



## Spot Welding of Steel Plates Using Gas Mixture Detonation Technique: An Experimental Study

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Hosseinzadeh Salehkouh S.<sup>1</sup> MSc,  
Babaei H.\*<sup>1</sup> PhD,  
Mirzababaie Mostofi T.<sup>2</sup> PhD

#### How to cite this article

Hosseinzadeh Salehkouh S, Babaei H, Mirzababaie Mostofi T. Spot Welding of Steel Plates Using Gas Mixture Detonation Technique: An Experimental Study. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(9):2255-2262.

### ABSTRACT

Spot welding process due to its ability to create a qualitative connection between metal plates and the absence of restrictions on old welding methods such as the impossibility of welding metals by many differences in their melting point is considered as one of the fastest and most economical methods. In this method, an atomic bonding is created on the surface of plates due to high-velocity impact and metal plates are welded together. In the present study, a gas mixture detonation set up was used to perform the impact spot welding tests. Also, the steel plate with a thickness of 4mm was considered as a base plate and steel plates with 1, 2, and 3mm thickness were used as front layers. They were under direct contact with flat- and spherical-nosed metallic projectiles with a mass of 650 and 1300g, respectively. The diameter of the projectiles was 25mm and the average velocity was 600 meters per second. To study the morphology of the weld interface in impact spot welding, the interface of the welds was studied using scanning electron microscope (SEM). Also, the effect of flyer plate thickness and stand-off distance on the spot welding of plates due to projectile impact was studied. The results showed that by increasing the thickness of the flyer plate, the formation of a damaged central area will be decreased. The results also confirmed that when higher stand-off distance was utilized, the velocity of impact was not sufficient to create continuous weld.

**Keywords** Bonding in the Solid Phase; Impact Spot Welding; Scanning Electron Microscope; Gas Mixture Detonation Technique

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Electrical, Computer and Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

#### \*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, 5th Kilometer of Persian Gulf Highway, Rasht, Iran.

Phone: +98 (13) 33690539

Fax: -

ghbabaie@guilan.ac.ir

#### Article History

Received: June 06, 2020

Accepted: June 23, 2020

ePublished: September 20, 2020

### CITATION LINKS

[1] High-velocity impact welding process ... [2] Explosive welding of aluminium to stainless steel using carbon ... [3] Detonation process analysis and interface morphology ... [4] Experimental and numerical study of water jet ... [5] 3-D finite element modelling of wate ... [6] Numerical modeling based on coupled Eulerian-Lagrangian ... [7] Study of microstructure and mechanical properties ... [8] Modification of mechanical properties of Al6061 ... [9] Experimental investigation of deformation and jetting ... [10] Experimental study of high-velocity projectile ... [11] The influence of projectile nose shape on the morphology ... [12] Towards better understanding of explosive welding by ... [13] Explosive ... [14] Assessment of bond interface in impact ... [15] Single and double plate impact welding: Experimental ... [16] An experimental and numerical study of laser impact ... [17] Analysis of elastic-plastic behavior and plastic ... [18] Benchmarking strength and fatigue properties of ... [19] Numerical simulation of laser impact spot ... [20] Spot impact welding of an age-hardening aluminum ... [21] Experimental investigation of spot welding process ... [22] Effect of gas detonation on response of circular ... [23] Experimental investigation and analytical modelling ... [24] Empirical modelling for prediction of large deformation ... [25] Gas mixture detonation method, a novel ... [26] Experimental and theoretical study on large ductile ... [27] The influence of gas mixture detonation loads on large ... [28] Impact and explosion: Structural analysis ... [29] Tube expansion by gas ... [30] The measurement of impact pressure and solid ... [31] Stress waves, deformation and fracture caused ... [32] Interfacial morphology of magnetic pulse welded ... [33] Microstructure and mechanical properties of Mg-to-Al ... [34] Effect of process parameters on electromagnetic impact ...

## جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های فولادی با روش انفجار مخلوط گازها: مطالعه تجربی

صدیقه حسین‌زاده صالحکوه MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

هاشم بابایی\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

توحید میرزابابایی مستوفی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی برق، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

### چکیده

فرآیند جوشکاری نقطه‌ای به دلیل قابلیت ایجاد اتصالی باکیفیت بین صفحات فلزی و عدم وجود محدودیت‌های موجود در روش‌های قدیمی جوشکاری مانند عدم امکان جوشکاری فلزات با اختلاف نقطه ذوب بسیار زیاد، به عنوان یکی از سریع‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این روش در اثر ضربه با سرعت بالا در سطح صفحات اتصال اتمی ایجاد می‌شود و صفحات فلزی به یکدیگر جوش می‌خورند. در پژوهش حاضر، از سامانه انفجار مخلوط گازها برای انجام آزمایش‌های جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای استفاده شده است. همچنین، ورق فولادی با ضخامت ۴ میلی‌متر به عنوان ورق پایه و ورق‌های فولادی با ضخامت ۲، ۱ و ۳ میلی‌متر به عنوان لایه جلویی تحت برخورد مستقیم پرتابه‌های فلزی با شکل دماغه مسطح و کروی با جرم‌های ۷۵۰ و ۱۳۰۰ گرم قرار گرفته‌اند. قطر پرتابه‌ها ۲۵ میلی‌متر و میانگین سرعت پرتابه‌ها ۶۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی مورفولوژی فصل مشترک اتصالات تحت جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه، فصل مشترک جوش با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تاثیر ضخامت صفحه پرنده و فاصله بین لایه‌ای بر جوشکاری نقطه‌ای ورق‌ها در اثر ضربه پرتابه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت صفحه پرنده احتمال شکل‌گیری ناحیه مرکزی آسیب‌دیده کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که اگر فاصله بین لایه‌ای بالاتر از حد معینی بین صفحات اعمال شود، دیگر سرعت ضربه برای ایجاد جوش پیوسته کافی نیست.

