

تأثیر عملیات حرارتی بر ترکیبات بین فلزی فصل مشترک جوش انفجاری فولاد زنگ نزن ۳۲۱ به آلومینیم ۱۲۳۰

حمید بختیاری^{۱*}، محمدرضا خانزاده قره شیران^{۲*} و سید علی اصغر اکبری موسوی^۳

چکیده

در این پژوهش تأثیر عملیات حرارتی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی ترکیبات بین فلزی فصل مشترک اتصال جوشکاری انفجاری فولاد آستنیتی ۳۲۱ به آلومینیم ۱۲۳۰ بررسی شده است. بررسی های آزمایشگاهی با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون های ریز سختی سنجی و استحکام کششی برشی انجام شده است. ترکیبات بین فلزی فصل مشترک و مقدار نفوذ عناصر آلومینیم، آهن، نیکل و کروم با استفاده از آنالیز خطی و الکترون برگشتی در نمونه ها مشخص شدند. در نمونه های پیش از عملیات حرارتی با افزایش فاصله توقف از یک به دو و نیم میلی متر فصل مشترک اتصال از حالت صاف به موجی تبدیل شده و ضخامت لایه های بین فلزی از ۳/۵ میکرون به ۱۰۲/۳ میکرون افزایش یافته است. ریز سختی نیز با افزایش ترکیبات بین فلزی از ۷۶۶ ویکرز در نمونه با فاصله توقف یک میلیمتر به ۹۲۷ ویکرز در نمونه با فاصله توقف دو و نیم میلی متر، افزایش یافته است. همچنین، استحکام آن ها از ۱۰۳/۲ مگاپاسکال به ۲۱۴/۵ مگاپاسکال افزایش یافته است. انجام عملیات حرارتی در دمای 450°C برای شش ساعت باعث افزایش ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی به ۴/۴ میکرون برای نمونه با فاصله توقف یک میلی متر و ۱۱۸/۵ میکرون برای نمونه با فاصله توقف دو و نیم میلی متر شده است. نتایج نشان دادند 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.

واژه های کلیدی: ترکیبات بین فلزی، جوشکاری انفجاری، عملیات حرارتی، فاصله توقف.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مواد گرایش جوشکاری، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، شهر مجلسی، اصفهان، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول مقاله: Hamid.bakhtiari60@gmail.com M.khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir

پیشگفتار

جوشکاری انفجاری یکی از روش‌های پیشرفته جوشکاری در حالت جامد است. جوشکاری انفجاری روشی است که در آن از انرژی کنترل شده یک ماده منفجره استفاده می‌شود تا سطوح جوش شونده که نسبت به هم در فاصله توقف معینی قرار گرفته‌اند با سرعت بالایی به یکدیگر نزدیک شده و به هم برخورد کنند. در اثر برخورد دو سطح به یکدیگر، یک میدان خمیری موضعی در فصل مشترک اتصال ایجاد می‌شود که با اشتراک گذاری الکترون‌ها یک باند با پیوند متالورژیکی بین اجزا جوش شونده ایجاد می‌شود. در اثر فشار برخوردی بالا یک جت با سرعت بالا از دو سطح اتصال تشکیل می‌شود که موجب ایجاد سطوح اتصالی تمیز در فصل مشترک جوشکاری و حذف آلودگی‌های سطحی می‌شود. تشکیل این جت از شرایط اساسی ایجاد پیوند مناسب در جوشکاری انفجاری می‌باشد [۱-۵].

اتصالات حاصله با این روش به مانند روش‌های دیگر جوشکاری حالت جامد فاقد مشکلات شدید متالورژیکی ناشی از حضور مذاب در منطقه جوشکاری می‌باشند و از این روش می‌توان به عنوان روشی مناسب جهت اتصال دهی طیفی گسترده از فلزات هم جنس و نا هم جنس با

خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت به یکدیگر استفاده کرد [۷و۶].

اتصال آلومینیم به فولاد، با روش‌های جوشکاری ذوبی به دلیل اختلاف درجه حرارت، خواص شیمیایی، فیزیکی و لایه‌های اتمی آن‌ها بسیار دشوار است. از این روش به گونه گسترده می‌توان جهت پوشش دهی به صورت دو یا چند لایه در صنایع شیمیایی، تولید نیروگاهی، هوا و فضا، صنایع اتوماتیک، تجهیزات خلا، ساخت مخازن تحت فشار و مبدل‌های حرارتی استفاده کرد. پوشش دهی اتصالات لوله ای شکل و سطوح استوانه ای نیز یکی دیگر از کاربردهای عمده این روش می‌باشد و می‌توان استوانه‌ها و سیلندرهای توخالی مرکب را تولید کرد، اما وجود عناصری اصلی مانند آهن و آلومینیم و نیز استحکام پیوند بین اتم‌های نامشابه مربوطه که بیش‌تر از استحکام پیوند بین اتم‌های مشابه است، احتمال ایجاد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال را افزایش می‌دهند [۷و۸و۹].

از نقطه نظر شیمیایی واکنش آهن با آلومینیم چندین ترکیب بین فلزی از نوع $Fe_x Al_y$ ایجاد می‌کند زیرا فقط مقدار کمی از آهن می‌تواند در آلومینیم حل شود و بر عکس که در جدول ۱ خواص آن‌ها آمده است [۱۰].

جدول ۱- انواع ترکیبات بین فلزی از نوع $[10 \cdot Fe_x Al_y]$

فاز	مقدار Al(at%)	ساختار	ریز سختی(HV)	چگالی(g/cm^3)
Fe_3Al	۲۵	مکعبی مرکز پر	۲۵۰-۳۵۰	۶/۶۷
$FeAl$	۵۰	مکعبی مرکز پر	۴۰۰-۵۲۰	۵/۳۷
Fe_2Al_7	۶۳	مکعبی مرکز پر	۶۵۰-۶۸۰	-
$FeAl_2$	۶۶-۶۷	رومبوهدرال	۱۰۰۰-۱۰۵۰	۴/۳۶
Fe_2Al_5	۶۹/۷-۷۳/۲	اورترومبیک	۱۰۰۰-۱۱۰۰	۴/۱۱
$FeAl_3$	۷۴-۷۶	مونوکلینیک	۸۲۰-۹۸۰	۳/۹۵

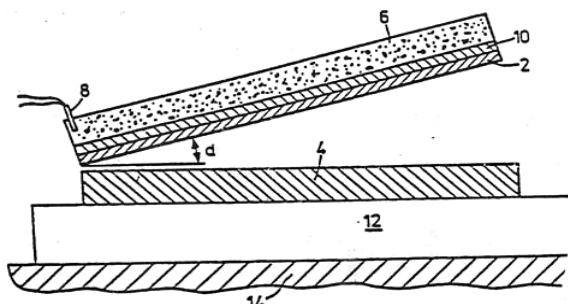
در معرض تنش حرارتی زیر $300^\circ C$ رشد شایان توجهی نداشته‌اند، ولی در مورد نمونه‌هایی که درجه حرارت برابر یا بیش‌تر از $500^\circ C$ بوده است، گسترش ترکیبات Fe/Al در فصل مشترک اتصال بیش‌تر بوده است.

