مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 39-46

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تاثیر پارامترهای فاصله توقف و بار انفجاری بر خواص اتصال انفجاری مس- آلومینیوم-مس

یاسر خرسندی[1]، محمدرضا خانزاده قره شیران[2*]، عباس سعادت[2]

1- دانشجو، مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد

2- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرمجلسی، اصفهان

*شهرمجلسی، صندوق پستی 8631656451، m.khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 06 مهر 1395

پذیرش: 26 آذر 1395

ارائه در سایت: 15 دی 1395

کلید واژگان:

جوش‌کاری انفجاری

بار انفجاری

فاصله توقف

استحکام کششی-برشی

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی تاثیر متغیرهای فاصله توقف و بار انفجاری بر خواص مکانیکی و متالوژیکی فصل مشترک‌های اتصال انفجاری سه لایه مس- آلومینیوم- مس بوده است. برای نشان دادن تاثیر این دو پارامتر، نمونه‌ها با فواصل توقف و بارهای انفجاری متفاوت جوش‌کاری شدند. بررسی‌های آزمایشگاهی با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون‌های ریز سختی‌سنجی و استحکام کششی- برشی انجام گرفته است. نتایج بیانگر ایجاد پیوند با خواص مکانیکی و متالوژیکی مناسب بین ورق‌های مس-آلومینیوم- مس بوده است. تصاویر میکروسکوپی، فصل مشترک‌های شبه موجی نامتقارن به همراه ترک و حفره را نشان داده که با افزایش بار انفجاری بر میزان مناطق ذوب موضعی در فصل مشترک‌ها افزوده شده است. آنالیز عنصری وجود ترکیبات بین فلزی سخت و شکننده در فصل مشترک را تایید نموده که موجب ایجاد ترک در این نواحی–شده است. همچنین طول امواج با افزایش بار انفجاری افزایش یافته است. سختی در مجاورت فصل مشترک‌ها در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید ناشی از برخورد افزایش یافته که با افزایش بار انفجاری میزان آن بیشتر شده است. نتایج آزمایش کشش-برشی نیز کاهش استحکام اتصال در اثر افزایش بار انفجاری را نشان داده است.

Effect of stand-off distance and the explosive ratio parameters on the properties explosively bonded copper-aluminum-copper

Yaser Khorsandi[1], Mohammad Reza Khanzadeh Gharah Shiran[2*], Abbas Saadat[2]

1- Department of Materials Engineering, Islamic Azad University of NajafAbad Branch, NajafAbad, Iran
2- Department of Materials Engineering, Islamic Azad University of Majlesi Branch, Isfahan, Iran
*P.O.B. 8631656451, Majlesi, Iran, m.khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 27 September 2016
Accepted 16 December 2016
Available Online 04 January 2017

Keywords:
Explosive welding
Explosive ratio
Stand-off distance
Tensile- shear strength

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the influence of stand-off distance and the explosive ratio parameters on metallurgical and mechanical properties of three-layers explosively bonded copper-aluminum-copper interface. To illustrate the effects of these two parameters, samples were welded with different stand-off distances and explosive ratios. Optical microscopy, scanning electron microscopy, microhardness and tensile-shear strength tests were carried out on the samples. The results indicate a suitable joint with proper metallurgical and mechanical properties in copper-aluminum-copper plates. Microscopic images showed the semi unsymmetrical wavy interface with cracks and voids, also by increasing the explosive ratio, locally melted zones were increased at the interfaces. Elemental analysis confirmed the brittle intermetallic compounds at the interface that produce cracks in these areas. Also, the wavelength increased with increasing explosive ratio. Hardness increased near the interfaces due to the severe plastic deformation and increased with increasing the explosive ratio. Tensile-shear test results showed the decrease in bond strength caused by increasing the explosive ratio.

1- مقدمه

مس و آلومینیوم به جهت هدایت حرارتی و الکتریکی و مقاومت به خوردگی عالی شناخته می‌شوند. اگر چه در برخی از خواص فیزیکی با یکدیگر تفاوت دارند؛ به‌طور مثال چگالی مس تقریبا سه برابر چگالی آلومینیوم و دمای ذوب آلومینیوم در حدود 60 درصد کمتر از دمای ذوب مس است [1]. در صنعت جوش‌کاری این آلیاژها کاربرد وسیعی در صنایع الکتریکی و الکترونیکی دارد [2]. با وجود امکان جوش‌کاری آلیاژهای مس-آلومینیوم توسط فرایندهای جوش‌کاری ذوبی از قبیل جوش‌کاری قوسی تنگستن– گاز یا جوش‌کاری قوسی فلز – گاز، به دلیل اختلاف دمای ذوب جوش‌کاری این دو آلیاژ مشکل است. به همین دلیل فرایندهای جوش‌کاری حالت جامد مانند جوش‌کاری اصطکاکی، جوش‌کاری فراصوتی (التراسونیک) و جوش‌کاری انفجاری، روش‌های مناسبی جهت برقراری این اتصالات می‌باشند. دو فرایند جوش‌کاری اصطکاکی و فراصوتی مناسب جهت اتصال صفحات با ابعاد و اندازه کوچک یا متوسط بوده و از جوش‌کاری انفجاری جهت اتصال قطعات در ابعاد بزرگ‌تر استفاده می شود [3-5].

جوش‌کاری انفجاری یک روش اتصال فلزات همجنس و غیرهمجنس به

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
Y. Khorsandi, M. R. Khanzadeh Gharah Shiran, A. Saadat, Effect of stand-off distance and the explosive ratio parameters on the properties explosively bonded copper-aluminum-copper, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 39-46, 2017 (in Persian)

یکدیگر در حالت جامد بوده 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 اشتراک‌گذاری الکترون‌ها یک باند با پیوند متالورژیکی بین اجزا جوش‌شونده ایجاد می‌گردد. در اثر فشار برخوردی بالا یک جت با سرعت بالا از دو سطح اتصال تشکیل می‌گردد 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 است [6].

ایجاد اتصال مناسب توسط این فرآیند با توجه به محدودیت کنترل انفجار بستگی به انتخاب دقیق متغیرهای فرآیند دارد. این متغیرها شامل آماده‌سازی سطحی، فاصله توقف (S)، بار انفجاری (R)، زاویه توقف اولیه (α)، زاویه دینامیکی برخورد (β)، سرعت صفحه پرنده (V_p)، سرعت انفجار (V_d) و سرعت حرکت نقطه برخورد (V_c) می‌باشند [7].

آرایش هندسی اولیه برای جوش‌کاری انفجاری سه لایه به طور شماتیک در "شکل 1" نشان داده شده است. با انفجار مواد منفجره، صفحه پرنده شتاب گرفته و با سرعت به صفحه واسط برخورد نموده و لایه اول اتصال را بوجود می‌آورد. در اثر این برخورد صفحه پرنده بخشی از انرژی جنبشی خود را جهت تغییر شکل پلاستیک با صفحه واسط و ایجاد فصل مشترک اولیه مصرف نموده و در ادامه با سرعت کاهش یافته همراه با فصل مشترک تشکیل شده اولیه به صفحه پایه برخورد نموده و فصل مشترک نهایی را ایجاد می‌نماید [8].