**کلیدواژه‌ها:** اتصال حالت جامد، جوش نقطه‌ای ضربه‌ای، میکروسکوپ الکترونی، روش انفجار مخلوط گازها

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳

نویسنده مسئول: ghbabaei@guilan.ac.ir

### مقدمه

امروزه به دلیل محدودیت روش‌های مرسوم جوشکاری، فرآیندهای جوشکاری حالت جامد به عنوان روش جایگزین توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است [1]. روش‌هایی مانند جوشکاری انفجاری [2، 3] جوشکاری ضربه‌ای با جت آب [4-6]، جوشکاری اصطکاکی [7، 8] و فرآیند جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه [9، 10]، از جمله روش‌های جوشکاری حالت جامد به شمار می‌آیند. در روش جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه، ضربه سرعت بالای پرتابه موجب شکل‌گیری اتصال متالورژیکی بین دو ورق (که در فاصله مشخصی نسبت به یکدیگر قرار دارند) شده و در فصل مشترک صفحات، جوش ایجاد می‌شود.

تورگوتلو و همکارانش آزمایش‌هایی به منظور بررسی مشخصات فصل مشترک جوش در نمونه‌های تحت جوش ضربه‌ای انجام دادند. بدین منظور، پرتابه‌های نرم با شکل دماغه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد زمانی که از پرتابه‌های با دماغه نوک‌تیز استفاده شود، ناحیه جوش نخورده مرکزی، که عموماً در جوشکاری به وسیله پرتابه‌های با دماغه مسطح ایجاد می‌شود، حذف می‌شود [11]. نواحی جوشکاری شده با روش جوش نقطه‌ای ضربه‌ای توسط الگوی صاف و موجی شکل مشخص می‌شود. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که وجود الگوی موجی شکل نشان‌دهنده کیفیت جوش ایجاد شده است [12-14].

چیدری و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی جوشکاری ضربه‌ای با استفاده از دستگاه تفنگ گازی پرداختند. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که زبری سطح صفحه پرنده پس از ضربه به هدف افزایش می‌یابد [15].

ونگ و همکارانش به مطالعه عددی و آزمایشگاهی جوش نقطه‌ای ضربه‌ای پرداختند و در مقطع جوش فصل مشترک صاف و موجی شکل را مشاهده نمودند و دریافتند که دامنه و طول موج امواج در طول فصل مشترک جوش در نتیجه تغییرات دینامیکی زاویه برخورد، تغییر می‌کند. بعلاوه مقادیر ریزسختی در فصل مشترک اتصال را به منظور تحلیل خواص مکانیکی اندازه‌گیری نمودند. همچنین از نرم‌افزار اتوداین و روش SPH برای شبیه‌سازی عددی فرآیند جوشکاری استفاده کردند [16]. فنلی و همکارانش به بررسی رفتار الاستیک-پلاستیک در نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از روش جوش نقطه‌ای پرداختند [17]. کاپیلی و همکارانش استحکام و خواص سختی جوش نقطه‌ای ضربه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند و با اندازه‌گیری ریزسختی اتصالات دریافتند که در غیاب ناحیه متأثر از حرارت شاهد مقادیر سختی ثابتی در طول فصل مشترک جوش خواهیم بود [18]. ونگ و همکارانش به شبیه‌سازی جوش نقطه‌ای ضربه‌ای پرداختند و دریافتند که با افزایش سرعت صفحه پرنده، فصل مشترک اتصال به ترتیب از حالت صاف به حالت موجی با امواج صاف و ریز و سپس به حالت موجی-گردابه‌ای درمی‌آید [19]. کاپیلی و همکارانش جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای آلیاژ آلومینیوم را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که استحکام جوش با عملیات حرارتی تغییر می‌کند. همچنین با بررسی آزمون ریزسختی-سنجی، افزایش سختی در فصل مشترک جوش در مقایسه با فلزات پایه را نتیجه گرفتند [20]. حسین‌زاده و همکاران فرآیند جوشکاری نقطه‌ای در اهداف فلزی تحت ضربه با پرتابه‌های مسطح و کروی را مورد مطالعه قرار دادند و به منظور بررسی پارامترهای موثر در فرآیند جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای، از ترکیب‌بندی‌های مختلف ورق‌های دولایه فلزی با فواصل بین لایه‌ای مختلف استفاده نمودند و فصل مشترک جوش با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که در ناحیه برخورد خصوصاً در نواحی مرکزی اتصال کاملی رخ داده است [21].

