

## بررسی بارگذاری انفجاری متغیر بر خواص

### اتصال انفجاری مس به فولاد زنگ نزن ۴۱۰

فرهاد فاضل<sup>۱</sup>، محمدرضا خانزاده قره شیران<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد آموزش عالی دانش پژوهان اصفهان ۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، اصفهان

(تاریخ وصول: ۹۵/۳/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۲۴)

#### چکیده

در این پژوهش تأثیر متغیر بار انفجاری بر خواص فصل مشترک اتصال انفجاری ورق‌های مس - فولاد زنگ نزن ۴۱۰ بررسی شده است. برای نشان دادن تأثیر این متغیر، صفحات با فاصله توقف یکسان و بار انفجاری متفاوت جوشکاری شدند. بررسی‌های آزمایشگاهی با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون‌های ریز سختی سنجی و استحکام سنجی برش کششی انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش بار انفجاری و در نتیجه تغییر شکل پلاستیکی بیشتر، دامنه و طول امواج در فصل مشترک افزایش یافته و همچنین مناطق ذوب موضعی منجمد شده بیشتر شده است. در آزمون ریز سختی در هر دو نمونه با نزدیک شدن به فصل مشترک سختی افزایش یافته، همچنین در نمونه با بار انفجاری بیشتر، سختی بیشتری در هر دو سمت فولاد و مس به دست آمد. با انجام آزمون استحکام سنجی برش کششی مشخص شد که در نمونه‌ها شکست در لایه مسی اتفاق افتاده است و هیچ شکستی به دلیل جدایش نمونه‌ها از فصل مشترک رخ نداده است. این موضوع نشانگر این است که استحکام باند جوش ایجاد شده بیشتر از استحکام برشی لایه مسی است.

**واژه‌های کلیدی:** جوشکاری انفجاری، بار انفجاری، فصل مشترک اتصال، ریز سختی سنجی، استحکام کششی برشی.

## Investigation of Explosive Loading Variation on the Properties of Explosively Bonded Copper-410 Martensitic Stainless Steel

F. Fazel<sup>1</sup>, M. R. Khanzadeh Gharah Shiran<sup>2\*</sup>

1-Daneshpajooohan Institute of Higher Education

2-Islamic Azad University, Majlesi Branch, Esfahan

(Received: 6/18/2016, Accepted: 8/14/2016)

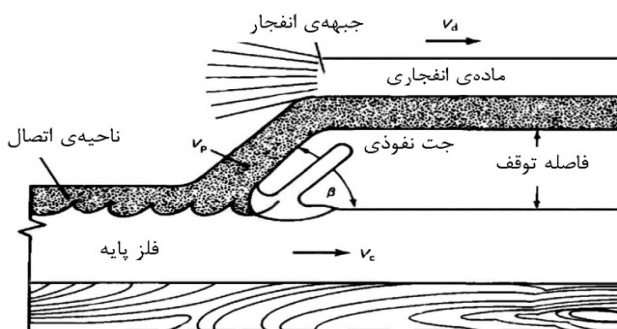
#### Abstract

In this research, effect of explosive ratio parameter on the interface properties of explosively bonded copper-410 martensitic stainless steel was investigated. Plates were welded in constant standoff distance with different explosive ratios. Optical microscopy, scanning electron microscopy, microhardness and tensile shear tests were carried out. The results showed that wavelength, wave amplitude, and locally melted zones increased by increasing explosive ratio due to more severe plastic deformation in the interface. Hardness was increased in near of the interfaces. Hardness was also increased by increasing the explosive ratio in the copper and steel sides. The tensile shear test result showed that fracture occurred on the copper side, no separation occurred from the interface and strength of interface was more than the copper side.

**Keywords:** Explosive Welding, Explosive Ratio, Bonding Interface, Microhardness Test, Tensile Shear Strength.

## ۱ - مقدمه

مورفولوژی فصل مشترک و استحکام باند اتصال داشته و خواص مکانیکی فصل مشترک تابع شکل و خواص فصل مشترک، گزارش گردیده است.



شکل ۱- نمایش تصویری از تغییر شکل صفحه پرن و برخورد ایجادشده توسط حرکت جبهه انفجار [۳].

دورگوتلو و همکاران [۴]، با تغییر در پارامترهای جوشکاری، اتصال فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را به مس خالص بررسی کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که در جوشکاری این دو نوع فلز، با افزایش فاصله توقف، فصل مشترک از حالت صاف به موجی تبدیل می‌شود. با افزایش فاصله توقف، دامنه و طول موج فصل مشترک، افزایش یافته است. همچنین بررسی‌های سختی سنجی نشان داد که در مرز اتصال، سختی به طور محسوسی افزایش یافته است. علیرغم مشاهده ترکیبات بین فلزی در نقاط خاصی از فصل مشترک، استحکام فصل مشترک در حد قابل قبولی به دست آمد و در نتیجه می‌توان گفت این ترکیبات، تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی دو فلز نداشته است. اکبری موسوی و یونسی [۵]، اتصال فولاد ۱۴ St به برنج ۹۰ Ms را مورد بررسی قرار دادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزایش بار انفجاری، فصل مشترک اتصال، از حالت تخت به موجی تغییر شکل یافته و همچنین دانه‌های نزدیک به فصل مشترک در جهت انفجار و در دو سمت اتصال کشیده می‌شوند. گولنج [۶] تأثیر تغییرات بار انفجاری بر اتصال مس - آلومینیوم را بررسی نموده است. شکل فصل مشترک اتصال با افزایش این متغیر از حالت خطی به حالت موجی با افزایش دامنه و طول امواج فصل مشترک تغییر نموده است. سختی در مجاورت فصل مشترک و سطوح خارجی صفحات در اثر برخورد افزایش نشان داده است. آزمون خمش سه نقطه‌ای بر اساس استاندارد ASTM A263-94 روی نمونه‌های اتصال یافته با بارهای انفجاری متفاوت صورت پذیرفته است. کلیه نمونه‌ها در هر دو حالت قرارگیری آلومینیوم و مس در سطح داخلی جهت خمش تا زاویه ۱۸۰ درجه خم شده‌اند. هیچ جدایشی در اتصالات پس از آزمون خمش سه نقطه‌ای مشاهده نشده است. زمانی و همکاران [۷] اتصال گوه‌ای فلزات آلومینیوم به مس به وسیله جوشکاری انفجاری را مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها با انجام محاسبات مربوطه و استفاده از روابط مناسب، به خصوص تدوین پنجره جوشکاری، راهکارهای مناسب جهت حصول اطمینان از انجام جوش کامل را ارائه نمودند. سپس به کمک مدل ریاضی ایجادشده با استفاده از روش رگرسیون، شرایط بارگذاری انفجاری و اثر آن بررسی بر روی استحکام را بیان نمودند. آن‌ها همچنان نشان دادند که با افزایش

