

ارائه یک مدل ریاضی در پیش‌بینی استحکام برشی اتصالات روکش‌شده انفجاری با استفاده از اتصال اسکارف فلزات آلومینیوم و مس به‌وسیله جوشکاری انفجاری

علی مهدی پور عمرانی^۲
مرکز فناوریهای نوین
دانشگاه صنعتی مالک اشتر

جمال زمانی^۱ و سیدمسعود باقری^۲
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۷/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۰/۰۷)

چکیده

در جوشکاری انفجاری، فشار بسیار زیاد در نقطه برخورد سبب کاهش لایه‌های ناخالصی سطحی شده و در نتیجه شرایط تماس فلز به فلز در فصل مشترک و اتصال متالورژیکی بین دوفلز غیرهم‌جنس ایجاد می‌شود. در این مقاله، ضمن معرفی اتصال اسکارف، جوشکاری انفجاری فلزات آلومینیوم و مس بر مبنای این نوع اتصال، در حالات مختلف بارگذاری انجام شده و استحکام برشی اتصالات اسکارف به‌وسیله روشی جدید ارزیابی می‌شود. رابطه بین استحکام برشی و بارگذاری انفجاری در نمونه‌های مختلف به‌وسیله مدل‌های غیرخطی و لگاریتمی به کمک روش رگرسیون و استفاده از جدول ANOVA ارائه می‌شود. کفایت مدل‌های مربوطه در آزمایش‌های روکش انفجاری ارزیابی شد. نتیجه آنکه، با انجام اتصال اسکارف در فلزات غیرهم‌جنس (با استفاده از روش محاسباتی که در این مقاله ارائه شده) می‌توان انواع بارگذاری انفجاری را در یک مرحله ارزیابی نمود و با ایجاد مدل مناسب، استحکام برشی قطعات روکش‌کاری شده انفجاری را تخمین زد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری انفجاری، اتصال اسکارف، استحکام برشی، پنجره جوشکاری

(Engineering Note)

Development of a Mathematical Model in Prediction of Shear Strength in Cladding Materials by Scarf Explosive Welding of Aluminium to Copper Plates

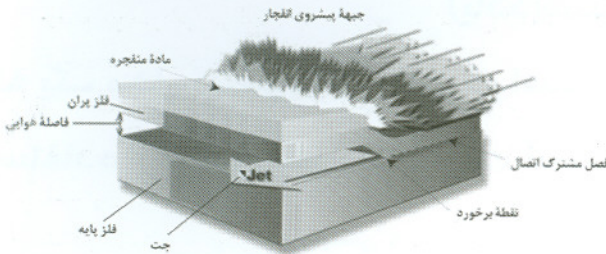
J. Zamani and S. M. Bagheri
Mechanical Engineering Dept.
K.N.Toosi Univ. of Tech.

A. Mehdipour Omrani
Innovative Technology Center
Malek-Ashtar Univ. of Tech.

ABSTRACT

In Explosive Welding (EXW) process, there is a situation in which high amount of pressure in collision point leads to decrease in impurity of superficial layers and metal gets in contact with another dissimilar metal and Metallurgical bond can be initiated at the interface. In this paper, in addition to introduction of scarf welding, explosive welding of aluminium to copper plate in different conditions of explosive loading performed and shear strength of bond was evaluated through new method. The Relationship between shear strength and explosive loading was demonstrated by establishment of non-linear and logarithmic models through regression method and ANOVA table. Adequacy of the developed models was verified in explosive cladding process. Consequently, explosive loading varieties can be evaluated in one experiment by production of scarf joint between dissimilar metals (according to the computational method employed in this paper) and with development of proper model, the shear strength of cladding metals can be estimated.

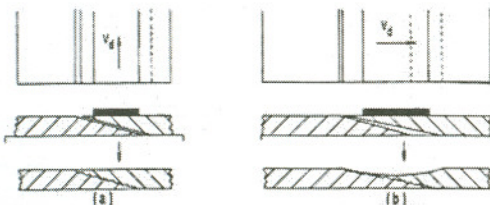
Keywords: Explosive Welding, Scarf Joint, Shear Strength, Welding Window



شکل (۱): هندسه فرآیند جوشکاری انفجاری و اجزای آن [۲].

مکانیزم فرآیند جوشکاری انفجاری، شامل مکانیک فشار بالا و جریانات سیالی است. این فرآیند زمانی اتفاق می‌افتد که فشار بسیار زیاد که به وسیله مواد منفجره ایجاد شده، باعث اتصال فلزات در سرعت و زاویه‌ای بحرانی می‌شود. زمانی که زاویه و سرعت به وسیله تمهیداتی در محدوده مشخصی قرار گیرند، سطوح نقطه برخورد به حالت سیال در می‌آیند و از گوشه انتهایی زاویه برخورد، پرتاب می‌شوند. این مکانیزم جریان سیال و پرتاب شدگی لایه‌های سطحی تحت عنوان پدیده جت، معروف است [۳].

جوش اسکارف، حالتی از قرارگیری قطعات است که در نهایت اتصال بین آنها، به صورت مورب ایجاد می‌شود. چیدمان اتصال اسکارف، مانند هندسه‌ای است که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): نمونه‌ای از چیدمان اتصال اسکارف، در این

حالت دو صفحه پخ دار شده و روی یکدیگر قرار

می‌گیرند [۴].

از کاربرهای مهم این روش اتصال می‌توان به اتصال هم‌راستای صفحات غیرهم‌جنس به یکدیگر در تجهیزات خاص مرتبط با صنایع نظامی و پتروشیمی اشاره داشت [۵]. کاربردهای دیگری از این نوع اتصال، در اتصال ورق‌های نازک به صفحات و نیز اتصال ورق‌هایی که بتوان

فهرست علائم

C_h	Cal/Kg K°	گرمای ویژه
d	m	فاصله هوایی
E		انرژی گرمی
E_Y	GPa	مدول یانگ
H_{vb}	ویکرز	سختی فلز پایه
H_{vf}	ویکرز	سختی فلز پُران
K	$\text{Cal/m s}^{-1} \text{C}^\circ$	ضریب هدایت حرارتی
l	m	طول صفحات
P		فشار هوگونیوت
R		نسبت بارگذاری
R_e		عدد رینولدز
t	m	ضخامت فلزات
t_{mp}	$^\circ\text{C}$	نقطه ذوب
U	m/s	سرعت انتشار صوت در فلزات
U		ضریب پواسون
V_c	m/s	سرعت پیشروی نقطه برخورد
V_D	m/s	سرعت انفجار ماده منفجره
V_p	m/s	سرعت برخورد صفحه پُران
V_T	m/s	سرعت انتقال
W	m	عرض صفحات
β	درجه	زاویه دینامیکی برخورد
ρ_b	Kg/m^3	دانسیته فلز پایه
ρ_f	Kg/m^3	دانسیته فلز پُران
σ_{UT}	MPa	استحکام تسلیم

۱- مقدمه

می‌توان بسیاری از فلزات و سازه‌های هم‌جنس را به وسیله روش‌های متداول به یکدیگر متصل نمود و این درحالی است که اتصال فلزات غیرهم‌جنس، برای دستیابی به ترکیبات بسیار کاربردی، موضوع تحقیق بسیاری از دانشمندان بوده است. اتصالات غیرهم‌جنس فلزات، پس از کشف و بکارگیری نیروی حاصل از انفجار مواد منفجره، روش جوشکاری انفجاری را پدید آورد [۱].

