

بررسی تاثیر فاصله توقف بر مورفولوژی و خواص مکانیکی فصل مشترک اتصال انفجاری صفحات سه لایه ضخیم AlMg5-Al-Steel

امیراکرامی^۱، محمدرضا خانزاده قره شیران^{۲*}، حمید عربی^۳

۱- عضو هیأت علمی، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف

آباد، اصفهان، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات مهندسی پیشرفته، واحد شهرمجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

*m.khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۴/۳۰)

چکیده

در این مقاله تاثیر پارامتر فاصله توقف بر مورفولوژی و خواص مکانیکی فصل مشترک اتصال آلیاژهای AlMg5-Al-Steel مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده با تغییر فاصله توقف و تغییر میزان انرژی جنبشی مصرفی ناشی از برخورد شکل فصل مشترکهای حاصله از حالت موجی - مسطح به موجی و موجی گردابه ای تغییر می نماید. با افزایش فاصله توقف به دلیل انتقال انرژی برخوردی بیشتر، در مجاورت گردابه های امواج در فصل مشترک آلومینیوم - فولاد مناطق ذوب موضعی تشکیل شده که ترکیب این مناطق براساس ماهیت حرکت چرخشی جت جهنده ترکیبی از عناصر دو صفحه بوده است. این مناطق به دلیل تمرکز تنش، باعث افت خواص استحکامی در فصل مشترک شده اند. نتایج هم چنین نشان داده حد استحکامی کلیه اتصالات در فصل مشترک آلومینیوم به فولاد از حد استاندارد بالاتر بوده است و نمونه ای که فاقد ترکیبات ذوب موضعی و دارای شکل فصل مشترک موجی بوده بالاترین استحکام را داشته است.

واژه‌های کلیدی:

جوشکاری انفجاری، فاصله توقف، مناطق ذوب موضعی، جت جهنده، انرژی جنبشی برخورد.

۱- مقدمه

سرعت صفحه پرنده، سرعت برخورد، زاویه دینامیکی برخورد، فاصله توقف و نسبت بار انفجاری از متغیرهای اساسی این روش می باشند [۳]. آلیاژهای آلومینیوم حاوی منیزیم در اتصالات سه لایه استفاده می شوند و معمولاً با صفحه های واسط از جنس آلومینیوم، تیتانیم، فولاد ضد زنگ و مس به فولادجوشکاری

جوشکاری انفجاری یکی از فرایندهای جوشکاری حالت جامد است که با استفاده از نیروی انفجاری، صفحه پرنده به صفحه پایه با سرعت بالایی برخورد نموده و در اثر فشار اعمالی در نقطه برخورد با ایجاد رفتار سیال گونه فلزات و تشکیل جت جهنده در فصل مشترک، اتصالی صورت می پذیرد [۱-۳]. شتاب و

فصل مشترک حاصل با صفحه واسط فولاد زنگ نزن در دو سمت موجی شکل گزارش شده و لایه میانی بین فلزی به ضخامت $30-10 \mu\text{m}$ به دلیل انرژی برخوردی بالا تشکیل شده که در سمت با انرژی برخوردی کمتر این ضخامت کاهش یافته است. ضخامت لایه میانی بین فلزی با تغییر سرعت برخورد در انرژی جنبشی ثابت تغییر نموده است. در سرعت برخورد کم، ضخامت این لایه غیر یکنواخت گزارش شده و علت آن حد پایین شرایط تشکیل جت جهنده ذکر شده است. هم چنین تاثیر تغییرات ضخامت صفحه واسط آلومینیوم 1050 در محدوده ضخامتی $2-2/0$ میلی متر بر اتصال سه لایه آلومینیوم 5083 با ضخامت 5 میلی متر به فولاد SS41 با ضخامت 9 میلی متر مورد بررسی واقع شده است، در فصل مشترک اتصال آلومینیوم ها در تمامی ضخامتهای صفحه واسط فصل مشترکی مسطح ایجاد شده است و یک لایه میانی در فصل مشترک صفحه واسط و فولاد تشکیل شده که به صورت موجی بی قاعده بوده است، ضخامت لایه میانی بین فلزی با افزایش ضخامت صفحه واسط افزایش نشان داده که به دلیل تغییرات انرژی جنبشی مصرفی ناشی از برخورد بوده است. ترکهای داخلی بدلیل ماهیت ترد و تفاوت ضریب انبساط حرارتی مواد در لایه میانی فصل مشترک ایجاد شده است. بررسی میکروسکوپ الکترونی عبوری دانه های نانو ذره با ساختار کریستالی FeAl_3 را در لایه میانی را نشان داده که با افزایش ضخامت صفحه واسط ضخامت لایه میانی بیشتر شده و استحکام افت نموده است. به همین دلیل استفاده از صفحه واسط نازک جهت کاهش ضخامت لایه میانی پیشنهاد شده است [۷]. اکبری موسوی و همکاران [۸] جوشکاری انفجاری سه لایه آلومینیوم 5083 - فولاد دریایی - آلومینیوم 1250 را به کمک ماده منفجره آنفو با سرعت 2480 m/s در چیدمان موازی انجام داده اند، نتایج آنها نشان داده با تغییر بار انفجاری و فاصله توقف، شکل امواج فصل مشترک تغییر نموده و با افزایش این متغیرها در مجاورت گردابه امواج و در فصل مشترک مناطق ذوب موضعی تشکیل شده است. ترکیب این مناطق از نوع FeAl_2 ، FeAl_3 گزارش شده است. نتایج استحکامی نشان داده

