

اتصال گوه‌ای فلزات آلومینیوم و مس به وسیله جوشکاری انفجاری و بررسی فصل مشترک اتصال

جمال زمانی^۱ و سیدمسعود باقری^۲

علی مهدی پور عمرانی^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

مرکز فناوری‌های نوین

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۹/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۲/۳۱)

چکیده

می‌توان بسیاری از فلزات و سازه‌های همجنس را به وسیله روش‌های متداول به یکدیگر متصل نمود. این درحالی‌است که اتصال فلزات غیرهمجنس، برای دستیابی به ترکیبات بسیار کاربردی، موضوع تحقیق بسیاری از دانشمندان بوده است. در این مقاله، ضمن معرفی اتصال گوه‌ای، جوشکاری انفجاری فلزات آلومینیوم و مس صورت می‌گیرد و فصل مشترک اتصال از دیدگاه ماکروسکوپی و بررسی خواص مکانیکی به وسیله انجام آزمایش‌های کشش، برش خالص و میکروسختی سنجی، ارزیابی می‌شود. در اجرای آزمایش‌های برش، با بررسی بارگذاری انفجاری در نمونه‌ها، مدل‌هایی به روش رگرسیونی و تحلیل واریانس برای بیان استحکام برشی برحسب بارگذاری انفجاری ارائه می‌شود. مدل‌های مربوطه در آزمایش‌های روکش انفجاری تأیید می‌شود. در نتیجه، با ایجاد اتصال گوه‌ای در صفحات غیرهمجنس می‌توان شرایط فصل مشترک اتصال را در فلزاتی با ضخامتهای مختلف صفحات پُرآن و ماده منفجره در فرآیند روکش کاری انفجاری در یک مرحله ارزیابی کرد و مدل مناسبی برای ارزیابی استحکام برشی - نسبت بارگذاری اتصال ارائه نمود.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری انفجاری، اتصال گوه‌ای، ماکروسکوپی، استحکام برشی، میکروسختی سنجی.

Scarf Joining of Aluminium to Copper Plates by Explosive Welding Process and Investigation of Interface Properties

J. Zamani and S. M. Bagheri

Mech. Eng. Dept.
K.N.Toosi Univ. of Tech.

A. Mehdipour Omrani

Innovative Technology Center
Malek-Ashtar Univ. of Tech.

ABSTRACT

It is possible and practicable to make a joint in similar materials, whereas, bonding of dissimilar metals in order to achieve applicable components has been subjected to many investigations. The purpose of this study is to produce scarf joint through explosive welding process (EXW) between chamfered end of aluminium and copper plates. Macroscopic observations and mechanical properties of interface, such as bond shear strength and micro-hardness was carried out on the bond interface. Mathematical models were adopted for the interface properties of the scarf joint to make relationship between the bond shear strength and explosive loading ratio with regression method and variance analysis. These models verify in explosive cladding processes. Consequently, mathematical model which is based on scarf joints in dissimilar metals could predict bond properties of cladding metals under desired explosive loading and flyer plate thickness. This led to establishment of appropriate model to explain shear strength- Explosive loading ratio.

Keywords: Explosive Welding, Scarf Joint, Macroscopic, Micro-hardness

Archive of SID

۱- مقدمه

پرتاب شدگی لایه های سطحی تحت عنوان پدیده "جت"، شناخته می شود [۳].

در بخشی از تحقیقات انجام شده در خصوص جوشکاری، تاثیر پارامترهای مختلف جوشکاری انفجاری (ضخامت ماده منفجره یا نسبت بارگذاری انفجاری^۱، فاصله هوایی^۲، ضخامت و جنس صفحات پایه و پران و جنس سندان^۳، زاویه اولیه برخورد، ضخامت و جنس صفحه حائل^۴، نوع ماده منفجره، شرایط عملیات حرارتی و غیره) در خواص مختلف جوش؛ 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 بین فلزی^۵ و محلول های جامد، جهت کشیدگی دانه ها و غیره) و نیز از نظر هندسی (سطوح ایجاد شده صاف، موجی شکل و غیره) بررسی شده است [۴-۱۰].

در دسته ای دیگر از پژوهش ها، صرفاً به مطالعه موردی پرداخته شده است و امکان اتصال مناسب و قابل قبول بوسیله جوشکاری انفجاری، در کاربرد ویژه ای، ارزیابی شده است [۱۱-۱۲].

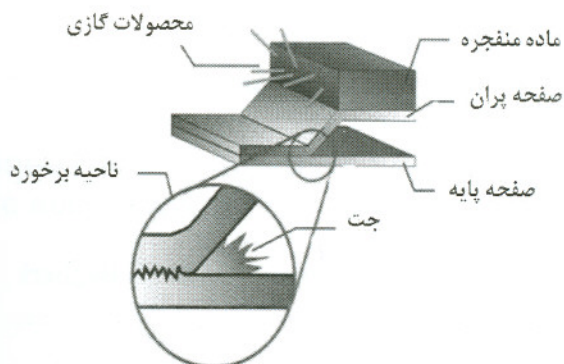
محققین بسیاری نیز آزمایشات عملی و تحقیقات خود در حوزه جوشکاری انفجاری را شبیه سازی نموده اند و محاسبات و نتایج را بوسیله نرم افزارهای اجزاء محدود، مورد ارزیابی قرار داده اند [۱۳-۱۴].

جوش گوه ای^۶، حالتی از قرارگیری قطعات است که در نهایت اتصال ایجاد شده بین آنها، بصورت مورب تشکیل می شود [۳]. روش اتصال، بوسیله هندسه ای که در شکل ۲ نشان داده شده است، ایجاد می شود.

در جوشکاری انفجاری، با کاهش لایه های سطحی ناخالصی ها، تماس متالورژیکی بین فلزات همجنس و غیرهمجنس ایجاد و فشار بسیار بالا در نقطه برخورد، شرایط تماس فصل مشترک بین صفحات را فراهم می کند.

اتصالات فلزات غیرهمجنس، پس از کشف و بکارگیری نیروی حاصل از انفجار مواد منفجره، جوشکاری انفجاری را پدید می آورد [۱].

شکل ۱، مجموعه ای متداول از انجام جوشکاری انفجاری را نشان می دهد که در این فرآیند یکی از اجزاء مجموعه، بنام صفحه پران با استفاده از نیروی ماده منفجره، با برخورد به صفحه پایه، باعث ایجاد جوش و اتصال می شود [۲].



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 می افتد که فشار بسیار زیاد حاصل از مواد منفجره، باعث اتصال صفحات در سرعت و زاویه دینامیکی برخورد مناسب گردد. زمانی که سرعت و زاویه دینامیکی برخورد بوسیله تمهیداتی در محدوده مشخصی قرار گیرد، منطقه برخورد به حالت سیال و خمیری تبدیل و از گوشه انتهای زاویه برخورد، پرتاب می شود. مکانیزم جریان سیال و

- 1-Loading Ratio
- 2-Stand off Distance
- 3-Anvil
- 4-Buffer
- 5-Intermetallic Phases
- 6-Scarf Joint

Archive of SID

با انجام فرآیند روکش کاری انفجاری در حالات متناظر، مورد تصدیق قرار می‌گیرد.