شکل ۱، مجموعه‌ای متداول از جوشکاری انفجاری را نشان می‌دهد که در این فرآیند یکی از اجزاء مجموعه، بنام صفحه پُران، با استفاده از نیروی ماده منفجره، با برخورد به صفحه پایه، باعث ایجاد اتصال می‌شود.

Archive of SID

۲- روش تحقیق

در این قسمت به شرح روش تحقیق پرداخته شده است.

۲-۱- انتخاب و تعیین فلزات مورد اتصال:

فلز پران از جنس آلومینیوم سری ۱۰۰۰ و فلز پایه از جنس مس خالص، به ابعاد $10 \times 10 \times 20$ میلیمتر (ضخامت \times عرض \times طول) با زوایای یخ خوردگی $7/5$ درجه، در اتصال اسکراف مورد جوشکاری انفجاری قرار گرفته است. آلومینیوم به دلیل نرم بودن و قابلیت ضد خوردگی در صنایع مختلف، مورد توجه است. مس نیز به دلیل هدایت حرارتی و الکتریکی بسیار بالا و داکتالیته مناسب، استفاده فراوانی دارد. خواص مکانیکی و فیزیکی این فلزات در جدول ۱ آورده شده است [۲۵].

جدول (۱): خواص مکانیکی و فیزیکی فلزات مورد اتصال.

Cu (C10200) (فلز پایه)	AL (1100) (فلز پران)	خواص مکانیکی فلزات
۸/۹۳	۲/۷	چگالی g/cm^3
۴۹۰۰	۶۴۰۰	سرعت صوت m/s
۱۷	۲۳/۶	انبساط حرارتی m/mc°
۱۰۸۵	۶۵۰	دمای ذوب C°
۹۱/۹۵	۲۱۵/۹۱	گرمای ویژه $Cal/Kg K^{\circ}$
۸۹/۸۰	۵۵/۴۱	هدایت حرارتی $Cal/m S^{\circ} C^{\circ}$
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

۳- محاسبات مربوط به فرآیند

در حالت کلی ساختار فرآیند جوشکاری انفجاری را می توان به صورت سه مرحله زیر در نظر گرفت [۳]: انفجار ماده منفجره، تغییر شکل و شتاب گیری صفحه پران یا اجزاء آن و در نهایت برخورد صفحات.

مهم ترین پارامترهای انجام فرآیند جوشکاری، نوع و خواص مکانیکی صفحه پران و پایه، جنس ماده منفجره،

زاویه یخ خوردگی در آنها را به صورت خم شدگی لبه ها ایجاد کرد، مشاهده شده است [۶-۷].

تحقیقات زیادی در خصوص جوشکاری انفجاری ارائه شده است: دسته ای تاثیر پارامترهای مختلف جوشکاری انفجاری (ضخامت ماده منفجره یا نسبت بارگذاری انفجاری^۱، فاصله هوایی^۲، ضخامت و جنس صفحات پایه و پران و سندان^۳، زاویه اولیه برخورد، نوع ماده منفجره، شرایط عملیات حرارتی^۴ و غیره) را بر روی خواص مختلف جوش تشکیل شده؛ هم از لحاظ مکانیکی (مقاومت کششی، مقاومت برشی، استحکام خمشی، استحکام پیچشی و شرایط خستگی، سختی سنجی میکرونی، مقاومت به خوردگی و غیره) و هم از لحاظ متالورژیکی (تشکیل فازهای اینترمتالیک و محلول های جامد، جهت کشیدگی دانه ها و غیره) و نیز از نظر هندسی (سطوح ایجاد شده صاف، موجی شکل و دامنه و ارتفاع آنها و غیره) مورد بررسی قرار داده اند [۸-۱۵].

دسته ای دیگر از تحقیقات و پژوهش ها، صرفاً به مطالعه موردی و کاربردی پرداخته می شود و امکان اتصال مناسب و قابل قبولی را در کاربرد ویژه ای، مورد ارزیابی قرار داده اند [۱۶]. محققین بسیاری نیز، سعی بر شبیه سازی آزمایشات و تحقیقات خود در این حوزه و تصدیق نمودن محاسبات و نتایج خود به وسیله نرم افزارهای اجزاء محدود، نموده اند [۱۷-۱۹].

در ایران تحقیقات بسیاری در خصوص جوشکاری انفجاری و دیگر فرایندهای انفجاری مانند شکل دهی انفجاری [۲۰] و نشست گیری در مخازن دارای سیال به کمک جوشکاری انفجاری صورت گرفته است که بسیاری از این فعالیت ها از کاربردی شده اند و همچنین کاربردهای جوشکاری انفجاری در اتصال لوله های غیرهم جنس موضوع مورد تحقیق برخی محققین ایرانی بوده است [۲۱ و ۲۴].

Archive of SID

۳-۲- حد اقل سرعت برخورد

بر اساس اطمینان از ایجاد انرژی جنبشی لازم برای تغییر شکل الاستیک-پلاستیک و ایجاد جت و اتصال، ویتمن و استیورز، رابطه برای جوشکاری فلزات غیرهم جنس با دانسیته مختلف به شکل زیر ارائه داده اند [۲۶]:

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

فشار، در هر کدام از فلزات با استفاده از رابطه فشار هوگونیوت به صورت زیر محاسبه می شود:

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

با بدست آوردن فشار بزرگتر، سرعت برخورد در فلز دیگر محاسبه می شود. مجموع این سرعت برخورد جدید و سرعت برخورد متناظر با فشار برخورد بزرگتر، در محاسبه سرعت برخورد حداقل، به صورت زیر استفاده می شود:

$$\begin{cases} P_1 < P_r \Rightarrow V_{P.new} = \frac{P_r}{U_1 \rho_1}, \\ P_r < P_1 \Rightarrow V_{P.new} = \frac{P_1}{U_r \rho_r}, \end{cases} \quad (5)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_1 < P_r \Rightarrow V_{P.Min} = V_{P.new} + \frac{1}{2} V_{P,r}, \\ P_r < P_1 \Rightarrow V_{P.Min} = V_{P.new} + \frac{1}{2} V_{P,1}. \end{cases}$$

در این روش، در فلز نرم از ایجاد فشار لازم در فصل مشترک برای تغییر شکل فلز سخت تر، اطمینان حاصل می شود. در نتیجه:

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

۳-۳- حداکثر سرعت برخورد

شرایط ایجاد فاز مذاب مبنای اولیه محاسبات محدودده بالای انرژی ضربه و نهایتاً سرعت برخورد حداکثر است. گرمای ایجاد شده، به دلیل محبوس شدن بخشی از جت، باعث ایجاد حرارت زودگذر می شود؛ که این حرارت فلز مذاب و یا بخشهایی از هر دو فلز پایه و پران، تحت تاثیر قرار می دهد و به دلیل نرخ بالای سرد شدن، ایجاد فازهای مختلفی و گاهاً تردد و شکننده را در برخی مواد ممکن می سازند. خاصیت های ترموفیزیکی فلزات در فصل مشترک برخورد، مانند هدایت حرارتی، دمای ذوب، گرمای

چگالی و سرعت انفجار آن، پارامترهای برخورد، نسبت بارگذاری ماده منفجره (جرم ماده منفجره به جرم فلز پران)، فاصله هوایی موجود بین صفحات، می باشد. تعیین و انتخاب بهینه مجموعه پارامترهای فوق، به شرایط مرزی فرآیند و پنجره جوشکاری، مربوط می شود. محاسبات فرآیند، شامل به دست آوردن مقادیر متغیرهای زیر است:

- سرعت انتقال^۱ از حالت صاف به موجی شکل و سرعت نقطه برخورد^۲،
- سرعت برخورد حداقل^۳ و حداکثر^۴،
- فاصله هوایی،
- پنجره جوشکاری^۵،
- نوع ماده منفجره و سرعت انفجار آن^۶ و
- بارگذاری انفجاری

۳-۱- سرعت انتقال حالت و سرعت نقطه برخورد

سرعت انتقال حالت نقطه برخورد، برای دستیابی به فصل مشترکی موجی شکل و قابل قبول از لحاظ خواص مکانیکی و متالورژیکی، با انتخاب عدد رینولدز برای اتصال آلومینیوم به مس که برابر با $Re = 13/1$ است، با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود [۲۶]:

$$V_T = \left\{ \frac{2 \times 10^6 \times 9/11 \times R_c \times (H_{vb} + H_{vf})}{\rho_b + \rho_f} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$\hookrightarrow V_T = 1765/24 \text{ m/s}$$

سرعت نقطه برخورد در این حالت برابر است با [۴]:

$$\begin{cases} V_C = V_T + 200 \Leftrightarrow V_T < 2000 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ V_C = V_T + 100 \Leftrightarrow 2000 \leq V_T \leq 2500 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ V_C = V_T + 50 \Leftrightarrow 2500 < V_T \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\hookrightarrow V_C = 1865/24 \text{ m/s}$$

- 1-Transition Velocity
- 2-Collision Point Velocity
- 3-Minimum Impact Velocity
- 4-Maximum Impact Velocity
- 5-Welding Window
- 6-Detonation Velocity

Archive of SID

۱- زاویه برخورد دینامیکی β جهت ایجاد جت و تشکیل امواج،

۲- سرعت پیشروی نقطه برخورد V_C جهت تشکیل امواج و نیز ایجاد جوش و

۳- انرژی جنبشی و فشار برخورد که متناسب با سرعت برخورد است.

می توان تمامی این پارامترها را در یک محور مختصات برحسب β - V_C مانند شکل (۳) ترسیم کرد [۴].

خط aa' :

مرز بحرانی β را برای تشکیل جت نشان می دهد. که با افزایش سرعت، جت تشکیل نمی شود. رابطه زیر برای ترسیم این مرز استفاده می شود [۲۴]:

$$\beta = 0.01 (V_c - 5500). \quad (8)$$

خط bb' :

این محدوده، حد بالای سرعت پیشروی نقطه برخورد است که بالاتر از آن مقدار، جوشی اتفاق نمی افتد و مقدار آن $1/2$ تا $1/5$ برابر سرعت صوت در فلزات است [۳]. با استفاده از اطلاعات جدول (۱) و در نظر گرفتن مقدار میانگین $1/35$ به عنوان ضریب افزایش سرعت صوت، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\text{آلومینیوم: } 1/35 \times 6400 = 1860 \text{ m/s}$$

$$\text{مس: } 1/35 \times 4900 = 6615 \text{ m/s}$$

خط cc' و dd' :

حداقل و حداکثر مقدار زاویه دینامیکی برخورد را نشان می دهد که پایین تر از مقدار حداقل و بالاتر از مقدار حداکثر زاویه دینامیکی برخورد، موجی تشکیل نمی شود. مقدار ۲ الی ۳ درجه برای حد پایینی و ۳۱ درجه برای حد بالایی، در نظر گرفته شده است [۳].

خط ee' :

باتوجه به محاسبات مربوط به سرعت انتقال، انتقال فصل مشترک از حالت صاف به موجی شکل، در اتصال آلومینیوم به مس در عدد $Re = 13/1$ ایجاد می شود [۲۶]. در این حالت سرعت انتقال برابر است با:

$$V_C = 1865/24 \text{ m/s}$$

ویژه فلزات پایه و پران، بر ایجاد این حالت حاکم است. این رابطه به وسیله ویتمن به صورت زیر بیان شده است [۲۶].

$$V_{P-Max} = \frac{(t_{mp} U_f)^{1/2}}{0.082 \times V_C} \left(\frac{K C_h U_f}{\rho t_f} \right)^{1/4}. \quad (6)$$

این سرعت به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V_{P_max_Al} = 65.0/51 \text{ m/s}$$

$$V_{P_max_Cu} = 465/0.7 \text{ m/s}$$

بنابراین، سرعت حداکثر با توجه به این دو سرعت و با در نظر گرفتن سرعت کمتر (در اینجا سرعت حداکثر مس) جهت حصول اطمینان از اتصال ایمن و تشکیل حداقل فازهای مذاب، در نظر گرفته می شود.

سرعت های برخورد حداقل و حداکثر در محاسبات مربوط به بارگذاری انفجاری و تعیین ضخامت ماده منفجره و هم چنین بدست آوردن مرزهای پنجره جوشکاری، مورد استفاده قرار می گیرد و می بایست به درستی تعیین شود.

۳-۴- تعیین فاصله هوایی

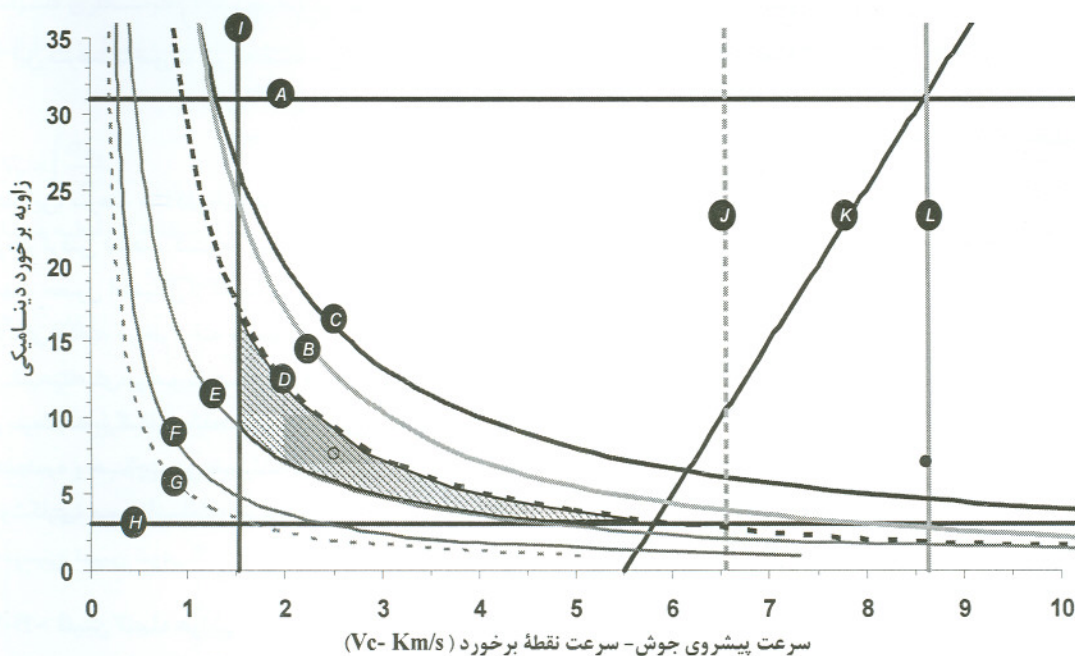
این فاصله بمنظور شتاب گیری فلز پران و دستیابی به سرعت برخورد و فشار مناسب، منظور می شود. در تعیین فاصله هوایی، از زاویه فاصله هوایی را به صورت مضربی از چگالی، به صورت زیر در نظر گرفت [۳]:

$$d = \begin{cases} \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \right) \times t & \delta < \rho \frac{gT}{cm^2}, \\ \left(\frac{1}{2} \sim 1 \right) \times t & \delta < \rho < 10 \frac{gT}{cm^2}, \\ \left(\frac{2}{3} \sim 2 \right) \times t & \rho < 10 \frac{gT}{cm^2}. \end{cases} \quad (7)$$

در این حالت، باتوجه به چگالی فلز پران (آلومینیوم) که $2/7 \text{ g/cm}^3$ می باشد، نصف ضخامت فلز پران (یعنی ۵ میلیمتر) در نظر گرفته شده است.