جوشکاری مواد غیرمشابه به علت داشتن مزیت‌های زیاد، اهمیت بسیاری در کاربردهای صنعتی پیدا کرده است. این مزایا تنها به موارد فنی از جمله خواص مطلوب محصول مربوط نمی‌شود، بلکه عواملی مانند هزینه اقتصادی تولید محصول را نیز در برمی‌گیرد، بنابراین تفاوت بسیار بین خواص فیزیکی، مکانیکی، متالورژیکی و شیمیایی مواد یک منبع جذاب در طراحی انتخاب مواد است و می‌توان از خواص مختلف مواد در کاربردهای خاص به نحو مناسب استفاده کرد.

یکی از روش‌های کارآمد برای اتصال مواد غیرمشابه روش جوشکاری انفجاری<sup>۱</sup> است. جوشکاری انفجاری یک فرآیند حالت جامد بوده که در آن اتصال در اثر یک برخورد مایل شدید تحت انفجار کنترل شده، ایجاد می‌گردد. این برخورد باید دارای انرژی کافی بوده تا منجر به سیلان هیدرودینامیکی سطوح دو فلز مورد نظر گردد. برخورد مورب دارای اهمیت است زیرا بقای شدت و اندازه حرکت ضربه‌ای، اجازه ایجاد عملیات جهشی (جت) برگشتی ناشی از سیلان هیدرودینامیکی سطوح فلزی را خواهد داد. جت ایجادشده از قسمت نوک برخورد بین دو فلز، به سمت بیرون پرتاب شده و در کنار چسباندن یا محو کردن سطوح فلزی، عمل پاک کردن سطوح را نیز انجام می‌دهد. سطوح فلزی تمیز به دست آمده (از عملیات جت فلزی)، زیر فشار زیاد ناشی از انفجار به هم فشرده می‌شوند که موجب افزایش اتصال اتمی می‌گردد. شکل (۱) نمایانگر شرایط برخوردی لحظه‌ای پس از انفجار مواد منفجره در سیستم موازی است. بار انفجاری باعث اعمال سرعت  $V_p$ ، که سرعت حرکت صفحه پرن است، به صفحه پرن شده و موجب برخورد آن به صفحه پایه می‌شود. انفجار ماده منفجره در سراسر صفحه پرن با سرعت انفجاری  $V_e$  انجام می‌پذیرد.

عمومی‌ترین کاربرد اتصال انفجاری، تولید فلزات روکش دار است. این فلزات روکش دار، به منظور مقاومت در برابر خوردگی و همچنین به عنوان اتصالات واسطه برای کمک به جوشکاری فلزات غیرمشابه به کار می‌رود. از معایب و محدودیت‌های این روش می‌توان به عدم تشکیل اتصال در برخی مواد دارای اختلاف چگالی زیاد، نیازمندی به حداقل ۵ درصد ازدیاد طول در آزمون کشش و حداقل ۱۴J چقرمگی شکست برای فلزات جوش شونده جهت تحمل تغییر شکل سریع در حین جوشکاری، کاربرد تنها جهت اتصال دهی شکل‌های ساده مانند صفحات و سطوح مسطح یا سطوح استوانه‌ای هم‌محور، خطرات ذاتی مواد منفجره و صدای ناشی از انفجار اشاره کرد [۱-۳].

در تحقیقات انجام شده ملاحظه شده است که پارامترهای جوشکاری انفجاری نظیر فاصله توقف (فاصله اولیه ورق‌ها در هنگام آزمون) و بار انفجاری (نسبت وزن ماده انفجاری به وزن صفحه پرن)، تأثیر مستقیمی بر

1- Explosive Welding

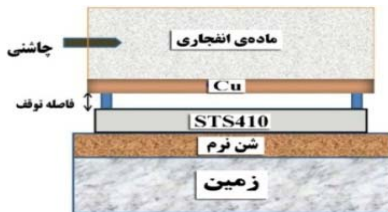
2- Jet

نوری مورد اندازه گیری واقع شده و دانه بندی مواد نیز توسط عبور از سرندهای مش معین تعیین شده است.

ماده منفجره در داخل یک جعبه چوبی با ابعاد مناسب در بالای ورق پران بدون فاصله مستقر گردید. سیستم آرایش تنظیم موازی که در شکل (۲) دیده می شود جهت فرآیند جوشکاری انتخاب گردید. کل مجموعه جهت انجام آزمون انفجاری بر روی بستری از شن نرم قرار گرفت. تحریک انفجاری توسط چاشنی الکتریکی M8 صورت پذیرفت. آزمون های اتصال دهی با تغییر بار انفجاری انجام گردیده که شرایط آزمون ها در جدول (۲) ملاحظه می گردد. فاصله توقف بر اساس نیم تا یک برابر ضخامت صفحه پرنده طراحی شده و میزان بار انفجاری بر اساس رابطه (۱) معین شده است:

$$R = \rho_e t_e / \rho_f t_f \quad (1)$$

در رابطه فوق  $\rho_e$  و  $t_e$  به ترتیب چگالی و ضخامت ماده منفجره،  $\rho_f$  و  $t_f$  به ترتیب چگالی و ضخامت صفحه پرنده است [۱۰].



شکل ۲- آرایش موازی استفاده شده در آزمون ها.

## ۲-۲- بررسی های فلز شناسی فصل مشترک اتصال

جهت حصول اطمینان از یکنواختی و عدم وجود ازهم گسیختگی جوش های انجام شده آزمون غیر مخرب اولتراسونیک مطابق پارامترهای جدول (۳) و بر اساس استاندارد ASTM A578 بر روی همه نمونه های جوشکاری شده انجام شد [۱۱].

پس از انجام بازرسی مذکور، مشخص گردید که در لبه ورق ها اتصال مناسب نیست که آن هم به دلیل پایدار نبودن آزمون جوش انفجاری در شروع آزمون جوشکاری است. پس از بررسی غیر مخرب قطعات از قسمت های مورد تأیید، جهت انجام آزمایش های بعدی نمونه برداری انجام گرفت.

