

تأثیر عملیات حرارتی بر روی ریزساختار و سختی فصل مشترک جوش انفجاری سه لایه مس/آلومینیوم/مس

اکبر سلطانی دهنوی^۱، محمدرضا خانزاده قره شیران*^۲، عباس سعادت^۲
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴، ش.ص ۲۹-۴۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۳)

چکیده

در این پژوهش به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال جوشکاری انفجاری شده سه لایه Cu/Al/Cu بعد از عملیات حرارتی پرداخته شده است. ریزسختی سنجی و استحکام کششی برشی در دو دمای عملیات حرارتی 300°C و 400°C با مدت زمان‌های ۳۰ دقیقه و ۲۰ ساعت بررسی گردید. با انجام عملیات حرارتی به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 300°C ، 30 دقیقه در دمای 400°C و ۲۰ ساعت در دمای 300°C به ترتیب ضخامت لایه نفوذی در فصل مشترک بالایی از $37/144$ ، $27/232$ و $82/33$ میکرون به $39/285$ ، $33/987$ و $95/834$ میکرون و در فصل مشترک پایینی از $20/967$ ، $43/979$ و $43/979$ به $22/12$ ، $22/796$ و 52 میکرون افزایش یافته است. میزان ریزسختی لایه نفوذی بالایی به ترتیب از $508/8$ ، $436/2$ و $393/9$ ویکرز به $258/9$ ، $296/7$ و $293/9$ ویکرز و در لایه نفوذی پایینی از 321 ، $321/3$ و $248/7$ ویکرز به $221/3$ ، $185/8$ و $162/3$ ویکرز کاهش یافته است. نتایج بررسی ضخامت لایه فصل مشترک نشان می‌دهد، با اعمال عملیات حرارتی بر روی نمونه‌ها، میزان ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی نسبت به قبل از عملیات حرارتی افزایش یافته است که این امر به دلیل افزایش نفوذ در اثر عملیات حرارتی بوده است.

واژه‌های کلیدی: عملیات حرارتی، جوشکاری انفجاری، ریزسختی سنجی، لایه نفوذی.

^۱ - کارشناس ارشد مهندسی مواد، جوشکاری، گروه مهندسی مواد، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران،

^۲ - نویسنده مسئول، استادیار، مرکز تحقیقات مهندسی پیشرفته، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

*-نویسنده مسئول مقاله: m.khanzadeh@iaumajlesi.ac

بیشگفتار

جوشکاری انفجاری، یک روش اتصال فلزات همجنس و غیرهمجنس به یکدیگر در حالت جامد می‌باشد که از نیروی انفجاری حاصل از مواد منفجره جهت ایجاد یک پیوند فلزی با به اشتراک گذاشتن الکترون بین دو عنصر استفاده می‌کند و نظر به گسترش روز افزون استفاده از این تکنیک جوشکاری در صنایع مختلف از جمله صنایع کشتی سازی، صنایع فلزی، صنایع هواپیماسازی و فضایی، صنایع روکش کاری ورق‌ها و ساخت و تولید مخازن چند لایه، توجه بسیاری از محققان و پژوهشگران را به خود جلب کرده است و به این علت تحقیقات قابل توجهی در این زمینه در اکثر کشورها صورت گرفته است. با توجه به اینکه کیفیت اتصال به کنترل دقیق متغیرهای این فرآیند نظیر آماده سازی سطوح اتصال، میزان فاصله توقف سطوح اتصال از یکدیگر، میزان بار انفجار یا همان نسبت ماده منفجره به صفحه پرنده و انرژی و سرعت انفجار، نیازمند می‌باشد، لذا اکثر بررسی‌هایی که در خصوص جوشکاری انفجاری در طی سال‌های اخیر انجام گرفته است در خصوص چند پارامتر یا موضوع خاص از قبیل عملیات حرارتی نمونه‌هایی که تحت جوشکاری انفجاری قرار گرفته‌اند و دمای کاری مجاز این قطعات، خصوصیات فصل مشترک منطقه اتصال، فاصله توقف میان ورق‌ها، میزان بار انفجار لازم جهت انجام فرآیند و نیز استفاده از لایه میانی و تأثیر آن بر روی اتلاف انرژی در حین انجام این فرآیند، بوده است [۱].

ساماردزیچ و همکاران در مطالعه اتصال سه گانه AIMg5-Al-St52-3 سه محدوده دمایی ۲۵۰، ۳۱۵ و ۴۵۰ درجه سانتیگراد برای عملیات حرارتی در زمان ثابت شش ساعت در نظر گرفتند. نتایج حاکی از شدت کاهش استحکام اتصال بعد از عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد نسبت به دمای ۳۱۵ درجه سانتیگراد به دلیل تشکیل لایه ترکیبات بین فلزی و افزایش مقدار عناصری مانند نیکل، کروم و سیلیسیم بسیار موثر بوده است [۲].

فیندیک و همکاران نیز در مطالعاتی که بر روی تأثیر دما و زمان بر اتصال انفجاری فولاد کم کربن به فولاد آستنیتی ۳۰۴ داشتند، نشان دادند که با انجام عملیات حرارتی اندازه دانه‌ها، سختی، استحکام و انعطاف پذیری تغییرات محسوسی داشته است. آن‌ها نشان دادند که با افزایش زمان عملیات حرارتی از یک ساعت به چهار ساعت

در دمای ثابت ۲۵۰ درجه سانتیگراد به دلیل ریز دانه شدن ساختار، میزان سختی کاهش یافته است. همچنین آن‌ها زمان‌های کوتاه‌تر عملیات حرارتی را پیشنهاد کردند؛ زیرا در این صورت میزان سختی و استحکام مناسب و تنش‌های باقی مانده کاهش پیدا کرده است [۳].

اکبری موسوی و همکاران نیز در بررسی عملیات حرارتی بر رفتار اتصال انفجاری فولاد ۳۰۴ به تیتانیوم نشان دادند که با افزایش حرارت از ۶۵۰ به ۹۰۰ درجه سانتیگراد در زمان یک ساعت، دانه‌بندی در تیتانیوم تحت تبلور مجدد بزرگ‌تر شده؛ اما در فولاد چندان تغییری در اندازه دانه‌ها مشاهده نشده است. تحقیقات آن‌ها نشان داده است که عرض مناطق بین فلزی فصل مشترک با افزایش دما به دلیل واکنش عناصر آلیاژی و افزایش نفوذ بیش‌تر شده است. آن‌ها همچنین نشان دادند که میزان نفوذ تیتانیوم در فولاد ۳۰۴ کم‌تر از نفوذ عناصر آلیاژی مانند کروم، نیکل و آهن در لایه‌های تیتانیوم بوده است. علت این امر ساختار فشرده مکعبی فولاد آستنیتی در مقایسه با ساختار هگزagonal تیتانیوم بیان شده است [۴].

لوکاج و همکاران نیز با بررسی عملیات حرارتی اتصال انفجاری آلومینیوم به فولاد آستنیتی نشان دادند که با عملیات حرارتی در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد برای ۱۰۰ ساعت به علت افزایش نفوذ آلومینیوم، درشت شدن دانه‌های آن و شکل آمورف فصل مشترک ریزسختی فلزات پایه و فصل مشترک کاهش زیادی یافته است [۵].