روش تحقیق

در حالت کلی ساختار فرآیند جوشکاری انفجاری را می‌توان بصورت سه مرحله زیر در نظر گرفت [۱]:

(۱) انفجار ماده منفجره،

(۲) تغییر شکل و شتاب گیری صفحه پران یا اجزاء آن و

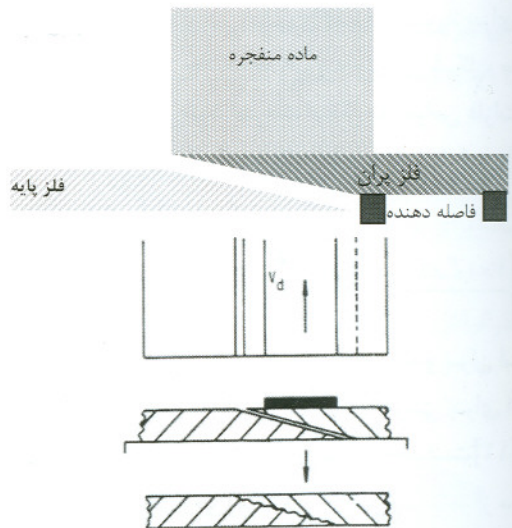
(۳) برخورد بین صفحات در مجموعه فوق.

مهمترین پارامترهای انجام فرآیند جوشکاری انفجاری، نوع و خواص مکانیکی صفحه پران و پایه، جنس، چگالی و سرعت انفجار ماده منفجره، نسبت بارگذاری ماده منفجره یا عبارتی نسبت جرم ماده منفجره به جرم فلز پران و فاصله هوایی بین صفحات است. تعیین و انتخاب بهینه کلیه عوامل ذکر شده باعث ایجاد جوشی قابل قبول از جنبه مکانیکی و متالورژیکی می‌شود.

انتخاب و تعیین فلزات مورد اتصال

در این تحقیق، قطعاتی از جنس آلومینیوم سری ۱۰۰۰ به قطعاتی از جنس مس خالص، در اتصال گوه‌ای مورد جوشکاری انفجاری قرار گرفته‌است. آلومینیوم بدلیل نرم بودن و قابلیت ضد خوردگی و مس نیز بدلیل هدایت حرارتی و الکتریکی بسیار بالا و قابلیت تغییر شکل مناسب، در صنایع مختلف، استفاده فراوانی دارد. خواص مکانیکی و فیزیکی این فلزات در جدول ۱ آورده شده است [۱۵].

آزمایشات با آماده سازی صفحاتی از جنس آلومینیوم و مس به ابعاد $۱۵۰ \times ۱۰۰ \times ۱۰$ میلیمتر (ضخامت \times عرض \times طول) با زوایای پخ خوردگی $۷/۵$ درجه، صورت گرفت.



شکل (۲): چیدمان اتصال گوه‌ای در جوشکاری انفجاری، در این حالت دو صفحه پخ دار روی یکدیگر قرار می‌گیرند.

مزیت کاربردی جوش گوه‌ای در اتصال لب به لب و همراستای صفحات غیرهمجنس است و از جنبه تحقیقاتی نیز می‌توان با انجام اتصال گوه‌ای بین صفحات غیرهمجنس، نتایج حاصله را در فرآیند روکش کاری انفجاری^۱، مانند آنچه که در این تحقیق بدان اشاره شده است، تعمیم داد.

در این مقاله ضمن معرفی اتصال گوه‌ای، با انتخاب فلزات پران و پایه برای انجام اتصال، محاسبات مربوط به نوع ماده منفجره و سرعت انفجار و فاصله هوایی بین صفحات، ارائه می‌شود و طراحی آزمایشات برای یافتن تاثیر بارگذاری انفجاری مطرح می‌گردد. در ادامه، پس از انجام جوشکاری انفجاری، بررسی ماکروسکوپی و نیز ارزیابی خواص مکانیکی فصل مشترک اتصال، بوسیله آزمایشات کشش و برش بر روی نمونه های دارای بارگذاری متفاوت، صورت می‌گیرد و مدل های رگرسیونی برای بیان استحکام برشی تسلیم-نسبت بارگذاری ارائه می‌شود. صحت مدل های ارائه شده علاوه بر جدول تحلیل واریانس،

Archive of SID

بخود می‌گیرد. سرعت پیشروی نقطه برخورد برای گذر فصل مشترک از حالت صاف به موجی شکل، سرعت انتقال نامیده می‌شود. سرعت انتقال به خواص فلزات مورد اتصال و عدد رینولدز^۲ بستگی دارد و توسط فرمول زیر محاسبه می‌گردد [۱۱]:

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

در این رابطه b و f ، مربوط به فلزات پایه و پران است و مقدار عدد رینولدز با آزمایشات تجربی برای اتصال آلومینیوم به مس $R_e = 13/1$ بدست آمده است [۱۱].

اگر سرعت پیشروی نقطه برخورد بیشتر از سرعت صوت در فلزات مورد اتصال باشد، موج شوک برگشتی به فصل مشترک اصابت کرده و باعث جدایش می‌شود. بنابراین سرعت پیشروی نقطه برخورد که در چیدمان موازی صفحات، برابر سرعت انفجار ماده منفجره است، می‌بایست از سرعت انتقال فصل مشترک به حالت موجی شکل، بیشتر و از حد بالای سرعت پیشروی نقطه اتصال که $1/2$ الی $1/5$ برابر سرعت صوت در فلزات است [۱۶]، کمتر باشد.

با استفاده از معادله (۲) و مشخصات جدول ۱ می‌توان سرعت انتقال را بصورت زیر بدست آورد:

$$V_T = 1765/24 \text{ m/s} \quad \text{سرعت انتقال:}$$

حد بالای سرعت پیشروی نقطه برخورد:

$$\begin{cases} 1/35 \times 6/4 = 8/64 \text{ km/s} & \text{آلومینیوم:} \\ 1/35 \times 4/9 = 6/615 \text{ km/s} & \text{مس:} \end{cases}$$

در این حالت، میانگین دو عدد $1/2$ و $1/5$ بعنوان ضریب سرعت صوت در فلزات در نظر گرفته شده است. بنابراین سرعت انفجار ماده منفجره (V_D) می‌بایست بین این دو سرعت قرار گیرد، یعنی:

$$1765 \text{ m/s} < V_D < 6615 \text{ m/s}$$

باتوجه به آزمایشات برخی از محققین [۵-۷] و امکانات آزمایشگاهی موجود، آنفو^۳، (آمونیم نترات) ۶٪ گازوییل،

جدول (۱): خواص مکانیکی و فیزیکی فلزات مورد اتصال در انجام جوشکاری انفجاری [۱۵].

Cu (C۱۰۲۰۰) (فلز پایه)	AL (۱۱۰۰) (فلز پران)	خواص مکانیکی فلزات
۸/۹۳	۲/۷	چگالی g/cm^3
۴۹۰۰	۶۴۰۰	سرعت صوت m/s
۱۷	۲۳/۶	انبساط حرارتی $10^{-6} m/mc^0$
۱۰۸۵	۶۵۰	دمای ذوب C^0
۹۱/۹۵	۲۱۵/۹۱	گرمای ویژه $Cal/Kg K^0$
۸۹/۸۰	۵۵/۴۱	هدایت حرارتی $Cal/m S^{-1} C^0$
۱۱۵	۶۹	مدول یانگ GPa
۰/۳۴۰	۰/۳۳۴	ضریب پواسون
۹۴	۴۷	سختی ویکرز H_v
۲۷۵	۱۱۰	مقاومت کششی MPa
۲۲۰	۱۰۵	استحکام تسلیم MPa
۱۳۲	۶۹	مقاومت برشی MPa

۱-۱- تعیین فاصله هوایی

فاصله هوایی، بمنظور شتاب گیری فلز پران و دستیابی به سرعت برخورد و فشار مناسب، در نظر گرفته می‌شود.

