲	
AR1	۴۶	۳	۳۰۰
	۷۹	۳	
	۷۹	۲	
AR2	۴۶	۳	۲
	۷۹	۳	
	۷۹	۲	
AR3	۴۶	۳	۲
	۷۹	۳	
	۷۹	۲	
AR4	۴۶	۳	۲
	۷۹	۳	
	۷۹	۲	
AR5	۴۶	۳	۲
	۷۹	۳	
	۷۹	۲	
AR6	۴۶	۳	۲
	۷۹	۳	
	۷۹	۲	

۳-۲- آزمون‌های بررسی ساختاری و متالورژیکی

برای بررسی میکروسکوپی، در ابتدا نمونه‌ها با ابعاد 10×10 میلی‌متر با دستگاه وایر کات در جهت عمود بر محور اتصال و سطح جوشکاری شده بریده و سپس مانند سرد شدند. در متالوگرافی ابتدا سطح نمونه‌ها توسط کاغذ سنباده شماره 60 تا 2500 سنباده زنی و با استفاده از

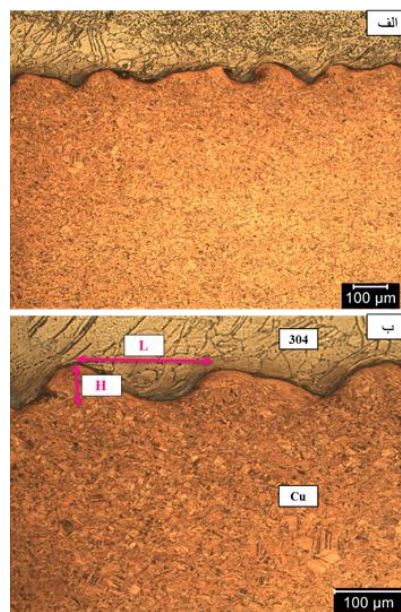


شکل ۲- ریزساختار در ناحیه نزدیک فصل مشترک در نمونه BR1: (الف) طرف مس و (ب) طرف فولاد ۳۰۴.

تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک اتصال انفجاری نمونه BR2 در شکل (۳) نشان داده شده است. فصل مشترک نمونه ۲ نیز به صورت موجی ایجاد شده است اما موج‌های ایجاد شده منظم‌تر از موج‌های نمونه BR1 هستند. میانگین طول موج برابر $280 \mu\text{m}$ و میانگین دامنه موج برابر $80 \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد. بزرگ‌تر بودن موج‌های ایجاد شده به علت بیشتر بودن ضخامت ماده منفجره در نمونه BR2 نسبت به نمونه BR1 است.

با افزایش ضخامت ماده منفجره سرعت برخورد افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش فشار برخوردی و زاویه دینامیکی برخورد و انرژی جنبشی مصرفی در نقطه برخورد می‌شود. قسمتی از انرژی جنبشی مصرفی در فصل مشترک به انرژی پتانسیل تبدیل شده و باعث می‌شود که ورق‌ها در طول سطح برخورد تغییر شکل دهند. با افزایش انرژی جنبشی مصرفی تغییر شکل پلاستیکی بیشتری در فصل مشترک ایجاد شده و با این افزایش، رفتار ماده به سیالیت بیشتری میل می‌نماید. سرعت حرکت صفحه پرده با افزایش فاصله توقف و ضخامت لایه انفجاری افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل وجود تفاوت در چگالی و سرعت حرکت موج در فلزات، مومنتم فشاری در دو سمت فصل مشترک با افزایش سرعت حرکت صفحه پرده تغییر نموده و در نتیجه نقطه برخورد در هنگام اتصال دچار نوسان می‌شود. 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.

آدیباتیک ناشی از گازهای محبوس ما بین صفحات می‌تواند ایجاد شده باشد. این مناطق با فلز سرد اطراف احاطه شده و تحت سرعت سرد شدن بالایی در حد 10^5-10^7 K/s قرار دارند [۵].



شکل ۱- فصل مشترک اتصال انفجاری نمونه BR1 در دو بزرگنمایی مختلف.

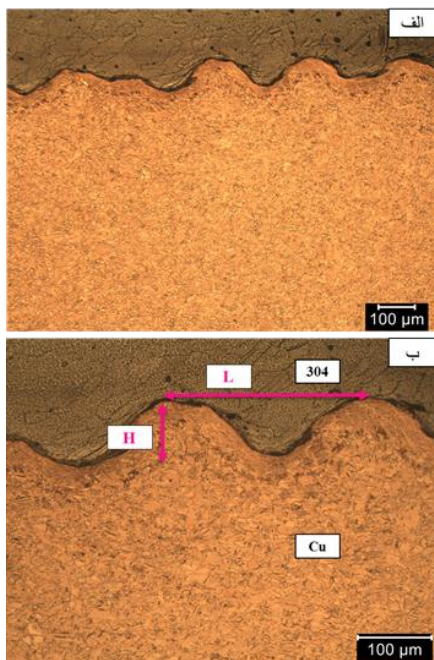
به منظور بررسی دقیق‌تر ریزساختار فلزات پایه (فولاد زنگ نزن ۳۰۴) و پرده (فلز مس) فصل مشترک اتصال در بزرگنمایی بالاتر در شکل (۲) ارائه شده است. ریزساختار میکروسکوپ نوری مس در نزدیکی فصل مشترک اتصال در نمونه BR1 را نشان می‌دهد. تغییرات اندازه دانه‌های محلول جامد مس در شکل (۲-الف) قابل مشاهده است. دانه‌های موجود در داخل موج‌ها بسیار ریزتر از دانه‌های دورتر از فصل مشترک است. پدیده دیگر قابل مشاهده وجود دوقلوبی‌ها در ریزساختار است. تعداد دوقلوبی‌ها با نزدیک شدن به مرز افزایش یافته است (نواحی تیره رنگ) اما به علت ریزتر شدن دانه‌ها، به وضوح قابل مشاهده نیستند. اما در قله موج دوقلوبی مشاهده نمی‌شود.

ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در نزدیک مرز ذوب در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. دانه‌های فولاد ۳۰۴ بزرگ‌تر از دانه‌های مس هستند و ساختار دوقلوبی درون این دانه‌ها مشاهده نمی‌شود. علاوه بر این در این ریزساختار برخلاف ریزساختار فلز مس اندازه دانه‌ها در ناحیه موج کوچک‌تر از سایر نواحی نشده است. با بررسی تصاویر در بزرگنمایی پایین‌تر مشخص شد که اندازه تقریبی دانه در نواحی موج مشابه سایر قسمت‌ها است. حرارت ایجاد شده در اثر انفجار باعث تأثیر بر دانه‌های مس در نواحی بالاتر قله موج شده است زیرا فشار و حرارت بیشترین مقدار بوده اما تأثیری بر دانه‌های فولاد ۳۰۴ نداشته است. علت این موضوع پایین بودن دمای ذوب مس است. امکان دارد در این نواحی تبلور مجدد دانه‌های جدید مس ایجاد شده باشد.

انفجاری نمونه BR2 باشد که باعث اعمال تنش بیشتر در فصل مشترک در هنگام برخورد شده است.

در ریزساختار فولاد ۳۰۴ (شکل ۴-ب) همان طور که مشاهده می شود اندازه دانه ها تغییری نداشته است. نواحی فریت دلتا کشیده شده در شکل (۴-ب) با فلش مشخص شده است.