براساس نظر هوکاموتو زاویه β_1 مابین صفحه پرنده و صفحه واسط برحسب بار انفجاری r و δ ضخامت لایه ماده منفجره به‌صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\beta_1 = \frac{\left(\sqrt{\frac{k+1}{k-1}} - 1\right)\pi}{2} \frac{r}{r + 2.71 + 0.184\delta / s_1} \quad (1)$$

در رابطه فوق S_1 فاصله توقف مابین صفحه پرنده و لایه واسط است. پارامتر k در بازه 1.96 تا 2.6 تابع ضخامت ماده منفجره می‌باشد. سرعت صفحه پرنده و زاویه برخورد با افزایش تعداد لایه‌ها کاهش می‌یابد. سرعت برخورد صفحه پرنده تابع سرعت حرکت نقطه برخورد V_c بوده که با رابطه

$$\sin\frac{1}{2}(\beta - \alpha) = \frac{V_p}{2V_c} \quad (2)$$

محاسبه می‌شود.

پس از برخورد دوم زاویه برخورد کاهش یافته و زاویه β_2 حاصله بین فصل مشترک اول و صفحه پایه از رابطه زیر حاصل می‌شود:

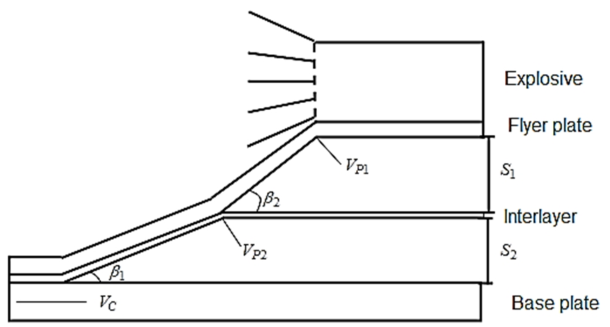


Fig.1 Geometrical configuration of a three-layer explosion welding.

شکل 1 پیکربندی هندسی اولیه جوش‌کاری انفجاری سه لایه.

$$\mathrm{tg}\beta_2 = \sin\beta_1\left(1 + \frac{t_i\rho_i}{t_f\rho_f} - 2\sin^2\left(\frac{\beta_1}{2}\right)\right)^{-1} \quad (3)$$

که در رابطه فوق t , ρ نمایانگر چگالی و ضخامت بوده و اندیس‌های i , f نمایانگر صفحه پرنده و واسط است [9]. انرژی جنبشی مصرفی ناشی از برخورد درحالت دوجزیی یعنی برخورد صفحه پرنده به صفحه واسط از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta KE = \frac{m_D m_c V_p^2}{2(m_D + m_c)} \quad (4)$$

که در این رابطه m_D و m_C جرم صفحات پرنده و پایه در واحد سطح می‌باشند. طبق رابطه فوق میزان کاهش انرژی جنبشی در هر فصل مشترک به جرم صفحات برخورد کننده و سرعت صفحه پرنده وابسته است [10]. با معرفی صفحه واسط در فصل مشترک نهایی مقدار این انرژی تغییر نموده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta KE = \frac{m_f\, m_i\, v_p{}^2}{2(m_f + m_i)} + \frac{M\, m_b v_{p1}^2}{2(M + m_b)} \quad (5)$$

اندیس‌های b, f, i نمایانگر صفحه پایه، صفحه پرنده و واسط می‌باشند و m نمایانگر جرم در واحد سطح آن‌ها است. M نمایانگر جمع جرمی صفحات واسط و پرنده بوده و سرعت پس از اولین برخورد می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود:

$$v_{p1} = \frac{m_f v_p}{m_f + m_i} \quad (6)$$

که V_p سرعت اولیه صفحه پرنده در برخورد اول می‌باشد.

ساراونا و همکاران پژوهشی در مورد تأثیر استفاده از لایه میانی در روکش‌کاری انفجاری انجام دادند که مشخص شد لایه میانی با اتلاف انرژی جنبشی آزاد شده ناشی از انفجار مواد منفجره، خواص مکانیکی جوش، به ویژه در خصوص عدم تشکیل مواد بین فلزی شکننده در لایه میانی، بهبود قابل توجهی داشته که البته لایه میانی هنگامی که مواد منفجره با سرعت و بار انفجاری بالاتری به‌کار گرفته شود کارآیی مناسب‌تری داشته است [11]. نتایج پژوهش اکبری موسوی و همکاران در مورد فاصله توقف ورق‌ها نسبت به یکدیگر در اتصال سه لایه آلومینیوم 5038، آلومینیوم 1250 و فولاد دریایی حاکی از تغییر شکل فصل مشترک از حالت صاف به حالت موجی شکل و ایجاد مناطق مذاب و تشکیل ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک جوش در اثر افزایش فاصله توقف و بار انفجاری بوده است [12]. گولنج تاثیر تغییرات بار انفجاری بر اتصال مس-آلومینیوم را بررسی نموده است. شکل فصل مشترک اتصال با افزایش این متغیر از حالت مسطح به حالت موجی با افزایش دامنه و طول امواج فصل مشترک تغییر یافته و سختی در مجاورت فصل مشترک و سطوح خارجی صفحات در اثر برخورد افزایش یافته است. آزمون خمش سه نقطه‌ای در هر دو حالت قرارگیری آلومینیوم و مس در سطح داخلی، هیچ جدایشی در اتصالات را نشان نداده است [13]. تحقیق زمانی و همکاران در زمینه اتصال گوه‌ای فلزات آلومینیوم و مس به وسیله جوش‌کاری انفجاری نیز حاکی از تغییر فصل مشترک به حالت مواج در اثر افزایش بارگذاری انفجاری و افزایش سختی اطراف فصل مشترک اتصال به‌دلیل تاثیرات موج شوکی و کار سرد ایجاد شده ناشی از برخورد بوده است [14]. زمانی و همکاران با بررسی جوش‌کاری انفجاری لوله‌های هم محور فولاد زنگ‌نزن و فولاد کربنی بیان نمودند که با افزایش بار انفجاری، فصل مشترک اتصال از حالت صاف به موجی شکل تغییر کرده و دامنه و طول امواج نیز افزایش یافته است [15]. لیاقت و همکاران با بررسی ساخت لوله‌های دوجداره فولاد و آلیاژ فسفر-برنز به روش جوش‌کاری انفجاری به این

