

ساخت لوله‌های دوجدار فولاد و فسفر - برنز به روش

جوشکاری انفجاری

غلامحسین لیاقت^{۱*}، سید احمد دهقان منشادی^۲

۱- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۵

ghlia530@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: تیر ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۷)

چکیده- مهمترین توانایی جوشکاری انفجاری در هندسه استوانه‌ای، پوشش‌دهی سطوح استوانه‌ای به منظور افزایش مقاومت به خوردگی، سایش و همچنین بهبود خواص مکانیکی است. در این مقاله، فرایند جوشکاری انفجاری لوله‌های دوجدار فولاد St-۳۷ و فسفر- برنز با استفاده از دو ماده منفجره TNT و آماتول ۵-۹۵ با سرعت‌های انفجاری متفاوت مطالعه شده است. در ابتدا با استفاده از روابط تحلیلی- تجربی موجود، پنجره جوش‌پذیری این دو فلز ترسیم شده و سپس با انجام آزمایش‌های متعدد، نقش کلیدی سرعت انفجار و همچنین موقعیت انتخاب پارامترها از پنجره جوشکاری در جوش‌پذیری دو فلز مورد بحث و بررسی قرار گرفته و همچنین روش تولید موفق اینگونه لوله‌ها ارائه شده است.

کلید واژگان: جوشکاری انفجاری، ماده منفجره، سرعت انفجار، فصل مشترک موجی.

Manufacturing of Bimetal Tubes Made of st-37 and Phosphor-Bronze Using Explosive Welding

G.H.Liaghat^{1*}, S.A.Deaghan Manshadi²

1- Prof. of Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University

2- M. Sc., Student of Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University

*P.O.Box: 14115-143, Tehran, Iran

ghlia530@modares.ac.ir

Abstract

The most important application of explosive welding in cylindrical geometry is cladding of cylindrical surfaces in order to increase corrosion and wear resistance and also improving the mechanical properties of bimetal product. In this study, the explosive welding of bimetal tubes made of steel and Phosphor-Bronze was investigated using two explosives (TNT and Amatol 5-95) with different explosion velocity. At first the explosive window of two metals was achieved using the theoretical-experimental relations, and then using different experiments, the key role of explosion velocity and also the position of selected parameters of explosive window in the metals weldability were determined. At the end, the successful method of manufacturing of this bimetal tubes is presented and commented upon.

Keywords: Explosive Welding, Explosive, Explosive velocity, Wavy Interface

۱- مقدمه

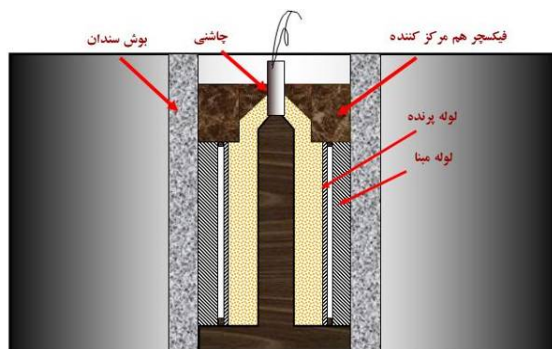
جوش انفجاری بر اثر برخورد مورب و با سرعت بالای دو فلز به یکدیگر به وجود می‌آید. به دلیل استفاده از مواد منفجره و سرعت بالای فرایند، کنترل پارامترها در حین عملیات جوشکاری امکان‌پذیر نیست و لازم است متغیرهای فرایند قبلاً به طور صحیح انتخاب شوند. این متغیرها که مشتمل است بر آماده‌سازی سطوح، فاصله توقف، تنظیم اولیه، مقدار خرج انفجاری، سرعت و انرژی انفجار، بر اساس خواص مکانیکی و فیزیکی فلزهایی که به هم متصل می‌شوند انتخاب می‌شود [۱]. جوشکاری انفجاری در ابتدا به عنوان روشی که فقط در موارد نادر و برای تولید اتصالاتی که ساخت آنها با روشهای متداول جوشکاری غیر ممکن بود مطرح شد، اما جذابیت صنعتی این روش باعث توسعه سریع آن شد [۲].

با آنکه مطالعات اولیه بیشتر بر پوشش‌دهی صفحات تخت متمرکز بود، اما با توسعه علمی و صنعتی این روش، پوشش‌دهی لوله‌ها و سطوح انحنا دار را هم به سرعت دربر گرفت. اولین اتصال انفجاری، در سال ۱۹۶۲ میلادی توسط «فیلیپچاک»^۱ به ثبت رسیده است [۲]. توسعه فرایند برای تولید لوله‌های دو جدار نیز توسط این محقق به انجام رسیده و سپس توسط محققان دیگری دنبال شده است [۲] و [۳]. در ایران تحقیقات اولیه در زمینه جوشکاری انفجاری استوانه‌های هم‌محور و همچنین توبی‌گذاری استوانه‌ها ابتدا توسط «یزدانی» و «لیاقت» [۴] و نیز «دامغانی» و «لیاقت» [۵] آغاز شده است. اخیراً تحقیقات و تلاشها در این زمینه، بیشتر در راستای کاربردی کردن و شناساندن این روش به بخش صنعت بوده است. یکی از این تحقیقات، کار تجربی و مطالعاتی «زمانی» و «لیاقت» [۶] در زمینه جوش انفجاری لوله‌های دو جدار «فولاد کربنی و فولاد

ضد زنگ» است که تحقیق حاضر نیز در ادامه همین راه انجام شده است.

اهمیت مقاله حاضر، کاربرد آن در پوشش‌دهی سطح داخلی لوله فولادی با فلز فسفر برنز، به منظور افزایش مقاومت سایش آن است. تولید این لوله دوجدار که از آن در تهیه یک قطعه پمپ صنعتی استفاده می‌شود، با روشهای معمول جوشکاری امکان‌پذیر نیست. برای این قبیل لوله‌ها که هم از نظر فنی و هم از نظر اقتصادی بسیار قابل توجه است، کاربردهای بسیاری را می‌توان در صنایع شیمیایی، هسته‌ای، نظامی، غذایی و مانند آن برشمرد.

برای ساخت این لوله دوجدار از روش «انفجار به خارج»^۲ استفاده شده است. در این روش، موج شوک تولید شده از انفجار، باعث تغییر شکل پلاستیک و شتاب گرفتن «لوله پرنده»^۳ در گذر از «فاصله توقف»^۴ می‌شود که برخورد آن به «لوله مینا»^۵، باعث تشکیل لایه‌ای بسیار نازک از مذاب (در حد چند لایه اتمی) در سطح مشترک دو فلز شده که بیشتر آن به سبب تشکیل جت، از سیستم بیرون ریخته می‌شود. سپس فشار بالای بین دو فلز باعث ایجاد فصل مشترک موجی بین دو فلز می‌شود [۳].



شکل ۱ چیدمان جوشکاری انفجاری لوله‌ها به روش انفجار به خارج [۳ و ۷]

2. Explosive Welding Process
3. Flyer Pipe
4. Stand-Off
5. Base Pipe

1. Philipchuk

۲- فرضیه‌ها

شرایط اصلی برای تحقق جوش انفجاری عبارتند از [۳]:

- ۱- سرعت کافی ضربه برای ایجاد فشار مورد نیاز، (حداقل ۱۰ برابر تنش تسلیم استاتیکی جزء قویتر اتصال)
- ۲- افزایش زاویه برخورد از یک مقدار حداقل که با کمک فشار ضربه باعث تشکیل جت می‌شود.