پنگ ساکول و همکاران در تحقیق خود به بررسی تأثیر دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد برای ۵ و ۱۵ دقیقه بر روی ترکیبات بین فلزی اتصال انفجاری سه گانه Al 5083 – AI 1050 – St 52-3N پرداخته‌اند. مطالعات آن‌ها نشان داده است که اولاً مقدار ترکیبات بین فلزی در AI5083 بعد از شرایط بحرانی در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد افزایش قابل توجهی داشته است؛ اما تأثیر خیلی مهمی بر مقدار ترکیبات بین فلزی در AI 1050 و فولاد St 52-3N نداشته است. ثانیاً ترکیبات بین فلزی مشخص شده در AI 5083 اغلب شامل آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم از نوع Al2Mg3 بوده است [۶].

جان بانکر و همکاران نیز تغییر خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم به فولاد با متغیرهای زمان و دما را بررسی کرده‌اند. آن‌ها دما را بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد در

به ترتیب ساختار شکست نرم و ترد را نشان داده‌اند [۱]. در این پژوهش تاثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار لایه نفوذی سه لایه مس/ آلومینیوم/ مس مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم سری ۱۰۰۰ و مس خالص به عنوان آلیاژهای به کار رفته در جوشکاری انفجاری استفاده شد. جدول (۱) مشخصات آلیاژهای آلومینیوم و مس را نشان داده است. در این تحقیق فلز مس خالص به عنوان صفحات پایه و پرنده و آلومینیوم خالص به عنوان صفحه واسط انتخاب شده است.

انتخاب روش جوشکاری

در این تحقیق قطعاتی از جنس آلومینیوم به ضخامت ۴ میلیمتر به عنوان صفحه واسط و قطعاتی از جنس مس به ضخامت ۲ میلیمتر به عنوان صفحات پایه و پرنده برای جوشکاری استفاده شد. آزمایشات با آماده سازی صفحه‌ای به ابعاد 190×190 میلیمتر صورت پذیرفت. سیستم آرایش تنظیمی موازی که در شکل (۱) دیده می شود، جهت فرآیند جوشکاری انتخاب گردید. جهت استقرار ورق‌های مورد نظر برای انجام فرآیند جوشکاری انفجاری یک سکوی بتنی که با بستری از شن نرم یا همان ماسه بادی به عنوان لایه بافر و واسط پوشیده شده است در نظر گرفته 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 شد. ارتفاع ماده منفجره بر روی صفحه پرنده ۶ سانتیمتر در نظر گرفته شد. همچنین فاصله توقف برابر ۲ میلیمتر انتخاب گردید. پس از انجام جوشکاری از صفحه جوشکاری شده چهار قطعه به ابعاد 10×10 میلیمتر به منظور آزمایشات ریزسختی سنجی و متالوگرافی نوری آماده سازی شده است. مهم‌ترین پارامترهای انجام فرآیند جوشکاری انفجاری، نوع و خواص مکانیکی صفحه پران و پایه، جنس، چگالی و سرعت انفجار نسبت جرم ماده منفجره به جرم فلز پران و فاصله هوایی بین صفحات است. تعیین و انتخاب بهینه کلیه عوامل ذکر شده، باعث ایجاد جوشی قابل قبول از جنبه مکانیکی و متالورژیکی می‌شود.

زمان‌های یک تا سیصد روز در نظر گرفتند. نتایج نشان داده است که با افزایش دما ترکیبات بین فلزی به تدریج شکل گرفته و نیز ضخامت آن‌ها رابطه مستقیم با افزایش دما و زمان داشته است [۷].

اتصال آلومینیوم به مس به روش نورد سرد و بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر فصل مشترک اتصال نشان داده که دماهای پایین عملیات حرارتی، باعث افزایش استحکام باند اتصال شده؛ اما دما و زمان‌های طولانی منجر به شکل گیری ترکیبات بین فلزی Al_2Cu در فصل مشترک اتصال شده است که بر روی استحکام اتصال موثر بودند. همچنین ذرات ریز Al_2O_3 در طول فصل مشترک Al و Al_2Cu رسوب نموده است، آن‌ها دمای ۴۲۲ درجه کلون و ۲۰ ساعت را به عنوان شرایط بهینه عملیات حرارتی معرفی نمودند [۸].

تاثیر عملیات حرارتی بر اتصال سه لایه $Al/Cu/Al$ نشان داد که افزایش دما، باعث افزایش ضخامت لایه بین فلزی در فصل مشترک شده و منجر به تغییرات سختی فصل مشترک گردیده است. آن‌ها مشاهده نمودند، در نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۳۰ دقیقه لایه بین فلزی در حد ۵ میکرون از نوع $AlCu$, $AlCu_3$, Al_2Cu در فصل مشترک تشکیل شده است، همچنین ترک‌های ریز در بالا و پایین نمونه‌های عملیات حرارتی شده مشاهده شده است [۹].

بختیاری و همکاران در بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی ترکیبات بین فلزی فصل مشترک اتصال جوشکاری انفجاری فولاد آستنیتی ۳۲۱ به آلومینیوم ۱۲۳۰ به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما و زمان، ریزسختی و استحکام به علت افزایش ضخامت منطقه بین فلزی نسبت به پیش از انجام عملیات حرارتی کاهش یافته است [۱۰].

بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر اتصال مس- فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۸ الی ۳۲ ساعت و خنک شدن در کوره مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نمایانگر فصل مشترکی موجی در اتصال بوده که عملیات حرارتی پس گرم، منجر به نفوذ بالایی در فصل مشترک شده است. سختی در نزدیک فصل مشترک به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید ناشی از انفجار بالا گزارش شده و فصل مشترک قبل و بعد از عملیات حرارتی

جدول ۱- خواص مکانیکی و فیزیکی مس و آلومینیوم [۱۱]

خواص	مس	آلومینیوم	واحد
وزن مخصوص	۸/۹	۲/۷	g/cm^3
نقطه ذوب	۱۰۸۳	۶۵۸	$^{\circ}\text{C}$
سختی ویکرز	۸۷/۹	۷۶/۶	H_v



شکل ۱- سیستم تنظیمی جوشکاری انفجاری

دمایی ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد و در بازه‌های زمانی کوتاه و بلند مدت انجام شده است که این دماها به دلیل بحرانی بودن بر روی خواص فصل مشترک انتخاب شده‌اند. بنابراین انتخاب دمای ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد و زمان‌های ۳۰ دقیقه و ۲۰ ساعت برای اتصال انفجاری آلومینیوم به مس با توجه به این تحقیقات بوده است [۹، ۱۲، ۱۳]. جدول (۲) مشخصات نمونه‌ها نشان داده شده است.