می‌شوند [27, 29]. نحوه انتقال موج انفجار به نمونه بدین صورت است که با توجه به اینکه با آزاد شدن مقدار زیادی از انرژی در هنگام انفجار، موج انفجار در طول محیط گسترش می‌یابد پس از ایجاد شوک ناشی از انفجار، نیروی انفجاری تولید شده پشت پرتابه قرار می‌گیرد و پرتابه با انرژی جنبشی بسیار زیاد به سمت هدف حرکت می‌کند و در نهایت با اعمال فشار دینامیکی باعث اتصال دورق می‌شود. شکل ۱ تصویر سامانه انفجار مخلوط گازها را نشان می‌دهد.



شکل ۱) تصویر سامانه انفجار مخلوط گازها

سامانه انفجار مخلوط گازها که در این تحقیق به منظور جوشکاری ورق‌های فلزی با نرخ انرژی بسیار بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد، از دو قسمت محرک و آزمایش تشکیل شده است. قسمت محرک شامل یک محفظه احتراق است که در آن فرآیند اختلاط گاز صورت می‌گیرد و قسمت آزمایش شامل یک اتصال کروی به قطر داخلی بزرگ و کوچک ۸۴ و ۵۴ میلی‌متر، لوله‌ای به طول ۱۰۴۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۵۴ میلی‌متر و گلوله یا پرتابه است. لازم به توضیح است که به منظور محبوس نمودن مخلوط گازی درون محفظه، از یک ورق نازک آلومینیومی (راپچر دیسک) بین لوله و محفظه انفجار استفاده می‌شود. در این دستگاه، ابتدا گاز اکسیژن و استیلن از درون کپسول وارد محفظه اختلاط می‌شوند. گاز محبوس شده در پشت راپچر دیسک تحت فشار قرار داده شده و پس از ایجاد جرقه، مخلوط گاز منفجر شده و ورق نازک آلومینیومی را پاره می‌شود. در گام بعدی، نیروی انفجاری تولید شده پشت پرتابه قرار می‌گیرد. پرتابه با انرژی جنبشی بسیار زیاد درون لوله حرکت کرده و به شدت با صفحه پرنده برخورد کرده و موجب تماس صفحه پرنده با صفحه پایه و در صورت مناسب بودن تمامی شرایط برای شکل‌گیری جوش، موجب ایجاد جوش نقطه‌ای بین صفحات پرنده و پایه خواهد شد. در قسمت خروجی لوله سرعت‌سنج لیزری نصب شده است که اطلاعات مربوط به سرعت پرتابه توسط این سرعت‌سنج دریافت و توسط نمایشگر دیجیتال نشان داده می‌شود. نحوه عملکرد این سرعت‌سنج لیزری بدین صورت است که دو عدد دیود ساطع‌کننده پرتوی نور منفرد و دو عدد آشکارساز پرتو نور در قسمت خروجی لوله روبروی یکدیگر قرار می‌گیرند و همزمان با خارج شدن پرتابه از لوله، ابتدا پرتو نور لیزر اول قطع شده و موجب تغییر در ولتاژ می‌شود. با تغییر ولتاژ، پیغامی برای زمان‌سنج ارسال شده و زمان‌سنج شروع به شمارش می‌نماید. هنگامی که پرتابه نور لیزر دوم را قطع کند، با تغییر ولتاژ مجدد پیغام مجددی

در این مقاله فرآیند جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با کمک سامانه انفجار مخلوط گازها مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که یکی از موارد بسیار مهم در فرآیند جوشکاری فلزات، تامین منابع انرژی با هزینه پایین است، استفاده از این دستگاه موجب کاهش هزینه‌های جوشکاری فلزات می‌شود. از دیگر مزیت‌های این روش می‌توان به مواردی از قبیل قابلیت انجام کار در کارگاه و قابل کنترل بودن پیش فشارهای قبل از انفجار و خودکار کردن بخشی از مراحل آزمایش اشاره نمود. شایان ذکر است که تا کنون تمامی تحقیقات انجام شده با روش انفجار مخلوط گازها مربوط به شکل‌دهی ورق‌های فلزی بوده و از این سامانه آزمایشگاهی برای جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های فلزی استفاده نشده است [22-27].

به منظور بررسی شکل موج‌های ایجاد شده، فصل مشترک اتصال توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تاثیر ضخامت صفحه پرنده و فاصله بین لایه‌ای بر جوشکاری نقطه‌ای ورق‌ها با ضربه پرتابه بررسی شده است. بعلاوه تغییر شکل ورق‌ها در اثر ضربه پرتابه مورد بررسی قرار گرفته است.

