



بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و متالورژیکی ورق سه لایه آلومینیوم فولاد/ آلومینیوم

مهدی پورجعفری کسمایی¹، محمد هنرپیشه^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جاسب، جاسب
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
*کاشان، صندوق پستی 8731751167، honarpishe@kashanu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 شهریور 1393
پذیرش: 26 آبان 1393
ارائه در سایت: 26 آذر 1393
کلید واژگان:
جوشکاری انفجاری
عملیات حرارتی
ترکیبات بین فلزی
فصل مشترک

یکی از روش‌های ایجاد اتصال بین فلزات هم جنس و غیر همجنس، فرایند جوش انفجاری می‌باشد که فشار لازم جهت ایجاد اتصال از طریق انرژی ناشی از انفجار مواد منفجره حاصل می‌شود. در این پژوهش ورق سه لایه آلومینیوم/فولاد/آلومینیوم از طریق جوشکاری انفجاری تولید گردیده و اثر دما و زمان عملیات حرارتی آنیلینگ بر خواص مکانیکی و متالورژیکی فصل مشترک اتصال مطالعه شده است. بدین منظور تغییرات سختی در راستای ضخامت نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و ضخامت و نوع ترکیبات بین فلزی تشکیل یافته در فصل مشترک اتصال با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و همچنین آنالیز شیمیایی عناصر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده آن است که افزایش دما و زمان عملیات حرارتی باعث افزایش عمق نفوذ و ضخامت ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال می‌شود. مطالعات صورت گرفته پس از تست میکروسختی و یکرز نشان دهنده تعدادی میکروتترک در فصل مشترک بالا و پایین برخی نمونه‌های آنیل شده می‌باشد که این موضوع، تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد در فصل مشترک اتصال و شکل پذیری پایین این ترکیبات را نشان می‌دهد. همچنین به منظور بررسی کیفیت اتصال لایه‌ها تست برش به انجام رسیده که بیانگر اتصال قابل قبول لایه‌ها به یکدیگر بوده است.

Investigation of annealing treatment on the mechanical and metallurgical properties of explosive-welded Al/St/Al multilayer

Mahdi Pourjafari Kasmaee¹, Mohammad Honarpisheh^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Jasp Branch, Jasp, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kashan, Iran
*P.O.B. 8731751167, Kashan, Iran, honarpishe@kashanu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 September 2014
Accepted 17 November 2014
Available Online 17 December 2014

Keywords:
Explosive welding
Heat treatment
Intermetallics
Interface

ABSTRACT

Explosive welding is used for excellent bonding of similar and dissimilar materials with a wide variety of thicknesses, area dimensions and different thermal and mechanical properties. In this study, an Al/St/Al multilayer sheet was fabricated by explosive welding process and the effects of annealing temperature on the interfacial properties of explosively bonded Al/Cu bimetal have been investigated. For this purpose, hardness changes along the thickness of the samples have been measured, and the thickness and type of intermetallic compounds formed at the joining interface have been explored by means of optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and also energy dispersive spectroscopy (EDS). By heat treatment of the samples at 300, 350 and 400°C, it was observed that intermetallic layer was formed at the interfaces. The obtained results indicate that, with the increase of the annealing temperature, the thickness of intermetallic compounds has increased and the amount of hardness along the thickness of the joining interface has diminished. In the annealed sample at 300°C for 60 min, it was observed that intermetallic layers have formed at the interface of Al/St bimetal. These layers consist of the intermetallic compound Al_2Fe and its thickness becomes to about 35 μm at some points.

1- مقدمه

موج و یا موج و گردابه، در هم فرو می‌روند. در حین اتصال تغییر شکل پلاستیک شدید و فشار زیاد باعث تشکیل جتی از بین صفحات به سمت بیرون می‌شود که با خود ناخالصی‌ها و اکسیدها را به سمت بیرون پرتاب می‌کند و یک فصل مشترک تمیز و اتصالی با کیفیت مناسب ایجاد می‌کند. در این روش مقداری کارسختی هنگام برخورد صفحات اتصال حین جوش انفجاری به یکدیگر و همچنین به سبب اثر شوک موج‌های برگشتی

یکی از روش‌های اتصال مواد هم جنس و غیر هم جنس فرایند جوشکاری انفجاری می‌باشد [1]. در این فرایند دو یا چند صفحه با فاصله توقف و زاویه استقرار مناسب نسبت به یکدیگر قرار گرفته و با سرعت بالایی که محصول انرژی آزاد شده یک ماده منفجره است، به یکدیگر برخورد می‌کنند و اتصال برقرار می‌شود. در این روش فلزات در ناحیه واسط بین خودشان با تشکیل یک