۳-۵- پنجره جوشکاری

این پنجره که محدوده جوش پذیری قابل قبول را ارائه می کند، به وسیله تعدادی مرز محدود شده است. پارامترهای بحرانی که می بایست جهت ایجاد پنجره جوشکاری در نظر گرفته شود عبارتند از [۳]:



شکل (۳): پنجره جوشکاری اتصال آلومینیوم به مس.

در محاسبه محدوده‌های فوق، ضریب تمیزی و صافی سطح، میانگین مقادیر یعنی ۰/۸ اتخاذ شده است. ۲- با استفاده از روابط هندسی انفجار و مقادیر محاسبه شده برای حداقل سرعت برخورد آلومینیوم به مس می‌توان نوشت [۴]:

$$V_{P_min} = 277/19 \text{ m/s}$$

$$\sin\left(\frac{\beta}{\gamma}\right) = \frac{V_P}{2V_D} \Rightarrow \sin\left(\frac{\beta}{\gamma}\right) = \frac{154/59}{V_D}$$

$$\Rightarrow \beta_{Rad} = \gamma \times \sin^{-1}\left(\frac{154/59}{V_D}\right)$$

نکته قابل توجه این است که با توجه به روابط هندسی جوش و چیدمان موازی، سرعت پیشروی نقطه جوش برابر سرعت انفجار ماده منفجره است، یعنی $V_D = V_C$ [۴].

خط 'gg':

این منحنی، حداکثر سرعت، انرژی و فشار صفحه پاران، را مشخص می‌کند. فراتر از آن، با افزایش انرژی ضربه، عیوبی

خط 'ff':

این منحنی معرف حداقل زاویه دینامیکی برخورد β برای تشکیل جوش است و با فرض این که با سرعتی کمتر از سرعت برخورد حداقل، اتصالی ایجاد نمی‌شود، این محدوده را می‌توان به دو طریق زیر محاسبه کرد:

۱- رابطه ویتمن و دریباس [۳]:

$$\sin(\beta) = K_1 \sqrt{\frac{H_V}{\rho V_C^2}} \quad (9)$$

که در این رابطه، H_V سختی فلز بر مبنای ویکرز و در واحد N/mm^2 . مقدار ثابت K_1 برای سطوح بسیار تمیز ۰/۶ و ۱/۲ در سطوح زبر و آلوده بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\beta_{min} = \frac{221/22}{V_C}$$

در آلومینیوم:

$$\beta_{min} = \frac{221/24}{V_C}$$

در مس:

Archive of SID

$$\sin\left(\frac{\beta}{\gamma}\right) = \frac{V_p}{2V_D} = \frac{371/31}{2650} \Rightarrow$$

$$\beta_{Rad} = 2 \times \sin^{-1}(371/31) \Rightarrow$$

$$\beta = 8/51^\circ, V_D = 2650 \frac{m}{s}$$

ملاحظه می‌شود که مکان نقطه آزمایش با توجه به ماده منفجره و سرعتش، درون محدوده و منطقه هاشور خورده، قرار می‌گیرد.

۳-۷- بارگذاری انفجاری

با توجه به تعریف بارگذاری (R) که عبارتست از نسبت جرم ماده منفجره به جرم صفحه پران، می‌توان ضخامت ماده منفجره را محاسبه کرد. یعنی:

$$R = \frac{m_e}{m_f} = \frac{\rho_e V_e}{\rho_f V_f} = \frac{.7 \times l_e \times W_e \times t_e}{2/7 \times l_f \times W_f \times t_f} = \frac{.7 \times t_e}{2/7 \times t_f} \quad (12)$$

همانگونه که در محاسبات دیده می‌شود مقادیر l و W، به دلیل ثابت بودن از معادلات حذف شده‌اند و بارگذاری انفجاری را می‌توان برحسب ضخامت‌های فلزات پایه و پران در نظر گرفت.

۴- طراحی آزمایشات

آزمایشات به منظور بررسی تغییرات بارگذاری و اثر آن بر استحکام برشی فصل مشترک اتصال، با ایجاد تغییرات در محفظه انفجار به منظور ایجاد بارگذاری متغیر انجام شد. نمودارهای بارگذاری انفجاری با توجه به رابطه (۱۲) در سراسر محدوده اتصال با در نظر گرفتن ضخامت ماده منفجره و ضخامت فلز پران ترسیم شد. مکانهای متفاوتی با در نظر گرفتن بارگذاری در آن مناطق انتخاب و نمونه‌هایی جدا شده و مورد ارزیابی برشی قرار گرفت. نمودارهای بارگذاری انفجاری به همراه مکانهای نمونه‌برداری در شکل ۴ نشان داده شده‌است.

نظیر تشکیل نواحی مذاب، پوسته شدن، و غیره در فصل مشترک رخ می‌دهد.

این محدوده را می‌توان به دو طریق زیر محاسبه نمود:
۱- رابطه تجربی در بیاس [۳]:

$$\sin\left(\frac{\beta}{\gamma}\right) = \frac{K_r}{t_f^{1/2} V_c^{1/2}} \quad (10)$$

$$K_r = \left[\frac{E_Y}{12 \times \rho \times (1 - \nu)} \right]^{1/2} \quad (11)$$

در آلومینیوم: $\sin\left(\frac{\beta}{\gamma}\right) = \frac{8.09}{V_c^{1/2}}$

در مس: $\sin\left(\frac{\beta}{\gamma}\right) = \frac{5784/\Delta Y}{V_c^{1/2}}$

۲- با توجه به V_f و V_D به راحتی می‌توان مقدار β را با توجه به چیدمان موازی یا زاویه‌ای بصورت زیر محاسبه نمود:

$$\beta_{Vp_max} = 465/0.7 \text{ m/s}$$

$$\sin\left(\frac{\beta}{\gamma}\right) = \frac{V_p}{2V_D} = \frac{371/13}{V_D} \Rightarrow$$

$$\beta_{Rad} = 2 \times \sin^{-1}\left(\frac{371/13}{V_D}\right)$$

در محاسبه این فرمول، میانگین سرعت‌های حداکثر و حداقل، به عنوان سرعت V_p قرار داده شد.