#### مواد و تجهیزات

فرآیند جوشکاری با روش انفجار مخلوط گازها نتیجه یک فرآیند شیمیایی گرمازا میان یک ماده سوختنی و عامل اکسیدکننده است که با تولید گرما و تغییر شیمیایی مواد اولیه همراه می‌شود. در جوشکاری با روش انفجار مخلوط گازها به‌طور معمول از گازهای اکسیژن، استیلن، هیدروژن و غیره استفاده می‌شود. به‌طور کلی، گاز مطلوب گازی است که هیچ نوع نیروی اصطکاک و قیدی در میان ذرات خود ندارد و انرژی داخلی آن صفر است؛ بنابراین، انرژی داخلی کل آن با انرژی جنبشی برابر است و تنها به دمای مطلق بستگی دارد. این نوع گاز مطلوب می‌تواند پلی‌تروپیک باشد و آنتروپی آن تابعی از دما، حجم یا فشار و حجم است. بعد از یک انفجار نمونه، گازها به‌طور عادی انبساط یافته و این پدیده دارای سرعت یکنواخت بوده و فرآیند آدیاباتیک است. هنگام انفجار هیچ نوع انتقال حرارت به محیط انجام نمی‌شود و امواج حاصل از آن در همه جهات پخش می‌شوند. به‌وسیله توزیع موج شوک در محیط واسط یک ضربه در جلوی موج به وجود می‌آید. در همان لحظه امواج برگشتی به‌طرف منبع گسترده می‌شود. در مرکز منبع پیشانی موج (جبهه موج) منقبض می‌شود و موج انعکاسی جدید از مرکز منتشر می‌شود. با آزاد شدن مقدار زیادی از انرژی در هنگام انفجار، موج انفجار در طول محیط گسترش می‌یابد. ایجاد موج‌های جدید و عمل تکرار آن باعث می‌شود که گازهای حاصل از انفجار، ضربه‌ان امواج برگشتی را کاهش دهند. حجم گازهای موج انعکاسی افزایش می‌یابد تا جایی که به مقدار حداکثر خود می‌رسد و فشار پایین گاز با فشار محیط قابل‌مقایسه می‌شود. همچنین یک فشار نسبتاً زیاد، گازها را مجبور به حرکت در جهت خلاف و به سمت مرکز منبع می‌نماید. افزایش بیشتر در فشار و انبساط جدید، موجب میرا شدن ضربه‌ها در گازهای حاصل از انفجار می‌شود و امواج در نهایت میرا

یک ورق فولادی به ضخامت ۴ میلی‌متر انتخاب شدند. در ادامه برای بررسی تأثیر فاصله بین ورق‌ها، فواصل بین لایه‌ای ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ میلی‌متر بین ورق‌ها در نظر گرفته شد.

### نتایج تجربی

نمای پشت و روی تعدادی از نمونه‌های جوش خورده فولاد/فولاد با استفاده از پرتابه‌های مسطح و کروی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. می‌توان مشاهده نمود الگوی تغییر شکل در نمونه‌های جوش خورده مشابه است. ضربه با سرعت بالای پرتابه روی صفحه پرنده باعث ایجاد تورفتگی بشقابی شکل در ناحیه ضربه می‌شود که قطر آن به مراتب بیشتر از قطر پرتابه است. عمق ناحیه تغییر شکل یافته با فاصله شعاعی از مرکز ورق تغییر می‌کند و با یک ناحیه فرورفته حلقوی شکل در اطراف خود احاطه شده است. ضخامت صفحه پرنده از لبه داخلی حلقه به سمت مرکز ورق کاهش می‌یابد به طوری که در مرکز دارای بیشترین عمق و کمترین ضخامت است. در واقع می‌توان بدین صورت بیان نمود که در اثر ضربه پرتابه در ناحیه مرکزی ضربه، جریان پلاستیک در صفحه پرنده شکل می‌گیرد و فلز در اثر فشار اعمالی بسیار بالا تسلیم می‌شود و مشاهده می‌شود که صفحه پرنده کشیده و نازک شده و بین صفحه پرنده و صفحه میزبان برخورد رخ داده است. همچنین با مقایسه شکل‌های ۲ و ۳ در می‌یابیم که استفاده از پرتابه با هندسه دماغه کروی شکل موجب نفوذ بیشتر پرتابه در ورق شده و موجب افزایش عمق ناحیه تغییر شکل یافته می‌شود. از این رو انتظار می‌رود صفحه پرنده به میزان بیشتری در داخل ورق میزبان نفوذ کرده و در نتیجه در سطح صفحات اتصال اتمی قوی‌تری ایجاد شود که این امر موجب تقویت الگوی موجی‌شکل در فصل مشترک اتصال ورق‌ها شده و در نتیجه جوش مطلوب‌تری ایجاد می‌شود.



شکل ۲) جوشکاری دو ورق فولادی با پرتابه مسطح (t=3mm, SD=0.1mm)



شکل ۳) جوشکاری دو ورق فولادی با پرتابه کروی (t=3mm, SD=0.1mm)



به زمان سنج فرستاده شده و زمان سنج شمارش را قطع می‌نماید. مقدار زمان شمارش شده پس از پردازش برحسب میکروثانیه روی صفحه‌نمایش، قابل رویت است. بدین ترتیب با داشتن زمان و فاصله بین حسگرهای نوری می‌توان سرعت برخورد پرتابه را محاسبه نمود. شایان ذکر است که جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای به کمک ورق فولادی با ضخامت ۴ میلی‌متر به‌عنوان صفحه میزبان و ورق‌هایی با ضخامت ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر به‌عنوان صفحه پرنده انجام شده است. مشخصات و خواص مکانیکی ورق مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱) مشخصات و خواص مکانیکی ورق فولادی St37

مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	تنش تسلیم (MPa)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	سختی (HRB)
۲۱۰	۰/۳	۳۰۰	۷۸۵۰	۱۱۸

### تشریح آزمایش‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها به‌منظور انجام آزمون ضربه، ابتدا نمونه‌ها به‌طور کامل یک‌نواخت سنباده‌کاری و سپس پرداخت می‌شوند تا سطحی کاملاً صاف به دست آید. از آنجایی که سطوح ورق‌ها باید عاری از هرگونه چربی و مواد اضافی باشد، به کمک محلول استون سطوح ورق‌ها در چند مرحله تمیز می‌شوند.