مقاطع انتخابی از اتصال، توسط دستگاه وایرکات به ابعاد یک سانتی متر در یک سانتی متر انتخاب شدند. هر کدام از نمونه ها طی مراحل مختلف از سمباده شماره ۶۰ تا ۱۲۰۰ ساییده شده و توسط خمیره الماسه پولیش شدند. برای بررسی ریزساختار، محلول حکاکی نایتال ۲ درصد برای فولاد و محلول حکاکی 5g FeCl<sub>3</sub>+50mL HCl+100mL water برای مس مورد استفاده واقع شدند [۱۲]. سپس از وجه آماده سازی شده نمونه ها در قسمت فصل مشترک های فولاد و مس در بزرگنمایی های مختلف به وسیله میکروسکوپ نوری مدل EPIPHOT300 ساخت شرکت نیکون کشور ژاپن تصویربرداری شد و تصاویر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند.

بارگذاری انفجاری، فصل مشترک به حالت موجی شکل تغییر شکل داده و سختی اطراف فصل مشترک اتصال به دلیل موج شوک و نیز کارسرد ایجاد شده ناشی از برخورد، افزایش یافته است.

کهرامان<sup>۱</sup> و همکارانش [۸] اتصال انفجاری تیتانیوم به فولاد زنگ نزن را بررسی نموده اند. این دو فلز توسط هندسه مورب در بارهای انفجاری متفاوت به هم اتصال یافته اند. نتایج میکروسکوپی نمایانگر انتقال شکل فصل مشترک از حالت مسطح به موجی با افزایش مقدار بار انفجاری بوده است. دانه ها در نزدیک فصل مشترک به موازات جهت انفجار کشیده شده، گزارش شده و هیچ برشی در فصل مشترک اتصال در آزمون برش کششی مشاهده نشده است. سختی متناسب با افزایش مقدار بار انفجار افزایش یافته که حداکثر سختی در نزدیک فصل مشترک مشاهده شده است. در بررسی دیگر اثر تغییرات مقدار بار انفجاری بر روی اتصال مس- تیتانیوم نیز ملاحظه شده که با افزایش بار انفجاری و افزایش فشار برخوردی، طول امواج و دامنه آن ها در فصل مشترک زیاد شده است، همچنین با افزایش مقدار بار انفجاری، دانه های سمت فلز مس به سمت فصل مشترک ریزتر شده است و دانه ها عمدتاً موازی جهت انفجار کشیده شده اند [۹].

در این تحقیق بررسی تأثیر متغیر بار انفجاری بر ساختار و خواص مکانیکی اتصال انفجاری ورق مس به فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۱۰، صورت گرفته و ارتباط بین ریز ساختار، خواص مکانیکی و شرایط آزمون مورد تحلیل واقع شده است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مواد اولیه و طراحی آزمون ها

در این پژوهش صفحه مس خالص (C10100) با خلوص ۹۹/۹۹٪ به عنوان صفحه پران و ورق فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۱۰ به عنوان صفحه پایه در نظر گرفته شده است. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۴۱۰ در جدول (۱) نشان داده شده است.

صفحات پران و پایه به ابعاد ۲۶۰×۲۶۰×۳mm، ۲۳۰×۲۳۰×۱۰mm آماده شدند. به دلیل اهمیت میزان صافی سطوح قطعات بر اتصال، قبل از انجام آزمون های جوشکاری انفجاری، صفحات با سنباده ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ پولیش و پرداخت شدند. سپس ورق ها با محلول استون تمیزکاری شده و پس از شستشو با آب در مکانی جهت خشک شدن قرار گرفتند.

جهت اتصال دهی از ماده منفجره آماتول<sup>۲</sup> با ترکیب ۹۵ درصد نیترات آمونیم و ۵ درصد، تری نیتروتولوئن یا همان تی ان تی<sup>۳</sup> که دارای چگالی در حدود ۰٫۸ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب و دانه بندی در حدود ۱۰۰ میکرون و سرعت انفجار در حدود ۲۵۰۴ متر بر ثانیه بوده است استفاده گردید. مقادیر سرعت انفجار توسط سرعت سنج با سیستم فیبر

1- Kahraman  
2- Ammatol  
3- TNT

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۱۰.

عنصر (%at)	C	Mn	P	Co	Si	Cr	Cu	Mo	Fe
فولاد زنگ نزن	۰/۷	۰/۵۹	۰/۰۲	۰/۰۲۲	۰/۴۵	۱۱/۸۳	۰/۰۸۷	۰/۰۲۲	باقیمانده

جدول ۲- متغیرهای آزمون‌های جوشکاری انفجاری.

آزمون	نمونه	بار انفجاری	ضخامت ماده منفجره (mm)	فاصله توقف (mm)
۱	SC1	۱/۹۱	۶۴	۲
۲	SC2	۲/۳۶	۷۹	۲

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در آزمون اولتراسونیک نمونه‌های جوشکاری شده.

قطر پروب (mm)	روش آزمون	نوع پروب	فرکانس آزمون (MHz)	ماده کوپل دهنده
۲۵	تماس مستقیم پالس- آکو	نرمال	۲/۲۵	گریس

### ۳-۲- بررسی استحکام اتصالات انفجاری

برای بررسی استحکام اتصالات جوشکاری انفجاری، استحکام برشی آن‌ها اندازه‌گیری گردید. برای این منظور طبق استاندارد DIN 50162 نمونه‌های استحکام برشی آماده شدند [۱۳]. شیوه آزمون و نمونه‌ها در شکل (۳) دیده می‌شود. جهت انجام این آزمون از دستگاه استحکام سنجی HOUNF-FIELD مدل H50KF ساخت کشور انگلیس استفاده گردید. نمونه‌ها برای بررسی استحکام این ناحیه، به وسیله دستگاه قیودبند (فیکسچر)، نمایش داده شده در شکل (۴) بر روی فک دستگاه فشار استقرار یافته و با حرکت فک بالایی دستگاه به سمت پایین، با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه، آزمون فشار انجام و نیروی حداکثر شکست اتصالی بر حسب نیوتن به دست آمده است.

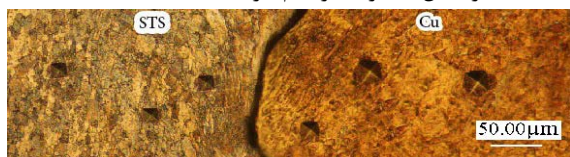


شکل ۴- نمایش آزمون استحکام سنجی برش کششی اتصال جوشکاری انفجاری.

