

مقایسه‌ی فصل مشترک جوشکاری انفجاری فولاد St ۱۴/۲۰ / برنج Ms ۹۰ با فصل مشترک پیش بینی شده به کمک پنجره جوشکاری

سید علی اصغر اکبری موسوی^{۱*}، البرز فتحی یونسی^۲

دانشکده‌ی مهندسی متالورژی و مواد - پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

(تاریخ وصول: ۸۸/۹/۲۳، تاریخ پذیرش: ۸۹/۵/۱۹)

چکیده

جوشکاری انفجاری یک فرآیند حالت جامد بوده که در آن اتصال در اثر برخورد مایل شدید دو قطعه تحت انفجار کنترل شده، ایجاد می‌گردد. در این تحقیق، صفحات برنج Ms ۹۰ به فولاد St ۱۴/۲۰ به صورت آرایش موازی و تحت فاصله‌های توقف متفاوت بر اساس پارامترهای اتخاذ شده در محدوده پنجره‌ی جوشکاری انفجاری آنها، با یکدیگر اتصال داده شده‌اند. از لحاظ عملی، عوامل مختلفی مانند فاصله توقف، نوع و مقدار ماده‌ی منفجره، زاویه‌ی قرارگیری صفحات و... بر روی اتصال قابل قبول تاثیر دارند. اما همه‌ی این عوامل را می‌توان تحت عنوان دو پارامتر کلی زاویه‌ی دینامیکی برخورد و سرعت برخورد جمع بندی کرد. بنابراین در نمودار سرعت برخورد برحسب زاویه‌ی دینامیکی برخورد، محدوده‌ای که تحت عنوان پنجره‌ی جوشکاری شناخته می‌شود، مشخص کننده‌ی محدوده‌ی اتصال قابل قبول می‌باشد. اهمیت پنجره‌ی جوشکاری می‌تواند در تعیین پارامترهای عملیاتی بهینه قبل از انجام عملیات و صرفه جویی در زمان و هزینه باشد. در این مقاله با توجه به روابط قابل قبول، پنجره‌ی جوشکاری مناسبی برای اتصال ورق‌های برنج Ms ۹۰ و فولاد St ۱۴/۲۰ رسم شد و سپس سطح مقطع اتصالات به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج متالوگرافی نشان داد که با افزایش خرج 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. این امر با افزایش خرج انفجاری تشدید یافته و تا عمق بیشتری در هر دو قطعه نفوذ می‌کنند. همچنین در این پژوهش، شبیه سازی فرآیند جوشکاری انفجاری با استفاده از نرم افزار آباکوس ۶/۷، انجام گرفت و مقادیر فشار در منطقه‌ی برخورد برای تمامی آزمایش‌ها محاسبه شدند.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری انفجاری، پنجره‌ی جوشکاری، فولاد St ۱۴/۲۰، برنج Ms ۹۰، شبیه سازی.

۱- مقدمه

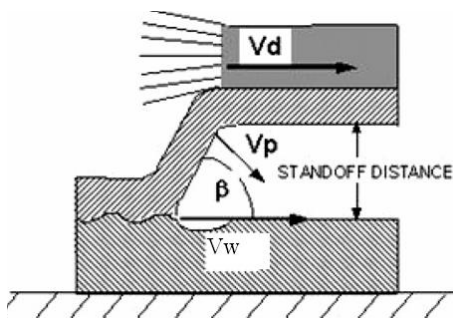
شدت کاهش می‌دهد. بنابراین در سال‌های اخیر گرایش بیشتری نسبت به روش‌های جوشکاری حالت جامد مخصوصاً در مواضع حساس ایجاد شده است. جوشکاری انفجاری یکی از انواع روش‌های جوشکاری حالت جامد می‌باشد که اساس آن را اتصال مکانیکی در مقیاس اتمی بین فصل مشترک دو فلز

جوشکاری فلزات غیر هم جنس از طریق روش‌های مرسوم همواره به صورت معضلی پیش روی صنایع مختلف قرار داشته است. زیرا از طرفی اختلاف در خواص فیزیکی مواد باعث ایجاد عیوب در فلز جوش و مناطق اطراف می‌شود و از طرف دیگر تشکیل ترکیبات مضر بین فلزی خواص مکانیکی اتصال را به

* E-mail: akbarimusavi@ut.ac.ir

۱- استادیار

۲- کارشناس ارشد
www.SID.ir

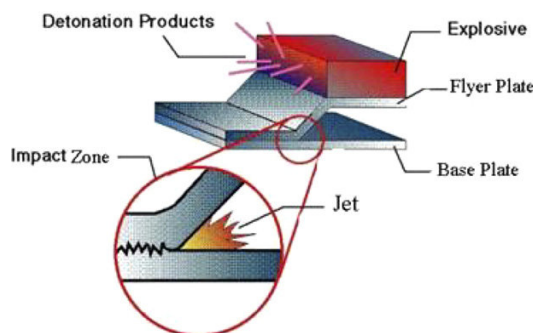


شکل ۲- متغیرهای فرآیند جوشکاری انفجاری [۱]

این عوامل به طور مستقیم با انرژی جنبشی حاصل از برخورد صفحه‌ی پرنده^۱ به صفحه‌ی پایه^۲، ارتباط دارند. مقدار انرژی حاصل از برخورد، با افزایش سرعت انفجار، سرعت برخورد و فاصله‌ی توقف، افزایش می‌یابد. با افزایش انرژی، فصل مشترک از حالت صاف به حالت موجی تبدیل می‌شود. با افزایش بیش از حد انرژی، ممکن است تبدیل انرژی صورت گیرد و انرژی جنبشی به گرما تبدیل شود. گرمای متمرکز در مرز دو فلز باعث ایجاد مذاب موضعی در فصل مشترک و ترکیبات بین فلزی می‌شود.

نیاز به صاف یا موجی بودن فصل مشترک را کاربرد اتصال مورد نظر تعیین می‌کند. اگر فلزات مورد نظر ترکیبات بین فلزی ترد و مضر داشته باشند، لازم است که در حد امکان از به وجود آمدن موج، جلوگیری شود تا خواص مکانیکی موضع اتصال کاهش نیابد. در نتیجه در این حالت لازم است که فصل مشترک به صورت صاف وجود داشته باشد و ترکیبات ترد بین فلزی به وجود نیاید. لازم به ذکر است که چون شرایط فصل مشترک صاف یک حالت مرزی بین عدم اتصال و ایجاد اتصال است، امکان دارد با تغییرات احتمالی و تصادفی، فرآیند اتصال به طور کلی برقرار نشود و بنابراین حتماً باید در تنظیم متغیرها جوانب احتیاط را رعایت کرد. در فصل مشترک موجی خطرات ناشی از عدم اتصال به حداقل رسیده و استحکام بالاتری از موضع جوشکاری به دست می‌آید. لذا، تنظیم و تعیین پارامترهای جوشکاری انفجاری از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. اهمیت این موضوع هنگامی بیشتر نمایان می‌شود که عواملی مانند سرعت بالای فرآیند، عدم دسترسی به موضع جوش در هنگام فرآیند و همچنین سطوح زیادی که در یک پاس جوشکاری می‌شوند، در نظر گرفته شود.