پرتابه فولادی از جنس VCN200 با جرم‌های ۷۰گرم (پرتابه با شکل دماغه مسطح) و ۱۳۰گرم (پرتابه با شکل دماغه کروی) مورد استفاده قرار گرفته است. ورق فولادی St-37 با ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر به‌عنوان ورق پایه و ورق‌های فولادی با ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر برای جوشکاری روی این ورق انتخاب شدند. آزمایش‌ها به‌صورت جدول ۲ دسته‌بندی شدند.

جدول ۲) نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ورق‌های فولادی با ضخامت ۴mm

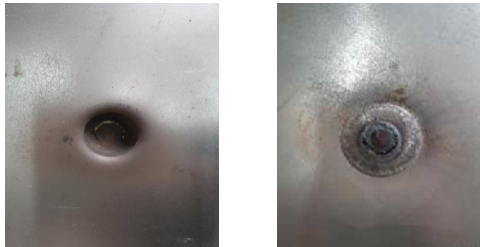
شماره آزمایش	ضخامت صفحه پرنده (mm)	فاصله بین دو ورق (mm)	نوع پرتابه
آزمایش ۱	۳	۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۵	مسطح
آزمایش ۲	۲	۰/۱	مسطح
آزمایش ۳	۱	۰/۱	مسطح
آزمایش ۴	۳	۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۵	کروی
آزمایش ۵	۲	۰/۱	کروی
آزمایش ۶	۱	۰/۱	کروی

همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌منظور بررسی تأثیر ضخامت ورق بر جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای، از ورق‌هایی با ضخامت‌های مختلف استفاده شده است. همچنین به‌منظور بررسی تأثیر فاصله بین ورق‌ها، فواصل بین لایه‌ای مختلف در نظر گرفته شده است. در این آزمایش‌ها پرتابه‌های مسطح و کروی به کار گرفته شده‌اند. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که به‌منظور بررسی اثر ضخامت صفحه پرنده در جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای، ورق‌هایی از جنس فولاد با ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر برای جوشکاری روی





شکل ۶) جوشکاری دو ورق فولادی با پرتابه مسطح (t=2mm, SD=0.1mm)



شکل ۷) جوشکاری دو ورق فولادی با پرتابه کرومی (t=2mm, SD=0.1mm)

### بررسی فصل مشترک اتصال نمونه‌ها

سه الگوی مختلف برای فصل مشترک نمونه‌های تحت جوش ضربه‌ای وجود دارد که شامل فصل مشترک صاف، موجی‌شکل و موجی گردابه‌ای است. اساساً الگوهای متفاوت فصل مشترک جوش، توسط پارامترهای فرآیند مشخص می‌شوند که عبارتند از زاویه ضربه و سرعت برخورد. به‌عنوان نمونه فصل مشترک موجی گردابه‌ای حین جوشکاری انفجاری در نتیجه سرعت برخورد بالاتر از ۱۰۰۰ متر بر ثانیه به دست می‌آید [32]. در این مطالعه، نمونه‌های جوش خورده به‌منظور مشاهده و بررسی فصل مشترک جوش به کمک دستگاه میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. آماده‌سازی نمونه‌ها از نکات اساسی و قابل توجه در استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی است. به‌منظور مشاهده فصل مشترک نمونه‌های حاصل از آزمایش با دستگاه میکروسکوپ الکترونی، ابتدا مقاطع نمونه‌های انتخابی توسط دستگاه وایرکات به صورت عرضی برش داده شدند. سپس هر یک از نمونه‌ها طی مراحل مختلف با استفاده از کاغذ سنباده‌های شماره ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ سنباده‌زنی شده و سپس پولیش شدند. در نهایت سطح نمونه‌ها با الکل شسته و خشک شده و بدین ترتیب نمونه‌ها آماده بررسی با میکروسکوپ الکترونی شدند. برخی از این نمونه‌ها دارای فصل مشترک اتصال موجی شکل و برخی دیگر دارای فصل مشترک اتصال مسطح بودند.