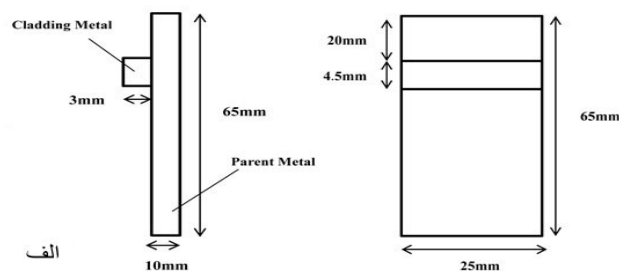
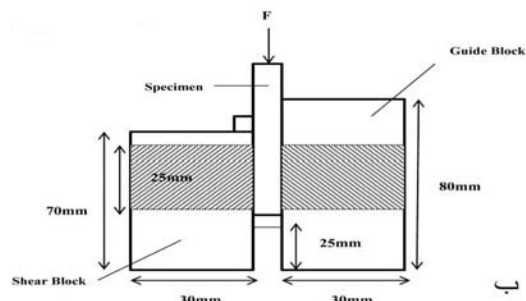
### ۴-۲- بررسی سختی مقاطع عرضی اتصالات

به منظور بررسی تأثیر فرآیند اتصال انفجاری بر میزان سختی نمونه‌ها آزمون ریز سختی سنجی بر طبق استاندارد ASTM 384-11 به روش سختی سنجی ویکرز به شرح زیر صورت گرفت [۱۴]. در این آزمون از دستگاه سختی سنجی LAITZ-TESTER ساخت کشور آلمان استفاده گردید.

جهت انجام آزمون ریز سختی میزان بار ۱۰۰gf انتخاب و مطابق شکل (۵) در هر دو طرف هر یک از فصل مشترک‌های نمونه‌ها پنج آزمون سختی با موقعیت  $1000\mu m$ ،  $500\mu m$ ،  $200\mu m$ ،  $100\mu m$ ،  $50\mu m$  از فصل مشترک مورد نظر و البته به صورت زیگزاگ به گونه‌ای که حوزه تنش‌های هر یک از آزمون‌های سختی تأثیری بر روی آزمون سختی بعدی نداشته باشد، صورت گرفت؛ بنابراین در مجموع تعداد ۱۰ عدد سختی از هر یک از نمونه‌ها به دست آمد که با استفاده نمودن از این نتایج برای هر یک از نمونه‌های جوشکاری انفجاری پروفیل ریز سختی بر حسب فاصله از فصل مشترک ترسیم گردید.



شکل ۵- منطقه تحت آزمون ریز سختی سنجی در نمونه SC2.



شکل ۳- روش و نمونه آزمون استحکام برشی اتصال بر اساس استاندارد DIN 50162 (نمونه آزمون ب) قید و بند و نحوه آزمون [۱۳].

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری

همان طور که در شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شود، با افزایش میزان بار انفجاری، فصل مشترک اتصال موجی تر شده و به سمت حالت گردابه ای با تشکیل مناطق ذوب موضعی انجماد یافته، تغییر شکل داده است.

پراکندگی بیشترین رابطه برای محاسبه سرعت برخورد صفحه پران معادلات گرینی است. که سرعت حدی  $V_T$  صفحه پران را بر حسب پارامتر  $R$  که برابر نسبت جرم ماده منفجره به جرم صفحه پران است و انرژی گرینی (EG) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_T = \sqrt{2EG} \left[ \frac{R}{(1 + \frac{1}{2}R)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

علاوه بر این رابطه، رابطه دیگری نیز برای سرعت حدی بر حسب  $R$  و سرعت انفجار  $V_D$  بیان شده است که در آن  $K$  عدد ثابتی است که به انرژی جنبشی ماده منفجره بستگی دارد:

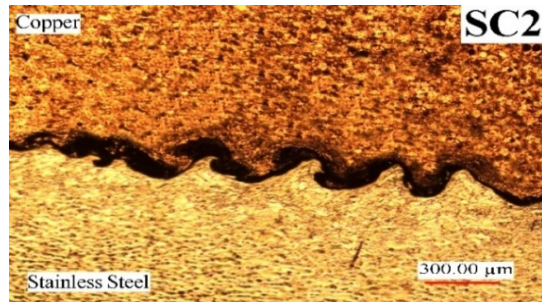
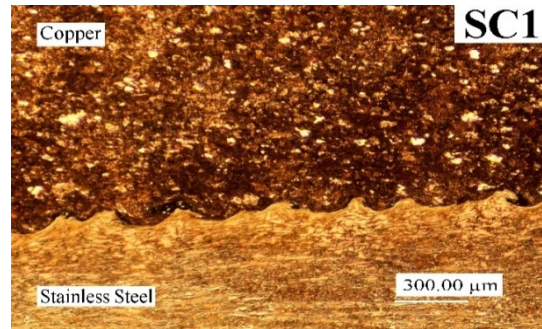
$$V_T = V_D \sqrt{\left( \frac{3R^2}{(R+1)(R+4)(K^2-1)} \right)} \quad (3)$$

با توجه به روابط (۲) و (۳) با افزایش میزان بار انفجاری، سرعت حرکت صفحه پران جهت برخورد افزایش می‌یابد. هم چنین انرژی جنبشی مصرفی ناشی از برخورد  $\Delta KE$  از رابطه زیر قابل محاسبه است:

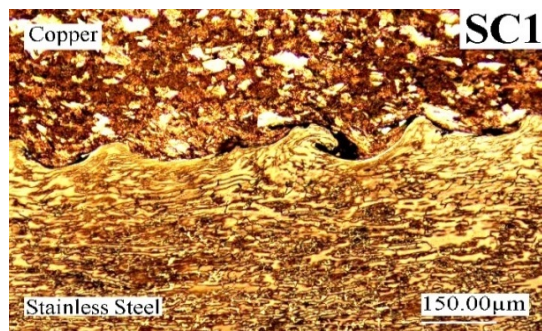
$$\Delta KE = \frac{m_D m_C V_P^2}{2(m_D + m_C)} \quad (4)$$