تشکیل می‌دهد. در این فرآیند به وسیله نیروی حاصل از انفجار یک ماده‌ی منفجره، دو سطح اتصال با سرعت زیاد به صورت مایل به هم برخورد می‌کنند و اتصال بسیار مناسبی را از منظر فیزیکی پدید می‌آورند [۱ و ۲]. شرط اصلی ایجاد این اتصال قوی، تشکیل یک جت پلاسمایی در محل برخورد دو فلز است. در هنگام انفجار، به سبب نیروی شدیدی که در زمان بسیار کمی به سطوح وارد می‌شود، لایه‌های سطحی توسط جت پلازما از فاصله بین صفحات خارج می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- مراحل فرآیند جوشکاری انفجاری [۱]

این جت پلازما در هنگام پیش روی جبهه‌ی انفجار، لایه‌های اکسیدی را با خود می‌برد و سطحی عاری از هرگونه عیب و یا اکسید را به جای می‌گذارد. در نتیجه در فصل مشترک جوشکاری انفجاری در صورتی که کل جت از وسط صفحات خارج شوند، اکسیدهای سطحی باقی مانده مشاهده نخواهد شد [۱ و ۳]. با توجه به اینکه نیروی حاصل از انفجار بسیار زیاد است و هم چنین در مدت زمان کمی به سطح اتصال اعمال می‌شود، می‌توان رفتار فلزات مختلف را در زمان اعمال فشار حاصل انفجار در محل برخورد، به صورت سیال ویسکوز فرض کرد [۲]. فصل مشترک بین صفحات می‌تواند به شکل صاف، موجی، موجی همراه با لایه‌ی مذاب و فصل مشترک مذاب کامل، حاصل شود. عواملی که باعث تعیین شکل فصل مشترک اعم از موجی یا غیر موجی و همچنین فرکانس و دامنه‌ی امواج می‌شوند عبارتند از (شکل ۲):

۱- سرعت انفجار V_d ؛

۲- سرعت برخورد V_p ؛

۳- فاصله‌ی اولیه سطوح برخورد.

1- Flyer plate
2- Base plate

دورگوتلو^۲ و همکاران، با تغییر در پارامترهای جوشکاری، اتصال فولاد زنگ نزن را به مس خالص بررسی کردند [۵ و ۶]. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که در جوشکاری این دو نوع آلیاژها، با افزایش فاصله‌ی توقف و بار انفجاری، فصل مشترک از حالت صاف به موجی تبدیل می‌شود. با افزایش فاصله‌ی 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. آن‌ها نتیجه گرفتند که علاوه بر امکان پدید آمدن ترکیبات ترد بین فلزی و تشکیل مذاب در فصل مشترک، به سبب کار مکانیکی شدیدی که در هنگام جوشکاری در فلزات رخ می‌دهد، سختی در کل نقاط صفحه‌ی پایه و صفحه‌ی پرندۀ بیشتر است. علیرغم مشاهده‌ی 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، تاثیر زیادی بر خواص مکانیکی دو آلیاژ نداشته است.

در هیچ کدام از تحقیقات انجام شده قبلی، پنجره‌ی جوشکاری به طور خاص برای آلیاژهای پایه‌ی مس و آهن رسم نشده است. در این مقاله سعی بر آن است که علاوه بر رسم پنجره‌ی جوشکاری برای اتصال برنج به فولاد کربنی، این یافته‌ها با نتایج عملی و شبیه سازی قیاس شود تا از صحت و سقم این پنجره اطمینان حاصل شود.

۲- رسم پنجره‌ی جوشکاری

در این بخش ابتدا به نحوه ارائه هر کدام از روابط پنجره‌ی جوشکاری پرداخته می‌شود و در نهایت با استفاده از آن روابط، پنجره‌ی جوشکاری انفجاری برای اتصال فولاد St ۱۴ به برنج Ms ۹۰ رسم خواهد شد.

در جدول ۱ مشخصات فیزیکی و خواص مکانیکی فولاد St ۱۴ و برنج Ms ۹۰ مورد استفاده در این تحقیق، آورده شده است. برای رسم پنجره‌ی جوشکاری، از این ثوابت استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی فولاد St ۱۴ و برنج Ms ۹۰.

ضخامت (mm)	استحکام تسلیم (MPa)	سختی (ویکرز)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	دانسیته (gr/cm ³)	
۴/۵	۲۰۹	۲۱۷	۲۹	۲۰۰	۷/۸	فولاد St ۱۴
۲	۸۴	۱۰۳	۰/۳۴	۱۱۵	۸/۸	برنج MS ۹۰

محققین کلیه پارامترهای قابل تنظیم در فرآیند جوشکاری انفجاری را درون دو عامل اصلی سرعت جوشکاری (V_w) و زاویه‌ی دینامیکی برخورد (β) خلاصه کرده و روابطی را برای شرایط مرزی مختلف و حالت‌های متفاوت فصل مشترک ارائه کرده‌اند. اگر کلیه این روابط با در نظر گرفتن ثوابت فیزیکی هر دو ماده‌ی خاص در نموداری که محور x آن سرعت جوشکاری و محور y آن، زاویه‌ی دینامیکی برخورد باشد، رسم شود نموداری حاصل می‌شود که به عنوان پنجره‌ی جوشکاری انفجاری موسوم است. هدف از رسم پنجره‌ی جوشکاری، پیش بینی وضعیت جوش قبل از انفجار است. یکی از اولین فواید آن می‌تواند صرفه جویی اقتصادی باشد که تعداد تست‌های مورد نیاز جهت حصول به جوش بهینه را کاهش می‌دهد.

در این مقاله سعی بر آن است که ابتدا با توجه به روابط و ثوابت فیزیکی برنج Ms ۹۰ و فولاد St ۱۴ پنجره‌ی جوشکاری برای اتصال این دو آلیاژ رسم شود. سپس با توجه به ریزساختارهای به دست آمده از نتایج عملی اتصال، صحت و سقم این پنجره‌ی جوشکاری بررسی گردد.

جوشکاری انفجاری آلیاژهای مس به آلیاژهای آهنی، توسط بعضی از محققین انجام شده است. با توجه به اینکه اتصال مس به فولادهای زنگ نزن به طور گسترده‌ای در بدنه‌ی راکتورهای هسته‌ای کاربرد دارند، لذا اغلب تحقیقات، بر روی جوشکاری مس به فولادهای زنگ نزن انجام گرفته است.

