



مجموعه مقالات مهندسي مكانيك - ساخت و توليد

www.sakhtolid.ir

مطالعه تحلیلی و تجربی جوشکاری انفجاری لوله‌های هم‌محور فولاد کربنی - فولاد ضدزنگ

غلامحسین لیاقت^۱، احسان زمانی^۲

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، بخش مهندسی مکانیک، آزمایشگاه مکانیک ضربه و انفجار

First Author E-mail: (ghlia530@modares.ac.ir)

چکیده

مهمترین توانایی جوشکاری انفجاری در هندسه استوانه‌ای، همانا قابلیت تولید استوانه‌های دو جداره است که کاربردهای صنعتی بسیاری برای آنها می‌توان برشمرد. در این مقاله، ضمن معرفی کلی فرآیند جوشکاری انفجاری، به فرآیند جوشکاری انفجاری لوله‌های هم‌محور فولاد کربنی و فولاد ضدزنگ با دقت بیشتری پرداخته شده و ضمن بدست آوردن پنجره جوش‌پذیری ایندو فلز، روش تولید موفق اینگونه لوله‌ها نیز توضیح داده شده است.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری انفجاری - فولاد کربنی - فولاد ضدزنگ - پنجره جوشکاری - انفجار بخارج

مقدمه

نام جوشکاری در هندسه مسطح و چیدمان موازی شناخته می‌شود، مطابق شکل ۱ از یک لایه ماده منفجره که بر روی یک ورق فلزی قرار گرفته است، بعنوان منبع انرژی استفاده می‌شود. این صفحه که «صفحه پرنده» نامیده می‌شود، در اثر فشار گازهای حاصل از دتونیشن، فاصله مابین خود و صفحه فلزی دیگری را که بر روی یک «سندان» مناسب قرار داده شده و به نام «صفحه پایه» شناخته می‌شود، با شتاب بسیار بزرگی می‌پیماید؛ بنحویکه در پایان این فاصله که به «فاصله قرار» معروف است، مومنتوم بسیار بالایی کسب نموده است. همین مومنتوم است که پس از برخورد صفحات فلزی، باعث تولید حرارت موضعی بسیار زیاد و فشار بسیار بزرگی در نقطه برخورد تولید شده، یک جریان پلاستیکی شدید موضعی را که از آن بعنوان جت فلز نام برده می‌شود، در نقطه برخورد بوجود آورده و درنهایت باعث برقراری اتصال دائمی بین آنها می‌گردد [۱ و ۲].

«جوشکاری انفجاری» که به نام دیگر «پوشش‌دهی انفجاری» نیز معروف است، از تکنیکهای غیرسنتی و جدید اتصال فلزات محسوب می‌شود که در آن از مواد منفجره قوی، بعنوان منبع انرژی استفاده می‌شود. با استفاده از این فرآیند که یک روش جوشکاری در فاز جامد محسوب می‌گردد، می‌توان ترکیبات بسیار متنوعی از کامپوزیت‌های فلزی دو لایه و یا حتی چند لایه را تولید نمود. بسیاری از این ترکیبات بعلا مختلف، که از آن جمله می‌توان به اختلاف زیاد درجه حرارت ذوب دو فلز شرکت کننده در اتصال اشاره نمود، تا قبل از گسترش این روش تولیدی از دسترس بشر خارج بوده‌اند.

مکانیزم انجام جوشکاری انفجاری

در یک چیدمان پایه و استاندارد جوشکاری انفجاری که به

^۱ استاد

^۲ کارشناس ارشد

استوانه‌ای انجام می‌شود، سرعت برخورد یا سرعت ضربه (V_I)، سرعت نقطه برخورد (V_C) و زاویه دینامیکی برخورد (β)، به «پارامترهای برخورد» معروف بوده و جزء پارامترهای اساسی جوشکاری انفجاری محسوب می‌گردند. مقادیر این پارامترها می‌توانند توسط تغییر در هندسه سیستم، نوع خرج انفجاری، سرعت دتونیشن و فاصله قرار تغییر نماید. برای یک چیدمان مسطح، این سه پارامتر بر روی یک دیاگرام که به «دیاگرام سینماتیکی» معروف است، نمایش داده می‌شوند. این دیاگرام در شکل ۳ نشان داده شده است.

پنجره جوشکاری

با توجه به مطالب بخشهای قبل، شرایط لازم برای تشکیل یک پیوند انفجاری با کیفیت را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود [۴]:

الف) تشکیل جت در نقطه برخورد دو فلز
ب) افزایش فشار تا بزرگی و مدت زمان کافی، برای تشکیل پیوندهای اتمی بین دو فلز
بزرگی این فشار که در اثر اتلاف انرژی جنبشی در «نقطه برخورد» بوجود می‌آید، به «سرعت برخورد» یا «سرعت ضربه» دو فلز وابسته است، در حالیکه مدت زمان اعمال آن به سرعت «پیشروی نقطه برخورد» یا «سرعت گسترش جوش» بستگی دارد.