شکل ۱ نمایانگر یک تنظیم مورب جهت انجام جوشکاری انفجاری با صفحه پرنده می‌باشد که این تنظیم

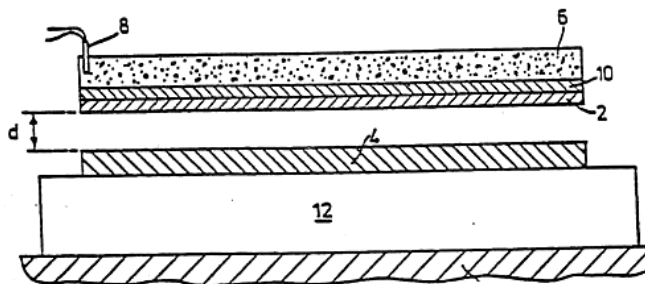
ترکیبات بین فلزی در دمای زیر نقطه ذوب آلومینیم رخ می‌دهند. نسبت شکل گیری این ترکیبات به نوع نفوذ بستگی دارد، بنابراین به دما و زمان وابسته‌اند. با افزایش زمان و دمای عملیات حرارتی انتظار می‌رود ضخامت لایه‌های بین فلزی نیز افزایش یابند [۱۰]. داده‌های تجربی مشخص کرده‌اند که ترکیبات بین فلزی نمونه‌ها

شونده) با یک فاصله توقف معین و یکنواخت (d) قرار می‌گیرد. تنظیم موازی برای مواد منفجره با سرعت پایین و صفحات بزرگ کاربرد دارد [۱۱].

معمولاً برای مواد منفجره با سرعت انفجاری بالا و ورق‌های کوچک بکار می‌رود. شکل ۲ نیز نمایانگر یک تنظیم موازی جهت انجام جوشکاری انفجاری می‌باشد که صفحه پرنده به صورت موازی و جداگانه از صفحه پایه (برخورد



شکل ۱- تنظیم مورب برای جوشکاری انفجاری صفحات مسطح [۱۲].



شکل ۲- تنظیم موازی برای جوشکاری انفجاری صفحات مسطح [۱۲].

مقدار ریزسختی کاهش یافته است، بنابراین زمان‌های کوتاه برای عملیات حرارتی پیشنهاد شده است [۱۳]. پژوهش‌های لوکاج و همکاران [۱۴] نیز نشان داد که با انجام عملیات حرارتی در دمای 250°C برای ۱۰۰ ساعت به علت افزایش نفوذ آلومینیم، درشت شدن دانه‌های آن و شکل آمورف فصل مشترک ریزسختی فلزات پایه و فصل مشترک کاهش زیادی یافته است.

در این پژوهش بررسی اثر دما و زمان عملیات حرارتی بر اتصال انفجاری لوله‌های فولاد آستنیتی ۳۲۱ به آلومینیم ۱۲۳۰ و تاثیر آن بر ریزساختار متالورژیکی ترکیبات بین فلزی فصل مشترک و خواص مکانیکی اتصال صورت گرفته است.

ساماردزیچ و همکاران [۱۲] در مطالعه اتصال سه گانه Almg5-Al-St52 نشان دادند که شدت کاهش استحکام اتصال پس از آنیل کردن در دمای 450°C نسبت به دمای 315°C به دلیل تشکیل لایه ترکیبات بین فلزی و افزایش مقدار عناصری مانند نیکل، کروم و سیلیسیم بسیار بیشتر بوده است و با افزایش دما ترکیبات بین فلزی در ریزساختار افزایش یافته است. در دمای عملیات حرارتی پایین ترکیبات بین فلزی جدید اثر شایان توجهی بر خواص استحکام نداشته است، اما در دمای 450°C افزایش ترکیبات بین فلزی نقش موثری جهت وقوع شکست در قطعه ایفا کرده است.

در مطالعات تاثیر دما و زمان بر اتصال انفجاری فولاد کم کربن به فولاد آستنیتی ۳۰۴، نشان داده شد که با افزایش زمان عملیات حرارتی در دمای ثابت 250°C از یک ساعت به چهار ساعت به دلیل درشت شدن ساختار،

مواد و روش ها

آلیاژهای مورد استفاده در فرآیند جوشکاری انفجاری جهت ایجاد لوله دو جزئی، فولادی با ترکیب $Cr_{18}Ni_9Ti$ و آلیاژ آلومینیوم از جنس Alka3 می باشد که در جدول ۲ ترکیب شیمیایی آن ها آمده است. متغیری که جهت اتصال لوله آلیاژی از جنس $StCr_{18}Ni_9Ti$ به لوله آلیاژی فولادی از جنس Alka3 در طراحی مورد استفاده قرار گرفته، فاصله توقف بوده است.

در فرایند جوشکاری، چهار فاصله توقف گوناگون در نظر گرفته شده که این فاصله ها به ترتیب ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ میلی متر بوده و لوله ها به صورت کاملاً موازی و هم محور نسبت به یکدیگر در فاصله های توقف بالا قرار داده شده اند و عمل جوشکاری انجام گرفته است. جهت اتصال دهی لوله ها از ماده منفجره ای به نام آماتول^۱ که ترکیبی از تری نیتروتولون یا تی ان تی^۲ و نیترات آمونیم می باشد، استفاده شده است. در شکل ۳ سیستم تنظیمی مورد استفاده جهت جوشکاری انفجاری نمونه ها نشان داده شده است.

لوله پایه و ابعاد آن

لوله ای از جنس $StCr_{18}Ni_9Ti$ به عنوان لوله پایه در نظر گرفته شده است که دارای ضخامت ۴/۵mm و طول ۲۰۰mm می باشد. قطر خارجی آن ۱۳۵mm و قطر داخلی آن ۱۲۶mm می باشد.

لوله پرنده و ابعاد آن

لوله آلیاژی از جنس Alka3 به عنوان لوله پرنده در جوشکاری انفجاری در نظر گرفته شده که دارای ضخامت ۱/۵mm و طول ۲۴۰mm می باشد.

عملیات حرارتی پس گرم

پس از انجام جوشکاری، عملیات حرارتی پس گرم روی نمونه ها انجام شد. عملیات حرارتی را در کوره تحت حفاظت گاز آرگون با فشار یک بار در دمای $450^{\circ}C$ به

مدت زمان شش ساعت انجام داده و سپس در محیط هوا سرد شدند. انتخاب دمای $350^{\circ}C$ و $450^{\circ}C$ در این پژوهش به علت بحرانی بودن این دما برای اتصال فولاد - آلومینیم می باشد.

در جدول ۳ خصوصیات آزمون ها و نامگذاری نمونه ها بر اساس فاصله توقف، دما و زمان عملیات حرارتی آمده است.

آزمون میکروسکوپ نوری

بمنظور آماده سازی نمونه ها برای متالوگرافی به وسیله سمباده های دارای شماره های به ترتیب ۶۰ تا ۲۵۰۰، سمباده زده شده و پس از رفع خطوط و ناهمواری های سطحی پولیش زده شدند. پس از پولیش، سطح نمونه ها با الکل شسته و خشک و سپس به وسیله محلول گلیسریرژیا (گلیسرین + اسید نیتریک + اسید کلریدریک) اچ شیمیایی شدند. از استانداردهای مرجع ASTM E3- [11511] برای آماده سازی، [ASTM E407-07] [16] میکرو اچ فلزات، [ASTM E 883-11] [17] تصاویر میکروسکوپ نوری و استاندارد [ASTM B487-02] [18] برای اندازه گیری ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی استفاده شد. ریز ساختار فصل مشترک و ترکیبات بین فلزی به وسیله میکروسکوپ نوری مدل Metallux 3 در بزرگنمایی های گوناگون مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این پژوهش از میکروسکوپ الکترونی روبشی و مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی الکترون بازگشتی^۳ مدل VEGA\TESCAN-LMU جهت مقایسه و بررسی شکل و اندازه ترکیبات بین فلزی، ترک های موجود استفاده شده است. پس از ایجاد خلاء با فشار بالا در ستون خلاء دستگاه، فصل مشترک اتصال با بزرگنمایی های گوناگون، مورد بررسی قرار گرفت.