Please cite this article using:

M. Pourjafari Kasmaee, M. Honarpisheh, Investigation of annealing treatment on the mechanical and metallurgical properties of explosive-welded Al/St/Al multilayer, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 397-402, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جهت انجام جوشکاری، ابتدا صفحه آلومینیومی به عنوان صفحه ساکن بر روی بلوک بتنی گذاشته شده و سپس صفحه فولادی به عنوان صفحه میانی و با فاصله توقف برابر با ضخامت لایه پرند و توسط پایه‌های چوبی بر روی صفحه ساکن قرار داده شد. در آخر صفحه آلومینیومی به عنوان صفحه پرند و به صورت آرایش موازی بر روی صفحات دیگر قرار گرفت و مواد منفجره پس از آماده‌سازی و توزین، در داخل جعبه از جنس چوب کاملاً خشک ریخته شده و سپس روی صفحه پرند قرار گرفته است. در آزمایش جوش انفجاری انجام شده در این تحقیق از پودر آماتول با ترکیب شیمیایی 92% درصد وزنی نیترات آمونیوم به همراه 6% درصد وزنی گازوئیل و با چگالی 0/85 گرم بر سانتی‌متر مکعب و با سرعت انفجاری متوسط 2500 متر بر ثانیه استفاده شده است. همچنین جهت آغاز و اطمینان از عملیات انفجار، از چاشنی C4 استفاده گردیده است. به منظور بررسی تاثیر پارامترهای دما و زمان عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و متالورژیکی ورق‌های جوش انفجاری شده، نمونه‌هایی با ابعاد 250×40×5 میلی‌متر از ورق آلومینیوم/فولاد/آلومینیوم تهیه گردید و عملیات حرارتی نمونه‌ها داخل کوره با تفرانس دمایی $\pm 5^{\circ}\text{C}$ به مدت یک ساعت در دماهای 300، 350 و 400 درجه سانتی‌گراد و همچنین در دمای ثابت 350 درجه به مدت 3 و 6 ساعت صورت گرفت. جهت انجام مطالعات متالوگرافی و همچنین اندازه‌گیری سختی در فصل مشترک اتصال، یک سطح مقطع عرضی در جهت انفجار برش داده شد. نمونه‌ها جهت سنباده‌زنی و پولیش بهتر مانع گردید و سپس با ورق‌های سنباده شماره 120 تا 3000 ساییده شدند و در آخر توسط خمیر الماسه 1 میکرون پولیش گردیدند. به منظور بررسی تاثیر دما و زمان عملیات حرارتی آنیلینگ بر خواص مکانیکی و متالورژیکی فصل مشترک اتصال، تست سختی سنجی ویکرز با بار 100 گرم و در راستای ضخامت نمونه‌ها انجام شد به طوری که سختی هر دو فصل مشترک و مناطق اطراف آنها به طور کامل و به صورت یک پروفیل سختی گزارش شده است. همچنین تست استحکام کششی و برشی نمونه‌های جوش انفجاری و نمونه‌های عملیات حرارتی شده به ترتیب مطابق با استاندارد ASTM-E8M-88a و ASTM D 3165-95 انجام شد. همچنین به منظور بررسی نحوه اتصال صفحات آلومینیوم و فولاد، تغییرات ریز ساختاری در حین عملیات انفجار و همچنین شکل‌گیری ترکیبات بین فلزی، فصل مشترک اتصال در نمونه‌های جوش انفجاری و عملیات حرارتی توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز EDS مورد مطالعه قرار گرفته است.

3- نتایج و بحث

شکل 1 تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری با بزرگ نمایی 500 برابر از فصل مشترک اتصال ورق‌های آلومینیوم و فولاد قبل از عملیات حرارتی را نشان می‌دهد.