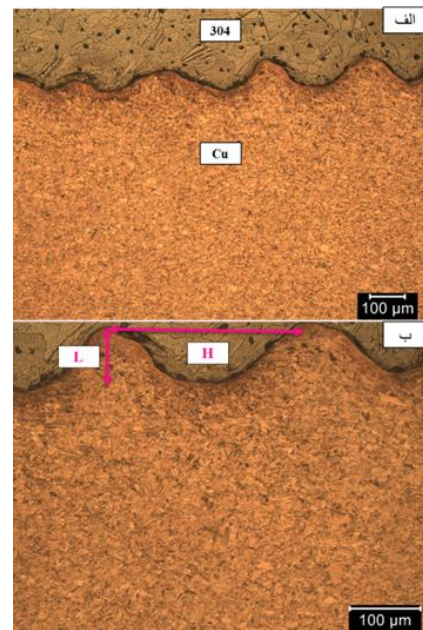
تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک اتصال انفجاری نمونه BR3 در شکل (۵) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود ریزساختار فصل مشترک این نمونه نیز مشابه دو نمونه قبلی به صورتی موجی است. میانگین طول موج برابر $271 \mu\text{m}$ و میانگین دامنه موج برابر $75 \mu\text{m}$ اندازه گیری شد. همان طور که مشاهده می شود موج های ایجاد شده در نمونه BR3 کوچک تر از موج های نمونه BR2 هستند که به علت کمتر بودن فاصله توقف نمونه BR3 نسبت به نمونه BR2 است.



شکل ۵- فصل مشترک اتصال انفجاری نمونه BR3.

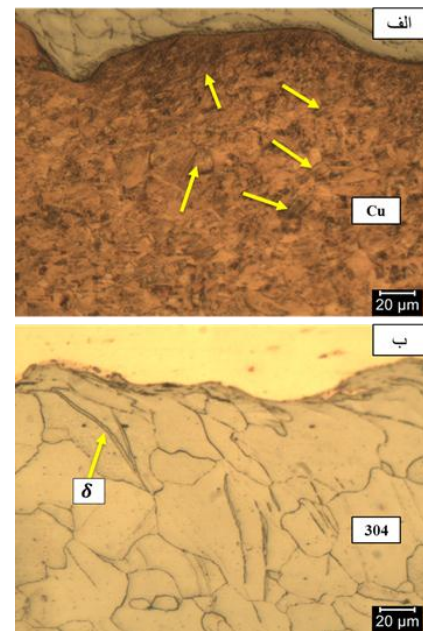
میزان اعوجاج فصل مشترک موجی شکل تابع نسبت چگالی های مواد ρ_1/ρ_2 بوده و کم بودن این نسبت باعث بیشتر شدن انحراف از حالت موجی شکل سینوسی می شود و بر طبق نتایج این نظریه، نسبت دامنه به طول موج تشکیلی در اتصال فلزات غیر هم جنس کمتر از فلزات هم جنس بوده و طول موج فصل مشترک اتصال فلزات غیر هم جنس بیشتر از حالت اتصال فلزات هم جنس می باشد [۱۲].

با کاهش نسبت ρ_1/ρ_2 اختلاف در سرعت جریان در نزدیک نقطه برخورد افزایش یافته و باعث تغییر در الگوی موج می شود و در اثر کاهش نسبت چگالی ها، شکل موج می تواند به طور سریعی تغییر نموده و تغییر از حالت سینوسی شکل موج تسریع شود. همان طور که در نمونه های جوش مشاهده شد به دلیل اختلاف چگالی مس و فولاد زنگ نزن (چگالی مس برابر 8.96 g/cm^3 و چگالی فولاد زنگ نزن 7.8 g/cm^3 برابر



شکل ۳- فصل مشترک اتصال انفجاری نمونه BR2 در دو بزرگنمایی مختلف.

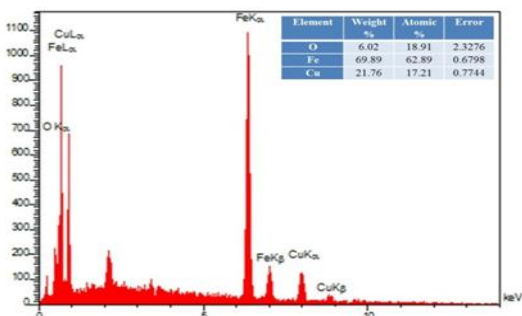
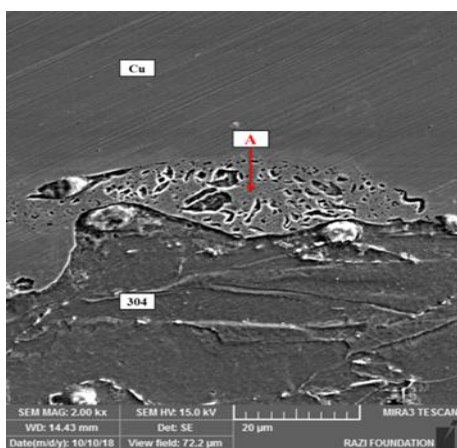
ریزساختار میکروسکوپ نوری مس و فولاد ۳۰۴ نمونه BR2 در نزدیکی فصل مشترک اتصال در بزرگنمایی بالا در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل ۴- ریزساختار در ناحیه نزدیک فصل مشترک در نمونه BR2: (الف) طرف مس و (ب) طرف فولاد ۳۰۴.

نواحی مشخص شده با فلش در (شکل ۴-الف) نواحی دوقلویی هستند. همان طور که مشاهده می شود در این نمونه در نزدیکی فصل مشترک اندازه دانه های مس و نواحی تیره رنگ که همان دوقلویی ها هستند بیشتر شده است. دلیل این امر می تواند بیشتر بودن فاصله توقف و بار

تنهایی ناست و ناحیه مخلوط شده‌ای از این دو است. می‌توان گفت که در این ناحیه، حرارت زیادی ایجاد شده که تمایل به تشکیل منطقه ذوب داشته است. ناحیه ذوب در فصل مشترک اتصال انفجاری در اثر حرارت داخلی ایجاد شده بر اساس فشار بالای ناشی از امواج شوکی انفجار و تغییر شکل پلاستیکی شدید و ایجاد گرمای بی دررو در اثر گیر افتادن گردابه در جلوی جبهه برخی امواج در اثر استحاله انرژی جنبشی به انرژی حرارتی در طول برخورد و با حرارت آدیباتیک ناشی از گازهای محبوس ما بین صفحات می‌تواند ایجاد شده باشد. هر چه میزان فاصله توقف و ضخامت ماده انفجاری بیشتر باشد انرژی حرارتی ایجاد شده در جلوی جبهه انفجار بیشتر شده و در نتیجه ناحیه ذوب اختلاط بیشتری خواهد داشت. اما چون در نمونه BR1 میزان ضخامت ماده منفجره کمتر بود این اختلاط کمتر ایجاد شده است.