نتیجه رسیدند که استفاده از ماده منفجره با سرعت انفجار بالاتر از سرعت صوت در دو فلز، باعث ایجاد جدایش در برخی نقاط فصل مشترک شده و با افزایش مقدار ماده منفجره فصل مشترک از حالت صاف به موجی شکل تغییر نموده است [16]. طباطبایی قمی و همکاران با بررسی تعمیر نشتی لوله‌های کم‌فشار نفت و گاز توسط فرآیند جوش‌کاری انفجاری به این نتیجه رسیده‌اند که نشتی کوچک لوله‌های کم فشارحاوی مایع با روش جوش‌کاری انفجاری با استفاده از چاشنی و بدون مواد منفجره قابل تعمیر است [17]. حسینی‌اطهر و همکاران در بررسی اتصال سه جزیی انفجاری آلومینیوم-مس-آلومینیوم در دو مرحله مشاهده کردند که فصل مشترک اتصال در بار انفجاری کم، مسطح بوده و با افزایش بار انفجاری، فصل مشترک موجی شکل گردیده و ریز سختی در مجاورت فصل مشترک افزایش یافته است. آزمایش کشش-برش نیز حاکی از افزایش اندک استحکام در اثر افزایش بار انفجاری و سرعت برخورد بوده، اما با افزایش بار انفجاری استحکام برشی اتصال کاهش یافته است [7]. هوکاموتو اتصال سه لایه آلیاژ آلومینیوم 5083 به فولاد زنگ نزن 304 را با صفحه واسطی از جنس فولاد زنگ‌نزن 304 بررسی نموده است. فصل مشترک حاصل با صفحه واسط فولاد زنگ‌نزن در دو سمت موجی شکل گزارش شده و فصل مشترکی حاوی آلومینیوم و فازهای بین فلزی Fe_2Al_5 , Fe_4Al_{13} گزارش شده است [18].

در این پژوهش تاثیر متغیرهای بار انفجاری و فاصله توقف بر ریز ساختار متالورژیکی و خواص مکانیکی فصل مشترک اتصالات ورق‌های مس-آلومینیوم- مس بررسی شده است.

2- فرآیند آزمایش

در این پژوهش ورق‌های مس 10200 به عنوان صفحات پرنده و پایه و ورق آلومینیوم 1050به عنوان صفحه واسط را انتخاب شدند. ورق مس در دو ضخامت 2mm و 5mm استفاده شده و برای هر ضخامت فرآیند اتصال جداگانه‌ای صورت گرفت. ابعاد صفحات بصورت زیر می‌باشد:

1- صفحه پرنده و پایه مس به ابعاد $190 \times 90 \times 2mm^3$

2- صفحه پرنده و پایه مس به ابعاد $190 \times 90 \times 5mm^3$

3- صفحه واسط آلومینیوم به ابعاد $190 \times 90 \times 4mm^3$

نحوه قرار گیری نمونه‌ها به‌صورت سیستم آرایش موازی مطابق "شکل 2" بر روی زمین با بستری از شن نرم به‌عنوان لایه بافر و واسط نشان داده شده است. معمولا فاصله توقف را می‌توان بین نیم تا یک برابر ضخامت صفحه پرنده در نظر گرفت تا صفحه پرنده به سرعت و شتاب مناسب جهت برخورد موردنیاز برسد. متغیرهای سرعت صفحه پرنده و سرعت برخورد باید کمتر از کران سرعت حرکت صوت در فلزات مورد جوش‌کاری باشند، بنابراین در جوش‌کاری انفجاری نمی‌توان از اکثر مواد منفجره با سرعت بالا استفاده نمود چرا که ضربه فشاری شدید ناشی از انفجار این مواد باعث ایجاد تنش کششی و تغییر شکل دینامیکی شدید در صفحه پرنده شده و همچنین سرعت برخورد صفحه پرنده و فشار حاصل از آن در نقطه برخورد، می‌تواند باعث شکست اتصال و یا حتی متلاشی شدن صفحه پرنده شود. بنابراین از ماده منفجره آماتول 95.5 با ترکی‌تری نیترو تولوئن، 5 درصد و 95 درصد نیترات آمونیوم با دانه بندی 200 میکرون استفاده شد که سرعت انفجار آن 2504 m/s و کمتر از سرعت اشاعه صوت در فلزات جوش شونده بود. سرعت انفجار توسط سیستم فیبر نوری مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. جهت آغازگری انفجار از چاشنی *M*8 استفاده شده است. خواص مواد و شرایط جوش‌کاری به ترتیب در جداول 1 و 2 بیان شده است [1].

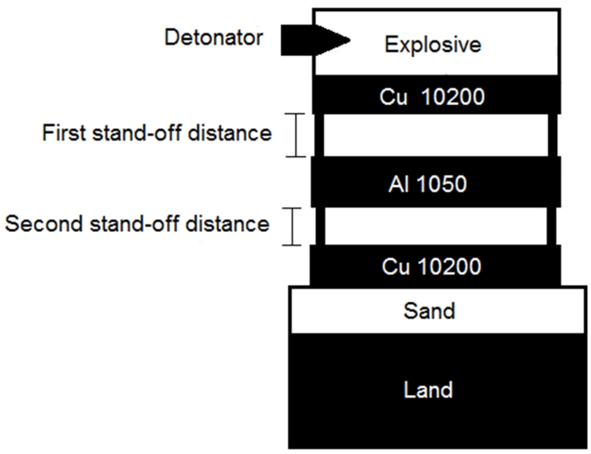


Fig. 2 Setup of explosive welding tests

شکل 2 تنظیم آزمون‌های جوش‌کاری انفجاری

جدول 1 خواص فیزیکی و مکانیکی فلزات مورد استفاده [1]

Table 1 Physical and mechanical properties of used metals [1]

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی		Cu-10200	Al-1050
چگالی	gcm^{-3}	8.96	2.705
نقطه ذوب	°K	1358	933
استحکام تسلیم	MPa	163	90
سختی ویکرز	HV	74	30
مدول یانگ	GPa	115	69
ظرفیت گرمایی ویژه	$Jg^{-1}k^{-1}$	386	900
هدایت حرارتی	$Wm^{-1}k^{-1}$	400	237
سرعت صوت	ms^{-1}	6400	4700

جدول 2 متغیرهای جوش‌های انجام شده.

Table 2 Welding Parameters.