در این رابطه  $m_D$  و  $m_C$  جرم صفحات پران و پایه در واحد سطح و  $V_P$  سرعت حرکت صفحه پران هستند. با توجه به شکل‌های (۶) و (۷) با افزایش میزان بار انفجاری و افزایش سرعت برخوردی صفحه پران بر اساس رابطه‌های (۲) و (۳)، انرژی جنبشی مصرفی ناشی از برخورد در فصل مشترک اتصال بر اساس رابطه (۴) افزایش یافته و شکل فصل مشترک به سمت گردابه ای تر شدن با افزایش طول و دامنه امواج تغییر شکل داده است. با افزایش میزان بار انفجاری، تغییر شکل صفحه پران و فصل مشترک در حین برخورد بیشتر شده است. با بالا رفتن فشار از استحکام تسلیم دینامیکی دو فلز در نقطه برخورد و هم چنین به علت تفاوت مومنت فشاری در دو سمت فصل مشترک که در نتیجه تفاوت در چگالی و سرعت حرکت موج دو فلز است، نقطه برخورد هنگام اتصال دچار نوسان شده و این نوسانات با افزایش سرعت برخورد افزایش یافته و مواد در مجاورت نقطه برخورد در حجم بزرگ‌تری استحکام خود را از دست داده و رفتار پلاستیک شبه سیال از خود نشان می‌دهند. در نتیجه طول موج در فصل مشترک اتصال با افزایش سرعت برخورد افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر زاویه برخورد، قله موج در حرکت موج انفجاری تغییر شکل پیدا نموده و فصل مشترک گردابه ای ایجاد شده است [۱۰].

به دلیل نزدیک بودن چگالی دو فلز فصل مشترک اتصال می‌بایست به صورت موجی سینوسی متقارن باشد، بنابراین متفاوت بودن شکل امواج در فصل مشترک، ناشی از تغییر زاویه دینامیکی برخورد حین فرآیند جوشکاری است. در جوشکاری انفجاری دو فصل مشترک فلز به فلز و فلز به مذاب انجماد یافته، می‌تواند در فصل مشترک حاصل شود. در کنار یک سرعت حداقل صفحه پران، یک مقدار حداقل انرژی جنبشی



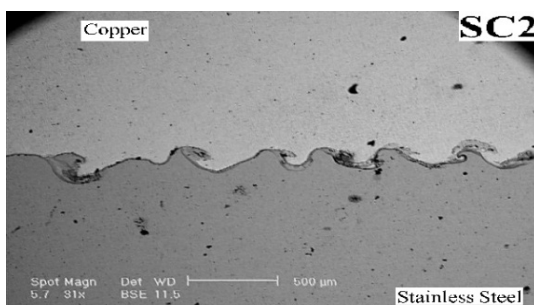
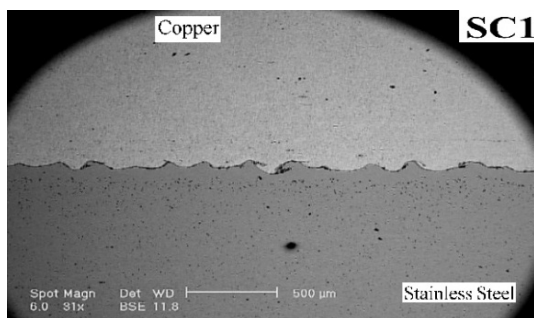
شکل ۶ - تصاویر میکروسکوپ نوری فصل مشترک اتصال در بزرگنمایی (×۵۰).



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ نوری فصل مشترک اتصال در بزرگنمایی (×۱۰۰).

### ۲-۳- بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل (۹) نمایانگر تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک‌های اتصالات است. همان طور که مشاهده می‌شود، مناطق ذوب موضعی انجماد یافته در مجاورت امواج فصل مشترک به وجود آمده‌اند که با افزایش بار انفجاری بر میزان این مناطق افزوده شده است.



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک اتصال نمونه‌ها.



شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از منطقه ذوب موضعی منجمد شده، در نمونه SC1.

در صورتی که جت جهنده تولید شده به طور کامل خارج نشود، ممکن است برخی یا تمام قسمت‌های آن به صورت گردابه‌هایی شکل گرفته و قبل یا بعد موج ایجاد شده در فصل مشترک به دام می‌افتد. انرژی بسیار بالای جت، به صورت حرارت در داخل گردابه‌ها نمایان شده و این امر باعث ایجاد ذوب در مرکز گردابه‌ها می‌شود [۱۱۷]. شکل (۱۰) نمونه‌ای از این گردابه‌های مذاب است.

به دلیل سرعت سرد شدن بسیار بالای این منطقه ساختار بسیار ریز دانه همراه با حفره‌های انقباضی در این منطقه مشاهده می‌شود. زمانی که بسته‌های مذاب درون گردابه‌ها به دام افتادند در حین انجماد و

برخوردی برای اتصال دهی وجود دارد، در اثر برخورد صفحه پران، انرژی جنبشی مصرفی به انرژی پتانسیل تبدیل شده و منجر به تغییر شکل سطوح برخوردی می‌شود. اگر مقدار تغییر شکل پلاستیک کافی نباشد موج‌های کوتاه ایجاد شده و منطقه ذوب موضعی پدیدار نمی‌شود. با افزایش انرژی جنبشی برخوردی تغییر شکل شدید در زیر و تاج موج ایجاد می‌شود و در نتیجه فشارهای برخوردی بالا، گردابه‌ها می‌توانند در فصل مشترک اتصال ایجاد شوند و این گردابه‌ها ممکن است در برخی مناطق فصل مشترک، ایجاد مناطق ذوب موضعی نمایند. این مناطق توسط حرارت داخلی ایجاد شده، بر اساس تغییر شکل پلاستیکی شدید و ایجاد گرمای بی دررو، در اثر استحاله انرژی جنبشی به انرژی حرارتی در طول برخورد یا حرارت آدیباتیک ناشی از گازهای محبوس مابین صفحات می‌تواند 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 [۱۵].

