

The Effect of Projectile Nose-Shape on Spot Welding of Steel Plates Using Gas Mixture Detonation Technique

Hosseinzadeh Salehkouh S.¹ *MSc*, Babaei H.*¹ *PhD*, Mirzababaie Mostofi T.² *PhD*

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

Abstract

In the present study, deformation pattern in impact spot welded plates with flat and spherical-nosed projectiles using gas mixture detonation set up has been investigated and compared with numerical simulations. The steel plate with a thickness of 4mm was considered as a base plate and steel plates with 1, 2, and 3mm thicknesses were selected as flyer plates and were under direct contact with flat- and spherical-nosed metallic projectiles with a mass of 650 and 1300 gram, respectively. The average velocity of the projectiles was 600 meters per second. The ABAQUS finite element software was used to investigate the high-velocity impact of projectiles on steel sheets. The Johnson-Cook (J-C) model was utilized to describe the behavior of metals. The deformation of plates during the impact spot welding process has been simulated. Comparing the plate deformation pattern in numerical simulation and experimental results found that the numerical model predicted well the deformation of plates during the projectile impact spot welding process. The stress wave propagation on the flyer plates also was studied numerically. The results show that the waves start from the center and progress to the corners of the plate. The values of the equivalent plastic strain (PEEQ) and shear stress pattern for flyers and target plates have investigated as a measure of the quality of welding.

Keywords

Impact Spot Welding
Gas Mixture Detonation Technique
Bonding in the Solid Phase
Johnson-Cook Constitutive Law

*Corresponding Author

Tel: +98 (13) 33690539

Fax: +98 (13) 33690271

Post Address: Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, 5th km of Persian Gulf Highway, Rasht, Iran. Postal Code: 4199613776

ghbabaei@guilan.ac.ir

Received: July 5, 2020

Accepted: August 1, 2020

ePublished: October 21, 2020

بررسی تأثیر شکل هندسی دماغه پرتابه بر جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های فولادی با روش انفجار مخلوط گازها

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 مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی تجربی الگوی تغییر شکل ورق‌ها حین فرآیند جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با استفاده از پرتابه‌های با شکل دماغه مسطح و کروی به کمک سامانه انفجار مخلوط گازها و مقایسه آن با الگوی تغییر شکل در شبیه‌سازی عددی پرداخته شده است. ورق فولادی با ضخامت ۴ میلی‌متر به‌عنوان صفحه پایه و ورق‌های فولادی با ضخامت‌های یک، ۲ و ۳ میلی‌متر به‌عنوان صفحه پرند انتخاب شدند و تحت برخورد مستقیم پرتابه‌های فلزی با شکل دماغه مسطح و کروی با جرم‌های ۶۵۰ و ۱۳۰۰ گرم قرار گرفته‌اند. میانگین سرعت پرتابه‌ها ۶۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. نرم‌افزار المان محدود آباکوس به‌منظور بررسی ضربه سرعت بالای پرتابه روی ورق‌های فولادی مورد استفاده قرار گرفته است. برای توضیح رفتار فلزات از مدل جانسون-کوک استفاده شده است. تغییر شکل صفحات حین فرآیند جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای شبیه‌سازی شده است. با مقایسه الگوی تغییر شکل ورق‌ها در حالت شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی درمی‌یابیم که مدل عددی به خوبی الگوی تغییر شکل در صفحات حین فرآیند جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه را پیش‌بینی می‌کند. همچنین الگوی انتشار امواج تنش روی صفحه پرند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این امواج از مرکز شروع و به سمت گوشه‌های ورق گسترش می‌یابد. به‌علاوه مقادیر کرنش پلاستیک معادل و الگوی تنش برشی برای صفحات پرند و پایه به‌عنوان معیار کیفیت جوش مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: جوش نقطه‌ای ضربه‌ای، روش انفجار مخلوط گازها، اتصال حالت جامد، مدل جانسون-کوک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱

*نویسنده مسئول: ghbabaei@guilan.ac.ir

مقدمه

فرآیند جوشکاری کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی، کشتی‌سازی و غیره دارد. این فرآیند یکی از مهم‌ترین روش‌های تولید در صنعت است. روش‌های جوشکاری براساس حالت مواد حین این فرآیند، به دو دسته جوشکاری حالت جامد و ذوبی تقسیم می‌شوند. در جوشکاری حالت جامد، یک اتصال متالورژیکی در دمای پایین‌تر از نقطه ذوب مواد برقرار می‌شود. بنابراین عیوبی مانند ترک ناشی از انجماد، اعوجاج و تخلخل که در جوشکاری ذوبی در نتیجه ذوب مواد

ظاهر می‌شوند، در جوشکاری حالت جامد قابل اجتناب است [1]. اخیراً روش‌های مختلف جوشکاری حالت جامد پیشرفت قابل توجهی داشته‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان به روش‌های جوشکاری پالس مغناطیسی [2، 3]، ضربه‌ای با لیزر [4، 5]، مافوق صوت [6، 7]، مقاومتی [8، 9]، اصطکاکی-اغتشاشی [10، 11]، انفجاری [12، 13] و نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه [14-16] اشاره نمود که از این میان جوشکاری انفجاری، پالس مغناطیسی، ضربه‌ای با لیزر و نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه از جمله روش‌های جوشکاری ضربه‌ای با سرعت بالا هستند. جوشکاری ضربه‌ای با سرعت بالا توسط دمای جوشکاری پایین و سرعت جوشکاری بالا شناخته شده است. با توجه به توضیحات فوق درمی‌یابیم که جوشکاری ضربه‌ای شامل حوزه تحقیقاتی گسترده‌ای در علم مکانیک، حرارت و مواد است. از این‌رو، توصیف اثر دینامیکی متقابل پیچیده بین پدیده‌های مختلف در فرآیند جوشکاری به‌صورت تحلیلی، بسیار دشوار است. بنابراین شبیه‌سازی کامپیوتری فرآیند جوشکاری رویکردی مناسب برای درک بهتر این فرآیند است. مطالعات مختلفی در زمینه شبیه‌سازی کامپیوتری فرآیند جوشکاری ضربه‌ای با سرعت بالا انجام شده است.