شماره نمونه	ضخامت ماده منفجره (mm)	بار انفجاری	فاصله توقف مابین صفحه پرنده و صفحه واسط (mm)	فاصله توقف مابین صفحه واسط و صفحه پایه (mm)
1	60	2.8	3	2
2	80	3.8	3	2
3	60	2.8	2	2
4	80	3.8	2	2

پس از جوش‌کاری جهت مطالعات میکروسکوپی نمونه‌ها به ابعاد2cm×2cm از مناطق مورد تایید جوش‌کاری شده در آزمون غیرمخرب التراسونیک به‌وسیله دستگاه وایرکات تهیه شدند. سپس با استفاده از کاغذ سنباده‌های 60، 120، 320، 600، 1000، 1200 سنباده‌زنی و توسط خمیر الماسه پولیش گردیدند. جهت اچ نمودن سمت مس از محلول با ترکیب شیمیایی $100(ml)HNO_3+100(ml)H_2O$ استفاده شده است. از هر دو وجه آماده‌سازی شده نمونه‌ها در قسمت فصل مشترک‌های مس-آلومینیوم و آلومینیوم-مس در بزرگنمایی‌های مختلف به‌وسیله میکروسکوپ نوری مدل پروگرس تصویربرداری انجام گرفته و هر یک از فصل مشترک‌های مذکور از نظر نوع موجی و یا صاف بودن و ترک‌های اطراف فصل مشترک‌ها مورد بررسی و تصویربرداری قرار گرفتند. از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل وگا تسکن ایکس ام یو مجهز به سیستم آنالیز EDS، جهت مقایسه و تصویربرداری دقیق-

تر از مناطق بین‌فلزی و نیز تصویر برداری از ترک‌ها و حفرات استفاده شده است. آزمون ریزسختی سنجی نیز بر طبق استاندارد ASTM E384-11 به روش سختی‌سنجی ویکرز با اعمال بار یک کیلوگرم به مدت زمان 9 s اندازه‌گیری شد. استحکام کششی برشی جوش‌های انجام شده بر طبق استاندارد DIN 50162 و با استفاده از دستگاه با مدل گوتس بر روی قطعات با ابعاد 65mm × 25mm که در "شکل 3" نشان داده شده است، صورت پذیرفت. نحوه انجام آزمایش استحکام برشی بدین صورت بود که پس از استقرار نمونه بر روی فک دستگاه، فک بالایی با سرعت 1mm/min به نمونه اعمال نیرو نموده و حداکثر نیروی شکست اتصال برحسب نیوتن بدست آمد، سپس میزان تنش شکست براساس تقسیم نیروی حداکثر شکست بر مساحت زائده تعیین گردید.

3- نتایج و بحث

برای نمونه‌های 1 و 2 با ضخامت صفحات پرنده وپایه 5mm که به ترتیب با بارهای انفجاری 2.8 و 3.8 جوش‌کاری شدند، اتصال برقرار نشد. با توجه به روابط (4) و (5) این‌گونه می‌توان بیان کرد که انرژی جنبشی لازم جهت برقراری اتصال به جرم صفحات برخورد کننده و سرعت صفحه پرنده بستگی دارد که ضخامت بالای صفحه پرنده و فاصله توقف کم موجب کاهش سرعت برخورد شده و در نتیجه انرژی جنبشی لازم جهت ایجاد اتصال فراهم نشده است. همچنین محدوده جوش‌پذیری در جوش‌کاری انفجاری با افزایش ضخامت ورق‌ها کوچک می شود.

نمونه‌های مس با ضخامت 2mm برای آزمون شماره 3 با بار انفجاری 2.8 و فواصل توقف 2mm جوش‌کاری شد. تصاویر متالوگرافی نشان‌دهنده فصل مشترک‌های شبه موجی با توزیع بی قاعده مناطق ذوب موضعی است (شکل 4). سرعت بالای صفحه پرنده منجر به اعمال فشارهای خیلی زیاد نزدیک نقطه برخورد می‌شود. این فشارها از استحکام تسلیم هر دو فلز تجاوز کرده و موجب تغییر شکل پلاستیک شدید نزدیک نقطه برخورد می‌گردد و جریانی شبیه سیال برای فلزات در محل اتصال رخ می‌دهد. فشار بالا و جریان سیال مانند باعث ایجاد برآمدگی موضعی در جلوی نقطه برخورد می‌شوند که بیانگر مکانیزم دندانه‌زنی جت جهت ایجاد فصل مشترک موجی شکل است. حسینی‌اطهر و همکاران نیز در بررسی جوش‌کاری انفجاری سه لایه آلومینیوم- مس- آلومینیوم تشکیل فصل مشترک‌هایی با این مکانیزم را تایید کردند [7]. خواص فیزیکی متفاوت مس و آلومینیوم به خصوص چگالی و دمای ذوب و سرعت اشاعه موج در دو فلز، باعث ایجاد فصل مشترک‌های شبه موج نامتقارن شده است. تغییر شکل پلاستیک در هر دو صفحه پرنده و پایه مس به‌دلیل برخورد صفحات و فشار بالای فصل مشترک‌ها براساس مکانیزم دوقلویی شدن می‌باشد که در "شکل 4" قابل مشاهده است. میانگین دامنه امواج در فصل مشترک مس پرنده- آلومینیوم بیشتر از فصل مشترک آلومینیوم-مس پایه است (جدول 3). این تفاوت دامنه امواج به دلیل کاهش انرژی جنبشی ثانویه و زاویه برخورد دوم به‌دلیل تشکیل فصل مشترک مس پرنده- آلومینیوم بود که به‌ترتیب با استفاده از فرمول‌های (5) و (3) قابل توصیف است.

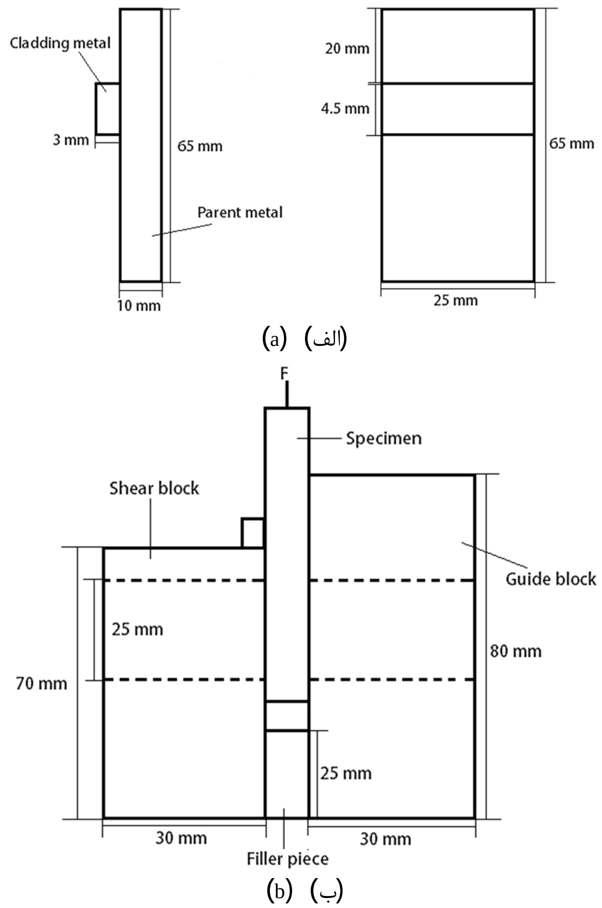


Fig. 3 Tensile-shear strength test method and sample according to DIN 50162 standard a) The test sample b) Fixture and test method.

شکل 3 روش و نمونه آزمون استحکام کششی- برشی اتصال براساس استاندارد 50162DIN الف) نمونه آزمون ب) قید و بند و نحوه آزمون.