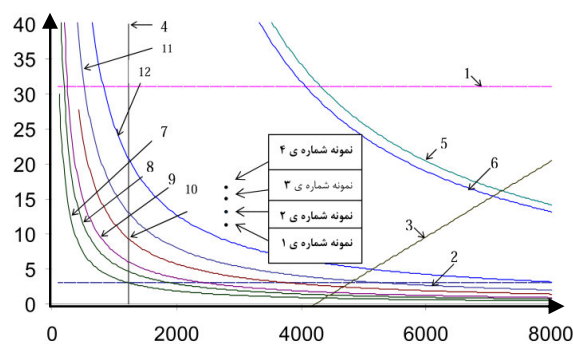
لیدلی و همکارانش آلیاژ مس با ذرات Al_2O_3 را برای اتصال به فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L بررسی کردند [۴]. این محققین یک بار اتصال این فلزات را به صورت جوش انفجاری و بار دیگر با کمک روش پرس هیدرواستاتیک داغ^۱ انجام دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استحکام نمونه‌های جوشکاری انفجاری به علت باندهای مکانیکی مستحکمی که در فصل مشترک پدید می‌آید و همچنین عدم وجود تخلخل در مرز اتصال، نسبت به روش پرس هیدرواستاتیک داغ، بالاتر است. اما در دماهای بالا این اثر تا حدودی از بین می‌رود زیرا در روش پرس هیدرواستاتیک داغ، دامنه‌ی نفوذ اتمی بیشتر است و اتصال تا دماهای بالاتری می‌تواند استحکام خود را حفظ کند.

۱-۲- حداقل و حداکثر زاویه‌ی دینامیکی

از نظر هندسی، زاویه‌ی کمینه‌ای وجود دارد که کمتر از آن، امکان تشکیل اتصال وجود ندارد. همچنین در زوایای بسیار بالای دینامیکی ممکن است فشار موضعی لازم برای اتصال محقق نشود. بنابراین در پنجره‌های جوشکاری همیشه حداقل و حداکثر زاویه‌ای در نظر گرفته می‌شود که در این مقاله حداقل زاویه‌ی ۳ درجه و حداکثر زاویه‌ی ۳۱ درجه در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ (پنجره‌ی جوشکاری رسم شده) این دو خط به ترتیب با شماره‌های ۱ و ۲ مشخص شده‌اند.

۲-۲- تشکیل جت پلاسمایی

همان گونه که گفته شد، تشکیل جت پلاسمایی شرط لازم ایجاد اتصال است [۳]. برای ایجاد جت، بایستی رفتار سیال گونه مواد محقق شود. بنابراین در تعیین این زاویه، مکانیک سیالات بیشتر از خواصی مانند استحکام ماده موثر است. کوان و همکاران [۳] نشان دادند که سرعت موج انفجاری، بایستی کمتر از سرعت موج شوکی^۱، باشد تا جت پلاسمایی بین دو قطعه پدید آید و این حالت را به عنوان حد مرزی در نظر گرفتند. این محققین سپس نمودارهایی را بر اساس روابط تجربی رسم کردند. در اینجا یکی از این نمودارها که برای اتصال Cu-Cu رسم شده است، تحت نام نمودار شماره ۳ در شکل ۳ نام گذاری شده است.



شکل ۳- پنجره‌ی جوشکاری انفجاری برای اتصال برنج MS۹۰ به فولاد St ۱۴/۲۰

۱ و ۲: حد بالا و پایین هندسی زاویه دینامیکی برخورد؛

۳: معادلات تجربی کوان برای مرز سمت راست؛

۴: مرز تغییر حالت صاف به موجی؛

۵ و ۶: مرز بالای پنجره جوشکاری با استفاده از رابطه دربیاس؛

۷ و ۸: مرز پایین پنجره جوشکاری با استفاده از رابطه ویتمن-دربیاس؛

۹ و ۱۰: مرز پایین پنجره جوشکاری با استفاده از رابطه کوالیسکیچ.

۲-۳- ناحیه تغییر نوع فصل مشترک از صاف به موجی

همان طوری که در قسمت مقدمه توضیح داده شد، زمانی که قطعه تحت فشار بسیار زیاد قرار می‌گیرد، رفتاری سیال گونه را پیدا می‌کند. پس طبیعی به نظر می‌رسد که می‌توان با استفاده از تعریف یک عدد رینولدز، تغییر رفتار سیال از حالت جریان آرام به حالت نا آرام (تغییر فصل مشترک صاف به موجی) را مدل سازی کرد. کوان و همکاران [۳] وضعیت های مختلفی را برای این تغییر حالت بیان کردند. آن‌ها ادعا کردند که در سرعت های تغییر حالت پایین، زاویه‌ی برخورد تاثیری ندارد و رابطه‌ی زیر را برای عدد رینولدز ارائه دادند.

$$R = \frac{(\rho_f + \rho_p) \times V_w^2}{2 \times (H_f + H_p)} \quad (1)$$

در این رابطه R عدد رینولدز، ρ_f, ρ_p به ترتیب دانسیته‌های صفحه‌ی پایه و صفحه‌ی پرند و H_f, H_p به ترتیب سختی‌های صفحه‌ی پایه و صفحه‌ی پرند و V_w سرعت جوشکاری از دید ناظری است که روی جبهه‌ی انفجار قرار دارد. در مواقعی که دو صفحه با آرایش موازی نسبت با هم، قرار می‌گیرند، ثابت می‌شود که V_w با سرعت پیشروی جبهه‌ی انفجار V_d یکسان است. آنها مرز بین فصل مشترک صاف و موجی را با عدد رینولدز ۱۰/۶ نشان دادند. لازم به ذکر است که در آزمایش‌های انجام شده آنها، زاویه‌ی دینامیکی برخورد برابر ۱۲ درجه بود. هر چند که آنها این عدد رینولدز ۱۰/۶ را برای همه زاویه‌ها پیشنهاد کردند. با محاسبات انجام شده، مقدار V_w برای فصل مشترک برنج و فولاد برابر ۱۲۳۱ متر بر ثانیه به دست آمد. این خط در شکل ۳ با شماره‌ی ۴ مشخص شده است.

۲-۴- مرز بالایی پنجره‌ی جوشکاری

بسیاری از فلزات و آلیاژهایی که از طریق جوشکاری انفجاری به هم متصل می‌شوند، اگر با روش‌های معمول ذوبی به هم اتصال یابند، ترکیبات بین فلزی تردی را تشکیل می‌دهند که به شدت خواص مکانیکی فلز جوش را کاهش خواهند داد. بنابراین می‌توان گفت یکی از مشکلات عمده در فرآیند جوش انفجاری، تشکیل مذاب در مرز مشترک دو فلز است.

همان طور که در مقدمه ذکر شد، اگر انرژی حاصل از برخورد دو سطح بیش از حد باشد ممکن است این انرژی به صورت آدیاباتیک به گرما تبدیل شود و بسته به هندسه‌ی جوش و همچنین نقطه‌ی ذوب فلزات، بسته‌های ناپیوسته یا حتی لایه پیوسته‌ای از مذاب در فصل مشترک دو آلیاژ ایجاد شود. حتی

۲-۵- مرز پایینی پنجره‌ی جوشکاری

مرز پایین جوشکاری، نشان دهنده حداقل انرژی ضربه مربوط به صفحه‌ی پرنده جهت تشکیل جت می‌باشد که تنش لازم جهت سیلان و میزان فشار ناشی از برخورد و زمان تداوم این فشار را تعیین می‌کند.

تفاوت این منحنی با منحنی سمت راست این است که در سمت راست ناحیه مافوق صوت قرار دارد اما مرز پایینی شرایط به دست آوردن حالت سیال مانند را برای به وجود آمدن جت تشریح می‌کند.