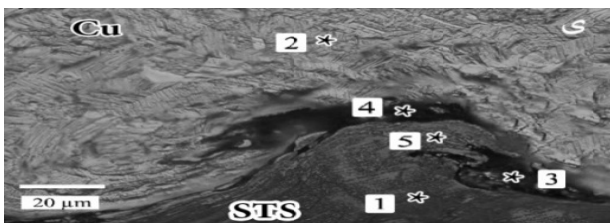
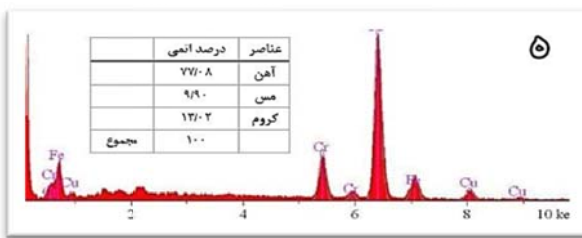
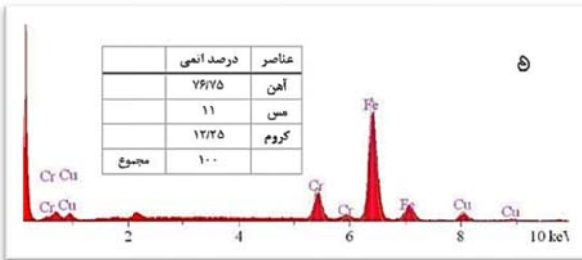
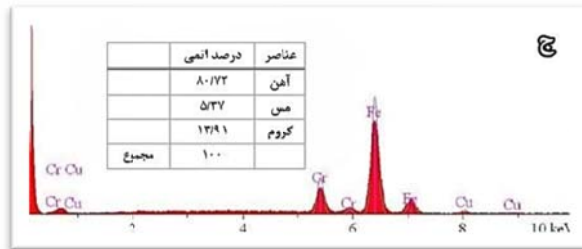
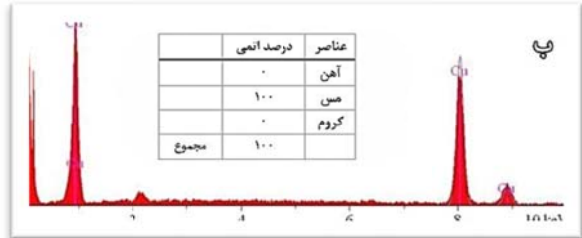
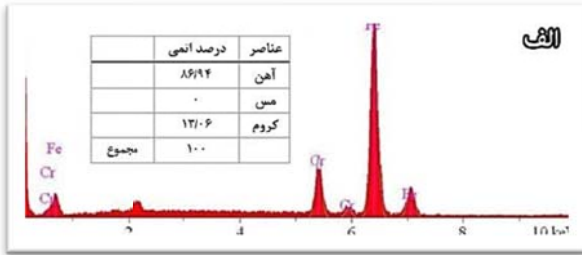
اکبری موسوی و همکاران [۱۵] نیز در تحقیقی که بر روی اتصال انفجاری تیتانیوم به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ انجام دادند، دریافتند که با افزایش بار انفجاری طول و دامنه امواج نیز افزایش یافته، همچنین گردابه‌هایی با ذوب موضعی در جلوی امواج ایجاد شده‌اند. کهرامان و گولنج [۹] نیز در اتصال انفجاری مس به تیتانیوم، موجی تر شدن فصل مشترک را ناشی از افزایش بار انفجاری عنوان کردند.

مورد دیگری که مشاهده گردید کشیدگی دانه‌ها در فصل مشترک اتصال است (شکل ۸)، که علت آن را می‌توان میزان تغییر شکل پلاستیکی شدید در آن منطقه عنوان کرد. ایتاکی و همکاران [۱۶]، اکبری موسوی و همکاران [۱۵] و دورگوتلو و همکاران [۴] نیز کشیدگی دانه در مرز اتصال را مشاهده نموده‌اند.

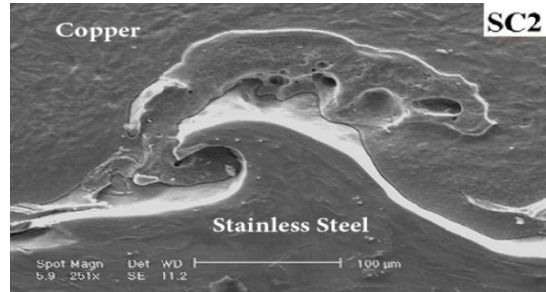


شکل ۸- تصویر میکروسکوپ نوری فصل مشترک اتصال نمونه‌ها.

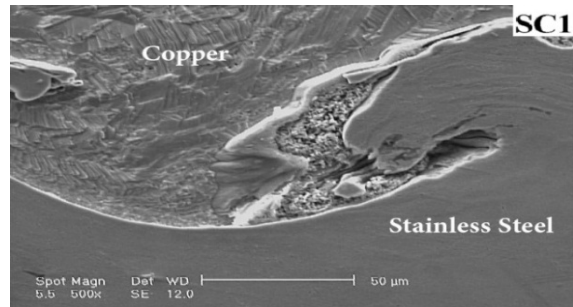
سرد شدن، حفره‌هایی را در ساختار منطقه اتصال پدید می‌آورند [۱۸]، این حفرات در شکل‌های (۱۱) و (۱۳) نشان داده شده است.



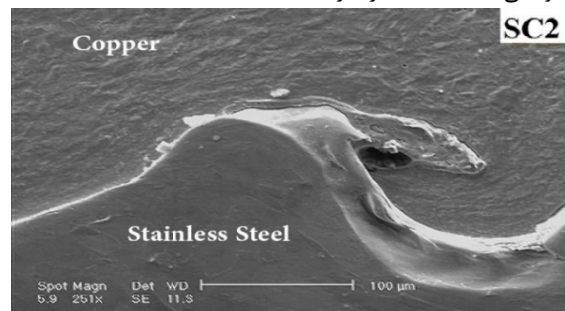
شکل ۱۴ - آنالیز EDS از مناطق فصل مشترک، الف) منطقه فولاد (نقطه ۱)، ب) منطقه مس (نقطه ۲)، ج) منطقه جلوی گردابه (نقطه ۳)، د) منطقه بالای موج (نقطه ۴)، ه) منطقه موج (نقطه ۵)، ی) مناطق مورد آنالیز.



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از حفرات ایجادشده در منطقه مذاب، در نمونه SC2.



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از منطقه ذوب موضعی منجمد شده، در نمونه SC1.

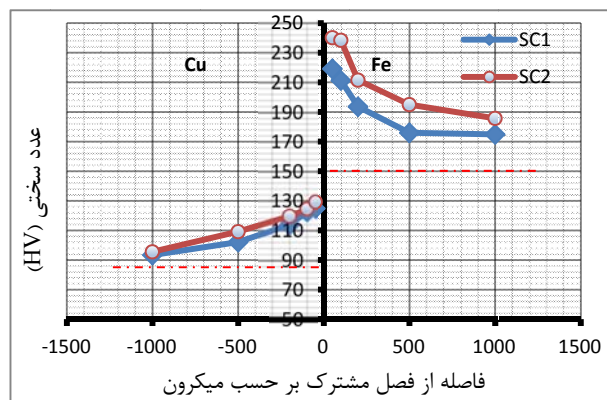


شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از حفره ایجادشده در منطقه مذاب منجمد شده موضعی، در نمونه SC2.