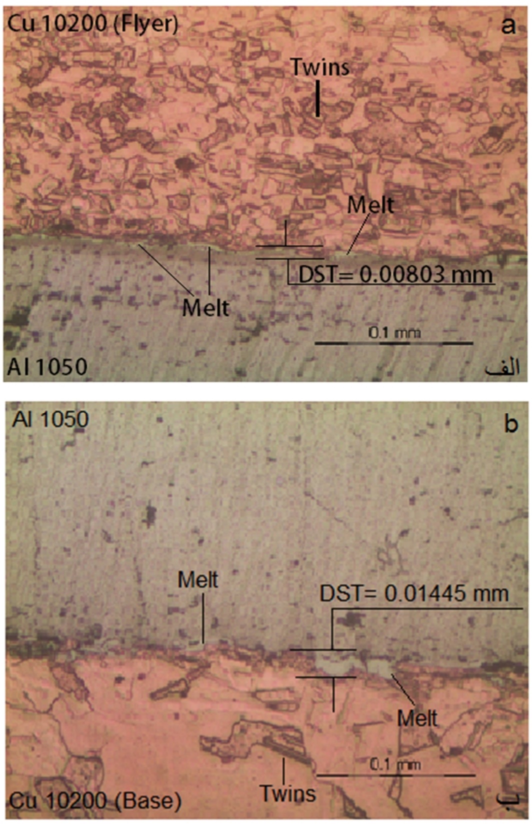


Fig .4 Metallographic test picture of sample No.3: a) The interface of flyer copper - aluminum b) The interface of aluminum - base copper

شکل 4 تصاویر متالوگرافی نمونه شماره 3 الف) فصل مشترک مس پرنده- آلومینیوم ب) فصل مشترک آلومینیوم- مس پایه.

آزمون شماره 4 نیز با صفحات مس به ضخامت 2mm، بار انفجاری 3.8 و فواصل توقف 2mm انجام شد. افزایش بار انفجاری موجب افزایش انرژی جنبشی می‌گردد که این انرژی جنبشی در فصل مشترک به حرارت تبدیل شده و گرمای بیشتری در فصل مشترک حاصل می‌شود. این افزایش گرما منجر به افزایش اندازه مناطق ذوب موضعی در فصل مشترک شده است. لوریر و همکاران نیز در پژوهش جوش‌کاری انفجاری مس-آلومینیوم، افزایش اندازه مناطق ذوب موضعی در اثر افزایش بار انفجاری را بیان کردند [14]. با افزایش بار انفجاری و در نتیجه افزایش انرژی جنبشی، شدت برخورد صفحات به یکدیگر بیشتر شد و در نتیجه تنش در مجاورت نقطه برخورد افزایش یافت و در مواد نزدیک فصل مشترک تغییر شکل شدیدی اتفاق افتاده است. بنابراین لایه سطحی ورق‌ها استحکام خود را از دست دادند و بسوی حالت سیال مانند دگرگون شدند و در تشکیل جت دخالت کردند. پس جت شامل لایه‌های نازکی از سطوح صفحات است که در گردابه‌ها به دام می‌افتد و منجر به تشکیل فاز بین فلزی می‌گردد. تشکیل این ترکیبات بین فلزی ترد با سختی بالا و از سوی دیگر تنش‌های پسماند ناشی از برخورد و تغییر شکل پلاستیک شدید فصل مشترک و از سوی دیگر عدم تطابق انبساط حرارتی آلومینیوم و مس که خود منجر به پیک‌های تنش موضعی می‌گردد بر تشکیل ترک‌ها در فصل مشترک‌ها موثر است (شکل 5). در این آزمون نیز بر طبق فرمول (6) سرعت پس از برخورد اول کاهش یافت که در نتیجه کاهش انرژی جنبشی ثانویه را در پی داشت (فرمول (5)). بنابراین میانگین دامنه امواج فصل مشترک مس پرنده-آلومینیوم بیشتر از میانگین دامنه امواج فصل مشترک آلومینیوم- مس پایه است. در کل با افزایش بار انفجاری میانگین امواج و مناطق ذوب موضعی افزایش یافته است.

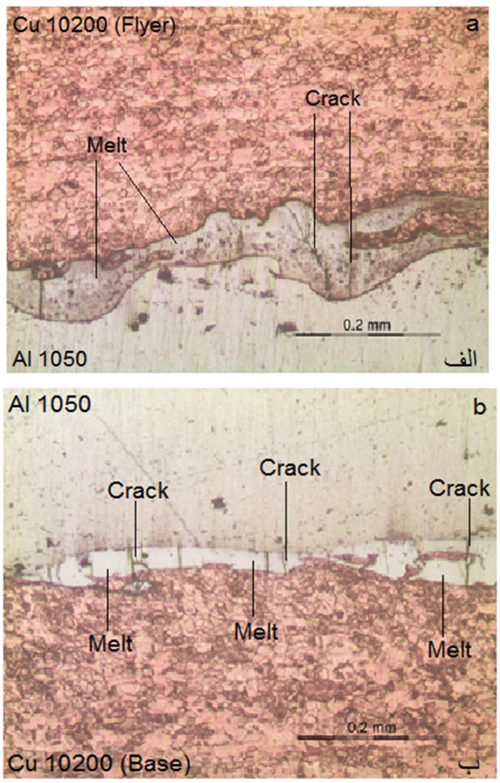


Fig .5 Metallographic test picture of sample No.4: a) The interface of flyer copper - aluminum b) The interface of aluminum - base copper

شکل 5 تصاویر متالوگرافی نمونه شماره 4 الف) فصل مشترک مس پرنده- آلومینیوم ب) فصل مشترک آلومینیوم- مس پایه

جدول 3 تغییرات دامنه موج در فصل مشترک‌های نمونه‌های 3 و 4

Table 3 wave amplitude variations at the interface of samples No.3 and No.4

شماره آزمون	فصل مشترک	میانگین دامنه موج (mm)
3	مس پرنده – آلومینیوم (بالا)	0.012
3	آلومینیوم – مس پایه (پایین)	0.010
4	مس پرنده – آلومینیوم (بالا)	0.044
4	آلومینیوم – مس پایه (پایین)	0.040

جت جهنده شامل لایه‌های نازکی از سطوح صفحات بوده و با تشکیل گردابه و گیر افتادن گردابه در مجاورت امواج دما افزایش یافته و باعث تغییر فاز و تشکیل ذوب موضعی گردیده که در "شکل‌های 6 و 7" مربوط به تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های شماره 3 و 4 نشان داده شده است. نتایج آنالیز عنصری (EDS) مناطق ذوب موضعی و استفاده از نمودار فازی مس–آلومینیوم، تشکیل ترکیب بین فلزی $CuAl_2$ را در فصل مشترک بالا (بین مس پرنده و آلومینیوم) و فاز بین فلزی $Al/CuAl_2$ را در فصل مشترک پایین (بین آلومینیوم و مس پایه) هر دو نمونه 3 و 4 تایید می‌کند که می‌توان نتیجه گرفت با افزایش بار انفجاری تغییری در ترکیب فاز بین فلزی ایجاد نمی‌گردد. حسینی اطهر و همکاران نیز توضیح دادند که با افزایش بار انفجاری فاز بین فلزی افزایش می‌یابد اما ترکیب آن بدون تغییر باقی می‌ماند [11]. جدول 4 ترکیب شیمیایی و فازهای تشکیل شده در نقاط مناطق ذوب موضعی مشخص شده در "شکل‌های 6 و 7" را بیان کرده است. نمودارهای نقاط P1 و P2 که شامل پیک‌های مس و آلومینیوم می باشد در "شکل 8" نشان داده شده است. همچنین در مناطق ذوب موضعی فصل مشترک نمونه 4 در "شکل 7a" حفره مشاهده می‌شود که در نتیجه انجماد سریع و حرکت دایره ای مذاب و حبس گازها است.