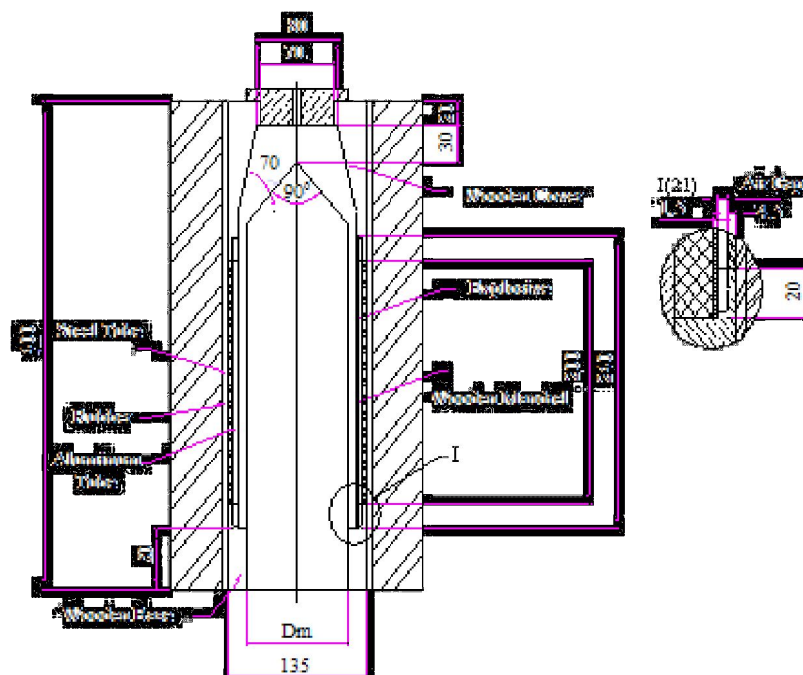
^۱-Ammatol

^۲-TNT

^۳-Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS)

جدول ۲- ترکیب شیمیایی لوله های جوشکاری انفجاری (%Wt).

Fe	Al	Zn	V	Cu	Ni	Ti	Cr	Mg	S	P	Mn	Si	C	(% عنصر Wt)
بالانس	-	-	-	-	۱۰/۵	-	۱۸	-	۰/۰۳	۰/۰۴	۲	۰/۷۵	۰/۸	AISI321
۰/۷	بالانس	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۱	-	۰/۰۳	-	۰/۰۵	-	-	۰/۰۵	۰/۷	-	AA1230



شکل ۳- سیستم تنظیمی جوشکاری انفجاری آلومینیوم ۱۲۳۰ به فولاد ۳۲۱.

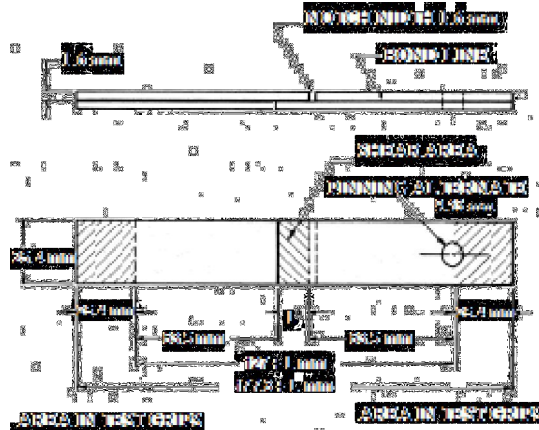
جدول ۳- خصوصیات آزمون های جوشکاری و عملیات حرارتی نمونه ها.

زمان (hr)	دما (C)	ضخامت مواد منفجره (mm)	قطر داخلی لوله پایه (mm)	قطر خارجی لوله پرنده (mm)	سرعت انفجار (m/s)	ماده منفجره	فاصله توقف (mm)	نمونه
۶	۴۵۰	۱۰/۷	۱۲۶	۱۲۴	۳۶۵۰	آماتول	۱	AS1
۶	۴۵۰	۱۰/۸	۱۲۶	۱۲۳	۳۶۵۰	آماتول	۱/۵	AS2
۶	۴۵۰	۷	۱۲۶	۱۲۲	۲۵۰۴	آماتول	۲	AS3
۶	۴۵۰	۶/۹۵	۱۲۶	۱۲۱	۲۵۰۴	آماتول	۲/۵	AS4
۶	۳۵۰	۷	۱۲۶	۱۲۲	۲۵۰۴	آماتول	۲	AS5
۸	۴۵۰	۷	۱۲۶	۱۲۲	۲۵۰۴	آماتول	۲	AS6

آزمون کششی برشی

استاندارد [ASTM D3165-95 ۱۹] تهیه شد. در شکل ۴ هندسه ابعاد و شکل ظاهری نمونه ها بر اساس استاندارد نشان داده شده است.

برای بررسی خواص مکانیکی نمونه ها پیش و پس از عملیات حرارتی، آزمون های مکانیکی شامل آزمون استحکام کششی برشی و ریزسختی روی نمونه های جوشکاری شده انجام شد. جهت ارزیابی خواص کششی برشی نمونه هایی از فلزات جوشکاری شده بر اساس



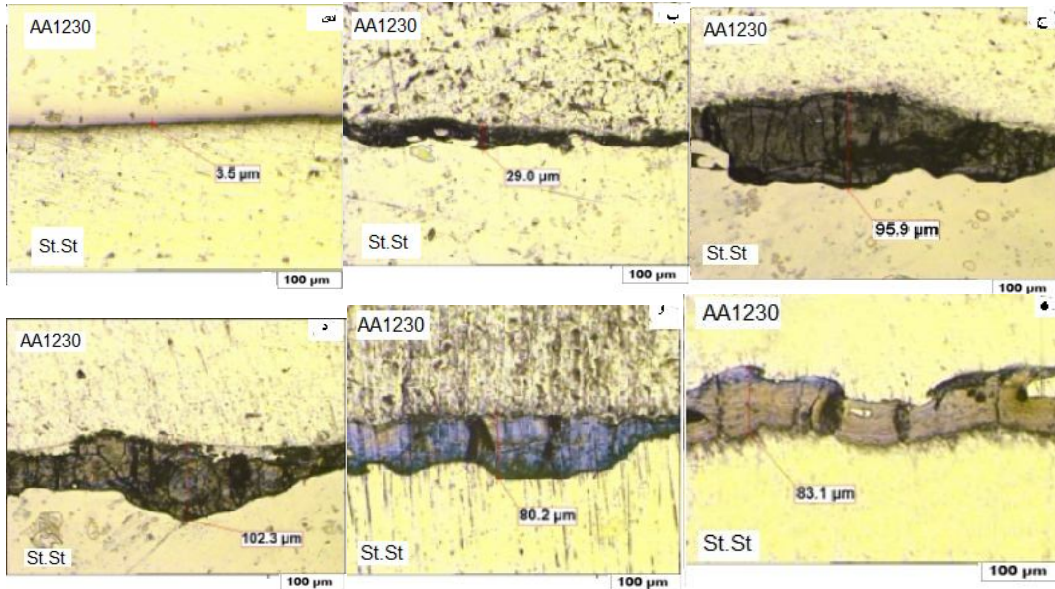
شکل ۴- ابعاد نمونه جهت آزمون کششی برشی بر اساس استاندارد [ASTM D3165-95 ۳۶].