شکل‌های ۸ تا ۱۰ تصاویر به‌دست‌آمده از نمونه‌های با فاصله بین لایه‌های ۱/۱، ۲/۰ و ۵/۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مرز بین دو ورق، فصل مشترک صاف و موجی‌شکل ایجاد شده است. طبق تحقیقات انجام‌شده، تورگوتلو و همکارانش نشان دادند که الگوی موجی‌شکل ایجادشده در محل اتصال ورق‌ها در نتیجه ضربه پرتابه موجب افزایش سطح تماس بین صفحه پرنده و صفحه میزبان می‌شود و در هم فرورفتگی فلزات را در نتیجه اتصال دائمی دو ورق فلزی افزایش می‌دهد و

### بررسی الگوی آسیب در فصل مشترک اتصال

الگوی آسیب در اثر ضربه با سرعت بالا روی جامدات شکننده در گذشته مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. شی و همکارانش الگوی آسیب روی سطح PMMA (پلی متیل متا کریلیت) بعد از ضربه جت آب با سرعت ۳۲۹ متر بر ثانیه را بررسی و یک ناحیه مرکزی آسیب دیده را مشاهده نمودند که از اطراف توسط ترک‌هایی احاطه شده بود [30]. فیلد در آزمایش‌های خود شکست در حلقه میانی و ناحیه مرکزی آسیب دیده را گزارش داد و مشاهده نمود که شکستگی حلقه بجای یک ترک پیوسته، از تعداد زیادی شکستگی‌های کوچک تشکیل شده است [31]. شکل‌های ۴ تا ۷ نمونه‌هایی از جوشکاری ناموفق صفحات فولادی به یکدیگر را نشان می‌دهد. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با استفاده از پرتابه‌های مسطح و کرومی برای صفحه پرنده فولادی با ضخامت ۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد. یک ناحیه مرکزی آسیب‌دیده دایره‌ای شکل که در اطراف خود با یک ناحیه حلقوی شکل احاطه شده است در محل ضربه مشاهده می‌شود. ضخامت ورق در این ناحیه به میزان قابل توجهی کاهش یافته و در برخی از قسمت‌ها به دلیل کاهش بیش از حد ضخامت ورق، پارگی رخ داده است. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با استفاده از پرتابه‌های مسطح و کرومی برای صفحه پرنده فولادی با ضخامت ۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان پارگی برای ورق‌های با ضخامت ۱ میلی‌متر بیشتر است. علت این امر را می‌توان این‌گونه بیان نمود که اگرچه فولاد جزء فلزات نرم و انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شود اما در نرخ کرنش‌های بالا فلزات، گذاری از تسلیم پلاستیک نرم به شکست ترد از خود نشان می‌دهند [6] بنابراین نتیجه می‌گیریم از آنجایی که برای ورق‌های فولادی با ضخامت ۱ و ۲ میلی‌متر تحت ضربه با سرعتی در حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه نرخ کرنش بسیار بالا است از این رو استفاده از ورق‌های با ضخامت بیشتر احتمال ایجاد آسیب و پارگی در ورق را کاهش می‌دهد.



شکل ۸) جوشکاری دو ورق فولادی با پرتابه مسطح (t=1mm, SD=0.1mm)



شکل ۹) جوشکاری دو ورق فولادی با پرتابه کرومی (t=1mm, SD=0.1mm)

به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی می‌توان دریافت که فصل مشترک اتصال ورق‌های فولادی در شکل ۱۰ دارای الگوی موجی شکل نیست. دلیل این امر بدین شرح است زمانی که فاصله بین لایه‌ای بالاتر بین صفحات اعمال شود، دیگر سرعت ضربه برای ایجاد جوش پیوسته کافی نیست [34]. بنابراین در این نمونه فاصله بین لایه‌ای به منظور دستیابی به اتصال کامل مناسب نبوده است. با توجه به این امر که استحکام ناحیه جوش به میزان قابل‌ملاحظه‌ای به وجود الگوی موجی شکل بستگی دارد، از این رو در این نمونه اتصال قابل قبولی رخ نداده و اتصالی ناقص مشاهده می‌شود.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای ورق‌های ضخیم فولادی با استفاده از ضربه سرعت بالای پرتابه به کمک سامانه انفجار مخلوط گازها مورد مطالعه قرار گرفت. ورق فولادی St-37 با ابعاد  $250 \times 250$  میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر به‌عنوان ورق پایه و ورق‌های فولادی با ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر برای جوشکاری روی این ورق انتخاب شدند. فاصله بین ورق‌ها  $0/1$ ،  $0/2$  و  $0/5$  میلی‌متر در نظر گرفته شد. پرتابه‌های فلزی با شکل دماغه مسطح و کرومی به ترتیب با جرم‌های  $650$  گرم و  $1300$  گرم مورد استفاده قرار گرفته است. تغییر شکل ورق‌ها در اثر ضربه پرتابه مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی مورفولوژی فصل مشترک اتصالات تحت جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه، فصل مشترک جوش با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که:

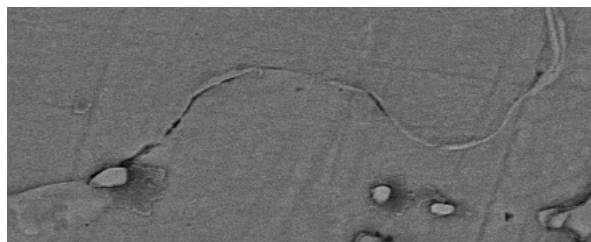
۱- تغییر شکل ورق‌ها در اثر ضربه پرتابه به صورت یک تورفتگی بشقابی شکل در ناحیه ضربه است که توسط یک ناحیه حلقوی شکل احاطه شده است.