ازرا^۱، فاصله هوایی را مضرپی از ضخامت صفحه پران در چگالیهای مختلف بصورت زیر در نظر گرفته است [۱]:

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

در این رابطه d ، فاصله هوایی بین صفحات پایه و پران می‌باشد. باتوجه به چگالی فلز پران (آلومینیوم) که $2/7 \frac{g}{cm^3}$ است، فاصله هوایی، نصف ضخامت فلز پران (یعنی ۵ میلیمتر) اعمال شده است.

۱-۲- نوع ماده منفجره و سرعت انفجار

فصل مشترک صاف و هموار در سرعت پیشروی پایین نقطه برخورد اتفاق می‌افتد و این در حالیکه در سرعت های بیشتر، فصل مشترک، حالتی موجی شکل

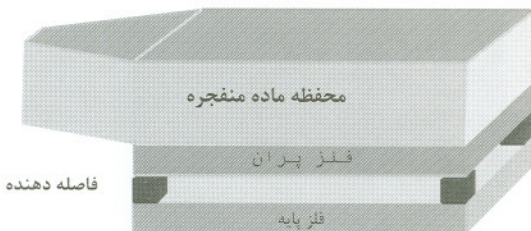
Archive of SID

سازی آنفو، که در دسته مواد منفجره کم سرعت محسوب می‌شود، از خمیر C4، بعنوان خرج بوستر در جلوی محفظه ماده منفجره و چاشنی الکتریکی نمره ۶، استفاده شد. چیدمان اجزای جوشکاری در شکل ۴ نشان داده شده‌است.



شکل (۴): چیدمان قطعات در انجام جوشکاری انفجاری.

دو آزمایش دیگر نیز طبق طراحی آزمایشات، به صورت فرآیند روکش انفجاری انجام شد. در این حالت صفحه آلومینیوم بعنوان فلز پران بر روی صفحه مسی بعنوان فلز پایه، قرار گرفت و ماده منفجره درون محفظه متناسب با ابعاد صفحات (شکل ۵) بر روی فلز پران قرار گرفت.

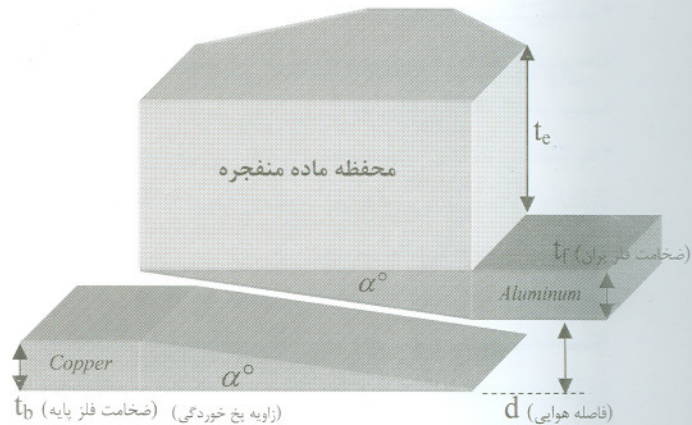


شکل (۵): چیدمان انجام فرآیند روکش کردن انفجاری.

که دارای سرعت انفجار 2500 m/s و چگالی 700 kg/m^3 است [۱۷]، بعنوان ماده منفجره انتخاب شد.

۳-۱- طراحی آزمایشات و انجام جوشکاری

آزمایشات برای بررسی تغییرات بارگذاری در صفحات از جنس آلومینیوم و مس به ابعاد $150 \times 100 \times 10$ میلیمتر، با در نظر گرفتن شکل ۳، با مشخصات جدول ۲ انجام شد.



شکل (۳): چیدمان انجام جوشکاری انفجاری گوه‌ای.

جدول (۲): طراحی آزمایشات مربوط به اتصال گوه‌ای و روکش انفجاری.

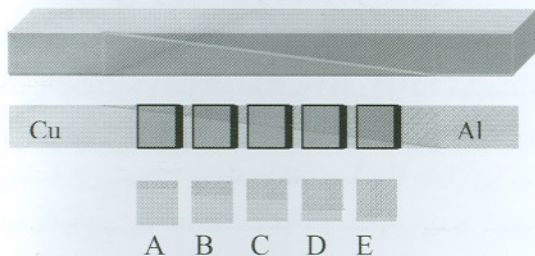
شماره قطعه	α° درجه	میلیمتر (mm)		
		t_e	$d = \sqrt{2} t_f$	t_b
P1	۷/۵	۶۰	۵	۱۰
P2	۷/۵	۸۰	۵	۱۰
C1	.	۶۰	۵	۱۰
C2	.	۸۰	۵	۱۰

۴-۱- انجام جوشکاری انفجاری

مراحل آماده سازی قطعات و چیدمان آنها بمنظور انجام آزمایش، با سمباده کاری سطوح برخورد و سطح اتصال، بوسیله سمباده های ۲۲۰، ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱،۲۰۰، انجام گرفت. فاصله هوایی بین فلزات، با استفاده از قطعات یونولیت به ضخامت ۵ میلیمتر، که در زیر صفحه پران و بالای صفحه پایه، قرار داده شدند، ایجاد گردید. برای فعال

Archive of SID

مشاهدات ماکروسکوپی در نمونه ها با بزرگنمایی ۲۰ برابر، در شکل ۷ آورده شده است.



شکل (۶): مکان شماتیک تکه های تهیه شده برای بررسی های ماکروسکوپی.