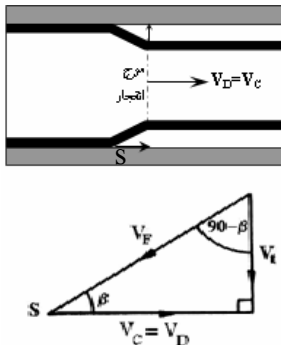
سرعت ضربه و زاویه برخورد با یکدیگر تعیین کننده سرعت نقطه برخورد است که برای ارضای شرط دو باید کمتر از سرعت صوت باشند. با تحقق دو شرط فوق، مقاومت اتصال بین دو فلز به دو عامل زیر بستگی دارد:

الف) بزرگی سرعت ضربه و زاویه برخورد (که خود به پارامترهایی نظیر: سرعت انفجار، ضخامت و شکل خرج، ضخامت ضربه گیر و جسم پرنده، فاصله توقف و زاویه استاتیکی بستگی دارد).

ب) میزان صافی سطوح برخورد کننده که اثر آن تسهیل در ستردن لایه اکسید و دیگر آلاینده‌ها از روی سطح فلزها و تشکیل جت است.

بیشتر پارامترهای جوشکاری انفجاری به نحوی به یکدیگر وابسته بوده یا دارای آثار مهم ثانویه هستند. برای مثال چنانچه سطوح برخورد از صافی سطح کافی برخوردار نباشد لازم است سرعت ضربه بیشتر از اندازه معمول در نظر گرفته شود تا دامنه امواج فصل مشترک یا ضخامت جت تشکیل شده بیشتر از ارتفاع ناهمواری سطح شود. برای افزایش سرعت ضربه نیز برای مثال می‌توان فاصله توقف را زیاد کرد [۳]. لازم است تذکر دهیم که سرعت برخورد یا سرعت ضربه (V_t)، سرعت نقطه برخورد (V_c) و زاویه دینامیکی برخورد (β)، به «پارامترهای برخورد» معروف بوده و جزو پارامترهای اساسی جوشکاری انفجاری محسوب می‌شود.

این پارامترها توسط منحنی موسوم به «دیاگرام سینماتیکی»^۱ در شکل زیر به هم ارتباط پیدا می‌کنند.



شکل ۲ دیاگرام سینماتیکی پارامترهای اصلی برخورد [۳]

مشاهده می‌شود که در این چیدمان، سرعت پیشروی نقطه برخورد، برابر با سرعت انفجار است یعنی:

$$V_C = V_D \quad (۱)$$

با دانستن سرعت برخورد لوله (V_t) زاویه دینامیکی برخورد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\beta = \tan^{-1} \left[V_t / V_c \right] \quad (۲)$$

برای پیش‌بینی سرعت برخورد لوله پرنده، روابط تجربی و نیمه تجربی مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از روابط پیشنهادی، رابطه معروف «گرنی»^۲ است که سرعت لوله پرنده را به صورت تابعی از پارامترهای E_G و R به دست می‌دهد [۳]:

$$V_t = \sqrt{2E_G} \left[\frac{R}{\left(1 + \frac{1}{2}R\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۳)$$

1. Kinematic Diagram
2. Gurney

در این رابطه :

R : نسبت جرم ماده منفجره به جرم لوله پرنده است.
 E_G : انرژی مخصوص^۴ (انرژی بر واحد جرم) یا انرژی است می‌باشد که مشخصه ماده منفجره محسوب می‌شود و برابر مقداری از انرژی شیمیایی ماده در حالت اولیه است که به انرژی جنبشی یا کار مکانیکی در حالت نهایی تبدیل می‌شود. (باقی‌مانده به صورت‌های دیگر انرژی، مانند گرما تبدیل می‌شود).

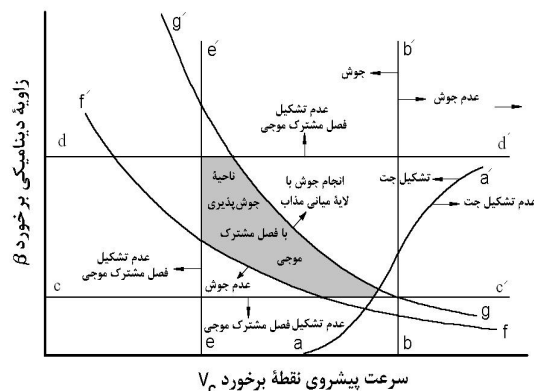
با توجه به مطالب گفته شده، ضروری به نظر می‌رسد که پارامترهای مؤثر در فرایند، از حداقل مقدار لازم برای حصول جوش مطلوب برخوردار بوده یا به بیان بهتر، در محدوده کاربردی خود قرار داشته باشند. قرار داشتن در این محدوده بدین معنا است که عبور از یک حد مجاز بالایی نیز کیفیت جوش را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین با انتخاب پارامترهای اساسی جوشکاری انفجاری در این محدوده مناسب که به «محدوده جوش‌پذیری» فلز یا «پنجره جوشکاری»^۵ فلز معروف است، می‌توان به جوش مناسبی دست یافت. متداول است که این پنجره، بر روی دستگاه مختصات که محور افقی آن معرف سرعت انفجار (V_D) - که در چیدمان موازی برابر سرعت پیشروی نقطه برخورد (V_C) است - و محور عمودی آن معرف زاویه دینامیکی برخورد (β) است، ترسیم شود. پارامترهای بحرانی لازم برای ترسیم پنجره جوشکاری 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_t) مرتبط است.

همه این پارامترها را می‌توان مطابق شکل زیر، به‌طور همزمان بر روی دستگاه ($V_C - \beta$)، با هفت مرز مشخص کرد:



شکل ۳ پنجره جوشکاری [۲ و ۵]

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 [۵]:

$$\beta = 10(V_C - 5/5) \quad (4)$$

که در این رابطه V_C با واحد (Km/s) جایگذاری می‌شود.
 ب) خط bb' : این خط معرف حد بالای سرعت V_C است و $1/2$ تا $1/5$ برابر سرعت صوت در فلز تخمین زده می‌شود [۳]. سرعت انتشار موج صوتی را می‌توان از رابطه ۵ به‌دست آورد.

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

4. Specific Energy
 5. Explosive Window

باقیمانده که حدود آن باید مشخص شود، سرعت برخورد فلز پرنده است که مسؤول تولید فشار و انرژی ضربه‌ای محسوب می‌شود.

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 کرد. رابطه تجربی زیر توسط «دریباس»^۴ و «ویتمن»^۵ برای توصیف این منحنی ارائه شده است [۲ و ۸]:

$$\beta = k_1 \left(\frac{H}{\rho V_c^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۷)$$

که H معرف سختی ویکرز فلز است و β برحسب رادیان به‌دست می‌آید. ضریب k_1 برای سطوح فلزی کاملاً پرداخت شده برابر، $۰/۶$ و برای سطوح به خوبی پرداخت نشده $۱/۲$ جایگزین می‌شود.

ز) خط gg' : این منحنی مرز بیشینه سرعت فلز پرنده را مشخص می‌کند که فراتر از آن، به دلیل افزایش انرژی ضربه، عیوبی نظیر تشکیل نواحی مذاب، پوسته شدن و مانند آن در فصل مشترک بروز می‌کند. «دریباس» رابطه تجربی زیر را برای این مرز پیشنهاد کرده است [۲]:

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{k_2}{t_f^{0.75} V_c^{1.75}} \quad (۸)$$

$$k_2 = \left[\frac{E}{12\rho(1-\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{که در آن}$$

در این رابطه C_s سرعت صوت، E مدول الاستیک و ρ چگالی ماده است.