آزمون ریزسختی

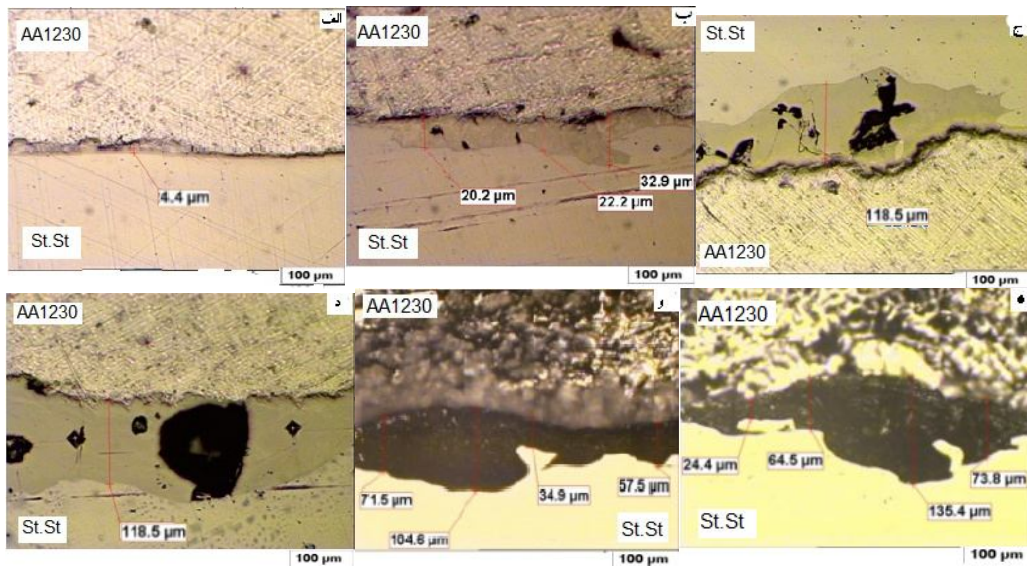
در این پژوهش آزمون ریزسختی ویکرز با استاندارد مرجع [ASTM E384-11 ۲۰] در دمای آزمایشگاهی (۲۵°C) به وسیله دستگاه مدل Buhler با نیروی اعمالی ۵۰ گرم از مناطق گوناگون ضخامت لایه بین فلزی انجام شد و میانگین سه اثر ریزسختی به عنوان مقدار ریزسختی ترکیبات بین فلزی نمونه جهت انجام مقایسه آن ها، پیش و پس از عملیات حرارتی و همچنین، تاثیر فاصله توقف بر آن در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

بررسی ریزساختار نمونه ها به وسیله میکروسکوپ نوری شکل موج های ایجاد شده در راستای طولی اتصال پیش و پس از عملیات حرارتی در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، ضخامت لایه ترکیب بین فلزی فصل مشترک اتصال با افزایش فاصله توقف افزایش یافته است. با افزایش فاصله توقف و ضخامت بار انفجاری سرعت صفحه پرنده بیشتر شده و تغییر شکل پلاستیک بیشتر در فصل مشترک اتصال اتفاق افتاده است. همچنین، انرژی جنبشی برخورد نیز افزایش یافته است و شکل فصل مشترک موجی تر شده است.



شکل ۵- فصل مشترک اتصال نمونه ها پیش از عملیات حرارتی- الف: AS1 ب: AS2 ج: AS3 د: AS4 و: AS5 ه: AS6.



شکل ۶- فصل مشترک اتصال نمونه ها پس از عملیات حرارتی- الف: AS1 ب: AS2 ج: AS3 د: AS4 و: AS5 ه: AS6.

دست داده و رفتار پلاستیک شبه سیال از خود نشان داده‌اند. شکل فصل مشترک به علت تغییر در زاویه دینامیکی برخورد و ناپیوستگی سرعت بین سطوح آزاد و تشکیل امواج ناشی از نوسان های موجی مواد و تغییر در توزیع سرعت‌ها در دو سمت سطح مشترک به صورت موجی و نایکنواخت است [۲۱-۲۳]. در اثر عملیات حرارتی در در دمای 450°C و زمان ۶ ساعت بیش‌ترین ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی نمونه ها در مقایسه با بیش‌ترین

سرعت حرکت صفحه پرنده با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری افزایش یافته و هم چنین، به دلیل وجود تفاوت در چگالی و سرعت حرکت موج در فلزات، مومنتم فشاری در دو سمت فصل مشترک با افزایش سرعت حرکت صفحه پرنده تغییر کرده و در نتیجه، نقطه برخورد در هنگام اتصال دچار نوسان شده است. این نوسان‌ها با افزایش سرعت برخورد افزایش یافته و مواد در مجاورت نقطه برخورد در حجم بزرگ تری استحکام خود را از

اختلاف خواص فیزیکی مواد، حذف عیوب خطی - نقطه‌ای و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری بوده است که در اثر آن ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی نیز گسترش یافته است. شکل‌های ۹ و ۱۰ منطقه‌های بین فلزی پیش و پس از انجام عملیات حرارتی را نشان داده اند. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز درصد اتمی عناصر ترکیبات موجود در فصل مشترک نمونه‌ها پیش و پس از انجام عملیات حرارتی به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی EDS نشان داده شده است. با توجه به نسبت اتمی آن‌ها و همچنین، دیاگرام فاز آهن- آلومینیم، لایه بین فلزی به احتمال زیاد، در منطقه $FeAl$ ، $FeAl_3$ و Fe_2Al_5 قرار دارد.

بر اساس گفته تامهانکارو همکارانش حرارت داخلی ایجاد شده بر اساس فشار بالای ناشی از امواج شوکی انفجار و تغییر شکل پلاستیکی شدید و ایجاد گرمای بی‌دررو در اثر گیر افتادن گردابه در جلوی جبهه برخی امواج در اثر استحاله انرژی جنبشی به انرژی حرارتی در طول برخورد و یا حرارت آدیاباتیک ناشی از گازهای محبوس ما بین صفحات ایجاد شده است. از آنجایی که به دلیل تفاوت در چگالی و سرعت اشاعه موج در دو فلز، شکل امواج دارای تقارن کامل نمی‌باشد و هم‌چنین، ضریب هدایت حرارتی فولاد کم‌تر از ضریب هدایت حرارتی آلومینیوم است، در هنگام سرد شدن این ترکیبات در یک سمت امواج متمرکز و به جهت انتقال حرارت بیش‌تر در سمت آلومینیوم مشاهده شده اند. با افزایش فاصله توقف به دلیل افزایش فشار و انرژی برخورد و دمای ناشی از آن، مقدار این مناطق در فصل مشترک بویژه در مجاورت گردابه موج‌ها افزایش یافته است. دشتی و اکبری موسوی نیز در اتصال انفجاری فولاد به آلومینیم گزارش کرده اند که با انجام عملیات حرارتی مکانیزم نفوذ فعال تر شده و باعث تشکیل و یا افزایش ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی شده است [۲۷ و ۲۸].

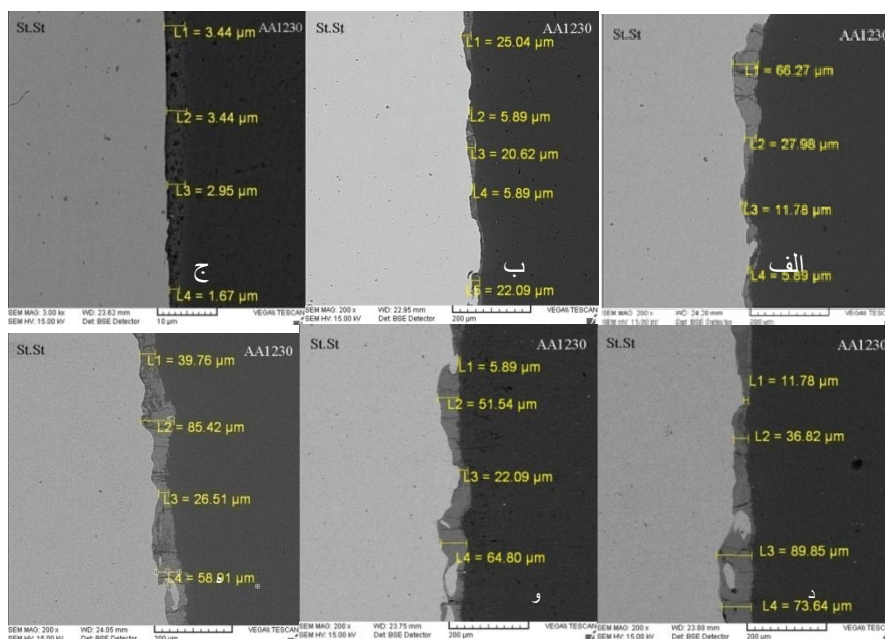
ضخامت لایه، پیش از عملیات حرارتی افزایش داشته است که در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده شده است که با کاهش دما ضخامت لایه بین فلزی نیز افزایش کم‌تری داشته است. در شکل ۶- و نشان داده شده است که با انجام عملیات حرارتی در دمای $350^{\circ}C$ و زمان ۶ ساعت ضخامت لایه بین فلزی نمونه AS5 ۱۰۴/۶ میکرون اندازه گیری شده است، در حالی که در نمونه AS3 با دمای $450^{\circ}C$ ، زمان ۶ ساعت و فاصله توقف برابر (دو میلی‌متر)، ضخامت لایه به $118/5$ میکرون رسیده بود. اکبری موسوی نیز در اتصال انفجاری سه لایه آلومینیم $50.83/5$ فولاد دریایی گزارش کرده است که با افزایش بار انفجاری و فاصله توقف دما در نقطه برخورد بسیار افزایش یافته و فصل مشترک از حالت صاف به موجی تبدیل شده و ترکیبات بین فلزی نیز افزایش یافته است [۲۳].