فرض اساسی تشکیل جت در نقطه برخورد دو فلز، بر این پایه استوار است که فشار تولید شده در این نقطه، از مقاومت برشی دو فلز بسیار بالاتر است، بنحویکه فلز در برابر آن همانند سیال رفتار خواهد کرد [۵]. لذا کاملاً بدیهی است که در صورت کم بودن سرعت برخورد دو فلز، فشار تولید شده در نقطه برخورد بعد مورد نیاز برای بروز رفتار سیال گونه نرسیده و در نتیجه جت تشکیل نگردد. حتی در صورت بروز این رفتار، ضروری است که ضخامت لایه‌ای از فلز که توسط جت از روی سطوح فلزات برداشته شده و مقدار آن به «زاویه دینامیکی برخورد» دو فلز وابسته است، به اندازه کافی برای ستردن لایه اکسید و دیگر آلاینده‌ها از روی سطوح فلزات، زیاد باشد. چنین محدودیتهایی را برای سایر پارامترهای دخیل در فرآیند نیز، می‌توان برشمرد. لذا ضروری بنظر می‌رسد که

همانند هندسه مسطح، در جوشکاری در هندسه استوانه‌ای نیز از یک فلز برای پوشش‌دهی انفجاری فلزی دیگر استفاده می‌شود؛ با این تفاوت که تغییر هندسه، ظاهر چیدمان را کاملاً متفاوت جلوه می‌دهد. اما با اندکی دقت می‌توان تشابهات بسیاری بین دو هندسه یافت.

در کاربردهای عملی جوشکاری انفجاری لوله‌ها، همواره یک لوله، درون لوله دیگری قرار داده می‌شود. اختلاف قطر دو لوله، همیشه بصورتی است که یک فاصله قرار شعاعی، بین آنها فاصله می‌اندازد. علاوه بر آن، دو لوله بوسیله فیکسچرهای مناسبی کاملاً هم‌محور نگه داشته می‌شوند. بسته به آنکه کدامیک از لوله‌ها بعنوان لوله پرنده و کدامیک بعنوان لوله مبنا عمل خواهند کرد، می‌توان سه روش اصلی، مطابق تقسیم‌بندی زیر برشمرد [۳]:

الف) روش انفجار بخارج یا «EWP»^۱

ب) روش انفجار بداخل یا «IWP»^۲

ج) روش انفجار همزمان بداخل و بخارج «IWP/EWP»

در روش انفجار بخارج، خرج انفجاری در داخل لوله درونی تعبیه شده و لذا این لوله بعنوان لوله پرنده عمل خواهد کرد. مطابق شکل ۲، سطح بیرونی لوله مبنا به سندان سنگینی - که در اینجا، سندان خارجی نامیده می‌شود - تکیه کرده و به همین خاطر لوله‌های دوجدار تولید شده به این روش، قطر خارجی ثابتی خواهند داشت.

برعکس روش شرح داده شده، خرج انفجاری در روش انفجار بداخل، بصورت یک پوسته استوانه‌ای، پیرامون لوله بیرونی را در بر گرفته و در عوض لوله درونی توسط یک سندان - که غالباً بصورت یک استوانه توپر می‌باشد - مهار می‌گردد. بنابراین در این روش، لوله بیرونی بعنوان لوله پرنده عمل کرده و ابعاد داخلی محصول تولیدی بدون تغییر باقی خواهد ماند.

روش سوم نیز در حقیقت تلفیقی از دو روش اول است که در آن بطور همزمان از دو خرج انفجاری داخلی و خارجی استفاده شده و در حقیقت هر دو لوله بعنوان لوله پرنده عمل خواهند کرد.

پارامترهای اساسی جوشکاری انفجاری

صرف نظر از اینکه جوشکاری در هندسه مسطح یا

۳- از اینگونه رفتار فلزات، بعنوان «رفتار هیدرودینامیک» یاد می‌گردد.

این خط معرف مرز بالای زاویه دینامیکی برخورد است که فراتر از آن، مرز مشترک موجی تشکیل نخواهد شد. حدود پائین و بالای زاویه (β) ، بطور تجربی توسط «Crossland» و «Bahrani»، به ترتیب معادل ۲ تا ۳ درجه و ۳۱ درجه پیشنهاد شده‌اند [۲].