ج) خط cc' : این خط معرف مرز پایین زاویه دینامیکی برخورد است که کمتر از آن، مرز مشترک موجی تشکیل نمی‌شود.

د) خط dd' : این خط معرف مرز بالای زاویه دینامیکی برخورد است که فراتر از آن، مرز مشترک موجی تشکیل نمی‌شود. حدود پایین و بالای زاویه (β) ، به‌طور تجربی توسط «کراسلند»^۱ و «بهرانی»^۲، به ترتیب برابر با ۲ تا ۳ درجه و ۳۱ درجه پیشنهاد شده است [۲].

ه) خط ee' : این خط معرف حد پایین سرعت پیشروی نقطه برخورد است که در این سرعت، انتقال از حالت فصل مشترک موجی به غیر موجی بروز می‌کند. بر مبنای فرضیه هیدرودینامیک و تشابه با جریان سیال، این انتقال در عدد رینولدزی که با رابطه زیر محاسبه می‌شود رخ می‌دهد [۲]:

$$R_e = \frac{(\rho_f + \rho_p)V_c^2}{2(H_f + H_p)} \quad (۹)$$

که در این رابطه، زیرنویس‌های f و p ، به ترتیب فلز پرنده و ساکن بوده و H معرف سختی ویکرز فلز برحسب (N/m^2) است که معیاری از مقاومت ماده محسوب می‌شود. براساس این تحلیل که توسط «کوان»^۳ ارائه شده، انتقال از فصل مشترک موجی به غیر موجی برای بیشتر فلزها در $R_e = ۱۰/۶$ رخ می‌دهد که این مقدار در آزمایشهای مختلف تأیید شده است. تنها عامل

4. Deribas
5. Wittman

1. Crossland
2. Bahrani
3. Cowan

جدول ۱ خواص مکانیکی و فیزیکی لوله‌های مورد استفاده

نوع فلز	چگالی (Kg/m^3)	سختی ویکرز (Kg/mm^2)	مدول الاستیک (GPa)
۳۱۶St	۷۸۰۰	۲۲۰	۲۰۷
فسفر - برنز	۹۲۰۰	۹۵	۱۰۰

۳-۱ محاسبه حداقل سرعت پیشروی نقطه جوش

این سرعت از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

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

$$= \sqrt{\frac{2 \times 10.6 \times (220 + 95) \times 9.81 \times 10^6}{(9200 + 7800)}} = 1963 \text{ m/s}$$

مقدار به دست آمده، کمترین سرعت انفجار ماده

منفجره مورد استفاده را نیز مشخص می‌سازد.

۳-۲ محاسبه حداکثر سرعت پیشروی نقطه جوش

این سرعت نیز حداکثر ۱/۲ تا ۱/۵ برابر سرعت صوت در فلز تخمین زده می‌شود، اگرچه بسیار محافظه کارانه است که کاملاً زیر سرعت صوت باقی بماند. سرعت صوت در فولاد ۳۷-St با استفاده از رابطه ۵ برابر است با:

$$C_{s \text{ Steel}} = \sqrt{\frac{207 \times 10^9}{7800}} = 5152 \text{ m/s}$$

و برای فسفر برنز برابر است با:

ناحیه هاشور خورده شکل ۳، منطقه محصور بین این هفت خط را نشان می‌دهد که در آن جوش باکیفیت را می‌توان انتظار داشت. لازم است تذکر دهیم که پنجره مشخص شده، شرایط جوش پذیری یک نوع فلز را مشخص می‌سازند، و برای حالتی که جنس فلزها صفحات مینا و پرنده متفاوت باشد، پنجره جوشکاری هر فلز باید به طور جداگانه ترسیم شده و سپس بر یگدیگر هم قرار داده شوند. ناحیه‌ای که به طور مشترک در هر دو پنجره قرار دارد، پنجره جوشکاری دو فلزی را تشکیل می‌دهد. تذکر این نکته ضروری است که روابط توصیف کننده این مقادیر حدی، همه تجربی‌اند و لذا طبیعی است که پنجره حاصل، پنجره‌ای تقریبی باشد. اما از آنجا که این روابط در طی آزمایشهای متعدد انجام شده توسط محققان مختلف، کارایی خود را به اثبات رسانده‌اند، می‌توان تا حد زیادی به آنها اعتماد کرد؛ به علاوه با فاصله گرفتن از مرزها و نزدیک شدن به مرکز پنجره، میزان دقت در انتخاب پارامترها بسیار افزایش می‌یابد. این موضوع در این تحقیق نیز به اثبات رسیده است.

۳-۳ پنجره جوشکاری «فولاد»- «فسفر - برنز»

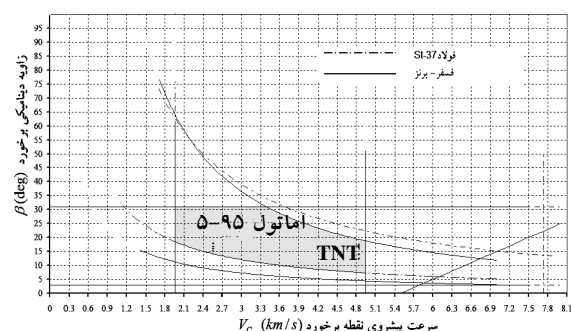
برای ترسیم پنجره جوشکاری لوله‌های فولاد و فسفر-برنز، در ابتدا ضروری است نوع و خواص مکانیکی و فلزی هر دو لوله مشخص شود. در انجام این آزمایشها، از لوله‌های فولادی با قطر خارجی ۵۰ mm و قطر داخلی ۲۸ mm و لوله‌های فسفر-برنز با قطر خارجی ۲۵ mm و ضخامت جدار ۱/۵ mm به عنوان لوله داخلی استفاده شده است. اطلاعات مربوط به خواص مکانیکی و فیزیکی لوله‌های مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

$$\beta = 2 \sin^{-1} \left[\left(\frac{100 \times 10^9}{12 \times 9200 \times 0.5} \right)^{1/2} / \left(0.0015^{1/20} \times V_C^{1/20} \right) \right]$$

$$= 2 \sin^{-1} \left(\frac{6839}{V_C^{1/20}} \right)$$

۳-۵ محاسبه سایر پارامترهای برخورد

این پارامترها که شامل مرز بحرانی تشکیل جت و مرز بالا و پایین زاویه برخورد دینامیکی می‌شود، مانند موارد توضیح داده شده در بند قبل (پنجره جوشکاری) قابل محاسبه است. در شکل زیر در ابتدا با استفاده از معادلات ارائه شده در بندهای قبلی، پنجره جوشکاری دو فلز در یک دستگاه مختصات ترسیم شده و سپس به منظور به دست آوردن محدوده جوش پذیری دو فلز فولاد St-۳۷ و فسفر-برنز، محدوده‌ای که داخل هر دو پنجره قرار می‌گیرد، به صورت رنگی نشان داده شده است.