عملیات حرارتی پس از جوشکاری

به منظور تحقیق در مورد اثر عملیات حرارتی بر روی ریزساختار فصل مشترک و خصوصیات مکانیکی نمونه جوش داده شده، عملیات حرارتی بر روی قطعات 10×10 میلیمتر در دماهای 300°C و 400°C به مدت ۳۰ دقیقه و ۲۰ ساعت در کوره GALLEN KAMP MUFELE ساخته کشور روسیه انجام گرفت. مطالعات قبلی بر روی اتصال انفجاری آلومینیوم به مس در محدوده

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های عملیات حرارتی شده

شماره نمونه	S1	S2	S3
فاصله توقف (mm)	۲	۲	۲
دما ($^{\circ}\text{C}$)	۳۰۰	۴۰۰	۳۰۰
زمان (hr)	۰/۵	۰/۵	۲۰
ضخامت ماده منفجره (mm)	۶۰	۶۰	۶۰
محیط خنک کننده	کوره	کوره	کوره

متالوگرافی

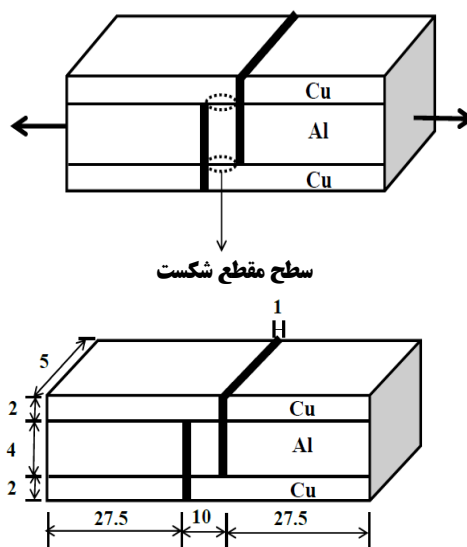
برای بررسی‌های میکروسکوپی و مطالعه ریزساختار به منظور تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، قطعات آماده شده، ابتدا با سنباده‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ پرداخت و پولیش نهایی به همراه خمیر الماسه انجام شد. سپس نمونه‌ها را به مدت ۷ تا ۱۳ ثانیه در محلول ماربل که حاوی ۱۵ سی سی آب اکسیژنه (H_2O_2)، ۲۰ سی سی آب (H_2O) و ۲۰ سی سی اکسید آمونیوم بود، قرار داده و بعد از گذشت این زمان، به ترتیب با آب و الکل شستشو داده شدند. بررسی نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ نوری مدل IMM 420 انجام گرفت و هر یک از فصل مشترک‌های مذکور از نظر نوع موجی و یا صاف بودن، وجود و یا عدم وجود مناطق بین فلزی و یا حفرات و ترک‌های اطراف فصل مشترک‌ها مورد بررسی و تصویر برداری قرار گرفتند. بررسی دقیق‌تر فصل مشترک اتصال نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA TESCAN که مجهز به سیستم آنالیز EPS استفاده شد. برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات حرارتی آزمون‌های مکانیکی شامل ریزسختی سنجی بر روی نمونه‌های جوشکاری شده انجام شد.

آزمون کششی برشی

استحکام اتصالات حاصل از جوشکاری انفجاری در هر یک از نمونه‌های آزمایش در قسمت فصل مشترک مس/آلومینیوم توسط آزمون استحکام سنجی کششی برشی صورت پذیرفت. بدین منظور از دستگاه Houns Field مدل H25KS ساخت کشور انگلیس استفاده شد. جهت ارزیابی خواص کششی برشی نمونه‌ها از استاندارد ASTM D3165-95 استفاده گردید که بدین منظور بلوک‌هایی به ابعاد $5mm \times 65mm$ از کلیه نمونه‌ها توسط دستگاه وایرکات، برش داده شد. شکل (۲) نمونه‌های نهایی را نشان داده است [۱۴].

آزمون ریزسختی سنجی

در این تحقیق آزمون ریزسختی سنجی ویکرز توسط دستگاه ریزسختی سنج شرکت KOOPA مدل MH1 با نیروی اعمالی ۵۰ گرم و مدت زمان ۹ ثانیه از مناطق مختلف ضخامت لایه بین فلزی انجام شد و میانگین سه اثر بخشی به عنوان میزان ریزسختی سنجی ترکیبات بین فلزی نمونه جهت انجام مقایسه آن‌ها، قبل و بعد از عملیات حرارتی در نظر گرفته شد. این آزمون برای نمونه‌های قبل و بعد از انجام عملیات حرارتی با دمای ثابت و نیز برای نمونه‌هایی با فاصله توقف یکسان ولی دما و زمان مختلف با استاندارد مرجع ASTM E384-11 صورت پذیرفت [۱۵].



شکل ۲- ابعاد نمونه‌های آماده شده برای آزمون کششی برشی [۱۴]

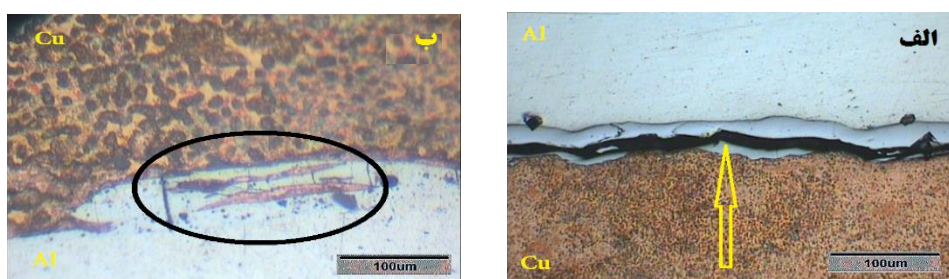
نتایج و بحث

بررسی ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری

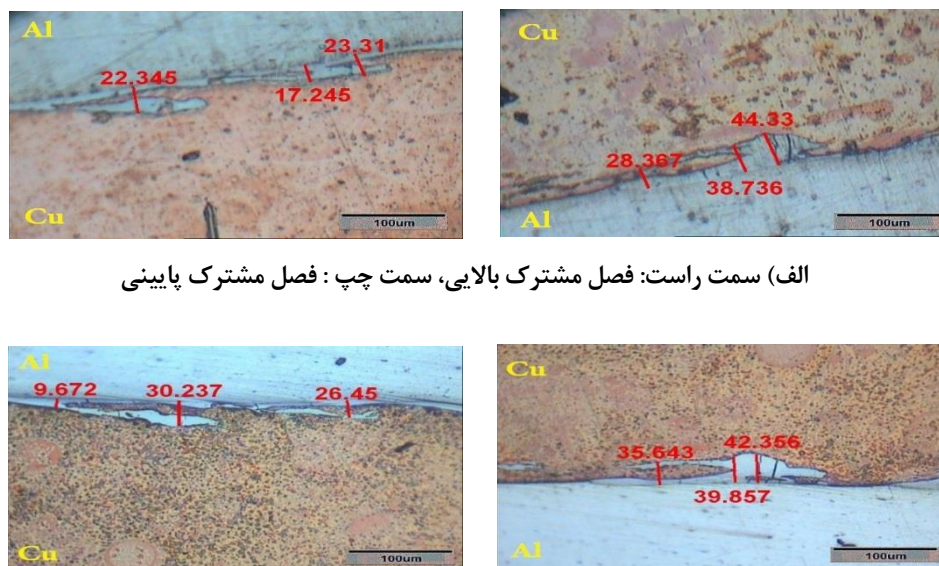
ریزساختار نمونه‌ها قبل از عملیات حرارتی

بوده است. علت به وجود آمدن منطقه ذوب موضعی منجمد شده، ترکیب شدن صفحات پایه و پرنده در اثر چرخش جت جهنده محبوس شده در فصل مشترک است. در اثر برخورد صفحات و افزایش انرژی جنبشی برخوردی در فصل مشترک، امکان به دام افتادن جت جهنده در گردابه امواج فصل مشترک به وجود می‌آید. در اثر به دام افتادن و تبدیل انرژی جنبشی به فصل مشترک به حرارت در منطقه گردابه امواج مناطق ذوب موضعی در مجاورت امواج به وجود می‌آید که ترکیب این مناطق ترکیبی از صفحات پرنده و پایه می‌باشد و تحت سرعت انجمادی بالا در 10^7 K/S - 10^5 قرار دارند [۱۶].