جدول 1 آنالیز شیمیایی مواد مورد استفاده (wt.%)

نمونه	Al	Sn	Cr	Ni	Mn
آلومینیوم 2024	بالانس	0/01	0/01	0/02	0/67
St14	0/037	0/01	0/02	0/02	0/25
نمونه	Cu	Fe	Si	C	
آلومینیوم 2024	4/9	0/35	0/15	-	
St14	0/01	بالانس	0/02	0/04	

ایجاد می‌شود [2]. لذا به منظور بهبود خواص مکانیکی و متالورژیکی و همچنین کاهش اثرات تنش‌های پسماندی که در فصل مشترک و مناطق اطراف آن بوجود می‌آید انجام عملیات حرارتی آنیل بر روی قطعات ضروری می‌باشد. باید توجه داشت عملیات حرارتی نمونه‌ها بدلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد در فصل مشترک اتصال به دقت کنترل شود زیرا تشکیل و افزایش ضخامت این ترکیبات بر خواص مکانیکی ورق اثر خواهد گذاشت [3] به خصوص اگر ضخامت این ترکیبات به 5 میکرومتر برسد استحکام اتصال را شدیداً تحت تاثیر قرار می‌دهد [4]. البته فرآیند جوشکاری انفجاری مختص اتصال ورق‌های فلزی نمی‌باشد و ساخت لوله‌های دو جدار فولاد/فسفر-برنز موردی است که توسط لیاقت و همکارش [5] صورت گرفته است. ضمن اینکه نوع اتصال صفحات به یکدیگر می‌تواند به صورت گوه‌ای شکل طراحی گردد. زمانی و همکارانش [6] اتصال گوه‌ای آلومینیوم/مس را مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

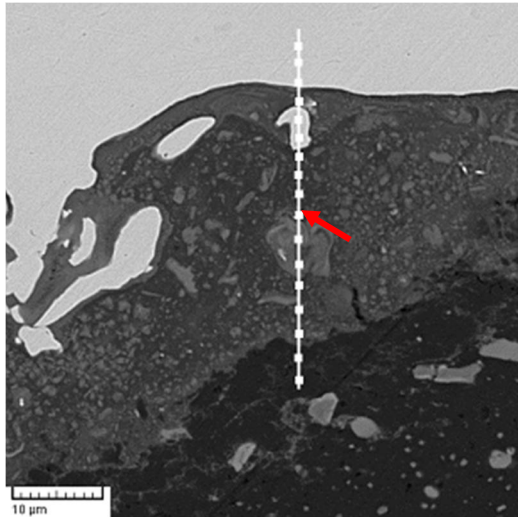
در زمینه‌ی بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی فصل مشترک اتصال آلیاژهای مختلف تحقیقاتی به انجام رسیده است. گولنس [7] به بررسی خواص فصل مشترک ورق مس/آلومینیوم پرداخت. صدیقی و همکارانش [8] نقش عملیات حرارتی پس از فرآیند جوشکاری انفجاری را در ایجاد فازهای میانی در فصل مشترک لایه‌های آلومینیوم/مس مورد بررسی قرار دادند. همچنین بررسی فصل مشترک فولاد/تانتالیوم موردی است که توسط کوزک و همکارانش [9] به انجام رسیده است. بررسی فصل مشترک مس/فولاد توسط رافوکاندان [10] به انجام رسید. وی در تحقیق خود وضعیت متالورژیکی و مکانیکی فصل مشترک را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. از دیگر تحقیقات در زمینه‌ی فصل مشترک اتصال، بررسی استحکام باند جوش می‌باشد که بوسیله‌ی چاو و همکارانش بر روی ورق آلومینیوم/فولاد به انجام رسیده است [11].

نتایج تحقیقات محققین نشان می‌دهد افزایش دمای عملیات حرارتی به بیش از 300 درجه سانتی‌گراد منجر به کاهش استحکام اتصال آلومینیوم و فولاد می‌شود. همچنین مقاومت به شکست تا دمای 400 درجه سانتی‌گراد تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین بررسی سطح شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد شکست در لایه آلومینیومی در دماهای بالاتر از 320 درجه سانتی‌گراد از نوع ترد و در دماهای پایین تر از نوع نرم می‌باشد. لذا عملیات حرارتی ورق‌های آلومینیوم/فولاد/آلومینیوم و در حالت کلی ورق‌های چندلایه‌ی جوش انفجاری شده در یک دما و زمان بهینه صورت می‌گیرد تا شکل‌پذیری و استحکام جوش مناسبی بدست آید [12].