شکل ۴ پنجره جوشکاری فلزهای فولاد St-۳۷ و فسفر-برنز، همراه با موقعیت نقاط مربوط به آزمایشهای انجام شده با استفاده از TNT و آماتول ۵-۹۵ [۷]

۴- روش انجام آزمایشها

آزمایشهای جوش انفجاری با استفاده از دو ماده منفجره TNT و آماتول ۵-۹۵ (شامل ۹۵ درصد TNT و ۵ درصد نیترات آمونیوم) که به ترتیب با سرعتهای انفجاری 4850 m/s و 2560 m/s انجام شده است. چگالی مواد

$$C_s = \sqrt{\frac{100 \times 10^9}{9200}} \cong 3297 \text{ m/s}$$

۳-۳ محاسبه حداقل سرعت برخورد

رابطه ۷ معرف شکل منحنی حداقل سرعت برخورد است که باید در صفحه $(V_C - \beta)$ و در بازه بین حداقل و حداکثر سرعت برخورد- که از بندهای قبل محاسبه شده - ترسیم شود. شکل این رابطه برای فولاد St-۳۷ به صورت زیر:

$$\beta_{Steel} = 1/2 \left(\frac{22 \times 9/8 \times 10^6}{7800 \times V_C^2} \right)^{1/2} = \frac{631/2}{V_C}$$

و برای فسفر-برنز به صورت زیر است:

$$\beta = 1/2 \left(\frac{95 \times 9/8 \times 10^6}{9200 \times V_C^2} \right)^{1/2} = \frac{382}{V_C}$$

۳-۴ محاسبه حداکثر سرعت برخورد

منحنی حداکثر سرعت برخورد دو فلز از رابطه ۸ به دست می‌آید. شکل این منحنی برای لوله فولادی با قطر mm ۵۰ و ضخامت mm ۱۱، به صورت زیر:

$$\beta_{Steel} = 2 \sin^{-1} \left[\left(\frac{207 \times 10^9}{12 \times 7800 \times 0.4} \right)^{1/2} / \left(0.0011^{1/20} \times V_C^{1/20} \right) \right]$$

$$= 2 \sin^{-1} \left(\frac{7260}{V_C^{1/20}} \right)$$

و برای لوله فسفر-برنز با قطر خارجی mm ۲۵ و ضخامت mm ۱/۵ به صورت زیر است:

منفجره به کار رفته برابر 0.8 gr/cm^3 است. مشخصات ابعادی لوله‌های مورد استفاده در آزمایشها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ مشخصات ابعادی لوله‌های مورد استفاده (به میلیمتر) [۷]

جنس لوله	قطر خارجی	قطر داخلی	ضخامت	طول
فولاد St-۳۷	۵۰	۲۸	۱۱	۶۰
فسفر- برنز	۲۵	۲۲	۱/۵	۶۰

اطلاعات مربوط به خواص مکانیکی و فیزیکی لوله‌ها در جدول ۱ ذکر شده است. در شکل ۴ تصویر این لوله‌ها همراه با نگهدارنده‌های هم‌مرکزکننده بالا و پایین و همچنین مغزی چوبی وسط - که برای کنترل مقدار ماده منفجره به کار می‌رود - نشان داده شده است.



شکل ۵ لوله‌های فولاد St-۳۷ و فسفر برنز همراه با نگهدارنده‌های به کار رفته در آزمایشها [۷]

«سندان» خارجی مورد استفاده دارای ابعاد خارجی $25 \times 25 \times 12 \text{ cm}$ بوده و جنس آن از نوعی فولاد آلیاژی مقاوم در برابر بارگذاری ضربه‌ای انتخاب شده است.

1. Anvil

فاصله توقف و ضخامت لوله پرنده برابر $1/5 \text{ mm}$ انتخاب شده است. در این تحقیق ۳ آزمایش با استفاده از ماده منفجره TNT و ۴ آزمایش نیز با ماده منفجره آماتول ۵-۹۵ انجام شده است. جزئیات آزمایشها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ پارامترهای آزمایشها [۷]

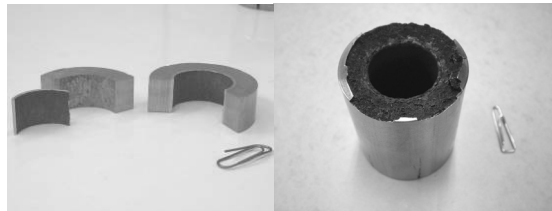
شماره آزمایش	ماده منفجره	مقدار ماده منفجره (gr)	جرم لوله پرنده و ضربه گیر (gr)	بارگذاری انفجاری (R)
۱	TNT	۲۳	۶۱	۰/۳۸
۲	TNT	۱۵/۵	۷۰	۰/۲۲
۳	TNT	۱۳	۷۲	۰/۱۸
۴	آماتول ۵-۹۵	۱۲	۶۱	۰/۲
۵	آماتول ۵-۹۵	۱۳/۵	۶۱	۰/۲۲
۶	آماتول ۵-۹۵	۱۵/۵	۶۵	۰/۲۴
۷	آماتول ۵-۹۵	۱۸	۶۳	۰/۲۹

در ادامه نحوه چیدمان و روش انجام آزمایشها توضیح داده می‌شود. قبل از نصب کردن لوله‌ها، لازم است سطوح برخورد دو لوله (سطح خارجی لوله پرنده و سطح داخلی لوله مبنا) با استفاده از «اتانول ۹۶ درجه» به خوبی شستشو داده شود تا لایه چربی و روغن موجود از روی آن پاک شود. پس از شستشو و خشک شدن لوله‌ها ابتدا لوله‌ها را بر روی هم‌مرکزکننده تفلونی و مغزی چوبی سوار کرده و سپس هم‌مرکزکننده بالایی بر روی مجموعه مونتاژ می‌شود. در ادامه مواد منفجره که وزن آن اندازه‌گیری شده، از منفذ بالایی هم‌مرکزکننده (محل قرار گیری

استاندارد «ASTME ۴۰۷-۱۹۹۹»، همچنین نحوه تهیه تصاویر با میکروسکوپ نوری از استاندارد «ASTME ۸۸۳-۲۰۰۲» استفاده شده است.

۵- نتایج و بحث

شکل ۷ نمونه حاصل از اولین آزمایش را نشان می‌دهد، که با استفاده از بیشترین مقدار ماده منفجره TNT (۲۳ گرم) انجام شده است. برای اطمینان اولیه از جوش خوردن دو لوله، قطعی از لوله برش داده شد، به محض برش، لایه فسفر-برنز از سطح فولادی جدا شد.



شکل ۷ نمونه حاصل از آزمایش اول، قبل و بعد از برش [۷]

بررسی فصل مشترک روی سطح فولادی نشان می‌دهد که لایه‌ای از فسفر-برنز بر روی سطح آن چسبیده است. برای بررسی دقیق‌تر فصل مشترک با آزمایش متالوگرافی، یک لایه نازک آلومینیومی بین دو قطعه قرار داده شد و سپس نمونه‌ها مانت شد و پس از آماده سازی نمونه‌ها، تصاویری از فصل مشترک، با استفاده از میکروسکوپ نوری تهیه شد که در شکل ۸ نشان داده شده است.

بررسی نتایج متالوگرافی نشان می‌دهد که در کل فصل مشترک و به‌طور پیوسته، لایه‌ای از مذاب در حد فاصل فولاد و فسفر-برنز ایجاد شده و فصل مشترکی را بدون موج‌های منظم به‌وجود آورده است. علت تشکیل مذاب در فصل مشترک، زیاد بودن سرعت

چاشنی) به داخل ریخته می‌شود. پس از خرج گذاری، مجموعه داخل سندان قرار گرفته و پس از بستن پیچهای مربوط، سندان به داخل راکتور انفجاری که قابلیت استهلاک صدا و امواج منتشر شده در هوا را دارد، منتقل می‌شود.