شکل ۳-الف وب تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک نمونه S1 قبل و بعد از عملیات حرارتی و تشکیل لایه مذاب منجمد شده موضعی و لایه نفوذی را نشان داده است. همان‌گونه که در شکل ۳-الف برای نمونه S1 قبل از عملیات حرارتی نشان داده شده است، ضخامت لایه مذاب منجمد شده موضعی نسبت به لایه نفوذی پس از انجام عملیات حرارتی در دمای 300°C درجه سانتیگراد و زمان ۳۰ دقیقه کم‌تر است. دلیل این امر تاثیر عملیات حرارتی و نفوذ عناصر آلیاژی نسبت به قبل از انجام عملیات حرارتی



شکل ۳-الف) منطقه مذاب منجمد شده قبل از عملیات حرارتی در نمونه S1، (ب) لایه نفوذی بعد از عملیات حرارتی در نمونه S1



الف) سمت راست: فصل مشترک بالایی، سمت چپ: فصل مشترک پایینی

ب) سمت راست: فصل مشترک بالایی، سمت چپ: فصل مشترک پایینی

شکل ۴- تغییرات ضخامت فصل مشترک اتصال نمونه S1: الف) نمونه عملیات حرارتی نشده (لایه مذاب منجمد شده)، ب) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای 300°C و زمان ۳۰ دقیقه (لایه نفوذی)

بررسی ریزساختار نمونه S1

شکل ۴ بیان کننده فصل مشترک اتصال نمونه S1 در جوشکاری انفجاری با ضخامت ماده منفجره ۶۰ میلیمتر است. با انجام عملیات حرارتی در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۳۰ دقیقه، میانگین ضخامت لایه نفوذی در فصل مشترک بالایی از $37/144 \pm 13$ به $39/285 \pm 17$ میکرون و در فصل مشترک پایینی از $20/967 \pm 6$ به $22/12 \pm 11$ بعد از عملیات حرارتی رسیده است.

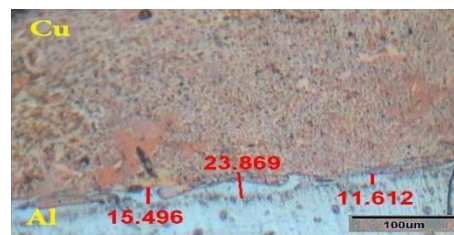
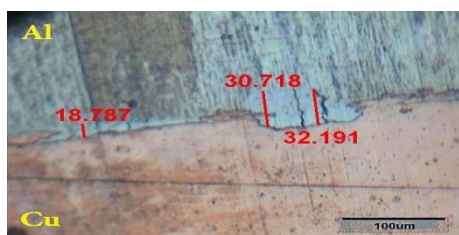
همان گونه که ملاحظه می شود، میانگین ضخامت لایه نفوذی در فصل مشترک بالایی از فصل مشترک پایینی بیشتر است که این به دلیل نزدیک بودن فصل مشترک بالایی به منبع انرژی و در نتیجه سرعت بیشتر صفحه پرنده، افزایش انرژی جنبشی و بیشتر شدن ضخامت فصل مشترک های بالایی شده است. با عبور موج شوک انفجار از ورق ها، تغییرات ریزساختاری و افزایش چگالی نایجایی ها در ورق ها رخ می دهد که باعث افزایش انرژی نمونه ها می شود. این انرژی پسماند به عنوان انرژی اکتیواسیون نفوذ عمل می نماید.

بررسی ریزساختار نمونه S3

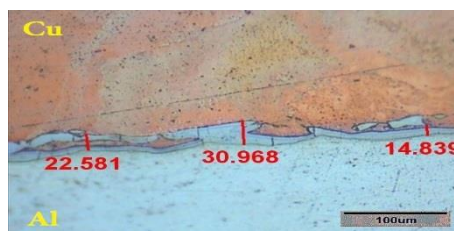
شکل ۶ فصل مشترک اتصال نمونه S3 را نشان داده است. همان گونه که مشاهده می شود، با انجام عملیات حرارتی در دمای 300°C و زمان ۲۰ ساعت با بار ۶۰ میلیمتر میانگین ضخامت در فصل مشترک بالایی از $82/33 \pm 15$ به $95/834 \pm 33$ میکرون و در فصل مشترک پایینی از $43/979 \pm 2$ به $52/003 \pm 2$ بعد از عملیات حرارتی رسیده است. ضخامت لایه نفوذی در نمونه S3 نسبت به نمونه های S1 و S2 بیشتر شده است. علت این امر تاثیر عملیات حرارتی بر مکانیزم نفوذ عناصر به درون فصل مشترک می باشد به طوری که با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی تشکیل ترکیبات بین فلزی افزایش یافته است و لایه نفوذی ترکیبی از فلز پایه و پرنده می باشد.

بررسی ریزساختار نمونه S2

همان گونه که در شکل ۵ نشان داده است، با انجام عملیات حرارتی در دمای 400°C و زمان ۳۰ دقیقه با بار ۶۰ میلیمتر میانگین ضخامت لایه نفوذی در فصل مشترک بالایی از

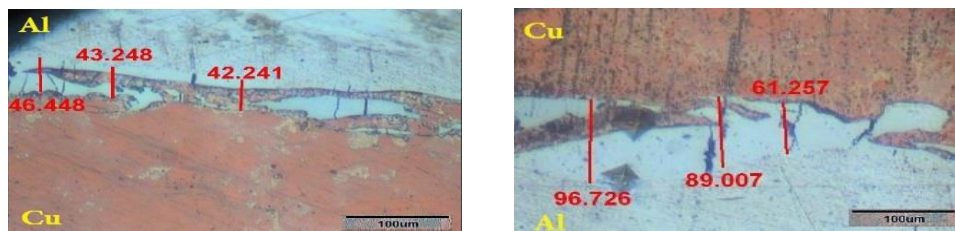


الف) سمت راست: فصل مشترک بالایی، سمت چپ: فصل مشترک پایینی

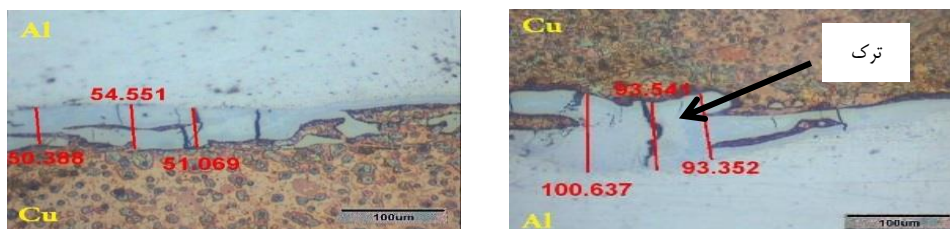


ب) سمت راست: فصل مشترک بالایی، سمت چپ: فصل مشترک پایینی

شکل ۵- تغییرات ضخامت فصل مشترک اتصال نمونه S2: الف) نمونه عملیات حرارتی نشده (لایه مذاب منجمد شده)، ب) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای 400°C و زمان ۳۰ دقیقه (لایه نفوذی)



الف) سمت راست: فصل مشترک بالایی، سمت چپ: فصل مشترک پایینی.