۲- عمق ناحیه تغییر شکل یافته با فاصله شعاعی از مرکز ورق تغییر می‌کند و با یک ناحیه فرورفته حلقوی در اطراف خود احاطه شده است. ضخامت صفحه پرنده از لبه داخلی حلقه به سمت مرکز ورق کاهش می‌یابد به طوری که در مرکز دارای بیشترین عمق و کمترین ضخامت است.

۳- تصاویر SEM نشان می‌دهد که جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه ممکن است منجر به ایجاد فصل مشترک صاف و موجی شکل شود.

۴- در برخی از نمونه‌ها یک ناحیه مرکزی آسیب‌دیده دایره‌ای شکل که در اطراف خود با یک ناحیه حلقوی شکل احاطه شده است در محل ضربه مشاهده شد که ضخامت ورق در این نواحی به میزان قابل توجهی کاهش یافته و در برخی از قسمت‌ها به دلیل کاهش بیش از حد ضخامت ورق، پارگی رخ داده است که با افزایش ضخامت صفحه پرنده احتمال شکل‌گیری این ناحیه مرکزی آسیب‌دیده کاهش می‌یابد.

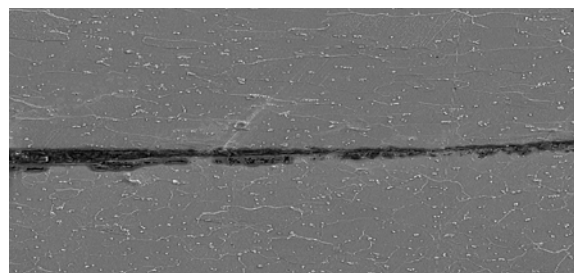
بدین ترتیب یک جوش دائمی با کیفیت بالا بین صفحات ایجاد می‌شود [33]. به منظور بررسی تأثیر فواصل بین لایه‌ای مختلف روی فصل مشترک جوش، جوشکاری نقطه‌ای فولاد/فولاد با فواصل بین لایه‌ای  $0/1$ ،  $0/2$  و  $0/5$  میلی‌متر انجام شد.



شکل ۸) جوشکاری دو ورق فولادی با پرتابه کرومی ( $t=3\text{mm}$ ,  $SD=0.1\text{mm}$ )



شکل ۹) جوشکاری دو ورق فولادی با پرتابه کرومی ( $t=3\text{mm}$ ,  $SD=0.2\text{mm}$ )



شکل ۱۰) جوشکاری دو ورق فولادی با پرتابه کرومی ( $t=3\text{mm}$ ,  $SD=0.5\text{mm}$ )

در شکل‌های ۸ و ۹ ناحیه جوش خورده با درجات متفاوتی از فرورفتگی در مرکز صفحه پرنده مشاهده می‌شود. مشاهده می‌شود که فصل مشترک اتصال به صورت الگوی موجی شکل با طول موج‌ها و دامنه‌های متفاوت است.

شکل ۸ جوشکاری نقطه‌ای دو ورق فولادی که در فاصله  $0/1$  میلی‌متر از یکدیگر قرار دارند را نشان می‌دهد. در این شکل فصل مشترک اتصال ورق‌های فولادی قابل مشاهده است. مشاهده می‌شود که فصل مشترک اتصال دارای الگوی موجی شکل بوده و اتصال کامل رخ داده است.

در شکل ۹ فاصله بین دو ورق فولادی به  $0/2$  میلی‌متر افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد با مقایسه شکل‌های ۸ و ۹ افزایش فاصله بین دو ورق موجب تضعیف الگوی موجی شکل در فصل مشترک اتصال شده و الگوی فصل مشترک از حالت موجی به سمت فصل مشترک صاف متمایل می‌شود.

شکل ۱۰ جوشکاری نقطه‌ای دو ورق فولادی که در فاصله  $0/5$  میلی‌متر از یکدیگر قرار دارند را نشان می‌دهد. با بررسی تصاویر

in impact spot welds. *International Journal of Impact Engineering*. 1996;18(6):657-669.

12- Bataev IA, Tanaka S, Zhou Q, Lazurenko DV, Junior AJ, Bataev AA et al. Towards better understanding of explosive welding by combination of numerical simulation and experimental study. *Materials & Design*. 2019;169:107649.

13- Crossland B, Williams JD. Explosive welding. *Metallurgical Reviews*. 1970;15(1):79-100.

14- Turgutlu A, Al-Hassani STS, Akyurt M. Assessment of bond interface in impact spot welding. *International Journal of Impact Engineering*. 1997;19(9-10):755-767.

15- Chizari M, Barrett LM. Single and double plate impact welding: Experimental and numerical simulation. *Computational Materials Science*. 2009;46(4):828-833.

16- Wang X, Gu Y, Qiu T, Ma Y, Zhang D, Liu H. An experimental and numerical study of laser impact spot welding. *Materials & Design* (1980-2015). 2015;65:1143-1152.

17- Fanelli P, Fino A, Vivio F. Analysis of elastic-plastic behavior and plastic front evaluation in spot welded joints. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015;90:122-132.

18- Kapil A, Lee T, Vivek A, Bockbrader J, Abke T, Daehn G. Benchmarking strength and fatigue properties of spot impact welds. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;255:219-233.