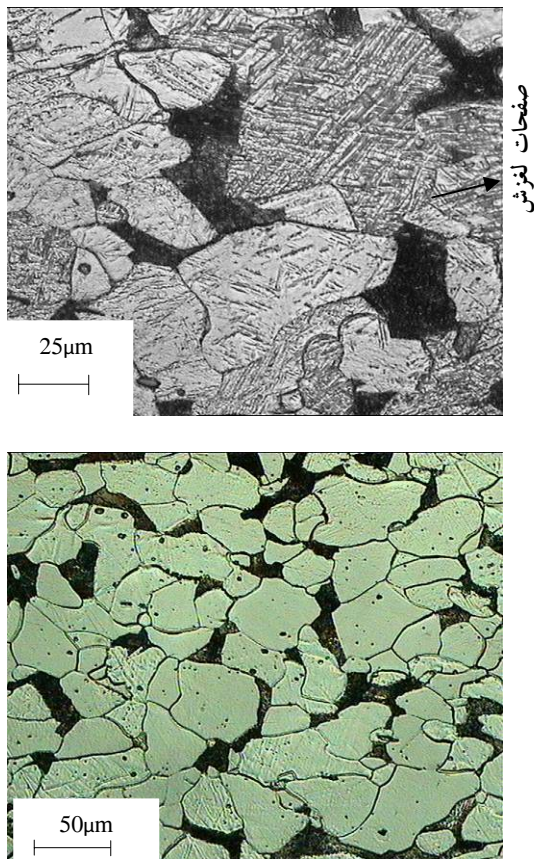


شکل ۶ راکتور انفجاری و مجموعه آماده شده قبل از انفجار [۷]

پس از چاشنی گذاری و بسته شدن در راکتور، انفجار انجام می‌شود.

پس از انفجار و خارج کردن لوله‌ها از سندان، به‌منظور بررسی اولیه اتصال لوله‌ها، لازم است نمونه‌ها در راستای شعاعی و طولی برش داده شود. چنانچه اجزای نمونه پس از برش جدا نشدند، آنگاه به‌منظور بررسی دقیق‌تر فصل مشترک لوله‌ها، لازم است آزمایش متالوگرافی نیز بر روی نمونه انجام شود. تمامی مراحل آماده سازی نمونه مطابق استانداردهای خاص آن انجام می‌شود. در این تحقیق، برای آماده سازی نمونه‌های متالوگرافی از استاندارد «ASTME ۳-۲۰۰۱» و برای میکرو اچ فلزها از

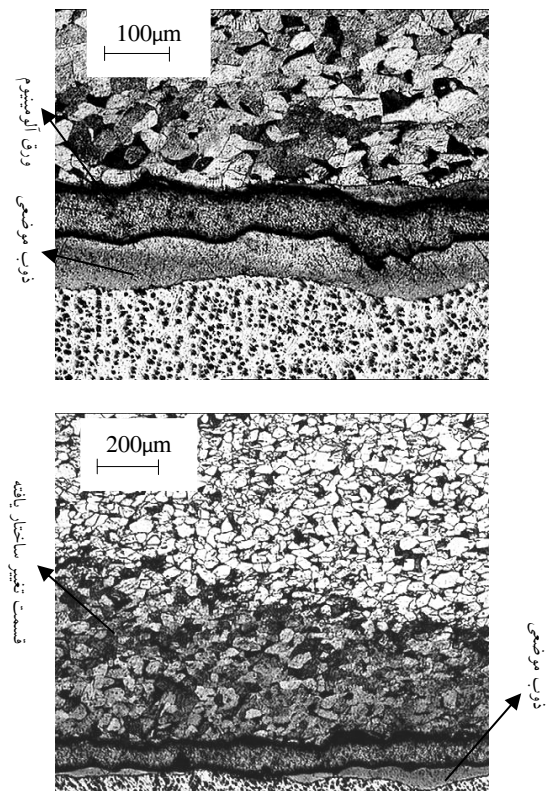
به‌طور کاملاً واضح دچار تغییر ساختار شده است. شکل ۹ تصویر متالوگرافی بزرگ شده از قسمت فولادی، نزدیک و دور از فصل مشترک را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، در منطقه تغییر ساختار یافته (تصویر بالا) مقادیر زیادی صفحات لغزش مشترک هیچگونه آثاری از تغییر ساختار و خطوط لغزش وجود ندارد. علت این تغییر ساختار، بالا بودن میزان بارگذاری انفجاری و ضربه شدید بین دو فلز است که در نواحی نزدیک فصل مشترک باعث لغزش دانه‌ها بر روی یکدیگر شده است.



شکل ۹ تصویر متالوگرافی از قسمت فولادی، نزدیک و دور از فصل مشترک، بزرگنمایی به ترتیب از بالا ۴۰۰X و ۲۰۰X [۷]

پدیده جالب دیگری که در انتهای لوله‌ها اتفاق افتاده و

برخورد دو فلز می‌شود. جت تشکیل شده در سرعت برخورد بالاتر، به‌طور جزیی یا کامل در بین امواج فصل مشترک محبوس می‌شود. انرژی جنبشی جت در گردها، به صورت حرارت تلف شده و باعث ایجاد مذاب در مرکز گرداب می‌شود. هر چه انرژی جنبشی جت بیشتر باشد، منطقه مذاب، بزرگتر و بیشتر قابل رویت خواهد بود. افزایش انرژی جنبشی جت می‌تواند باعث ایجاد یک لایه پیوسته مذاب در فصل مشترک گردد [۲] و [۹].



شکل ۸ مرز مشترک جوش دو فلز (۲۳ گرم TNT) لایه بالا: فولاد St-۳۷، لایه پایین: فسفر- برنز، بزرگنمایی به ترتیب از بالا ۱۰۰X و ۵۰X [۷]

همچنین همانطور که تصویر پایینی شکل ۸ نشان داده است، لایه‌ای به ضخامت تقریبی ۰/۷-۰/۲ mm از قسمت فولادی نیز

با به دست آمدن انرژی انفجاری و از تقسیم کردن آن بر انرژی گرانی (E_G) - که برای ماده منفجره TNT برابر 3360 J/gr است - جرم ماده منفجره مورد نیاز به دست می آید:

$$m_e = \frac{E_e}{E_G} = \frac{53/249 \times 10^3}{3360} \cong 15/5 \text{ gr} \quad (10)$$

شکل ۱۰ نمونه حاصل از آزمایش دوم را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود در این آزمایش، پدیده شکست کششی در انتهای لوله ها اتفاق نیفتاده و همچنین کیفیت سطح داخلی لوله فسفر برنز نیز - به علت استفاده از ضربه گیر لاستیکی - بهبود یافته است.



شکل ۱۰ نمونه حاصل از آزمایش دوم، قبل از برش [۷]

در برش روی لوله ها، قسمت فسفر- برنز از قسمت فولادی جدا نشد، لذا نمونه تهیه شده، برای انجام آزمایش متالوگرافی، آماده شد. شکل ۱۱ تصویری از متالوگرافی فصل مشترک دو فلز را نشان می دهد.

در تصویر سمت راست شکل ۷ نیز نشان داده شده، «پوسته ای شدن» انتهای لوله ها است، یعنی در حدود ۲ تا ۳ میلیمتر از انتهای لوله ها جدا شده است. این همان «شکست کششی» بوده و ناشی از بالا بودن مقدار بارگذاری انفجاری است.