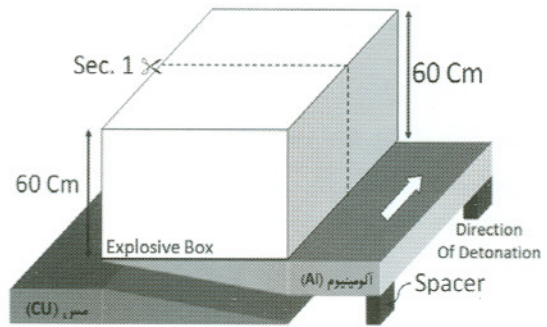
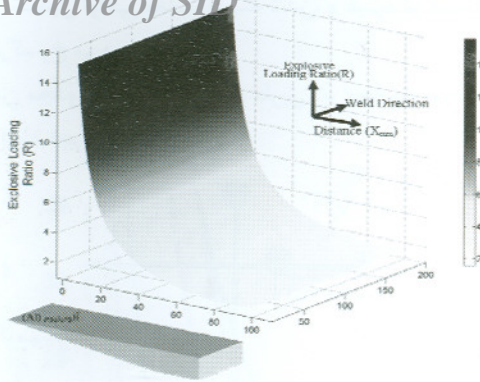
۳-۶- نوع ماده منفجره و سرعت انفجار

سرعت انفجار ماده منفجره باید از سرعت انتقال فصل مشترک به حالت موجی، بیشتر از حد بالای سرعت پیشروی نقطه اتصال، کمتر باشد [۳]. به عبارتی، سرعت انفجار ماده منفجره می‌بایست بین دو خط 'bb' و 'ee' در پنجره جوشکاری، قرار گیرد، یعنی:

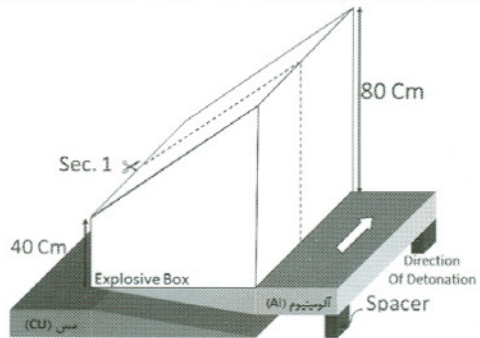
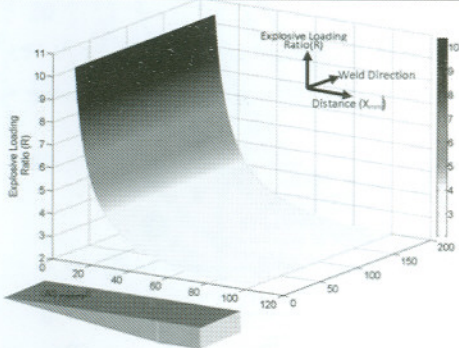
$$m/s \ 1260 < V_D < 6615 \ m/s$$

با توجه به آزمایشات برخی از محققین [۸-۶] و امکانات آزمایشگاهی، آنفو، (آمونیم نترات) ۶٪ گازوییل، که دارای سرعت انفجار 2650 m/s و چگالی 0.7 Kg/m^3 می‌باشد [۲۷]، بعنوان ماده منفجره انتخاب شد. صحت این انتخاب را می‌توان با محاسبه مورد تایید قرارداد. می‌توان با استفاده از روابط هندسی انفجار و انجام محاسبات ساده، زاویه دینامیکی برخورد را در این فرآیند، به دست آورد و اگر این نقطه درون پنجره جوشکاری واقع شد، به معنای آن است که نوع و سرعت ماده منفجره، مناسب می‌باشد.

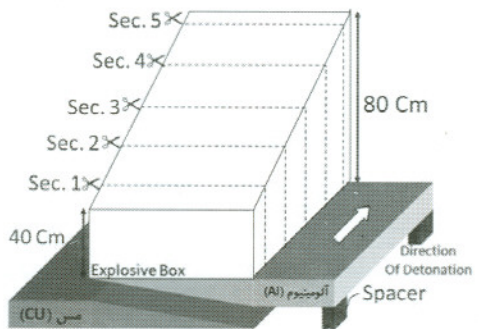
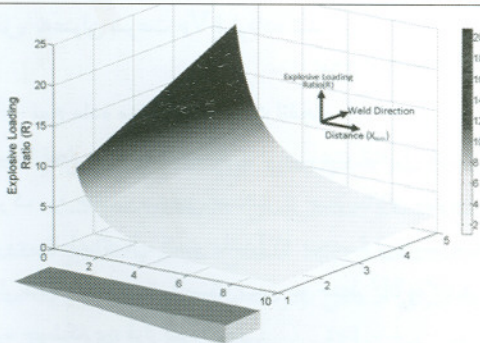
Archive of SID



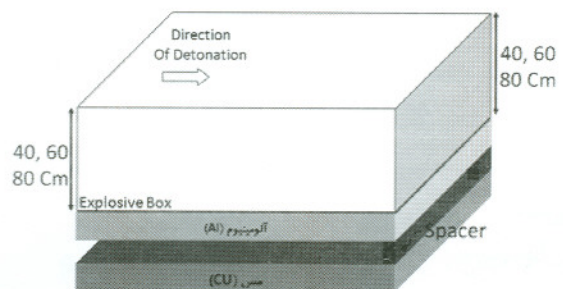
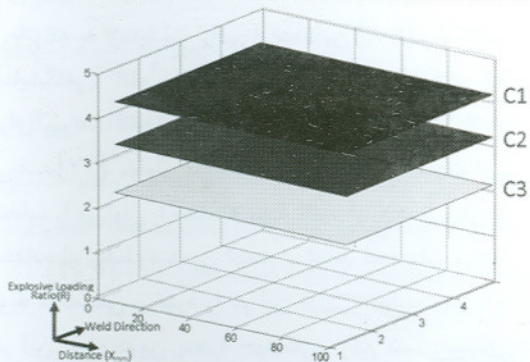
نمونه P



نمونه Q



نمونه R



نمونه C

Archive of SID

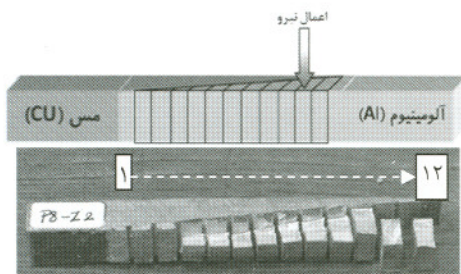
۵- انجام جوشکاری انفجاری

مراحل آماده سازی قطعات و چیدمان آنها به منظور انجام جوشکاری انفجاری و روکش کاری انفجاری، با پولیش و سمباده کاری سطوح برخورد و باند اتصال، به وسیله استفاده از سمباده‌های ۲۲۰، ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ انجام شد.

قطعات یونولیت به منظور ایجاد فاصله هوایی بین صفحات، در زیر صفحه پران (آلومینیوم) و بالای صفحه پایه (مس) قرار گرفت. برای فعال سازی انفو، که در دسته مواد منفجره کم‌سرعت قرار می‌گیرد، از خمیر C4، به عنوان خرج بوستر در جلوی محفظه ماده منفجره و چاشنی الکتریکی نمره ۶، استفاده شد. نمونه‌ای از چیدمان مورد استفاده در فرآیند جوشکاری انفجاری در شکل ۵ نشان داده شده است.

۶-۱- آزمایش برش

برای بررسی استحکام برشی قطعات، می‌بایست فصل مشترک اتصال، مورد تنش برشی قرار گیرد. باتوجه به ماهیت اتصال اسکارف، نحوه انجام آزمایشات برش در مناطق مشخص شده در شکل ۴، باتوجه به کدهای ASTM A263-A264 و استاندارد نظامی MIL-J24445 و استفاده از فیکسچری مناسب، تدوین شد. شکل ۶ نحوه انجام آزمایشات برش به همراه نمونه‌ای از آن را نشان می‌دهد. بدین ترتیب، تنش برشی خالص، با تقسیم نیروی اعمال شده در هر تکه بر سطح اعمال تنش، محاسبه شد.



شکل (۶): طرح‌واره آزمایش برش به همراه مکان بارگذاری.

۶-۲- نتایج حاصل از آزمایش برش

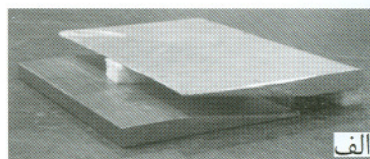
نتایج حاصل از انجام آزمایشات برش را می‌توان با در نظر گرفتن بارگذاری انفجاری و فاصله از ابتدای پخ‌خوردگی به صورت جدول ۲ در نظر گرفت.