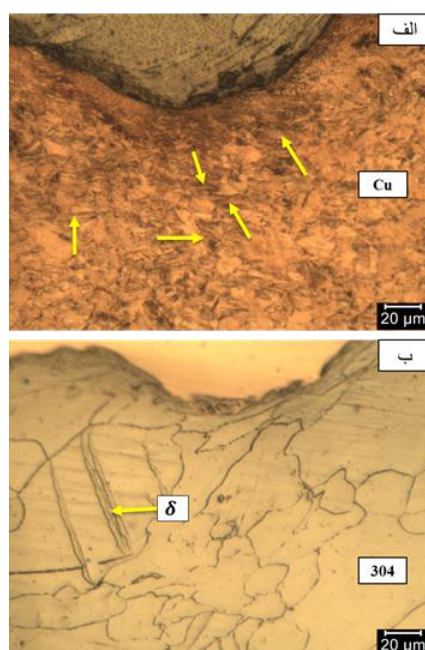
شکل ۷- (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی فصل مشترک اتصال انفجاری نمونه BR1، (ب) نتایج آنالیز EDS از نقطه A.

جدول ۲- نتایج آنالیز EDS نمونه‌ها.

نمونه	نقطه	عنصر (wt%)		
		O	Fe	Cu
BR1	A	6	69.9	21.8
BR2	A	-	19.9	72.6
BR3	A	-	9	82.7
AR1	A	6.2	67.8	23.5
AR4	A	4.31	63.3	31.1
AR5	B	-	14.6	80.5
AR6	C	-	6.7	87.6

$8/06 \text{ g/cm}^3$ موج‌های ایجاد شده به صورت سینوسی کامل نیستند و دامنه موج کوچکتر از طول موج است.

از عوامل دیگر تأثیر گذار بر روی طول موج فصل مشترک زاویه برخورد دو صفحه و ضخامت صفحه پرند است. طول موج‌ها با افزایش زاویه برخورد تا یک حد بحرانی، افزایش یافته و از آن حد بیشتر موج‌ها شروع به از بین رفتن می‌نمایند. وقتی زاویه برخورد ثابت در نظر گرفته شده، طول موج با افزایش ضخامت صفحه پرند زیاد شده است. ریزساختار میکروسکوپ نوری مس و فولاد ۳۰۴ نمونه BR3 در نزدیکی فصل مشترک اتصال در بزرگنمایی بالا در شکل (۶) نشان داده شده است. ریزساختار این نمونه هم در فصل مشترک فولاد ۳۰۴ و هم در فصل مشترک فلز مس مشابه نمونه قبلی است و تفاوت خاصی مشاهده نشد.

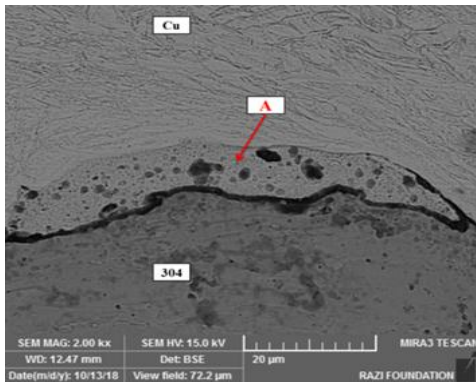


شکل ۶- ریزساختار در ناحیه نزدیک فصل مشترک در نمونه BR3 (الف) طرف مس و (ب) طرف فولاد ۳۰۴.

۳-۱-۲- بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی

ریزساختار میکروسکوپ الکترونی فصل مشترک نمونه BR1 در شکل (۷-الف) ارائه شده است. پدیده بارز قابل مشاهده وجود ناحیه متخلخل در فصل مشترک است. این ناحیه درون قسمت فلز مس ایجاد شده است. این نواحی امکان دارد در نتیجه محبوس شدن هوا و گازهای ایجاد شده در نتیجه انفجار به وجود آمده باشند. نتایج آنالیز EDS از نقطه A مشخص شده در شکل (۷) در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود درصد بالایی اکسیژن (۶/۰۲ درصد وزنی) در این ناحیه وجود دارد که تأیید کننده روش ایجاد این نقاط توسط محبوس شدن هوا و گازهای حاصل از انفجار است. علاوه بر این ۶۹/۸۹ درصد Fe و ۲۱/۷۶ درصد Cu در این ناحیه وجود دارد. این موضوع نشان می‌دهد که ترکیب این ناحیه مس یا فولاد ۳۰۴ به

فصل مشترک کمتر شده است. نتایج آنالیز EDS نقطه A مشخص شده در جدول (۲) ارائه شده است. وجود ۹/۰۱ درصد Fe و ۸۲/۶۷ درصد Cu نشان دهنده ناحیه ذوب بودن این قسمت است.



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی فصل مشترک اتصال انفجاری نمونه BR3.

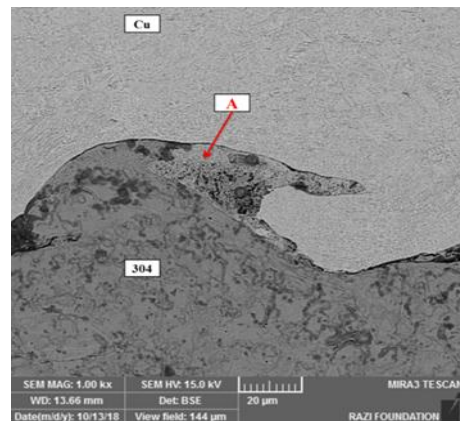
۲-۳- بررسی نمونه‌های جوش بعد از عملیات نورد

۳-۲-۱- بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری

ریزساختار میکروسکوپ نوری نمونه‌های بعد از نورد که بدون عملیات پیش گرم با میزان تغییر ضخامت ۲mm (۳۳/۳۳ درصد) تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند (AR1، AR2، AR3)، در شکل (۱۰) ارائه شده است. پدیده بارز قابل مشاهده کاهش دامنه موج‌ها (ضخامت موج‌ها) در نتیجه اعمال عملیات نورد است که قابل پیش‌بینی بود. پدیده دیگر قابل مشاهده در فصل مشترک نمونه‌ها نواحی تیره رنگ است. این نواحی تیره رنگ در فصل مشترک نمونه‌های قبل از نورد در این حد دیده نمی‌شد. به منظور بررسی دقیق‌تر ماهیت این نواحی باید نتایج آنالیز EDS و تصاویر SEM را مورد بررسی قرار داد.

ریزساختار میکروسکوپ نوری نمونه‌های بعد از نورد که در دمای ۳۰۰°C به مدت ۳۰ دقیقه تحت عملیات پیش گرم قرار گرفته و سپس با میزان تغییر ضخامت ۲mm (۳۳/۳۳ درصد) نورد شده‌اند در شکل (۱۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر اصلی ایجاد شده کاهش دامنه موج‌ها (ضخامت موج‌ها) در نتیجه اعمال عملیات پیش گرم و نورد است. میزان کاهش دامنه موج در این سه نمونه که تحت عملیات پیش گرم قرار گرفته بودند بیشتر از سه نمونه قبل است. دلیل این موضوع می‌تواند نفوذ عناصر از فصل مشترک باشد. در نتیجه افزایش دما تا دمای ۳۰۰°C نیروی محرکه نفوذ فراهم می‌شود و بنابراین پدیده نفوذ در نتیجه وجود شیب غلظتی در فصل مشترک اتفاق می‌افتد. به دلیل یکسان بودن ساختار کریستالی مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ (هر دو دارای ساختار FCC) نفوذ از فصل مشترک راحت‌تر اتفاق افتاده است. این امر باعث کوچک‌تر شدن دامنه فصل موج‌ها شده است.