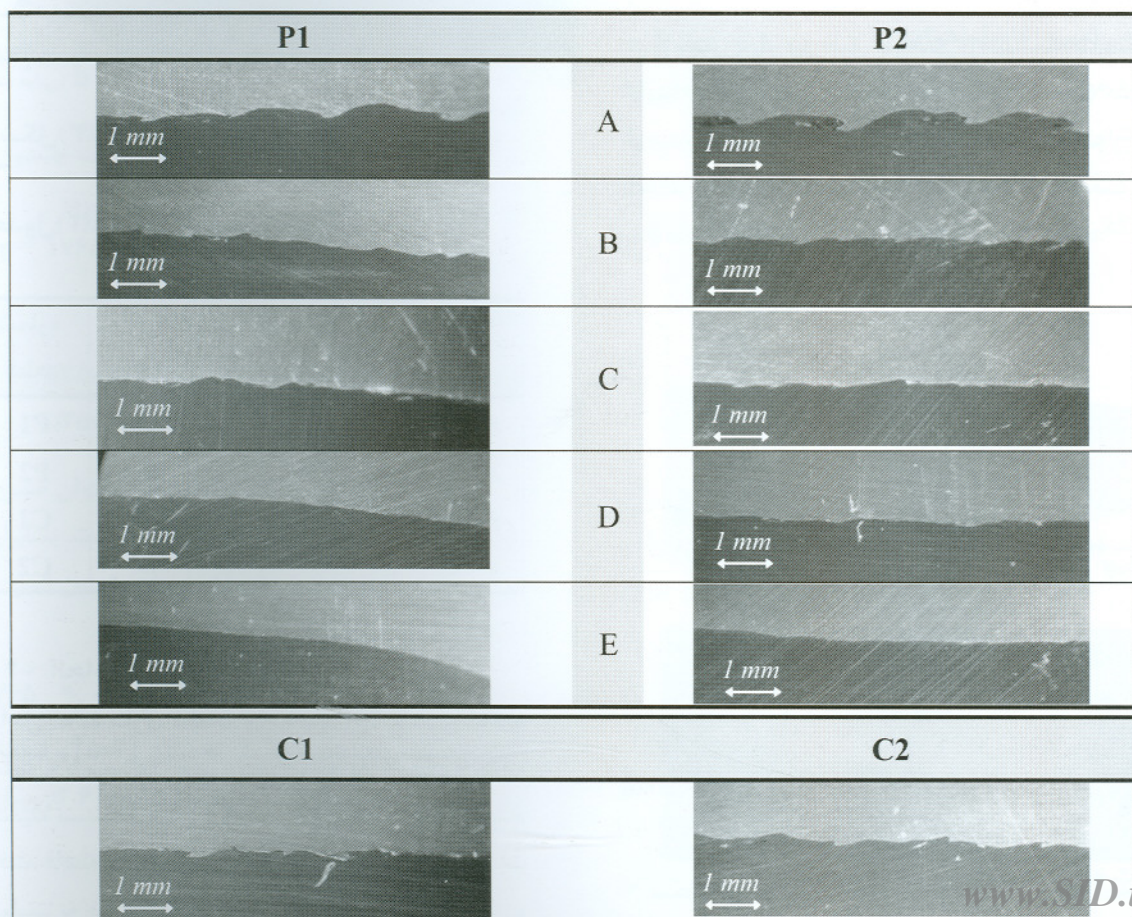
۲- بحث و بررسی نتایج

بر اساس برنامه ریزی انجام شده، مقرر گردید نتایج حاصل از آزمایشات در چند حالت متفاوت طبق موارد مطروحه در زیر، مورد بررسی دقیقتر قرار گیرند.

۱-۲- مشاهدات ماکروسکوپی

اصول کار بدین ترتیب است که ابتدا تسمه هایی از ناحیه وسط قطعات جوش شده، بریده شده و هر کدام در باند اتصال، به پنج تکه مساوی (A,B,C,D,E) تقسیم شده است (شکل ۶).

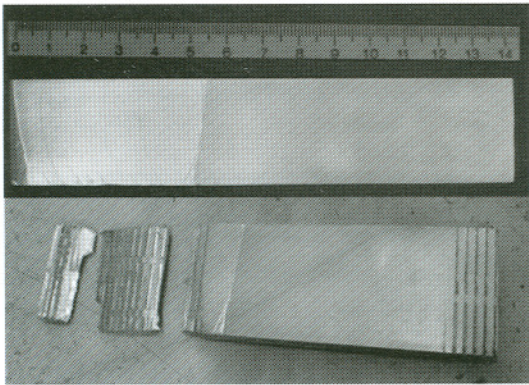
سمباده کاری و پرداختاری، با استفاده از سمباده های ۱۵۰، ۲۲۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۲۰۰۰، و پودرهای مخصوص پرداخت تا مقدار ۰/۳ میکرون، بر روی تمامی قطعات، انجام شد. پس از پرداخت نهایی نمونه ها، مشاهدات ماکروسکوپی بر روی آنها صورت گرفت.



شکل (۷): تصاویر ماکروسکوپی نمونه های مختلف اتصال (با بزرگنمایی ۲۰×)

Archive of SID

(شکل ۸)، بریده شد و بوسیله دستگاه آزمایش کشش، مورد ارزیابی قرار گرفت. بدلیل پارگی از قسمت آلومینیوم، آزمایش کشش در دو مرحله انجام شد.



شکل (۸): نمونه بریده شده برای انجام آزمایش کشش و قطعه نهایی پس از آزمایش کشش.

نتیجه آزمایش کشش در هر دو قطعه حاکی از آن بود که انجام این آزمایش در اتصال گوه‌ای آلومینیوم به مس چندان موفقیت آمیز نمی‌باشد و بدلیل ایجاد پارگی و جدایش در فلز پایه آلومینیوم، انجام آزمایش کشش در ارزیابی این اتصال، کارآمد نیست.

۲-۳- آزمایش برش

طراحی آزمایش برش، با توجه به دستورالعمل مرتبط با آزمایش برش در کدهای ASTM A263-A264 و استاندارد نظامی MIL-J24445، صورت گرفت.

در آزمایش برش، قطعات جوشکاری شده، در قسمت آلومینیوم به تکه هایی تقسیم شده و بارگذاری بر روی هر تکه آلومینیوم برش خورده، اعمال شد. نهایتاً مقدار تنش و استحکام برشی خالص اتصال، با تقسیم نیرو بر سطح اعمال تنش در فصل مشترک اتصال آلومینیوم به مس بدست آمد. شکل ۹ نحوه انجام آزمایش برش به همراه بردار نیروی اعمال شده بر تکه ها را نشان می‌دهد. قطعات جوشکاری شده پس از انجام آزمایش برش در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۲-۱-۱- بحث بر روی نتایج حاصل از مشاهدات ماکروسکوپی

■ با بارگذاری بیش از حد و یا ضخامت کم فلز پُران، سطح مشترک، دچار تلاطم و امواج دارای قله‌ها و دره‌های عمیق می‌شود. این حالتها را می‌توان در تکه های "A" مشاهده نمود.

■ مقایسه نمونه های P1 و P2 نشان می‌دهد که به دلیل بارگذاری بیشتر، شکل امواج در نمونه P2 نسبت به P1، ناهموارتر و دارای دره‌های عمیق تر و اعوجاج بیشتر است. ■ به دلیل نسبت بارگذاری بیشتر P1 نسبت به P2، روند ناهمواریها در P2 از موقعیت A تا E، با شیب بیشتری نسبت به P1 کاهش می‌یابد.

■ در مناطقی که فلز آلومینیوم ضخیم تر می‌شود و نسبت بارگذاری کاهش می‌یابد (تکه های D و E)، احتمال جدایش و گسیختگی افزایش می‌یابد.

■ فصل مشترک اتصال در قطعه C1 مشابه تکه "C" از قطعه P1 و نمونه C2 مشابه تکه "C" از قطعه P2 است و این مشاهده را می‌توان به بارگذاری مشابه به قطعات فوق نسبت داد.

باتوجه به موارد ذکر شده در مشاهدات ماکروسکوپی، می‌توان به این نتیجه دست یافت که اتصال گوه‌ای بخوبی می‌تواند شرایط ماکروسکوپی فصل مشترک اتصال را در فرآیند روکش کاری صفحات، با بارگذاری متناظر را نشان دهد. بعبارتی، ناهمواریهای ایجاد شده در سطح مقطع قطعات گوه‌ای شکل، مشابه سطح مقطع صفحات روکش کاری شده در ضخامت و نسبت بارگذاری مربوطه است.