همانگونه که از جدول ۲ برمی‌آید، بطور کلی می‌توان محدوده سطح اتصال را به سه منطقه تقسیم‌بندی کرد:

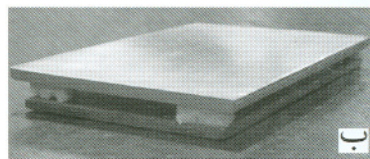
۱- ناحیه اول: جاییست که مقاومت اتصال و تکه‌های جدا شده آلومینیوم، دارای استحکام برشی نامی یعنی 64 MPa است. [۲۵].

۲- ناحیه دوم: مکانی است که در آن منطقه، تنش برشی از مقدار حداکثر آن که در ناحیه اول رخ می‌دهد، به تدریج همراه با شیب، به مقدار حداقلی که دارای تنش برشی صفر است و هیچگونه اتصالی وجود ندارد، تغییر می‌کند. این منطقه را می‌توان به ناحیه "استحکام متغیر" نامگذاری نمود و

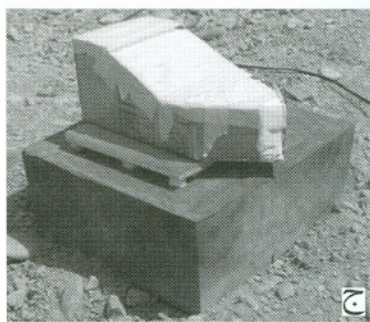
۳- ناحیه سوم: در این ناحیه، هیچ‌گونه اتصالی رخ نداده است و قطعات به صورت ظاهری به یکدیگر متصل



الف



ب



ج

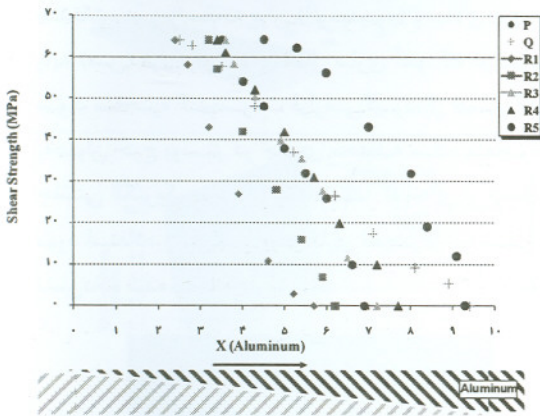
شکل (۵): الف: چیدمان جوشکاری اسکارف، ب: فرآیند روکش کاری انفجاری، ج: محفظه ماده منفجره.

۶- بحث و بررسی نتایج

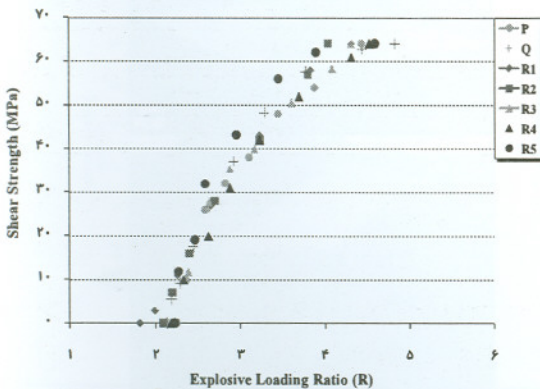
نتایج حاصل از آزمایشات باتوجه به حالات مختلف بارگذاری و شرایطی که انجام شده بر روی استحکام برشی، طبق موارد مطروحه در زیر مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفت.

Archive of SID

می‌توان استحکام برشی ناحیه دوم، یعنی ناحیه دارای استحکام برشی متغیر را برحسب فاصله از ابتدای پخ‌خوردگی فلز پران (یعنی جائیکه آلومینیوم به‌عنوان فلز پران دارای نوک تیز می‌باشد) براساس اطلاعات جدول ۲، مانند اشکال ۷-۸ ترسیم نمود.



شکل (۷): تغییرات تنش برشی برحسب ضخامت آلومینیوم.



شکل (۸): تغییرات تنش برشی برحسب بارگذاری انفجاری.

باتوجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود محدوده اتصال نمونه R5 بزرگتر است و این به دلیل ضخامت زیاد (۸۰ میلی‌متر) ماده منفجره امکان‌پذیر شده‌است. بعبارتی با افزایش ضخامت ماده منفجره، ضخامت بیشتری از آلومینیوم مورد جوش قرار می‌گیرد.

برعکس، مطلب فوق، با مشاهده منحنی R1، می‌توان دریافت که در این حالت بارگذاری، محدوده کمتری مورد اتصال قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان گفت

شده‌اند و حداقل تنش برشی را دارا هستند و با کوچک‌ترین ضربه و نیرویی، دو فلز از هم گسیخته می‌شوند.

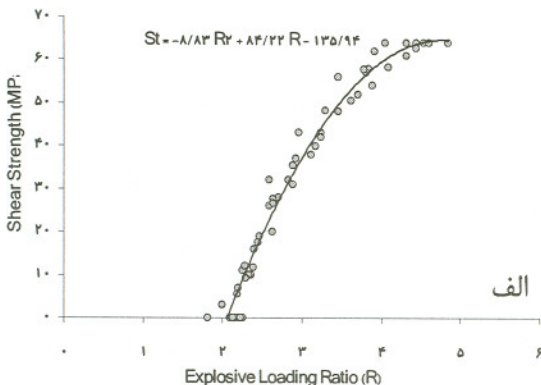
جدول (۲): نتایج حاصل از انجام آزمایشات برش بر روی قطعات اسکارف و روکش‌شده انفجاری شامل استحکام برشی، بارگذاری و فاصله از ابتدای پخ‌خوردگی فلز پران (آلومینیوم).

P_S1	S_t (MPa)	۶۴	۵۴	۴۸	۳۸	۳۲	۲۶	۱۰	۰		
	R	۴/۴۴	۳/۸۹	۳/۴۶	۳/۱۱	۲/۸۳	۲/۵۹	۲/۳۶	۲/۲۵		
	X(mm)	۳/۵	۴/۰	۴/۵	۵/۰	۵/۵	۶/۰	۶/۹	۱۰/۰		
Q_S2	S_t (MPa)	۶۴	۶۲/۷	۵۷/۷	۴۸/۲	۳۷/۱	۲۶/۶	۱۷/۵	۹/۲	۵/۵	۰
	R	۴/۸۴	۴/۴۴	۳/۷۹	۳/۳۰	۲/۹۲	۲/۶۴	۲/۴۵	۲/۲۹	۲/۱۹	۲/۱۳
	X(mm)	۲/۵	۲/۸	۳/۵	۴/۳	۵/۲	۶/۲	۷/۱	۸/۱	۸/۹	۹/۴
R_S1	S_t (MPa)	۶۴	۵۸	۴۳	۲۷	۱۱	۳	۰			
	R	۴/۳۳	۳/۸۴	۳/۲۴	۲/۶۶	۲/۲۵	۱/۹۹	۱/۸۲			
	X(mm)	۲/۴	۲/۷	۳/۲	۳/۹	۴/۶	۵/۲	۶/۷			
R_S2	S_t (MPa)	۶۴	۵۷	۴۲	۲۸	۱۶	۷	۰			
	R	۴/۰۵	۳/۸۱	۳/۲۴	۲/۷۰	۲/۴۰	۲/۲۰	۲/۰۹			
	X(mm)	۳/۲	۳/۴	۴/۰	۴/۸	۵/۴	۶/۹	۶/۲			
R_S3	S_t (MPa)	۶۴	۵۸/۳	۵۰/۵	۳۹/۹	۳۵/۵	۲۷/۷	۱۱/۷	۰		
	R	۴/۳۳	۴/۰۹	۳/۶۲	۳/۱۷	۲/۸۸	۲/۶۴	۲/۳۹	۲/۱۶		
	X(mm)	۳/۶	۳/۸	۴/۲	۴/۹	۵/۴	۵/۹	۶/۵	۷/۲		
R_S4	S_t (MPa)	۶۴	۶۱	۵۲	۴۲	۳۱	۲۰	۱۰	۰		
	R	۴/۵۴	۴/۳۲	۳/۷۰	۳/۲۴	۲/۸۸	۲/۶۳	۲/۳۳	۲/۱۹		
	X(mm)	۴/۰	۴/۲	۴/۹	۵/۶	۶/۳	۶/۹	۷/۸	۸/۳		
R_S5	S_t (MPa)	۶۴	۶۲	۵۶	۴۳	۳۲	۱۹	۱۲	۰		
	R	۴/۶۱	۳/۹۱	۳/۴۶	۲/۹۶	۲/۵۹	۲/۴۷	۲/۲۸	۲/۲۳		
	X(mm)	۴/۵	۵/۳	۶	۷	۸	۸/۴	۹/۱	۹/۳		