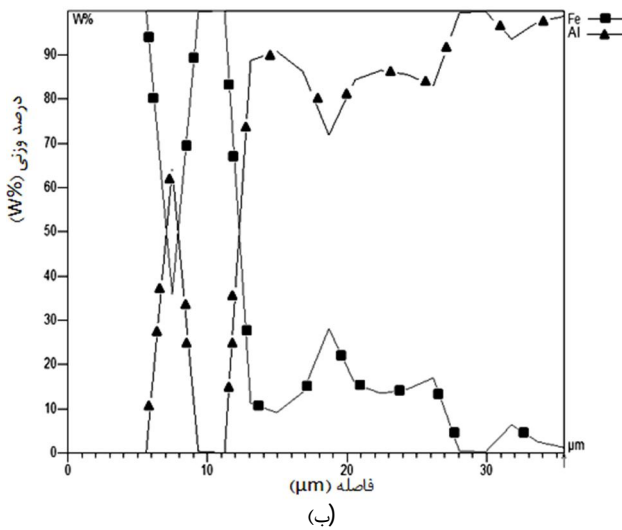
در این پژوهش یک ورق سه لایه متشکل از صفحات آلومینیوم (Al2024)، فولاد (St14) و آلومینیوم (Al2024) که به روش جوش انفجاری به یکدیگر متصل شده‌اند تهیه گردید و سپس اثر دما و زمان عملیات آنیلینگ بر خواص فصل مشترک اتصال به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، تست میکروسختی در راستای ضخامت نمونه‌های عملیات حرارتی به انجام رسید و شکل‌گیری و رشد ترکیبات بین فلزی توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت.

2- مواد و روش تحقیق

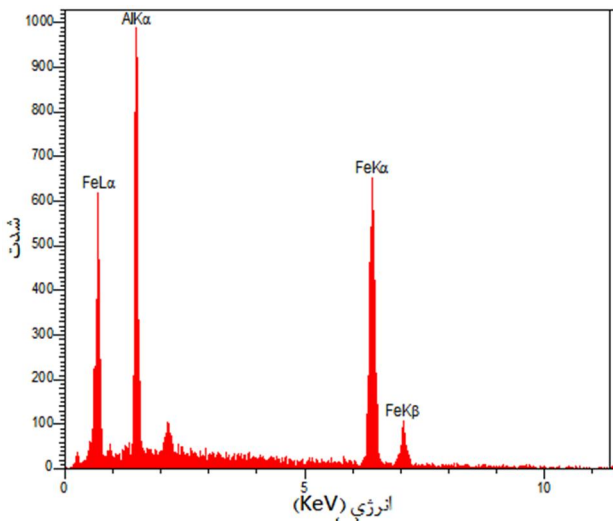
در این مطالعه از ورق‌های آلومینیوم (Al2024) و فولاد (St14) به ترتیب با ضخامت 2 و 1 میلی‌متر در اتصال به روش جوشکاری انفجاری و با چیدمان موازی استفاده شده است. ترکیب شیمیایی این مواد در جدول 1 آورده شده است.



(الف)



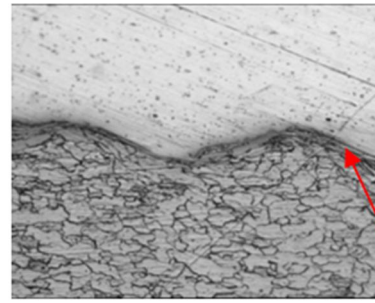
(ب)



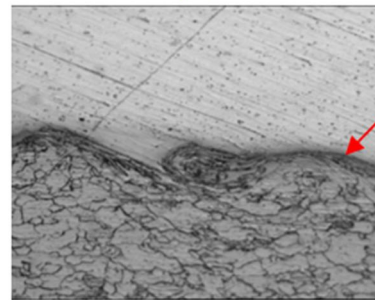
(ج)

شکل 2 فصل مشترک اتصال صفحات آلومینیوم و فولاد پس از عملیات حرارتی در دمای 300 درجه سانتیگراد و مدت 60 دقیقه (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی (ب) آنالیز شیمیایی خطی فصل مشترک اتصال (ج) آنالیز نقطه نشان داده شده در شکل 2- الف

شکل 3 فصل مشترک اتصال و آنالیز شیمیایی آن پس از عملیات



(الف)