انفجاری شده اند. عمده استفاده این آلیاژها در صنایع کشتی سازی است. عرشه کشتی ها از جنس فولاد دریایی بوده و در ناحیه روسازه یا سوپر استراکچر از آلیاژ آلومینیوم سری 5000 و از آلیاژ آلومینیوم سری 1000 نیز به عنوان صفحه واسط استفاده می شود. علت استفاده از آلومینیوم در نواحی سوپر استراکچر آنست که باعث کاهش وزن در ناحیه فوقانی شده و افزایش حرکت و تعادل شناور را منجر می شود. روشهای سنتی اتصالات ذوبی بدلیل تفاوت درجه حرارت ذوب آلومینیوم ($600-700^\circ\text{C}$) با فولاد ($1500-1600^\circ\text{C}$) و هم چنین احتمال ایجاد فازهای ترد بین فلزی ذوبی مناسب نبوده و از روشهای اتصالاتی حالت جامد استفاده می شود. عنصر منیزیم دارای نقطه ذوب کم و فشار بخار بالایی است، در صورت اتصال مستقیم آلیاژ آلومینیوم حاوی این عنصر به فولاد مشاهده شده حفرات میکروسکوپی و ترک تمایل به ایجاد در بسته های مذابی داشته که درصد منیزیم در آنها افزایش داشته است. با تشکیل مذاب در فصل مشترک، دمای مذاب بالاتر از دمای بخار شدن منیزیم قرار گرفته و پس از انجماد بخشی از منیزیم در فلز مذاب حل شده و باعث شکل گیری رسوبات حاوی عنصر منیزیم همراه با حفرات می شود. مشاهده شده با افزایش درصد منیزیم، سختی لایه مذاب و مناطق نزدیک به فصل مشترک افزایش یافته است که باعث ضعیف شدن و عدم پیوند اتصال شده است. منیزیم حل شده در فلز مذاب، دامنه انجمادی مذاب و زمان انجماد را افزایش می دهد. در نتیجه چقرمگی باند اتصال حالت جامد کاهش یافته و در اثر عبور موج شوک انفجار اتصال به راحتی جدا شده است [۴-۵]. ایزوما و همکاران [۶] اتصال سه لایه آلیاژ آلومینیوم 5083 به ضخامت 4 mm به فولاد زنگ نزن 304 را با صفحه واسطی از جنس فولاد زنگ نزن 304 با ضخامتهای $1-0/1$ میلی متر بررسی نموده اند. نتایج نمایانگر ایجاد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال بوده که ضخامت این لایه با کاهش انرژی جنبشی مصرفی کاهش یافته است. جوش بهینه در این اتصال در محدوده انرژی جنبشی $0/55-0/1 \text{ J/mm}^2$ گزارش شده که سرعت برخورد در محدوده $350-670 \text{ m/s}$ بوده است.

مابین دو آلیاژ جهت ایجاد یک باند اتصالی مناسب پیشنهاد می شود. این موضوع بدلیل نقطه ذوب بالاتر و دامنه انجمادی نزدیک به صفر و هدایت حرارتی بالاتر فلز Al است که میزان فاز مذاب تشکیل شده در فصل مشترک اتصال آلومینیوم/ فولاد را کاهش می دهد [۲].

آلیاژها ابتدا سند بلاست، زنگ زدایی شده و سپس به ابعاد زیر و به صورت مستطیل شکل برشکاری شدند:

۱- صفحه پایه فولادی به ابعاد طول ۳۰۰ میلی متر، عرض ۲۵۰ میلی متر و ضخامت ۲۰ میلی متر

۲- صفحه واسط آلومینیوم ۱۰۵۰ به ابعاد طول ۳۰۵ میلی متر، عرض ۲۵۵ میلی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر

۳- صفحه پرنده آلومینیوم ۵۰۸۳ به ابعاد طول ۳۱۰ میلی متر، عرض ۲۶۰ میلی متر و ضخامت ۷ میلی متر

ورقها سپس با سنباده ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ سنباده زده شده و پولیش و پرداخت شدند تا کاملاً تمیز و عاری از هر گونه آلودگی سطحی باشند. سپس ورقها با محلول CaOH و اتانول ۹۵ درصد یا استون شستشو داده شده و قبل آزمون با آب شسته شده و خشک شدند. خواص مکانیکی و فیزیکی این ورقها در جدول ۱ نشان داده شده است.

در نسبتهای کم بار انفجاری به دلیل افزایش تغییر شکل پلاستیک در لایه های مجاور فصل مشترک استحکام افزایش نشان داده و در بار انفجاری زیاد به دلیل افزایش انرژی جوشکاری و ایجاد بسته های ترد بین فلزی در فصل مشترک استحکام افت نموده است. نتایج سختی سنجی نیز نمایانگر افزایش سختی بدلیل عبور امواج شوک انفجار در مناطق مجاور فصل مشترک اتصال بوده است.

در این پژوهش جوشکاری انفجاری ورقهای ضخیم آلومینیوم ۵۰۸۳ به فولاد AISI1515 با لایه واسط آلومینیوم ۱۰۵۰ ضخیم مورد بررسی قرار گرفته و تاثیرات تغییر پارامتر فاصله توقف بر شکل و خواص فصل مشترک ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روشهای آزمون

ورق های آلومینیوم ۵۰۸۳ و ۱۰۵۰ به ترتیب بعنوان صفحات پرنده و واسط، ورق فولادی AISI1515 به عنوان صفحه پایه در نظر گرفته شده است. انتخاب آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ به عنوان لایه واسط جهت کاهش ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک صورت می گیرد. جهت جوشکاری آلیاژهای Al-Zn-Mg به طور مستقیم به فولاد بدلیل محدوده انجمادی گسترده و چگالی نسبتاً پایین آلیاژ، استفاده از یک لایه واسط از جنس Al خالص

جدول (۱): خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژهای مورد استفاده

سرعت انتشار (m/s) (صوت)	Hv سختی	استحکام تسلیم (MPa)	چگالی (kg/m ³)	مواد
۴۸۰۴	۱۸۰	۳۵۵	۷۸۵۰	AISI ۱۵۱۵
۴۹۹۶	۳۰	۱۰۰	۲۷۱۰	AA۱۰۵۰
۵۰۹۰	۸۲	۳۲۰	۲۶۶۰	AA۵۰۸۳

نحوه قرار گیری نمونه ها به صورت سیستم آرایش موازی مطابق شکل ۱ بر روی سکوی بتنی با بستری از شن نرم به عنوان لایه بافر بوده است. چاشنی شماره ۸ جهت تحریک مطابق قرار گیری در شکل ۱ استفاده شده است.