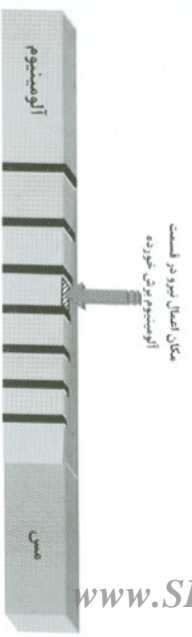
۲-۲- آزمایش کشش

آزمایش کشش، یکی از آزمایشهای مخربی است که بطور وسیع بمنظور ارزیابی خواص مکانیکی مواد و اتصالات، به کار می‌رود. با انجام این آزمایش می‌توان استحکام کششی عمود بر فصل مشترک جوش، استحکام تسلیم و مدول الاستیسیته اتصالات را استخراج نمود.

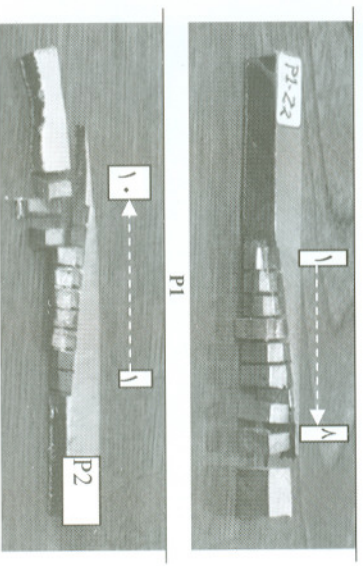
در اتصال گوه‌ای جهت حصول اطمینان از جوش انجام شده بوسیله آزمایش کشش، تسمه ای از قطعه جوش شده در جهت عمود بر راستای پیشروی جوش،

جدول (۳): استحکام برشی در نمونه های اتصال گوه ای و روکش کاری انفجاری.

شماره تکه ها	استحکام برشی قطعات (MPa)		
	P1	P2	C1
۱	۶۴	۶۴	۴۴
۲	۶۴	۶۴	۴۵
۳	۵۴	۶۴	۴۵
۴	۳۸	۶۴	۴۴
۵	۲۶	۶۴	۴۴
۶	۱۰	۵۶	
۷	ع	۴۷	
۸	ع	۳۲	
۹	ع	۱۹	
۱۰	ع	۱۲	



شکل (۹): نحوه انجام آزمایش برش (مکان بارگذاری بر روی تکه های آلومینیوم برش خورده).

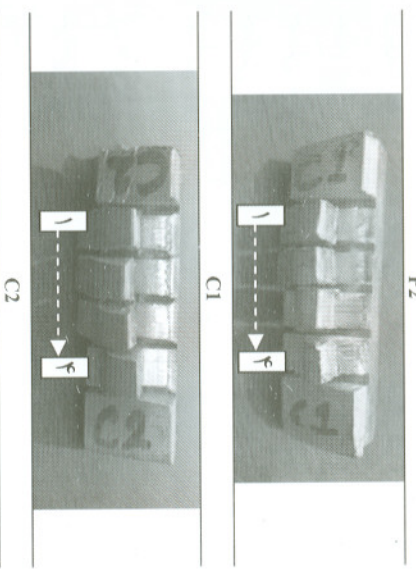


۳-۲- بحث بر روی نتایج آزمایشات برش
مشاهدات و نتایج آزمایشات برش، را می توان از دو دیدگاه مورد تحلیل قرار داد:

- طبقه بندی محدوده اتصال از لحاظ استحکام برشی.
- ارزیابی بارگذاری انفجاری و اثر آن بر روی استحکام برشی محدوده اتصال یافته.

بطور کلی، همانگونه که از جدول ۳ برمی آید، می توان فصل مشترک اتصال را به سه ناحیه تقسیم بندی کرد: **ناحیه اول:** منطقه ایست که مقاومت اتصال و تکه های جدا شده، همگی دارای استحکام برشی ۶۴MPa می باشند. این مقدار، برابر با استحکام برشی آلومینیوم است و با آنچه که از استاندارد [۱۵] بدست آمده و در جدول ۱ نشان داده شده است، تفاوت دارد. در این منطقه، استحکام برشی اتصال، از مقاومت برشی فلز ضعیف تر (آلومینیوم)، بیشتر است و برش در آلومینیوم و نه در فصل مشترک اتصال رخ داده است.

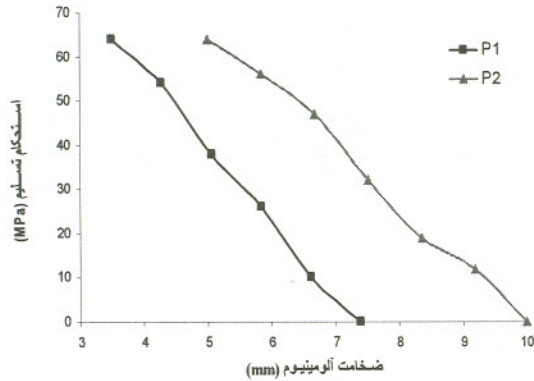
ناحیه دوم: محدوده ایست که در آن استحکام برشی اتصال از مقدار حداکثر آن که در ناحیه اول رخ می دهد، بتدریج به مقدار حداقلی که دارای استحکام برشی همفر است و هیچگونه اتصالی ندارد، تغییر می کند. این منطقه را می توان ناحیه "استحکام متغیر" نامگذاری نمود و **ناحیه سوم:** در این ناحیه فصل مشترک، هیچگونه اتصالی رخ نداده است و صفحات به یکدیگر بجزورت ظاهری چسبیده اند و این منطقه دارای حداقل مقاومت برشی است و با کوچکترین ضربه و نیرویی، دو فلز از هم



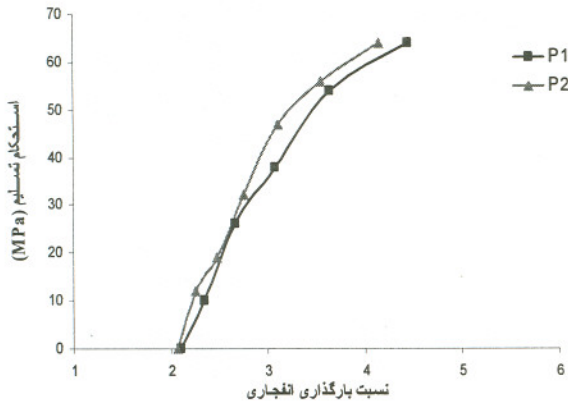
شکل (۱۰): نمونه های C1, C2, P1, P2 پس از انجام آزمایش برش.

۳-۲-۱- نتایج حاصل از آزمایش برش
نتایج حاصل از انجام آزمایش برش در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول "ع" بمعنای جدایش کامل تکه ها، بدون اعمال نیرو است. وضعیت استحکام ۶۴ MPa به معنای این است که برش در آلومینیوم ایجاد شده است و در فصل مشترک اتصال، جدایشی رخ نداده است و شماره قطعات نشان دهنده تکه های جدا شده برای انجام برش است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

Archive of SID



شکل (۱۲): تغییرات استحکام برشی بر حسب ضخامت آلومینیوم پخ خورده در محدوده اتصال.



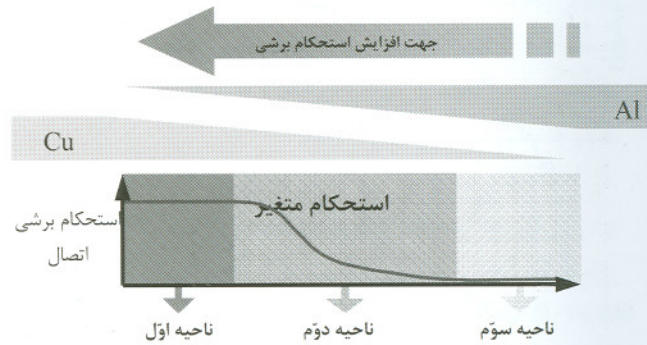
شکل (۱۳): نمودار تغییرات استحکام برشی بر حسب نسبت بارگذاری انفجاری.