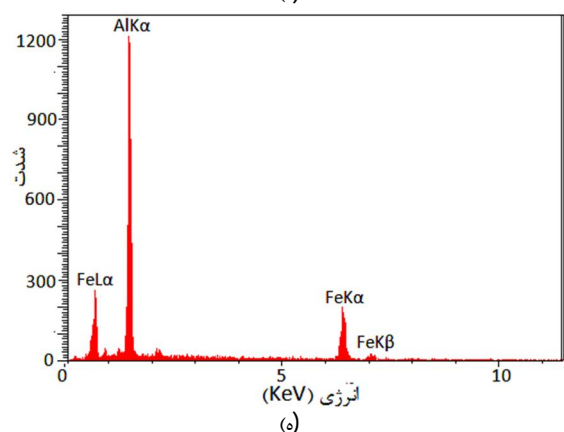
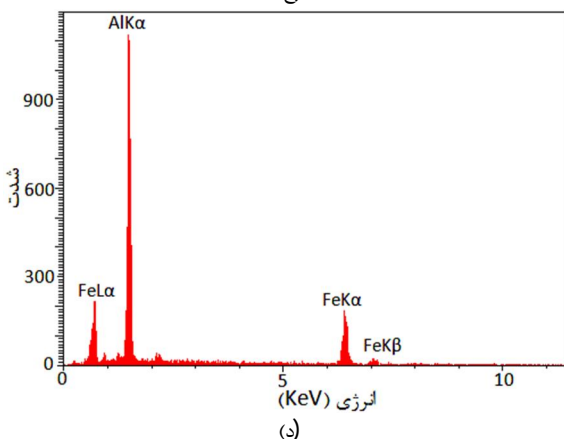
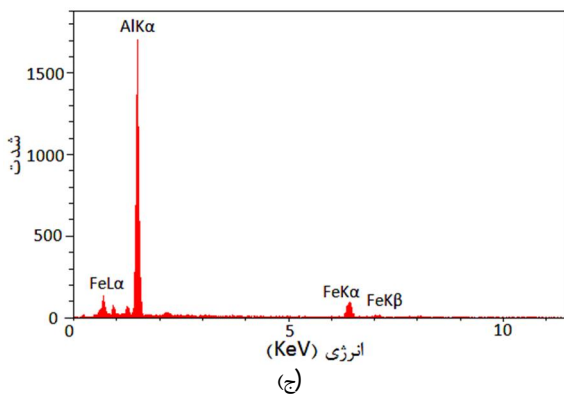
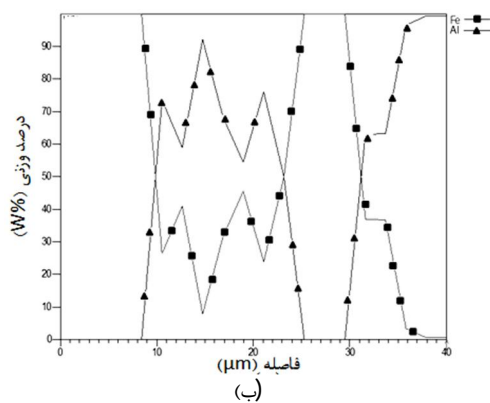
(ب)

فاز میانی

شکل 1 فصل مشترک نمونه جوش انفجاری شده (الف) فصل مشترک بالا (ب) فصل مشترک پایین

همان طور که مشاهده می شود فصل مشترک اتصال در بالا و پایین شکل موجی دارد با این تفاوت که موج های تشکیل شده در فصل مشترک بالا، دامنه و طول موج بیشتری نسبت به موج های فصل مشترک پایین دارند. این امر بدلیل تغییر شکل پلاستیک بیشتری بوده است که در فصل مشترک بالا در حین جوشکاری انفجاری ایجاد شده است [13].

در شکل 1 فازهای جدیدی در مناطق محدودی از فصل مشترک موجی مشاهده می شود. این فاز میانی یکی از مشخصه های جوشکاری انفجاری می باشد که بر اثر ایجاد حرارت موضعی و تنش برشی با نرخ بالا در فصل مشترک اتصال ایجاد می شود [14]. آنالیز توزیع انرژی پرتو ایکس¹ این فازها نشان دهنده حضور عناصر آلومینیوم و فولاد در فصل مشترک اتصال نمونه ها می باشد. با توجه به توزیع عنصری بدست آمده (68/65 درصد آلومینیوم و 31/35 درصد فولاد)، ترکیب بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک اتصال آلومینیوم/فولاد، Al_2Fe می باشد. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی، نشان دهنده شکل گیری و رشد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک آلومینیوم و فولاد با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی آنیلینگ می باشد. افزایش دما و زمان عملیات منجر به فعال شدن مکانیزم نفوذ و تشکیل ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال می شود. در صورتی که ترکیبات بین فلزی هنگام جوشکاری انفجاری تشکیل شده باشد باعث سهولت بیشتر نفوذ اتم های آلومینیوم و آهن هنگام عملیات حرارتی نمونه ها می شود. شکل 2 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز شیمیایی از فصل مشترک اتصال پس از حرارت دادن در دمای 350 سانتیگراد و به مدت 60 دقیقه را نشان می دهد. آنالیز ترکیب شیمیایی فصل مشترک در جدول 2 نشان می دهد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال رشد کرده و ضخامت آن در برخی نقاط به حدود 35 میکرومتر رسیده است. با توجه به توزیع عنصری بدست آمده (65/46 درصد آلومینیوم و 34/54 درصد فولاد)، نوع این ترکیبات Al_2Fe می باشد.