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمایانگر مناطق ذوب موضعی انجماد یافته در نمونه‌های آزمون هستند. با توجه به بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت مس نسبت به فولاد، این ترکیبات به دلیل انتقال حرارت کمتر در سمت فولاد تشکیل شده‌اند. آنالیز EDS نیز برای نمونه از مناطق نشان داده در شکل مربوط به فلزات پایه و فصل مشترک اتصال صورت پذیرفت؛ که این مناطق و نتایج این آنالیزها در شکل (۱۴) مشاهده می‌شوند. نتایج این آنالیزها نمایانگر ایجاد ترکیبی مخلوط از هر دو صفحه پایه و پران، در این مناطق موضعی، بر اساس حرکت تلاطمی و چرخشی جت جهنده گیر افتاده، است [۱۹].

## ۳-۳- نتایج ریز سختی سنجی

نتایج حاصل از آزمون ریز سختی برای هر یک از دو نمونه در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. عدد سختی قبل از آزمون جوشکاری برای صفحه مسی  $92/HV$  و صفحه فولادی  $172/1 HV$  به دست آمد.



شکل ۱۵- مقایسه پروفیل سختی هر دو نمونه بر حسب فاصله از فصل مشترک.

نتایج نشان می‌دهد که سختی در هر دو منطقه مس و فولاد در نزدیک فصل مشترک اتصال به صورت قابل توجهی افزایش داشته، در نمونه SC2 سختی در قسمت فولاد از  $185/7 HV$  در فاصله  $1000$  میکرومتر از فصل مشترک، به  $240/2 HV$  در فاصله  $50$  میکرومتر افزایش یافته که با توجه به مطالعات و بررسی‌های به عمل آمده علت را می‌توان پدیده سخت شدن شوکی<sup>۱</sup> فلزات که در اثر انرژی جنبشی برخوردی انتقال یافته، ناشی از موج انفجاری صورت می‌گیرد و همچنین کار سرد شدید حاصل از برخورد دو صفحه، معرفی نمود [۶].

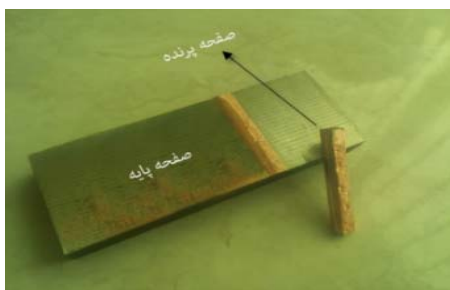
از طرفی دیگر معلوم گردید عدد سختی در نمونه SC2 در هر دو طرف فصل مشترک بیشتر از نمونه SC1 است، به طوری که سختی در قسمت فولاد در فاصله  $50$  میکرومتر از فصل مشترک در نمونه SC1،  $219/2 HV$  و در نمونه SC2،  $240/2 HV$  به دست آمد، همچنین سختی در سمت مس و فاصله  $50$  میکرومتر در نمونه SC1،  $124/8 HV$  و در نمونه SC2،  $129 HV$  حاصل گردید که علت این امر را می‌توان افزایش انرژی جنبشی برخورد و در نتیجه تغییر شکل پلاستیکی شدیدتر به دلیل بار انفجاری بیشتر در نمونه SC2 بیان نمود.

## ۳-۴- نتایج استحکام برش کششی

به دلیل امکان تشکیل ترکیبات ذوب موضعی و بین فلزی و تفاوت خواص مس و فولاد در اتصال غیر هم جنس خواص استحکامی این فصل مشترک مورد اهمیت بوده و بررسی شده است.

با توجه به استاندارد DIN50162، شکست در نمونه مورد آزمون

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 است. همان طور که در شکل (۱۶) مشخص است با انجام آزمون استحکام برشی مشخص شد که در نمونه‌ها، شکست در لایه مسی اتفاق افتاده است و هیچ شکستی به دلیل جدایش نمونه‌ها از فصل مشترک رخ نداده است. این موضوع نشانگر آن است که در این نمونه‌ها، استحکام باند جوش ایجادشده بیشتر از استحکام لایه مسی است. استحکام برشی استاندارد مس  $132 MPa$  است در صورتی برای نمونه‌های جوشکاری شده مطابق جدول (۴) استحکام  $143/6 MPa$  در نمونه SC1 و  $154/6 MPa$  در نمونه SC2 به دست آمد که دلیل آن را کارسختی ایجادشده در نمونه‌های جوشکاری شده می‌توان عنوان کرد، همچنین افزایش استحکام برشی از  $143/6 MPa$  در نمونه SC1 به  $154/6 MPa$  در نمونه SC2، به دلیل انرژی برخوردی بالاتر و در نتیجه کارسختی بیشتر در نمونه SC2 است.



شکل ۱۶- شکست در نمونه استحکام.

جدول ۴- نتایج آزمون استحکام سنجی فصل مشترک مس به فولاد.

نمونه	استحکام (MPa)
SC1	۱۴۳/۶
SC2	۱۵۴/۶

شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نمودارهای نیرو بر حسب جابجایی آزمون استحکام کشش برشی را نشان می‌دهند که بر اساس آن‌ها تنش شکست محاسبه گردیده است. محققان دیگری نیز عدم جدایش از فصل مشترک اتصال در ورق‌های چندلایه پس از آزمون استحکام برشی را گزارش کرده‌اند. به طور مثال ممالیس و همکارانش [۲۰] عدم جدایش از فصل مشترک مس و آلومینیم، دورگوتلو و همکاران [۴] عدم جدایش از فصل مشترک فولاد زنگ نزن و مس و کهرامان و گولنج [۹] عدم جدایش از فصل مشترک تیتانیوم و مس را در تحقیقات خود گزارش کرده‌اند.

