

جوشکاری اصطکاکی مس خالص - فولاد زنگ‌نزن در فناوری تجهیزات خلأ بسیار بالا

مرتضی امیری^۱، امجد سازگار^{۲*}، محسن شایان‌مهر^۱، علیرضا زائری امیرانی^۳

۱. پژوهشگر سازمان انرژی اتمی ایران، تهران - ایران.

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران.

۳. مدیرعامل شرکت دانش بنیان فرتاک امیران صنعت فراتولید، تهران- ایران.

چکیده

در این تحقیق، برای اولین بار در فناوری ساخت تجهیزات خلأ بسیار بالا، فرآیند جوشکاری اصطکاکی به‌عنوان فرآیند جایگزین به‌طور دقیق به‌صورت تجربی پیاده‌سازی شده است. فرآیند جوشکاری اصطکاکی جزو فرآیندهای اتصال‌دهی حالت جامد می‌باشند که برخلاف فرآیندهای جوشکاری ذوبی، تأثیرات مخرب متالورژیکی ناشی از حرارت ناحیه ذوب به‌ویژه در فلز مس خالص به حداقل ممکن خواهد رسید. پس از بررسی و مطالعه متالورژی جوش مس خالص و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی با بهره‌گیری از طراحی آزمایش‌ها فرآیند جوش اصطکاکی برای تمامی اتصالات انجام گردید. تست خلأ هلیومی و فشار خلأ، تست فشار مثبت، تست متالوگرافی و آزمون‌های ریزساختاری بر روی نمونه‌های اتصال داده‌شده انجام گردید. نتایج حاکی از مطلوب بودن فرآیند جوش اصطکاکی برای اتصال قطعات مس خالص عاری از اکسیژن به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی برای کاربردهای خلأ بسیار بالا می‌باشد. **کلیدواژه‌ها:** جوش اصطکاکی، خلأ بسیار بالا، مس اکسیژن‌زدایی شده، فولاد زنگ‌نزن، شتاب‌دهنده ذرات مغناطیسی.

Friction Welding of Pure Copper to Austenitic Stainless Steel in Ultra-High Vacuum Equipment Technology

Morteza Amiri¹, Amjad Sazgar^{2*}, Mohsen Shayanmehr¹, Alireza Zaeri Amirani³

1. Researcher of AEOI, Tehran-Iran

2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran-Iran.

3. Manager of Fartak Amiran Sanat Faratolid, Tehran- Iran.

Abstract:

In this research, regarding complexity of melting welding processes application in oxygen-free high conductivity (OFHC) copper, the friction welding process as an alternative process has been thoroughly investigated in manufacturing technology of ultra-high vacuum equipment. Despite fusion welding process, friction welding process as the solid destructive metallurgical effects of melting zone heat especially on pure copper. Initially, the conceptual study was conducted to be aware of the metallurgy of pure copper and stainless steel welding. Then, the experimental test was implemented for all joining by using DOE. Helium leak detection, ultimate vacuum pressure, positive pressure, metallography, and microstructure tests were performed on the joining samples. For ultra-high vacuum applications, the results indicate that the friction welding process is desirable to join pure oxygen-free copper parts to stainless steel.

Keywords: Friction Welding, Ultra-High Vacuum, OFHC, Stainless Steel, Synchrotron.

۱. مقدمه

در فناوری طراحی و ساخت تجهیزات خلأ بسیار بالا، مهم‌ترین پارامتر کنترلی رسیدن به فشار خلأ نهایی می‌باشد؛ به طوری که به منظور رسیدن به فشار خلأ نهایی در فناوری این تجهیزات، فاکتورهای مهمی از قبیل انتخاب و شکل‌دهی متریال، نوع اتصال‌دهی و فرآیند جوشکاری و فرآیند شستشو بسیار حائز اهمیت هستند. در میان این پارامترهای مهم و تأثیرگذار، نوع اتصال‌دهی و انتخاب نوع فرآیند جوشکاری با توجه به متریال‌های کاربردی مطابق با استانداردهای بین‌المللی نظیر انجمن جوشکاری آمریکا در فناوری تجهیزات خلأ از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. مواد انتخابی باید از نظر مکانیکی به راحتی قابل شکل‌دهی بوده و بتوان آن‌ها را به راحتی ماشین‌کاری نمود. همچنین این مواد باید از قابلیت بالایی در اتصال به روش جوشکاری و لحیم‌کاری برخوردار باشند. از متریال‌های کاربردی در حوزه فناوری طراحی و ساخت تجهیزات خلأ می‌توان به فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی گروه ۳۰۰، مس خالص عاری از اکسیژن، آلومینیوم، تانتالیم، مولیبدن و سرامیک اشاره نمود [۱]. با توجه به الزامات استاندارد متریال‌های کاربردی، بهینه‌ترین فرآیند اتصال‌دهی و جوشکاری انتخاب می‌شود؛ به طوری که برای این منظور فرآیندهای جوشکاری نظیر جوش اصطکاکی^۲، فرآیند جوش پرتو الکترونی، جوش نفوذی، جوش اصطکاکی اغتشاشی و لحیم‌کاری القائی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].

در زمینه فرآیند جوش اصطکاکی در فناوری تجهیزات خلأ بسیار بالا تحقیقات اندکی صورت پذیرفته است. این روش، روشی نوین و در حال توسعه برای اتصال مواد و فلزاتی همچون مس خالص با پیچیدگی‌های متالورژیکی است. در سال ۲۰۱۴ شانگجوی^۳ به بررسی استحکام جوش اصطکاکی مس به فولاد زنگ‌نزن در فشار مثبت پرداخته است [۳]. در سال ۲۰۱۵ لو^۴ جوش اصطکاکی مس به فلزات غیرهمجنس [۴] و واهیبو^۵ آنالیز میکروسکوپی روی اتصالات جوش اصطکاکی مس را بررسی کردند [۵]. در سال ۲۰۱۶ مومین^۶ پارامترهای جوش اصطکاکی مس به فولادهای زنگ‌نزن را بهینه‌سازی نمود [۶]. فلوریان^۷ تغییر شکل و تبلور مجدد ریزساختار ناحیه اتصال با روش جوش اصطکاکی برای فلزات مس، آلومینیوم و فولاد زنگ‌نزن مورد مطالعه قرار داد [۷].

در این پژوهش، با توجه به چالش‌هایی همچون محدودیت سطح تکنولوژیکی و دانش فنی برای انجام فرآیندهای بریزینگ و محدودیت دستگاه‌های جوش پرتو الکترونی با قابلیت جوشکاری مس در توان بالاتر از ۱۴ کیلووات، فرآیند جوش اصطکاکی مس اکسیژن‌زدایی شده به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی در فناوری ساخت تجهیزات خلأ بسیار بالای محفظه شتاب‌دهنده‌های سنکروترون مورد بررسی دقیق قرار گرفته است. بررسی و ارزیابی متغیرهای مستقل فرآیند (نیرو یا فشار اصطکاکی، سرعت حرکت دورانی، زمان اصطکاک و فشار فورج نهایی)، انجام تست‌های متالورژیکی (ماکرو، میکروساختار و خواص مکانیکی)، انجام تست‌های فشار مثبت (جهت بررسی استحکام اتصال ایجادشده) و فشار نهایی خلأ فعالیت‌های صورت گرفته در این پژوهش می‌باشند.

۲. روش کار

۲.۱. فرآیند جوشکاری اصطکاکی

اساس فرآیند جوشکاری اصطکاکی بر اصل تبدیل انرژی مکانیکی (جنشی) به انرژی گرمایی استوار است. با حرکت دورانی سریع یکی از قطعات بر روی دیگری و ایجاد مالش و اصطکاک بین دو قطعه، گرمای زیادی تولید می‌شود که نتیجه آن ایجاد تغییر شکل پلاستیک (یا خمیری شکل) در سطوح می‌باشد. با اعمال فشار نهایی، سطوح دو قطعه در هم فرورفته و اتصال انجام می‌گیرد. مراحل کامل جوشکاری اصطکاکی در شکل ۱ نشان داده شده است [۸].

² Friction Welding

³ Shanjeevi

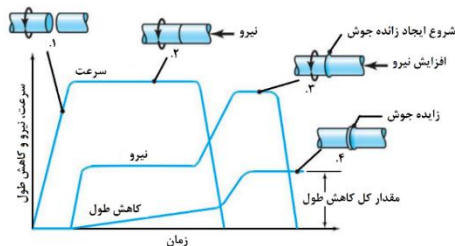
⁴ Lou

⁵ Wahyu

⁶ Mumin

⁷ Florian

ایجاد اتصال بر اساس قانون اصطکاک نرمال صورت می‌گیرد. با توجه به رابطه $F = \mu \cdot N$ ، نیروی اصطکاکی و N ، نیروی فشاری است که می‌تواند نیروی وزن جسم یا سایر نیروها باشد) با اعمال یک نیروی مکانیکی در صورت وجود اصطکاک (μ) نیرویی موسوم به نیروی اصطکاکی تولید می‌گردد [۸]. متغیرهای مستقل در فرآیند جوش اصطکاکی، نیرو یا فشار اصطکاکی، سرعت حرکت دورانی، زمان اصطکاک و فشار فورج نهایی می‌باشند.



شکل ۱. مراحل اساسی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی [۸].

هرکدام از متغیرهای مستقل برحسب مساحت سطح مقطع تماس، نقطه ذوب، ضریب هدایت حرارتی قطعه کار و تغییرات متالورژیکی که در اثر گرم شدن (حین انجام فرآیند) در قطعه به‌وجود می‌آید، تنظیم می‌شوند. فشار اصطکاکی به‌طور مستقیم بر میزان گشتاور موردنیاز برای جوشکاری تأثیر می‌گذارد [۸].

۲.۲. جوش اصطکاکی مس - فولاد زنگ‌نزن در فناوری تجهیزات خلأ بسیار بالا

۱.۲.۲. متالورژی جوش در مس اکسیژن‌زدایی‌شده OFHC

در متالورژی جوش مس، چهار ویژگی منحصربه‌فرد ضریب هدایت حرارتی، وجود اکسیژن، بازتاب بالا و ضریب انبساط حرارتی از اهمیت بسزایی برخوردار است (جدول ۱). جوشکاری مس تابع عوامل زیر می‌باشد [۹]:

- ✓ هدایت حرارتی بسیار بالای مس؛ در درجه حرارت عادی، هدایت حرارتی مس بسیار بالا می‌باشد.
- ✓ اگر مس حاوی اکسیژن باشد، قابلیت ترک‌برداشتن در جریان جوشکاری را خواهد داشت.
- ✓ اگر گرانیوی مس زیاد باشد، در حالت مذاب باعث سرریز شدن آن از درز جوش می‌گردد.
- ✓ انرژی پنهانی ذوب مس بزرگ است و در جریان جامد شدن این انرژی آزاد می‌شود.
- ✓ حضور همزمان هیدروژن و اکسیژن در مس در قابلیت جوشکاری آن نقش عمده‌ای دارد. در درجه حرارت بالای جوشکاری، هیدروژن به‌صورت اتمی به داخل مس نفوذ می‌کند (به‌ویژه در جوشکاری گازی) و اگر مس حاوی اکسیژن باشد با آن وارد واکنش شیمیایی می‌شود. در جوشکاری تجهیزات خلأ بسیار بالا به دلیل الزامات استاندارد، از جوشکاری در درجه حرارت‌های بالا و استفاده از مس اکسیژن دار اجتناب می‌گردد. بر این اساس از فرآیند جوش اصطکاکی و انتخاب متریال مس عاری از اکسیژن، جهت پیشگیری از پدیده هیدروژن تردی که ارتباط مستقیم با درجه حرارت جوشکاری و میزان اکسیژن موجود در مس دارد، استفاده شده است. با کاهش مقدار اکسیژن این پدیده نامطلوب نیز کاهش می‌یابد. [۹].

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی مس اکسیژن‌زدایی‌شده OFHC و فولاد زنگ‌نزن [۹]

نقطه ذوب (°C)	چگالی (g/cc)	مقاومت الکتریکی (Ω-cm)	هدایت حرارتی (W/m-k)	ضریب انبساط حرارتی	استحکام نهایی (Mpa)	مدول الاستیک (Mpa)	متریال
۱۰۸۳	۸٫۹۲	1.71×10^{-10}	۳۹۱	17.5×10^{-6}	۳۳۸	۱۱۵	مس اکسیژن‌زدایی‌شده OFHC
۱۳۸۵	۸٫۰	7.2×10^{-10}	۱۶٫۳	16.0×10^{-6}	۵۶۰	۱۹۳	فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L



با توجه به دلایل ذکر شده، در فرآیند جوشکاری باید مس استفاده شده کاملاً خالص بوده و فاقد ناخالصی بوده و تا حد امکان اکسیژن کمتری داشته باشد. مقدار اکسیژن در مس باید کمتر از ۰/۰۳ درصد باشد و اگر مس جوشکاری شده تحت تأثیر نیروهای مکانیکی قرار گیرد، باید مقدار اکسیژن آن از ۰/۰۱ درصد تجاوز نکند.

مس و آلیاژهای آن دارای ضریب انبساط حرارتی^۸ بالایی هستند که باعث تغییر شکل و تمرکز تنش در منطقه جوش پس از سرد شدن می‌گردد که این موضوع خود عامل تضعیف مرزهای بلوری و شکنندگی آن می‌باشد [۹].

بر اساس ویژگی‌های ذکر شده برای دستیابی به بهینه‌ترین شرایط جوشکاری در مس خالص برای کاربردهای تجهیزات خلأ بسیار بالا با الزامات تعیین شده در آنها، نیاز به تحلیل و بررسی‌های تجربی بر روی فرآیند جوشکاری اصطکاکی می‌باشد.

⁸ Coefficient of Thermal Expansion (CTE)

۲.۲.۲. جوشکاری اصطکاکی مس خالص عاری از اکسیژن به فولاد زنگ‌زن آستنیتی

در شکل ۲، نمونه‌های مورد ارزیابی که با فرآیند جوشکاری اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند، نشان داده شده است. هدف از انجام تست جوش اصطکاکی مس به استیل، بررسی امکان اتصال بوشن مسی به فلنج استیل در محفظه‌های خلأ شتاب‌دهنده‌های سنکروترون می‌باشد.



شکل ۲. الف) نمونه آماده‌سازی شده مس و استیل قبل از اتصال؛ ب) نمونه‌های اتصال داده شده مس به استیل با فرآیند جوش اصطکاکی.

۱.۲.۲.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

در جدول ۲ نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس دستورالعمل به‌کاربرده شده (WPS) برای جوش اصطکاکی نمونه‌های مورد آزمون نشان داده شده است. یکی از چالش‌های جوش اصطکاکی برای مواد غیرهمجنس، پارامتر میزان ضریب انبساط حرارتی برای هر یک از مواد می‌باشد. بدین منظور با توجه به شکل، ضریب انبساط حرارتی برای هر دو فلز مس و استیل مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر ضریب انبساط حرارتی برای هر دو فلز در محدوده دمایی 200°C - 500°C ، برابر با $(10^{-6}/\text{K})$ ۱۰-۱۵ می‌باشد؛ از این رو، حداقل چالش ممکن از این منظر برای اتصال دهی با فرآیند جوش اصطکاکی وجود دارد.

جدول ۲. دستورالعمل انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی مس به فولاد زنگ‌زن

مشخصات ابعاد و متریکال جوش			پارامترهای ماشین	
	بخش ثابت	بخش دورانی	فاصله اولیه (میلی‌متر)	۰٫۵
طراحی اتصال	لوله به لوله		مسیریابی مجدد (میلی‌متر)	۹۰
			فشار تماس اولیه (بار)	۶٫۵
طول کلی قطعات اولیه (میلی‌متر)	60 ± 0.1	60 ± 0.1	زمان تماس اولیه (ثانیه)	۰٫۳
قطر خارج جوش (میلی‌متر)	25 ± 0.05	20 ± 0.05	نوع اسپیندل	سرعت ثابت در تمام زمان جوشکاری
قطر داخل جوش (میلی‌متر)	8 ± 0.05	10 ± 0.05		بخش ثابت
جنس متریکال	مس خالص	فولاد زنگ‌زن آستنیتی		بخش دورانی
فرآیند آماده‌سازی سطح جوش	ماشینکاری	ماشینکاری	نوع گرفتن قطعات جوش	چاک کولت پنوماتیک
زبری سطح پس از آماده‌سازی (Ra)	۰٫۸	۰٫۶	سرعت حرکت قبل از جوش (سانتی‌متر بر ثانیه)	۱٫۲۷