جدول (۴): محدوده های متصل شده و نشده در اتصالات گوه‌ای.

شماره قطعه	محدوده متصل شده (mm)		محدوده متصل نشده (mm)
	ناحیه اول	ناحیه دوم	ناحیه سوم
P1	۲۶/۵۸	۲۶/۶۲	۱۹/۷۴
P2	۳۷/۹۷	۳۷/۹۷	.

با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود که نمونه P2، دارای محدوده استحکام برشی بزرگتری است. بعبارتی دیگر، در نمونه P2، بدلیل ضخامت بیشتر (۸۰ میلیمتر) ماده منفجره نسبت به نمونه P1 (۶۰ میلیمتر)، مجموع اندازه نواحی دوم و سوم و در نتیجه محدوده اتصال در این نمونه

گسیخته می‌شوند. این نواحی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل (۱۱): جهت افزایش استحکام برشی و نواحی سه گانه مربوط به استحکام.

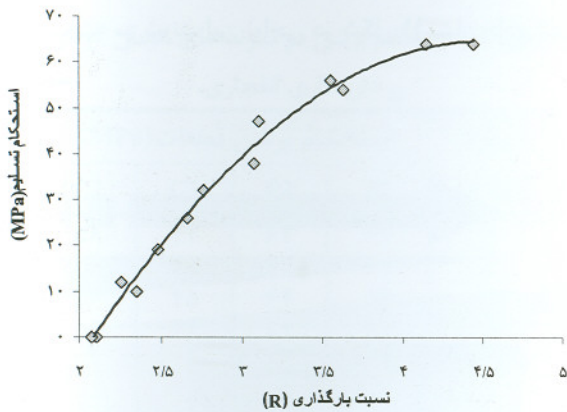
می‌توان منحنی های استحکام برشی تسلیم، بر حسب ضخامت آلومینیوم، یعنی مکانی که آلومینیوم بعنوان فلز پران دارای نوک تیز می‌باشد را برای قطعات مختلف در ناحیه دوم، مانند نمودار شکل ۱۲ ترسیم نمود.

با مشاهده منحنی P1 در شکل ۱۲، می‌توان دریافت که در این حالت بارگذاری، محدوده کمتری مورد اتصال قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان گفت که با اعمال ضخامت کمتری از ماده منفجره (۶۰ میلیمتر)، محدوده کمتری از فلز پران را می‌توان مورد اتصال قرار داد.

نتایج مهم دیگر باتوجه به بررسی بارگذاری انفجاری بر حسب استحکام برشی بدست می‌آید. باتوجه به تعریف بارگذاری انفجاری که برابر است با جرم ماده منفجره بر جرم فلز پران و در نظر گرفتن چگالی ماده منفجره، می‌توان بارگذاری را بصورت المانی در تکه های مختلف صفحه، پران در نظر گرفت و باتوجه به اعداد جدول ۳، میزان استحکام برشی بدست آمده را به مکانهای مختلف نسبت داد و نمودارهای استحکام برشی -نسبت بارگذاری را مانند شکل ۱۳ ترسیم نمود.

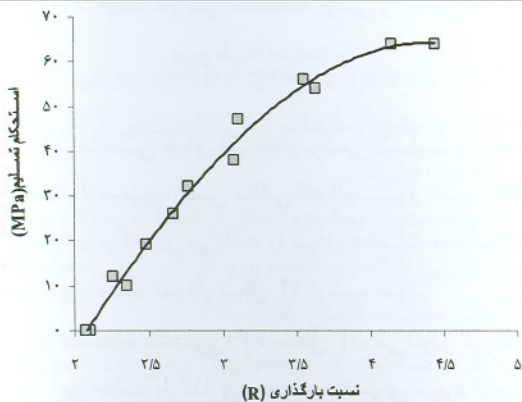
نمودار شکل های ۱۳-۱۲ براساس اطلاعات جدول ۳ و اندازه گیری ضخامت فلز آلومینیوم و محاسبه نسبت بارگذاری بدست آمده است. اطلاعات نمودار فوق در جدول ۴ بصورت مشخص تر، محدوده های اتصالی و نواحی مختلف را نشان می‌دهد.

Archive of SID



ب: مدل درجه دو

$$St = -10/91 \times R^2 + 98/60 \times R - 158/05$$



ج: مدل درجه سه

$$St = -0/748 \times R^3 - 3/69 \times R^2 + 76/16 \times R - 135/61$$

شکل (۱۴): نمودارهای معادلات منطبق بر رابطه بین استحکام برشی برحسب بارگذاری انفجاری

مقدار R-Sq، مربع ضریب همبستگی است که ضریب تشخیص^۴، تبیین و یا تعیین نامیده می‌شود و نوعی شاخص آماری است که رابطه بین متغیر مستقل (نسبت بارگذاری R) و متغیر وابسته (در اینجا استحکام تسلیم St) را توجیه می‌کند. این عدد بین صفر و یک متغیر است و با داشتن مقداری بیشتر از ۰/۶، نشان‌دهنده آن است که همبستگی بسیار قوی بین متغیرهای وابسته و مستقل برقرار است. شاخص F، نوعی محک آماری است که به آزمون فیشر^۵ موسوم است [۱۹]. مقدار محاسبه شده آن

- 2-Quadratic
- 3-Cubic
- 4-Coefficient of Determination
- 5-Fisher

بزرگتر است. بنابراین، با افزایش ضخامت ماده منفجره، ضخامت بیشتری از فصل مشترک، مورد اتصال قرار می‌گیرد.

با توجه به نمودار شکل‌های ۱۳-۱۴، استحکام برشی اتصال گوه‌ای در مقاطع مختلف و ضخامت‌های متفاوت فلز پران، متغیر است ولی مقدار مقاومت برشی، بادر نظر گرفتن نسبت بارگذاری، روند مشخص و ثابتی دارد. عبارتی، نسبت بارگذاری، یعنی نسبت جرم ماده منفجره به جرم فلز پران است که تعیین کننده استحکام برشی اتصال است و ضخامت ماده منفجره به تنهایی ملاک دستیابی به استحکام برشی مطلوب نمی‌باشد. باتوجه به موارد مذکور، می‌توان رابطه ای برحسب بارگذاری انفجاری و استحکام برشی، در اتصال فلزات آلومینیوم و مس، بوسیله رگرسیون خطی و یا غیرخطی و با کمک جدول تحلیل واریانس، ارائه نمود و منحنی های خطی، درجه دو یا سه را بر آن منطبق نمود.

ارائه مدل

می‌توان مدل‌های خطی، درجه دو و درجه سه را برای بیان استحکام برشی نسبت به بارگذاری انفجاری باتوجه به اطلاعات جدول ۳ و نمودار شکل ۱۳ با استفاده از نرم افزار اس.پی.اس.اس و به کمک جدول تحلیل واریانس^۱، بدست آورد. معادله استخراج شده دارای فرم کلی به صورت زیر است:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2^2 + b_3 X_3^3 \quad (3)$$

جدول (۵): تحلیل واریانس مدل‌های خطی، درجه دو و درجه سه.

