مهندسی مکانیک شریف
دوره‌ی ۳ - ۲۶، شماره‌ی ۱، ص. ۱۱۹-۱۲۷

# اصلاح مدل‌های بارگذاری انفجاری به‌وسیله‌ی ایجاد اتصال فارسی‌بُر (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 عمرانی (استادیار)**
**دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر**

در فرایند جوشکاری انفجاری[1]، دو یا چند صفحه‌ی فلزی(صفحه فلزیا همان فلز پایه و صفحه پران) در فشار زیادی که توسط ماده‌یی منفجره ایجادشده، به یکدیگر متصل می‌شوند. در این نوشتار ضمن معرفی اتصال فارسی‌بُر[2] و محاسبات مربوطه، و نیز باتوجه به روابط موجود جوشکاری انفجاری فلزات آلومینیوم و مس انجام می‌شود. استحکام اتصال ایجادشده با آزمایش‌های طراحی‌شده‌ی برشی بررسی می‌شود. درنهایت، نتایج حاصل از آزمایش‌های برش و نسبت دادن مقدار کمینه‌ی 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 فارسی‌بُر 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 فارسی‌بُر 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:** جوشکاری‌انفجاری، بارگذاری انفجاری، فاصله‌ی هوایی، سرعت برخورد، اتصال اسکارف، مدل‌سازی.

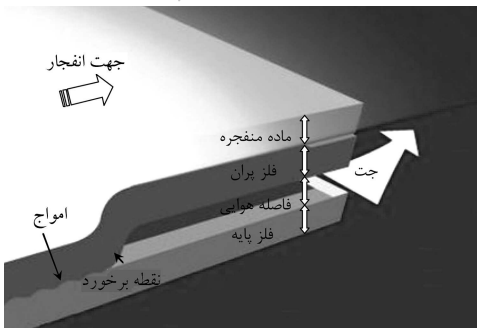
zamani@kntu.ac.ir
mirmasoodbagheri@gmail.com
a.mehdipoor@gmail.com

## 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.[1] چنان‌که در شکل ۱ مشاهده می‌شود صفحه‌ی پران، براثر نیروی ماده‌ی منفجره به صفحه‌ی پایه برخورد می‌کند و به پیدایش جوش می‌انجامد.[2] 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.[3]

در اتصال فارسی‌بُر (اسکارف) قطعات به‌گونه‌یی قرار می‌گیرند که در نهایت به‌صورت مورّب و مایل به هم متصل می‌شوند. روش اتصال مطابق هندسه‌یی است که در شکل ۲ نشان داده شده است.

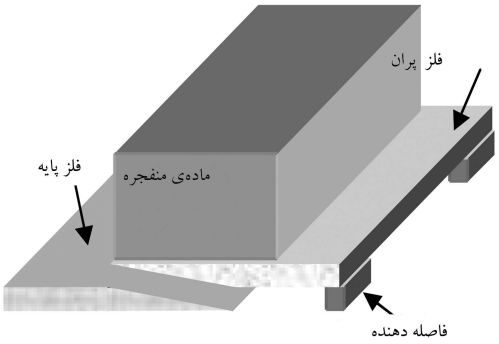
از کاربردهای مهم این روش اتصال می‌توان به اتصال هم‌راستای صفحات غیرهم‌جنس به یکدیگر در تجهیزات خاص مرتبط با صنایع نظامی و پتروشیمی اشاره داشت.[4] این نوع اتصال همچنین در متصل‌کردن ورق‌های نازک به صفحات