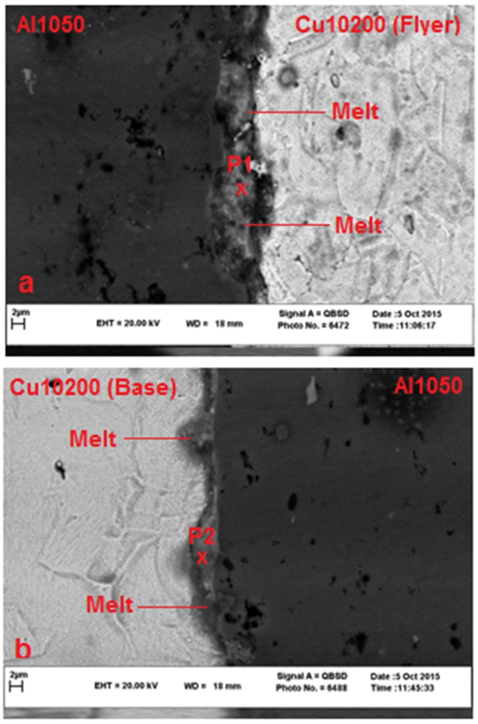


Fig. 6 SEM picture of sample No.3: a) The interface of flyer copper - aluminum b) The interface of aluminum - base copper

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه شماره 3 الف) فصل مشترک مس پرنده – آلومینیوم ب) فصل مشترک آلومینیوم- مس پایه

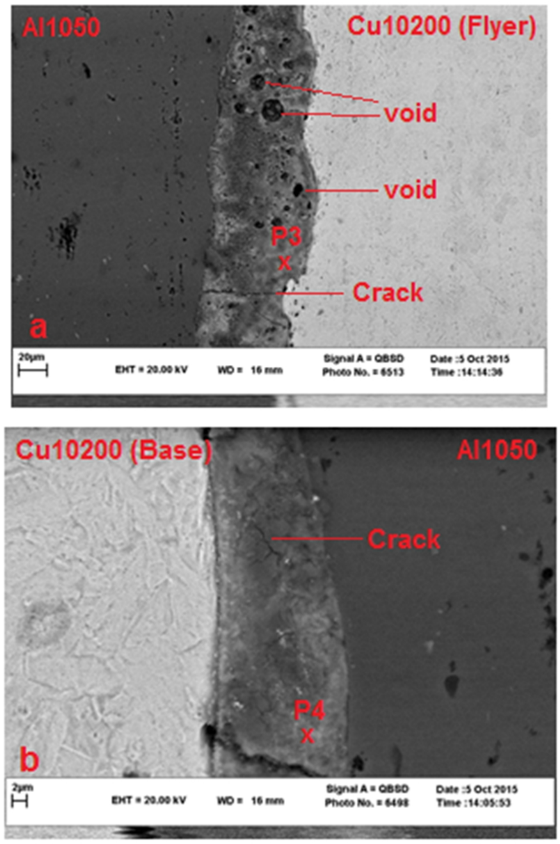


Fig. 7 SEM picture of sample No.4: a) The interface of flyer copper - aluminum b) The interface of aluminum- base copper

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه شماره 4 الف) فصل مشترک مس پرنده – آلومینیوم ب) فصل مشترک آلومینیوم- مس پایه

جدول 4 نتایج آنالیز EDS از فصل مشترک‌های نمونه‌های 3 و 4

Table 4 The results of EDS analysis of the samples No.3 and No.4. Interfaces

شماره آزمون	فصل مشترک	مناطق آنالیز EDS	ترکیب شیمیایی Al (at %)	ترکیب شیمیایی Cu (at %)	فازهای مس-آلومینیوم
سه	مس پرنده – آلومینیوم (بالا)	P1	70.93	29.07	$CuAl_2$
	آلومینیوم – مس پایه (پایین)	P2	81.39	18.61	$Al/CuAl_2$
چهار	مس پرنده – آلومینیوم (بالا)	P3	67.73	32.27	$CuAl_2$
	آلومینیوم – مس پایه (پایین)	P4	84.47	15.53	$Al/CuAl_2$

"شکل‌های 9 و 10" مقادیر ریزسختی در مجاورت فصل مشترک‌ها را نشان می‌دهند. به عنوان مثال در بار انفجاری 2.8 مقدار سختی صفحه پرنده مس و صفحه واسط آلومینیوم به ترتیب از مقدار اولیه $74HV$ و $30HV$ به مقدار $101HV$ و $58HV$ در مجاورت فصل مشترک افزایش یافته و با زیاد شدن فاصله از فصل مشترک میزان سختی برای صفحه مس پرنده به $95HV$ و سپس $90HV$ و برای صفحه واسط آلومینیوم به $53HV$ و $49HV$ کاهش می-یابد. چنین شرایطی برای فصل مشترک پایین (آلومینیوم– مس پایه) این

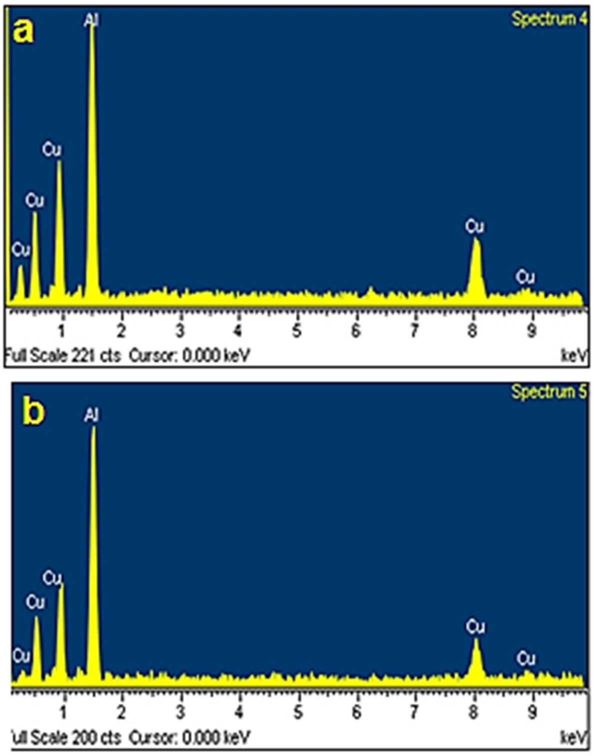
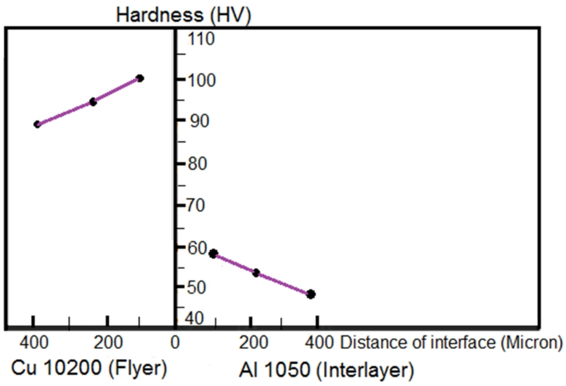