حرارتی در دمای 350 درجه سانتی‌گراد و مدت 6 ساعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما و زمان آنیلینگ، مکانیزم نفوذ فعال شده و ضخامت لایه بین فلزی به طور چشمگیری افزایش یافته است. تغییرات شدید ایجاد شده در پروفیل ترکیب شیمیایی، نشان دهنده عبور از فازهای مختلف در فصل مشترک اتصال می‌باشد. آنالیز کمی این نقاط جهت شناسایی ترکیب بین فلزی لایه‌های مختلف نشان می‌دهد ترکیبات بین فلزی فصل مشترک اتصال شامل Al_5Fe_2 و Al_2Fe می‌باشد. تغییرات استحکام نمونه‌های عملیات حرارتی شده با دما و زمان‌های متفاوت در جدول 3 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود انجام عملیات حرارتی باعث افزایش چگالی نابیایی‌ها و کاهش کار سختی ماده شده است و در نتیجه استحکام و حد تسلیم نمونه‌ها کاهش یافته است.

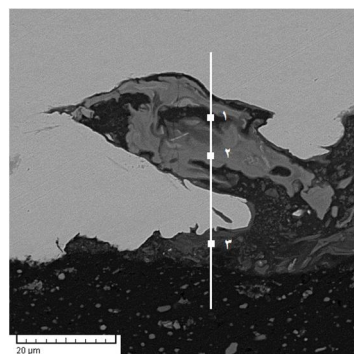
همچنین مشاهدات انجام شده توسط میکروسکوپ الکترونی و پس از تست سختی‌سنجی ویکرز، علائم ترک در فصل مشترک را پس از عملیات حرارتی نمونه در دمای 400°C و مدت زمان 60 دقیقه نشان می‌دهد. در شکل 4 این نکته قابل مشاهده می‌باشد. در واقع با افزایش دمای عملیات حرارتی، مکانیزم نفوذ فعال شده و ضخامت لایه بین فلزی به طور چشمگیری افزایش یافته است و در برخی قسمت‌ها لایه بین فلزی تشکیل یافته شامل چندین لایه از ترکیبات مختلف می‌باشد که این امر سبب ترد شدن نمونه خواهد شد.

جدول 2 آنالیز عنصری نقاط نشان داده شده در شکل 3

نوع ترکیب بین فلزی	Fe (A%)	Al (A%)	
Al_5Fe_2	26/42	73/58	نقطه 1
Al_5Fe_2	28/8	71/2	نقطه 2
Al_2Fe	32/5	67/5	نقطه 3

جدول 3 اثر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی نمونه‌ها

درصد ازدیاد کششی (درصد)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	دما و زمان عملیات حرارتی
7/5	250	بدون عملیات حرارتی
14	247	1 ساعت در دمای 300 درجه سانتی‌گراد
19	243	1 ساعت در دمای 350 درجه سانتی‌گراد
19	240	1 ساعت در دمای 400 درجه سانتی‌گراد
22	235	3 ساعت در دمای 350 درجه سانتی‌گراد
24	223	6 ساعت در دمای 350 درجه سانتی‌گراد

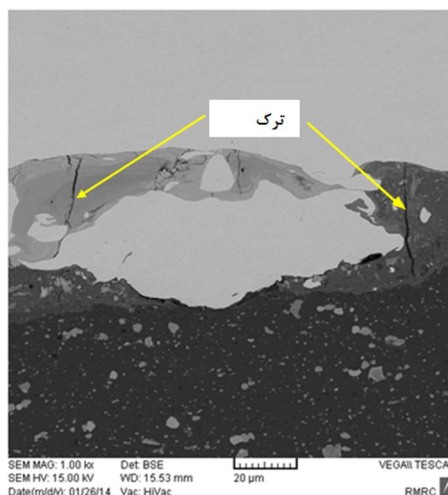


(الف)