ریزساختار میکروسکوپ الکترونی فصل مشترک نمونه BR2 در شکل (۸) ارائه شده است. ناحیه ذوب در فصل مشترک در منطقه جلوی جبهه انفجار به رنگ تیره‌تر از ناحیه فلز مس و روشن‌تر از ناحیه فولاد ۳۰۴ است. همان‌طور که ذکر شد این ناحیه به سبب حرارت داخلی ایجاد شده در اثر فشار بالا و همچنین استحاله انرژی جنبشی به انرژی حرارتی در طول برخورد ایجاد شده است. در این نمونه، ناحیه ذوب برخلاف نمونه BR1 به صورت کامل و بدون تخلخل ایجاد شده است. دلیل این موضوع بیشتر بودن ضخامت ماده انفجاری در نمونه BR2 است. این موضوع باعث ایجاد حرارت بیشتری در جلوی جبهه انفجار می‌شود و باعث می‌شود ناحیه ذوب به صورت همگن‌تری تشکیل شود. همچنین عدم تشکیل مناطق متخلخل در نمونه BR2 نشان دهنده بهتر بودن این نمونه نسبت به نمونه BR1 است.



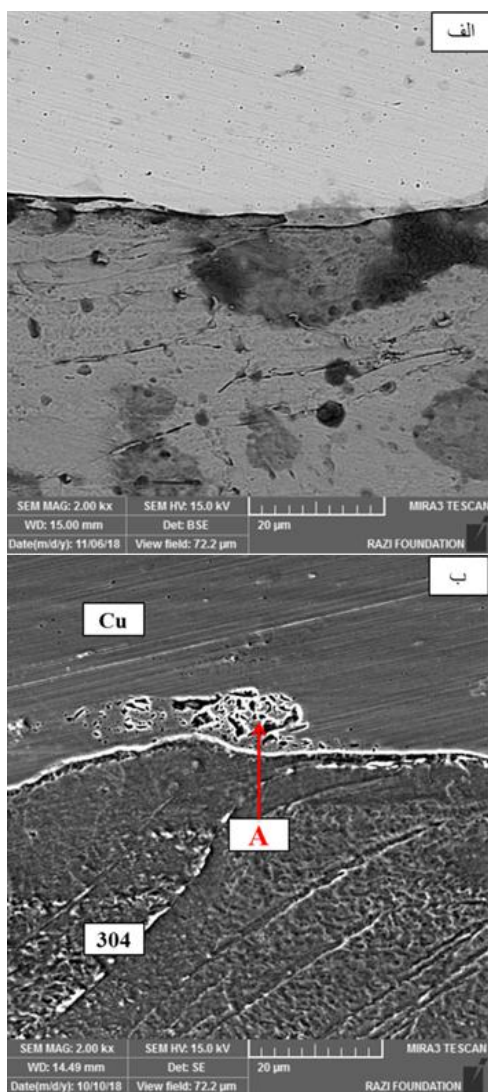
شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی فصل مشترک اتصال انفجاری نمونه BR2.

نتایج آنالیز EDS نمونه BR2 در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان درصد وزنی Fe برابر ۱۹/۹۴ درصد و درصد وزنی Cu برابر ۷۲/۵۹ درصد است. این درصدها مربوط به فلز مس و فولاد ۳۰۴ به تنهایی ناست و بنابراین این ناحیه همان ناحیه ذوب است. بیشتر بودن درصد مس در این ناحیه می‌تواند به علت کمتر بودن دمای ذوب فلز مس نسبت به فولاد ۳۰۴ باشد. در این حالت گرمای ایجاد شده در جلوی جبهه انفجار باعث ذوب بیشتری از فلز مس شده است.

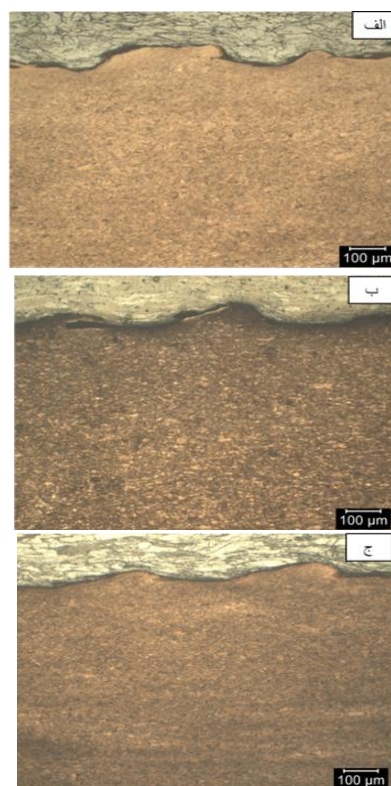
ریزساختار میکروسکوپ الکترونی فصل مشترک نمونه BR3 در شکل (۹) ارائه شده است. ناحیه مشخص شده در فصل مشترک که روشن‌تر از فولاد ۳۰۴ و تیره‌تر از مس است، ناحیه ذوب است. ناحیه ذوب ایجاد شده در نمونه BR3 دارای تخلخل بیشتری از ناحیه ذوب نمونه BR2 و تخلخل کمتری از ناحیه ذوب نمونه BR1 است. همان‌طور که در قسمت‌های قبلی ذکر شد نمونه BR3 دارای فاصله توقف کمتر از نمونه BR2 است و همین مورد باعث ایجاد این تفاوت در ناحیه ذوب شده است. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت ماده منفجره و فاصله توقف، میزان تخلخل‌های ایجاد شده در ناحیه ذوب

۳-۲-۲- بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی

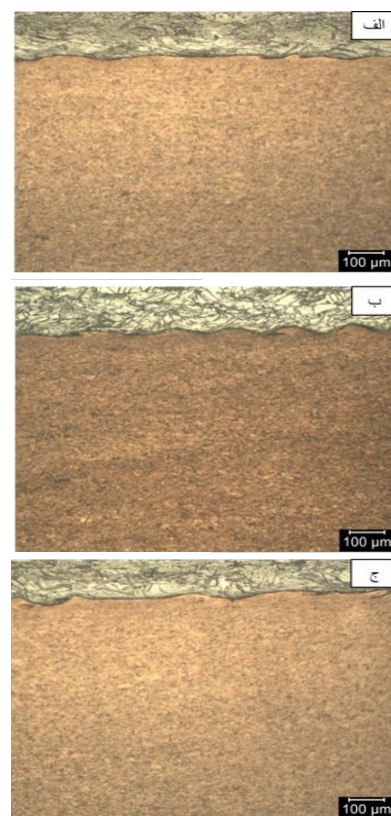
تصویر میکروسکوپ الکترونی از فصل مشترک اتصال نمونه AR1 در دو حالت الکترون‌های ثانویه (الف) و الکترون‌های برگشتی (ب) در شکل (۱۲) ارائه شده است. ناحیه متخلخل A که دارای ریزساختار متفاوت از سایر نقاط است به احتمال زیاد همان ناحیه متخلخل دارای ذوب ناقص است که در تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه BR1 مشاهده شد. نتایج آزمون EDS این ناحیه در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ترکیب شیمیایی این ناحیه تفاوت چندانی با شیمیایی ناحیه متخلخل نمونه BR1 نداشته است. با بررسی نواحی ذوب در نمونه‌های AR2 و AR3 نیز مشخص شد که عملیات نورد باعث تغییر ترکیب نواحی ذوب در فصل مشترک نشده است. علت این امر عدم پیش گرم یا عملیات حرارتی این نمونه‌ها است.