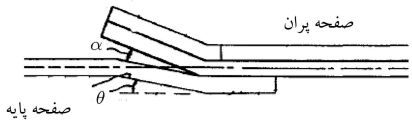


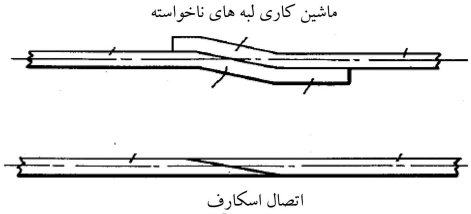

**شکل ۱. هندسه‌ی فرایند جوشکاری انفجاری و اجزاء آن.[5]**

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

Archive of SID
www.SID.ir




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

و نیز اتصال ورق‌هایی که بتوان زاویه‌ی پخی در آن‌ها را به‌صورت خم‌شدگی لبه‌ها ایجاد کرد (مانند شکل ۲) مشاهده شده است.[۶و۷] 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 جوشِ تشکیل‌شده ــ 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، جهتِ 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 قابل‌قبول 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 نشت‌گیری در مخازن دارای سیّال 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]

## 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 فارسی‌بُر متصل شده‌اند. خواص مکانیکی و فیزیکی این فلزات در جدول ۱ آورده شده است.[۲۴] آزمایش‌ها با آماده‌سازی صفحاتی از جنس آلومینیوم و مس به ابعاد ۱۰×۱۰۰×۱۵۰ میلی‌متر (ضخامت×عرض×طول) با زوایای پخی ۷٫۵ 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 انتقالِ حالت و سرعت نقطه‌ی برخورد

سرعت انتقال حالتِ نقطه‌ی برخورد، به‌منظور دست‌یابی به فصل مشترکی موجی‌شکل و قابل قبول ــ از نقطه‌نظر خواص مکانیکی و متالورژیکی ــ با انتخاب عدد رینولدز (Re) برای اتصال آلومینیوم به مس (که برابر ۱۳٫۱ است)، با استفاده از رابطه‌ی ۱

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

| خواص مکانیکی فلزات | AL(۱۱۰۰) (فلز پران) | Cu(C۱۰۲۰۰) (فلز پایه) |
|---|---|---|
| چگالی $gr/Cm^3$ | ۲٫۷ | ۸٫۹۳ |
| سرعت صوت $m/s$ | ۶۴۰۰ | ۴۹۰۰ |
| دمای ذوب $C^o$ | ۶۵۰ | ۱۰۸۵ |
| گرمای ویژه $Cal/Kg\,K^o$ | ۲۱۵٫۹۱ | ۹۱٫۹۵ |
| هدایت حرارتی $Cal/m\,S^{-1}\,C^o$ | ۵۵٫۴۱ | ۸۹٫۸۰ |
| مدول یانگ $GPa$ | ۶۹ | ۱۱۵ |
| ضریب پواسون | ۰٫۳۳۴ | ۰٫۳۴۰ |
| سختی ویکرز $H_v$ | ۴۷ | ۹۴ |
| تنش کششی $MPa$ | ۱۱۰ | ۲۷۵ |
| تنش تسلیم $MPa$ | ۱۰۵ | ۲۲۰ |
| تنش برشی $Mpa$ | ۶۹ | ۱۳۲ |



Archive of SID
www.SID.ir

محاسبه می‌شود:[۲۵]

$$V_T = \left\{ \frac{۲ \times ۱۰^{۶} \times ۹/۸۱ \times R_e \times (H_{Vb} + H_{Vf})}{\rho_b + \rho_f} \right\}^{\frac{۱}{۴}}$$
$$\hookrightarrow V_T = ۱۷۶۵/۲۴\, m/s \qquad (۱)$$

بنابراین سرعت نقطه‌ی برخورد برابر است با:[۸]

$$\begin{cases} V_C = V_T + ۲۰۰ \;\Leftrightarrow\; V_T < ۲۰۰۰\ \frac{m}{s} \\ V_C = V_T + ۱۰۰ \;\Leftrightarrow\; ۲۰۰۰ \le V_T \le ۲۵۰۰\ \frac{m}{s} \\ V_C = V_T + ۵۰ \Leftrightarrow ۲۵۰۰ < V_T\ \frac{m}{s} \end{cases}$$
$$\hookrightarrow VC = ۱۸۶۵/۲۴\, m/s \qquad (۲)$$