شکل 3 فصل مشترک اتصال صفحات آلومینیوم و فولاد پس از عملیات حرارتی در دمای 350 درجه سانتی‌گراد و مدت 6 ساعت (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی (ب) آنالیز شیمیایی خطی فصل مشترک اتصال (ج) آنالیز EDS نقطه 1 نشان داده شده در شکل 3-الف (د) آنالیز EDS نقطه 2 نشان داده شده در شکل 3-الف (ه) آنالیز EDS نقطه 3 نشان داده شده در شکل 3-الف

جدول 4 متوسط تغییرات سختی لایه های مختلف با توجه به افزایش دما بر

حسب ویکرز			دما و زمان عملیات حرارتی
متوسط سختی لایه ساکن (آلومینیوم)	متوسط سختی لایه میانی (فولاد)	متوسط سختی لایه پرنده (آلومینیوم)	
76	150	74/46	بدون عملیات حرارتی
64	145	67	1 ساعت در دمای 300 درجه سانتی گراد
61	143	60	1 ساعت در دمای 350 درجه سانتی گراد
58	140	59	6 ساعت در دمای 350 درجه سانتی گراد
60	138	55	1 ساعت در دمای 400 درجه سانتی گراد



شکل 4 ترک ایجاد شده در فصل مشترک پس از انجام تست سختی سنجی نمونه‌ی عملیات حرارتی شده در دمای 400°C و مدت زمان 60 دقیقه

یکی از علل عمده افزایش سختی فصل مشترک، تاثیر شوک ناشی از موج‌های انفجار بر روی سطوح اتصال می‌باشد. طبیعی است که با اعمال عملیات حرارتی انتظار می‌رود که پیک سختی فصل مشترک از بین برود. همان‌طور که در جدول 4 آورده شده است با افزایش دمای عملیات حرارتی مقادیر سختی به علت کاهش تنش‌های موجود در فصل مشترک بالا و پایین و همچنین تبلور مجدد دانه‌ها افت کرده است. مطالعه سطوح شکست نشان می‌دهد بدلیل اینکه ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک اتصال، ماهیتی ترد و شکننده دارند تحت کشش و تغییرشکل پلاستیک، شکسته می‌شوند و جوانه‌زنی و اشاعه‌ی ترک را تسریع می‌نمایند و در نتیجه باعث کاهش انعطاف پذیری و شکست در نمونه می‌شوند.

4- نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد انجام عملیات حرارتی در دمای بالاتر از 300 درجه سانتی گراد، منجر به فعال شدن مکانیزم نفوذ در نمونه های جوش انفجاری شده و سبب تشکیل و رشد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال آلومینیوم و فولاد گردیده است به طوری که در برخی نقاط در دمای 350 درجه سانتی گراد، ضخامت این ترکیبات به حدود 35 میکرومتر رسیده است. همچنین افزایش ضخامت لایه های ترد نفوذی در عرض اتصال منجر به کاهش استحکام و شکل پذیری نمونه‌ها می‌شود. لذا به منظور کاهش کارسختی ایجاد شده در نمونه‌های جوش انفجاری، بهترین دما و زمان بهینه عملیات حرارتی، دمای 350 درجه سانتی گراد و مدت زمان یک ساعت پیشنهاد می‌شود.

5- مراجع

- [1] F. Findik, Recent Developments in Explosive Welding, *Materials and Design* 32, pp.1081-1093, 2011.
- [2] S.A.A. Akbari Mousavi, P. Farhadi Sartangi, Effect of post-weld heat treatment on the interface microstructure of explosively welded titanium-stainless steel composite, *Materials Science and Engineering A* 494, pp.329-336, 2008.
- [3] H. Danesh Manesh, A. Karimi Taheri, The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum clad steel sheet, *Materials and Design* 24, pp. 617-622, 2003.
- [4] J.H. Kim, B.K. Suh, H.C. Kwon, W.Y. Yoon, Extrusion conditions and bonding characterization of Al/Cu clad composite material fabrication by indirect extrusion, *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials* 38, pp. 474-479, 2000.