دریاس و همکاران و ویتمن به نظر می‌رسد که برخلاف مرز بالایی با هم توافق داشته باشند. این محققین فرض کرده‌اند که وضعیت مرز پایینی توسط مشخصات مکانیکی و فیزیکی تعیین می‌شود. که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۷ و ۸].

$$\sin \beta = k \sqrt{\frac{H_v}{\rho V_w^2}} \quad (6)$$

در این رابطه ρ دانسیته، H_v سختی بر اساس ویکرز و k عدد ثابت مربوط به وضعیت سطحی است. اگر کیفیت سطحی بسیار عالی باشد k برابر با ۰/۶ و اگر کیفیت سطح پایین باشد، مقدار k برابر ۱/۲ در نظر گرفته خواهد شد. برای رسم مرز پایینی پنجره‌ی جوشکاری انفجاری برنج/فولاد طبق این رابطه، چهار نمودار رسم شد. دو نمودار برای کیفیت سطحی پایین برای برنج و فولاد و دو نمودار برای کیفیت سطحی بالا برای این دو آلیاژ رسم شده که در ذیل آورده شده است.

(۷) معادله برای برنج در حالت کیفیت سطحی بالا:

$$\sin \beta = 0.6 \times \sqrt{\frac{103 \times 10^6}{8800}} = \frac{64.9}{V_w}$$

(۸) معادله برای برنج در حالت کیفیت سطحی پایین:

$$\sin \beta = 1.2 \times \sqrt{\frac{103 \times 10^6}{8800}} = \frac{129.8}{V_w}$$

(۹) معادله برای فولاد در حالت کیفیت سطحی بالا:

$$\sin \beta = 0.6 \times \sqrt{\frac{217 \times 10^6}{7800}} = \frac{100}{V_w}$$

(۱۰) معادله برای فولاد در حالت کیفیت سطحی پایین:

$$\sin \beta = 1.2 \times \sqrt{\frac{217 \times 10^6}{7800}} = \frac{200}{V_w}$$

اگر این لایه‌ی مذاب از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی مضر نباشند ممکن است در هنگام انفجار، قبل از انجماد این لایه، موج انفجار برگشتی باعث از هم گسیخته شدن اتصال شود. بنابراین در هنگام جوشکاری با تنظیم پارامترهای جوش باید تا حد ممکن از نزدیک شدن به مرز بالایی جلوگیری و همیشه فاصله‌ی مطمئن نسبت به آن حفظ شود.

دریاس و ویتمن دو روش متفاوت را برای تعیین مرز بالایی پنجره‌ی جوشکاری ارائه دادند [۷ و ۸]. ویتمن [۸] مقدار V_p را طوری تعیین می‌کند که در آن ذوب فصل مشترک اتفاق نیفتد در حالی که دریاس [۷] مرز بالایی پنجره‌ی جوشکاری را جایی قرار می‌دهد که ذوب اتفاق می‌افتد اما زمان انجماد کمتر از زمان رسیدن موج برگشتی است. بنابراین می‌توان گفت مرز ویتمن^۳ از مرز دریاس^۲ پایین‌تر است. در این مقاله از مرز دریاس^۱ استفاده خواهد شد. معادله دریاس^۲ به صورت زیر است [۷]:

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{k}{t^{0.25} \times V_w^{1.25}} \quad (2)$$

و پارامتر k سرعت صوتی توده‌ی حجمی است که از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود.

$$k = \frac{E}{3 \times (1 - 2\nu)} \quad (3)$$

در روابط بالا، t ضخامت، E مدول الاستیسیته و ν ضریب پواسون صفحه‌های پرنده و پایه است. برای رسم پنجره‌ی جوشکاری اتصال غیر مشابه برنج و فولاد، یک بار این رابطه برای فولاد و یک بار برای برنج رسم شده است. طبیعی است که مرز حاصل پایین‌تر، به عنوان مبنای کار در نظر گرفته خواهد شد. هر دو رابطه در ذیل آورده شده است و در شکل ۳ برای فولاد و برنج به ترتیب با شماره‌های ۵ و ۶ مشخص شده‌اند.

(۴) مرز بالایی برای فولاد:

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{E}{t^{0.25} \times V_w^{1.25}} = \frac{200 \times 10^9}{[4.5 \times 10^{-3}]^{0.25} \times V_w^{1.25}} = \frac{9357}{V_w^{1.25}}$$

(۵) مرز بالایی برای برنج:

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{E}{t^{0.25} \times V_w^{1.25}} = \frac{113 \times 10^9}{[2 \times 10^{-3}]^{0.25} \times V_w^{1.25}} = \frac{8700}{V_w^{1.25}}$$

جوشکاری شدند، به طوری که ورق برنجی به عنوان صفحه‌ی پرنده و ورق فولادی به عنوان صفحه‌ی پایه قرار داشته باشد.

مخلوط ماده‌ی منفجره تی ان تی^۳/انفو^۴ برای انفجار انتخاب شد. دانسیته‌ی این ماده-ی منفجره ۰/۹ گرم بر سانتی متر مربع و سرعت انفجار این ماده (V_d) ۲۸۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد. چهار نمونه تحت شرایط و متغیرهای زیر جوش داده شدند. این متغیرها در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

جدول ۲- شرایط جوشکاری نمونه‌ها.

شماره‌ی نمونه	ضخامت ماده‌ی منفجره (mm)	فاصله توقف (mm)	R
۱	۱۵	۱	۰/۷۶۷
۲	۲۰	۱	۱/۰۲۲
۳	۲۵	۱	۱/۲۷۸
۴	۴۰	۱	۲/۰۴۵

۴- شبیه‌سازی فرآیند

برای پیش‌بینی وضعیت متغیرهای فرآیند در هنگام جوشکاری، هر کدام از نمونه‌ها با شرایط خاص خود شبیه‌سازی شدند. شبیه‌سازی فرآیند توسط نرم افزار آباکوس^۱ انجام شد. سرعت‌های برخورد، برای هر کدام از نمونه‌ها، توسط شبیه‌سازی محاسبه شد. این داده‌ها به همراه داده‌های کاملتری از وضعیت نمونه‌ها و همچنین اطلاعات دیگری برای مقایسه در جدول آورده شده است که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۴-۱- تحلیل با نرم افزار آباکوس

جوشکاری انفجاری فرآیندی کاملاً دینامیکی است. و تغییر شکل‌های ایجاد شده در این نوع جوشکاری دارای کرنش‌هایی با نرخ بالا می‌باشند. بنابراین، به منظور ارزیابی و محاسبه این کرنش‌ها بایستی از نرم افزار قدرتمندی که تحلیل گر بسیار خوبی برای چنین مسائلی باشد استفاده کنیم. در این نرم افزار می‌توان رفتار ماده، شرایط برخورد نوع قیدها، انواع بارهای دینامیکی و شرایط مرزی را توسط برنامه‌های فرعی که به زبان فترن نوشته می‌شود توسط کاربر تعریف نمود. نرم افزار آباکوس^۵ دارای دو ماژول تحلیل گر می‌باشد که معمولاً در حل مسائل دینامیکی مختلف قابل استفاده هستند. بنا به قابلیت‌های این دو ماژول از دو روش ضمنی^۶ و ایمیپلیسیت^۷ جهت حل

این معادلات در شکل ۳ به ترتیب با شماره‌های ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰ مشخص شده است.

بررسی‌هایی نیز توسط محققین دیگر انجام شده است. یکی از این محققین کووالیسکیج^۳ است [۹]. این محقق رابطه را بر اساس استحکام تسلیم، سختی و ضخامت صفحات ارائه کرده است [۹].

$$V_p = \sqrt{\frac{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2}{\rho_1 \rho_2 (h_1 + h_2)}} (2\sigma_Y) \quad (11)$$

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{V_p}{2V_w} \quad (12)$$

در این رابطه σ_Y تنش تسلیم فلز، ρ دانسیته هر کدام از صفحات، و h ضخامت هر کدام از صفحات پایه و پرنده است. این رابطه برای هر کدام از صفحات برنجی و فولادی طبق معادلات زیر رسم شده اند و در شکل ۳ به ترتیب با شماره‌های ۱۱ و ۱۲ مشخص گردیده اند.

(۱۳) معادله برای برنج:

$$\sin \left(\frac{\beta}{2} \right) = \frac{\sqrt{\frac{7800 \times 4.5 \times 10^{-3} + 8800 \times 2 \times 10^{-3}}{7800 \times 8800 \times (4.5 + 2) \times 10^{-3}} \times (2 \times 84 \times 10^6)}}{2 \times V_w} = \frac{140}{2V_w} = \frac{70}{V_w}$$

(۱۴) معادله برای فولاد:

$$\sin \left(\frac{\beta}{2} \right) = \frac{\sqrt{\frac{7800 \times 4.5 \times 10^{-3} + 8800 \times 2 \times 10^{-3}}{8800 \times 7800 \times (4.5 + 2) \times 10^{-3}} \times (2 \times 209 \times 10^6)}}{2 \times V_w} = \frac{222}{2V_w} = \frac{111}{V_w}$$

رابطه‌ی کووالیسکیج^۱ [۹] نسبت به رابطه دریباس^۲ [۷] سخت‌گیرانه‌تر است و محدوده جوش پذیری کمتری را در نظر می‌گیرد. بنابراین استفاده از آن می‌تواند ضریب اطمینان بیشتری را به وجود آورد.

۳- مواد و روش‌های آزمایش

در این تحقیق، از ورق‌هایی به مساحت ۳۰۰ × ۳۰۰ میلی متر، استفاده شد. ضخامت ورق‌های برنجی ۲ میلی متر و ضخامت ورق‌های فولادی ۴/۵ میلی متر انتخاب گردید. ورق‌های فولادی و برنجی، با شرایط تنظیم موازی

3- TNT
4- ANFO
5- ABAQUS
6- Implicit
7- Explicit

1- Kowalewoskij
2- Deribas

برشی و پوسته ای شدن کششی یا برش فشاری نیز می‌تواند استفاده شود. قابل ذکر است که در این تحقیق، شرایط برای شکست برشی و کششی وارد نشده است.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p)(1 - T^{*m}) \quad 0 \leq T^* \leq 1 \quad (15)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (16)$$

در رابطه‌های ۱۵ و ۱۶، T درجه حرارت مطلق می‌باشد. p میزان نرخ کرنش پلاستیک برای $\dot{\varepsilon}_0 = 1 s^{-1}$ و ε کرنش پلاستیک می‌باشد.

۴-۴- مدل کردن بارگذاری انفجاری

معادله‌ی حالت جی-دلیو-ال^۳ برای بررسی رفتار ماده‌ی منفجره در نرم‌افزار افزار آباکوس موجود می‌باشد. لیکن این معادله، برای مواد منفجره با سرعت انفجار زیاد کاربرد دارد، حال آنکه در جوشکاری انفجاری عملاً از مواد منفجره با سرعت پائین استفاده می‌شود. لذا این معادله نمی‌تواند در شبیه سازی جوشکاری انفجاری استفاده شود. معادله‌ای که برای سرعت های پائین و بالا در جوشکاری انفجاری، کاربرد دارد، رابطه‌ی ۱۷، معادله حالت ویلیامزبرگ^۴ [۱۱ و ۱۲] است. با توجه به اینکه این معادله در آباکوس نیست، با استفاده از قابلیت نرم افزار در دریافت برنامه ی فرعی به زبان برنامه نویسی فرتن می-توان در نرم افزار کد گذاری کرد. بنابراین به منظور اعمال بارگذاری انفجاری برای ماده ی منفجره با سرعت انفجار پائین از معادله‌ی ۱۷ استفاده گردید. فشار حاصل که از رابطه ی ۱۸، معادل فشار حاصل از معادله‌ی حالت ویلیا مزبرگ^۲ قرار گرفته و بدین ترتیب مقدار ثابت ماده ی منفجره بدست آورده می‌شود. پس از آن روابط ۱۷ و ۱۸ بصورت معادله‌ی فشار وابسته به زمان و مکان از طریق برنامه ی فرتون در برنامه‌ی Vdload یا اعمال بار بر روی سطح ورق پرنده اعمال می‌گردد.

$$P = P_0 \exp\left(\frac{-t}{\theta}\right) \quad (17)$$

$$P_0 = \frac{\rho_e V_d^2}{1 + k_e} \quad (18)$$

در روابط ۱۷ و ۱۸، پارامترهای θ ، ρ_e ، t ، k_e ، P ، به ترتیب عبارتند از: ثابت زمانی، چگالی ماده‌ی منفجره، ثابت ماده‌ی منفجره، زمان انجام انفجار، نیرو یا فشار حاصل از انفجار و V_d سرعت انفجار ماده‌ی منفجره می‌باشد.

مسائل استفاده می‌گردد. در روش ایمپلیسیت تعداد تکرارها محدود است، لذا اجرای برنامه، به زمان بیشتری نیازمند است، در این روش، مشتق معادلات دیفرانسیل بر اساس جایجائی نوشته می‌شود.

برای تغییر شکل‌هایی که در زمان کمتری به انجام می‌رسد، مشتق معادلات دیفرانسیل بر اساس زمان نوشته می‌شود، برای تغییر شکل‌هایی که در زمان کم انجام می‌شوند از روش ضمنی استفاده خواهد شد. در این تحقیق، از ماژول تحلیل ضمنی دینامیکی (شامل آنالیز حرارتی آدیباتیک)، نیز استفاده شده است.

۴-۲- مدل نمودن چیدمان ورق‌ها

فرآیند جوشکاری انفجاری در دو حالت دو بعدی و سه بعدی قابل مدل شدن است در این پژوهش، پروسه ی جوشکاری انفجاری به صورت سه بعدی مدل گردیده است و حالت کاملاً واقعی تری از فرآیند را نمایش می‌دهد. تمامی آزمایش‌های جوشکاری انفجاری در این تحقیق، شبیه سازی شده‌اند.

۴-۳- مدل نمودن مواد مورد استفاده در جوشکاری

در این تحقیق، از معادله‌ی رفتاری جانسون-کوک^۱ (رابطه ۱۵) استفاده شده است [۱۰] و پارامترهای مربوط به این معادله در جدول ۳ آمده است. مدل پلاستیسیته‌ی جانسون-کوک برای مدل کردن تغییر شکل با نرخ کرنش بالای فلزات به کار می‌رود. این مدل، نوع ویژه ای از پلاستیسیته‌ی وان میسرز^۲ می‌باشد که شامل شکل‌های تحلیلی قانون سخت شدن و وابستگی به نرخ کرنش، می‌باشد. این مدل معمولاً در تحلیل دینامیکی آدیباتیک گذرا استفاده می‌شود.