### ب) حداقل سرعت برخورد

براساس 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]

$$V_P = \left( \frac{\sigma_{U_T}}{\rho} \right)^{\frac{۱}{۲}} \qquad (۳)$$

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

$$P = \frac{۱}{۲} \rho V_P U \qquad (۴)$$

با به‌دست 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 کمینه استفاده می‌شود:[۲۵]

$$\begin{cases} P_۱ < P_۲ \Rightarrow V_{P.new} = {P_۲}/{U_۱ \rho_۱} \\ P_۲ < P_۱ \Rightarrow V_{P.new} = {P_۱}/{U_۲ \rho_۲} \end{cases}$$
$$\Rightarrow \begin{cases} P_۱ < P_۲ \Rightarrow V_{P.Min} = V_{P.new} + \frac{۱}{۲} V_{P۲} \\ P_۲ < P_۱ \Rightarrow V_{P.Min} = V_{P.new} + \frac{۱}{۲} V_{P۱} \end{cases} \qquad (۵)$$

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

$$\hookrightarrow V_{P.min} = ۲۷۷/۱۹\, m/s$$

### ج) سرعت بیشینه‌ی برخورد

شرایط ایجاد فاز مذاب، مبنای اولیه‌ی محاسباتِ محدوده‌ی بالایی انرژی ضربه و نهایتاً سرعت برخورد بیشینه است. گرمای ایجادشده، به‌دلیل محبوس‌شدن 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 به‌دلیل آهنگ سریع سردشدن، ایجاد فازهای تردد و شکننده را در برخی ترکیبات فلزی ممکن می‌سازد. خاصیت‌های ترموفیزیکی فلزات در فصل مشترک برخورد ــ نظیر هدایت حرارتی، دمای ذوب، گرمای ویژه‌ی فلزات پایه و پران ــ بر این شرایط حاکم است. رابطه‌ی ۶ توسط محققین برای یافتن سرعت بیشینه‌ی برخورد بیان شده‌است.[۸]

$$V_{P.Max} = \frac{(t_{mp} U_f)^{\frac{۱}{۲}}}{۰/۰۸۲ \times V_C} \left( \frac{K\, C_h\, U_f}{\rho\, t_f} \right)^{\frac{۱}{۴}} \qquad (۶)$$

درنتیجه:

$$\hookrightarrow V_{P.Max_Al} = ۶۵۰/۵۱\, m/s$$

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

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

$$V_P = V_{P.Min} + ۰/۱ \times (V_{P.Max} - V_{P.Min})$$
$$\hookrightarrow V_{P۱} = ۳۱۴/۵۲\, m/s \qquad (۷)$$

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

$$V_P = \left( \frac{V_{P.Max} + V_{P.Min}}{۲} \right)$$
$$\hookrightarrow V_{P۲} = ۴۶۳/۸۵\, m/s \qquad (۸)$$

سرعت به‌دست آمده، در معادلات بارگذاری به‌منظور تعیین ضخامت ماده‌ی منفجره مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق، با ارزیابی هر دو سرعتِ به‌دست آمده مشاهده شد که روش ارائه‌شده توسط نگارنده، شرایط اتصال قابل قبول را با موفقیّت 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)



Archive of SID

www.SID.ir

و با قراردهی مقدار سرعت برخورد در نظرگرفته شده در معادله‌ی بارگذاری‌مناسب، مقدار ضخامت ماده‌ی منفجره به‌دست می‌آید.

معادلات نیمه‌تجربی و تجربی فراوانی درخصوص ارتباط بین سرعت صفحه‌ی پران و بارگذاری انفجاری ارائه شده است. اولین مطالعات، بعد از جنگ جهانی دوم و به‌منظور نشان‌دادن 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 به‌صورت 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 ممنتومی 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 نظرگرفت:

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

با فرض قانون بقای ممنتوم می‌توان نوشت:

$$-M \times V_P + \rho_e \int_o^{Y_o} \left[(V_o + V_P)\frac{Y}{Y_o} - V_P\right] dY = ۰ \qquad (۱۰)$$