19- Wang X, Shao M, Gao S, Gau GT, Tang H, Jin H, et al. Numerical simulation of laser impact spot welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;35:396-406.

20- Kapil A, Lee T, Vivek A, Cooper R, Hetrick E, Daehn G. Spot impact welding of an age-hardening aluminum alloy: Process, structure and properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;37:42-52.

21- Hosseinzadeh Salehkouh S, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H. Experimental investigation of spot welding process on metallic targets impacted by flat and conical projectiles. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2019;9(3):39-49. [Persian]

22- Babaei H, Mirzababaie Mostofi, Sadraei SH. Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical. *Structural Engineering and Mechanics*. 2015;56(4):535-548.

23- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020;234(5):1102-1111.

24- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M, Darvizeh A. Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process. *Experimental Techniques*. 2016;40:1485-1494.

25- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Namdari-Khalilabad M, Alitavoli M, Mohammadi K. Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling. *Powder Technology*. 2017;315:171-181.

26- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M. Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. *Strain*. 2017;53(4):e12235.

27- Mirzababaie Mostofi, Babaei H, Alitavoli M. The

۵- زمانی که فاصله بین لایه‌ای بالاتر از حد معینی بین صفحات اعمال شود، دیگر سرعت ضربه برای ایجاد جوش پیوسته کافی نیست و در نتیجه شاهد یک اتصال ضعیف ناپیوسته خواهیم بود.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان و صحت نتایج آن نیز بر عهده آنها است.

**تعارض منافع:** این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

**سهم نویسندگان:** صدیقه حسین‌زاده صالحکوه (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده مقدمه/تحلیلگر آماری (۵۰٪)؛ هاشم بابایی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۳۰٪)؛ توحید میرزابابایی مستوفی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۲۰٪).

**منابع مالی:** کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تامین شده است.

## منابع

1- Wang H, Wang Y. High-velocity impact welding process: A review. *Metals*. 2019;9(2):144.

2- Carvalho Ghsfl, Galvão I, Mendes R, Leal RM, Loureiro A. Explosive welding of aluminium to stainless steel using carbon steel and niobium interlayers. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;283:116707.

3- Sun Z, Shi C, Xu F, Feng K, Zhou C, Wu X. Detonation process analysis and interface morphology distribution of double vertical explosive welding by SPH 2D/3D numerical simulation and experiment. *Materials & Design*. 2020;191:108630.

4- Chizari M, Al-Hassani STS, Barrett LM. Experimental and numerical study of water jet spot welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;198(1-3):213-219.

5- Chizari M, Al-Hassani STS, Barrett LM, Wang B. 3-D finite element modelling of water Jet spot welding. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2007;2.

6- Alitavoli M, Darvizeh A, Moghaddam M, Parghou P, Rajabiehfard R. Numerical modeling based on coupled Eulerian-Lagrangian approach and experimental investigation of water jet spot welding process. *Thin-Walled Structures*. 2018;127:617-628.

7- Vaezi AA, Jafari H. Study of microstructure and mechanical properties of dissimilar friction welded martensitic stainless steel 410 to austenitic stainless steel 304. *Modares Mechanical Engineering*. 2019;19(2):439-445. [Persian]

8- Yahya Abadi S, Abbasi M. Modification of mechanical properties of Al6061 aluminum alloy joint formed using friction stir welding by increasing the cooling rate and application of vibration. *Modares Mechanical Engineering*. 2019;19(6):1551-1558. [Persian]

9- Turgutlu A, Al-Hassani STS, Akyurt M. Experimental investigation of deformation and jetting during impact spot welding. *International Journal of Impact Engineering*. 1995;16(5-6):789-799.

10- Hosseinzadeh S, Babaei H, Jahanbakhsh R, Alitavoli M. Experimental study of high-velocity projectile impact welding. *Experimental Techniques*. 2018;2(5):509-522.

11- Turgutlu A, Al-Hassani STS, Akyurt M. The influence of projectile nose shape on the morphology of interface

the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1966;260(1110):86-93.

32- Watanabe M, Kumai S. Interfacial morphology of magnetic pulse welded aluminum/aluminum and copper/copper lap joints. *Materials transactions*. 2009;50(2):286-292.

33- Peng H, Chen DL, Bai XF, Wang PQ, Li DY, Jiang XQ. Microstructure and mechanical properties of Mg-to-Al dissimilar welded joints with an Ag interlayer using ultrasonic spot welding. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2020;8(2):552-563.

34- Kore SD, Date PP, Kulkarni SV. Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminum sheets. *International Journal of Impact Engineering*. 2007;34(8):1327-1341.

influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. *Thin-Walled Structures*. 2017;118:1-11.

28- Bangash MTH. *Impact and explosion: Structural analysis and design*. Didcot: Taylor & Francis. 1993.

29- Kleiner M, Hermes M, Weber M, Olivier H, Gershteyn G, Bach WF, et al. Tube expansion by gas detonation. *Production Engineering*. 2007;1:9-17.

30- Shi HH, Takayama K, Nagayasu N. The measurement of impact pressure and solid surface response in liquid-solid impact up to hypersonic range. *Wear*. 1995;186-187 Pt 2:352-359.

31- Field J. Stress waves, deformation and fracture caused by liquid impact. *Philosophical Transactions for*