مورد دیگری نیز که از بررسی سطح داخلی لوله سفر- برنز مشاهده می شود، نامطلوب بودن کیفیت سطح داخلی آن است که ناشی از تماس مستقیم ماده منفجره قوی با سطح داخلی فسفر- برنز است. لذا برای برطرف کردن این مشکل لازم است از ضربه گیر مناسبی بین سطح داخلی لوله فسفربرنز و ماده منفجره استفاده شود.

با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده از این آزمایش، در آزمایش بعد، از مقدار کمتری ماده منفجره استفاده شده و همچنین از یک ضربه گیر لاستیکی بین ماده منفجره و سطح داخلی لوله فسفر برنز استفاده شده است. برای به دست آوردن مقدار ماده منفجره در این آزمایش، از رابطه زیر استفاده شده است. این رابطه، انرژی مورد نیاز را برای جوشکاری انفجاری لوله های کوتاه در روش انفجار به خارج تعیین می کند [۳] و [۹]:

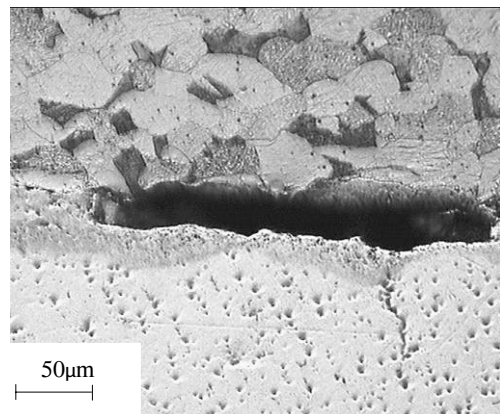
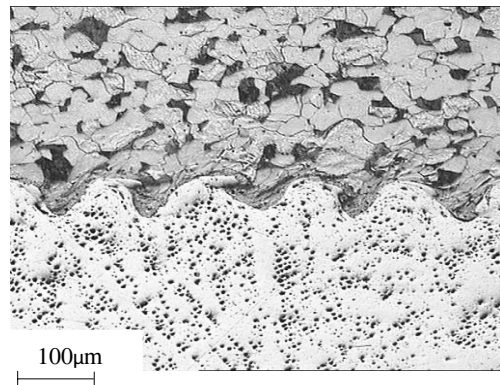
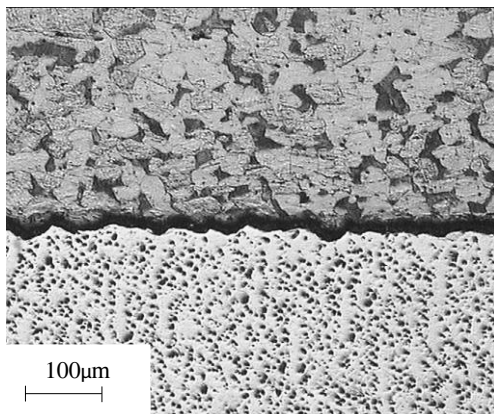
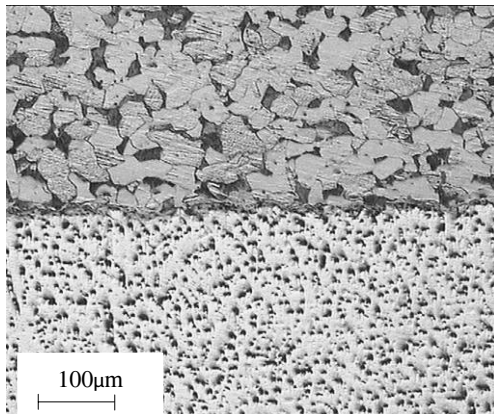
$$E_e = 0.0226 \rho_f V_D^2 d_{ip}^{1/5} t_f^{1/5} L \quad (9)$$

پارامترهای به کار رفته در این رابطه، به ترتیب از سمت چپ عبارتند از: چگالی لوله پرنده، سرعت انفجار ماده منفجره، قطر داخلی لوله مینا (بیرونی)، ضخامت لوله پرنده و طول لوله ها. با جاگذاری پارامترها در رابطه داریم:

$$E_e = 0.0226 \times 9200 \times 4850^2 \times 0.028^{1/5} \times 0.015^{1/5} \times 0.06 \cong 53/249 \times 10^3$$

1. Spalling

(۳) مقادیر سرعت برخورد لوله پرنده همراه با زاویه دینامیکی برخورد محاسبه و در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۱۱ مرز مشترک جوش دو فلز (۱۵/۵ گرم TNT)، بزرگنمایی به ترتیب بالا برابر ۱۰۰ و ۲۰۰ برابر [۷]

شکل ۱۲ مرز مشترک جوش دو فلز (۱۳ گرم TNT)، بزرگنمایی ۱۰۰ برابر [۷]

جدول ۴ پارامترهای انتخاب شده در آزمایش مرحله اول [۷]

شماره آزمایش	مقدار ماده منفجره (gr)	بارگذاری انفجاری (R)	سرعت برخورد لوله پرنده (m/s)	زاویه دینامیکی برخورد (درجه)
۱	۲۳	۰/۳۸	۱۴۶۵	۱۶/۸
۲	۱۵/۵	۰/۲۲	۱۱۵۴	۱۳/۴
۳	۱۳	۰/۱۸	۱۰۵۳	۱۲/۳

همانطور که مشاهده می‌شود، در برخی نقاط فصل مشترک (تصویر بالا)، اتصالی کامل همراه با موج‌های نسبتاً منظم به وجود آمده و در برخی نقاط دیگر (تصویر پایین)، بین دو فلز جدایش وجود دارد.

در ادامه، یک آزمایش نیز با مقدار کمتری ماده منفجره (۱۳ گرم) انجام شده است. بررسی تصاویر متالوگرافی این مرحله در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که در بیشتر نقاط اتصال، فصل مشترک صاف به وجود آمده و در برخی نقاط دیگر نیز، مانند نمونه قبلی، جدایش بین دو فلز مشاهده می‌شود.

برای بررسی علت جدایش ایجاد شده در فصل مشترک فلزها لازم است موقعیت پارامترهای انتخاب شده در پنجره جوشکاری مشخص گردد. لذا با استفاده از روابط (۲) و

$$\%16 \cong \frac{15/5 - 13}{15/5} \times 100 = \text{درصد خطا}$$

از آنجا که رابطه گرانی، رابطه‌ای کاملاً تجربی است و نیز با توجه به ماهیت ضربه‌ای این فرایند، این مقدار خطا قابل قبول است.

همانطور که گفته شد، در برخی نقاط فصل مشترک، برای دو نمونه با ۱۳ و ۱۵/۵ گرم ماده منفجره، جدایش ایجاد شده است، که علت این پدیده را باید در سرعت بالای انفجار TNT جستجو کرد. سرعت انفجار ماده منفجره، مهمترین عامل اثرگذار بر سرعت برخورد، تشکیل جت، انرژی برخورد و به‌طور کلی کیفیت جوش است [۱۰]. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، سرعت پیشروی نقطه برخورد باید کمتر از سرعت صوت در صفحات پرنده و مبنا باشد. با این حال برخی مراجع مانند [۲] ۱/۲ تا ۱/۵ برابر V_t را نیز برای سرعت انفجار در پنجره جوشکاری تخمین زده‌اند.