با جایگزینی عبارت $\rho_e Y_\circ = c$ و فرض $C$، به‌عنوان جرم ماده‌ی منفجره در واحد سطح، معادله‌ی ۱۰ تبدیل می‌شود به:

$$\frac{V_o}{V_P} = \frac{۲}{R} + ۱ \qquad (۱۱)$$

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

$$CE = \frac{۱}{۲}M \times V_P^۲ + \frac{۱}{۲}\rho_e \int_o^{Y_o} \left[(V_o + V_P)\frac{Y}{Y_o} - V_P\right]^۲ dY \qquad (۱۲)$$

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

$$CE = \frac{۱}{۲}M \times V_P^۲ + \frac{۱}{۶}C\frac{(V_o^۳ + V_P^۳)}{(V_o + V_P)} \qquad (۱۳)$$

و یا:[۴]

$$V_p = \sqrt{۲E}\left[\frac{(۱ + \frac{۲}{R})^۳ + ۱}{۶\,(۱ + \frac{۱}{R})} + \frac{۱}{R}\right]^{-\frac{۱}{۲}} \qquad (۱۴)$$

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

$$V_P = \sqrt{۲E}\left[\frac{۳R^۲}{R^۲ + ۵R + ۴}\right]^{\frac{۱}{۲}} \qquad (۱۵)$$

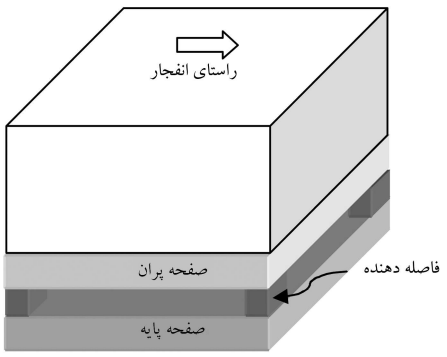
معادله‌ی ۱۵ توسط استرن[۳] به معادله‌ی ۱۶ تغییر یافت:[۴]

$$V_P = \sqrt{۲E}\left[\frac{\frac{۵}{۴}R^۲}{R^۲ + ۵R + \frac{۵}{۴}}\right]^{\frac{۱}{۲}} \qquad (۱۶)$$

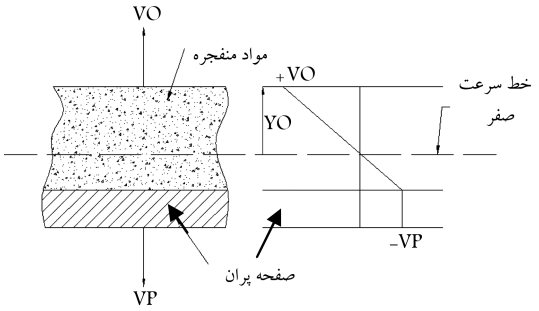
که در آن $E$ مقدار انرژی ماده‌ی منفجره است که در آنفو(نوعی ماده‌ی منفجره)، همراه با ۶٪ گازوییل، دارای مقدار ۲۰۳KJ/Kg است.[۸] می‌توان نمودار سرعت برخورد را در منحنی‌های فوق و برحسب بارگذاری انفجاری، مانند شکل ۵ به‌دست آورد.

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:

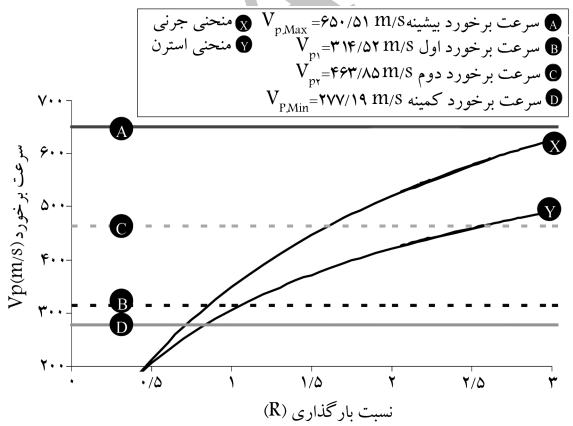
$$R = \frac{m_e}{m_f} = \frac{\rho_e v_e}{\rho_f v_f} = \frac{۰/۷ \times \ell_e \times dW_e \times t_e}{۲/۷ \times \ell_f \times dW_f \times t_f} = \frac{۰/۷ \times t_e}{۲/۷ \times t_f} \qquad (۱۷)$$




شکل ۳. شماتیک انجام آزمایش روکش‌کاری انفجاری.