1- Shok Hardening  
2- Cold Working

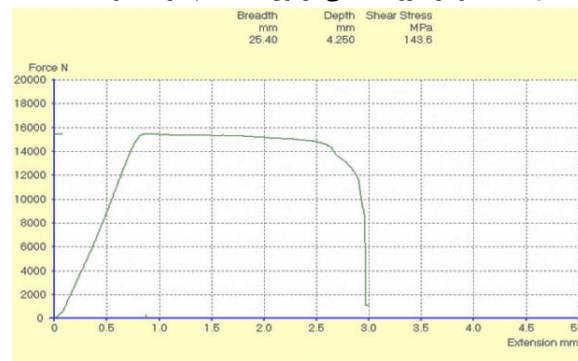


## مراجع

- [1] AWS Welding Handbook "Welding Processes"; American Welding Society, 9<sup>th</sup> Edition, 2007.
- [2] Blazynski, T. Z. "Explosive Forming Welding and Compaction"; Applied Science Publisher, London and New York, 1983.
- [3] Fendik, F. "Recent Development in Explosive Welding"; Mater. Des. 2011, 32, 1081-1093.
- [4] Durgutlu, A.; Okuyucu, H.; Gulenc, B. "Investigation of Effect of the Stand-off Distance on Interface Characteristics of Explosively Welded Copper and Stainless Steel"; Mater. Des. 2008, 29, 1480-1484.
- [5] اکبری موسوی سید علی اصغر و فتحی یونسی، البرز "مقایسه فصل مشترک جوشکاری انفجاری فولاد St14/پرینج Ms90 با فصل مشترک پیش بینی شده به کمک پنجره جوشکاری"، مجله علمی پژوهشی مواد پراثری، سال پنجم، شماره ۲، ۱۳۸۹.
- [6] Gulenc, B. "Investigation of Interface Properties and Weldability of Aluminum and Copper Plates by Explosive Welding Method"; Mater. Des. 2008, 29, 275-278.
- [7] زمانی، جلال؛ باقری، سید مسعود؛ مهدی پور عمرانی، علی "اتصال گوه‌ای فلزات آلومینیوم و مس به وسیله جوشکاری انفجاری و بررسی فصل مشترک اتصال"، مجله مکانیک هوافضا، جلد ۵، شماره ۳، ۱۳۸۸.
- [8] Kahraman, N.; Gulence, B.; Findik, F. "Joining of Titanium/Stainless Steel by Explosive Welding and Effect on Interface"; J. Mater. Process. Technol. 2005, 169, 127-133.
- [9] Kahraman, N.; Gulence, B. "Microstructural and Mechanical Properties of Cu-Ti Plates Bonded Through Explosive Welding Process"; J. Mater. Process. Technol. 2005, 169, 67-71.
- [10] خانزاده قره شیران، محمدرضا؛ اکبری موسوی، سید علی اصغر؛ آماده، احمدعلی؛ لیاقت، غلامحسین "بررسی جوشکاری انفجاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به فولاد گرمکار H13"، رساله دکتری مهندسی مواد دانشکده مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۳۹۱.
- [11] ASTM A578 "Standard Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Rolled Steel Plates for Special Applications"; Book of Standards, 2012, 01.04.
- [12] "Standard Practice for Micro Etching Metals and Alloys"; ASTM E407, Philadelphia, 2012.
- [13] DIN Standard Number 50162 "Determination of Shear Strength between Cladding Metal and Parent Metal in Shear Test"; 1975.
- [14] "Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials"; ASTM E384-11, Philadelphia, 2012.
- [15] Akbari Mousavi, S. A. A.; Farhadi Sartangi, P. "Experimental Investigation of Explosive Welding of Cp-Titanium/AISI 304 Stainless Steel"; Mater. Des. 2009, 30, 459-468.
- [16] Ettiqa, S.; Langlois, L.; Bigot, R. "Cobalt-Based Super Alloy Layers Deposited on X38CrMoV5 Steel Base Metal by Explosion Cladding Process"; Surf. Coat. Technol. 2008, 202, 3306-3315.
- [17] Crossland, B. "Explosive Welding of Metals and its Application"; Clarendon Press, Oxford, 1982.
- [18] Wittman, R. H. "Computer Selection of the Optimum Explosive Loading and Welding Geometry" Proceeding of 5<sup>th</sup> International Symposium on Use of Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials of New Properties, 1975, 4, 1-16.
- [19] Akbari Mousavi, S. A. A.; Al-Hassani, S. T. S. "Numerical and Experimental Studies of Mechanism of Wavy Interface Formations in Explosive/Impact Welding"; J. Mech. Phys. Solids 2005, 53, 2501-2528.
- [20] Mamalis, A. G.; Vaxevanidis, N. M.; Szalay, A.; Prohaszka, J. "Fabrication of Aluminum/Copper Bimetals by Explosive Cladding and Rolling"; J. Mater. Process. Technol. 1994, 44, 99-117.



شکل ۱۷- نمودار نیرو جابجایی آزمون استحکام برای نمونه SC1.



شکل ۱۸ - نمودار نیرو جابجایی آزمون استحکام برای نمونه SC2.

## ۴- نتیجه گیری

نتایج متالوگرافی نشان می دهد که فصل مشترک ها به دلیل نزدیک بودن چگالی دو صفحه، به صورت موجی سینوسی متقارن هستند، با این تفاوت که با افزایش بار انفجاری دامنه و طول امواج افزایش یافت که این امر به دلیل سرعت برخورد بالاتر و تغییر شکل پلاستیکی بیشتر صفحات در فصل مشترک اتصال است، همچنین مناطق ذوب موضعی منجمد شده در مجاورت موج ها در فصل مشترک های مس / فولاد در اثر افزایش بار انفجاری، بیشتر شده است. آنالیز عنصری ترکیب مناطق ذوب موضعی، نمایانگر مخلوطی از عناصر ورق های مس و فولاد پایه است که به دلیل ماهیت چرخشی جت جهنده و چرخش گردابه ای حاصل شده است. نتایج آزمون ریز سختی سنجی نمایانگر افزایش سختی در نزدیک فصل مشترک های اتصال به علت رخ دادن پدیده سخت شدن شوکی فلزات بوده و بالاترین عدد سختی در فصل مشترک، مربوط به نمونه آزمون با بار انفجاری بیشتر و نزدیک تر به فصل مشترک در سمت فولاد است. با انجام آزمون استحکام سنجی برش کششی مشخص شد که در نمونه ها شکست در لایه مسی اتفاق افتاده است و هیچ شکستی به دلیل جدایش نمونه ها از فصل مشترک رخ نداده است. این موضوع نشان گر این است که استحکام باند جوش ایجاد شده بیشتر از استحکام برشی لایه مسی است. همچنین افزایش استحکام برشی در نمونه SC2 را می توان به دلیل کارسختی بیشتر در نمونه عنوان کرد.