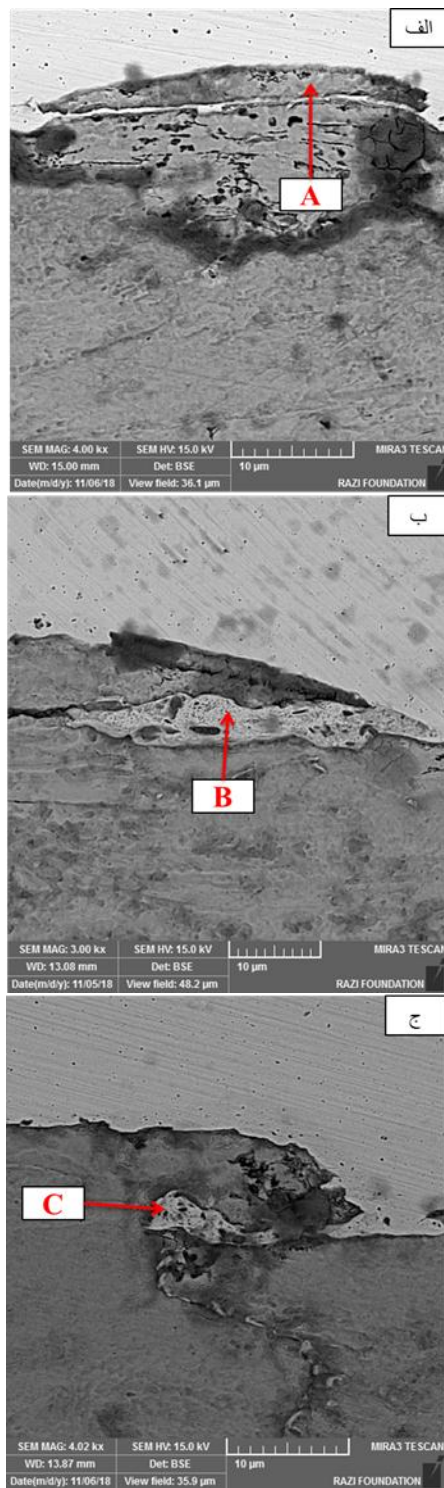
شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی فصل مشترک اتصال نمونه AR1.



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های الف) نمونه AR1، ب) نمونه AR2 و ج) نمونه AR3.



شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک الف) نمونه AR4، ب) نمونه AR5 و ج) نمونه AR6.



شکل ۱۳- ریزساختار میکروسکوپ الکترونی:
الف) AR4، ب) AR5 و ج) AR6.

با بررسی نتایج EDS نقطه C در ناحیه ذوب نمونه AR6 مشاهده می‌شود که در اینجا نیز نفوذ عناصر مس و آهن اتفاق افتاده است (در مقایسه با نتایج EDS نمونه BR3). شیب غلظتی مس در این نمونه کمتر از دو نمونه قبلی است و همین عامل باعث نفوذ کمتر در این نمونه نسبت به دو نمونه قبل شده است. علاوه بر این نیروی محرکه

نمونه‌های AR4، AR5 و AR6 قبل از انجام عملیات نورد در دمای 300°C به مدت ۳۰ دقیقه تحت عملیات پیش گرم قرار گرفته‌اند؛ افزایش دما به‌عنوان نیروی محرکه نفوذ عمل کرده و باعث انجام نفوذ و تغییر ترکیب شیمیایی مابین دو مرز می‌شود، بنابراین می‌توان انتظار تغییر در ترکیب ناحیه ذوب در این نمونه‌ها را داشت.

ریزساختار میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های AR4، AR5 و AR6 به ترتیب در شکل (۱۳-الف، ب و ج) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ریزساختار مناطق ذوب بعد از عملیات پیش گرم و نورد تغییر زیادی اتفاق افتاده است که اولاً در نتیجه نفوذ و مهاجرت عناصر از فصل مشترک در نتیجه عملیات پیش گرم بوده و ثانیاً در نتیجه عملیات نورد بوده است. علاوه بر این عملیات پیش گرم باعث شده میزان تغییر شکل ناشی از عملیات نورد بیشتر باشد. زیرا اعمال تنش همراه با حرارت باعث فعال شدن سامانه‌های لغزشی بیشتری می‌شود و در نتیجه میزان تغییر شکل پلاستیکی بیشتر از حالت بدون پیش گرم است.

با مقایسه نتایج حاصل از EDS نقطه A در ناحیه ذوب نمونه AR4 و نمونه BR1 (حالت بدون پیش گرم و قبل از نورد نمونه AR4)، می‌توان نتیجه گرفت که در نتیجه عملیات پیش گرم نفوذ عناصر مس و آهن اتفاق افتاده است. نفوذ عنصر مس از آلیاژ مس به درون ناحیه ذوب اتفاق افتاده و نفوذ عنصر آهن به‌صورت برعکس از ناحیه ذوب به درون فلز مس بوده است. همچنین اکسیژن این ناحیه به اندازه ۱/۵ درصد کاهش داشته است. پدیده نفوذ در نتیجه وجود شیب غلظتی از فصل مشترکی که شرایط نفوذ بهتری دارد (فصل مشترک هم سیما) اتفاق می‌افتد. ناحیه ذوب و فلز مس هر دو دارای ساختار FCC هستند. علاوه بر این وجود عنصر مس در هر دو ساختار باعث نزدیک‌تر شدن ساختارهای کریستالی دو ناحیه شده است. این عامل باعث ایجاد پدیده نفوذ در این فصل مشترک شده است. نیروی محرکه نفوذ، افزایش دما در نتیجه عملیات پیش گرم، وجود شیب غلظتی و همچنین انرژی ذخیره شده در نتیجه انجام جوش انفجاری هستند.

با مقایسه نتایج حاصل از EDS نتایج آنالیز EDS نقطه B در ناحیه ذوب نمونه AR5 و نمونه BR2 مشاهده می‌شود که در نتیجه عملیات پیش گرم نفوذ عناصر مس و آهن اتفاق افتاده است. میزان نفوذ در این نمونه کمتر از نمونه AR4 بوده است. علت این موضوع تقابل اثر دو نیروی محرکه موجود است. انرژی ذخیره شده در نتیجه انجام عملیات جوش انفجاری در این نمونه بیشتر از نمونه AR4 بود چون میزان ضخامت ماده انفجاری و فاصله توقف در این نمونه بیشتر بوده است اما شیب غلظتی مس (اختلاف درصد مس در فلز مس و ناحیه ذوب) در این نمونه کمتر از نمونه AR4 بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عامل شیب غلظتی تأثیرگذارتر بوده و باعث شده نفوذ در این نمونه کمتر از نمونه AR4 باشد.

مشترک نشان می‌دهد که با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری سختی فلز مس افزایش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه BR2 که دارای بیشترین فاصله توقف و بار انفجاری بین سه نمونه بود دارای بیشترین میزان سختی فلز مس در ناحیه فصل مشترک است که برابر ۱۱۸HV است. در ناحیه فصل مشترک فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ نیز همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین سختی مربوط به نمونه BR2 است که برابر ۳۶۵HV است. فلز مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ هر دو دارای ساختار کریستالی FCC هستند و از این جهت تغییرات ریزساختاری ایجاد شده (به‌عنوان مثال تشکیل نابه‌جایی‌ها و دوقلوبی‌ها در اثر کارسختی) در اثر انجام عملیات جوش انفجاری در این دو تقریباً یکسان است.