ه) خط ee'

این خط معرف حد پائین سرعت پیشروی نقطه برخورد می‌باشد که در این سرعت، انتقال از حالت فصل مشترک موجی به غیر موجی بروز می‌کند. بر مبنای تئوری هیدرودینامیک و تشابه با جریان سیال، این انتقال در عدد رینولدزی که با رابطه زیر محاسبه می‌گردد رخ می‌دهد [۶]:

$$Re = \frac{(\rho_f + \rho_p) V_C^2}{2(H_f + H_p)} \quad (2)$$

که در این رابطه، منظور از اندیس‌های f و p ، بترتیب فلز پرنده و ساکن بوده و H نیز معرف سختی ویکرز فلزات بر حسب (N/m^2) است که بعنوان معیاری از مقاومت ماده قلمداد می‌گردد. بر اساس این آنالیز که توسط «Cowan» ارائه شده است، انتقال از فصل مشترک موجی به غیر موجی برای اکثر فلزات در $Re=10.6$ رخ داده، و این مقدار بوسیله آزمایشهای مختلف تأیید شده است.

تنها فاکتور باقی‌مانده که باید حدود آن مشخص گردد، سرعت برخورد فلز پرنده است که مسؤول تولید فشار و انرژی ضربه‌ای است.

و) خط ff'

این منحنی معرف فشار بحرانی یا حداقل سرعت برخورد V_f است که فراتر از آن، رفتار فلز را می‌توان سیال‌گونه فرض نمود. رابطه تجربی زیر توسط «Deribas» و «Wittman» برای توصیف این منحنی ارائه شده است [۵]:

$$\beta = k_1 \left(\frac{H}{\rho V_C^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

که H معرف سختی ویکرز فلز است و β نیز برحسب رادیان بدست خواهد آمد. ضریب k_1 نیز برای سطوح فلزی کاملاً پرداخت شده معادل ۰/۶ و برای سطوح بخوبی پرداخت نشده ۱/۲ جایگزین می‌شود.

ز) خط gg'

این منحنی مرز ماکزیمم سرعت فلز پرنده را مشخص

پارامترهای مؤثر در فرآیند، از حداقل مقدار لازم برای حصول یک جوش مطلوب برخوردار بوده و یا بعبارت بهتر، در محدوده کاربردی خود قرار داشته باشند. قرار داشتن در این محدوده بدین معناست که عبور از یک حد مجاز بالائی نیز، کیفیت جوش را تحت‌الشعاع خود قرار خواهد داد. بنابراین با انتخاب پارامترهای اساسی جوشکاری انفجاری در این محدوده مناسب که به «محدوده جوش-پذیری» فلزات و یا «پنجره جوشکاری» فلزات معروف است، می‌توان به یک جوش مناسب دست یافت. متداول است که این پنجره، بر روی یک دستگاه مختصات که محور افقی آن معرف سرعت دتونیشن (V_D) که در چیدمان موازی برابر سرعت پیشروی نقطه برخورد (V_C) است و محور عمودی آن معرف زاویه دینامیکی برخورد (β) است، رسم گردد. پارامترهای بحرانی لازم برای رسم پنجره جوشکاری یک فلز عبارتند از [۲]:

الف) زاویه دینامیکی برخورد بحرانی (β_c) برای تشکیل جت

ب) سرعت پیشروی نقطه برخورد (V_C)

ج) انرژی و فشار ضربه در نقطه برخورد که با سرعت برخورد (V_f) مرتبط است

مطابق شکل ۴، همه این پارامترها را می‌توان بطور همزمان بر روی یک دستگاه $(\beta - V_C)$ ، با هفت مرز مشخص نمود:

الف) خط aa'

این خط معرف مرز زاویه بحرانی برخورد، برای تشکیل جت است. ناحیه سمت راست این مرز، منطقه مافوق صوت را مشخص می‌کند که در آن جت تشکیل نمی‌شود. رابطه زیر برای این مرز، پیشنهاد شده است [۶]:

$$\beta = 10 (V_C - 5.5) \quad (1)$$

که در این رابطه، V_C برحسب (km/s) جایگذاری می‌گردد.

ب) خط bb'

این خط معرف حد بالای سرعت V_C است و ۱/۲ تا ۱/۵ برابر سرعت صوت در فلز تخمین زده می‌شود [۲].

ج) خط cc'

این خط معرف مرز پائین زاویه دینامیکی برخورد است که کمتر از آن، مرز مشترک موجی تشکیل نخواهد شد.

د) خط dd'

$$\text{Re} = \frac{(\rho_f + \rho_p) V_C^2}{2(H_f + H_p)} \Rightarrow V_{C_{\min}} = \sqrt{\frac{2\text{Re}(H_f + H_p)}{(\rho_f + \rho_p)}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 10.6 \times (177 + 153) \times 9.81 \times 10^6}{(8000 + 7890)}} = 2077 \text{ m/s}$$

سرعت محاسبه شده، کمترین سرعت ماده منفجره مورد استفاده را مشخص می‌کند.