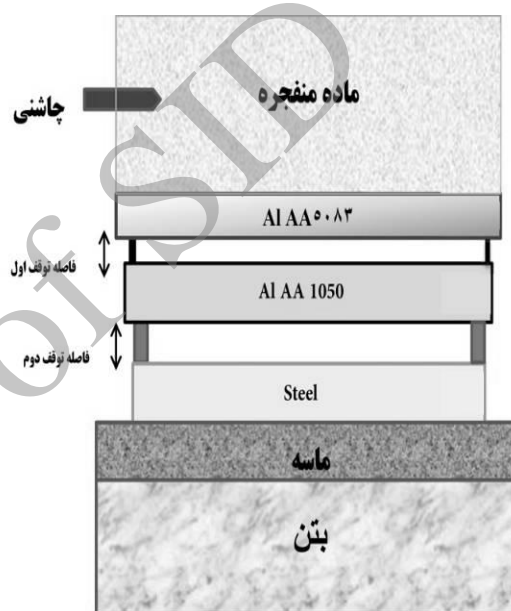
برای انجام آزمونها از ماده منفجره انفو با سرعت انفجار m/s ۲۷۰۰ و چگالده ۹۰۰ kg/m³ با دانه بندی ۲۰۰ μm استفاده شده است. جدول ۲ نمایانگر پارامترهای طراحی شده برای اتصالی ورقها است.

جدول (۲): پارامترهای آزمونهای طراحی شده

شماره آزمون	فاصله توقف مابین صفحه پرنده و صفحه واسط (mm)	فاصله توقف مابین صفحه پایه فولادی و صفحه واسط (mm)	ضخامت ماده منفجره (mm)
۱	۱۰	۸	۵۰
۲	۸	۸	۵۰
۳	۶	۱۰	۵۰

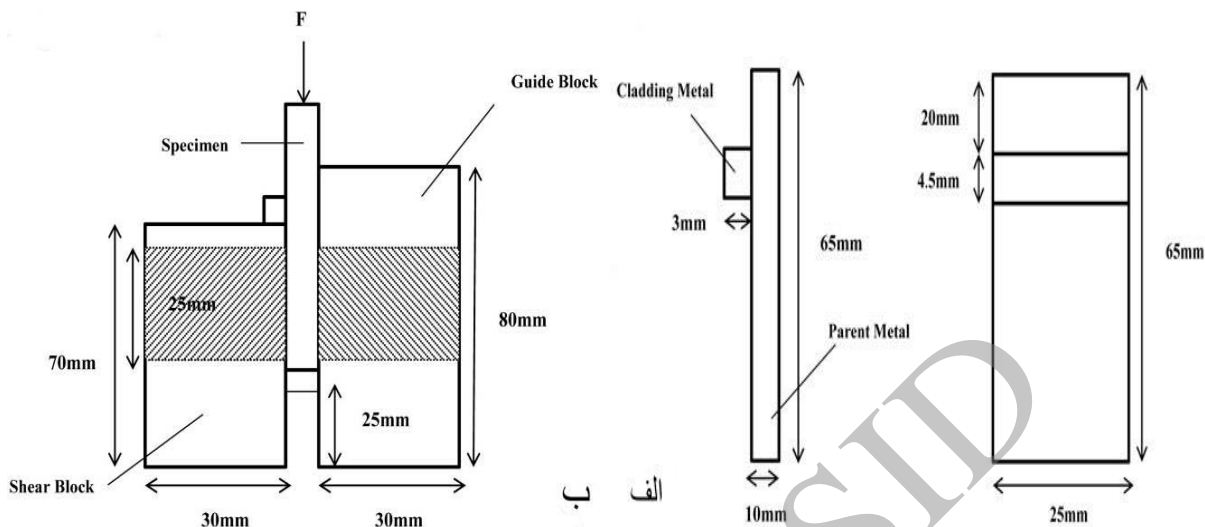
دستگاه وایرکات به ابعاد یک سانتی متر در یک سانتی متر در جهت عمود بر جبهه انفجار انتخاب شده و بریده شدند. هر یک از نمونه ها طی مراحل مختلف با استفاده از کاغذ سنباده های شماره ۶۰ تا ۱۲۰۰ سنباده زنی شده و سپس توسط خمیر الماسه پولیش شدند. برای بررسی ریز ساختمانی، محلول حکاکی نایتال ۲ درصد برای فولاد استفاده شد. بررسی دقیق تر فصل مشترکهای حاصله با کمک آنالیزهای الکترون بازگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت پذیرفت. برای این آزمایش ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA TESCAN استفاده شد. برای بررسی و آنالیز ترکیب شیمیایی فازهای موجود در فصل مشترک و توزیع عنصری از آنالیز انرژی پرتو ایکس^۲ موجود در دستگاه میکروسکوپ الکترونی استفاده شد.