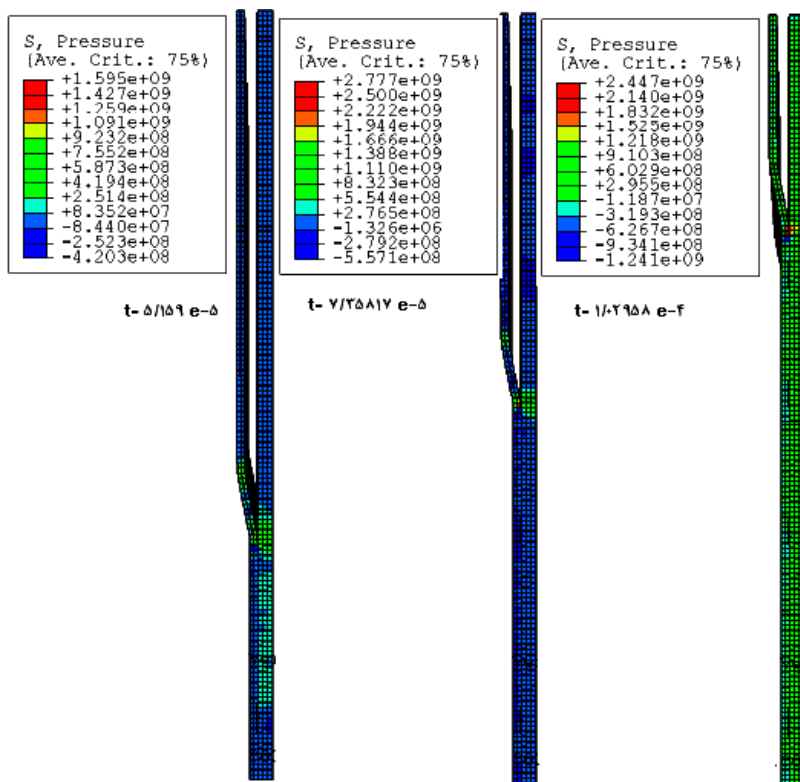
جدول ۳- پارامترهای معادله ی جانسون-کوک رابطه ۱۵ [۱۰].

آلیاژ	A (MPa)	B (MPa)	M	N	Tm (k)
فولاد کم کربن St۱۴	۳۱۰	۳۵۰	۰/۵	۰/۳	۲۰۷۳
برنج تک فاز Ms۹۰	۸۴	۱۵۰	۰/۳۱	۱/۰۹	۱۶۲۹

سخت شدن در معادله‌ی جانسون-کوک، حالت خاصی از سخت شدن ایزوتروپیک می‌باشد که تنش تسلیم را بعنوان تابعی از کرنش پلاستیک معادل، نرخ کرنش و دما ارائه می‌کند. رابطه ۱۵ برای مدل کردن شکست

3- JWLL
4- Williamsburg

1- Johnson-Cook
2- Von-Mises



شکل ۴- نمایشی از کانتور فشار جوشکاری ورق‌ها در حین فرآیند مربوط به نمونه‌ی شماره ۲.

۴-۵- مدل نمودن شرایط مرزی و قیدها

در شرایط عملی در جوشکاری انفجاری صفحات، برای ثابت نگهداشتن صفحه ساکن، از سندان استفاده می‌شود. که برای جلوگیری از حرکت صفحات بایستی آنها را در نرم افزار قید گذاری نمود، البته قیدگذاری‌ها را بایستی به گونه‌ای انجام داد که باعث ایجاد اعوجاج در هنگام اجرای برنامه انفجاری نگردد. بنابراین، میزان ممان و جابجایی در سه جهت برای سطح زیرین ورق مادر، بایستی صفر در نظر گرفته شود.

۵- نتایج و بحث

۱-۵- تصاویر میکروسکوپ نوری

نتایج بررسی‌های ریز ساختاری توسط میکروسکوپ نوری برای نمونه‌های مختلف در شکل ۵ قابل مشاهده است. در همه نمونه‌ها در قسمت بالا که در تصاویر روشن‌تر دیده می‌شود موقعیت برنج MS۹۰ قرار دارد و در قسمت پایین که تیره‌تر دیده می‌شود فولاد St ۱۴ قرار دارد.

از نمونه‌ی ۱ تا ۴ به ترتیب بار انفجاری، افزایش یافته است. اولین پیامد افزایش بار انفجاری، افزایش انرژی ضربه است. انتظار می‌رود با افزایش انرژی ضربه، ابتدا فصل مشترک از حالت صاف به موجی تبدیل شوند. با افزایش بار

انفجاری، دامنه و طول موج فصل مشترک، گسترش می‌یابد. همچنین، احتمال تشکیل بسته‌های ترکیبات بین فلزی و مذاب، به علت افزایش بیش از حد انرژی در مرز مشترک افزایش می‌یابد و در نهایت به لایه پیوسته‌ای از مذاب تبدیل خواهند شد. به این نکته باید توجه کرد که در همه بارهای انفجاری، اتصال انجام گرفته است. یعنی باید انتظار داشت که همه‌ی نمونه‌ها در محدوده‌ی پنجره‌ی جوشکاری قرار داشته باشند. در مرحله بعد، به بررسی نوع و کیفیت امواج پرداخته می‌شود. جدول شماره ۴، دامنه و فرکانس امواج را برای هر یک از نمونه‌ها نشان می‌دهد.

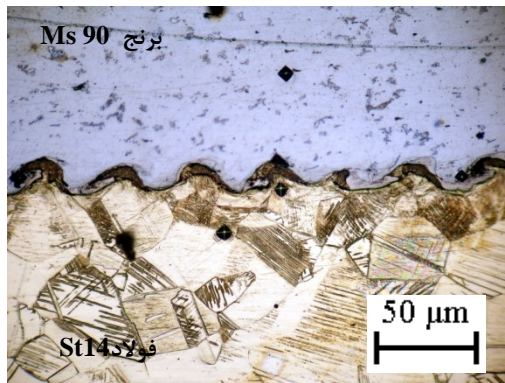
جدول ۴- دامنه و فرکانس امواج برای هر یک از نمونه‌ها.