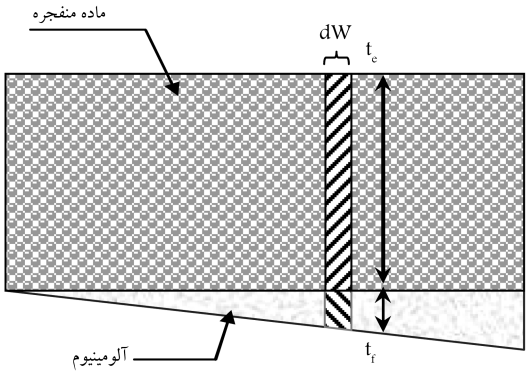

شکل ۴. المان درنظرگرفته شده در ماده‌ی منفجره و فلز پران.[۴]




شکل ۵. منحنی‌سرعت برخورد برحسب بارگذاری در مدل‌های دیگر محققین.



Archive of SID
www.SID.ir




شکل ۶. المان درنظرگرفته شده از ضخامت ماده‌ی منفجره و صفحه‌ی پران.

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

| $V_P$=۴۶۳٫۸۵ m/s | $V_P$=۳۱۴٫۵۲ m/s | |
|---|---|---|
| بارگذاری (R) ضخامت ماده‌ی منفجره (te) | | مدل بارگذاری |
| ۱٫۶۱<br>۳۱٫۰۴ | ۰٫۸۶<br>۱۶٫۶ | جرنی |
| ۲٫۵۵<br>۴۹٫۱۶ | ۱٫۰۶<br>۲۰٫۰۴ | استرن |

چنان که در محاسبات دیده می‌شود مقادیر $\ell$ و W، به‌دلیل ثابت بودن از معادلات حذف شده‌اند. بنابراین:

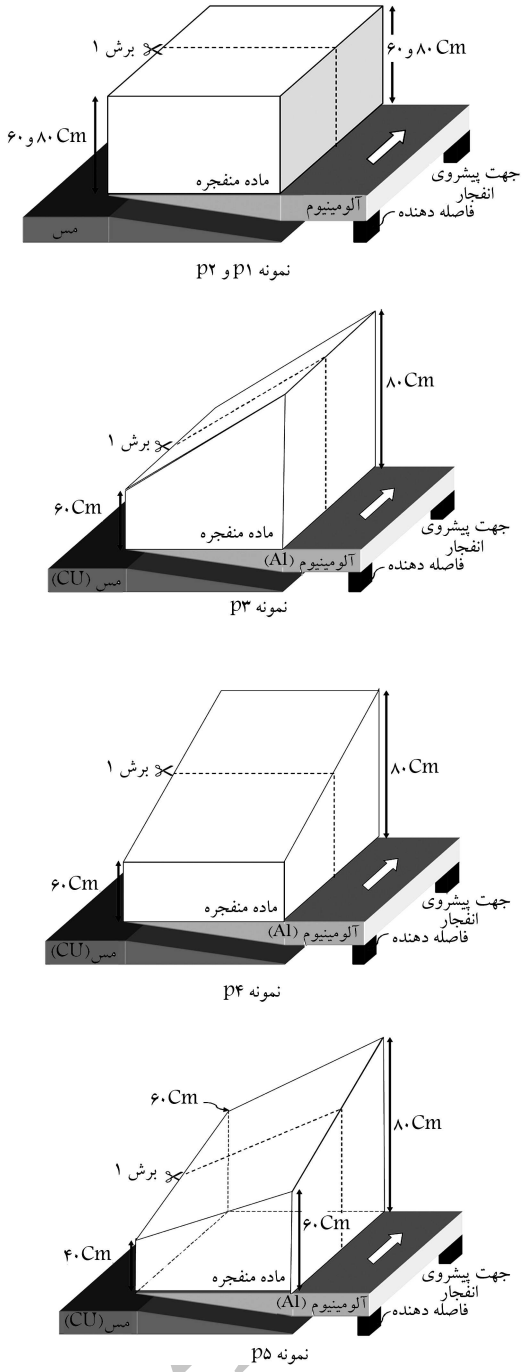
$$R = \frac{۰/۷ \times t_e}{۲/۷ \times t_f} = \frac{t_e}{۳/۸۵۷ \times ۵} = \frac{t_e}{۱۹/۲۸} \qquad (۱۸)$$