برای بررسی استحکام برشی اتصالات، مطابق استاندارد DIN50162 [۱۰] نمونه های استحکام برشی آماده شدند. شماتیک آزمون و نمونه ها در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه ای عمود بر جهت انفجار از داخل نمونه های اتصال یافته مطابق استاندارد توسط وایر کات ساخته شد. سپس با دستگاه کشش و قید و بند مخصوصی مطابق شکل ۲ نمونه ها تحت فشار قرار گرفتند. ابتدا مساحت دقیق زائده، اندازه گیری شده و پس از قرار گیری نمونه در قید و بند، فشار با سرعت حرکت فک های فشاری ۱ میلیمتر بر دقیقه بر نمونه وارد شد. تنش شکست بر اساس تقسیم ماکزیمم حد نیرو و اعمالی بر مساحت زائده گزارش شده است.

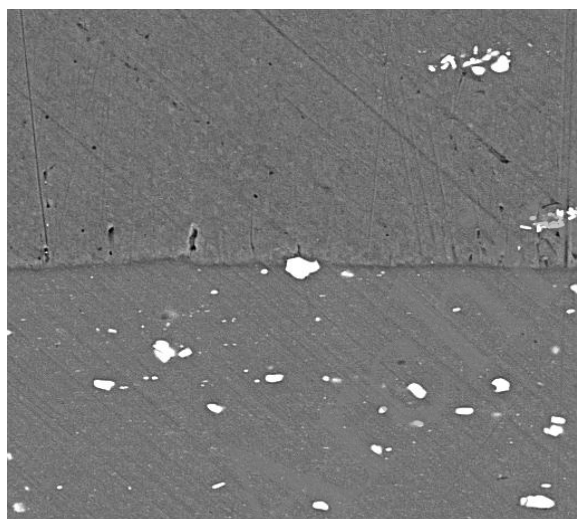


شکل (۱): تنظیم آزمونهای انفجاری

هم چنین فاصله توقف مابین ورقها نیز به کمک فاصله دهنده های مسی با ابعاد مناسب (به ارتفاع فاصله های توقف طراحی شده جدول ۲) ایجاد شدند. ماده منفجره مطابق شکل ۳ در داخل یک جعبه چوبی با ابعاد مناسب در بالای ورق پرنده مستقر شد. جهت اطمینان از یکنواختی و عدم وجود از هم گسیختگی، آزمون غیر مخرب ماوراصوت بر اساس استاندارد ASTM A578 [۹] روی همه اتصالات انجام شد. پس از بازرسی، از مناطق مورد تایید برای آزمایش های بعدی نمونه برداری انجام شد. برای بررسی چگونگی اتصال و تغییرات ریز ساختمانی، آزمونهای متالوگرافی توسط میکروسکوپ نوری بر تمام فصل مشترکهای حاصله صورت پذیرفت. مقاطع انتخابی توسط



شکل (۲): روش و نمونه آزمون استحکام برشی اتصال بر اساس استاندارد DIN50162: (الف): نمونه آزمون، (ب): فیکسچر و نحوه انجام آزمون [۱۰].



SEM MAG: 2.00 kx Det: BSE
SEM HV: 15.00 kV WD: 11.40 mm
Date(m/d/y): 12/24/13 Vac: HiVac
VEGA\\ TESCAN
RMRC

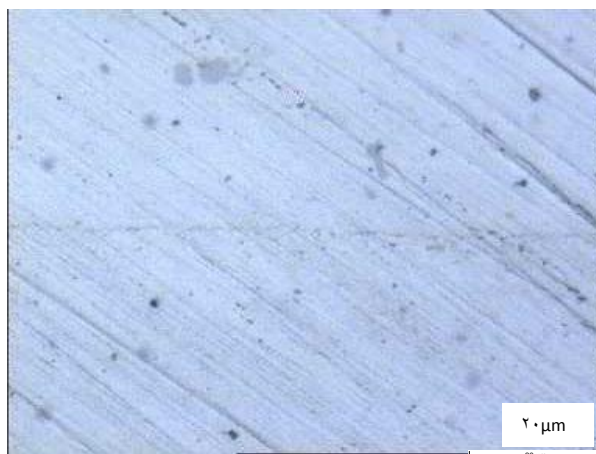
شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم ها آزمون شماره یک (آلومینیوم ۱۰۵۰ صفحه واسط در بالای تصویر)

همان طور که شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهند فصل مشترک موجی - مسطح در اتصال آلومینیوم ها در این آزمون ایجاد شده است. شکل ۵ نمایانگر تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم صفحه واسط به فولاد (قسمت تیره تر) است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختاری آزمون شماره یک

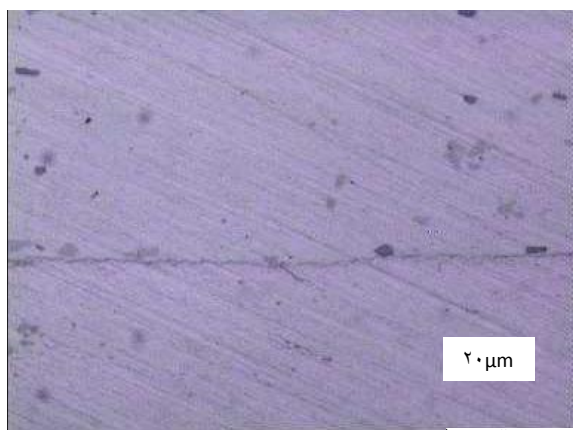
شکل‌های ۳ و ۴ نمایانگر تصاویر متالوگرافی نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال مابین آلومینیوم ها است.