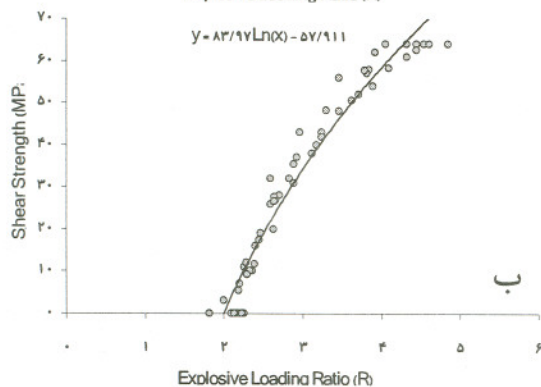
	S_t (MPa)			R
C40	۵	۰	۰	۲/۰۷
C60	۴۴	۴۵	۴۵	۳/۱۱
C80	۵۸	۵۸	۵۶	۴/۱۴

Archive of SID

صفحه پایه، است و می توان گفت این رابطه عملاً مستقل از ضخامت صفحه پران و ضخامت ماده منفجره است. به عبارتی دیگر برای دستیابی به استحکام برشی قابل قبول در جوشکاری انفجاری، می بایست به طور کلی بارگذاری مدنظر قرار گیرد و طراحی بر مبنای ضخامت ماده منفجره و صفحات به تنهایی کافی نیست.



الف



ب

شکل (۹): نمودار منحنی درجه دو (الف) و لگاریتمی (ب) منطبق بر رابطه تنش برشی-نسبت بارگذاری.

هدف از ارائه این مدلها، صرفاً ارائه رابطه ای بین تنش برشی تسلیم و نسبت بارگذاری اتصال نیست، بلکه می توان در فرآیند روکش انفجاری، استحکام برشی اتصال را در ضخامتهای مختلف ماده منفجره و فلزات پران، به وسیله ایجاد اتصال اسکارف، به دست آورد. این مهم ترین نتیجه استفاده از اتصال اسکارف و تعمیم آن در فرآیند روکش کاری انفجاری است. در این مقاله، این روش در روکش کردن انفجاری فلز آلومینیوم به مس، به کار برده شده است.

که با اعمال ضخامت کمتری از ماده منفجره (۴۰ میلیمتر) محدوده کمتری از فلز پران مورد اتصال قرار می گیرد.

باتوجه به بررسی بارگذاری انفجاری بر حسب تنش برشی و در نظر گرفتن نمودار شکل ۸، می توان اظهار داشت که مقدار مقاومت برشی اتصال اسکارف در مقاطع مختلف و ضخامتهای متفاوت فلز پران، با در نظر گرفتن نسبت بارگذاری انفجاری، روند مشخص و ثابتی دارد. می توان رابطه ای بر حسب بارگذاری انفجاری و استحکام برشی، در اتصال فلزات آلومینیوم و مس به یکدیگر، به وسیله رگرسیون خطی و یا غیرخطی، ارائه نمود و منحنی خطی^۱، درجه دو^۲، درجه سه^۳ یا لگاریتمی^۴، را بر این رابطه، باتوجه به آنالیز واریانس، برای بیان تنش برشی تسلیم نسبت به بارگذاری انفجاری، به دست آورد [۲۸]. شکل کلی معادله درجه دو و لگاریتمی را می توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2^2, \quad (13)$$

$$Y = b_1 \ln(X) + b_0. \quad (14)$$

جدول (۳): آنالیز واریانس مدل های خطی، درجه دو و سه.

F	R (CC) ⁵	b ₂	b ₁	b ₀	مدل
۹۳۶/۴	۰/۹۸۶	-۸/۸۳	۸۴/۲۲	-۱۳۵/۹۴	درجه دو
۸۸۳/۲	۰/۹۷۲	---	۸۳/۹۷	-۵۷/۹۱	لگاریتمی

با اعمال ضرایب فوق، معادلات بیان تنش تسلیم-نسبت بارگذاری به صورت زیر می باشد:

$$S_t = -135/94 + 84/22 \times R - 8/83 \times R^2, \quad (15)$$

$$S_t = 83/97 \times \ln(R) - 57/91. \quad (16)$$

در این مدلها، S_t، بر حسب مگاپاسکل و R عددی ثابت و بدون بُعد است.

می توان نمودارهای معادلات فوق را نیز به صورت شکل ۹، ترسیم نمود. نکته قابل ملاحظه در اینست که چون ضخامت فلز پران در تعریف بارگذاری نهفته است. بنابراین رابطه تنش برشی-نسبت بارگذاری، در کل، مربوط به اتصال فلز آلومینیوم به عنوان فلز پران، و مس به عنوان

Archive of SID

۷- نتیجه گیری

همانگونه که انتظار می‌رفت، براساس طراحی اولیه در راستای ایجاد اتصال بین صفحات آلومینیوم و مس در حالت اسکارف، این اتصال برطبق محاسبات مربوطه، به‌طور قابل قبول ایجاد شد. نحوه انجام محاسبات و استفاده از روابط مناسب و مرتبط و بخصوص تدوین پنجره جوشکاری در انجام آزمایشات، راهکاری مناسب جهت حصول اطمینان از انجام جوشی کامل را ارائه نمود.

کیفیت استحکام اتصال همراه با آزمایشات متعدد برش بر روی صفحات، به‌صورت کمیته ارزیابی شد و مدل ریاضی ایجادشده با استفاده از روش رگرسیون، شرایط بارگذاری انفجاری و اثر آن بر روی استحکام اتصال را به‌خوبی بیان نمود. صحنه‌گذاری مدل‌های مربوطه با خطای قابل قبول کمتر از ۱۰٪، توسط آزمایشات روکش کاری انفجاری، انجام شد.

نتیجه آنکه، با محاسبات ارائه شده و انجام اتصال اسکارف در فلزات موردنظر و تدوین مدل ریاضی مناسب در خصوص استحکام برشی اتصال نسبت به بارگذاری انفجاری، می‌توان استحکام برشی متناظر در ضخامت‌های مختلف ماده منفجره و صفحات پران را در فرآیند روکش کاری انفجاری، پیش‌بینی کرد. به‌کارگیری این روش از انجام آزمایشات متعدد و صرف هزینه‌های گزاف در فرآیند جوشکاری انفجاری جلوگیری می‌کند.