بررسی ریزساختار نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی

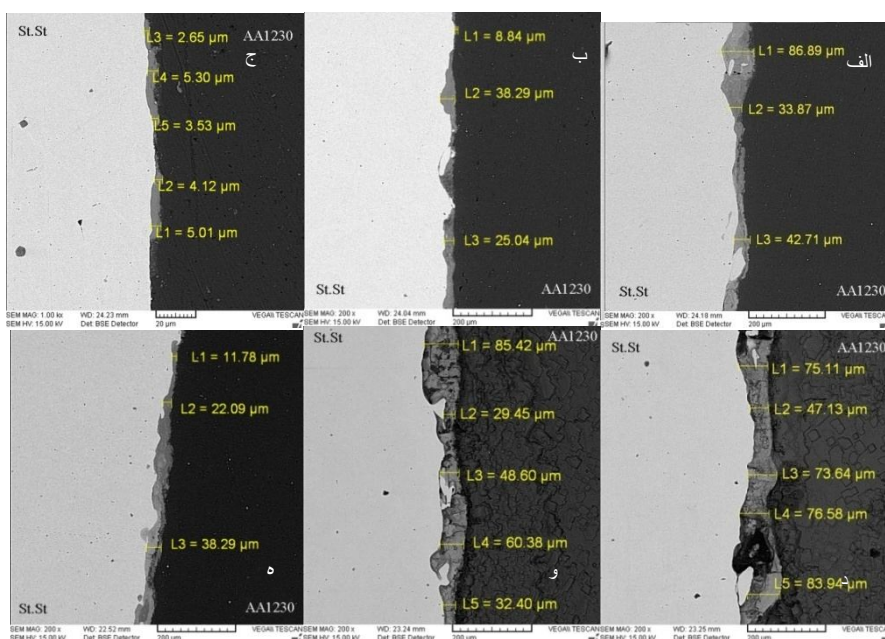
با افزایش فاصله توقف، دما در محل برخورد بسیار افزایش یافته است و باعث نزدیک شدن دمای محل برخورد به دمای نقطه ذوب فلزات و در نهایت، گردابه‌های مذاب شده است و با انجماد گردابه‌های مذاب لایه‌های بین فلزی و ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی فصل مشترک اتصال نیز افزایش یافته است. تغییر در شرایط برخوردی بویژه تغییر در زاویه دینامیکی برخورد^۱ بوده که باعث تغییر شرایط فصل مشترک و شکل آن شده است [۲۴ و ۲۶].

شکل ۱۰-۷ شکل‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک نمونه‌ها و ضخامت لایه‌ها در برخی نقاط را نشان داده است. همان‌گونه که در شکل ۷ برای نمونه‌ها پیش از انجام عملیات حرارتی نشان داده شده است، ضخامت این لایه‌ها نسبت به پس از انجام عملیات حرارتی در در دمای $450^{\circ}C$ و زمان ۶ ساعت که در شکل ۸ نشان داده شده است، کم‌تر است. دلیل این امر تاثیر عملیات حرارتی و نفوذ عناصر آلیاژی، کرنش‌های ناشی از

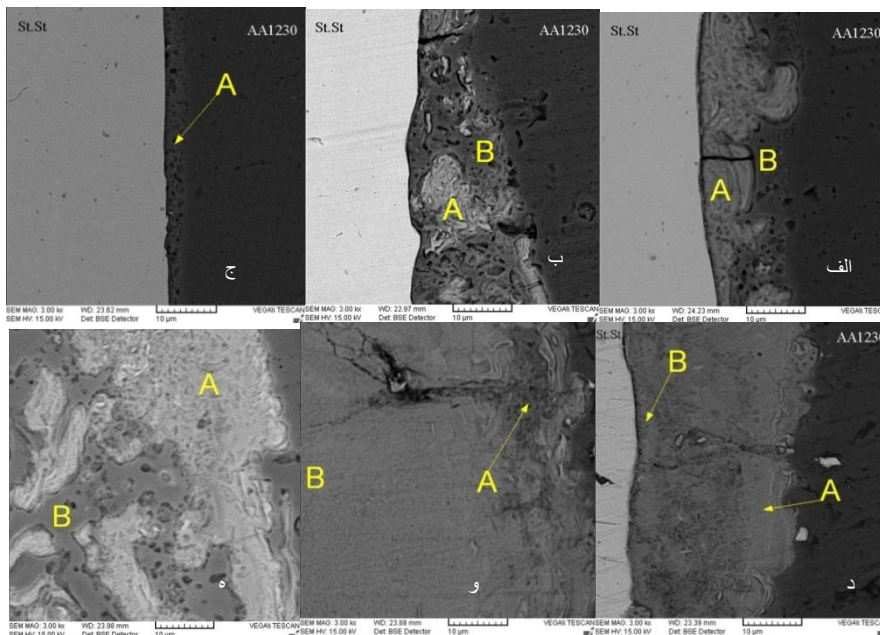
۱- صفحه پرنده در لحظه پس از انفجار، تحت زاویه (β) که به نام زاویه دینامیکی برخورد شهرت دارد، به صفحه پایه برخورد می‌کند.



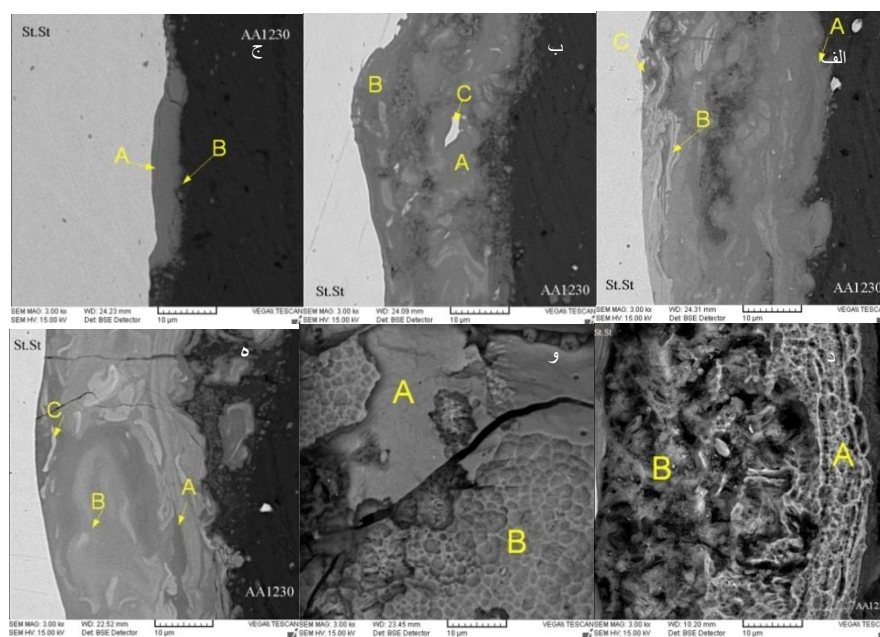
شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از تغییرات ضخامت نمونه های عملیات حرارتی نشده -الف: AS1 ب: AS2 ج: AS3 د: AS4 و: AS5 هـ: AS6.