Fig. 8 Result of EDS analysis of locally melted zone of sample No.3: a) P1 point b) P2 point

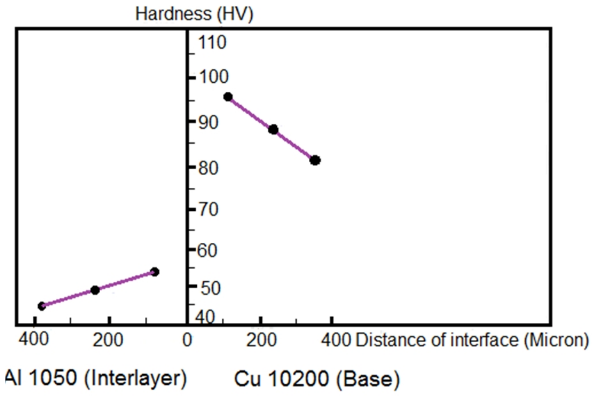
شکل 8 نتایج آنالیز EDS از منطقه ذوب موضعی نمونه شماره 3 الف) نقطه P1 ب) نقطه P2

آزمون و همچنین فصل مشترک‌های بالا و پایین آزمون شماره 4 (R=3.8) نیز برقرار است. البته میزان سختی در فصل مشترک بالای هر دو آزمون نسبت به فصل مشترک پایین آزمون‌ها بیشتر می باشد. این تفاوت در سختی به دلیل سرعت برخورد بیشتر صفحه مس پرنده با آلومینیوم در مقایسه با سرعت برخورد آلومینیوم با صفحه مس پایه می‌باشد. همچنین مقدار سختی به‌دست آمده برای مس و آلومینیوم در فصل مشترک‌های بالا و پایین نمونه شماره 4 بیشتر از نمونه شماره 3 می‌باشد که حاکی از رابطه مستقیم افزایش سختی با بار انفجاری است. تشکیل ترکیبات سخت بین فلزی و تغییر شکل پلاستیک شدید در مجاورت فصل مشترک و نیز کارسختی در اثر جریان برخورد هنگام جوش‌کاری موجب افزایش سختی می‌شوند. زمانی و همکاران نیز توضیحاتی مشابه جهت افزایش سختی بیان کردند [13].

آزمون استحکام برشی نمونه شماره 3 (R=2.8) برای فصل مشترک بالا بین مس پرنده و آلومینیوم نشان دهنده مقدار 157MPa و برای فصل مشترک آلومینیوم-مس پایه بیانگر 154MPa می‌باشد. این مقادیر بالای استحکام به دلیل فصل مشترک موجی شکل است. حالت موجی شکل بیانگر ایجاد قفل مکانیکی در فصل مشترک صفحات می‌باشد. تغییر شکل پلاستیک حاصل از انفجار نیز موجب افزایش استحکام فصل مشترک‌ها می‌گردد. اختلاف ناچیز بین استحکام برشی فصل مشترک بالا و پایین ناشی از کاهش انرژی جنبشی برخوردی می‌باشد. در آزمون 4 با افزایش بار انفجاری (R=3.8) فصل مشترک مس پرنده-آلومینیوم قبل از انجام کامل فرآیند آزمون دچار شکست گردید، بنابراین عددی برای آن ثبت نشد و برای فصل مشترک آلومینیوم-مس پایه عدد 67MPa محاسبه گردید. بنابراین افزایش بار انفجاری موجب ایجاد حفره و افزایش اندازه مناطق ذوب موضعی و فاز بین فلزی



(a) (الف)



(b) (ب)

Fig. 9 Hardness profile of interfaces Joint No.3 (R =2.8): a) The interface of flyer copper - aluminum b) The interface of aluminum - base copper.

شکل 9 پروفیل سختی فصل مشترک اتصال شماره 3 (R=2.8) الف) فصل مشترک مس پرنده-آلومینیوم ب) فصل مشترک آلومینیوم- مس پایه

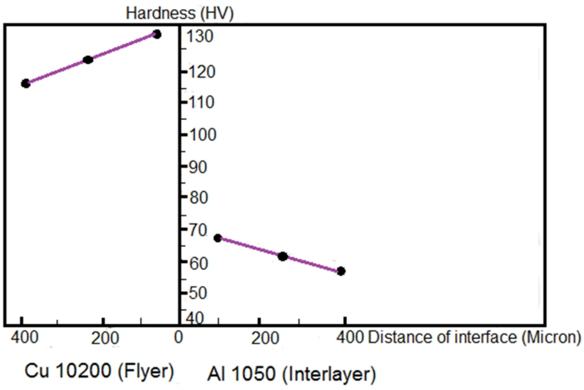
می‌گردد، که خاصیت ترد و شکننده ترکیبات بین فلزی موجب ایجاد ترک در فصل مشترک‌ها می‌شود [20,19]. در نتیجه فصل مشترک‌ها ضعیف و شکننده شده و استحکام باند برشی در سرتاسر اتصال کاهش می‌یابد. حسینی اطهر و همکاران نیز در بررسی خود شاهد کاهش استحکام فصل مشترک در اثر افزایش بار انفجاری بودند [7].

4- نتیجه گیری

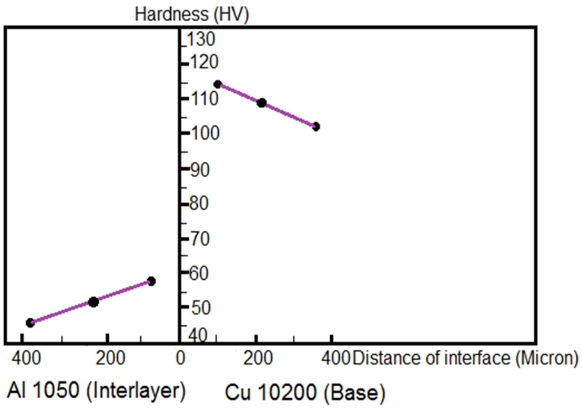
1- نتایج متالوگرافی نشان می‌دهد که فصل مشترک‌های مس پرنده-آلومینیوم و آلومینیوم- مس پایه به شکل شبه موجی نامتقارن به دلیل خواص فیزیکی متفاوت مس و آلومینیوم به خصوص چگالی و دمای ذوب دو فلز همراه با مناطق ذوب موضعی در مجاورت موج‌ها بوده که با افزایش بار انفجاری بر میزان این مناطق ذوب موضعی افزوده می‌شود.