در انجام محاسبات، میانگین ضخامت پخی (یعنی $۵\ \text{mm} = ۲/^{[۱۰+۰]}$ ) به‌عنوان ضخامت فلز پران در نظرگرفته شد و با استفاده از مقدار $R$، مقدار ضخامت ماده‌ی منفجره برحسب میلی‌متر به‌دست آمد.

نتایج حاصل از محاسبات مرتبط با بارگذاری انفجاری و ضخامت ماده‌ی منفجره در دو مدل جرنی و استرن با درنظرگرفتن سرعت‌های کمینه (که به دو روش به دست آمده) در جدول ۲ نشان داده‌شده است.

## طراحی آزمایش‌ها و انجام جوشکاری

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




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

دیگر مکان‌های قطعات نتایج متفاوتی به‌دست 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 به‌آن خواهیم پرداخت، به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد. چنان‌که اشاره شد، برای بررسی اتصال یا عدم اتصال صفحات تحت بارگذاری‌های محاسبه‌شده



Archive of SID
www.SID.ir

در سرعت‌های کمینه، آزمایش‌های روکش‌کاری انفجاری انجام، و مشاهده شد که در دو مدل جرنی و استرن، در سرعت برخورد کمینه‌ی ۳۱۴٫۵۲ متر بر ثانیه هیچ اتصالی انجام نشد. به‌عبارت دیگر، محاسبات انجام‌شده درخصوص افزایش ۱۰درصدِ اختلافِ سرعتِ کمینه و بیشینه به سرعت کمینه، 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 تکه‌هایی‌مجزا در قسمت آلومینیوم مانند شکل ۹، تقسیم شد. بارگذاری‌در هر تکه به‌وسیله‌ی قراردادن تسمه بریده شده در فیکسچر مناسب و اعمال نیرو به‌وسیله‌ی دستگاه آزمایش فشار، انجام شد.

## ب)نتایج حاصل از آزمایش بررسی‌فصل مشترک اتصال

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

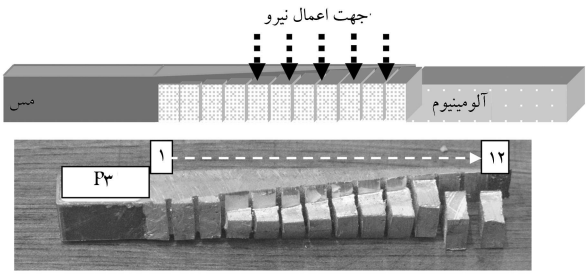
## ج) بررسی‌فصل مشترک اتصال و ارائه‌ی مدل

به‌طورکلی می‌توان محدوده سطح اتصال را به سه منطقه تقسیم‌بندی کرد:

**منطقه‌ی اول**. در این مکان مقاومت اتصال برابر استحکام برشی‌آلومینیوم، یعنی ۶۴MPa، 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 ۳. تنش برشی‌تسلیم در قطعات مختلف در محدوده اتصال.