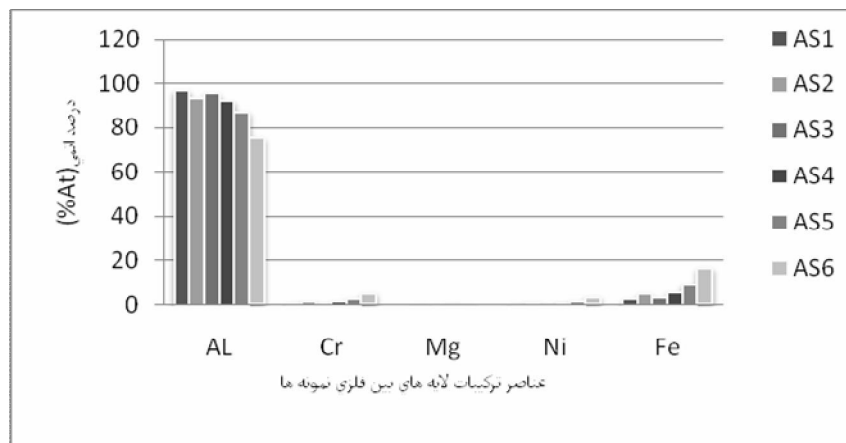
شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از تغییرات ضخامت نمونه های عملیات حرارتی شده- الف: AS1 ب: AS2 ج: AS3 د: AS4 و: AS5 هـ: AS6.



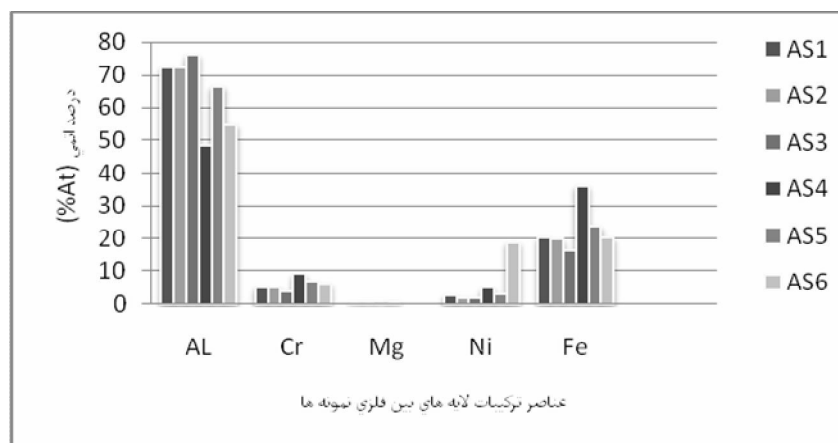
شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک نمونه‌های عملیات حرارتی نشده- الف: AS1 ب: AS2 ج: AS3 د: AS4 و: AS5 ه: AS6.



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ترکیبات بین فلزی فصل مشترک نمونه‌های عملیات حرارتی شده - الف: AS1 ب: AS2 ج: AS3 د: AS4 و: AS5 ه: AS6.



شکل ۱۱- تغییرات آنالیز عناصر لایه ترکیبات بین فلزی نمونه ها پیش از انجام عملیات حرارتی (درصد اتمی).



شکل ۱۲- تغییرات آنالیز عناصر لایه ترکیبات بین فلزی در دمای ۴۵۰ درجه برای شش ساعت (درصد اتمی).

کرنش ناشی از ناسازگاری فیزیکی- گرمایی ماده در هنگام عملیات حرارتی و نرم شدن زمینه فلز پایه در اثر تخریب کامل عیوب ساختاری تاثیر می پذیرد [۲۸-۳۰]. در شکل های ۱۱ و ۱۲ آنالیز ترکیبات بین فلزی پیش و پس از عملیات حرارتی آمده است. نتایج نشان می دهد که ترکیب لایه در نزدیکی مرز با آلومینیم چندان تغییری ندارد و از نوع Fe_2Al_5 ثابت مانده است و بنابراین، نفوذ چندانی رخ نداده است. در نزدیک مرز با فولاد آستنیتی شاهد نفوذ بویژه برای کروم، نیکل و آهن پس از انجام عملیات حرارتی بوده و ترکیب از نوع $FeAl_3$ به Fe_2Al_5 به احتمال زیاد تغییر ساختار داده است.

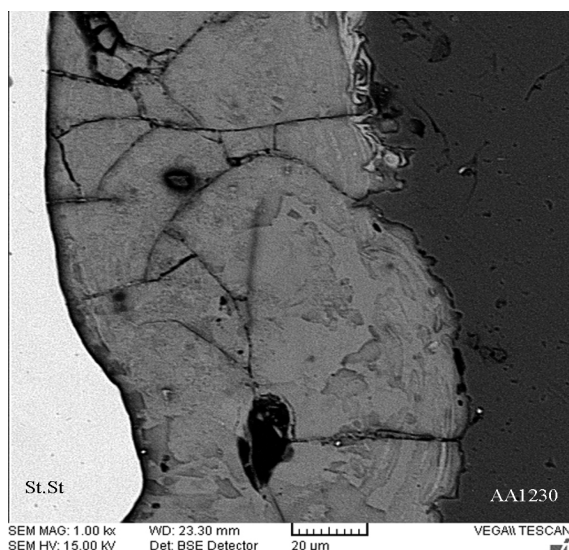
با مقایسه اثر زمان بر نفوذ عناصر همان گونه که در شکل ۱۲ برای نمونه AS6 نشان داده است، با افزایش زمان عملیات حرارتی از شش به هشت ساعت مقدار نفوذ

پس از انجام عملیات حرارتی به دلیل افزایش دما فرصت نفوذ کافی برای کروم، نیکل و آهن در ترکیبات بین فلزی فراهم شده و در نتیجه، ضخامت لایه های بین فلزی افزایش یافته است. این مطلب را می توان به فضای بیش تر ساختار شبکه دارای چگالی بالا از عیوب نقطه ای و خطی نسبت داد که در اثر عبور موج تنش ضربه ای ایجاد شده هنگام جوشکاری انفجاری بوجود آمده است. این عیوب باعث می شود که مقدار بیش تری آهن، کروم و نیکل از راه این مسیرهای نفوذ سریع به فصل مشترک نفوذ کنند. انرژی اکتیواسیون نفوذ با دما افزایش می یابد و بنابراین، عرض منطقه واکنش دهنده را افزایش می دهد. تغییر لایه های بین فلزی از عواملی چون مقدار نفوذ عناصر اصلی، تنش های باقی مانده ناشی از جوشکاری که منجر به ایجاد کرنش در منطقه نفوذ می شود، ایجاد

یکدیگر پیوسته اند و در اثر عبور امواج شوکی، دانسیته عیوب خطی و نقطه‌ای افزایش یافته است. از آنجایی که نفوذ اتم‌ها بیش‌تر با مکانیزم جای خالی انجام می‌شود، در حین نفوذ با افزایش دما تعادل ترمودینامیکی جای خالی به هم خورده و تعدادی جای خالی به سیستم اضافه شده تا به تعادل برسد، جاهای خالی به هم پیوسته و تشکیل حفره می‌دهند [۲۸-۳۰].