در حالت کلی می‌توان گفت که بر اثر نیروی انفجار در ناحیه تماس فلز مس با فولاد زنگ نزن آستنیتی برخورد شدیدی روی می‌دهد که سبب تغییر شکل پلاستیک فلز روکش و پایه در نواحی نزدیک فصل مشترک می‌شود. با افزایش فاصله توقف، سرعت حرکت صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد افزایش پیدا کرده و در نتیجه انرژی جنبشی برخوردی نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه سخت شدن شوکی ناشی از امواج انفجار باعث افزایش ریزسختی می‌شود. همچنین افزایش ضخامت ماده منفجره باعث افزایش انرژی جنبشی برخوردی و در نتیجه باعث افزایش میزان تغییر شکل پلاستیکی در فصل مشترک می‌شود که بر روی سختی فصل مشترک تأثیر گذاشته و باعث افزایش آن می‌شود. افزایش ریزسختی فصل مشترک اتصال با افزایش فاصله توقف و ضخامت ماده انفجاری توسط محققان دیگر نیز گزارش شده بود [۱۶ و ۱۷].

در نتایج آزمون ریزسختی از فصل مشترک اتصال بعد از انجام نورد در شرایط بدون پیش گرم، بیشترین میزان سختی مربوط به فصل مشترک نمونه AR2 است که در فصل مشترک مس برابر ۱۲۸HV و در فصل مشترک فولاد ۳۰۴ برابر ۴۱۲HV است. این حالت در تطابق با نتایج سختی نمونه‌ها قبل از عملیات نورد است. دلیل این امر بیشتر بودن ضخامت ماده انفجاری و فاصله توقف نمونه دوم (AR2 و BR2) است. با مقایسه نتایج حاصل از سختی نمونه‌های قبل و بعد از نورد می‌توان مشاهده نمود که در شرایط بعد از نورد سختی هر سه نمونه افزایش پیدا کرده است. یانگ کی چنگ و همکاران [۱۸] مشاهده کردند که میزان سختی بعد از عملیات نورد از دو فاکتور تأثیر می‌پذیرد که عبارتند از سایز دانه‌بندی و چگالی نابه‌جایی‌ها. با انجام عملیات نورد و افزایش تعداد پاس نورد افزایش چگالی نابه‌جایی و دوقلوبی باعث افزایش میزان سختی می‌شوند. این محققان در مورد نمونه منبزم مشاهده کردند که در پاس دوم ۲۵ درصد افزایش سختی به وجود آمد و با افزایش تعداد پاس میزان سختی رفته رفته افزایش پیدا می‌کرد اما شیب افزایش به‌صورت کاهشی بود به‌طوری که در پاس هشتم بیشینه مقدار سختی که ۵۳ درصد بیشتر از نمونه اولیه بود، به‌دست آمد و پس از آن سختی با شیب کمی کاهش یافت [۱۸]. در نمونه‌های این پژوهش نیز افزایش سختی بعد از نورد در نتیجه افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها و دوقلوبی‌ها در ساختار فلز مس و فولاد ۳۰۴ بوده است.

انرژی ذخیره شده در نتیجه جوشکاری انفجاری در این نمونه به علت کمتر بودن فاصله توقف، کمتر از نمونه AR5 بود. این دو عامل باعث نفوذ کمتر عناصر در این نمونه شده‌اند. لازم به ذکر است که نفوذ می‌تواند از فصل مشترک ناحیه ذوب و فولاد ۳۰۴ نیز اتفاق افتاده باشد چون هر دو دارای ساختار FCC هستند اما مشاهدات نشان داد که عمده نفوذ از فصل مشترک مس / ناحیه ذوب بوده است.

۳-۳- بررسی سختی فصل مشترک اتصال

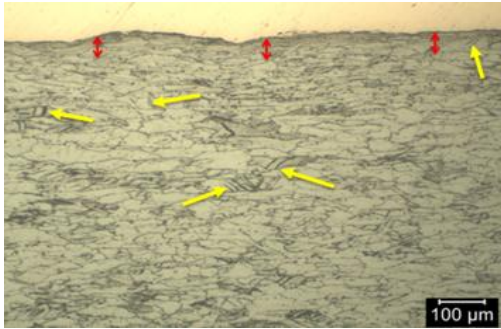
در جوشکاری انفجاری، صفحه پرنده و صفحه پایه در معرض موج تنشی شدید حاصل از انفجار ماده منفجره است. این امواج تنشی شدید موجب تغییرات متالورژیکی می‌گردند که منجر به افزایش در ریزسختی می‌شوند. ریزسختی تابعی از ترکیبات شیمیایی، درصد عناصر آلیاژی، ترکیبات بین فلزی و تغییرات حرارتی، بار انفجار و فاصله توقف می‌باشد [۱۵-۱۳]. نتایج آزمون ریزسختی سنجی از فصل مشترک اتصال سه نمونه قبل از نورد در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج آزمون سختی از فصل مشترک نمونه‌ها.

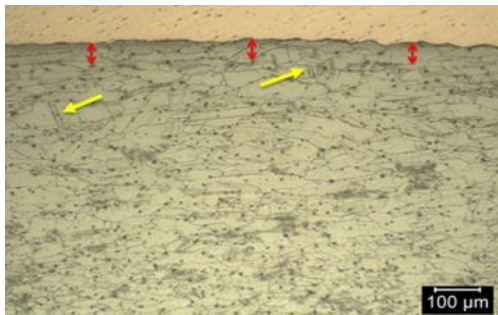
نمونه	موقعیت سختی سنجی	میانگین سختی (HV)
BR1	فصل مشترک مس	۱۰۸
	فصل مشترک فولاد	۳۲۱
BR2	فصل مشترک مس	۱۱۸
	فصل مشترک فولاد	۳۶۵
BR3	فصل مشترک مس	۱۱۲
	فصل مشترک فولاد	۳۴۹
AR1	فصل مشترک مس	۱۲۹
	فصل مشترک فولاد	۳۶۶
AR2	فصل مشترک مس	۱۳۸
	فصل مشترک فولاد	۴۱۲
AR3	فصل مشترک مس	۱۳۳
	فصل مشترک فولاد	۴۰۰
AR4	فصل مشترک مس	۹۵
	فصل مشترک فولاد	۲۹۳
AR5	فصل مشترک مس	۱۰۳
	فصل مشترک فولاد	۳۲۵
AR6	فصل مشترک مس	۹۸
	فصل مشترک فولاد	۳۱۹

اعداد سختی در فواصل ۵۰ میکرون از فصل مشترک اتصال به طرف فلز مس و فولاد ۳۰۴ گرفته شده‌اند. به منظور تکرار پذیر بودن نتایج سختی، هر آزمون سختی ۳ بار در نواحی مختلف از فلز مس یا فولاد زنگ نزن به‌طوری که ناحیه انجام آزمون سختی ۵۰ میکرون از فصل مشترک فاصله داشته باشد، گرفته شده است. نتایج میانگین سختی مس در ناحیه فصل

قبلی مناطق تیره درون دانه‌های نزدیک فصل مشترک بسیار بیشتر بود این مناطق یا فصل مشترک دانه‌ها بودند و یا دوقلوبی‌ها که در هر دو حالت باعث افزایش سختی نمونه AR2 نسبت به نمونه AR4 می‌شوند. لازم به ذکر است که بررسی نتایج ریزساختاری بقیه نمونه‌های بعد از نورد مشابه موارد ذکر شده بود و به همین دلیل از ارائه آن‌ها خودداری شد.