۸- تشکر و قدردانی

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از زحمات جناب آقایان مهندس عربی، مهندس نعیم و مهندس حسین‌پور، که در انجام آزمایشات نهایت همکاری را داشته‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

مراجع

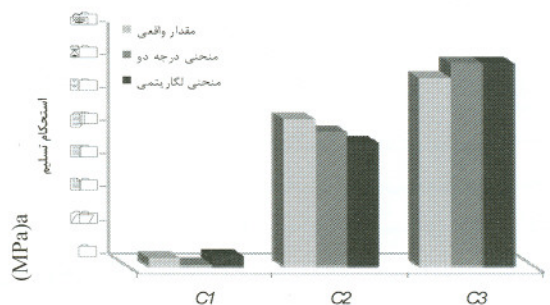
- Rinehart, J.S. and Pearson, J., "Explosive Working of Metals", The Macmillan Company, New York, 1963.
- Young, G.A. and Banker, J.G., "Explosion Welded, Bi-metallic Solution to Dissimilar Metal Joining", Texas Section of the Society of Naval Architect and Marine Engineers, The 13th Offshore Symp., USA, 2004.
- Crossland, B., "Explosive Welding of Metals and Its Application", Clarendon Press, Oxford, 1982.

محاسبات مربوط به استحکام تسلیم باتوجه به روابط (۱۵) و (۱۶) انجام شد و مقادیر محاسبه شده با مقادیر واقعی که از آزمایشات برش به‌دست‌آمده (جدول ۴)، مقایسه شده‌است و مقدار خطای حاصله، محاسبه شده‌است. این مقایسه در جدول ۴ آورده شده است.

جدول (۴): مقادیر محاسبه شده و واقعی استحکام برشی و درصد خطای حاصل از تخمین مدل‌های خطی و لگاریتمی در فرآیند روکش کاری انفجاری فلز آلومینیوم به مس.

شماره قطعه	مقدار محاسبه شده (MPa)		مقدار واقعی (MPa)	درصد خطا	
	منحنی دو درجه دو	منحنی لگاریتمی		منحنی دو درجه دو	منحنی لگاریتمی
C1	۰/۵۶	۳/۱۸	۲/۵	۷۷/۶٪	۲۷/۲٪
C2	۴۰/۵۸	۳۷/۳۶	۴۴/۵	-۸/۸۰٪	-۱۶/۰۴٪
C3	۶۱/۳۸	۶۱/۳۸	۵۷	۷/۶۸٪	۷/۶۸٪

ملاحظه می‌شود که روش فوق توانایی پیش‌بینی استحکام برشی اتصال فلزات را با دقت قابل قبولی دارا است. در خصوص مدل‌های ارائه شده هم باید گفت که دقت مدل دو درجه دو نسبت به مدل لگاریتمی در مقادیر بارگذاری متوسط، به‌خوبی جواب‌گو است و در مقادیر بارگذاری حداکثر، به‌طور یکسان رفتار می‌کنند، نهایتاً می‌توان اظهار داشت که مدل دو درجه دو بر شرایط آزمایشات تطابق بیشتری دارد. نتایج این جدول به‌صورت نمودار در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است



شکل ۱۰: نمودار نشان‌دهنده تسلیم در قطعات روکش شده.

Archive of SID

- Computation and Experiments", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 30, No. 1, 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*, Vol. 29, No. 1, pp.1-19, 2008.
 19. Mousavi, A.A.A. and Joodaki, G., "Explosive Welding Simulation of Multilayer Tubes", *Int. Conf. on Comp. Plasticity, Barcelona*, 2005.
 ۲۰. بیسادی، ح.، "شکل‌دهی همراه با جوشکاری تجربی صفحات فلزی به روش انفجار مواد منفجره"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۴.
 ۲۱. طباطبایی قمی، م.، "نشت‌گیری در مخازن دارای سیال به کمک جوشکاری انفجاری و کنترل متغیرهای فرایند"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۵.
 ۲۲. 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 پراثرژی، سال سوم، شماره ۲، ۱۳۸۷.
 ۲۳. زمانی، ا.، "مطالعه تجربی و تحلیلی جوشکاری انفجاری لوله‌های هم‌محور فولاد ضدزنگ-فولاد کربنی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.
 ۲۴. دهقان منشادی، س.ا.، "تدوین فرآیند جوشکاری انفجاری لوله‌های دوجداره فولاد و آلیاژ برنز"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
 25. ASM Int. Handbook Committee, "Properties and élection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials", New York, Vol. 2, 1992.
 26. Vaidyanathan, P.V. and Ramanathan, A., "Computer-aided Design of Explosive Welding Systems", *J. Materials Pro. Tech.*, Vol. 38, No. 2, pp. 501-516, 1993.
 27. Cooper, P.W., "Explosive Engineering", Wiley-VCH, New York, 1997.
 28. SPSS for windows Release 11.5.0, User Guide.
 4. Blazynski, T.Z., "Explosive Welding, Forming and Compaction", Applied Science Publisher, London & New York, 1983.
 5. Carter W.A. and Keathley W.C., "Method of Explosively Forming a Scarf Type Joint", United States Patent, 3197855, 1965.
 6. Laurence J.B., "Method of Making an Explosively Welded Scarf Joint", United States Patent, 3842485, 1974.
 7. Simon, W.E., "Method for Explosive Bonding of Metals", United States Patent, 3732612, 1973.
 8. Hokamoto, K., Izuma, T., and Fujita, M., "New Explosive Welding Technique to Weld Aluminium Alloy and Stainless Steel Plates, Using a Stainless Steel Intermediate Plate", *Metallurgical Transactions*, Vol. 24A, No. 10, pp. 2289-2297, 1993.
 9. Acarer M., Gulence, B., and Findik, F., "Investigation of Explosive Welding Parameters and Their Effects on Microhardness and Shear Strength", *Materials and Design*, Vol. 24, No. 1, pp. 659-664, 2003.
 10. Kahramana, N., Gulenc B., and Findikc, F., "Corrosion and Mechanical-microstructural Aspects of Dissimilar Joints of Ti-6Al-4V and Al Plates", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 34, No. 3, pp.1423-1432, 2007.
 11. Kahraman, N., Gulenc, B., and , Findik, F., "Joining of Titanium/Stainless Steel by Explosive Welding and Effect on Interface", *J. Materials Processing Tech.*, Vol. 169, No. 1, pp.127-133, 2005.
 12. 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", *Metallurgija*, Vol. 43, No. 1, pp.83-86, 2004.
 13. Raghukandan, K., "Analysis of the Explosive Cladding of Cu-low Carbon Steel Plates", *J. Materials Processing Tech.*, Vol. 139, No. 2, pp.573-577, 2003.
 14. Gerland, M., Presles, H.N., Guin, J.P., and Bertheau, D., "Explosive Cladding of a Thin Ni-film to an Aluminium Alloy", *Materials Science and Eng.*, Vol. A280, No. 2, pp. 311-319, 2000.
 - عربی، ح. و مهدی‌پور عمرانی، ع.، "تاثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی اتصال جوشکاری انفجاری برنج-فولاد، دومین کنگره ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، آذرماه ۱۳۸۶.
 16. Buchare, J., Rolc, S., and Hruby, V., "On the Explosive of a Ring to Axisymmetric Body", *J. Materials Processing Tech.*, Vol. 85, pp. 171-174, 1999.
 17. Grignon, F., Benson, D., Vecchio, K.S., and Meyers, M.A., "Explosive Welding of Aluminium to Aluminium: Analysis,