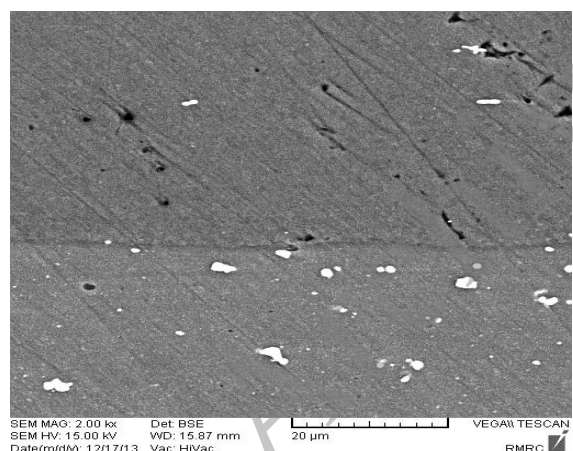
شکل (۳): تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری فصل مشترک اتصال آلومینیوم ها، آزمون شماره یک (آلومینیوم ۱۰۵۰ صفحه واسط در بالای تصویر)

۳-۲- بررسی ریزساختاری آزمون شماره دو

شکل‌های ۷و۶ نمایانگر تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم ها به یکدیگر است.

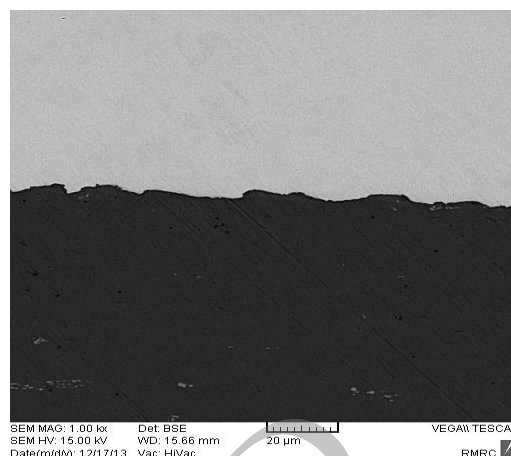


شکل(۶): تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری فصل مشترک اتصال آلومینیوم ها آزمون شماره دو (آلومینیوم صفحه واسط در بالا)

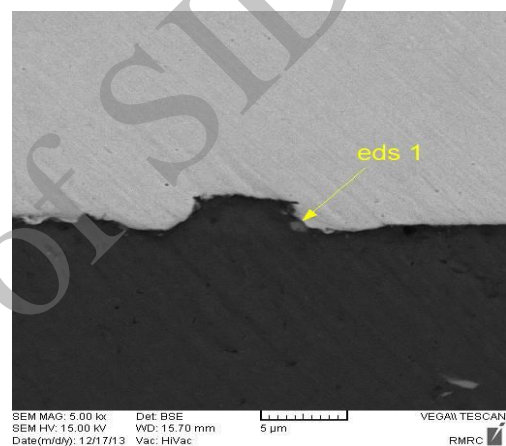


شکل(۷): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم ها آزمون شماره دو (آلومینیوم ۱۰۵۰ صفحه واسط در بالای تصویر)

همانطور که شکل‌های ۷و۶ نشان می‌دهند فصل مشترک موجی کوتاه در اتصال آلومینیوم ها در این آزمون ایجاد شده است. شکل ۸ نمایانگر تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم صفحه واسط به فولاد (قسمت تیره تر) است.



(الف)



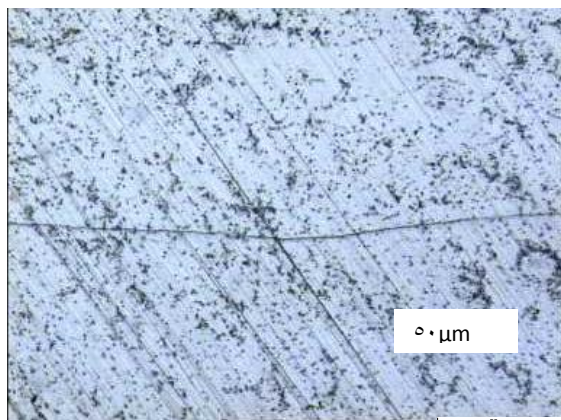
(ب)

شکل(۵): (الف): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال اتصال آلومینیوم صفحه واسط به فولاد آزمون شماره یک (ب): منطقه ذوب موضعی فصل مشترک

همانطور که شکل ۵ نشان می‌دهد فصل مشترکی موجی-گردابه ای در این آزمون ایجاد شده است. در برخی مناطق مجاور امواج مناطق کوچک ذوب موضعی نیز مشاهده می‌شود. نتایج آنالیز عنصری پرتو ایکس از منطقه ذوب موضعی نشان داده شده در شکل ۵، در جدول ۳ نشان داده شده است.

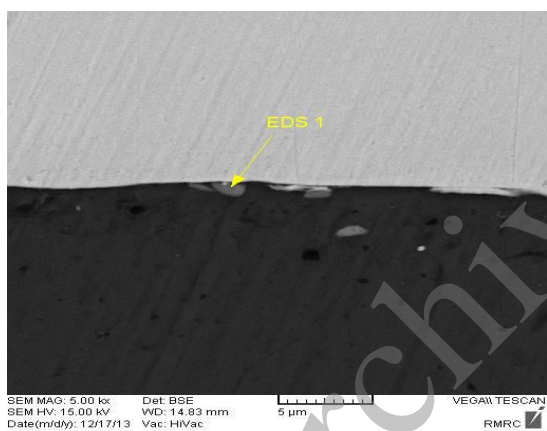
جدول(۳): درصد عناصر آنالیز پرتو ایکس منطقه ذوب موضعی شکل ۵