با توجه به شکل 5 و طبق استاندارد ASTM D 3165-95، شکست در نمونه مورد تست می‌بایست به واسطه برش به موازات خط جوش رخ دهد. چنانچه شکست در فلز پایه اتفاق افتد بیانگر آن است که استحکام برشی جوش بیشتر از استحکام فلز پایه می‌باشد. با انجام آزمون استحکام برشی مشخص شد که در تمام نمونه‌ها، شکست در لایه آلومینیومی اتفاق افتاده است و هیچ شکستی بدلیل جدایش نمونه‌ها از فصل مشترک اتصال رخ نداده است. این موضوع نشانگر آن است که در این نمونه‌ها، استحکام باند جوش ایجاد شده بیشتر از استحکام لایه آلومینیومی و مطابق با استاندارد می‌باشد. محققان دیگری نیز عدم جدایش از فصل مشترک اتصال در ورق‌های چندلایه پس از تست استحکام برشی را گزارش کرده‌اند. به طور مثال ممالیس و همکارانش [15] عدم جدایش از فصل مشترک مس و آلومینیوم، دورگوتلو و همکاران [16] نیز عدم جدایش از فصل مشترک فولاد ضد زنگ و مس و کهرمان و گولنج [17] عدم جدایش از فصل مشترک تیتانیوم و برنز را در تحقیقات خود گزارش کرده‌اند.

متوسط تغییرات سختی لایه های مختلف آلومینیوم/فولاد/آلومینیوم با توجه به افزایش دمای نمونه ها پس از عملیات حرارتی در جدول 4 آورده شده است.

یکی از علل عمده افزایش سختی فصل مشترک، تاثیر شوک ناشی از موج های انفجار بر روی سطوح اتصال می باشد. طبیعی است که با اعمال عملیات حرارتی انتظار می رود که پیک سختی فصل مشترک از بین برود. همان‌طور که در جدول 4 آورده شده است با افزایش دمای عملیات حرارتی مقادیر سختی به علت کاهش تنش های موجود در فصل مشترک بالا و پایین و همچنین تبلور مجدد دانه ها افت کرده است.

متوسط تغییرات سختی لایه‌های مختلف آلومینیوم/فولاد/آلومینیوم با توجه به افزایش دمای نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی در جدول 4 آورده شده است.



شکل 5 نمونه آماده شده جهت تست استحکام برشی مطابق با استاندارد ASTM-D-3165-95

- aluminium/steel structural transition joint, *Marine Structures* 10, pp.353-362, 1997.
- [12] V.S. Sedykh, Mechanical properties of explosion welded steel-aluminium joints, *Welding Production*, No.2, pp.17-18, 1985.
- [13] M. Acarer, B. Demir, An investigation of mechanical and metallurgical properties of explosive welded aluminum-dual phase steel, *Materials Letters* 62, pp.4158-4160, 2008.
- [14] S.A.A. Akbari Mousavi, P. Farhadi Sartangi, Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel, *Materials and Design* 30, pp.459-468, 2009.
- [15] A.G. Mamalis, N.M. Vaxevanidis, A. Szalay, J. Prohaszka, Fabrication of aluminium/copper bimetallics by explosive cladding and rolling, *Journal of Materials Processing Technology* 44, pp.99-117, 1994.
- [16] 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* 29, pp.1480-1484, 2008.
- [17] N. Kahraman, B. Gulenc, Microstructural and mechanical properties of Cu-Ti plates bonded through explosive welding process, *Journal of Materials Processing Technology* 169, pp.67-71, 2005.
- [5] G. H. Liaghat, S. A. Dehghan Manshadi. Manufacturing of Bimetal Tubes Made of st-37 and Phosphor-Bronze Using Explosive Welding, *Modares Mechanical Engineering* 10, No. 2, pp. 1-17, 2010. (In Persian).
- [6] J. Zamani, S. M. Bagheri, A. Mehdipour Omrani, Scarf joining of aluminum to copper plates by explosive welding process and investigation of interface properties, *Air and Space Engineering* 5, No. 3, pp. 27-39, 2009. (In Persian).
- [7] B. Gulenc, Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method, *Materials and Design* 29, pp. 275-8, 2008.
- [8] M. Honarpisheh, M. Asemabadii, M. Sedighi. Investigation of annealing treatment on the interfacial properties of explosive-welded Al/Cu/Al multilayer, *Materials and Design* 37, pp.122-127, 2012.
- [9] B. Kosec, L. Kosec, V. Petrovic, G. Kosec, M. Gojic, P. Skraba, Analysis of low-carbon steel/tantalum interface after explosive welding, *Metalurgija* 42, pp. 147-151, 2003.
- [10] R. Raghukandan, Analysis of the explosive cladding of cu-low carbon steel plates, *Journal of Materials Processing Technology* 139, pp. 573-577, 2003.
- [11] R.M. Chao and J.M. Yang, Interfacial toughness for the shipboard