2- آنالیز عنصری ترکیب مناطق ذوب موضعی نمایانگر مخلوطی از عناصر ورقه‌های مس و آلومینیوم است که به‌دلیل ماهیت چرخشی جت جهنده و چرخش گردابه‌ای حاصل شده است. با افزایش بار انفجاری میزان این ترکیبات بین فلزی افزایش یافته اما نوع آن تغییر نکرده و از نوع $CuAl_2$ است.

3- دامنه امواج فصل مشترک مس پرنده- آلومینیوم به‌دلیل کاهش سرعت پس از برخورد اول صفحات به یکدیگر و در نتیجه کاهش انرژی جنبشی ثانویه بیشتر از دامنه امواج فصل مشترک آلومینیوم- مس پایه است. در کل با افزایش بار انفجاری، دامنه امواج افزایش یافته است.



(a) (الف)



(b) (ب)

Fig. 10 Hardness profile of interfaces Joint No.4 (R =3.8): a) The interface of flyer copper - aluminum b) The interface of aluminum - base copper

شکل 10 پروفیل سختی فصل مشترک اتصال شماره 4 (R=3.8) الف) فصل مشترک مس پرنده-آلومینیوم ب) فصل مشترک آلومینیوم-مس پایه

4- افزایش بار انفجاری موجب افزایش سختی نواحی مجاور فصل مشترک به علت افزایش انرژی برخورد و تغییر شکل پلاستیک شدید شده است.

5- نتایج آزمون استحکام‌سنجی کششی برشی نشانگر بالاتر بودن استحکام فصل مشترک‌های نمونه شماره 3 با بارانفجار کمتر، با مقادیر 157MPa و 154MPa به ترتیب برای فصل مشترک‌های مس‌پرنده-آلومینیوم و آلومینیوم-مس‌پایه به علت موجی شکل بودن و ایجاد قفل مکانیکی در فصل مشترک صفحات است. کاهش استحکام در نمونه شماره 4 به دلیل افزایش بار انفجاری و در نتیجه تشکیل بیشتر فاز بین فلزی، پیوستن عیوب از قبیل حفرات و افزایش مناطق ذوب موضعی در مجاورت گردابه امواج است.

5- مراجع

[1] ASM International, *ASM Handbook : Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-purpose Materials*, pp.43-76, 1992.

[2] J.P. Bergmann, F. Petzoldt, R. Schürer, S. Schneider, Solid-state welding of aluminum to copper - case studies, *Welding in the World*, Vol.57, No. 5, pp.541–550, 2013.

[3] M. Sahin, Joining of aluminium and copper materials with friction welding, *International Journal Advance Manufacture Technology*, Vol. 49, No. 5, pp.527–534, 2010.

[4] X.Wu, T. Liu, C. Wayne, Microstructure, welding mechanism, and failure of Al/Cu ultrasonic welds, *Journal of Manufacture Process*, Vol. 20, No. 4, pp.321–331, 2015.

[5] B. Gulenc, *Investigation of interface properties and weldability*

investigation of interface properties, *Aerospace Journal* , Vol. 5, No. 3, pp. 27-39, 2009. (in Persian فارسی)

[14] A. Loureiro, R.Mendes, J.B. Ribeiro, R.M. Leal, I. Galvão, Effect of explosive mixture on quality of explosive welds of copper to aluminium, *Materials and Design*,Vol. 95, No.9, pp.256–267, 2016.

[15] E.Zamani, G.H. Liaghat, Explosive welding of stainless steel–carbon steel coaxial pipes, *Journal Material Science,* Vol. 47, No. 2, pp. 685-695, 2012.

[16] G.H.Liaghat, S.A.Dehghan Manshadi, Manufacturing of bimetal tubes made of st-37 and phosphor-bronze using explosive welding, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 54-69, 2010. (in Persian فارسی)

[17] M. Tabatabaee Ghomi, J. Mahmoudi, G.H. Liaghat, Removing leakage from oil and gas low pressure pipes by explosive welding method, *Journal of Petroleum and Gas Exploration Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 34 -42, 2011.

[18] T. Izuma, K. Hokamoto, M. Fujita, M. Aoyagi, Single-shot explosive welding of hard-to-weld A5083/SUS304 Clad using SUS304 intermediate plate, *Journal of Welding international*, Vol. 6, No. 12, pp. 941-946, 1992.

[19] T.Z. Blazynski, *Dynamically consolidated composites: Manufacture and properties*, pp. 93-209, New York: Springer Science & Business Media, 1992.

[20] T. Inal, C. Zimmerly, Processing of materials with explosives, *9th International Metallurgy and Materials Congress*, Bulgaria, pp. 24-39, June 10-16, 1997.

of aluminum and copper plates by explosive welding method, Des.29. 2008; http://www.Elsevier.com/locate/matdes.

[6] T.Z.Blazynski, Explosion forming welding and compaction, *Applied Science Publisher*, pp.57- 61, New York: Springer, 1983.

[7] M.M. Hoseini Athar, B. Tolaminejad, *Weldability Window and the Effect of Interface Morphology on the Properties of Al/Cu/Al Laminated Composites Fabricated by Explosive Welding*, 16 July 2015; http://www.Sciencedirect.com.

[8] P. Manikandan, K. Hokamoto, M. Fujita, K. Raghukandan, R. Tomoshige, Control of energetic conditions by employing interlayer of different thickness for explosive welding of titanium/304stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 195, No.9 ,pp. 232-240, 2008.

[9] T. Izuma, K. Hokamoto, M. Fujita, M. Aoyagi, *Single-shot explosive welding of hard-to-weld A5083/SUS304 Clad using SUS304 intermediate plate*, 1992; http://www.Sciencedirect.com.

[10] D. Jaramillo, A. Szecket O. T. Inal, On the transition from a waveless to wavy interface in explosive welding, *Materials Science and Engineering*, Vol. 91, No. 3, pp. 217-222, 1987.

[11] S. Saravanan, K. Raghukandan, Influence of Interlayer in Explosive Cladding of Dissimilar Metals, *Journal Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 28, No. 5, pp. 589-594, 2013.

[12] S. A. A. Akbari Mousavi, M. Nourozpour, Study of the Explosive Welding Interface connection three-layer sheets aluminum1250/ aluminum5083 / steel sea products, *Energetic Materials*, Vol. 3, No. 2, pp. 11-26. Fall 2007. (in Persian فارسی)

[13] J. Zamani, S. M. Bagheri, A. Mehdipour Omrani, Scarf joining of aluminium to copper plates by explosive welding process and