عنصر	درصد وزنی
Al	80.22
Si	1.89
Fe	17.89

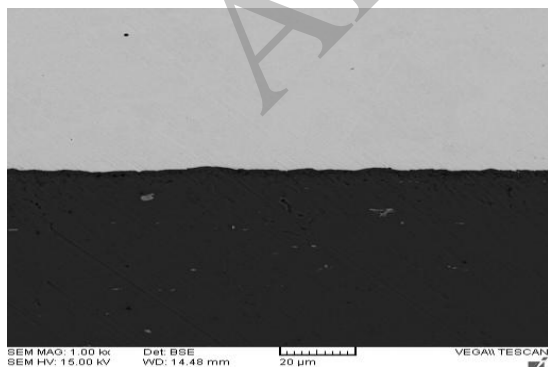


شکل (۱۰): تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری فصل مشترک اتصال آلومینیوم ها آزمون شماره پنج (آلومینیوم صفحه واسط در بالا)

شکل ۱۱ نمایانگر تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم صفحه واسط به فولاد (قسمت تیره تر) است.

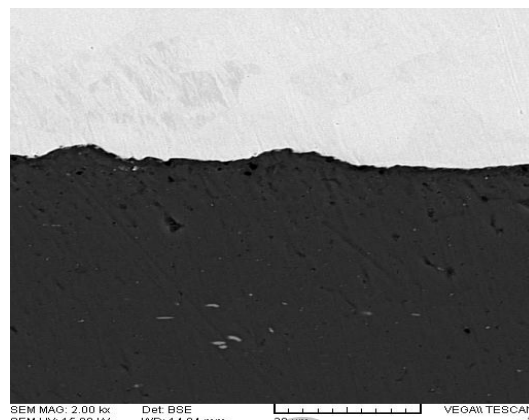


(الف)



(ب)

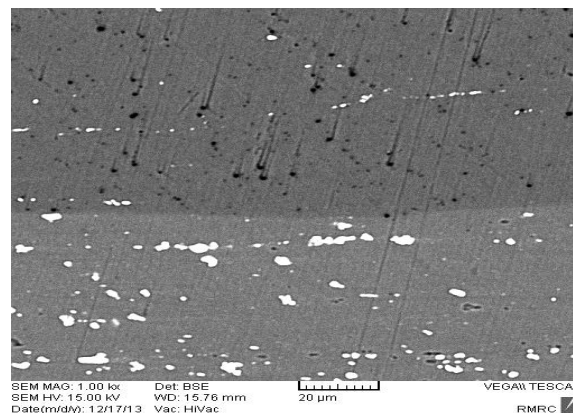
شکل (۱۱): (الف): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم صفحه واسط به فولاد موضعی آزمون شماره سه (ب): مناطق ذوب موضعی فصل مشترک



شکل (۸): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم صفحه واسط به فولاد آزمون شماره دو

همانطور که شکل ۸ نشان می دهد فصل مشترکی موجی در این آزمون ایجاد شده و در مناطق مجاور امواج مناطق ذوب موضعی مشاهده نمی شود.

۳-۳- بررسی ریزساختاری آزمون شماره سه
شکل های ۹ و ۱۰ نمایانگر تصویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم ها است.



شکل (۹): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم ها آزمون شماره سه (آلومینیوم صفحه واسط در بالای تصویر)

همانطور که شکل های ۹ و ۱۰ نشان می دهند فصل مشترکی موجی کوتاه در اتصال آلومینیوم ها در این آزمون ایجاد شده است.

شکل پلاستیک کافی نباشد موجهای کوتاه ایجاد شده و منطقه ذوب موضعی پدیدار نمی شود. با افزایش انرژی جنبشی برخوردی تغییر شکل شدید در زیر و تاج موج ایجاد می شود و در نتیجه فشارهای برخوردی بالا، گردابه ها می توانند در فصل مشترک اتصال ایجاد شوند و این گردابه ها ممکن است در برخی مناطق فصل مشترک ایجاد مناطق ذوب موضعی نمایند. این مناطق توسط حرارت داخلی ایجاد شده بر اساس فشار بالای ناشی از امواج شوکی انفجار و تغییر شکل پلاستیکی شدید و ایجاد گرمای بی دررو در اثر گیر افتادن گردابه در جلوی جبهه برخی امواج در اثر استحاله انرژی جنبشی به انرژی حرارتی در طول برخورد و یا حرارت آدیاباتیک ناشی از گازهای محبوس ما بین صفحات می تواند ایجاد شده باشد. این مناطق موضعی با فلز سرد اطراف احاطه شده و تحت سرعت سرد شدن بالایی در حد $10^5 - 10^7$ K/s قرار دارند [۱۲]. این مناطق کوچک در مجاورت گردابه امواج شکلهای ۵ و ۱۱ مشاهده می شوند. با افزایش فاصله توقف و یا میزان بار انفجاری به دلیل افزایش فشار و انرژی برخورد و دمای ناشی از آن، میزان این مناطق در فصل مشترک خصوصا در مجاورت گردابه موج ها افزایش می یابد. از آنجایی که به دلیل تفاوت در چگالی و سرعت اشاعه موج در دو فلز، شکل امواج دارای تقارن کامل نمی باشد و هم چنین 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 فولاد مطابق شکلهای ۵ و ۱۱ مشاهده شده اند. آنالیز EDS نیز برای نمونه از داخل منطقه نشان داده شده مربوط به جلوی گردابه های ایجاد شده صورت پذیرفت. که این مناطق و نتایج این آنالیزها در جداول ۳ و ۴ مشاهده می شوند. نتایج این آنالیزها نمایانگر ایجاد ترکیبی مخلوط در این مناطق موضعی از دو آلیاژ، بر اساس حرکت تلاطمی و چرخشی جت گیر افتاده تشکیل شده از هر دو صفحه پایه و پرنده در این مناطق می باشد. تشکیل جت جهنده از هر دو صفحه پایه و پرنده و حرکت چرخشی آن توسط محققین دیگر نیز مشاهده شده است [۱۳-۱۴]. برای

همانطور که شکل ۱۱ نشان می دهد فصل مشترک موجی کوتاه - گردابه ای در این آزمون ایجاد شده است. در برخی مناطق مجاور امواج مناطق کوچک ذوب موضعی نیز مشاهده می شود. نتایج آنالیز عنصری پرتو ایکس از منطقه ذوب موضعی نشان داده شده در شکل ۱۱، در جدول ۴ مشاهده می شود.