ب) بالا: فصل مشترک بالایی، پایین: فصل مشترک پایینی

شکل ۶- تغییرات ضخامت فصل مشترک اتصال نمونه S3: الف) نمونه عملیات حرارتی نشده (لایه مذاب منجمد شده)، ب) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای 300°C و زمان ۲۰ ساعت (لایه نفوذی)

جدول ۳- تغییرات ابعادی ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی در دما و زمانهای متفاوت عملیات حرارتی (μm)

S3		S2		S1		نمونه
پایینی	بالایی	پایینی	بالایی	پایینی	بالایی	فصل مشترک
$43/979 \pm 2$	$82/33 \pm 15$	$16/992 \pm 5$	$27/232 \pm 6$	$20/967 \pm 6$	$37/144 \pm 12$	عملیات حرارتی نشده
$52/003 \pm 2$	$95/834 \pm 3$	$22/796 \pm 7$	$33/987 \pm 4$	$22/12 \pm 11$	$39/285 \pm 16$	عملیات حرارتی شده

ترکیبات بین فلزی افزایش یافته است و لایه نفوذی ترکیبی از فلز پایه و پرنده می‌باشد. با توجه به این که ضریب نفوذ مس بیش تر از آلومینیوم می‌باشد و انتقال حرارتی بالایی دارد؛ بنابراین میزان مس بیشتری در لایه نفوذی حضور خواهد داشت.

بررسی ریزساختار نمونه S1

شکل ۷ فصل مشترک نمونه S1 که تحت جوشکاری انفجاری با ضخامت ماده منفجره ۶۰ میلی‌متر قرار گرفته را نشان داده است. با انجام عملیات حرارتی در دمای 300°C درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه، میانگین ضخامت فصل مشترک بالایی و پایینی افزایش یافته است. این افزایش در فصل مشترک بالایی بیش تر بوده که به دلیل نزدیک بودن به منبع

بررسی تغییر خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم به فولاد با متغیرهای زمان و دما مشخص نموده است که با افزایش دما، ترکیبات بین فلزی به تدریج شکل گرفته و ضخامت آن‌ها رابطه مستقیم با افزایش دما و زمان داشته است [۷].

بررسی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

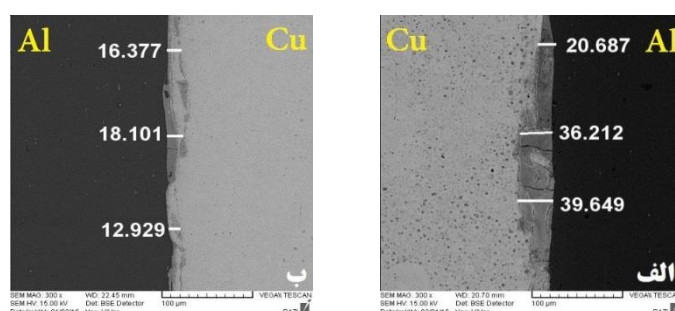
بررسی ریزساختار نمونه‌ها قبل از عملیات حرارتی

در تمامی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده از لایه مذاب منجمد شده موضعی و لایه نفوذی بیانگر ضخامت بیش تر لایه نفوذی نسبت به لایه مذاب منجمد شده موضعی می‌باشد. علت این امر تاثیر عملیات حرارتی بر مکانیزم نفوذ عناصر به درون فصل مشترک می‌باشد به طوری که با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی تشکیل

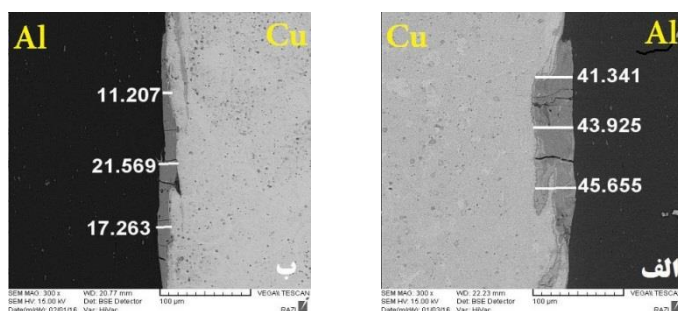
بین فلزی A شناسایی شده که درصد اتمی عناصر آن در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق جدول این نقطه از ۷۴/۱۷ درصد اتمی آلومینیوم و ۲۵/۸۳ درصد اتمی مس تشکیل شده است. در شکل ۹-الف و ۹-ب آنالیز عناصر نیز نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، ترکهایی عمود بر فصل مشترک مشخص است که ناشی از میدانهای تنشی حرارتی و کرنش پسماند ناشی از اختلاف ضریب هدایت حرارتی دو فلز می باشد و در نتایج محققین گزارش شده است [۴،۱۷،۱۹].

انرژی و سرعت بیش تر صفحه پرنده بالایی نسبت به صفحه پرنده پایینی بوده است [۱۷،۱۸].

با انجام آنالیز عنصری قبل از عملیات حرارتی، دو منطقه بین فلزی A و B مشخص و در شکل (۸) نشان داده شده اند. آنالیز عنصری و درصد اتمی عناصر تشکیل دهنده آن در جدول ۴ ارائه شده است. قبل از عملیات حرارتی در نقطه A، لایه از ۱/۹۲ درصد اتمی منیزیم، ۶۸/۸۸ درصد اتمی آلومینیوم و ۲۹/۲۱ درصد اتمی مس تشکیل شده و نقطه B از ۴۹/۵۹ درصد اتمی آلومینیوم و ۵۰/۴۱ درصد اتمی مس تشکیل شده است. پس از عملیات حرارتی یک نوع ترکیب

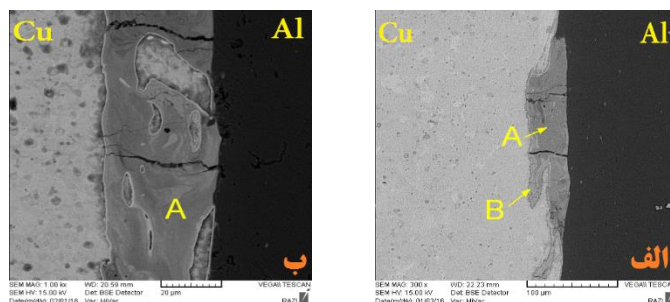


(a) الف: فصل مشترک بالایی، ب: فصل مشترک پایینی



(b) الف: فصل مشترک بالایی، ب: فصل مشترک پایینی

شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از تغییرات ضخامت در فصل مشترک نمونه S1: (a) نمونه عملیات حرارتی نشده، (b) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۳۰۰°C و زمان ۳۰ دقیقه