مدل	R-Sq.	F	b0	b1	b2	b3
خطی	۰/۹۳۰	۱۴۵/۹۹	-۵۳/۶۰	۲۸/۹۷	-	-
درجه دو	۰/۹۹۰	۴۷۸/۷۹	۱۵۸/۰۵	۹۸/۶۰	۱۰/۹۱	-
درجه سه	۰/۹۹۰	۴۸۲/۳۷	۱۳۵/۶۱	۷۶/۱۶	۳/۶۹	۰/۷۴

با اعمال ضرایب فوق، معادلات بیان استحکام تسلیم- نسبت بارگذاری بصورت شکل ۱۴ ترسیم می‌شود در این مدل‌ها، St تنش برشی تسلیم ناحیه استحکام متغیر برحسب مگاپاسکال و R، بارگذاری انفجاری، عددی ثابت و بدون بعد است.

۲-۴- آزمایش میکروسختی^۱ سنجی

آزمایشات سختی سنجی برای بررسی تغییرات سختی در اطراف فصل مشترک جوش صورت می‌گیرد. بدلیل تغییرات زیاد سختی نسبت به فاصله از فصل مشترک اتصال، از روش میکروسختی سنجی استفاده شده است. اعداد سختی، براساس معیار ویکرز و اندازه گرفتن قطر هرم بجا مانده بر روی قطعات، باوزنه ۱۰۰ گرمی، بدست می‌آید. نمونه گیری در منطقه C نشان داده شده در شکل ۶ انجام شد. نتایج حاصل از این مشاهدات بهمراه منحنی سختی و اطلاعات اعداد سختی در شکل ۱۶، آورده شده است.

نمودارهای میکروسختی سنجی، اطلاعات مفیدی را ارائه می‌نماید. نتایج را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

- بدلیل کار سرد^۲ حاصل از برخورد صفحه پرن به پایه و موج شوک^۳ ایجاد شده بوسیله انفجار، سختی ایجاد شده در قطعات P1 و P2، از سختی اولیه فلزات پایه و پرن قبل از جوشکاری بیشتر است.
- سختی ایجاد شده در صفحات، دارای بیشینه ای است که این مقدار حداکثر، در فاصله ای حدود ۱۰۰ الی ۱۵۰ میکرون از فصل مشترک اتصال قرار دارد.
- در نزدیکی فصل مشترک اتصال، سختی ایجاد شده از مقدار بیشینه آن کمتر است؛ بدلیل اینکه آزاد سازی انرژی جنبشی در فصل مشترک اتصال، که ناشی از برخورد صفحات است، موجب افزایش دما شده و افزایش دما تا حدودی باعث آنیل شدن این مناطق و کاهش سختی می‌شود.
- با دور شدن از فصل مشترک اتصال و مکان بیشینه سختی، مقادیر سختی ایجاد شده در قطعات کاهش می‌یابد و این بدلیل تاثیر پذیرفتن کمتر از کار سرد حاصل از برخورد در صفحات در مناطق دورتر، است.
- به دلیل اعمال ضخامت بیشتر ماده منفجره در قطعه P2، این نمونه نسبت به P1، دارای سختی بیشتری است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت ماده منفجره در ضخامت ثابتی از فلز پرن، نسبت بارگذاری انفجاری افزایش یافته و می‌توان به سختی بیشتری دست یافت.

در جدول ۵ با مقدار جدولی آن در سطح معنی دار از پیش تعیین شده‌ای مقایسه شده است. مقدار جدولی F، در سطح معنی دار ۰/۰۰۵ برابر ۱۲/۲۳ است و از تمامی مقادیر محاسبه شده F که در جدول ۵ نشان داده شده است، کمتر است. بنابراین می‌توان به این نتیجه دست یافت که با احتمال ۹۹/۵٪ رابطه ای معنی دار بین متغیرها بصورت مطلوب، برقرار است.

نکته قابل ملاحظه این است که چون ضخامت فلز پرن در تعریف نسبت بارگذاری انفجاری نهفته است؛ روابط استحکام برشی-نسبت بارگذاری در شکل ۱۴ مستقل از ضخامت صفحه پرن و تابعی از نسبت بارگذاری هستند.

هدف از ارائه این مدلها، صرفاً ارائه رابطه ای بین استحکام برشی و نسبت بارگذاری اتصال نمی‌باشد، بلکه می‌توان با انجام اتصال گوه‌ای در دیگر ترکیبات فلزی، استحکام برشی اتصالات را در ضخامتهای مختلف فلزات پرن بدست آورد. در این مقاله، روش فوق در روکش کاری انفجاری فلز آلومینیوم به مس، بررسی شده است.

در قطعه C1، ضخامت ماده منفجره ۶۰ میلیمتر، فاصله هوایی ۵ میلیمتر و باتوجه به نسبت جرم فلز پرن به جرم ماده منفجره، نسبت بارگذاری ۳/۱۱، و در قطعه C2، ضخامت ماده منفجره ۸۰ میلیمتر، فاصله هوایی ۵ میلیمتر و نسبت بارگذاری ۳/۶۲ است.

جوشکاری انفجاری در فرآیند روکش کاری انفجاری در قطعات فوق انجام شد و طبق دستورالعمل آزمایش برش، مقادیر استحکام برشی در نمونه های فوق بدست آمد. مقادیر مربوط به بارگذاری انفجاری در قطعات C1 و C2 در معادلات مربوط به شکل ۱۴ قرار داده شد و مقدار استحکام برشی اتصالات فوق، محاسبه گردید. مقادیر واقعی استحکام برشی قطعات C1 و C2 که در جدول ۳ آورده شده است و مقادیر محاسبه شده از معادلات خطی، درجه دو و سه بهمراه خطای حاصل از پیش بینی، در جدول ۶ نشان داده شده است.

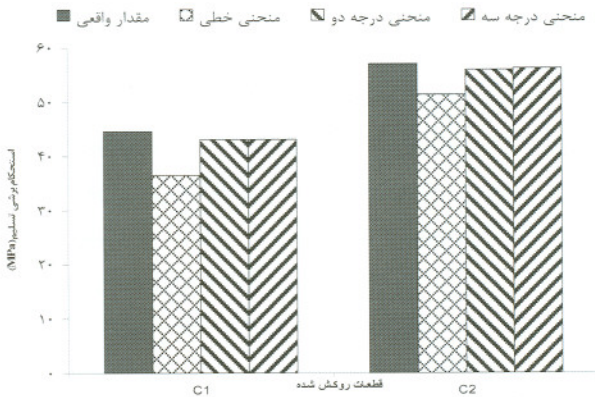
با توجه به نمودار شکل ۱۵ می‌توان دریافت که منحنی های درجه دو و سه دارای دقت بیشتری نسبت مدل خطی هستند و با افزایش درجه منحنی می‌توان به انطباق بیشتری بر شرایط حاکم دست یافت.