جدول (۴): درصد عناصر آنالیز پرتو ایکس منطقه ذوب موضعی شکل ۱۱

عصر	درصد وزنی
Mg	0.00
Al	68.90
Cr	0.09
Fe	30.47
Ni	0.54

۳-۴- تحلیل ریز ساختار فصل مشترک آزمون شماره یک

همانطور که در شکلهای ۳ و ۴ مشاهده می شود فصل مشترک موجی - مسطح مابین آلومینیوم ها ایجاد شده است. ایجاد این نوع فصل مشترک به دلیل فاصله توقف بالا و بازگشت امواج شوکی در فصل مشترک اتصال توجیه می شود. به دلیل بالا بودن فاصله توقف به نظر می رسد بازگشت موج شوک انفجار صورت پذیرفته و موجهای بازگشتی غیر هم فاز بوده و اثر متقابل آنها موج مسطح شده ایجاد نموده است [۱۱].

فصل مشترک اتصال آلومینیوم به فولاد مطابق شکل ۵ به دلیل اختلاف چگالی دو آلیاژ موجی گردابه ای نامتقارن است. هم چنین به دلیل بالا بودن فاصله توقف (جدول ۲) مابین صفحات آلومینیومی و سرعت برخورد بیشتر صفحه پرنده، انرژی جنبشی برخوردی بیشتری به فصل مشترک دوم انتقال یافته و باعث ایجاد فصل مشترک موجی شکل گردابه ای شده است. در جوشکاری انفجاری دو فصل مشترک فلز به فلز و فلز به مذاب انجماد یافته می تواند در فصل مشترک حاصل شود. در کنار یک سرعت حداقل صفحه پرنده، یک مقدار حداقل انرژی جنبشی برخوردی برای اتصال دهی وجود دارد، در اثر برخورد صفحه پرنده، انرژی جنبشی مصرفی به انرژی پتانسیل تبدیل شده و منجر به تغییر شکل سطوح برخوردی می شود. اگر مقدار تغییر

مشترک گردابه ای با مناطق ذوب موضعی کوچک در مجاورت گردابه امواج تشکیل شده است.

۳-۷- نتایج بررسی استحکام فصل مشترک آلومینیوم به فولاد

جدول ۵ نمایانگر نتایج آزمونهای استحکامی فصل مشترک آلومینیوم به فولاد است.

جدول (۵): نتایج آزمون استحکام برشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم صفحه

واسط به فولاد

آزمون	استحکام (MPa)
یک	۷۱
دو	۷۳
سه	۶۹

استحکام برشی فصل مشترکهای اتصالات در هر سه آزمون از حد استحکامی استاندارد بر طبق استاندارد نظامی به شماره Mil-J-۲۴۴۵ که حد استحکام برشی استاندارد اتصال Al/steel را ۵۶ MPa معرفی نموده، بالاتر بوده و اتصال مناسبی را ایجاد نموده است [۱۶].

ایجاد فصل مشترکی موجی شکل بدون ترکیبات بین فلزی و مناطق ذوب موضعی در آزمون شماره دو که در شکل ۸ مشاهده می شود باعث ایجاد ماکزیمم استحکام در بین آزمونهای دیگر شده است. ایجاد ترکیبات بین فلزی ترد و مناطق ذوب موضعی در مجاورت گردابه امواج آزمون شماره یک مطابق شکل ۵ به عنوان مناطق تمرکز تنش، ایجاد گردابه امواج تیز و تمرکز تنش در راس گردابه ها باعث افت استحکام این آزمون نسبت به آزمون شماره دو شده است. وجود ترکیبات بین فلزی و ذوب موضعی در مجاورت گردابه امواج آزمون شماره سه مطابق شکل ۱۱ و کوتاه شدن دامنه امواج ناشی از کاهش انرژی جنبشی برخوردی انتقالی ناشی از کاهش فاصله توقف آلومینیوم ها که با مقایسه شکلهای ۵، ۸ و ۱۱ مشخص است، باعث کمتر بودن استحکام برشی آزمون شماره سه شده است. آزمون شماره دو با

ترکیبات غیر هم جنس بر اساس انعکاس جت از صفحه با چگالی کمتر، فشار به طور عمده روی صفحه با چگالی بالاتر اعمال می شود و در نتیجه گردابه تشکیل شده در عقب موج بیشتر حاوی مواد صفحه پرنده و گردابه تشکیل شده در جلوی امواج بیشتر حاوی مواد صفحه پایه خواهد بود [۱۱]. براین اساس، ملاحظه می شود که مقادیر عناصر صفحه پایه فولادی نظیر آهن در داخل مناطق گردابه ای جلوی امواج حضور دارند. هم چنین نتایج نشان می دهد که آنالیز این ترکیبات در جلوی امواج مختلف با تغییر پارامترهای جوشکاری، تغییر نموده و غیر همگن می باشد که با مقایسه ترکیب آنالیز جدول های ۳ و ۴ مشخص می باشد. براساس ترکیب آنالیز عنصری و بالا بودن درصد عنصر آلومینیوم در منطقه ذوب موضعی فاز بین فلزی احتمالی تشکیل شده از نوع $FeAl_3$ است [۱۵].