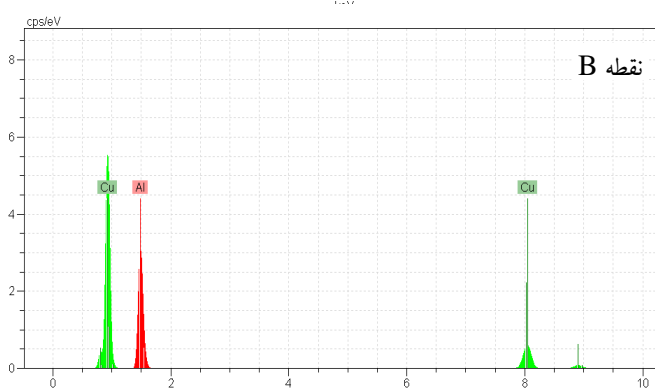
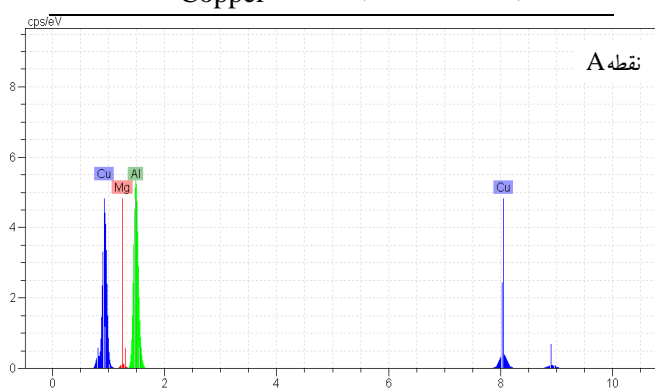
شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نقاط نمونه برداری شده در فصل مشترک نمونه S1، الف) نمونه عملیات حرارتی نشده، ب) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۳۰۰°C و زمان ۳۰ دقیقه

جدول ۴- درصد وزنی و اتمی عناصر در آزمایش آنالیز عنصری از درون نقاط A و B نمونه S5 در شکل ۸-الف

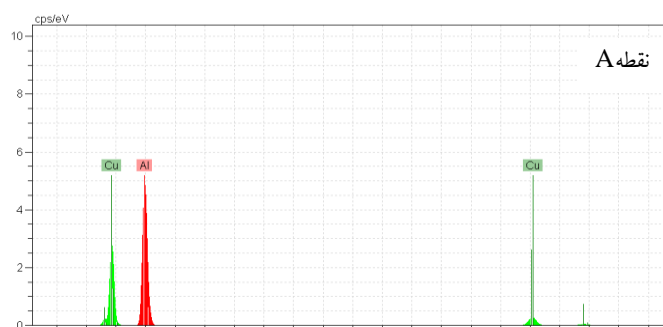
Point	Element	[Wt. %]	[norm. at. %]
A	Magnesium	۱/۲۶	۱/۹۲
	Aluminium	۵۰/۰۸	۶۸/۸۸
	Copper	۵۰/۰۱	۲۹/۲۱
B	Aluminium	۲۹/۵۹	۴۹/۵۹
	Copper	۷۰/۸۴	۵۰/۴۱

جدول ۵- درصد وزنی و اتمی عناصر در آزمایش آنالیز عنصری از درون نقطه A نمونه S1 در شکل ۸-ب

Point	Element	[Wt. %]	[norm. at. %]
A	Aluminium	۵۳/۵۷	۷۴/۱۷
	Copper	۴۳/۹۳	۲۵/۸۳



شکل ۹- الف: آنالیز EDS از لایه مذاب منجمد مشخص شده در نمونه S1 قبل از عملیات حرارتی در نقاط A و B شکل ۸-الف (نمونه عملیات حرارتی نشده)

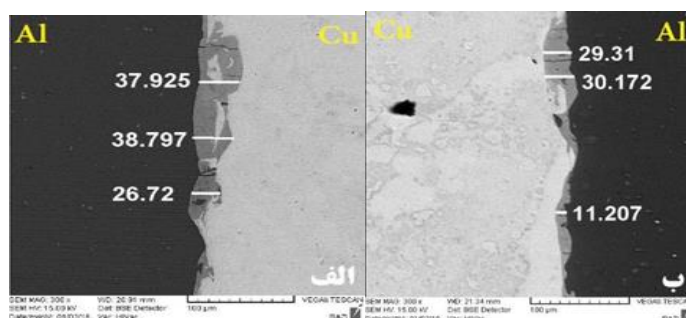


شکل ۹- ب: آنالیز EDS از لایه نفوذی مشخص شده در نمونه S1 بعد از عملیات حرارتی در نقطه A شکل ۸-ب (نمونه عملیات حرارتی شده)

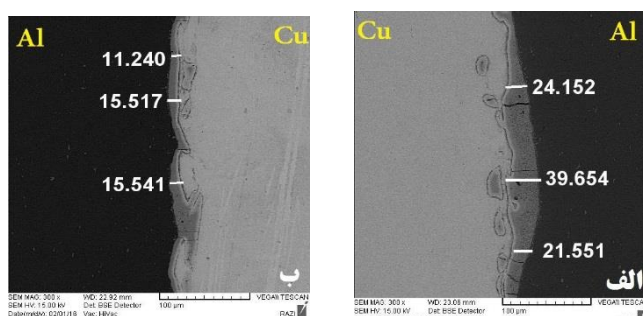
بررسی ریزساختار نمونه S2

شکل ۱۰ ریزساختار فصل مشترک و لایه بین فلزی نمونه S2 را نشان داده است که از انجام جوشکاری انفجاری با ضخامت ماده منفجره ۶۰ میلیمتر و عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه بر روی آن حاصل شده است. پس از عملیات حرارتی، به دلیل گسترش نفوذی عناصر ساختار شبکه‌ای، کرنش‌های ناشی از اختلاف خواص فیزیکی مواد، حذف عیوب خطی و نقطه‌ای و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری انفجاری، موجب افزایش ضخامت لایه نفوذی شده است [۲۰].

همان‌گونه که در شکل ۱۰- الف مشاهده می‌شود، یک نوع ترکیب بین فلزی A در این لایه قبل از عملیات حرارتی شناسایی شده است که آنالیز عناصر آن در جدول ۶ آورده شده است. در این نقطه ترکیب شامل ۱/۳۲ درصد اتمی منیزیم، ۶۶/۳ درصد آلومینیوم و ۳۲/۳۸ درصد مس بوده است. پس از عملیات حرارتی که آنالیز عناصر آن در جدول ۷ ارائه شده است، دو نوع ترکیب A و B شناسایی که A به ترتیب شامل ۷۲/۴۶ درصد آلومینیوم و ۲۷/۵۴ درصد مس بوده و نقطه B شامل ۴۶/۹۴ درصد آلومینیوم و ۵۳/۰۶ درصد مس بوده است.