Archive of SID

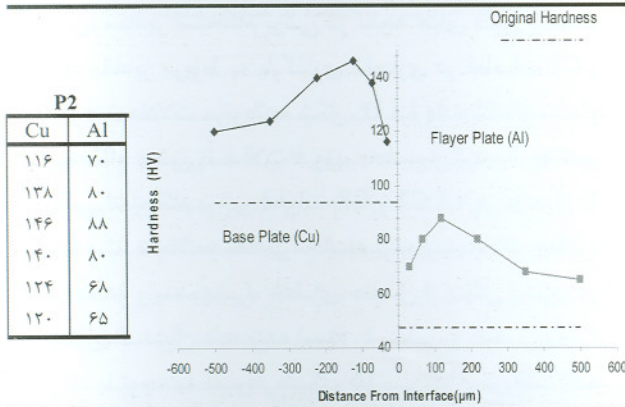
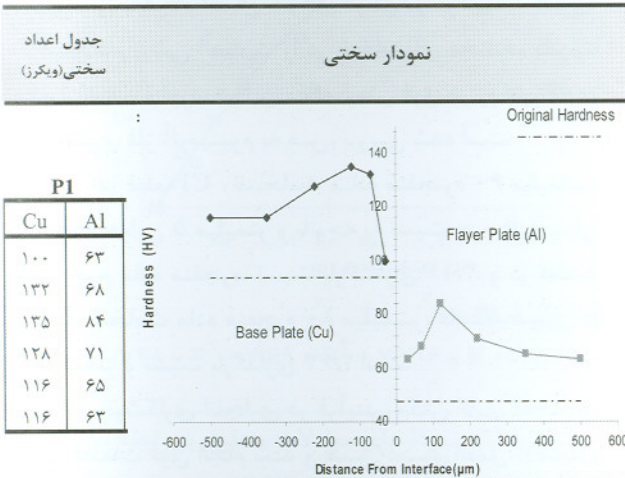
جدول (۶): مقادیر محاسبه شده و واقعی استحکام برشی و درصد خطای حاصله بوسیله تخمین مدلها در روکش کردن فلز آلومینیوم به مس.

شماره قطعه	مقدار محاسبه شده (MPa)			مقدار واقعی (MPa)	درصد خطا		
	معادله خطی	منحنی درجه دو	منحنی درجه سه		معادله خطی	منحنی درجه دو	منحنی درجه سه
C1	۳۶/۴۹	۴۳/۰۷	۴۳/۰۷	۴۴/۵	۱۷/۹۸٪	۳/۲۰٪	۳/۲۴٪
C2	۵۱/۲۷	۵۵/۹۱	۵۵/۹۱	۵۷	۱۰/۰۵٪	۱/۹۰٪	۱/۳۱٪

بطور کلی می توان اظهار داشت که اثر پارامترهای بارگذاری انفجاری، شرایط اتصال و تاثیر ضخامت صفحه پران در



شکل (۱۵): نمودار استحکام برشی تسلیم در قطعات روکش شده.



شکل (۱۶): منحنی های سختی در اطراف فصل مشترک اتصال.

۳- نتیجه گیری

براساس طراحی اولیه در راستای ایجاد اتصال بین صفحات آلومینیوم و مس در حالت گوه‌ای، همانگونه که انتظار می رفت، این اتصال با توجه به ملزومات در نظر گرفته شده، ایجاد و سپس با آزمایشات متعدد بر روی صفحات، کیفیت اتصال بصورت کمی ارزیابی شد و آنگاه مدل‌های ریاضی با استفاده از روش رگرسیون و نرم افزار مربوطه، استخراج گردید. مدل‌های ایجاد شده، با خطای قابل قبول حدود ۳ درصد در مدل‌های غیرخطی، توسط آزمایشات روکش کاری انفجاری، صحت گذاری شد. فصل مشترک اتصال نیز اطلاعاتی در خصوص بارگذاری انفجاری ارائه می‌دهد و می‌توان دریافت که با افزایش بارگذاری انفجاری، فصل مشترک به حالت موج در می‌آید. سختی اطراف فصل مشترک اتصال نیز به دلیل موج شوک و نیز کارسرد ایجاد شده ناشی از برخورد، افزایش می‌یابد.

Archive of SID

11. Grignon, F., Benson, D., Vecchio, K.S., and Meyers, M.A., "Explosive Welding of Aluminium to Aluminium Analysis, Comput. and Experiments", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 30, No. 1, pp. 1333-1351, 2004.
 12. 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", *Metall. Trans.*, Vol. 24A, No. 10, pp. 2289-2297, 1993.
 13. Al-Hassani, S.T.S. and Mousavi A.A., "Finite Element Simulation of Explosively Driven Plate Impact with Application to Explosive Welding", *Material and Design*, Vol. 29, No. 1, pp.1-19, 2008.
 14. Mousavi, A.A. and Joodaki, G., "Explosive Welding Simulation of Multilayer Tubes", *Int. Conf. on Comput. Plast.*, Barcelona, 2005.
 15. ASM Int. Handbook Committee, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials", Vol. 2, 1992.
 16. Vaidyanathan, P.V. and Ramanathan, A., "Computer Aided Design of Explosive Welding Systems", *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 38, No. 1, pp. 501-516, 1993.
 17. Cooper, P.W., "Explosive Engineering", 1997, Wiley-VCH, New York.
 18. SPSS for Windows Release 11.5.0, User Guide, 2007.
 ۱۹. رضایی، ع.، "مفاهیم آمار و احتمالات"، نشر مشهد، مشهد، ۱۳۷۹.
- فرآیند روکش کاری، با انجام جوشکاری انفجاری گوه‌ای شکل، قابل ارزیابی است و این روش باعث جلوگیری از انجام آزمایشات متعدد و صرف هزینه و زمان زیادی می‌شود.
- ۴- تشکر و قدردانی
- در اینجا لازم است از زحمات جناب آقایان مهندس عربی، مهندس نعیم و مهندس حسین پور تشکر و قدردانی شود.
- مراجع
1. Crossland, B., "Explosive Welding of Metals and its Application", Clarendon Press, Oxford, 1982.
 2. Al-Hassani, S.T.S. and Mousavi A.A., "Numerical and Experimental Studies of the Mechanism of the Wavy Interface Formations in Explosive/Impact Welding", *J. Mech. and Phys. of Solids*, Vol. 53, No. 1, pp. 2501-2528, 2005.
 3. Blazynski, T.Z., "Explosive Welding, Forming and Compaction", Applied Science Publisher, London & New York, 1983.
 4. Acarer, M., Gulence, B., and Findik, F., "Investigation of Explosive Welding Parameters and their Effects on Microhardness and Shear Strength", *Material and Design*, Vol. 24, No. 1, pp. 659-664, 2003.
 5. Kahramana, N., Gulenc, B., and Findik, 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.
 6. Kahraman, N., Gulenc, B. and Findik, F., "Joining of Titanium/Stainless Steel by Explosive Welding and Effect on Interface", *J. Material Process. Tech.*, Vol. 169, No. 1, pp. 127-133, 2005.
 7. 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*, Vol. 43, No. 2, pp.83-86, 2004.
 8. Raghukandan, K., "Analysis of the Explosive Cladding of Cu-Low Carbon Steel Plates", *J. Material Process. Tech.*, Vol. 139, No. 1, pp.573-577, 2003.
 9. Gerland, M., Presles, H.N., Guin, J.P., and Bertheau D., "Explosive Cladding of a Thin Ni-Film to an Aluminium Alloy", *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A280, pp. 311-319, 2000.
 10. Buchare, J., Rolc, S., and Hruby, V., "On the Explosive of a Ring to Axisymmetric Body", *J. Material Process. Tech.*, Vol. 85, No. 3, pp. 171-174, 1999.