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

جدول ۴. محدودهای متصل‌شده و نشده در انواع قطعات.

| شماره‌ی 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 به‌صورت مشخص‌تر محدوده‌های اتصالی و نواحی مختلف نشان داده شده است. چنان که مشاهده شد، برای به‌دست آوردن بارگذاری‌انفجاری‌و ضخامت ماده‌ی منفجره، میانگین سرعت‌های‌کمینه و بیشینه در مدل بارگذاری‌مورد استفاده قرار گرفت. اکنون می‌توان این مدل را به‌همراه مدل جرنی مورد ارزیابی‌قرار داد. فرض منطقی این است که سرعت برخورد کمینه 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 باتوجه به نسبت بارگذاری‌در مدل‌های‌مربوطه می‌توان تفاوت‌ها را مشاهده، و مدل‌ها را ارزیابی‌کرد. 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



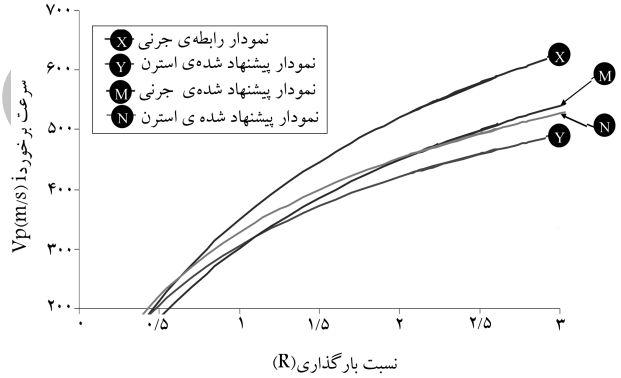
Archive of SID
www.SID.ir

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 | مدل جرنی | مدل استرن |
| P۱ | ۷/۴ | ۳۳/۱۵ | ۲/۱۰ | ۵۳۲/۹۶ | ۴۲۹/۷۱ | ٪۱۴/۸۹ | ٪-۷/۳۶ |
| P۲ | ۱۰ | ۷۶ | ۲/۰۷ | ۵۲۹/۲۱ | ۴۲۷/۲۳ | ٪۱۴/۰۹ | ٪-۷/۸۹ |
| P۳ | ۹ | ۶۸/۳۶ | ۲/۲۴ | ۵۴۹/۸۰ | ۴۴۰/۸۷ | ٪۱۸/۵۲ | ٪-۴/۹۵ |
| P۴ | ۸/۵ | ۶۴/۵۶ | ۲/۱۳ | ۵۳۶/۶۶ | ۴۳۲/۱۷ | ٪۱۵/۶۹ | ٪-۶/۸۲ |
| P۵ | ۸/۱ | ۶۱/۳۰ | ۲/۱۱ | ۵۳۴/۲۰ | ۴۳۰/۵۴ | ٪۱۵/۱۶ | ٪-۷/۱۸ |
| سرعت برخورد کمینه، ۴۶۳/۸۵ متر بر ثانیه محاسبه شده است. | | | | | | ٪۱۵/۶۷ | ٪-۶/۸۴ |
| درصد اختلاف برابر تفاضل سرعت کم‌ترین برخورد و سرعت به‌دست آمده از مدل‌های مربوطه تقسیم بر سرعت برخورد کمینه است. | | | | | | میانگین | |

جدول ۶. مدل‌های بارگذاری جدید با اعمال ضریب اصلاحی.

| مدل جدید | ضریب اصلاحی | مدل بارگذاری |
|---|---|---|
| $V_p = \sqrt{2E}\left[\frac{2.24R^2}{R^2+5R+4}\right]^{\frac{1}{2}}$ | $\Rightarrow 0.864 =$ رابطه ۱۵ $\times$ | $\frac{\text{حداقل سرعت برخورد}}{\text{میانگین سرعت برخورد از جدول ۵ در مدل جرنی}}$ |
| $V_p = \sqrt{2E}\left[\frac{1.92R^2}{R^2+5R+\frac{5}{4}}\right]^{\frac{1}{2}}$ | $\Rightarrow 1.073 =$ رابطه ۱۶ $\times$ | $\frac{\text{حداقل سرعت برخورد}}{\text{میانگین سرعت برخورد از جدول ۵ در مدل استرن}}$ |




شکل ۱۰. نمودارهای بارگذاری انفجاری جرنی و استرن به‌همراه مدل‌های جدید.