اکبری موسوی و/الحسنی به مطالعه عددی و آزمایشگاهی مکانیزم شکل‌گیری فصل مشترک موجی‌شکل در جوشکاری انفجاری پرداختند. در بخش عددی این مطالعه، روش تفاضل محدود برای مدل‌سازی ضربه مایل یک ورق نازک به یک ورق ضخیم مورد استفاده قرار گرفت. همچنین فصل مشترک صاف و موجی‌شکل و پدیده شکل‌گیری جت مدل‌سازی و اندازه امواج و سرعت جت پیش‌بینی شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که شکل‌گیری فصل مشترک موجی شکل در نتیجه تغییرات توزیع سرعت و تداخل دوره‌ای مواد است. همچنین مقادیر بالای کرنش پلاستیک در فصل مشترک موجی‌شکل پیش‌بینی شد [17].

چیندری و همکاران به مطالعه عددی و آزمایشگاهی جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با جت آب پرداختند. آنها از شبیه‌سازی المان محدود سه‌بعدی به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری نقطه‌ای با جت آب استفاده نمودند. هدف اصلی شبیه‌سازی، تعیین پارامترهایی بود که معیار مناسبی برای تعیین کیفیت جوش ایجادشده محسوب شود. نتایج مطالعه آنها نشان داد که مقدار کرنش پلاستیک معادل و جهت تنش برشی در مواد، پیش‌بینی‌کننده موفقیت و یا عدم موفقیت فرآیند جوشکاری است [18].

وانگ و همکاران، مطالعه عددی و آزمایشگاهی جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با جت آب را مورد بررسی قرار دادند. آنها از روش تفاضل محدود نرم‌افزار اتوداین و روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری استفاده نمودند و دریافتند که جهت تنش برشی مخالف و بالاتر بودن کرنش پلاستیک معادل از یک مقدار بحرانی برای دستیابی به جوش مطلوب ضروری است [5].

آلاینده‌ها از سطوح، ورق‌های مورد آزمایش طی چند مرحله به کمک محلول استون شستشو داده شده و خشک می‌شوند. خواص مکانیکی فولاد ST-37 در جدول ۱ ارایه شده است. ضخامت صفحه پایه ۴، فاصله بین دو ورق ۱/۰ و برای صفحه پرده ضخامت‌های یک، ۲ و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها به صورت جدول ۲ دسته‌بندی شدند. همان طور که مشاهده می‌شود به منظور بررسی تأثیر شکل هندسی دماغه پرتابه بر جوش کاری نقطه‌ای ضربه‌ای، از پرتابه‌هایی با شکل دماغه مسطح و کروی استفاده شده است. نمای پشت و روی تعدادی از نمونه‌های جوش خورده فولاد/فولاد با استفاده از پرتابه‌های با شکل دماغه مسطح و کروی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود یک تورفتگی بشقابی شکل در اثر ضربه با سرعت بالای پرتابه روی صفحه پرده ایجاد شده است. برای مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات تجربی با نتایج شبیه‌سازی عددی، نمونه‌های حاصل از آزمایش‌های شماره یک و ۴ از جدول ۲ انتخاب شده و الگوی تغییر شکل در این ورق‌ها با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است که تطابق خوبی را بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشات تجربی نشان می‌دهد. توضیحات تکمیلی در زمینه آزمایشات تجربی، در مطالعه حسین‌زاده صالح‌کوه و همکاران^[21] به تفصیل ارایه شده است. همچنین در پژوهش‌هایی اطلاعات بیشتر در مورد سازوکار روش انفجار مخلوط گازها ارایه شده است^[22-29].



شکل ۱) سامانه انفجار مخلوط گازها

جدول ۱) مشخصات و خواص مکانیکی ورق فولادی ST-37^[16]

توضیحات	پارامتر
ورق فولادی ST-37	نوع ماده
۲۱۰	مدول یانگ (GPa)
۰/۳	نسبت پواسون
۳۰۰	تنش تسلیم (MPa)
۳۶۰	استحکام نهایی (MPa)
۷۸۵۰	چگالی (kg/m ³)

جدول ۲) نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی ورق‌های فولادی

شماره آزمایش	ضخامت صفحه پرده (mm)	ضخامت ورق (mm)	فاصله بین دو ورق (mm)	شکل هندسی دماغه پرتابه
آزمایش ۱	۳	۴	۱/۰	مسطح
آزمایش ۲	۲	۴	۱/۰	مسطح
آزمایش ۳	۱	۴	۱/۰	مسطح
آزمایش ۴	۳	۴	۱/۰	کروی
آزمایش ۵	۲	۴	۱/۰	کروی
آزمایش ۶	۱	۴	۱/۰	کروی

علی‌طاولی و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی فرآیند جوش کاری نقطه‌ای با جت آب براساس رویکرد اویلری-لاگرانژی پرداختند. مدل‌سازی عددی شکل‌گیری جت و برهم‌کنش بین جت و سطح جامد با به کارگیری رویکرد اویلری-لاگرانژی انجام شد. به علاوه مدل آسیب جانسون-کوک به منظور پیش‌بینی شروع آسیب در سطوح جامد مورد استفاده قرار گرفت. پروفیل سرعت جت در راستای محوری و شعاعی و تغییرات آن به منظور توصیف تغییرات سرعت در نقاط مختلف جت نسبت به زمان به دست آمد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که مدل پیشنهادی در پیش‌بینی رفتار جت حین فرآیند جوش کاری و تغییر شکل ورق و الگوی شکست موفق عمل کرده است^[19].

باتاو و همکاران به شبیه‌سازی عددی و مطالعه آزمایشگاهی جوش کاری انفجاری پرداختند و دریافتند که شبیه‌سازی فرآیند ضربه با سرعت بالا با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار امکان شبیه‌سازی دقیق شکل‌گیری فصل مشترک موجی شکل، ناحیه گردابی و همچنین تشکیل جت را فراهم می‌سازد و بدین ترتیب توضیحات جدیدی در رابطه با شکل‌گیری ناحیه گردابی شکل ارایه نمودند. به علاوه آنها با ترکیب چندین رویکرد مبتنی بر روش‌های عددی یک پنجره جوش کاری برای ترکیب فولاد/فولاد ارایه نمودند و نشان دادند که نتایج به دست آمده با مفاهیم موجود جوش کاری حین ضربه با سرعت بالا مطابقت دارد^[20].

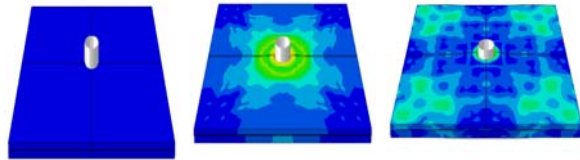
مواد و آزمایشات تجربی

آزمایش‌های جوش کاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه با استفاده از سامانه انفجار مخلوط گازها انجام شده است. این سامانه شامل دو قسمت محرک و آزمایش است که قسمت محرک متشکل از محفظه احتراقی به منظور انجام فرآیند اختلاط گاز بوده و قسمت آزمایش شامل یک قسمت کروی شکل، یک لوله با قطر داخلی ۵۴ و طول ۱۰۴۰ میلی‌متر و پرتابه فولادی از جنس VCN200 با دو شکل دماغه تخت و کروی به ترتیب با جرم‌های ۷۵۰ و ۱۳۰۰ گرم است. سرعت پرتابه‌ها در حدود ۷۰۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. پس از اختلاط دو گاز اکسیژن و استیلن درون محفظه احتراق و ایجاد جرقه، مخلوط گاز منفجر شده و نیروی انفجاری تولید شده موجب حرکت پرتابه با انرژی جنبشی بسیار زیاد درون لوله و برخورد پرتابه با صفحه پرده می‌شود. شکل ۱ تصویر سامانه انفجار مخلوط گازها را نشان می‌دهد.

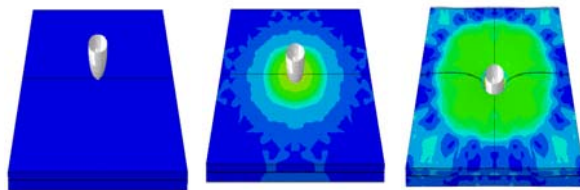
ورق‌های فولادی ST-37 با ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر که سطح آنها سنباده کاری و پولیش شده است، به منظور انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نحوه آماده‌سازی سطوح ورق‌ها قبل از انجام جوش کاری بدین صورت است که در ابتدا ورق‌ها طی چند مرحله با کاغذ سنباده به طور یکنواخت سنباده‌زنی شده و پس از آن به منظور دستیابی به سطحی کاملاً صاف، پرداخت می‌شوند. در مرحله بعد به منظور برطرف نمودن هر گونه چربی و مواد اضافی و

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (۲)$$

که T دمای ماده، T_{melt} دمای ذوب فلز و T_{room} دمای اتاق است. پارامترهای مدل جانسون- کوک برای فولاد ST-37 در جدول ۳ ارائه شده است.

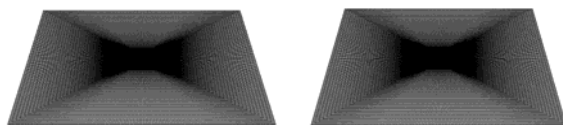


(الف)

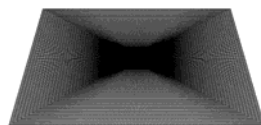


(ب)

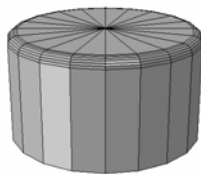
شکل ۴) سه مرحله از شبیه‌سازی المان محدود جوش کاری نقطه‌ای ضربه‌ای؛
الف) پرتابه با شکل دماغه مسطح، ب) پرتابه با شکل دماغه کروی



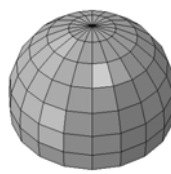
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵) مدل‌سازی المان محدود؛ الف) صفحه پرنده، ب) صفحه پایه، ج) پرتابه
با شکل دماغه کروی، د) پرتابه با شکل دماغه مسطح

جدول ۳) پارامترهای مدل جانسون- کوک برای فولاد ST-37 [34]

پارامتر	ضخامت ورق (mm)	
	۴	۳
A	۲۴۵/۹۲	۳۰۰/۵۸
B	۱۴۲/۷۰	۱۲۷/۸۶
n	۰/۱۲۷۷	۰/۱۵۷۷
C	۰/۰۲۲۰	۰/۰۲۲۰
m	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰

حساسیت‌سنجی شبکه مدل

یکی از موضوعات مهم در نتایج حاصل از المان محدود، کنترل خطاهای ناشی از توصیف مدل، جداسازی معادلات و غیره است. اگر نوع و تراکم المان‌ها در مناطق بحرانی به درستی انتخاب نشود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ممکن است گمراه‌کننده باشد.



شکل ۲) جوش کاری دو ورق فولادی با پرتابه مسطح (ضخامت صفحه پرنده ۳ و فاصله بین دو ورق ۱/۰ میلی‌متر)



شکل ۳) جوش کاری دو ورق فولادی با پرتابه کروی (ضخامت صفحه پرنده ۳ و فاصله بین دو ورق ۱/۰ میلی‌متر)

شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی کامپیوتری ضربه پرتابه روی ورق فولادی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس در شکل ۴ نشان داده شده است. صفحات پرنده و پایه به کمک شمار زیادی از المان‌های هشت‌وجهی با سه درجه آزادی برای هر گره که قادر به تغییر شکل‌های بزرگ هستند، مدل شده است. مش‌بندی المان به صورت موضعی به منظور افزایش المان‌های نزدیک سطح تماس بهینه شده است تا بتوان به مناسب‌ترین مش‌بندی موضعی مورد نیاز در نواحی شامل تغییر شکل‌های بزرگ دست یافت [30]. صفحات پرنده و پایه به صورت ورق‌های الاستیک- پلاستیک انعطاف‌پذیر مدل شده‌اند (شکل‌های ۵- الف و ۵- ب). صفحه پرنده به موازات صفحه پایه و با فاصله مشخصی از آن قرار گرفته است. پرتابه‌ها صلب فرض شده و به صورت شکل‌های ۵- ج و ۵- د مدل شده‌اند.

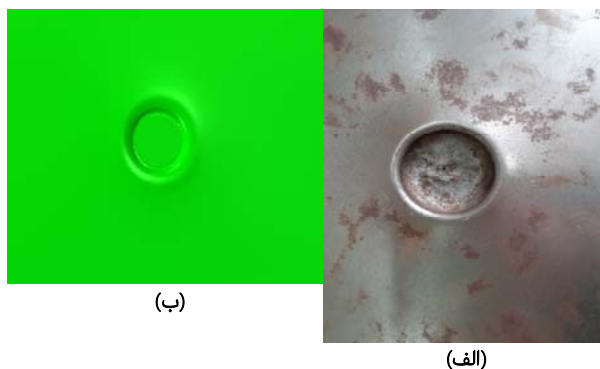
برای توصیف رفتار صفحات تحت ضربه سرعت بالا، مدل جانسون- کوک مورد استفاده قرار گرفته است. جانسون- کوک مدلی است که تسلیم شبه‌استاتیک، کرنش سختی، نرخ کرنش سختی و نرم‌شدن حرارتی در مواد را محاسبه می‌کند [31-33].

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 + T^{*m}) \quad (۱)$$

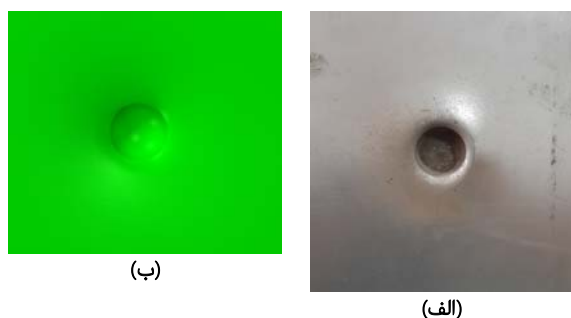
معادله ۱ جریان تنش و ن-میسز ($\bar{\sigma}$) را به صورت تابعی از کرنش پلاستیک معادل ($\bar{\epsilon}^{pl}$)، نرخ کرنش پلاستیک معادل ($\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$) و دمای بی‌بعد (T^{*m}) بیان می‌کند. A ، B ، C و m به ترتیب ثابت‌های ماده متناظر با تنش تسلیم، ثابت کرنش سختی، تأثیر گرانش و نرم‌شدن حرارتی است. همچنین n نشان‌دهنده کرنش سختی و $\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}$ نرخ کرنش پلاستیک نرمال بوده و T^* نیز به صورت زیر تعریف می‌شود.

ایجاد شده در سطح صفحه پرنده شروع به افزایش می‌کند و مقدار آن از صفر (قبل از ضربه) تا بیشترین مقدار خود که برابر فاصله بین دو صفحه است، افزایش می‌یابد. به‌علاوه قطر ناحیه فرورفته به تدریج کاهش پیدا می‌کند تا زمانی که قسمت فرورفته با صفحه پایه برخورد کند. تغییر شکل صفحه پرنده زمانی متوقف می‌شود که صفحات پرنده و پایه در تماس با یکدیگر قرار گرفته و به یکدیگر متصل شوند. شایان ذکر است در مواردی که فاصله بین دو ورق زیاد باشد، صفحه پرنده سوراخ خواهد شد. همچنین مشاهده می‌شود الگوی تغییر شکل در ضربه با پرتابه‌های مسطح و کروی مشابه است. با مقایسه حالت تغییر شکل یافته حاصل از آزمایش‌های تجربی و مدل‌سازی عددی درمی‌یابیم که تطابق خوبی بین نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی وجود دارد و مدل عددی به خوبی الگوی تغییر شکل در صفحات را حین فرآیند جوش کاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه پیش‌بینی می‌کند.

زمانی که یک سطح جامد در معرض بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرد امواج طولی و عرضی در آن ایجاد می‌شود^[19]. انتشار موج تنش در سطح تماس صفحه پرنده برای نمونه‌های جوش کاری شده با پرتابه‌های با شکل دماغه مسطح و کروی به‌ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که امواج از مرکز شروع و به سمت لبه‌های ورق گسترش می‌یابد. طبق شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار تنش در ناحیه حلقوی شکل و مرکز ورق اعمال شده است و در بخش‌های باقی‌مانده ورق، بزرگی تنش به‌طور نسبی کمتر است.

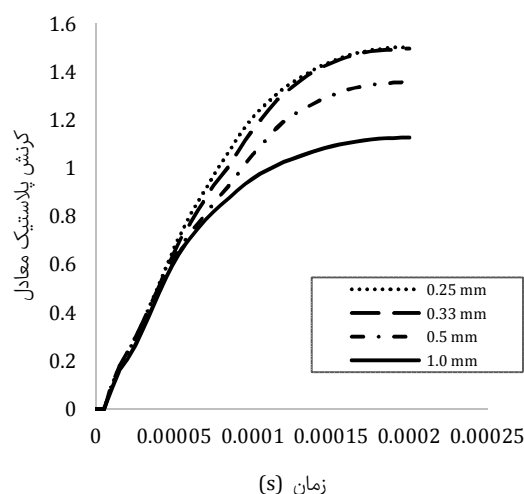


شکل ۶ جوش کاری دو ورق فولادی با پرتابه مسطح؛ (الف) نمونه آزمایشگاهی، (ب) شبیه‌سازی عددی



شکل ۷ جوش کاری دو ورق فولادی با پرتابه کروی؛ (الف) نمونه آزمایشگاهی، (ب) شبیه‌سازی عددی

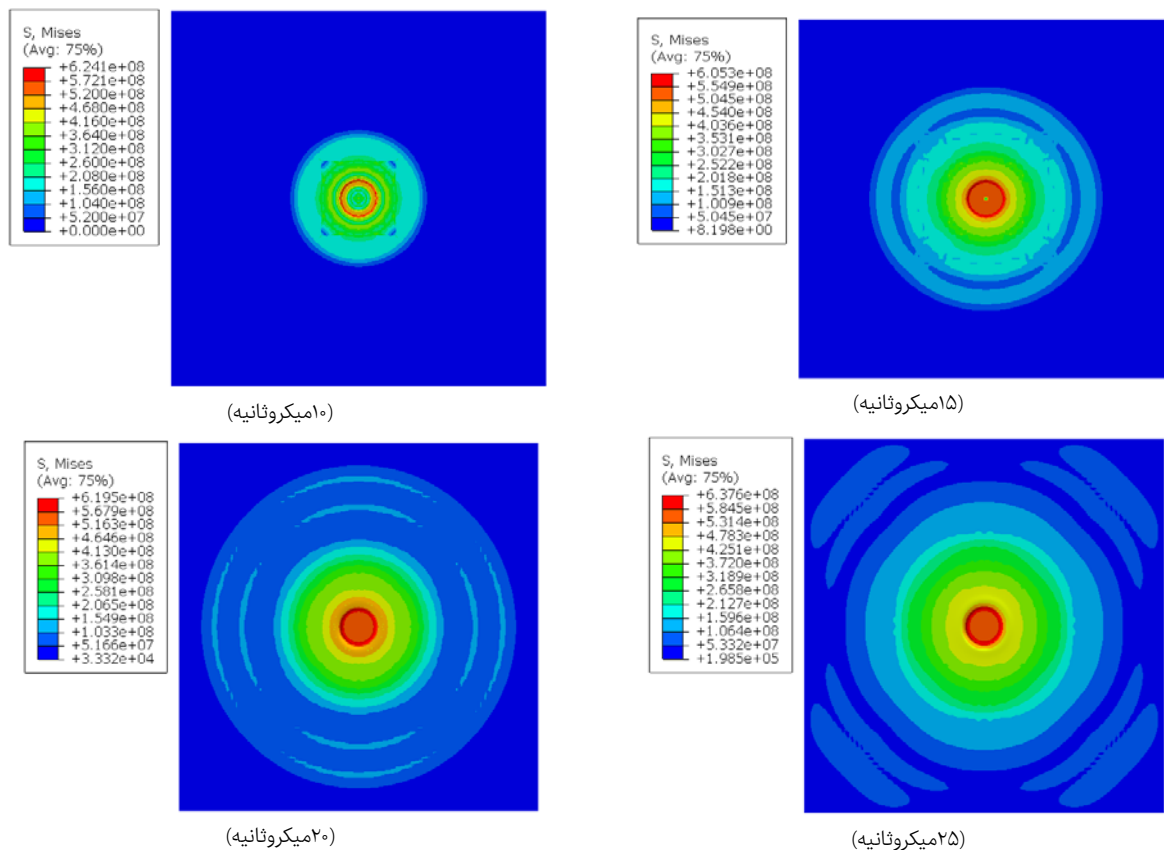
بررسی‌ها نشان داده است که اگر اندازه المان کاهش یابد، نتایج دقیق‌تری حاصل می‌شود. این فرآیند تحت عنوان همگرایی مش شناخته شده است که به میزان کوچک‌بودن المان‌های مورد نیاز در یک مدل به‌منظور حصول اطمینان از تحت تأثیر قرارنگرفتن نتایج با تغییر اندازه مش اشاره دارد. بدین منظور به نموداری از یک پارامتر بحرانی (به‌عنوان مثال تنش، فشار، چگالی، انرژی و غیره) در یک مکان بحرانی نیاز است تا نسبت به تراکم مش یا اندازه مش در آن ناحیه بحرانی ترسیم شود. شایان توجه است که حداقل باید سه بررسی برای همگرایی مش ارایه شود. که اولین بررسی حاوی مش درشت بوده و در هر بررسی متوالی، تراکم مش ریزتر می‌شود. از این‌رو با بهبود مش، دقت افزایش می‌یابد. تا آنجایی که پس از یک تراکم مش مشخص، بهبود نتایج تقریباً ناچیز خواهد بود و در نهایت این تراکم مش برای تجزیه و تحلیل انتخاب می‌شود. به‌منظور تعیین حساسیت ابعاد شبکه مدل، اندازه شبکه اولیه کل نمونه مدل‌سازی به‌ترتیب به ۰/۵، ۰/۳۳ و ۰/۲۵ کاهش داده شده است. در نمودار ۱، نتایج تغییرات کرنش پلاستیک معادل برای اندازه‌های مختلف شبکه مقایسه شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و همگرایی آنها در اندازه شبکه ۰/۳۳، این اندازه شبکه برای شبکه‌بندی نهایی انتخاب می‌شود.



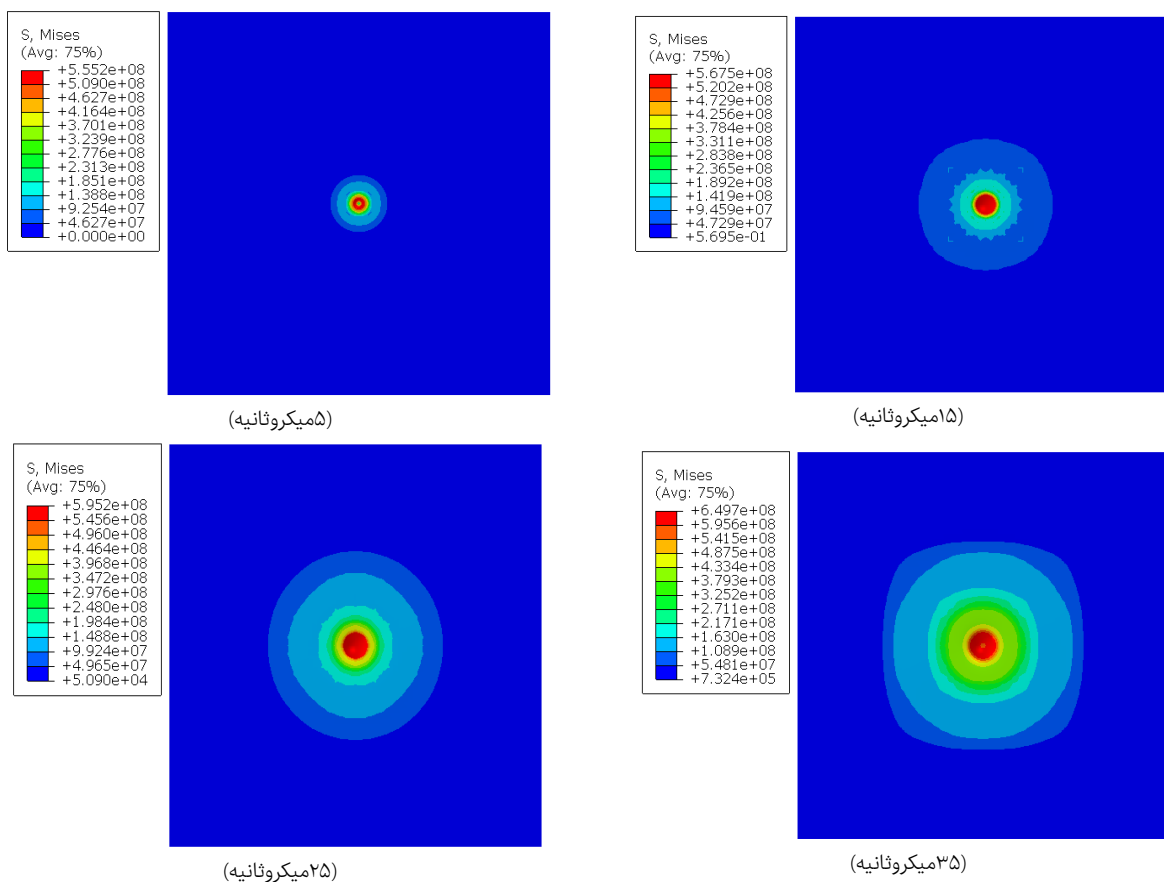
نمودار ۱ مقایسه تأثیر تغییر اندازه شبکه کل نمونه مدل‌سازی بر تغییرات کرنش پلاستیک معادل (کاهش اندازه شبکه به ۰/۵، ۰/۳۳ و ۰/۲۵)

نتایج و بحث

طبق مشاهدات تجربی، پس از برخورد پرتابه با صفحه پرنده یک ناحیه فرورفته روی سطح صفحه پرنده ایجاد می‌شود و موجب تغییر شکل صفحه پرنده در نقطه برخورد می‌شود. نمای تغییر شکل یافته ورق‌ها پس از جوش کاری برای دو حالت شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی در شکل‌های ۶ و ۷ ارایه شده است. مشاهده می‌شود که در اثر ضربه سرعت بالای پرتابه، یک ناحیه فرورفته بشقابی شکل که از اطراف با یک ناحیه حلقوی احاطه شده است، در محل ضربه ایجاد می‌شود. شایان ذکر است که فرورفتگی



شکل ۸) انتشار شعاعی موج تنش در سطح صفحه پرنده برای نمونه جوش کاری شده با پرتابه مسطح

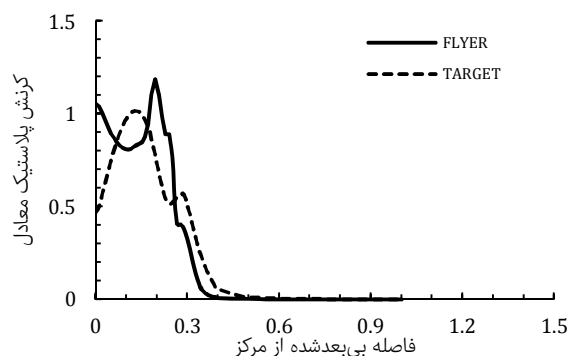


شکل ۹) انتشار شعاعی موج تنش در سطح صفحه پرنده برای نمونه جوش کاری شده با پرتابه کروی

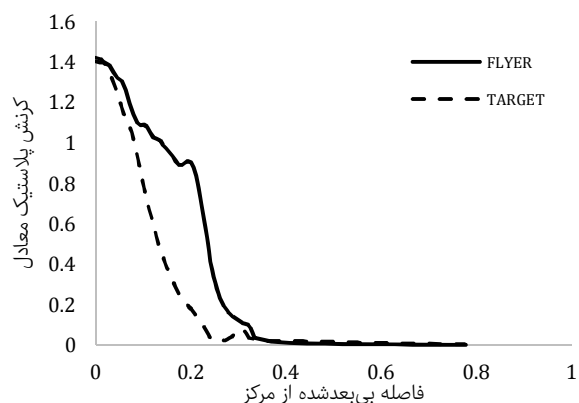
پرنده و پایه در یک جهت هستند از این رو نتیجه می‌شود که برای این نمونه، در ناحیه مرکزی اتصالی رخ نداده است که این پدیده در نمودار کرنش پلاستیک معادل نیز نتیجه گرفته شده است.

تغییرات تنش برشی نسبت به زمان در مرکز صفحات و مجاورت ناحیه حلقوی شکل برای نمونه جوش کاری شده با پرتابه با شکل دماغه کروی در نمودار ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در ناحیه حلقوی شکل (نمودار ۵- الف) تنش‌های برشی در المان‌های برخوردی از صفحات پرنده و پایه در جهات مخالف هستند که نشان‌دهنده اتصال مطلوب است. در ناحیه فرورفته مرکزی (نمودار ۵- ب) مشاهده می‌شود که تنش برشی صفحات پرنده و پایه در خلاف جهت هم هستند. از این رو نتیجه می‌شود که در این حالت ناحیه جوش‌نخورده مرکزی حذف شده و در ناحیه مرکزی نیز دو ورق به یکدیگر متصل شده‌اند که این پدیده در نمودار کرنش پلاستیک معادل نیز نتیجه گرفته شده است.

بنابراین مطابق نتایج عددی به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که الگوی تنش برشی برای صفحات پرنده و پایه با نتایج گزارش شده توسط چیدری و همکاران مطابقت دارد [18, 35]. همچنین مقایسه بین الگوی تغییر شکل به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشات تجربی نشان‌دهنده صحت نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی است.



نمودار ۲) تغییرات کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در راستای عرض صفحات پرنده و پایه برای نمونه جوش کاری شده با پرتابه مسطح



نمودار ۳) تغییرات PEEQ در راستای عرض صفحات پرنده و پایه برای نمونه جوش کاری شده با پرتابه کروی

طبق مطالعات عددی انجام‌شده در زمینه جوش کاری ضربه‌ای با سرعت بالا، چیدری و همکاران [18, 35] دریافتند که دو پارامتر کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در نرخ کرنش‌های بالا و تنش برشی در نقطه برخورد می‌تواند به‌عنوان معیار جوش کاری مورد استفاده قرار گیرند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که برای آلومینیوم HS30، زمانی که مقدار عددی کرنش پلاستیک معادل در صفحات پرنده و پایه به‌ترتیب بالاتر از مقادیر بحرانی ۰/۷ و ۰/۶ باشد، اتصال مطلوبی ایجاد می‌شود. به‌علاوه آنها نشان دادند در جایی که تنش برشی برای دو صفحه در نقطه برخورد در جهات مخالف باشند، اتصال مطلوب خواهد بود اما در جایی که تنش برشی برای صفحات پرنده و پایه هم‌جهت باشند اتصال ضعیف خواهد بود. نمودار ۲ مقادیر کرنش پلاستیک معادل در راستای عرض صفحات پرنده و پایه برای نمونه جوش کاری شده با پرتابه با شکل دماغه مسطح را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود برای نمونه جوش کاری شده با پرتابه با شکل دماغه مسطح، مقدار عددی کرنش پلاستیک معادل در صفحات پرنده و پایه در ناحیه حلقوی شکل به‌ترتیب بالاتر از ۰/۷ و ۰/۶ است. به‌علاوه در قسمت مرکزی صفحه پایه مقدار عددی کرنش پلاستیک معادل از مقدار بحرانی ۰/۶ کمتر شده است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که نتایج عددی برای این نمونه نشان‌دهنده وجود ناحیه جوش‌نخورده مرکزی احاطه‌شده با ناحیه جوش‌خورده است که این امر با نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده توسط تورگوتلو و همکاران [36] نیز مطابقت دارد. آنها با مطالعه آزمایشگاهی روی تأثیر هندسه دماغه پرتابه بر جوش کاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه دریافتند که حین فرآیند جوش کاری، استفاده از پرتابه با دماغه مسطح، نواحی جوش‌نخورده‌ای را در مرکز ضربه نتیجه می‌دهد [36]. مقادیر کرنش پلاستیک معادل در راستای عرض صفحات پرنده و پایه برای نمونه جوش کاری شده با پرتابه با شکل دماغه کروی در نمودار ۳ نشان داده شده است. مطابق نمودار ۳ برای نمونه جوش کاری شده با پرتابه کروی مشاهده می‌شود مقدار عددی کرنش پلاستیک معادل برای صفحات پرنده و پایه هم در مرکز و هم در ناحیه حلقوی شکل، بالاتر از مقادیر بحرانی است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که برای این نمونه در نواحی برخورد خصوصاً در ناحیه مرکزی اتصال کاملی رخ داده است. بنابراین با مقایسه نمودارهای ۲ و ۳ نتیجه گرفته می‌شود که تغییر هندسه دماغه پرتابه می‌تواند موجب حذف ناحیه جوش‌نخورده مرکزی و دستیابی به اتصالی یکنواخت شود.

تغییرات تنش برشی نسبت به زمان در مرکز صفحات و مجاورت ناحیه حلقوی شکل برای نمونه جوش کاری شده با پرتابه با شکل دماغه مسطح در نمودار ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در ناحیه حلقوی شکل (نمودار ۴- الف) تنش‌های برشی در المان‌های برخوردی از صفحات پرنده و پایه در جهات مخالف هستند که نشان‌دهنده اتصال مطلوب است. در ناحیه فرورفته مرکزی (نمودار ۴- ب) مشاهده می‌شود که تنش برشی صفحات

نتیجه‌گیری

بررسی تجربی الگوی تغییر شکل در ورق‌های جوش‌کاری‌شده با روش جوش‌کاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه‌های با شکل دماغه مسطح و کروی با استفاده از سامانه انفجار مخلوط گازها و مقایسه آن با الگوی تغییر شکل در شبیه‌سازی عددی انجام گرفته است. همچنین مطالعه عددی الگوی انتشار موج تنش در سطح تماس صفحه پرنده، مقادیر کرنش پلاستیک معادل و الگوی تنش برشی برای صفحات پرنده و پایه به‌عنوان معیار کیفیت جوش مورد بررسی قرار گرفته است. ورق فولادی ST-37 با ابعاد 250×250 و ضخامت ۴ میلی‌متر به‌عنوان صفحه پایه و ضخامت‌های یک، ۲ و ۳ میلی‌متر به‌عنوان صفحه پرنده انتخاب شدند. فاصله بین ورق‌ها ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. پرتابه‌های فلزی با شکل دماغه مسطح و کروی به‌ترتیب با جرم‌های ۶۵۰ و ۱۳۰۰ گرم مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که:

۱- در اثر ضربه سرعت بالای پرتابه، یک فرورفتگی بشقابی‌شکل که از اطراف با یک ناحیه حلقوی‌شکل احاطه شده است، در ناحیه ضربه ایجاد می‌شود.

۲- الگوی تغییر شکل ورق‌ها در جوش‌کاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه‌های با شکل دماغه مسطح و کروی مشابه است.

۳- شبیه‌سازی عددی ارایه‌شده به خوبی قادر به پیش‌بینی الگوی تغییر شکل در صفحات حین فرآیند جوش‌کاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه است.

۴- بررسی الگوی انتشار موج تنش در سطح تماس صفحه پرنده نشان می‌دهد که امواج از مرکز شروع و به سمت لبه‌های ورق گسترش می‌یابند.

۵- بیشترین مقدار تنش در ناحیه حلقوی‌شکل و مرکز ورق مشاهده می‌شود و در سایر بخش‌های ورق بزرگی تنش برشی به‌طور نسبی کمتر است.

تشکر و قدردانی: از زحمات بی‌دریغ دانشجویان و اساتید عزیز در آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه گیلان صمیمانه تقدیر می‌شود.

تأییدیه‌های اخلاقی: محتویات علمی حاصل پژوهش نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده آنها است.

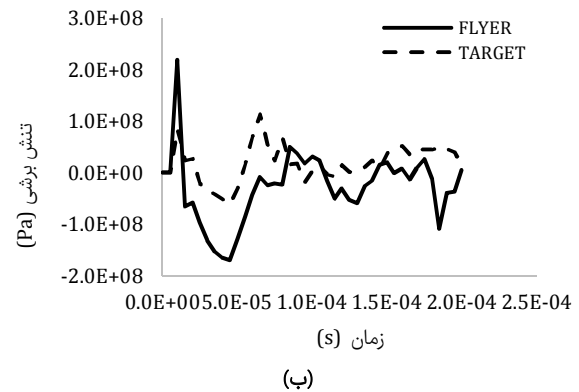
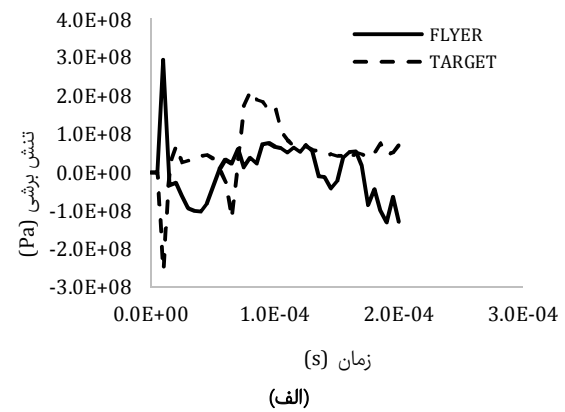
تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص وجود ندارد.

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

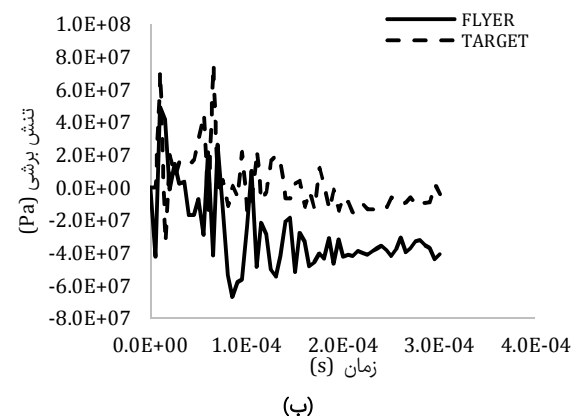
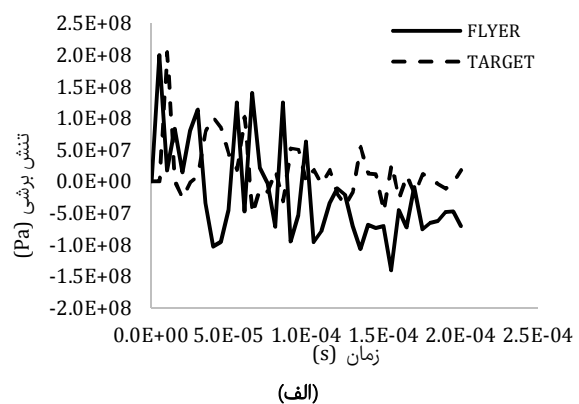
منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

منابع

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



نمودار ۴) تغییرات تنش برشی نسبت به زمان در ناحیه تماس برای نمونه جوش‌کاری‌شده با پرتابه مسطح؛ الف) ناحیه حلقوی‌شکل، ب) ناحیه فرورفته مرکزی



نمودار ۵) تغییرات تنش برشی نسبت به زمان در ناحیه تماس برای نمونه جوش‌کاری‌شده با پرتابه کروی؛ الف) ناحیه حلقوی‌شکل، ب) ناحیه فرورفته مرکزی

- 17- Mousavi AA, Al-Hassani STS. Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2005;53(11):2501-2528.
- 18- 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.
- 19- 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.
- 20- Bataev IA, Tanaka S, Zhou Q, Lazurenko DV, Jorge Junior AM, Bataev AA, et al. Towards better understanding of explosive welding by combination of numerical simulation and experimental study. *Materials & Design*. 2019;169:107649.
- 21- Hosseinzadeh Salehkouh S, Babaei H, Mirzababaei Mostofi T. Spot welding of steel plates using gas mixture detonation technique: An experimental study. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(9):2255-2262. [Persian]
- 22- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Sadraei SH. Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical. *Structural Engineering Mechanics*. 2015;56(4):535-548.
- 23- Babaei H, Mirzababaei 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, Mirzababaei 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(6):1485-1494.
- 25- Babaei H, Mirzababaei 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- Mirzababaei 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- Mirzababaei Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M. The 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- Mirzababaei Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D. Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. *International Journal of Impact Engineering*. 2019;125:93-106.
- 29- Mirzababaei Mostofi T, Sayah-Badkhor M, Rezasefat M, Ozbakkaloglu T, Babaei H. Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum plates. *Thin-Walled Structures*. 2020;155:106851
- 30- Chizari M, Al-Hassani S, Barrett LM, Wang B. 3-D finite element modelling of water jet spot welding. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2-4
- 2- Wang S, Zhou B, Zhang X, Sun T, Li G, Cui J. Mechanical properties and interfacial microstructures of magnetic pulse welding joints with aluminum to zinc-coated steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2020;788:139425.
- 3- Lu Z, Gong W, Chen S, Yuan T, Kan C, Jiang X. Interfacial microstructure and local bonding strength of magnetic pulse welding joint between commercially pure aluminum 1060 and AISI 304 stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;46:59-66.
- 4- Wang X, Shao M, Gao S, Gau JT, Tang H, Jin H, et al. Numerical simulation of laser impact spot welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;35:396-406.
- 5- 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.
- 6- Dhara S, Das A. Impact of ultrasonic welding on multi-layered Al-Cu joint for electric vehicle battery applications: A layer-wise microstructural analysis. *Materials Science and Engineering: A*. 2020;791:139795.
- 7- Zhang GP, Li JC, Liu ZX, Wang PC. Application of ultrasonic welding to repair adhesively bonded short carbon fiber reinforced Nylon 6 composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020;100:102603.
- 8- Arabi SH, Pouranvari M, Movahedi M. Influence of heat-input on mechanical behavior and phase balance of 2304 duplex stainless steel resistance spot welds. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(5):159-165. [Persian]
- 9- Ahmadi Ashtiani HR, Zarandooz R, Sohrabian M. The numerical investigation of influence of electrode diameter on nugget diameter and thermal distribution in the resistance spot welding (RSW) of Inconel 625. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(8):116-124. [Persian]
- 10- 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]
- 11- Tayebi P, Fazli A, Asadi P, Soltanpour M. Experimental and numerical investigation of the formability of friction stir welded 5083 aluminum alloy sheets in single point incremental forming process. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(3):45-55. [Persian]
- 12- Khorsandi Y, Khanzadeh Ghareh Shiran MR, Saadat A. Effect of stand-off distance and the explosive ratio parameters on the properties of explosively bonded copper-aluminum-copper. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(1):39-46. [Persian]
- 13- Pourjafari Kasmaee M. Investigation of annealing treatment on the mechanical and metallurgical properties of explosive-welded Al/St/Al multilayer. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(1):397-402. [Persian]
- 14- 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.
- 15- 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.
- 16- Hosseinzadeh S, Babaei H, Jahanbakhsh R, Alitavoli M. Experimental study of high-velocity projectile impact welding. *Experimental Techniques*. 2018;42(5):509-522.

of thin steel plates by deformable steel penetrators. *Thin-Walled Structures*. 2016;102:58-67.

34- Öztürk G. Numerical and experimental investigation of perforation of ST-37 steel plates by oblique impact [dissertation]. Ankara: The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University; 2010.

35- Chizari M, Al-Hassani STS, Barrett LM. Effect of flyer shape on the bonding criteria in impact welding of plates. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(1):445-454.

36- Turgutlu A, Al-Hassani STS, Akyurt M. The influence of projectile nose shape on the morphology of interface in impact spot welds. *International Journal of Impact Engineering*. 1996;18(6):657-669.

July 2007, London, United Kingdom. Hong Kong: Newswood Limited; 2007.

31- Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M. Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2019;233(7):1449-1471.

32- Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin-Walled Structures*. 2019;144:106332.

33- Elek PM, Jaramaz SS, Mickovic DM, Miloradovic NM. Experimental and numerical investigation of perforation