شکل ۱۴- ریزساختار فولاد ۳۰۴ در نزدیکی فصل مشترک اتصال در نمونه AR2.



شکل ۱۵- ریزساختار فولاد ۳۰۴ در نزدیکی فصل مشترک اتصال در نمونه AR4.

به منظور مقایسه بهتر تغییر اندازه دانه نسبت به فاصله از فصل مشترک در دو شکل (۱۴ و ۱۵)، نمودار تغییر اندازه دانه نسبت به فاصله از فصل مشترک در سمت فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در شکل (۱۶) ارائه شده است. برای رسم این نمودار میانگین اندازه دانه در فواصل $100\ \mu\text{m}$ از فصل مشترک (اندازه‌گیری اول در فاصله $0\ \mu\text{m}$ الی $100\ \mu\text{m}$ اندازه‌گیری دوم در فاصله $100\ \mu\text{m}$ الی $200\ \mu\text{m}$ و ...) توسط نرم‌افزار اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه AR2 نواحی نزدیک فصل مشترک، اندازه دانه ریزتر است. میانگین اندازه دانه در فاصله $0\ \mu\text{m}$ تا $100\ \mu\text{m}$ به میزان $12/5\ \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد. با فاصله گرفتن از فصل مشترک رفته رفته اندازه دانه بزرگ‌تر شده و در نواحی انتهایی اندازه دانه تقریباً به مقدار ثابتی رسیده است. میانگین اندازه دانه در فاصله $500\ \mu\text{m}$ الی $600\ \mu\text{m}$ برابر $21/12\ \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد. اما در نمونه AR4 همان‌طور که مشاهده می‌شود اندازه دانه در کل فواصل تقریباً مقدار ثابتی است. میانگین اندازه دانه در فاصله $0\ \mu\text{m}$ الی $100\ \mu\text{m}$ برابر $20/4\ \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد. بیشترین میزان اندازه دانه در نمونه AR4 در ناحیه $100\ \mu\text{m}$ الی $200\ \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد که برابر $22/82\ \mu\text{m}$ است.

با توجه به ساختار مشابه هر دو آلیاژ (FCC) سازوکار افزایش سختی در هر دو آلیاژ نیز تقریباً به صورت یکسان بوده است.

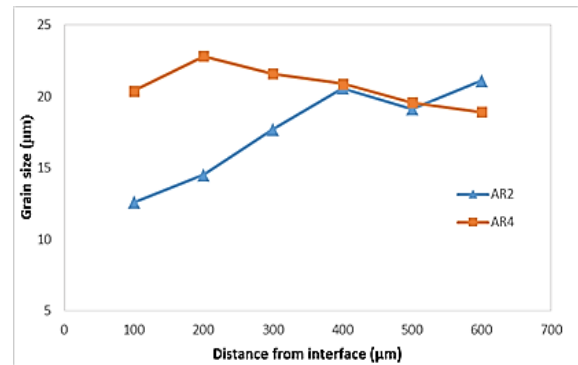
ریزساختار فولاد ۳۰۴ در نزدیکی فصل مشترک در نمونه AR2 در شکل (۱۴) ارائه شده است. پیکان‌های دو جهته قرمز رنگ در نزدیکی فصل مشترک نشان دهنده محدوده انجام آزمون سختی سنجی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نزدیکی فصل مشترک ریز شدن دانه‌ها به وضوح قابل مشاهده است. در حالی که در نمونه‌های قبل از نورد دانه‌های نزدیک فصل مشترک تفاوت چندانی با دانه‌های دورتر از فصل مشترک در فولاد ۳۰۴ نداشتند. همچنین نواحی مشخص شده با پیکان زرد رنگ نواحی دوقلوبی است. این دوقلوبی‌ها در دانه‌های نزدیک فصل مشترک نیز حضور دارند و به صورت خطوط تیره رنگ درون دانه‌ها قابل مشاهده هستند.

مقایسه نتایج سختی از فصل مشترک اتصال بعد از عملیات پیش گرم و نورد با حالت‌های پیشین که در جدول (۳) ارائه شده نشان می‌دهد که کمترین میزان سختی نمونه‌ها در این حالت به دست آمده است. حبیبی و همکاران [۱۹] بر روی ورق مس در چهار بازه دمایی تحقیقاتی انجام دادند و مشاهده کردند که در محدوده دمایی از اتاق تا 210°C درجه مقدار میکروسختی پایدار است و افزایش کمی در دمای پایین دارد. شکل‌گیری ساختارهای سلولی به وسیله چیدمان دوباره نابه‌جایی‌ها یک دلیل مهم برای افزایش میکروسختی است. ناحیه دوم از 210°C تا 250°C درجه است. این ناحیه یک سقوط در میکروسختی دارد که دلیل آن تبلور مجدد دانه‌های جدید بدون نابه‌جایی داخلی است. ناحیه سوم از 250°C تا 350°C است. در این ناحیه کاهش در میکروسختی با میزان شیب ملایم مشاهده شده که مرتبط با رشد دانه‌ها است. در این پژوهش نمونه‌های AR4، AR5، AR6 در ناحیه سوم تحقیقات حبیبی و همکاران بودند. همان‌طور که ذکر شد در این محدوده دمایی، پدیده تبلور مجدد و رشد دانه باعث کاهش سختی مس می‌شود. با توجه به اینکه ساختار فولاد ۳۰۴ نیز مشابه مس FCC است در این فولاد نیز کاهش سختی اتفاق افتاده است. بنابراین دلیل کاهش سختی ناحیه فصل مشترک نمونه‌های AR4، AR5، AR6 پدیده تبلور مجدد و رشد دانه در نتیجه عملیات پیش گرم است. البته لازم به ذکر است که عملیات نورد که بعد از پیش گرم بر روی نمونه‌ها انجام شده است باعث افزایش سختی می‌شود اما چون دمای نمونه‌ها در هنگام عملیات نورد بالا بوده سامانه‌های لغزشی راحت‌تر فعال شده و در نتیجه میزان نابه‌جایی‌ها و دوقلوبی‌ها کمتر از حالت قبلی بوده است. به همین دلیل سختی فصل مشترک حتی از سختی نمونه‌های اولیه نیز کمتر بوده است.

ریزساختار فولاد ۳۰۴ در نزدیکی فصل مشترک اتصال در نمونه AR4 در شکل ارائه شده است. پیکان‌های دو جهته قرمز رنگ در نزدیکی فصل مشترک نشان دهنده محدوده انجام آزمون سختی سنجی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دانه‌های مجاور فصل مشترک نسبت به حالت نورد بدون پیش گرم که در شکل (۱۵) ارائه شد، بسیار بزرگ‌تر هستند. همچنین دوقلوبی‌های کمتری در این نمونه به چشم می‌خورد. در نمونه