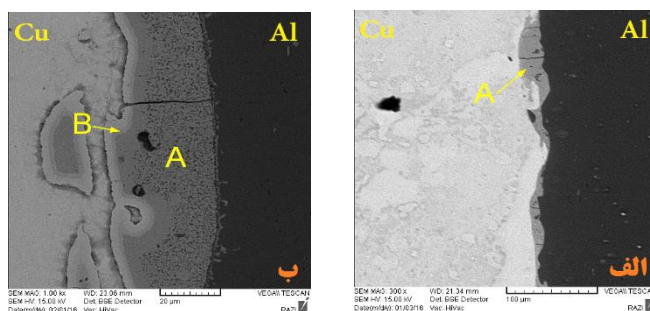


(a) الف: فصل مشترک پایینی، ب: فصل مشترک بالایی



(b) الف: فصل مشترک پایینی، ب: فصل مشترک بالایی

شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از تغییرات ضخامت در فصل مشترک نمونه S2: (a) نمونه عملیات حرارتی نشده، (b) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰°C و زمان ۳۰ دقیقه



شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نقاط نمونه برداری شده در فصل مشترک نمونه S2: (الف) نمونه عملیات حرارتی نشده، (ب) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰°C و زمان ۳۰ دقیقه

جدول ۶- درصد وزنی و اتمی عناصر در آزمایش آنالیز عنصری از درون نقطه A نمونه S2 در شکل ۱۱- الف

Point	Element	[Wt. %]	[norm. at. %]
	Magnesium	۰/۸	۱/۳۲
A	Aluminium	۴۴/۴۸	۶۶/۳
	Copper	۵۱/۱۷	۳۲/۳۸

جدول ۷- درصد وزنی و اتمی عناصر در آزمایش آنالیز عنصری از درون نقاط A و B نمونه S2 در شکل ۱۱- ب

Point	Element	[Wt. %]	[norm. at. %]
	Aluminium	۴۶/۴۱	۷۲/۴۶
A	Copper	۴۱/۵۵	۲۷/۵۴
	Aluminium	۲۹/۱۸	۴۶/۹۴
B	Copper	۷۷/۶۹	۵۳/۰۶

آزمون ریزسختی سنجی

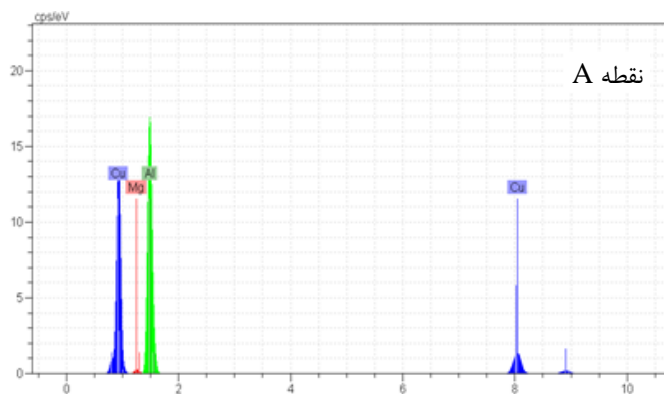
میزان ریزسختی فصل مشترک‌های بالایی از فصل مشترک‌های پایینی نیز بیش‌تر شده است که دلیل این امر، نزدیک بودن فصل مشترک بالایی به منبع انفجار و در نتیجه افزایش انرژی جنبشی و تغییر شکل پلاستیکی شدید در فصل مشترک اتصال، ایجاد و سخت شدن شوکی ناشی از امواج انفجاری بوده است. [۴].

در این تحقیق افت ریز سختی پس از انجام عملیات حرارتی در تمامی نمونه‌ها مشاهده شده است که علت آن افزایش نفوذ مس به دلیل بالا بودن نقطه ذوب آن و در نتیجه تغییر ماهیت این لایه از ترکیبات ترد به ترکیبات نرم‌تر و همچنین آزاد شدن تنش‌های ناشی از برخورد بوده است [۱۲،۹].

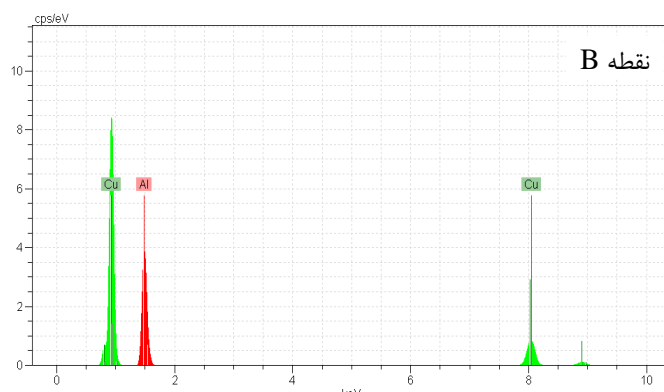
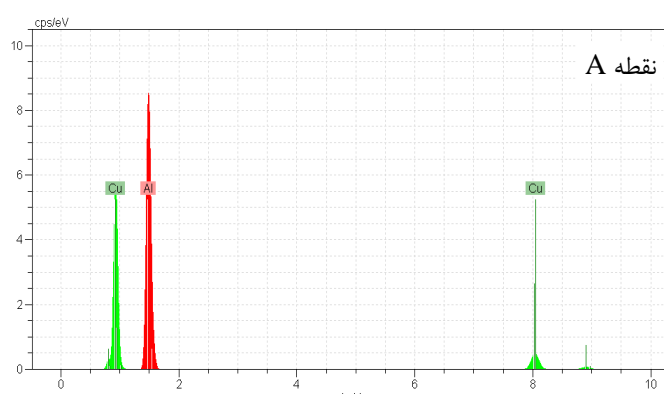
افت ریزسختی لایه‌های بین فلزی با انجام عملیات حرارتی توسط فیندیک، لوکاج و تریکاریو گزارش شده است [۱۶،۲۱،۲۲].

در جوشکاری انفجاری، صفحه پرنده در معرض موج تنشی شدید حاصل از انفجار ماده منفجره است. این امواج تنشی شدید موجب تغییرات متالورژیکی شده و در نهایت، منجر به افزایش در ریزسختی می‌گردند. ریزسختی تابعی از ترکیبات بین فلزی و تغییرات حرارتی، بار انفجار و فاصله توقف می‌باشد.

همان‌گونه که در جدول ۸ قابل مشاهده است، با افزایش دما و زمان در نمونه‌های S2 و S3 نسبت به نمونه S1 میزان سختی کاهش یافته است. دلیل این امر، حذف عیوب خطی و نقطه‌ای ناشی از عبور امواج شوک، آزاد شدن تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری و تنش که همگی باعث کاهش ریزسختی نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی شده است [۱۶،۱۸].



شکل ۱۲- الف: آنالیز EDS از لایه مذاب منجمد مشخص شده در نمونه S6 قبل از عملیات حرارتی در نقطه A شکل ۱۱-الف (نمونه عملیات حرارتی نشده)



شکل ۱۲- ب: آنالیز EDS از لایه نفوذی مشخص شده در نمونه S2 بعد از عملیات حرارتی در نقاط A و B شکل ۱۱-ب (نمونه عملیات حرارتی شده)

جدول ۸- نتایج آزمون ریزسختی سنجی

شماره نمونه	ریزسختی سنجی (HV) قبل از عملیات حرارتی	ریزسختی سنجی (HV) بعد از عملیات حرارتی
S1	فصل مشترک بالایی	۲۵۸/۹±۱۵
	فصل مشترک پایینی	۲۲۱/۳±۱۲
S2	فصل مشترک بالایی	۲۹۶/۷±۳۹
	فصل مشترک پایینی	۱۸۵/۸±۱۹
S2	فصل مشترک بالایی	۲۹۳/۹±۱۷
	فصل مشترک پایینی	۱۶۲/۳±۱۴

آزمون استحکام کششی برشی

در جدول ۹ تغییرات استحکام کششی برشی لایه نفوذی در دما و زمان‌های مختلف عملیات حرارتی آمده است. نتایج این آزمون نشان داد که میزان استحکام کششی برشی در نمونه‌های S1 و S2 و S3 به ترتیب ۴/۴۹ و ۳/۸۴ و ۵/۷۶ مگاپاسکال به دست آمده است. انجام عملیات حرارتی باعث افزایش ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک نمونه‌ها شده است، در نتیجه استحکام کششی برشی آن‌ها نیز در مقایسه با قبل از انجام عملیات حرارتی کاهش یافته است. مطالعات نشان داده که به دلیل افزایش لایه‌های ترد بین فلزی؛ استحکام کششی برشی فصل مشترک اتصال پس از انجام عملیات حرارتی سریع کاهش می‌یابد [۲، ۲۱].

نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر عملیات حرارتی بر سختی و ضخامت لایه نفوذی فصل مشترک اتصال انفجاری مس-آلومینیوم انجام شد و نتایج زیر حاصل شد:

۱- با اعمال عملیات حرارتی بر روی نمونه‌ها، میزان ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی نسبت به قبل از عملیات حرارتی افزایش یافته است و این افزایش در فصل مشترک بالایی بیش‌تر بوده است، به طوری که در دمای ۳۰۰ درجه و زمان ۳۰ دقیقه

ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی قبل از عملیات حرارتی در فصل مشترک بالایی و پایینی به ترتیب برابر ۳۷/۱۴۴ و ۲۰/۹۶۷ میکرون و بعد از عملیات حرارتی به ترتیب ۳۹/۲۸۵ و ۲۲/۱۲ میکرون شده است.

۲- با تغییر دمای عملیات حرارتی از ۳۰۰ به ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه، میانگین تغییرات ضخامت لایه نفوذی در فصل مشترک بالایی از ۲/۱۴۱ میکرون به ۶/۷۵۵ میکرون و در فصل مشترک پایینی از ۱/۱۵۳ به ۵/۸۰۴ میکرون افزایش یافته است.

۳- با افزایش زمان عملیات حرارتی از ۳۰ دقیقه به ۲۰ ساعت، میانگین تغییرات ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک بالایی از ۲/۱۴۱ میکرون به ۱۳/۵ میکرون و در فصل مشترک پایینی از ۱/۱۵۳ میکرون به ۸/۰۲۴ میکرون افزایش یافته است که این نشان دهنده موثر بودن زمان عملیات حرارتی نسبت به دمای آن می باشد.

۴- میزان تغییرات ریزسختی در فصل مشترک‌های بالایی بیش‌تر از فصل مشترک‌های پایینی بوده است به طوری که میانگین ریزسختی فصل مشترک بالایی در نمونه‌های S2، S1 و S3 بعد از عملیات حرارتی برابر ۲۸۳/۲ ویکرز و در فصل مشترک پایینی ۱۸۹/۸ ویکرز بوده است.

جدول ۹- تغییرات تنش و استحکام کششی برشی نمونه‌ها

نمونه	ماکزیمم نیرو (N)	تنش (N/m ²)
S1	۴۰۴	۴/۴۹
S2	۳۴۶	۳/۸۴
S3	۵۱۸/۳	۵/۷۶

References:

- 1) Akbari Mousavi SAA, FarhadiSartangi P, "Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel", Materials and Design, Vol. 30, pp. 459-468, 2009.
- 2) Samardzic B, Matesa B, Kladaric I, "The influence of heat treatment on properties of three-metal explosion joint: Almg-Al-steel", Metabk, Vol. 50, pp. 159-162, 2011.
- 3) Findik F, Yilmaz R and Somyurek T, "The effects of heat treatment on the microstructure and microhardness of explosive welding", Scientific Research and Essays, 8 September, Vol. 6(19), pp. 4141-4151, 2011.
- 4) Akbari Mousavi S.A.A, P.farhadi sartangi, " Effect of Post-weld heat treatment on the interface microstructure of explosively welded titanium-stainless steel

- composite", *Material science and engineering A*, Vol. 494, pp. 329-336, 2008.
- 5) Lokaj J and Benak M, " X ray microanalysis of Al-austenitic steel boundary formed by explosion welding", *metal*, Vol. 5, pp. 18-20, 2010.
- 6) Phengsakul S, Rodchanarowan A, "Effect of Thermal Treatment on Intermetallic Phases of Fe/Al Structural Transition Joints", *Energy and Materials Science and Engineering*, Vol. 34, PP. 782 – 790, 2013.
- 7) Banker J, " Aluminum-Steel Electric Transition Joints, Effects of Temperature and Time upon Mechanical Properties", *Draft of Paper for presentation TMS 131st Annual Meeting*, 2002.
- 8) Sheng LY, Yang F, Xi TF, Lai C, Ye HQ. " Influence of heat treatment on interface of Cu–Al bimetal composite fabricated by cold rolling". *Composites: Part B*, Vol. 42, pp. 1468–73, 2011.
- 9) Honarprishah M, Asemabadi M, and Sedighi M. "Investigation of annealing treatment on the interfacial properties of explosive-welded Al/Cu/Al multilayer". *Materials and Design* 2012; Vol. 37, pp. 122–7.
- ۱۰) ج. بختیاری، م. ر. قره شیران، س. ع. ا. اکبری موسوی، "تاثیر عملیات حرارتی بر ترکیبات بین فلزی فصل مشترک جوش انفجاری فولاد زنگ نزن ۳۲۱ به آلومینیوم ۱۲۳۰"، *مجله مواد نوین مرودشت*، جلد پنجم، شماره چهارم، ۱۳۹۴.
- 11) ASM Int. Handbook Committee, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials", Vol. 2, 1992.
- 12) Fendik F, "Recent development in explosive welding", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 1081-1093, 2011.
- 13) Zamani A, Bagheri M, and Mehdipour A. "Scarf joining of Al to Cu plates by explosive welding process and investigation of interface properties " *Journal of Mechanical and Aerospace*, Vol 5. pp. 27-39. 2008.
- 14) Standard test method for tension shear, ASTM D 3165-95, Philadelphia, 2012.
- 15) Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials, ASTM E384-11, Philadelphia, 2012.
- ۱۶) م. ر. خانزاده قره شیران، س. ا. ا. اکبری موسوی، ا. آماده، غ. م. لیاقت " بررسی جوشکاری انفجاری سوپر آلیاژ اینکول ۷۱۸ به فولاد گرمکار AISI H13 " رساله دکتری تخصصی مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، ۱۳۹۱.
- ۱۷) م. ر. خانزاده قره شیران، ا. حلویی، س. ا. ا. اکبری موسوی، " بررسی اتصال سه جزئی انفجاری لوله A1KA3 , و فولاد StCr18 Ni9Ti5 , پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، ۱۳۸۴.
- 18) Tricarico L, Spina R, Sorgente D, Brandizzi M, "Effects of heat treatments on mechanical properties of Fe/Al explosion-welded structural transition joints", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 2693-2700, 2009.
- 19) Acarer M, Gulenc B, Findik F, " Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength", *Materials and Design*, Vol. 24, pp. 659-664, 2003.
- ۲۰) م. شمعانیان، م. رحمتی، متالورژی جوشکاری و جوش پذیری فولادهای زنگ نزن، جهاد دانشگاهی اصفهان، ۱۳۸۷.
- ۲۱) د. دراویزه، «آشنایی با جوشکاری انفجاری فلزات و کاربرد آن»، جهاد دانشگاهی دانشگاه گیلان، ۱۳۸۲.
- ۲۲) ع. دشتی، ا. حلویی، «بررسی اثر عملیات حرارتی بر استحکام اتصال آلومینیوم به فولاد در جوش انفجاری»،

هفتمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی،

دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵. ۳۰-۴.