

اصلاح مدل‌های بارگذاری انفجاری به وسیله‌ی ایجاد اتصال فارسی بُر (اسکارف) بین فلزات غیرهمجنس آلومینیوم و مس در جوشکاری انفجاری

جمال زمانی (دانشیار)

سیدمسعود باقری (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

علی مهدی‌پور عموالی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

در فرایند جوشکاری انفجاری^۱، دو یا چند صفحه‌ی فلزی (صفحه فلز یا همان فلز پایه و صفحه پران) در فشار زیادی که توسط ماده‌ی منفجره ایجاد شده، به یکدیگر متصل می‌شوند. در این نوشتار ضمن معرفی اتصال فارسی بُر^۲ و محاسبات مربوطه، و نیز با توجه به روابط موجود جوشکاری انفجاری فلزات آلومینیوم و مس انجام می‌شود. استحکام اتصال ایجاد شده با آزمایش‌های طراحی شده‌ی برشی بررسی می‌شود. در نهایت، نتایج حاصل از آزمایش‌های برش و نسبت دادن مقدار کمیته‌ی سرعت برخورد به مناطق اتصال نیافته، روابط مربوط به بارگذاری انفجاری با اعمال ضریب مناسب تصحیح، و مدل جدیدی ارائه می‌شود. نتیجه این که ایجاد اتصال فارسی بُر علاوه بر قابلیت کاربرد در اتصال هم‌راستای فلزات غیرهمجنس، قابل استفاده در ارزیابی روابط مهم فرایند جوشکاری انفجاری نیز هست. برای دستیابی و تسلط به عوامل تأثیرگذار در اتصال انفجاری در دیگر ترکیبات فلزی، می‌توان با ایجاد اتصال فارسی بُر و سپس کنترل بهتر عوامل دخیل در فرایند، به اتصال کاملاً موفقی دست یافت. این روش از صرف هزینه‌های گزاف و زمان طولانی آزمایش‌ها جلوگیری می‌کند.

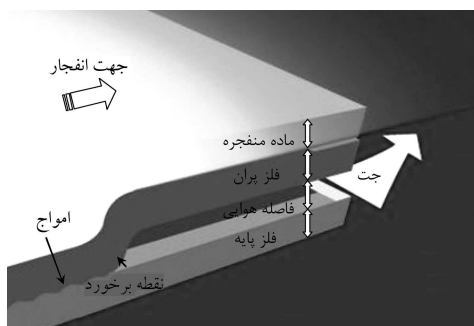
واژگان کلیدی: جوشکاری انفجاری، بارگذاری انفجاری، فاصله‌ی هوایی، سرعت برخورد، اتصال اسکارف، مدل‌سازی.

zamani@kntu.ac.ir
mirmasoodbagheri@gmail.com
a.mehdipoor@gmail.com

مقدمه

بسیاری از فلزات و سازه‌های هم‌جنس را می‌توان با روش‌های متداول به یکدیگر متصل کرد. اتصال فلزات غیرهم‌جنس به‌منظور دستیابی به ترکیبات کاربردی، موضوع تحقیق بسیاری از دانشمندان بوده است. اتصال فلزات غیرهم‌جنس، پس از کشف و به‌کارگیری نیروی حاصل از انفجار مواد منفجره به پیدایش جوشکاری انفجاری منجر شد.^[۱] چنان‌که در شکل ۱ مشاهده می‌شود صفحه‌ی پران، بر اثر نیروی ماده‌ی منفجره به صفحه‌ی پایه برخورد می‌کند و به پیدایش جوش می‌انجامد.^[۲] فرایند روکش‌کاری انفجاری مثالی از این عملیات است. در جوشکاری انفجاری، فشار در نقطه‌ی برخورد بیشینه است و چون در این منطقه فشار چندین برابر بیشتر از تنش تسلیم فلز است، رفتار جریان خمیرسان و مانند سیال است.^[۳] در اتصال فارسی بُر (اسکارف) قطعات به‌گونه‌ی قرار می‌گیرند که در نهایت به‌صورت مورب و مایل به هم متصل می‌شوند. روش اتصال مطابق هندسه‌ی است که در شکل ۲ نشان داده شده است.

از کاربردهای مهم این روش اتصال می‌توان به اتصال هم‌راستای صفحات غیرهم‌جنس به یکدیگر در تجهیزات خاص مرتبط با صنایع نظامی و پتروشیمی اشاره داشت.^[۴] این نوع اتصال همچنین در متصل‌کردن ورق‌های نازک به صفحات



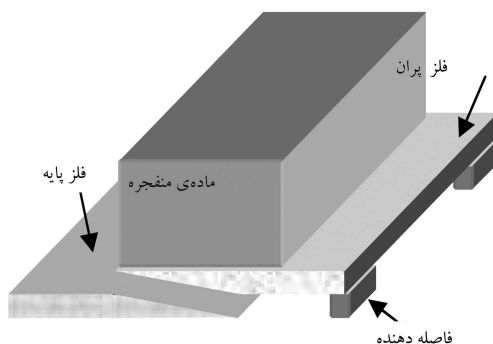
شکل ۱. هندسه‌ی فرایند جوشکاری انفجاری و اجزاء آن.^[۵]

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۹/۶، داوری ۱۳۸۸/۸/۳، پذیرش ۱۳۸۹/۱/۱۷

روش تحقیق

انتخاب و تعیین فلزات مورد اتصال

در این تحقیق طی فرایند جوشکاری انفجاری، قطعاتی از جنس آلومینیوم به تکه‌هایی از جنس مس خالص به‌طریق فارسی بر متصل شده‌اند. خواص مکانیکی و فیزیکی این فلزات در جدول ۱ آورده شده است.^[۲۳] آزمایش‌ها با آماده‌سازی صفحاتی از جنس آلومینیوم و مس به ابعاد $10 \times 100 \times 1.5$ میلی‌متر (ضخامت \times عرض \times طول) با زوایای پخی $7/5$ درجه انجام شد.



محاسبات مربوط به فرایند

ساختار فرایند جوشکاری انفجاری را عموماً می‌توان در قالب سه مرحله در نظر گرفت:^[۸]

۱. انفجار ماده‌ی منفجره؛

۲. تغییر شکل و شتاب‌گیری صفحه‌ی پران یا اجزاء آن؛

۳. برخورد بین صفحات در مجموعه‌ی فوق.

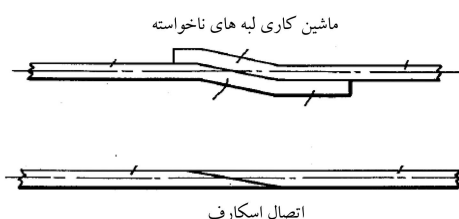
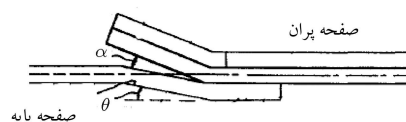
مهم‌ترین پارامترها در انجام فرایند جوشکاری عبارت‌اند از: نوع و خواص مکانیکی صفحه‌ی پران و پایه، جنس، چگالی و سرعت انفجار ماده‌ی منفجره، پارامترهای برخورد، نسبت بارگذاری ماده‌ی منفجره (به‌عبارتی نسبت جرم ماده‌ی منفجره به جرم فلز پران)، و فاصله‌ی هوایی موجود بین صفحات. تعیین و انتخاب بهینه‌ی مجموعه پارامترهای فوق متضمن ایجاد جوشی با استحکام قابل قبول است.

الف) سرعت انتقال حالت و سرعت نقطه‌ی برخورد

سرعت انتقال حالت نقطه‌ی برخورد، به‌منظور دست‌یابی به فصل مشترکی موجی شکل و قابل قبول -- از نقطه‌نظر خواص مکانیکی و متالورژیکی -- با انتخاب عدد رینولدز (Re) برای اتصال آلومینیوم به مس (که برابر 1371 است)، با استفاده از رابطه‌ی ۱

جدول ۱. خواص مکانیکی و فیزیکی فلزات مورد اتصال.^[۲۴]

Cu(C _{۱۰۲۰۰}) (فلز پایه)	AL(۱۱۰۰) (فلز پران)	خواص مکانیکی فلزات
۸,۹۳	۲,۷	چگالی gr/cm^3
۴۹۰۰	۶۴۰۰	سرعت صوت m/s
۱۰۸۵	۶۵۰	دمای ذوب C°
۹۱,۹۵	۲۱۵,۹۱	گرمای ویژه $Cal/Kg K^\circ$
۸۹,۸۰	۵۵,۴۱	هدایت حرارتی $Cal/m S^{-1} C^\circ$
۱۱۵	۶۹	مدول یانگ GPa
۰,۳۴۰	۰,۳۳۴	ضریب پواسون
۹۴	۴۷	سختی ویکرز H_v
۲۷۵	۱۱۰	تنش کششی MPa
۲۲۰	۱۰۵	تنش تسلیم MPa
۱۳۲	۶۹	تنش برشی Mpa



شکل ۲. نمونه‌یی از چیدمان متداول اتصال اسکارف در حالت سه بعدی و دوبعدی.^[۵]

و نیز اتصال ورق‌هایی که بتوان زوایای پخی در آن‌ها را به‌صورت خم‌شدگی لبه‌ها ایجاد کرد (مانند شکل ۲) مشاهده شده است.^[۷,۶] از این شیوه‌ی اتصال به‌عنوان یک روش تحقیق در این نوشتار استفاده شده است. در همین راستا، تحقیقات زیادی درخصوص جوشکاری انفجاری ارائه شده است. دسته‌یی به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف جوشکاری انفجاری (ضخامت ماده‌ی منفجره یا نسبت بارگذاری انفجاری، فاصله‌ی هوایی، ضخامت و جنس صفحات پایه و پران و سندان، زاویه‌ی اولیه‌ی تنظیم، ضخامت و جنس صفحه‌ی بافر، نوع ماده‌ی منفجره، شرایط عملیات حرارتی و غیره) بر خواص مختلف جوش تشکیل شده -- هم از لحاظ مکانیکی (مقاومت کششی، مقاومت برشی، استحکام خمشی، استحکام پیچشی و شرایط خستگی، سختی‌سنجی میکرونی، مقاومت در برابر خوردگی و غیره) و هم از لحاظ متالورژیکی (تشکیل فازهای اینترمتالیک و محلول‌های جامد، جهت کشیدگی دانه‌ها و غیره) و نیز از نظر هندسی (سطوح ایجادشده‌ی صاف، موجی‌شکل و غیره) اختصاص دارد.^[۸-۱۴]

دسته‌یی دیگر از تحقیقات و پژوهش‌ها صرفاً به مطالعه‌ی موردی و کاربردی یک موضوع می‌پردازد و امکان اتصال مناسب و قابل قبول را در کاربردی ویژه‌مورد ارزیابی قرار داده‌اند.^[۱۵] محققین بسیاری نیز سعی بر شبیه‌سازی آزمایش‌ها داشته‌اند و نتایج تحقیقات و محاسبات خود را در این حوزه به‌وسیله‌ی نرم‌افزارهای اجزاء محدود ارزیابی کرده‌اند.^[۱۶-۱۸]

در ایران تحقیقات بسیاری درخصوص جوشکاری انفجاری و دیگر فرایندهای انفجاری مانند شکل‌دهی انفجاری^[۱۹] و نشست‌گیری در مخازن دارای سیال به‌کمک جوشکاری انفجاری صورت گرفته است^[۲۰] که بسیاری از این فعالیت‌ها کاربردی شده‌اند. همچنین کاربردهای جوشکاری انفجاری در اتصال لوله‌های غیرهم‌جنس موضوع تحقیق برخی محققین ایرانی بوده است.^[۲۱-۲۳]

محاسبه می‌شود: [۲۵]

$$V_T = \left\{ \frac{2 \times 10^6 \times 9/81 \times R_e \times (H_{Vb} + H_{Vf})}{\rho_b + \rho_f} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\hookrightarrow V_T = 1765,24 \text{ m/s} \quad (1)$$

بنابراین سرعت نقطه‌ی برخورد برابر است با: [۸]

$$\begin{cases} V_C = V_T + 200 \Leftrightarrow V_T < 2000 \frac{m}{s} \\ V_C = V_T + 100 \Leftrightarrow 2000 \leq V_T \leq 2500 \frac{m}{s} \\ V_C = V_T + 50 \Leftrightarrow 2500 < V_T \frac{m}{s} \end{cases}$$

$$\hookrightarrow V_C = 1865,24 \text{ m/s} \quad (2)$$

ب) حداقل سرعت برخورد

بر اساس اطمینان از ایجاد انرژی جنبشی لازم برای تغییر شکل کشسانی-خمیری و ایجاد جت و اتصال، رابطه‌ی ۳ برای جوشکاری فلزات غیرهم‌جنس با چگالی مختلف ارائه شده است: [۲۵]

$$V_P = \left(\frac{\sigma_{UT}}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

میزان فشار در هرکدام از فلزات، با استفاده از رابطه‌ی فشار هوگونیوت، چنین محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{1}{2} \rho V_P U \quad (4)$$

با به دست آوردن فشار بزرگ‌تر، سرعت برخورد در فلز دیگر محاسبه می‌شود. از مجموع سرعت برخورد جدید و سرعت برخورد متناظر با فشار برخورد بزرگ‌تر، در محاسبه‌ی سرعت برخورد کمیته استفاده می‌شود: [۲۵]

$$\begin{cases} P_1 < P_2 \Rightarrow V_{P.new} = \frac{P_2}{U_1 \rho_1} \\ P_2 < P_1 \Rightarrow V_{P.new} = \frac{P_1}{U_2 \rho_2} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_1 < P_2 \Rightarrow V_{P.Min} = V_{P.new} + \frac{1}{2} V_{P_2} \\ P_2 < P_1 \Rightarrow V_{P.Min} = V_{P.new} + \frac{1}{2} V_{P_1} \end{cases} \quad (5)$$

در این روش، از ایجاد فشار لازم در فصل مشترک فلز نرم برای تغییر شکل فلز سخت‌تر اطمینان حاصل می‌شود. در نتیجه:

$$\hookrightarrow V_{P.min} = 277,19 \text{ m/s}$$

ج) سرعت بیشینه‌ی برخورد

شرایط ایجاد فاز مذاب، مبنای اولیه‌ی محاسبات محدودده‌ی بالایی انرژی ضربه و نهایتاً سرعت برخورد بیشینه است. گرمای ایجادشده، به دلیل محبوس شدن بخشی از جت، باعث ایجاد حرارت زودگذر می‌شود. حرارت ایجادشده در فلز مذاب یا بخش‌هایی از هر دو فلز پایه و پران تحت تأثیر این حرارت زودگذر، و به دلیل آهنگ سریع سرد شدن، ایجاد فازهای تردد و شکننده را در برخی ترکیبات فلزی ممکن می‌سازد. خاصیت‌های ترموفیزیک فلزات در فصل مشترک برخورد -- نظیر هدایت

حرارتی، دمای ذوب، گرمای ویژه‌ی فلزات پایه و پران -- بر این شرایط حاکم است. رابطه‌ی ۶ توسط محققین برای یافتن سرعت بیشینه‌ی برخورد بیان شده است. [۸]

$$V_{P.Max} = \frac{(t_{mp} U_f)^{\frac{1}{2}}}{0.082 \times V_C} \left(\frac{K C_h U_f}{\rho t_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

در نتیجه:

$$\hookrightarrow V_{P.Max-Al} = 650,51 \text{ m/s}$$

سرعت‌های برخورد کمیته و بیشینه در محاسبات مربوط به سرعت برخورد صفحه‌ی پران، بارگذاری انفجاری و تعیین ضخامت ماده‌ی منفجره مورد استفاده قرار می‌گیرد و باید به درستی تعیین شوند.

د) سرعت برخورد

سرعت برخورد فلز پران را باید چنان دقیق انتخاب کرد که بتواند تمامی الزامات دست‌یابی به اتصال قوی و قابل قبول را فراهم آورد. محدوده‌ی انرژی برخورد در واحد سطح باید بین مقادیر بیشینه و کمیته باشد.

مقداری از فشار برخورد که به کمیته‌ی سرعت برخورد نسبت داده می‌شود، برای ایجاد حالت سیال‌گونه در فصل مشترک مورد نیاز است. روش دستورالعمل پیشنهادی در تعیین سرعت برخورد [۲۵] با اضافه کردن ۱۰ درصد اختلاف سرعت برخورد کمیته و بیشینه به سرعت برخورد کمیته حاصل می‌شود:

$$V_P = V_{P.Min} + 0.1 \times (V_{P.Max} - V_{P.Min})$$

$$\hookrightarrow V_{P_1} = 314,52 \text{ m/s} \quad (7)$$

ماهیت جوشکاری انفجاری حاکی از آن است که به دلیل وجود متغیرهای فراوان در این فرایند و اثر تقابلی آن‌ها بر یکدیگر، در نظر گرفتن تمامی آن‌ها به طور هم‌زمان، غیرممکن و نشدنی است. این موضوع زمانی اهمیت می‌یابد که اتصال فلزات غیرهم‌جنس با چگالی‌های مختلف نیز مطلوب است. بنابراین در نظر گرفتن یک معادله با دستورالعملی مشخص و واحد در جوشکاری انفجاری عملاً مقدور نیست، ولی می‌توان در خصوص جوشکاری فلزاتی مشخص با استفاده از ماده‌ی منفجره‌ی معین، تا حدودی مدل‌های دست‌یابی به اتصال قابل قبول را تخمین زد. چنان که در انجام آزمایش‌ها بیان خواهد شد، ایجاد اتصال با توجه به محاسبه‌ی سرعت برخورد در معادله‌ی ۷ ناموفق بوده است. بنابراین، روش تجربی برای به دست آوردن مقدار سرعت برخورد، محاسبه‌ی میانگین سرعت برخورد کمیته و بیشینه ارائه شده است:

$$V_P = \left(\frac{V_{P.Max} + V_{P.Min}}{2} \right)$$

$$\hookrightarrow V_{P_2} = 463,85 \text{ m/s} \quad (8)$$

سرعت به دست آمده، در معادلات بارگذاری به منظور تعیین ضخامت ماده‌ی منفجره مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق، با ارزیابی هر دو سرعت به دست آمده مشاهده شد که روش ارائه شده توسط نگارنده، شرایط اتصال قابل قبول را با موفقیت برآورده کرد.

ه) بارگذاری انفجاری و ضخامت ماده‌ی منفجره

برای محاسبه‌ی بارگذاری انفجاری و ضخامت ماده‌ی منفجره، ابتدا تعیین سرعت برخورد ضرورت می‌یابد. با محاسبه‌ی سرعت برخورد (که در بخش قبل ارائه شد)

و با قراردادی مقدار سرعت برخورد در نظر گرفته شده در معادله‌ی بارگذاری مناسب، مقدار ضخامت ماده‌ی منفجره به دست می‌آید.

معادلات نیمه تجربی و تجربی فراوانی در خصوص ارتباط بین سرعت صفحه‌ی پران و بارگذاری انفجاری ارائه شده است. اولین مطالعات، بعد از جنگ جهانی دوم و به منظور نشان دادن محاسبات مربوط به سرعت صفحه‌ی پران تحت شرایط مختلف بارگذاری انفجاری، انجام شد.^[۴]

برای انجام محاسبات باید دو فرضیه را در نظر گرفت؛ ابتدا باید انرژی ویژه (E) ماده‌ی منفجره را از حالت اولیه و به صورت شیمیایی، به انرژی جنبشی در حالت نهایی تبدیل کرد. ثانیاً، فرض بر این است که انرژی جنبشی بین فلز پران و محصولات گازی حاصل از مواد منفجره در حالت چگالی یکنواخت، سرعت ثابتی را ایجاد می‌کند. برای یک هندسه‌ی متقارن، مانند یک سطح آزاد و یا چیزی که حین بارگذاری انفجاری صفحه‌ی پران وجود دارد (شکل ۳)، می‌توان یک معادله‌ی تعادلی مستومی را با توجه به اصل بقای انرژی هم‌زمان حل کرد. چنان که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، سرعت گازهای تولیدی در صفحه‌ی درون ماده‌ی منفجره صفر است. اگر توزیع سرعت، خطی فرض شود، آنگاه سرعت را می‌توان برحسب فاصله چنین در نظر گرفت:

$$V = (V_o + V_P) \frac{Y}{Y_o} - V_P \quad (۹)$$

با فرض قانون بقای ممتوم می‌توان نوشت:

$$-M \times V_P + \rho_e \int_0^{Y_o} \left[(V_o + V_P) \frac{Y}{Y_o} - V_P \right] dY = 0 \quad (۱۰)$$

با جایگزینی عبارت $c = \rho_e Y_o$ و فرض C ، به‌عنوان جرم ماده‌ی منفجره در واحد

سطح، معادله‌ی ۱۰ تبدیل می‌شود به:

$$\frac{V_o}{V_P} = \frac{2}{R} + 1 \quad (۱۱)$$

که در آن R «نسبت بارگذاری» نامیده می‌شود، و عبارت است از جرم ماده‌ی منفجره بر جرم واحد سطح صفحه‌ی پران. با در نظر گرفتن معادلات بقای انرژی می‌توان نوشت:

$$CE = \frac{1}{4} M \times V_P^2 + \frac{1}{4} \rho_e \int_0^{Y_o} \left[(V_o + V_P) \frac{Y}{Y_o} - V_P \right]^2 dY \quad (۱۲)$$

و با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به انرژی، می‌توان به معادله‌ی ۱۳ دست یافت:

$$CE = \frac{1}{4} M \times V_P^2 + \frac{1}{6} C \frac{(V_o^2 + V_P^2)}{(V_o + V_P)} \quad (۱۳)$$

و یا:^[۴]

$$V_P = \sqrt{2E} \left[\frac{\left(1 + \frac{1}{R}\right)^2 + 1}{6 \left(1 + \frac{1}{R}\right)} + \frac{1}{R} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (۱۴)$$

معادله‌ی به دست آمده جرمی، سرعت صفحه‌ی پران را به‌عنوان تابعی از انرژی و نیز مقدار بارگذاری به دست می‌دهد. شکل ساده شده‌ی معادله‌ی ۱۴ عبارت است از:

$$V_P = \sqrt{2E} \left[\frac{3R^2}{R^2 + 5R + 4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۱۵)$$

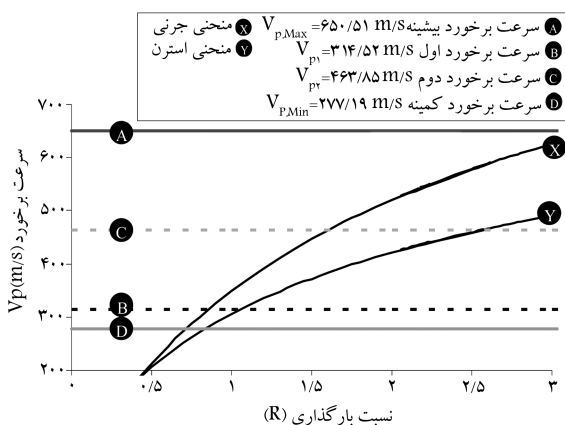
معادله‌ی ۱۵ توسط استرن^۳ به معادله‌ی ۱۶ تغییر یافت:^[۴]

$$V_P = \sqrt{2E} \left[\frac{\frac{6}{5} R^2}{R^2 + 5R + \frac{6}{5}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۱۶)$$

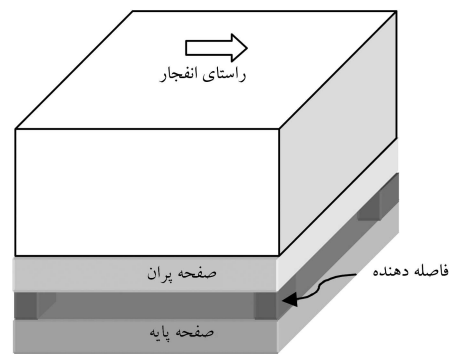
که در آن E مقدار انرژی ماده‌ی منفجره است که در آنفو(نوعی ماده‌ی منفجره)، همراه با ۶٪ گازوییل، دارای مقدار 203 KJ/Kg است.^[۸] می‌توان نمودار سرعت برخورد را در منحنی‌های فوق و برحسب بارگذاری انفجاری، مانند شکل ۵ به دست آورد.

با توجه به تعریف بارگذاری (R) که عبارت است از نسبت جرم ماده‌ی منفجره به جرم صفحه‌ی پران، می‌توان ضخامت ماده‌ی منفجره را با توجه به شکل ۶ و طبق رابطه‌ی ۱۷ محاسبه کرد:

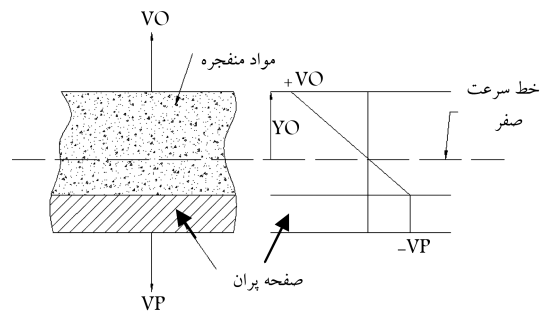
$$R = \frac{m_e}{m_f} = \frac{\rho_e v_e}{\rho_f v_f} = \frac{0.7 \times \ell_e \times dW_e \times t_e}{2.7 \times \ell_f \times dW_f \times t_f} = \frac{0.7 \times t_e}{2.7 \times t_f} \quad (۱۷)$$



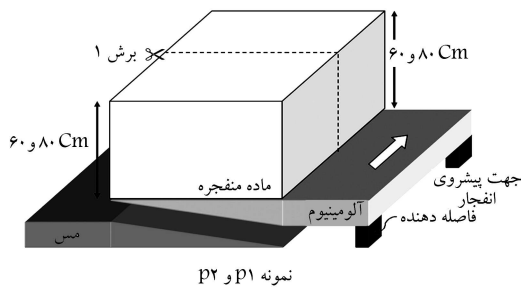
شکل ۵. منحنی سرعت برخورد برحسب بارگذاری در مدل‌های دیگر محققین.



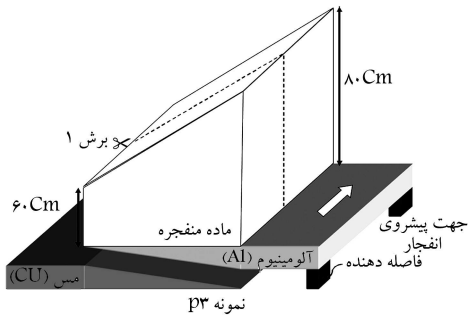
شکل ۳. شماتیک انجام آزمایش روکش‌کاری انفجاری.



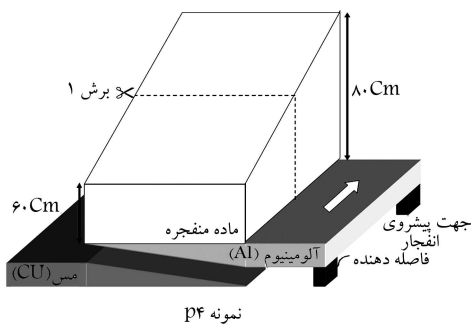
شکل ۴. المان در نظر گرفته شده در ماده‌ی منفجره و فلز پران.^[۴]



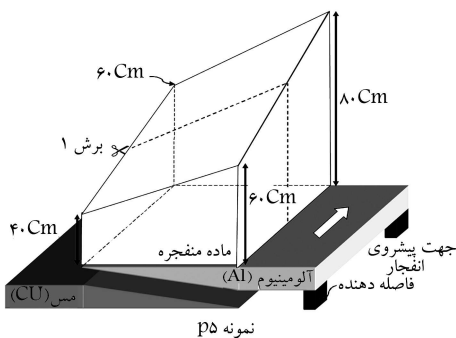
نمونه p1 و p2



نمونه p3



نمونه p4



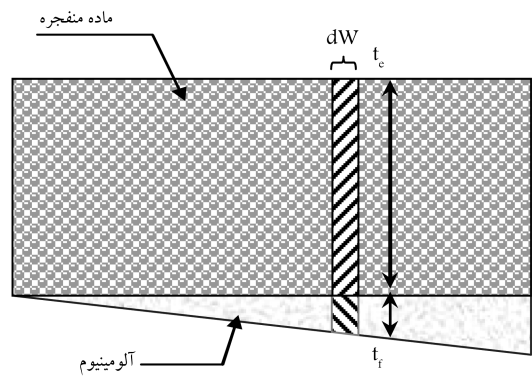
نمونه p5

شکل ۷. طراحی آزمایش‌ها، چیدمان و نمودارهای مربوط به بارگذاری انفجاری در چیدمان‌های مختلف.

دیگر مکان‌های قطعات نتایج متفاوتی به دست آمده که در مقالات بعدی به آن‌ها اشاره خواهد شد.

بررسی نتایج

براساس برنامه‌ریزی انجام شده، مقرر شد نتایج حاصل از آزمایش‌ها براساس مواردی که در ادامه به آن خواهیم پرداخت، به دقت مورد بررسی قرار گیرد. چنان‌که اشاره شد، برای بررسی اتصال یا عدم اتصال صفحات تحت بارگذاری‌های محاسبه شده



شکل ۶. المان در نظر گرفته شده از ضخامت ماده‌ی منفجره و صفحه‌ی پران.

جدول ۲. مقادیر بارگذاری انفجاری و ضخامت ماده‌ی منفجره در دو مدل جرنی و استرن.

$V_P=463,85 \text{ m/s}$	$V_P=314,52 \text{ m/s}$	
بارگذاری (R)	ضخامت ماده‌ی منفجره (te)	مدل بارگذاری
۱,۶۱	۰,۸۶	جرنی
۳۱,۰۴	۱۶,۶	استرن
۲,۵۵	۱,۰۶	
۴۹,۱۶	۲۰,۰۴	

چنان‌که در محاسبات دیده می‌شود مقادیر W و l ، به دلیل ثابت بودن از معادلات حذف شده‌اند. بنابراین:

$$R = \frac{0,7 \times t_e}{2,7 \times t_f} = \frac{t_e}{3,857 \times 5} = \frac{t_e}{19,28} \quad (18)$$

در انجام محاسبات، میانگین ضخامت پخی (یعنی $(10+0)/2 = 5 \text{ mm}$) به عنوان ضخامت فلز پران در نظر گرفته شد و با استفاده از مقدار R ، مقدار ضخامت ماده‌ی منفجره برحسب میلی‌متر به دست آمد. نتایج حاصل از محاسبات مرتبط با بارگذاری انفجاری و ضخامت ماده‌ی منفجره در دو مدل جرنی و استرن با در نظر گرفتن سرعت‌های کمیته (که به دوروش به دست آمده) در جدول ۲ نشان داده شده است.

طراحی آزمایش‌ها و انجام جوشکاری

آزمایش‌های اولیه برای اتصال یا عدم اتصال صفحات، با توجه به ضخامت مواد منفجره‌ی نشان داده شده در جدول ۲ در حالت روکش‌کاری انفجاری انجام شد. آزمایش‌های بعدی، به منظور بررسی تغییرات بارگذاری و اثر آن بر استحکام برشی فصل مشترک اتصال، و با ایجاد تغییرات در محفظه‌ی انفجار به منظور ایجاد بارگذاری متغیر، انجام شد. به منظور دست‌یابی به باند اتصال با عرض حدود ۷۵ میلی‌متر در فلزات پایه و پران، زاویه‌ی پخی $7,5$ درجه انتخاب شد و فاصله‌ی هوایی بین صفحات نصف ضخامت فلز پران (۵ میلی‌متر) در نظر گرفته شد.^[۸] مکان‌های متفاوتی با در نظر گرفتن بارگذاری در آن مناطق انتخاب و نمونه‌هایی جدا شد و مورد ارزیابی برشی قرار گرفت. نمودارهای بارگذاری انفجاری به همراه مکان‌های نمونه‌برداری در شکل ۷ نشان داده شده است. یادآور می‌شود که با توجه به طراحی آزمایش‌ها، در

جدول ۳. تنش برشی تسلیم در قطعات مختلف در محدوده اتصال.

شماره تکه	تنش برشی تسلیم (MPa)				
	P۵	P۴	P۳	P۲	P۱
۱	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴
۲	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴
۳	۵۸	۶۴	۶۴	۶۴	۵۴
۴	۴۶	۶۴	۶۴	۶۴	۳۸
۵	۳۳	۶۴	۶۴	۶۴	۲۶
۶	۲۴	۵۲	۵۷	۵۶	۱۰
۷	۱۱	۴۲	۴۸	۴۷	جدایش
۸	جدایش	۳۱	۳۷	۳۲	جدایش
۹	جدایش	۲۰	۲۵	۱۹	جدایش
۱۰	جدایش	۱۰	۱۵	۱۲	جدایش
۱۱	جدایش	جدایش	۹	جدایش	جدایش
۱۲	-	جدایش	جدایش	-	-

جدول ۴. محدوددهای متصل شده و نشده در انواع قطعات.

شماره قطعه	محدوده‌ی متصل شده (mm)		محدوده‌ی متصل نشده (mm)
	منطقه‌ی اول	منطقه‌ی دوم	منطقه‌ی سوم
P۱	۲۶,۵۸	۲۶,۶۲	۱۹,۷۴
P۲	۳۷,۹۷	۳۷,۹۷	۰
P۳	۳۲,۵۰	۳۵,۸۵	۷,۵۹
P۴	۲۶,۵۸	۳۷,۹۷	۱۱,۳۹
P۵	۲۶,۵۸	۳۴,۹۴	۱۴,۴۳

منطقه‌ی سوم. در این ناحیه هیچ‌گونه اتصالی رخ نداده است و با کوچک‌ترین ضربه و نیرویی، دو فلز از هم گسیخته می‌شوند. در جدول ۴ به صورت مشخص‌تر محدوده‌های اتصالی و نواحی مختلف نشان داده شده است. چنان که مشاهده شد، برای به‌دست آوردن بارگذاری انفجاری و ضخامت ماده‌ی منفجره، میانگین سرعت‌های کمیته و بیشینه در مدل بارگذاری مورد استفاده قرار گرفت. اکنون می‌توان این مدل را به همراه مدل جرنی مورد ارزیابی قرار داد. فرض منطقی این است که سرعت برخورد کمیته به مکانی نسبت داده شود که در آن هیچ اتصال صورت نگرفته است. عدم اتصال نواحی مختلف را نیز می‌توان از نتایج آزمایش‌های برش، و صفر بودن استحکام آن نواحی به‌دست آورد.

با مقایسه‌ی نواحی دارای عدم اتصال و محاسبه‌ی نسبت بارگذاری در آن مناطق (با توجه به معادله‌ی ۱۷) و نیز محاسبه‌ی سرعت برخورد با توجه به نسبت بارگذاری در مدل‌های مربوطه می‌توان تفاوت‌ها را مشاهده، و مدل‌ها را ارزیابی کرد. اطلاعات مورد نظر در جدول ۵ ارائه شده است.

چنان‌که از جدول ۵ استنباط می‌شود، خطای کم‌تر مدل استرن در پیش‌بینی سرعت برخورد منطقی به‌نظر می‌رسد، زیرا مدل استرن در واقع اصلاح‌شده‌ی مدل

در سرعت‌های کمیته، آزمایش‌های روکش‌کاری انفجاری انجام، و مشاهده شد که در دو مدل جرنی و استرن، در سرعت برخورد کمیته‌ی ۳۱۴/۵۲ متر بر ثانیه هیچ اتصالی انجام نشد. به عبارت دیگر، محاسبات انجام‌شده درخصوص افزایش ۱۰ درصد اختلاف سرعت کمیته و بیشینه به سرعت کمیته، شرایط اتصال موفق را برآورده نمی‌کند (شکل ۸).

الف) آزمایش‌ها بررسی استحکام فصل مشترک اتصال

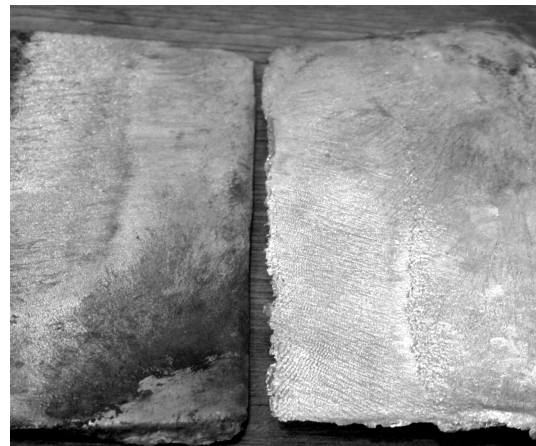
برای بررسی موضعی فصل مشترک اتصال و استحکام ایجاد شده، باند اتصال به تکه‌هایی مجزا در قسمت آلومینیوم مانند شکل ۹، تقسیم شد. بارگذاری در هر تکه به‌وسیله‌ی قراردادن تسمه بریده شده در فیکسچر مناسب و اعمال نیرو به‌وسیله‌ی دستگاه آزمایش فشار، انجام شد.

ب) نتایج حاصل از آزمایش بررسی فصل مشترک اتصال

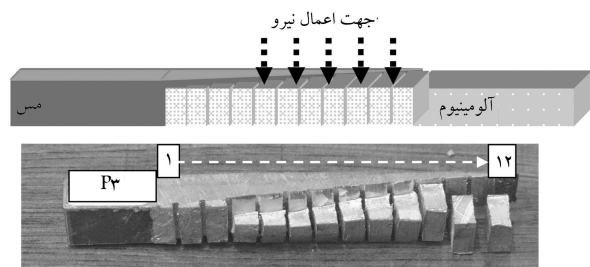
نتایج آزمایش‌های برش در قطعات مربوطه مانند شکل ۹، در جدول ۳ آورده شده است.

ج) بررسی فصل مشترک اتصال و ارائه‌ی مدل

به‌طور کلی می‌توان محدوده سطح اتصال را به سه منطقه تقسیم‌بندی کرد: منطقه‌ی اول. در این مکان مقاومت اتصال برابر استحکام برشی آلومینیوم، یعنی ۶۴ MPa است؛ منطقه‌ی دوم. این منطقه را می‌توان ناحیه‌ی «استحکام متغیر» نامید؛



شکل ۸. عدم اتصال صفحات آلومینیوم.



شکل ۹. شماتیک آزمایش برش به‌همراه مکان بارگذاری و نمونه P۳ در بررسی استحکام اتصال اسکارف انجام شده.

جدول ۵. ارزیابی سرعت برخورد و درصد خطاء در مدل‌های بارگذاری استرن و جرنی با ضریب اصلاح شده.

شماره نمونه	مکان عدم اتصال			سرعت برخورد در نسبت بارگذاری مدل مربوطه		درصد خطا با کم‌ترین سرعت برخورد
	t_f	X	R	مدل جرنی	مدل استرن	
P1	۷٫۴	۳۳٫۱۵	۲٫۱۰	۵۳۲٫۹۶	۴۲۹٫۷۱	٪-۷٫۳۶
P2	۱۰	۷۶	۲٫۰۷	۵۲۹٫۲۱	۴۲۷٫۲۳	٪-۷٫۸۹
P3	۹	۶۸٫۳۶	۲٫۲۴	۵۴۹٫۸۰	۴۴۰٫۸۷	٪-۴٫۹۵
P4	۸٫۵	۶۴٫۵۶	۲٫۱۳	۵۳۶٫۶۶	۴۳۲٫۱۷	٪-۶٫۸۲
P5	۸٫۱	۶۱٫۳۰	۲٫۱۱	۵۳۴٫۲۰	۴۳۰٫۵۴	٪-۷٫۱۸
						٪-۶٫۸۴

سرعت برخورد کمیته، ۴۶۳/۸۵ متر بر ثانیه محاسبه شده است.

درصد اختلاف برابر تفاضل سرعت کم‌ترین برخورد و سرعت به دست آمده از مدل‌های

مربوطه تقسیم بر سرعت برخورد کمیته است.

میانگین

جدول ۶. مدل‌های بارگذاری جدید با اعمال ضریب اصلاحی.

مدل بارگذاری	ضریب اصلاحی	مدل جدید
$\frac{\text{حدائل سرعت برخورد}}{\text{میانگین سرعت برخورد از جدول ۵ در مدل جرنی}} \times ۱۵ = ۰٫۸۶۴ \Rightarrow V_p = \sqrt{2E} \left[\frac{2,22R^2}{R^2+5R+2} \right]^{\frac{1}{4}}$		
$\frac{\text{حدائل سرعت برخورد}}{\text{میانگین سرعت برخورد از جدول ۵ در مدل استرن}} \times ۱۶ = ۱٫۰۷۳ \Rightarrow V_p = \sqrt{2E} \left[\frac{۱,۹۲R^2}{R^2+5R+\frac{5}{4}} \right]^{\frac{1}{4}}$		

نتیجه‌گیری

چنان که مشاهده شد، اتصال فارسی‌بر به دلیل ماهیت هندسی‌اش، شرایطی فراهم می‌آورد که می‌توان ضخامت ماده‌ی منفجره و صفحه‌ی پران متغیر را در یک مرحله‌ی انفجار ارزیابی کرد و معادلاتی را که در آن‌ها این متغیرها وجود دارند، محک زد. براساس طراحی اولیه در راستای انجام محاسبات مربوط به ایجاد اتصال بین صفحات آلومینیوم و مس در حالت فارسی‌بر، مطابق انتظار، این اتصال با توجه به محاسبات انجام شده ایجاد، و سپس با آزمایش‌های متعدد روی صفحات، استحکام مکان اتصال به صورت کتی ارزیابی شد. سپس با نسبت دادن سرعت برخورد کمیته به مکان‌های فاقد اتصال، مدل‌های بارگذاری انفجاری ارزیابی و سپس مدل‌های جدید با اعمال ضرایب اصلاحی استخراج شدند.

به‌طور کلی پیشنهاد می‌شود برای تسلط بر فرایند جوشکاری انفجاری -- به‌ویژه روش‌کاری انفجاری -- ابتدا با انجام محاسبات ارائه شده در خصوص بارگذاری انفجاری و تعیین ضخامت ماده‌ی منفجره و نیز سرعت برخورد، جوشکاری انفجاری در حالت فارسی‌بر انجام شود؛ آنگاه با مدل‌سازی فرایند، مانند آنچه که در این نوشتار ارائه شد، می‌توان به استحکام قابل قبولی دست یافت. این روش از صرف هزینه‌های گزاف در انجام آزمایشات جوشکاری انفجاری که معمولاً با سعی و خطا انجام می‌شود، جلوگیری می‌کند.

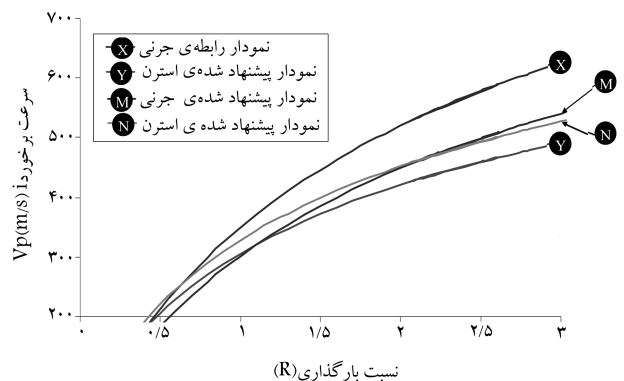
فهرست علائم

CE : انرژی جنبشی

t_{mp} : نقطه‌ی ذوب

C_h : گرمای ویژه

U : سرعت صوت در فلزات



شکل ۱۰. نمودارهای بارگذاری انفجاری جرنی و استرن به همراه مدل‌های جدید.

جرنی است و بنابراین تطابق بیشتری با شرایط حاکم بر فرایند دارد. این واقعیت از مقدار خطای سرعت برخورد محاسبه شده در مقایسه با سرعت برخورد کمیته متناسب با مکان عدم اتصال که کم‌تر از ۱۰ درصد است، به دست می‌آید. با توجه به میانگین خطاهای محاسبه شده، می‌توان ضریبی را در این معادلات اعمال کرد. بنابراین مدل‌های جدید مطابق جدول ۶ اصلاح می‌شوند.

نمودار معادلات جدید به همراه مدل‌های قبلی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. چنان که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، می‌توان گفت که مدل استرن با شدت زیادی مدل جرنی را تصحیح کرده است. از این رو مدل‌های به دست آمده جدید، نسبت به مدل استرن در بارگذاری یکسان، سرعت برخورد بیشتری دارند. می‌توان گفت که مدل جرنی لازم بود اصلاح شود ولی مقدار ضریب اصلاح آن از مقدار در نظر گرفته شده توسط استرن، باید کم‌تر باشد. بنابراین مدل‌های جدید بر مبنای مدل‌های جرنی و استرن، مقادیر دقیق‌تری از فرایند جوشکاری انفجاری در فلزات آلومینیوم به مس را ارائه می‌دهد.

m_e : جرم ماده‌ی منفجره	d : فاصله‌ی هوایی بین صفحات
W_e : عرض ماده‌ی منفجره در محفظه‌ی انفجار	V : سرعت گازهای تولیدی درون ماده‌ی منفجره
m_f : جرم فلز پران	E : انرژی مخصوص جرمی
W_f : عرض صفحه‌ی پران	V_C : سرعت پیشروی نقطه‌ی جوش
P : فشار هوگونیوت	H_V : سختی ویکرز
X : فاصله از ابتدای پخی	V_D : سرعت انفجار ماده‌ی منفجره
R : بارگذاری انفجاری	K : ضریب هدایت حرارتی
Y : فاصله از خط سرعت صفر در ماده‌ی منفجره	V_P : سرعت برخورد صفحه‌ی پران به صفحه‌ی پایه
R_e : عدد رینولدز	ℓ_e : طول ماده‌ی منفجره در محفظه‌ی انفجار
ρ_b : چگالی فلز پایه	V_T : سرعت انتقال حالت به موج
t_e : ضخامت ماده‌ی منفجره	ℓ_f : طول صفحه‌ی پران
ρ_e : چگالی ماده‌ی منفجره	v_e : حجم ماده‌ی منفجره
t_f : ضخامت فلز پران	M : ممتوم
ρ_f : چگالی فلز پران	v_f : حجم صفحه‌ی پران

پانوشت

1. explosion welding (EXW)
2. scarf joint
3. stern

منابع

1. Rinehart, J.S. and Pearson, J., *Explosive Working of Metals*, New York, The Macmillan company (1963).
2. Young, G.A. and Banker, J.G. "Explosion welded, Bi-metallic solution to dissimilar metal joining", Texas section of the society of Naval Architect and Marine Engineers, 13th offshore symposium (2004).
3. Crossland, B. *Explosive Welding of Metals and Its Application*, Oxford, Clarendon Press (1982).
4. Carter, W.A. and Keathley, W.C., *Method of Explosively Forming a Scarf Type Joint*, United States Patent, 3197855 (Aug. 1965).
5. SLV Duisbur, "The welding engineer's current knowledge", Branch of GSI mbH, Int. Weld. Eng. (2005).
6. Laurence, J.B., *Method of Making an Explosively Welded Scarf Joint*, United States Patent, 3842485 (Oct. 1974).
7. Simon, W.E., *Method for Explosive Bonding of Metals*, United States Patent, 3732612 (May. 1973).
8. Blazynski, T.Z., *Explosive Welding, Forming and Compaction*, London & New York, Applied science publisher (1983).
9. Hokamoto, K.; Izuma, T. and Fujita, M. "New explosive welding technique to weld aluminum alloy and stainless steel plates using a stainless steel intermediate plate", *Metallurgical Transactions*, **24A**, pp. 2289-2297 (1993).
10. Acarer, M.; Gulence, B. and Findik, F. "Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength", *Materials and Design*, **24**, pp. 659-664 (2003).
11. Kahramana, N.; Gulenc, B. and Findik, F. "Corrosion and mechanical-microstructural aspects of dissimilar joints of Ti-6Al-4V and Al plates", *International Journal of Impact Engineering*, **34**, pp. 1423-1432 (2007).
12. Kahraman, N.; Gulenc, B. and Findik, F. "Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface", *Journal of Materials Processing Technology*, **169**, pp. 127-133 (2005).
13. Kosec, B.; Kosec, L.; Cevink, G.; Fajfar, P.; Gojic, M. and Anzel, I. "Analysis of interface at explosive welded plates from low-carbon steel and titanium", *METALURGIJA*, **43**, pp. 83-86 (2004).
14. Raghukandan, K. "Analysis of the explosive cladding of cu-low carbon steel plates", *Journal of Materials Processing Technology*, **139**, pp. 573-577 (2003).
15. Gerland, M.; Presles, H.N.; Guin, J.P. and Bertheau D. "Explosive cladding of a thin Ni-film to an aluminum alloy", *Materials Science and Engineering*, **A280** .pp. 311-319 (2000).
16. Buchare, J.; Rolc, S., and Hruby, V. "On the explosive of a ring to axisymmetric body", *Journal of Materials Processing Technology*, **85**, pp. 171-174 (1999).
17. Grignon, F.; Benson, D.; Vecchio, K.S. and Meyers, M.A. "Explosive welding of aluminum to aluminum: Analysis, computation and experiments", *Int. J. Impact Engineering*, **30**, pp. 1333-1351 (2004).
18. Al-Hassani, S.T.S. and Mousavi, A.A. "Finite element simulation of explosively-driven plate impact with application to explosive welding", *Materials and Design*, **29**, pp. 1-19 (2008).

۱۹. بیسادی، ح. و لیاقت، غ.ح. «شکل‌دهی همراه با جوشکاری تجربی صفحات فلزی به روش انفجار مواد منفجره»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (۱۳۸۴).
۲۰. طباطبایی قمی، م. و لیاقت، غ.ح. «نشت‌گیری در مخازن دارای سیال به کمک جوشکاری انفجاری و کنترل متغیرهای فرایند»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (۱۳۷۵).
۲۱. اکبری موسوی، س.ع.ا؛ نوروزپور، م. و مکی، ا. «بررسی فصل مشترک جوشکاری انفجاری اتصال سه لایه ورق‌های آلومینیوم ۸۳/۵۰/ آلومینیوم ۱۲۵۰ فولاد دریایی»، نشریه مواد پر انرژی، ۳(۲) (۱۳۸۷).
۲۲. زمانی، ا؛ لیاقت، غ.ح. «مطالعه‌ی تجربی و تحلیلی جوشکاری انفجاری لوله‌های هم‌محور فولاد ضدزنگ - فولاد کربنی» پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (۱۳۸۳).
۲۳. دهقان منشادی، س.ا. و لیاقت، غ.ح. «تدوین فرایند جوشکاری انفجاری لوله‌های دوجداره فولاد و آلیاژ برنز»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (۱۳۸۵).
24. ASM International Handbook committee. "Properties and selection: Nonferrous alloys and special purpose materials", **2** (1992).
25. Vaidyanathan, P.V. and Ramanathan, A. "Computer-aided design of explosive welding systems", *J. of Materials Pro. Tech.*, **38**, pp. 501-516 (1993).