مراجع

- [۱] فاضل، فرهاد؛ خانزاده قره شیران، محمدرضا "بررسی بارگذاری انفجاری متغیر بر خواص اتصال انفجاری مس به فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۱۰"; مجله علمی پژوهشی مواد پراثرژی، دوره ۱۱، شماره ۴، صفحه ۲۱، ۱۳۹۵.
- [2] Durgutlu, A.; Okuyucu, H.; Gulenc, B. "Investigation of Effect of the Stand-off Distance on Interface Characteristics of Explosively Welded Copper and Stainless Steel"; Mater. Design 2008, 29, 1480-1484.
- [3] Asemabadi, M.; Sedighi, M.; Honarpisheh, M. "Investigation of Cold Rolling Influence on the Mechanical Properties of Explosive-Welded Al/Cu Bimetal"; Mater. Sci. Eng. A. 2012, 558, 144-149.
- [۴] خانزاده قره شیران، محمدرضا؛ بختیاری، حمید؛ محمد جواد، میلاد "تأثیر فاصله توقف و ضخامت ماده منفجره بر خواص اتصال انفجاری مس- فولاد زنگ نزن ۳۰۴"; مجله علمی پژوهشی مواد پیشرفته در مهندسی، دوره ۳۶، شماره ۳، صفحه ۳۵، ۱۳۹۶.
- [۵] اکبری موسوی، سید علی اصغر؛ فتحی بونسی، البرز "مقایسه فصل مشترک جوشکاری انفجاری فولاد St14 - برنج Ms90 با فصل مشترک پیش‌بینی شده به کمک پنجره جوشکاری"; مجله علمی پژوهشی مواد پراثرژی، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۳۱، ۱۳۸۹.
- [6] Akbari Mousavi, S. A. A.; Farhadi Sartangi, P. "Experimental Investigation of Explosive Welding of cp-Titanium/AISI 304 Stainless Steel"; Mater. Design 2009, 30, 459-468.
- [7] Benak, M.; Turna, M.; Ozvold, M.; Nesvadba, P.; Lokaj, J.; Caplovic, L.; Kovac, F.; Stoyka, V. "Study of Al-Austenitic Steel Boundary Formed by Explosion Welding"; 19th Int. Conf. Metallurgy and Material Czech Republic, 2010, 18.
- [8] Dyja, H.; Mroz, S.; Stradomski, Z. "Properties of Joint in the Bimetallic Rods Cu-Al and Cu-Steel after Explosive Cladding and the Process of Rolling"; Metallurgija 2003, 42, 185-191.
- [9] Dyja, H.; Mróz, S.; Milenin, A. "Theoretical and Experimental Analysis of the Rolling Process of Bimetallic Rods Cu-Steel and Cu-Al"; J. Mater. Process. Technol. 2004, 153, 100-107.
- [10] Akbari Mousavi, S. A. A.; Dashti, A. A.; Halvae, A. "Effects of Operational Parameters and Heat Treatments on the Aluminum-Steel Explosively Welded Composite Plates"; Adv. Mater. Res. 2011, 264, 223-228.
- [11] Honarpisheh, M.; Dehghani, M.; Ghaffari S. "Investigation of ECAR Routes on Mechanical Properties of Explosive-Welded Al-Cu Bimetal"; J. Manufac. Sci. Production 2014, 3, 83-92.
- [12] Akbari Mousavi, S. A. A.; Farhadi Sartangi, P. "Effect of Post-Weld Heat Treatment on the Interface Microstructure of Explosively Welded Titanium-Stainless Steel Composite"; Mater. Sci. Eng. A. 2008, 494, 329-336.
- [13] Gupta, R. C.; Kainth, G. S. "Swinging Wake Mechanism for Interface Wave Generation in Explosive Welding of Metals"; Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME, 1990, 57, 514-521.
- [14] Crossland, B. "Explosive Welding of Metals and its Application"; Oxford. Univ. Press, Oxford, 1982.
- [15] Samardzic, I.; Matesa, B.; Kladaric, I. "The Influence of Heat Treatment on Properties of Three-Metal Explosion Joint: Almg-Al-Steel"; Metabk. 2011, 50, 159-162.
- [16] Esquivel, E. V. "Fundamental Microstructural Issues Associated with Severe Deformation: Applications of Transmission Electron Microscopy"; 2005.
- [17] Tricarico, L.; Spina, R.; Sorgente D.; Brandizzi, M. "Effects of Heat Treatments on Mechanical Properties of Fe/Al Explosion



شکل ۱۶- نمودار تغییر اندازه دانه فولاد ۳۰۴ نسبت به فاصله از فصل مشترک در نمونه‌های AR2 و AR4.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی تأثیر مقدار کرنش و دمای نورد بر ریزساختار و سختی اتصال انفجاری ورق‌های فولاد ۳۰۴- مس انجام شد. بررسی نتایج میکروسکوپ نوری قبل از نورد نشان داد که هر سه نمونه دارای فصل مشترک موجی هستند. همچنین نمونه BR2 که بیشترین مقدار فاصله توقف و ضخامت ماده انفجاری را دارا بود دارای بیشترین مقدار طول موج و دامنه موج بود. بررسی نتایج میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDS قبل از نورد نشان داد که در هر سه نمونه ناحیه ذوب در فصل مشترک مشاهده شد. ناحیه ذوب نمونه BR1 به صورت متخلخل مشاهده شد و دارای مقادیری اکسیژن بود. ناحیه ذوب نمونه BR2 کمترین میزان تخلخل را دارا بود. بررسی نتایج ریزسختی سنجی قبل از نورد نشان داد که بیشترین سختی فصل مشترک مربوط به نمونه BR2 بود. نتایج میکروسکوپ نوری بعد از نورد نشان داد که در تمام حالت‌های بعد از نورد کاهش دامنه موج‌ها (ضخامت موج‌ها) ایجاد شده است. بررسی نتایج میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDS در شرایط بعد از نورد بدون پیش گرم نشان داد که تغییر خاصی در ترکیب شیمیایی ناحیه ذوب اتفاق نیفتاده است. بررسی نتایج میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDS در شرایط بعد از نورد به همراه پیش گرم نشان داد که در نتیجه عملیات پیش گرم قبل از نورد نفوذ عناصر مس و آهن از فصل مشترک ناحیه ذوب/ فلز مس اتفاق افتاده است. بیشترین میزان نفوذ در نمونه AR4 مشاهده شد. بررسی نتایج ریزسختی سنجی بعد از نورد در حالت بدون پیش گرم نشان داد که میزان سختی بعد از نورد در هر سه نمونه افزایش پیدا کرده است. اما در نمونه‌های پیش گرم شده میزان سختی کمتر از نمونه‌های قبل از نورد بود. می‌توان نتیجه گرفت که در جوشکاری انفجاری فولاد ۳۰۴/ مس میزان ضخامت ماده انفجاری ۷۹mm و فاصله توقف ۳mm (نمونه BR2) دارای شرایط ریزساختاری بهینه‌ای است. همچنین عملیات نورد به همراه پیش گرم در دمای ۳۰۰ درجه به مدت ۳۰ دقیقه باعث کاهش سختی فصل مشترک اتصال گردید که باعث افزایش چقرمگی نمونه‌های جوش نیز می‌شود.

- [19] Cheng, Y. Q.; Chen, Z. H.; Xia, W. J.; Zhou, T. "Effect of Channel Clearance on Crystal Orientation Development in AZ31 Magnesium Alloy Sheet Produced by Equal Channel Angular Rolling"; *J. Mater. Process. Tech.* 2007, 184, 97-101.
- [20] Habibi, A.; Ketabchi, M. "Enhanced Properties of Nano-Grained Pure Copper by Equal Channel Angular Rolling and Post-Annealing"; *Mater. Design* 2009, 34, 483-487.
- Welded Structural Transition Joints"; *Mater. Design* 2009, 30, 693-700.
- [18] Acarer, M.; Gulenc, B.; Findik, F. "Investigation of Explosive Welding Parameters and Their Effects on Microhardness and Shear Strength"; *Mater. Design* 2003, 24, 659-664.