آلومینیم به سمت فولاد کم‌تر از نمونه AS3 بوده است و مقدار عناصر دیگر با افزایش زمان نگهداری رشد پیدا کرده است. با توجه به ضریب نفوذ و دمای ذوب عناصر، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش زمان عرض منطقه واکنش نفوذ را افزایش می‌دهد.

در شکل ۱۳ حفره‌های ریز تیره رنگی در منطقه اتصال از فصل مشترک اتصال نمونه AS6 نشان داده است. با افزایش حرارت جاهای خالی بیش‌تری در اثر حرارت به

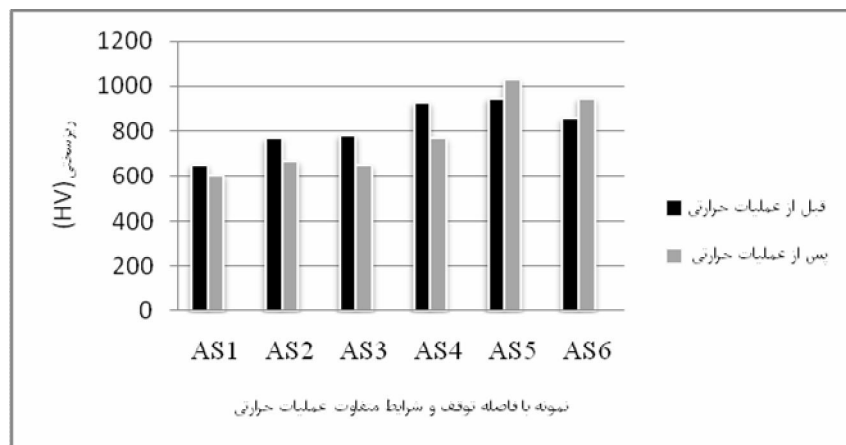


شکل ۱۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ترک و حفره در فصل مشترک نمونه AS6- عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰°C و زمان ۸ ساعت.

آزمون ریز سختی سنجی

نتایج آزمون در شکل ۱۴ نشان داد که پیش از انجام عملیات حرارتی با افزایش فاصله توقف، سرعت حرکت صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد بیش‌تر و در نتیجه، انرژی جنبشی برخوردی نیز افزایش یافته و تغییر شکل پلاستیکی شدیدی در فصل مشترک اتصال ایجاد شده و سخت شدن شوکی ناشی از امواج انفجار ریز سختی را افزایش داده است [۳۴].

همان گونه که در شکل‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده است، ترک‌های ریزی عمود بر فصل مشترک مشخص است که در نتایج دیگر پژوهشگران نیز گزارش شده است. میدان‌های تنش حرارتی و کرنش پسماند ناشی از اختلاف ضریب هدایت حرارتی دو فلز، ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی با ماهیت ترد و شکننده را افزایش داده است [۳۱-۳۳].



شکل ۱۴- نتایج آزمون ریزسختی سنجی لایه ترکیبات بین فلزی در دما و زمان های متفاوت.

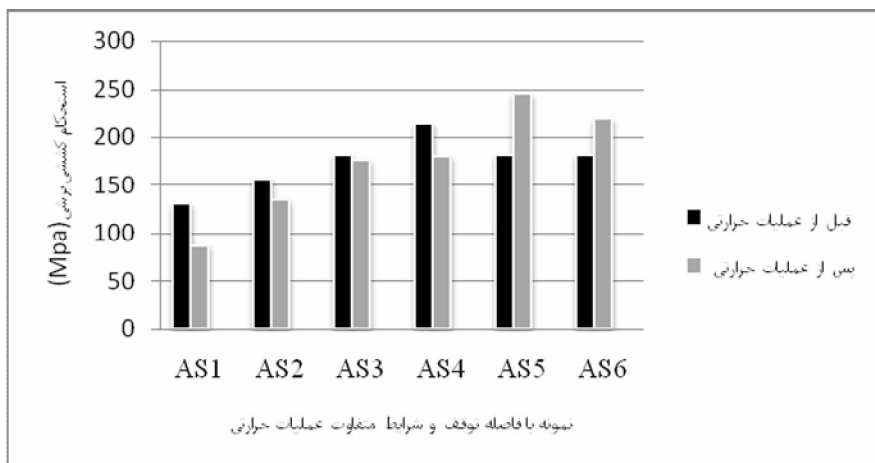
در در دمای 450°C در کوره نگهداری شده است، مقدار درصد اتمی آلومینیم، کروم و نیکل به ترتیب $54/7$ ، $6/1$ و $18/7$ و ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی بین $83/9$ - $47/1$ میکرون بدست آمده است. با توجه به کاهش درصد اتمی آلومینیم، افزایش درصد اتمی نیکل و کروم در نمونه AS6، افزایش یکنواخت ضخامت لایه بین فلزی ترد در طول فصل مشترک اتصال را که در شکل ۸ آمده است، با توجه به افزایش زمان عملیات حرارتی و افزایش مکانیزم نفوذ عناصر آلیاژی مقدار ریزسختی فصل مشترک اتصال نمونه AS6 با افزایش زمان عملیات حرارتی بیش تر شده است.

آزمون کششی برشی

نتایج آزمون کششی برشی که در شکل ۱۵ آمده است، نشان داد که مقدار استحکام کششی برشی در نمونه های AS1 و AS2 به ترتیب $103/2$ و $156/57$ مگاپاسکال بدست آمده است.

پس از انجام عملیات حرارتی در دمای 450°C و زمان شش ساعت، نتایج نشان داده که ریز سختی در تمامی نمونه های آزمایش نسبت به پیش از انجام عملیات حرارتی کاهش یافته است. به گونه ای که ریزسختی ترکیبات بین فلزی AS1، AS2، AS3 و AS4 به ترتیب 600 ، 666 ، 646 و 766 ویکرز اندازه گیری شده است. با افزایش دما و امکان حذف عیوب خطی و نقطه ای ناشی از عبور امواج شوک، آزاد شدن تنش های پسماند ناشی از جوشکاری، تنش زدایی انجام و باعث کاهش ریزسختی نمونه ها پس از انجام عملیات حرارتی شده است.

مشاهده شد که با افزایش زمان مقدار ریزسختی نیز افزایش یافته است. تاثیر زمان عملیات حرارتی در مقایسه ریزسختی نمونه های AS3 و AS6 با دمای عملیات حرارتی ثابت 450°C به ترتیب در زمان های شش و هشت ساعت بررسی شده است. با توجه به نتایج آنالیز عنصری شکل ۱۲، در نمونه AS3 درصد آلومینیم، کروم و نیکل به ترتیب 76 ، $3/8$ و $1/9$ و ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی بین $86/8$ - $33/8$ میکرون بدست آمده است. همچنین، برای نمونه AS6 که به مدت دو ساعت بیش تر



شکل ۱۵- نتایج آزمون استحکام برشی کششی در دما و زمان های متفاوت.

نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر عملیات حرارتی بر ترکیبات بین فلزی فصل مشترک اتصال انفجاری فولاد آستنیتی ۳۲۱ - آلومینیم ۱۲۳۰ و خواص آن با فاصله توقف گوناگون انجام و نتایج زیر بدست آمد:

دراثر عملیات حرارتی مکانیزم نفوذ فعال شده و باعث تشکیل یا افزایش ضخامت لایه ترکیب بین فلزی شده است. با انجام عملیات حرارتی مقدار ریز سختی فصل مشترک به دلیل حذف عیوب خطی نقطه ای در اثر عبور امواج شوک، انجام عملیات حرارتی آنیل و کاهش تنش های پسماند ناشی از جوشکاری، کاهش یافته است.

افزایش فاصله توقف باعث موجی تر شدن فصل مشترک اتصال شده و استحکام را افزایش داده است و پس از انجام عملیات حرارتی با افزایش حرارت، ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی افزایش یافته و در نتیجه، استحکام کاهش یافته است.