ب) محاسبه حداکثر سرعت پیشروی نقطه جوش

این سرعت نیز حداکثر ۱/۲ تا ۱/۵ برابر سرعت صوت در فلز تخمین زده می‌شود، گرچه بسیار محافظه کارانه‌تر است که کاملاً زیر سرعت صوت باقی بماند. از رابطه زیر می‌توان بطور کلی و با دقت قابل قبولی برای تخمین سرعت صوت در ماده استفاده نمود:

$$C_s = \sqrt{E/\rho} \quad ()$$

لذا سرعت صوت در فولاد ضدزنگ برابر است با:

$$C_s) \text{Stainless Steel} = \sqrt{\frac{193 \times 10^9}{8000}} \cong 4912 \text{ m/s}$$

و در فولاد کربنی نیز برابر است با:

$$C_s) \text{Carbon Steel} = \sqrt{\frac{200 \times 10^9}{7890}} = 5000 \text{ m/s}$$

بنابراین، انتخاب پودر TNT با سرعت ۴۸۵۰ m/s، از این نظر مناسب بنظر می‌رسد.

ج) محاسبه حداقل سرعت برخورد

رابطه (۳) معرف شکل منحنی حداقل سرعت برخورد است که می‌باید در صفحه $(V_C - \beta)$ و در بازه بین حداقل و حداکثر سرعت برخورد، که از بندهای قبل محاسبه شده است، ترسیم گردد. شکل این رابطه برای فولاد ضدزنگ بصورت زیر:

$$\beta) \text{Stainless Steel} = 1.2 \left(\frac{177 \times 9.8 \times 10^6}{8000 \times V_C^2} \right)^{1/2}$$

و برای فولاد کربنی بصورت

$$\beta) \text{Carbon Steel} = 1.2 \left(\frac{153 \times 9.8 \times 10^6}{7890 \times V_C^2} \right)^{1/2}$$

خواهد بود.

د) محاسبه حداکثر سرعت برخورد

رابطه (۴) معرف شکل منحنی حداکثر سرعت برخورد دو

می‌کند که فراتر از آن، بواسطه افزایش انرژی ضربه، عیوبی نظیر تشکیل نواحی مذاب، پوسته شدن و ... در فصل مشترک بروز می‌کند. رابطه تجربی زیر برای این مرز پیشنهاد کرده است [۵]:

$$\text{Sin} \frac{\beta}{2} = \frac{k_2}{t_f^{0.25} V_C^{1.25}} \quad (۴)$$

$$k_2 = \left[\frac{E}{12\rho(1-2\nu)} \right]^{1/2}$$

که در این رابطه

ناحیه هاشور خورده شکل ۴، منطقه محصور بین این هفت خط را نشان می‌دهد که در آن می‌توان انتظار یک جوش با کیفیت را داشت. لازم به تذکر است که پنجره مشخص شده، تنها شرایط جوش پذیری یک فلز را مشخص می‌کند، لذا برای در حالتی که جنس فلزات صفحات مبنا و پرنده متفاوت است، پنجره جوشکاری هر فلز باید بطور جداگانه ترسیم شده و سپس بر روی هم قرار داده شوند. ناحیه‌ای که بطور مشترک در هر دو پنجره قرار دارد، پنجره جوشکاری دو فلز را تشکیل می‌دهد. تذکر این نکته ضروری است که روابط توصیف کننده این مقادیر حدی، همه روابطی تجربی‌اند و لذا طبیعی است که پنجره حاصل، پنجره‌ای تقریبی باشد. اما از آنجا که این روابط در طی آزمایشهای متعدد انجام شده توسط محققین مختلف، کارائی خود را به اثبات رسانده‌اند، می‌توان تا حد زیادی به آنها اعتماد نمود؛ مضافاً آنکه با فاصله گرفتن از مرزها و نزدیک شدن به مرکز پنجره، میزان دقت در انتخاب پارامترها بسیار افزایش می‌یابد.

پنجره جوشکاری فولاد کربنی - فولاد ضدزنگ

برای رسم پنجره جوشکاری لوله‌های فولاد ضدزنگ - فولاد کربنی، در ابتدا ضروری است تا نوع و خواص مکانیکی و فلزی هر دو لوله، بدقت مشخص گردد. همچنین از آنجا که چیدمان مورد نظر، چیدمان موازی است، لذا با توجه به شکل ۳، $V_C = V_D$.

الف) محاسبه حداقل سرعت پیشروی نقطه جوش

با استفاده از آزمایش سختی سنجی انجام شده بر روی لوله‌های تهیه شده، سختی ویکرز برای لوله‌های فولاد ضدزنگ و فولاد کربنی به ترتیب برابر 177 N/m^2 و 153 N/m^2 بدست آمده است، لذا با استفاده از رابطه (۲) داریم:

داخلی و از لوله‌های فولاد کربنی (CK22) به قطر خارجی 50mm، ضخامت جداره 6mm و چگالی طولی 6.35Kg/m بعنوان لوله خارجی استفاده شده است. در شکل ۶، این لوله‌ها که در قطعاتی بطول 10cm برش خورده‌اند نشان داده شده است. همچنین از پودر «TNT» به چگالی 1.01 gr/cm^3 که پودری دانه ریز و زرد رنگ است، بعنوان خرج اصلی و از کپسول (چاشنی)های الکتریکی بعنوان آغازگر انفجار استفاده شده است.