شکل ۱۳ وجود جدایش در فصل مشترک اتصال فولاد و فسفر-برنز، بزرگنمایی ۵۰۰ برابر [۷]

مقادیر محاسبه شده در این جدول، بر روی پنجره جوشکاری شکل ۴ نیز مشخص شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تمامی نقاط، در داخل محدوده جوش‌پذیری دو فلز قرار گرفته‌اند، دو نقطه پایینی محدوده TNT، مربوط به ۱۳ و ۱۵/۵ گرم ماده منفجره می‌باشد که تقریباً در وسط پنجره واقع شده است.

با افزایش R برای ۲۳ گرم TNT این مقدار به نزدیکی مرز بالای پنجره نزدیک شده است. به ازای این مقدار ماده منفجره (برای $R=0/38$)، مطابق شکل ۸ مناطق ذوب شده به‌صورت یک لایه پیوسته و در سرتاسر فصل مشترک ظاهر شده که باعث گسستگی اتصال شده است. علت این جدایش را می‌توان چنین بیان کرد که با ضخیم شدن لایه مذاب، فرصت کافی برای سرد شدن و انجماد آن وجود نداشته و چون این منطقه هنوز استحکام کافی نیافته، لذا برگشت موج کششی به فصل مشترک، موجب گسستگی اتصال شده است.

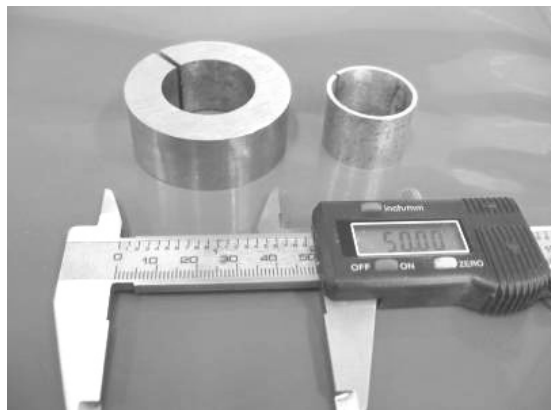
بررسی تصاویر متالوگرافی دو نمونه ۱۳ و ۱۵/۵ گرم ماده منفجره، نشان می‌دهد که با افزایش R، فصل مشترک از حالت تخت به موجی شکل تبدیل شده است. فصل مشترک تخت به ازای ۱۳ گرم TNT بین دو فلز ایجاد شده است. با استفاده از رابطه گرانی، کمترین مقدار انرژی مورد نیاز برای اتصال دو فلزی - که فصل مشترک تخت است - محاسبه می‌شود [۸] و [۹]. در اینجا برطبق رابطه گرانی، کمترین مقدار ماده منفجره برای ایجاد اتصال با استفاده از TNT برابر $m_e = 15/5 \text{ gr}$ به‌دست آمده است. لذا درصد خطای ایجاد شده بین این دو مقدار برابر است با:

$$E_e = 0.0226 \times 92.0 \times 256.0^2 \times 0.028^{1/5} \times 0.0015^{1/5} \times 0.06 \cong 14/836 \times 10^3$$

و با استفاده از رابطه زیر برای محاسبه جرم ماده منفجره داریم:

$$m_e = \frac{E_e}{E_G} = \frac{14/836 \times 10^3}{130.2} \cong 12gr$$

لذا آزمایشهای انجام شده در این مرحله، با استفاده از مقادیر ۱۲-۱۳/۵-۱۵/۵ و ۱۸ گرم ماده منفجره انجام شده است. نمونه‌های حاصل از مقادیر کمتر ماده منفجره یعنی ۱۲ و ۱۳/۵ گرم، مطابق شکل ۱۴، بعد از برش کاملاً از یکدیگر جدا شدند و بر روی سطح فولاد نیز هیچگونه آثاری از لایه فسفر برنز مشاهده نشد؛ یعنی انفجار فقط باعث انبساط لوله فسفر برنز تا حد رسیدن به سطح فولادی شده و هیچگونه اتصالی بین دو فلز ایجاد نشده است.



شکل ۱۴ نمونه جوش نخورده از آزمایش مرحله دوم [۷]

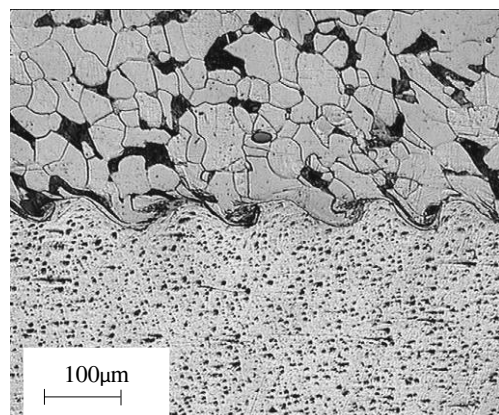
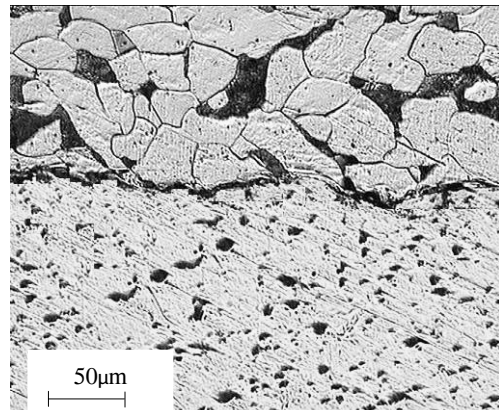
برای مقادیر ۱۵/۵ و ۱۸ گرم ماده منفجره، اتصال برقرار شده بود، لذا نمونه‌های برش خورده برای انجام آزمایش متالوگرافی آماده شد. بررسی تصاویر متالوگرافی شکل

با توجه به سرعت انفجار $V_D = 4850 m/s$ TNT و نیز سرعت صوت در لوله فسفر- برنز $V_s = 3300 m/s$ می‌توان دریافت که سرعت انفجار در محدوده بالایی ۱/۵ برابر سرعت صوت در فسفر- برنز قرار گرفته است. لذا به دلیل بالا بودن سرعت انفجار، گذر امواج کششی برگشتی از فصل مشترک از یکسو و همچنین ناکافی بودن زمان پایداری فشار دینامیکی برای نزدیک شدن آنها از سوی دیگر، باعث جدایش اتصال در برخی نقاط فصل مشترک شده است. برای برطرف کردن این عیب و اطمینان از این فرضیه، لازم است مجموعه‌ای از آزمایش‌ها، نیز با سرعت انفجار پایین‌تر انجام شود. لذا آزمایشهای بعدی با استفاده از ماده منفجره آماتول ۵-۹۵ با سرعت انفجار m/s ۲۵۶۰، انجام شده است. مقدار ماده منفجره مورد نیاز برای انجام آزمایش، از رابطه گرانی به دست آمده است. از آنجا که مقدار انرژی گرانی مربوط به این ماده منفجره در منابع مربوط به مواد منفجره موجود نبود، لذا از انرژی گرانی ماده منفجره‌ای که از لحاظ خواص تا حد زیادی به این ماده نزدیک بود، استفاده شده است. نزدیک‌ترین ماده منفجره به «آماتول ۵-۹۵» از نظر خواص، AN-6% fuel oil (آنفو) است که انرژی گرانی آن برابر است با:

$$E_G = 31.0 cal/gr = 130.2 J/gr$$

با در دست داشتن سرعت انفجار آماتول ۵-۹۵ ($V_D = 2560 m/s$) و نیز سایر پارامترهای هندسی داریم:

۱۵ برای ۲ مقدار ۱۵/۵ و ۱۸ گرم ماده منفجره، نشان می‌دهد که بیشتر مناطق در نمونه با ۱۵/۵ گرم ماده منفجره دارای فصل مشترک صاف و بدون امواج بوده و در بعضی مناطق نیز فصل مشترک با موج های کوچک و نسبتاً منظم دیده می‌شود.