پس از انجام عملیات حرارتی، با افزایش دما و زمان حفره های ریز تیره رنگی موازی با فصل مشترک و هم چنین، ترک هایی عمود بر راستای فصل مشترک اتصال رشد کرده اند.

همان گونه که نتایج نشان داده، با افزایش فاصله توقف در نمونه AS2 به یک و نیم میلی متر، دامنه امواج به علت تغییر شکل پلاستیکی بیش تر شده، شکل ۷ نشان داده که فصل مشترک موجی تر شده و یک قفل مکانیکی در آن بوجود آمده است که بر افزایش استحکام اثر دارد. در شکل های ۷-ج و ۷-د مربوط به نمونه های AS3 و AS4 نیز مشاهده شده است که با افزایش فاصله توقف از دو به دو و نیم میلی متر به دلیل بالا، استحکام از ۱۸۱/۱۱ مگاپاسکال در نمونه AS3 به ۲۱۴/۵ مگاپاسکال در نمونه AS4 افزایش یافته است.

انجام عملیات حرارتی با دمای 450°C و زمان شش ساعت، باعث افزایش ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک نمونه ها، تمرکز تنش و افزایش ترک و حفره در این منطقه شده است. به همین دلیل، استحکام کششی برشی آن ها نیز در مقایسه با پیش از انجام عملیات حرارتی کاهش یافته است. تمامی نمونه های آزمایش از سطح آلومینیم شکست داشته و از فصل مشترک شکستی رخ نداده است.

References

1- B. S. Zlobin, " Explosion Welding of Steel with Aluminum", Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 38, No. 3, pp. 374-377, 2002.

2- R. Kacar, and M.Acarer, "An Investigation on the Explosive Cladding of 316L Stainless Steel-Din-P355GH Steel", Materials Processing Technology, Vol. 153, PP. 91-96, 2009.

- 3- L. Tricarico, R. Spina, D. Sorgente, and M. Brandizzi, "Effects of heat treatments on mechanical Properties of Fe/Al Explosion-Welded Structural Transition Joints", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 2693-2700, 2009.
- 4- G. Temizel and M. Ozenbas, "Intermetallic Phase Formation at Fe-Al Film Interfaces", *Turkish J. Eng. Env.*, PP.71-78, 2007.
- 5- S. Phengsakul, A. Rodchanarowan, "Effect of Thermal Treatment on Intermetallic Phases of Fe/Al Structural Transition Joints", *Energy Procedia*, Vol. 34, pp. 782 – 790, 2013.
- 6- B. S. Zlobin, "Explosion Welding of Steel with Aluminum", *Materials and Design*, Vol. 24, No. 3, pp. 617–622, 2003.
- 7- Tricarico L, Spina R, Sorgente D, Brandizzi M., "Effects of Heat Treatments on Mechanical Properties of Fe/Al explosionwelded", *Structural Transition Joints. Materials and Design*, Vol. 30, PP. 693-700, 2009.
- 8- Patterson, A., "Fundamentals of Explosion Welding", *ASM Handbook*, Vol 6 Welding, Brazing, and Soldering, ASM International, USA, Pages 160-164, 1993.
- 9- A. Durgutlu, H. Okuyucu, B. Gulenc, "Investigation of Effect of the Stand-off Distance on Interface Characteristics of Explosively Welded Copper and Stainless Steel", *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 1480-1484, 2008.
- 10- G. Temizel, "Intermetallic Phase Formation at Fe-Al Film Interfaces", *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, Vol. 31, pp. 71-78, 2007.
- 11- T.I.Khan, S.A. Rizvi, K.Matsuura, "The Effect on Wear Behaviour of H13 tool Steel Surfaces Modified Using Atungesten arc Heat Source", *Wear* 2000, Vol.244, PP: 154-164.
- 12- I. Samardzic, B. Matesa, I. Kladaric, "The Influence of Heat Treatment on Properties of Three-Metal Explosion Joint: Almg-Al-steel", *Metabk*, Vol. 50, pp. 159-162, 2011.
- 13- F. Findik, R. Yilmaz and T. Somyurek, "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.
- 14- J. Lokaj, M. Benak, "X ray Microanalysis of Al-austenitic Steel Boundary Formed by Explosion Welding", *Metal*, Vol. 5, PP. 18-20, 2010.
- 15- "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens", *ASTM E3-11*, Philadelphia, 2012.
- 16- "Standard Practice for Microetching Metals and Alloys", *ASTM E407*, Philadelphia, 2012.
- 17- "Standard Guide for Reflected-Light Photomicrography", *ASTM E883-11*, Philadelphia, 2012.
- 18- "Measurement of Metal and Oxide Coating Thickness by Microscopical Examination of a Cross Section", *ASTM B487-02*, Philadelphia, 2012.
- 19- "Standard test Method for Tension Shear", *ASTM D 3165-95*, Philadelphia, 2012.
- 20- "Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials", *ASTM E384-11*, Philadelphia, 2012.
- ۲۱- س.ع.ا. اکبری موسوی، ا.ع. آماده، ا. فتحی یونسی، "بررسی جوشکاری انفجاری کامپوزیت سه لایه MS90/St14 /Ms90"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- 22- N. Kahraman, B. Gulence, "Micro Structural and Mechanical Properties of Cu-Ti Plates Bonded Through Explosive Welding Process", *Materials processing Technology*, Vol. 169, PP. 67-71, 2005.
- ۲۳- س.ع.ا. اکبری موسوی، م. نوروزپور، ا.ملکی، "بررسی فصل مشترک جوشکاری اتصال لایه ورق های آلومینیم ۵۰۸۳/آلومینیم ۱۲۵۰/فولاد دریایی"، علمی پژوهشی مواد پرانرژی، سال سوم، ۱۳۸۷.
- 24- M. Benak, M. Turna, M. Ozvold, P. Nesvadba, J. Lokaj, L. Caplovic, F. Kovac, V. Stoyka, "Study of Al-austenitic steel Boundary Formed by Explosion Welding",

Roznov Pod Radhostem Czech Republic, Vol. 18, 2010.

25- M.Acarer, B.Gulenc, F. Findik, " Investigation of Explosive Welding Parameters and Their Effects on Microhardness and Shear Strength", Materials and Design, Vol. 24, pp. 659-664, 2003.

26- L. Tricarico, R. Spina, "Mechanical Strength of Fe/Al Structural Transition Joints Subject to Thermal Loading", Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 37, pp. 85-93, 2009.

۲۷- ع. دشتی، ا. حلویایی، "بررسی اثر عملیات حرارتی بر استحکام اتصال آلومینیم به فولاد در جوش انفجاری"، هفتمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.

28- S.A.A.Akbari Mousavi, and 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.

۲۹- م.زرچی، "بررسی عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی مقطع جوش فولاد ۴۱۴۰"، مجله مواد نوین مرودشت، جلد سوم، شماره چهارم، ۱۳۹۲.

۳۰- ا. ساعتچی، ر. ماموری، " نفوذ در جامدات، دانشگاه تربیت مدرس"، ۱۳۷۲.

31- B.Crossland, "Explosive Welding of Metals and Its Applications", Oxford Science Publication.

32- S.r.Reid, "Wake Instability Mechanism for Wave Formation in Explosive welding", Int. Journal of Mechanical science, 1978.

33- E. Esquivel, Lawrence, E.Murr, St. Stafford, "Fundamental Microstructural Issue Associated with Severe Plastic Deformation: Application of Transmission Electron Microscopy", P.H.D Thesis, University of Texas, 2005.

34- N. Kengkla and N. Tareelap, " Role of Intermetallic Compound on Corrosion of Aluminium/Steel Transition Joint Used in Naval Applications", 1st Mae FahLuang University International Conference 2012.