۳-۵- تحلیل ریز ساختاری فصل مشترک آزمون شماره دو
شکلهای ۶ تا ۸ نمایانگر ایجاد فصل مشترک موجی در هر دو فصل مشترک آلومینیوم ها و آلومینیوم به فولاد است. با کاهش فاصله توقف مابین آلومینیوم ها (جدول ۲) و کاهش سرعت حرکت صفحه پرنده و انرژی جنبشی برخوردی انتقال یافته به فصل مشترک آلومینیوم - فولاد، فصل مشترکی موجی شکل بدون مناطق ذوب موضعی و گردابه ای ایجاد شده است.

۳-۶- تحلیل ریز ساختاری فصل مشترک آزمون شماره سه

شکلهای ۹ تا ۱۱ نمایانگر ایجاد فصل مشترک موجی و موجی گردابه ای به ترتیب در فصل مشترک آلومینیوم ها و آلومینیوم به فولاد است. به دلیل کاهش فاصله توقف مابین آلومینیوم ها (جدول ۲)، فصل مشترک به سمت حالت مسطح میل نموده است. با کاهش انرژی جنبشی برخوردی انتقال یافته به فصل مشترک فولاد-آلومینیوم ناشی از کاهش فاصله توقف مابین آلومینیوم ها، دامنه امواج نسبت به آزمونهای دیگر که با مقایسه شکلهای ۵، ۸ و ۱۱ مشخص است، کاهش نشان می دهد، اما به دلیل بالا بودن فاصله توقف مابین آلومینیوم و فولاد فصل

Alloy/Titanium/Steel”, Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 17, No. 2, pp. 110-116, 1986.

[6] T. Izuma, K Hokamoto, M Fujita & M. Aoyagi “Single-shot explosive welding of hard-to-weld A5083/SUS304 clad using SUS304 intermediate plate”, Welding International, Vol. 6, pp. 941-946, 1992.

[7] J. Hyun Han, J. Pyoung Ahn & M. Chul Shin, “Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of AA5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding”, of material science, Vol. 38, pp. 13– 18, 2003.

[۸] س. ع. ا. اکبری موسوی، ا. مکی، “بررسی فصل مشترک جوشکاری انفجاری اتصال سه لایه ورقهای آلومینیوم ۵۰۸۳/آلومینیوم ۱۲۵۰/فولاد دریایی”، پایان نامه کارشناسی دانشکده مهندسی و متالورژی مواد دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.

[9] ASTM A578, “Standard Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Rolled Steel Plates for Special Applications”, 2012.

[10] DIN 50162, “Testing of clad steels; determination of shear strength between cladding metal and parent metal in shear test”, 1978.

[11] B. Crossland, “Explosive welding of metals and its application”, Clarendon press, Oxford, 1982.

[12] S. A. A. Akbari Mousaviand & P. FarhadiSartangi, “Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel”, Materials and Design, Vol. 30, pp. 459-468, 2009.

[13] S. A. A. Akbari Mousavi & S. T. S Al-Hassani “Numerical and experimental studies of mechanism of wavy interface formations in explosive/impact welding”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 53, pp. 2501-2528, 2005.

[14] S. A. A. Akbari Mousavi & S. T. S. Al-Hassani, W. Byers Brown & S. J. Burley, “Simulation of explosive welding with ANFO mixtures”, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 29, pp. 188–196, 2004.

[15] L. Tricarico & R. Spina, “Effects of heat treatments on mechanical properties of Fe/Al

فصل مشترکی موجی و فاقد ترکیبات بین فلزی (شکل ۸) با استحکام بالاتر به عنوان آزمون با استحکام مناسب تر معرفی می شود.

۴- نتیجه گیری

۱- فصل مشترک موجی و موجی مسطح مابین آلومینیوم های صفحه واسط و صفحه پرنده براساس تغییر فاصله توقف ایجاد شده است.

۲- با تغییر فاصله توقف و میزان انرژی جنبشی ناشی از برخورد انتقال یافته به فصل مشترک، فصل مشترکی موجی و موجی گردابه ای با مناطق ذوب موضعی در مجاورت گردابه امواج مابین صفحه واسط آلومینیوم خالص و صفحه پایه فولاد ایجاد شده است.

۳- براساس ماهیت حرکت چرخشی جت جهنده، ترکیب مناطق ذوب موضعی در مجاورت امواج مخلوطی از عناصر صفحه پایه فولادی و صفحه واسط آلومینیومی است.

۴- تشکیل ترکیبات ذوب موضعی در مجاورت امواج و کاهش دامنه امواج باعث کاهش استحکام برشی فصل مشترک آلومینیوم به فولاد شده است.

۵- مراجع

[1] ASM Committee on Explosion welding; “Explosion Welding”, 1983.

[2] T. Z Blazynski, “Explosive Welding, Forming and Compaction”, Applide Science publisher, London, 1983.

[3] R. A. Patterson, “Fundamentals of Exolosion Welding”, Los Alamos National. Laboratory., USA, 1985.

[4] 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.

[5] Tatsukawa, “Interfacial phenomena in Explosive Welding of Al-Mg Alloy/Steeland Al-Mg

[16] Military standard number J-24445A, "Military specification for joint, bimetallic, bonded aluminum to steel", 1995.

explosion-welded structural transition joints", Material and Design, Vol. 30, pp. 2693–2700, 2009.

۶- پی نوشت

- [1] Izuma
- [2] EDS

Archive of SID