شکل ۱۵ مرز مشترک جوش دو فلز (به ترتیب از بالا ۱۵/۵ و ۱۸ گرم «آماتول ۹۵-۵»، بزرگنمایی ۲۰۰ برابر و ۱۰۰ برابر [۷])

اما برای نمونه با ۱۸ گرم ماده منفجره، تقریباً در کل فصل مشترک موج‌های نسبتاً منظم مشاهده می‌شود. تصاویر فوق، نشان دهنده برقراری جوش کاملاً موفق و ممتاز بین فلز پرنده و فصل مشترک کاملاً پیوسته و موجی

شکلی تشکیل شده، هیچگونه اثری از بسته‌های مذاب محبوس شده در میان امواج نیز مشاهده نمی‌شود. این دو مشخصه، مهمترین ملاک برای موفقیت فرایند جوش انفجاری دو فلز محسوب می‌شوند [۳] و [۷]. علت تبدیل فصل مشترک تخت به فصل مشترک موجی با افزایش بارگذاری انفجاری را می‌توان چنین توضیح داد که با افزایش بارگذاری انفجاری، انرژی انفجار افزایش یافته و باعث افزایش فشار برخورد بین دو فلز می‌شود که در نهایت باعث تغییر شکل بیشتر فصل مشترک و ایجاد فصل مشترک موجی می‌شود [۱۱] و [۱۲] و [۱۳].

در جدول ۵ مقادیر محاسبه شده سرعت برخورد لوله پرنده همراه با زاویه دینامیکی برخورد برای تعیین موقعیت پارامترهای انتخاب شده در پنجره جوشکاری آورده شده است.

جدول ۵ پارامترهای انتخاب شده در آزمایش مرحله دوم [۷]

شماره آزمایش	مقدار ماده منفجره (gr)	بارگذاری انفجاری (R)	سرعت برخورد لوله پرنده (m/s)	زاویه دینامیکی برخورد (درجه)
۴	۱۲	۰/۲	۶۸۸	۱۵
۵	۱۳/۵	۰/۲۲	۷۱۸	۱۵/۷
۶	۱۵/۵	۰/۲۴	۷۴۷	۱۶/۳
۷	۱۸	۰/۲۹	۸۱۲	۱۷/۶

با مراجعه به پنجره جوشکاری و ثبت این نقاط در پنجره مشاهده می‌شود که تمامی این نقاط تقریباً در محدوده پایینی پنجره، نزدیک به مرز پایینی که معرف حداقل زاویه دینامیکی برخورد، برای شکل‌گیری جت است قرار گرفته‌اند.

لذا دلیل جوش نخوردن لوله‌ها با مقادیر ۱۲ و ۱۳/۵ گرم ماده منفجره را می‌توان کافی نبودن سرعت برخورد

مطلوب، لازم است پارامترها را حتی‌الامکان در وسط پنجره جوشکاری و به دور از لبه‌ها انتخاب کنیم.

- بررسی نتایج به‌دست آمده از آزمایشها نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ماده منفجره (بارگذاری انفجاری) فصل مشترک از حالت تخت به موجی شکل تبدیل می‌شود.

۷- منابع

- [1] ASM Handbook, "Welding, brazing and soldering", Vol 6, 9 edition, 1983
- [2] Crossland, B., "Explosive welding of Metal and its Application", Oxford, 1982.
- [3] Blazynski, T. Z., "Explosive Welding, Forming and Compaction", Applied Science, London, 1985.
- [4] غ.ح.، لیاقت، م.، دامغانی، ح.، یزدانی، "جوشکاری انفجاری لوله‌ها"، ششمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۵.
- [5] م.، دامغانی نوری، "جوشکاری انفجاری لوله‌های هم محور"، رساله دکتری مهندسی مکانیک (به راهنمایی دکتر غلامحسین لیاقت)، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۱.
- [6] زمانی، ا.، "مطالعه تحلیلی و تجربی جوشکاری انفجاری لوله‌های هم محور فولاد ضدزنگ- فولاد کربنی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، (به راهنمایی دکتر غلامحسین لیاقت)، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.
- [7] س.ا. دهقان منشادی، "تدوین فرایند جوشکاری انفجاری لوله‌های دوجداره فولاد و آلایز برنز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (به راهنمایی دکتر غلامحسین لیاقت)، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- [8] Grignon, F., Benson, K. S., "Explosive welding of Aluminum to Aluminum:

لوله‌ها عنوان کرد. به ازای $m = 15/5 gr$ اتصال با فصل مشترک نسبتاً تخت بین دو فلز ایجاد شد، لذا درصد خطای ایجاد شده با مقدار به‌دست آمده از رابطه گرنی $m_g = 12 gr$ برابر است با:

$$\text{درصد خطا} = \frac{15/5 - 12}{15/5} \times 100 \cong 22\%$$

در مورد میزان خطای ایجاد شده، علاوه بر تجربی بودن رابطه گرنی و ضربه ای بودن ماهیت فرایند به این نکته نیز باید توجه کرد که در اینجا برای محاسبه مقدار ماده منفجره از مقدار انرژی گرنی مربوط به یک ماده منفجره با شرایط نزدیک به آماتول ۵-۹۵ استفاده شده که همین مسأله می‌تواند درصد خطا را افزایش دهد.

با افزایش مقدار ماده منفجره به ازای ۱۸ گرم ماده منفجره، فصل مشترکی کاملاً موجی بدون هیچ گونه جدایش بین دو فلز ایجاد شده است.

۶- نتیجه‌گیری

- پوشش‌دهی سطح داخلی لوله‌های فولادی به‌وسیله لوله فسفر- برنز به روش جوشکاری انفجاری، با موفقیت قابل انجام است.
- آزمایشهای انجام شده در این تحقیق نشان داد که استفاده از ماده منفجره با سرعت انفجار بالاتر از سرعت صوت در دو لوله، باعث ایجاد جدایش در برخی نقاط فصل مشترک می‌شود، لذا لازم است حتی‌الامکان از ماده منفجره‌ای با سرعت انفجار زیر سرعت صوت استفاده شود.
- نتایج آزمایشهای انجام شده نشان داد که نزدیک شدن به مرز پایین یا بالای پنجره جوشکاری باعث عدم اتصال مطلوب بین دو فلز می‌شود، لذا برای ایجاد اتصال

- [12] Kacar R., Acarer M., " An investigation on the explosive cladding of 316L stainless steel-din-P355GH steel ", Journal of Materials Processing Technology 152 (2004) pp. 91–96
- [13] Kaçar R., Acarer M., " Microstructure–property relationship in explosively welded duplex stainless steel–steel ", Materials Science and Engineering A363 (2003) pp. 290–296
- Analysis, Computations and Experiments", Int. J. Impact Engng., 2003.
- [9] Kudinov V.M., Zakharenko I.D., " Criteria for selecting the parametrs of explosion welding", Welding production, 1985, No.9 pp.1-3
- [10] Raghugandan K., Balasubramanian V., "Modelling of process parameters in explosive cladding of mildsteel and aluminium ", Journal of Materials Processing Technology. 63 (1997) pp. 83–88.
- [11] Acarer M., Gulenc B., Findik F., " Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength ", Materials and Design 24 (2003) pp. 659–664.