سندان خارجی مورد نیاز نیز از جنس فولاد آلیاژی و عملیات حرارتی شونده «1.2714» و به ابعاد خارجی «25×25×12 cm» ساخته شده است.

نحوه ساخت این سندان که تصویر آن در شکل ۷ نشان داده شده است، بگونه‌ایست که بین سوراخ ایجاد شده در مرکز آن و لوله فولاد کربنی، انطباق «جذب و روان» برقرار شده و پس از محکم کردن پیچهای آن، پیرامون لوله بنحو کاملاً محکمی در بر گرفته می‌شود.

ب) ساخت چیدمان

قبل از مرحله آماده‌سازی چیدمان، لازم است تا زنگار تشکیل شده بر روی فلزات شرکت کننده در اتصال، تا حد امکان زدوده شود. از آنجا که درجوشکاری فلزات مورد نظر، تنها فولاد کربنی احتیاج به زنگار زدائی دارد، لذا برای آزمایشهای این تحقیق، سطح داخلی لوله‌های فولاد کربنی بنحو کاملاً تمیزی اکسید زدائی و پرداخت شده‌اند.

بعنوان یک روش عمومی برای انجام آزمایشهای «EWP»، در ابتدا لازم است تا پس از آنکه لوله پرنده در داخل لوله بیرونی قرار گرفت، دو لوله بوسیله فیکسچرهای مناسبی کاملاً هم‌محور نگه داشته شوند تا یک فاصله قرار شعاعی کاملاً مساوی در تمامی نقاط مابین دو لوله برقرار گردد. در تمام آزمایشهای انجام شده در این تحقیق، این الزام بسادگی و با بکار بردن دو عدد «آرینگ» که با فشار، یکی در ابتدای فاصله قرار دو لوله و دیگری در انتهای آن تعبیه می‌گردند، تأمین شده است. سپس با پوشاندن یک سر لوله‌ها، درون آن از ماده منفجره پر می‌شود. پس از پر شدن حفره داخلی لوله پرنده، سر دیگر آن نیز پوشانده شده و از طریق سوراخی که از قبل بر روی این پوشش ایجاد شده است، چاشنی‌گذاری می‌گردد. سپس این مجموعه که اکنون مانند یک بمب کوچک دست‌ساز است در میان دو نیمه سندان قرار داده شده و پیچهای آن محکم

فلز در مختصات $(V_C - \beta)$ می‌باشد. برای لوله فولاد ضدزنگ با قطر خارجی 33.4mm و ضخامت 1.65mm، شکل این منحنی بصورت زیر:

$$\beta)_{Stainless\ Steel} = 2 \sin^{-1} \left[\frac{\left(\frac{193 \times 10^9}{12 \times 8000 \times 0.4} \right)^{0.5}}{(0.00165)^{0.25} \times V_C^{1.25}} \right]$$

و برای لوله فولاد کربنی به قطر خارجی 50mm و ضخامت 6mm بصورت

$$\beta)_{Carbon\ Steel} = 2 \sin^{-1} \left[\frac{\left(\frac{200 \times 10^9}{12 \times 7890 \times 0.4} \right)^{0.5}}{(0.006)^{0.25} \times V_C^{1.25}} \right]$$

می‌باشد.

ه) محاسبه سایر پارامترهای برخورد

این پارامترها که شامل مرز بحرانی تشکیل جت و مرز بالا و پائین زاویه برخورد دینامیکی می‌باشند نیز مطابق با بند قبل (پنجره جوشکاری) قابل محاسبه می‌باشند.

در شکل ۵، در ابتدا با استفاده از معادلات ارائه شده در این بخش، پنجره جوشکاری هر فلز بصورت جداگانه در صفحه $(V_C - \beta)$ ترسیم شده است و سپس به منظور بدست آوردن محدوده جوش‌پذیری دو فلز فولاد ضدزنگ 316L و فولاد کربنی CK22، دو پنجره بر روی یکدیگر مونتاژ شده است. محدوده‌ای که داخل هر دو پنجره قرار می‌گیرد، پنجره جوشکاری دو فلز را مشخص کرده و بصورت رنگی نمایش داده شده است.

آزمایشهای تجربی

الف) مواد و لوازم اولیه

مهمترین هدف تولید یک لوله فولادی که سطح داخلی آن با فلزی مقاوم در برابر خوردگی پوشش داده شده است، صرفه‌جویی اقتصادی است و لذا هرچه ضخامت فلز گرانیقیمت پوشش‌دهنده کمتر باشد، اقتصادی‌تر عمل شده است. بعلت این اختلاف ضخامت، استفاده از روش انفجار بخارج مناسب‌تر از سایر روشهاست و در آزمایشهای انجام شده در این تحقیق نیز از این روش استفاده شده است.

در انجام این آزمایشها، از دو رده لوله فولاد ضدزنگ (316L) به قطر خارجی 33.4mm، که اولی دارای ضخامت 1.65mm (معروف به رده ۵) و چگالی طولی 1.3Kg/m و دومی دارای ضخامت 3.38Kg/m و چگالی طولی 2.54Kg/m (معروف به رده ۴۰) بعنوان لوله پرنده

انجام این آزمایش بر روی لوله‌های دو جداره ساخته شده در طی این تحقیق، در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

نتیجه گیری

تصاویر حاصل از آزمایش‌های متالوگرافی نشان دهنده برقراری یک جوش کاملاً موفق و ممتاز بین لوله پرنده و لوله مبنا می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، علاوه بر آنکه یک فصل مشترک کاملاً پیوسته و موجی شکل تشکیل گردیده است، هیچگونه اثری نیز از بسته‌های مذاب محبوس شده در میان امواج مشاهده نمی‌گردد. این دو خاصیت مهمترین ملاک برای موفقیت فرآیند جوش انفجاری دو فلز قلمداد می‌شود.

نکته دیگر آنکه امواج بین سطحی تشکیل شده با استفاده از لوله پرنده با ضخامت کمتر (رده ۵)، هم از نظر دامنه و هم از نظر طول موج بزرگتر از امواجی هستند که با استفاده از لوله پرنده با ضخامت جداره بیشتر (رده ۴۰) بدست آمده‌اند. این نتیجه، سازگار با یک قاعده کلی و به اثبات رسیده است که بر اساس آن، دامنه موج با افزایش زاویه برخورد افزایش می‌یابد. طول موج نیز با افزایش زاویه برخورد تا حد بحرانی‌اش، افزایش یافته و بعد از آن دیگر این امواج تشکیل نمی‌شوند [۴]. همچنین در یک سرعت برخورد ثابت و مشخص، طول موج با افزایش ضخامت فلز پرنده، افزایش می‌یابد. بنابراین از آنجا استفاده از لوله‌های پرنده ضخیم‌تر (با قطر خارجی ثابت) به معنی استفاده از ماده منفجره کمتر و سرعت و زاویه برخورد کمتر است، لذا کاملاً مورد انتظار است که امواجی که با استفاده از این لوله‌ها تشکیل می‌گردند، کوچکتر و ریزتر از امواجی باشند که با استفاده از لوله‌های پرنده نازکتر بوجود می‌آیند.

همانطور که ملاحظه می‌شود، معیارهای بیان شده برای افزایش و یا کاهش دامنه و طول موج امواج بین سطحی، همگی بر حسب زاویه دینامیکی برخورد بیان شده‌اند. اما با توجه به دیگرام شکل ۳ از آنجا که سرعت برخورد و زاویه دینامیکی برخورد بصورت

$$\beta = \tan^{-1}(V_t/V_C) \Rightarrow V_t = V_C \tan \beta \quad ()$$

با هم مرتبطند، لذا هر کاهش یا افزایش در اندازه زاویه دینامیکی برخورد، به معنی کاهش و افزایش متنظری در اندازه زاویه برخورد بوده و بنابراین، معیارهای بیان شده را می‌توان بر حسب سرعت برخورد نیز بازنویسی نمود. با توجه به رابطه فوق می‌توان دریافت که حتی با فرض

می‌گردد. در مرحله بعد، این مجموعه اکنون آماده انفجار است بداخل راکتور منتقل شده و پس از بسته شدن درب آن، بوسیله فشردن کلید انفجار از روی پانل دستگاه، عمل انفجار صورت می‌گیرد.

اولین نکته‌ای که پس از انجام انفجار و خارج کردن لوله‌های دو جداره حاصل از آن جلب توجه می‌نماید، آن است که لوله پرنده تا حد رسیدن کامل به لوله بیرونی کرنش نموده و اثری از پارگی در هیچیک از قطعات مشاهده نمی‌شود. عبارت دیگر، لوله درونی کاملاً در داخل لوله بیرونی «گیر» افتاده و به آن چسبیده است؛ اما درباره اینکه آیا جوشی نیز مابین دو لوله تشکیل شده است یا نه، هیچ اظهار نظری نمی‌توان نمود.

بهترین و آسانترین راه برای اطمینان از برقراری اتصالی هرچند ضعیف و نیمه‌کاره بین دو لوله، برش طولی و عرضی آن است؛ بنحوی که مطابق شکل ۸ بتوان قطعاتی را از لوله جدا نمود. اگر اتصالی بین دو لوله برقرار نشده باشد، بمحض جدا شدن قطعات برش خورده، دو لایه از یکدیگر جدا می‌شوند، اما اگر جدایشی اتفاق نیفتاد بمعنای آن است که دو فلز به هم جوش خورده‌اند. اینکه کیفیت اتصال برقرار شده چگونه است و تا چه حد یک جوش کامل و یکدست بدست آمده است، مقوله‌ای است که باید بوسیله آزمایش‌های دقیقتر بررسی گردد. طیف وسیعی از آزمایش‌های مکانیکی و متالورژیکی بر روی این قبیل اتصالات قابل انجام است. یکی از این آزمایش‌ها، آزمایش متالوگرافی فصل مشترک جوش و تصویر برداری از آن بوسیله میکروسکوپ نوری است که امکان مشاهده و بررسی دقیق مرز جوش و ریزساختار دو فلز را فراهم می‌آورد و در این تحقیق از این تکنیک استفاده شده است.