شماره‌ی نمونه	دامنه‌ی امواج (μm)	فرکانس امواج (μm)
۱	-	-
۲	۴۰	۱۰
۳	۸۰	۱۰۰
۴	۷۵	--

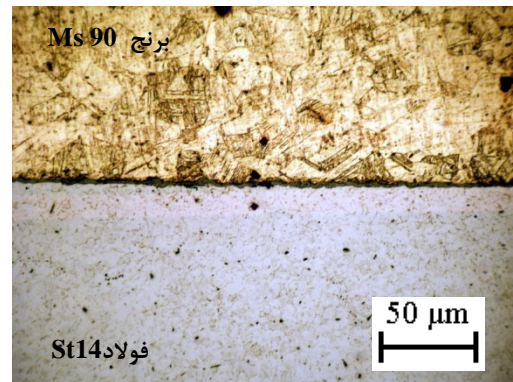
در نمونه‌ی ۲، دامنه‌ی امواج بلندتر از نمونه‌ی ۱ می‌باشد. تفاوت اساسی که در نمونه‌های شماره ۱ و ۲ وجود دارد این است که امواج در شکل شماره ۲

می رود که گره‌هایی^۱ در فصل مشترک ایجاد شود. در نمونه های شماره ۱ تا ۳ همانطور که مشاهده می‌شود، تقریباً ترکیبات و فازهای بین فلزی در فصل مشترک به وجود نیامده است. البته لازم به ذکر است که هم چنان که بار انفجاری افزایش یابد، میزان تشکیل ترکیبات و فازهای بین فلزی افزوده شده است. به طوری که در نمونه ی شماره ۳ تقریباً در همه دره‌ها، مذاب دیده می‌شود. همان طور که به روشنی در نمونه‌ی شماره ۴ دیده می‌شود، یک لایه ضخیم و پیوسته از ترکیبات و فازهای بین فلزی در فصل مشترک پدید آمده است که با توجه به ضخامت بسیار زیاد ماده ی منفجره، قابل پیشبینی می‌باشد.

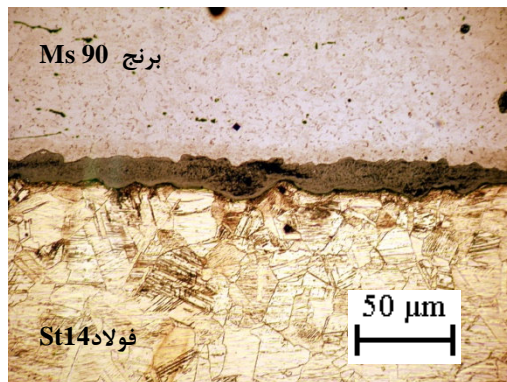
به صورت نامنظم تر وجود دارند و نمونه‌ی ۱ می‌تواند به فصل مشترک صاف تعبیر شود. از آنجا که اختلاف بار انفجاری نمونه‌های ۱ و ۲، چندان متفاوت نمی‌باشد لذا، دلیل این اختلاف در شکل فصل مشترک‌های نمونه‌های ۱ و ۲، می‌تواند شرایط سطحی متفاوت دو فلز و یا خطای آزمایش باشد. در نمونه ی شماره ۳ نسبت به دو نمونه قبل، دامنه و طول موج افزایش یافته است. اما به نظر نمی‌رسد که این روند در نمونه‌ی شماره ۴ حفظ شده باشد. دورگوتلو و همکاران در این رابطه، اظهار می‌کنند که در مقادیر انرژی ضربه‌ی بسیار بالا، طول موج آن چنان افزایش می‌یابد که در بزرگ نمایی‌های بالا، به صورت خطوط صافی، دیده می‌شوند [۶]. بنابراین می‌توان گفت در این نمونه هم این حالت پدید آمده است. با افزایش دامنه ی امواج انتظار



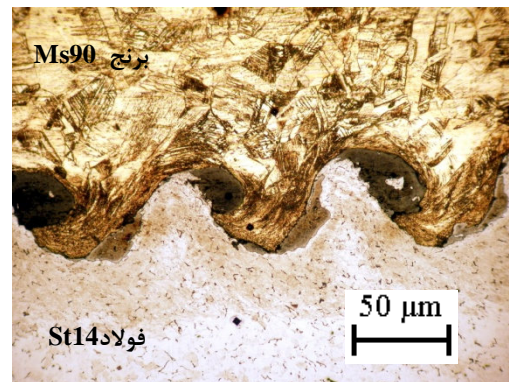
ب) نمونه‌ی شماره‌ی ۲- (R=۱/۰۲۲)



الف) نمونه‌ی شماره‌ی ۱- (R=۰/۷۶۷)



د) نمونه‌ی شماره‌ی ۴- (R=۲/۰۴۵)



ج) نمونه‌ی شماره‌ی ۳- (R=۱/۲۷۸)

شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ نوری برای هر یک از فصل مشترک‌های نمونه‌های ۱ تا ۴.

1- Vortex

جدول ۵- متغیرهای فرآیند برای نمونه‌های ۱ تا ۴.

سرعت برخورد حدی (Gurney) (m/s) [۱۳]	حداقل سرعت برخورد برای فولاد Kowalewskij (m/s) [۹]	حداقل سرعت پیشروی جوش (m/s)	حداقل سرعت برخورد برای برنج (Kowalewskij) (m/s) [۹]	زاویه‌ی برخورد پیش‌بینی شده (درجه)	سرعت پیشروی جوش پیش‌بینی شده (Vw) (m/s)	سرعت برخورد پیش‌بینی شده (m/s)	R	ضخامت ماده‌ی منفجره (mm)	شماره‌ی نمونه
۶۱۸	۲۲۲	۹۱۱	۱۴۰	۱۱/۲۷	۲۳۶۰	۲۷۵	۰/۷۶۷	۱۵	۱
۷۵۱	۲۲۲	۹۱۱	۱۴۰	۱۳/۱۲	۲۶۶۱	۳۲۰	۱/۰۲۲	۲۰	۲
۸۶۳	۲۲۲	۹۱۱	۱۴۰	۱۴/۹۸	۲۷۳۰	۳۶۵	۱/۲۷۸	۲۵	۳
۱۱۱۶	۲۲۲	۹۱۱	۱۴۰	۱۶/۶۳	۲۸۵۰	۴۰۵	۲/۰۴۵	۴۰	۴

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی

در این رابطه همانطور که قبلاً ذکر شد، اثر ضخامت صفحات و دانسیته آن‌ها را بر سرعت برخورد نشان می‌دهد. در نتیجه برای بارهای انفجاری متفاوت ثابت است. حداقل سرعت برخورد یک بار برای برنج و یک بار برای فولاد محاسبه شده است. V_p برای برنج ۱۴۰ متر بر ثانیه و برای فولاد ۲۲۲ متر بر ثانیه به دست آمد که هر دو در جدول ۴ شماره‌ی آمده است. در ستون آخر، حد سرعت برخورد توسط معادله‌ی گورنی^۲ محاسبه شده است. معادله‌ی گورنی^۳، حداکثر سرعت برخورد را به عنوان تابعی از بار انفجاری و نوع ماده منفجره در نظر می‌گیرد. این معادله به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۳]:

$$V_T = V_d \sqrt{\left(\frac{3R^2}{(R+1)(R+4)(k^2-1)} \right)} \quad (20)$$

در این رابطه، V_d سرعت انفجار، R نسبت ماده‌ی منفجره و k ثابتی است که به انرژی جنبشی ماده‌ی منفجره بستگی دارد. ثابت k برای مخلوط تی ان تی/آنفو برابر ۲/۳ در نظر گرفته شد.