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

نمودار معادلات جدید به‌همراه مدل‌های قبلی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. چنان‌که در شکل ۱۰ مشاهده‌می‌شود، می‌توان گفت که مدل استرن با شدت زیادی مدل جرنی را تصحیح کرده است. از این‌رو مدل‌های به‌دست آمده‌ی 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 درنظر گرفته شده توسط استرن، باید کم‌تر باشد. بنابراین مدل‌های جدید برمبنای مدل‌های جرنی و استرن، مقادیر دقیق‌تری از فرایند جوشکاری انفجاری در فلزات آلومینیوم به مس را ارائه می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

چنان که مشاهده شد، اتصال فارسی‌بُر به‌دلیل ماهیت هندسی‌اش، شرایطی فراهم می‌آورد که می‌توان ضخامت ماده‌ی منفجره و صفحه‌ی پران متغیر را در یک مرحله‌ی انفجار ارزیابی‌کرد و معادلاتی‌را 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 فارسی‌بُر، مطابق انتظار، این اتصال باتوجه به محاسبات انجام‌شده ایجاد، و سپس با آزمایش‌های متعدد روی صفحات، استحکام مکان اتصال به‌صورت کمّی ارزیابی شد. سپس با نسبت دادن سرعت برخورد کمینه به مکان‌های فاقد اتصال، مدل‌های بارگذاری انفجاری ارزیابی و سپس مدل‌های جدید با اعمال ضرایب اصلاحی استخراج شدند.

به‌طورکلی پیشنهاد می‌شود برای تسلط بر فرایند جوشکاری انفجاری ــ به‌ویژه روکش‌کاری انفجاری ــ ابتدا با انجام محاسبات ارائه‌شده درخصوص بارگذاری انفجاری و تعیین ضخامت ماده‌ی منفجره و نیز سرعت برخورد، جوشکاری انفجاری در حالت فارسی‌بُر 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



Archive of SID
www.SID.ir

$d$: فاصله‌ی هوایی‌بین صفحات

$V_\circ$: سرعت گازهای تولیدی درون ماده‌ی منفجره

$E$: انرژی مخصوص جرنی

$V_C$: سرعت پیشروی‌نقطه‌ی جوش

$H_V$: سختی‌ویکرز

$V_D$: سرعت انفجار ماده‌ی منفجره

$K$: ضریب هدایت حرارتی

$V_P$: سرعت برخورد صفحه‌ی پران به صفحه‌ی پایه

$\ell e$: طول ماده‌ی منفجره در محفظه‌ی انفجار

$V_T$: سرعت انتقال حالت به مواج

$\ell f$: طول صفحه‌ی پران

$v_e$: حجم ماده‌ی منفجره

$M$: ممنتوم

$v_f$: حجم صفحه‌ی پران

$m_e$: جرم ماده‌ی منفجره

$W_e$: عرض ماده‌ی منفجره در محفظه‌ی انفجار

$m_f$: جرم فلز پران

$W_f$: عرض صفحه‌ی پران

$P$: فشار هوگونیوت

$X$: فاصله از ابتدای پخی

$R$: بارگذاری‌انفجاری

$Y$: فاصله از خط سرعت صفر در ماده‌ی منفجره

$R_e$: عدد رینولدز

$\rho_b$: چگالی‌فلز پایه

$t_e$: ضخامت ماده‌ی منفجره

$\rho_e$: چگالی‌ماده‌ی منفجره

$t_f$: ضخامت فلز پران

$\rho_f$: چگالی‌فلز 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, Bimetallic 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 Findikc, 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).




Archive of SID

www.SID.ir

۱۹. بیسادی، ح. و لیاقت، غ.ح. «شکل‌دهی همراه با جوشکاری تجربی صفحات فلزی به‌روش انفجار مواد منفجره»، *پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک* (۱۳۸۴).

۲۰. طباطبایی قمی، م. و لیاقت، غ.ح. «نشت‌گیری در مخازن دارای سیال به‌کمک 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 ۵۰۸۳/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 ـ فولاد کربنی» *پایان نامه 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).

Archive of SID



www.SID.ir