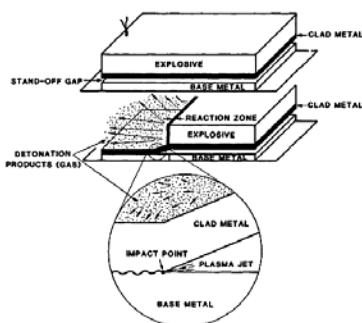
برای انجام این آزمایش، توجه به دو نکته ضروری است: اولاً سطحی که برای انجام آزمایش متالوگرافی آماده می‌شود باید از یک برش طولی لوله (هم جهت با مسیر حرکت دتونیشن) انتخاب گردد و نه از یک برش عرضی آن، ثانیاً این برش باید به اندازه کافی از دو انتهای لوله فاصله داشته باشد تا اثرات لبه‌ای که معمولاً در همه سازه‌های جوشکاری شده به این روش وجود دارد، باعث برداشت غلط از کیفیت جوش حاصل نگردد [۷و۴].

با توجه به این نکات، از فصل مشترک جوش دو لوله بوسیله میکروسکوپ نوری عکسبرداری گردید که نتایج

بیشتری، بعنوان خروجی‌های نرم‌افزار و بر روی صفحه نمایشگر کامپیوتر ملاحظه نمود [۹و۴].

مراجع

1. L. E., Murr, "Shock Waves for Industrial Applications", Noyes Publications, USA, 1988.
2. T. Z., Blazynski, "Explosive Welding, Forming and Compaction", Applied Science, London, 1985.
3. B., Crossland, "Explosive welding of Metal and its Application", Oxford, 1982.
۴. ا. زمانی، "مطالعه تجربی و تحلیلی جوشکاری انفجاری لوله‌های هم‌محور فولاد ضدزنگ- فولاد کربنی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک به راهنمایی دکتر غلامحسین لیاقت، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.
5. F., Grignon, K. S., Benson, "Explosive welding of Aluminum to Aluminum: Analysis, Computations and Experiments", Int. J. Impact Engng., Article in Press.
۶. م. دامغانی نوری، "جوشکاری انفجاری لوله‌های هم‌محور"، رساله دکتری مهندسی مکانیک به راهنمایی دکتر غلامحسین لیاقت، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۱.
۷. غ. ح. لیاقت، م. دامغانی نوری، ح. یزدانی، "جوشکاری انفجاری لوله‌ها"، ششمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۵.
8. P. W., Cooper, "Explosives Engineering", WILEY-VCH, 1996.
۹. ا. درویش، غ. ح. لیاقت، م. دامغانی نوری، "شبیه‌سازی دوبعدی کرنش لوله در فرآیند جوشکاری انفجاری"، مجله فنی و مهندسی مدرس، اسفند ۱۳۸۰.



شکل ۱. مکانیزم انجام جوشکاری انفجاری در هندسه مسطح و موازی

معلوم بودن سرعت انفجار نیز، با دو مجهول مواجه خواهیم بود که عبارتند از سرعت برخورد و زاویه دینامیکی برخورد. با توجه به ماهیت ویژه فرآیند که امکان هرگونه اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات را سلب می‌نماید، معمولاً از آزمایشگاهی نظیر آزمایش «صفحه پرنده» و «معادلات گرنی» برای برآورد تقریبی سرعت برخورد استفاده می‌شود. پس از محاسبه تقریبی این سرعت، محاسبه زاویه دینامیکی برخورد نیز با استفاده از رابطه (۶) امکان پذیر می‌گردد. در جوشکاری استوانه‌ها معمولاً فرض می‌گردد که لوله پرنده پس از گذر از فاصله قرار (که معمولاً بین نیم تا دو برابر ضخامت فلز پرنده انتخاب می‌گردد) به سرعتی می‌رسد که به «سرعت حدی» یا نهایی (V_t') معروف است. برای یک استوانه فلزی که از ماده منفجره‌ای با «انرژی گرنی E_G » پر شده است، این سرعت از رابطه معروف زیر بدست می‌آید [۸]:

$$V_t' = \sqrt{(2E_G)} \left[\frac{2R}{2+R} \right]^{0.5} \quad (7)$$

که در این رابطه، R برابر نسبت جرم ماده منفجره به جرم فلز است.

بعنوان مثال، با توجه به چگالی طولی 1.3 kg/m برای لوله پرنده رده ۵ و چگالی 1.0 gr/cm^3 برای ماده منفجره TNT و با احتساب طول 10 cm برای لوله خواهیم داشت:

$$R = \frac{C}{M} = \frac{70}{130} = 0.538$$

$$E_G \text{ (For HNS With } \rho=1.0 \text{ gr/cc)} \cong 3360 \text{ J/gr}$$

$$V_t' = \sqrt{(2E_G)} \left[\frac{2R}{2+R} \right]^{0.5} \\ = \sqrt{(2 \times 3360 \times 10^3)} \left[\frac{2 \times 0.538}{2 + 0.538} \right]^{0.5} \cong 1688 \text{ m/s}$$

که با توجه به سرعت حدود 4850 m/s برای ماده منفجره مورد استفاده و با استفاده از رابطه (۶)، زاویه دینامیکی برخورد برابر خواهد بود با:

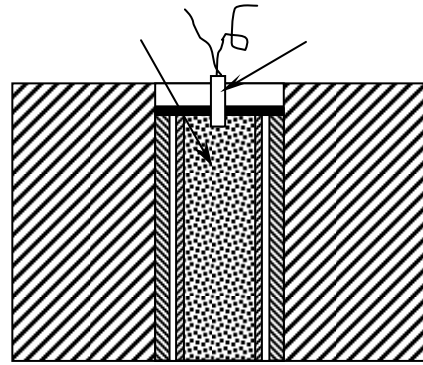
$$\beta = \tan^{-1}(V_t'/V_C) = \tan^{-1}(1688/4850) = 19.19^\circ$$

با مراجعه به پنجره جوشکاری شکل ۵، ملاحظه می‌شود که نقطه به مختصات (1688,19.19) در داخل این پنجره قرار داشته و لذا همخوانی خوبی بین پیش‌بینی پنجره جوشکاری و نتایج عملی وجود دارد.

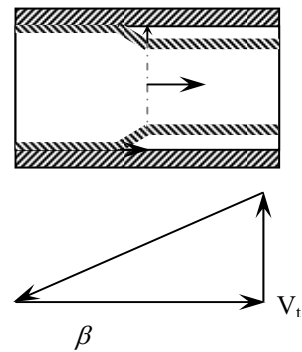
گذشته از این روابط تقریبی، امکان شبیه‌سازی کامپیوتری فرآیند نیز وجود دارد. با انجام چنین کاری می‌توان از میزان سعی و خطاها کاست و این پارامترها را با دقت



شکل ۶. به ترتیب از چپ: کربنی، ضدزنگ رده ۴۰ و رده ۵



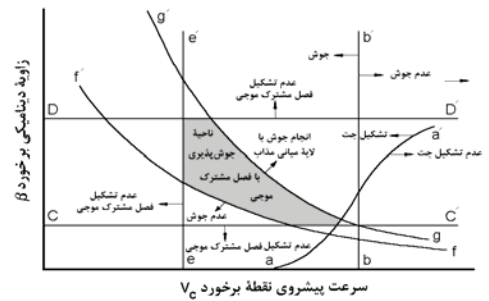
شکل ۲ چیدمان انفجار بخارج (EWP) در جوشکاری استوانه‌ها



شکل ۳. دیاگرام سینماتیکی سرعت در جوشکاری استوانه‌ها



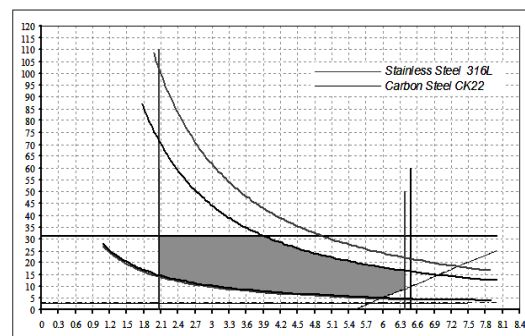
شکل ۷. سندان فولادی ساخته شده



شکل ۴. پنجره جوشکاری (محدوده جوش پذیری یک فلز)



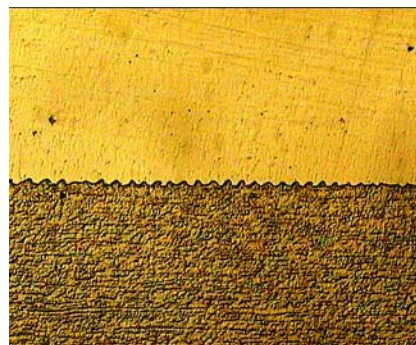
شکل ۸. لوله دو جداره برش داده شده



شکل ۵. پنجره جوشکاری فولاد کربنی و فولاد ضدزنگ



شکل ۹، فصل مشترک دو لوله (لوله پرنده رده ۵) (۳۰ برابر)



شکل ۱۰، فصل مشترک دو لوله (لوله پرنده رده ۴۰) (۳۰ برابر)