مقایسه‌ی سرعت برخورد در ستون‌های ۴، ۶، ۷ و ۸ جدول ۵، نشان می‌دهد که سرعت‌های پیش‌بینی شده به کمک شبیه‌سازی، همه از مقدار پیشینه سرعت حدی کمتر و از مقدار کمینه سرعت برخورد، بیشتر می‌باشند و بنابراین می‌توانند قابل قبول باشند. اگر مرز پایینی پنجره‌ی جوشکاری، مطابق با رابطه ویتمن^۳ و دریباس^۴ در نظر گرفته شود، مشاهده می‌شود که همه‌ی نمونه‌ها درون منطقه‌ی قابل جوشکاری قرار دارند.

اگر رابطه‌ی کووالوسکیچ [۹] هم در نظر گرفته شود که رابطه‌ی سخت‌گیرانه‌تری است، باز هم مشاهده می‌شود که در بدترین شرایط، پایین‌ترین نقطه (برای نمونه‌ی شماره‌ی ۱) از بالاترین مرز کووالوسکیچ [۹] برای فولاد

در جدول شماره‌ی ۵، نتایج شبیه‌سازی برای آزمایش‌ها با بارهای انفجاری مختلف نشان داده شده است. در ستون ۲ و ۳ به ترتیب ضخامت ماده‌ی منفجره و مقدار R ، برای هر کدام از آزمایش‌ها، آورده شده است. R نشان‌دهنده‌ی نسبت جرم مواد منفجره در واحد سطح، به جرم بار صفحه‌ی پرنده در واحد سطح، می‌باشد، یعنی:

$$R = \frac{m_c}{m_f} \quad (19)$$

در نتیجه با افزایش ضخامت بار انفجاری، نسبت R افزایش یافته است. در ستون چهارم و پنجم جدول ۵، نتایج پیش‌بینی شبیه‌سازی برای سرعت برخورد صفحه‌ی پرنده، زاویه‌ی برخورد و سرعت پیشروی جوش، پیش‌بینی شده آمده است. در اینجا برای به دست آمدن V_p ، مقدار حداکثر سرعت صفحه بعد از برخورد، به عنوان سرعت برخورد در نظر گرفته شد. با استفاده از رابطه بین V_p ، V_d و β و با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی، زاویه‌ی برخورد پیش‌بینی شد که مقادیر این زوایا در ستون پنجم آورده شده است. به علت موازی بودن صفحات برخورد، سرعت انفجار (V_d) برابر با سرعت پیشروی جبهه جوش (V_w)، می‌باشد. بنابراین، اگر مختصات طولی V_d در نظر گرفته شود و مختصات عرضی هر کدام از زوایا پیش‌بینی شده باشد، می‌توان نقاط هر کدام از نمونه‌ها را در پنجره‌ی جوشکاری تعیین کرد. این نقاط در شکل ۳ مشخص شده‌اند. نمونه‌های ۱ تا ۴ به ترتیب از پایین به بالا در پنجره‌ی جوشکاری مشخص شده‌اند. ستون ششم و هفتم جدول ۵، حداقل سرعت برخورد را با استفاده از رابطه کووالوسکیچ^۱ [۹] نشان می‌دهد.

2- Gurney
3- Wittman
4- Deribas

1- Kowalewskij

- [5]. Durgutlu, A.; Okuyucu, H.; Gulenc, B. "Investigation of Effect of the Stand-off Distance on Interface Characteristics of Explosively Welded Copper and Stainless Steel."; *Mat. & Des.* 2008, 29(7), 1480-1484.
- [6]. Durgutlu, A.; Gulenc, B.; Findik, F. "Examination of Copper/Stainless Steel Joints Formed by Explosive Welding."; *Mat. & Des.* 2005, 26, 497-507.
- [7]. Deribas, A. A.; Simonov, V. D.; Zakcharenko, L. D. "Investigation of Explosive Welding Parameters for Arbitrary Combinations of Metals and Alloys."; *Proc. of the 5th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication* 1975, 4(1), 1-24..
- [8]. Stivers, S. W.; Wittman, R. H. "Computer Selection of the Optimum Explosive Loading and Welding Geometry."; *Proc. of the 5th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication, Denver, Colorado*, 1975, 4(2), 1-16.
- [9]. Kowalewskij, V.; Belajew, W.; Smirnow, G. "Application of Explosive Welding in Manufacturing of Composite Materials."; *Z Metallkde* 1979, 70, 67-70.
- [10]. Johnson, R. G.; Cook, W. H. "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain-Rates and High Temperature."; *Proc. 7th Int Symp Ball the Hague the Netherlands*; 1983, 541-547.
- [11]. Akbari Mousavi, S. A. A.; Burley, S. J.; Al-Hassani, S. T. S. "Simulation of Explosive Welding Using the Williamsburg Equation of State to Model Low Detonation Velocity Explosives."; *Int. J. Imp. Eng.* 2005, 31, 719-734.
- [12]. Akbari Mousavi, S. A. A.; Al-Hassani, S. T. S. "Finite Element Simulation of Explosively-Driven Plate Impact with Application to Explosive Welding."; *Mat. & Des.* 2008, 29, 1-19.
- [13]. Gurney, R. W. "The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells and Granades."; *Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, Report No. 405*, 1947.

(منحنی شماره‌ی ۱۲) بالاتر است. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نتایج شبیه‌سازی به خوبی با نتایج عملی مطابقت دارد و در منطقه‌ی ایمن در پنجره‌ی جوشکاری قرار دارد.

۶- نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن روابط به دست آمده توسط محققین مختلف و جمع بندی کلی این روابط از مرزهای بحرانی، پنجره‌ی جوشکاری انفجاری برای اتصال فولاد St ۱۴ و برنج Ms۹۰ به دست آمد.

۱- با توجه به پنجره‌ی جوشکاری به دست آمده و مقایسه با تصاویر ریزساختاری، مشاهده شد که انتخاب پارامترهای فرآیند به درستی انجام شده است و اتصال درون منطقه‌ی اتصال پنجره‌ی جوشکاری قرار دارند.

۲- سرعت‌های به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی، برای همه نمونه‌ها به خوبی با روابط تئوری مطابقت داشت. به طوری که همه‌ی نمونه‌ها درون منطقه‌ی قابل اتصال در پنجره‌ی جوشکاری، قرار داشتند.

۳- نتایج تحقیق نشان می‌دهد که نمونه‌های ۱ و ۲ و ۳ با شکل‌های فصل مشترک صاف و موجی می‌توانند خواص مطلوب را دارا باشند. تست‌های مکانیکی و شرایط سرویس، تعیین کننده پارامترهای بهینه می‌باشند.

مراجع

- [1]. Crossland, B. "Explosive Welding of Metals and Its Applications."; University Press, Oxford, 1982.
- [2]. Blazynski, T.Z. "Explosive Welding, Forming and Compaction", Applied Science, 1983.
- [3]. Cowan, G. R. and Holtzman, A. H. "Flow Configuration in Colliding Plate: Explosive Bonding."; *J. Appl. Phys.* 1963, 34, 928-939.
- [4]. Leedly, K. D.; Stubbins, J. F. "Copper Alloy- Stainless Steel Bonded Laminates for Fusion Reactor Applications: Crack growth and Fatigue."; *Mat. Sci. & Eng. A.* 2001, A297, 19-25.