تحميل كل فشار از قسمت ثابت (میلی‌متر)	ماکزیمم ۰٫۱	سرعت حرکت حین جوشکاری (سانتی‌متر بر ثانیه)	۰٫۰۰	۱٫۷۰
--	-------------	--	------	------

۳.۲.۲. طراحی آزمایش جوشکاری اصطکاکی

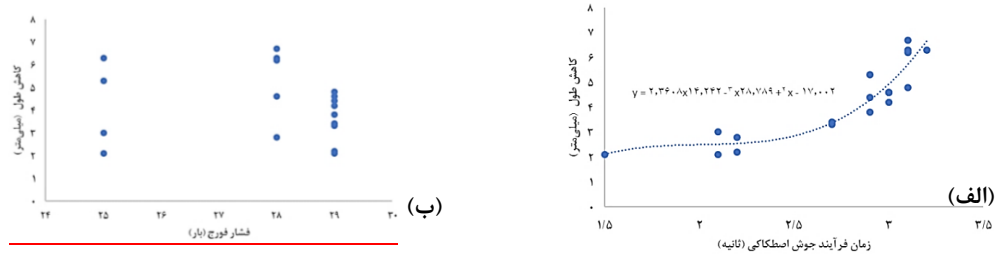
در این پژوهش، از طراحی آزمایش به منظور برنامه‌ریزی، طراحی، تجزیه و تحلیل تست‌ها استفاده شده است. آزمون‌هایی با مقادیر کاهش طول (BOL) کمتر از ۳ میلی‌متر نتایج قابل قبول هستند که در جدول ۲ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۳. طراحی آزمایش جوشکاری اصطکاکی مس به فولاد زنگ نزن

پارامترها	شماره نمونه‌ها																		
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹
فشار گرمایش (bar)	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵
زمان فشار گرمایش (s)	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
میزان فشار اصطکاک (bar)	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵
زمان فشار اصطکاک (s)	-	۱۵	۳۲	۳۱	۳۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۱	۳۱	۳۲	۳۱	۳۷	۳۹	۳۷	۳۹	۳۰	۳۰	۳۱
میزان فشار فورج (bar)	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹
زمان فشار فورج (s)	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
سرعت چرخش (RPM)	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰
طول ناحیه خمیری (mm)	۲٫۰	۲٫۱	۲٫۰	۳٫۰	۵٫۲	۴٫۶	۶٫۷	۲٫۸	۲٫۰	۲٫۰	۲٫۲	۲٫۱	۲٫۲	۴٫۴	۳٫۴	۳٫۸	۴٫۶	۴٫۲	۴٫۸

۳. نتایج

در شکل ۳ نتایج تحلیل داده‌های مربوط به طراحی آزمون جوش اصطکاکی مس به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، تغییرات کاهش طول نسبت به تغییرات زمان فرآیند و فشارهای فورج مختلف با توجه به آزمون‌های صورت گرفته، آورده شده است. در شکل ۳-الف) همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در حالت کلی با افزایش زمان فرآیند جوش اصطکاکی، کاهش طول بیشتر خواهد بود. در شکل ۳-ب) تغییرات کاهش طول نسبت به سه مقدار فشار فورج مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، در سطح بالای فشار فورج، میزان کاهش طول کمتری مشاهده می‌گردد.



شکل ۳. نتایج تحلیل داده‌های مربوط به طراحی آزمون جوش اصطکاک مس به فولاد زنگ‌نزن. الف) تغییرات کاهش طول نسبت به تغییرات زمان فرآیند؛ ب) تغییرات کاهش طول نسبت به سه مقدار فشار فورج مختلف.

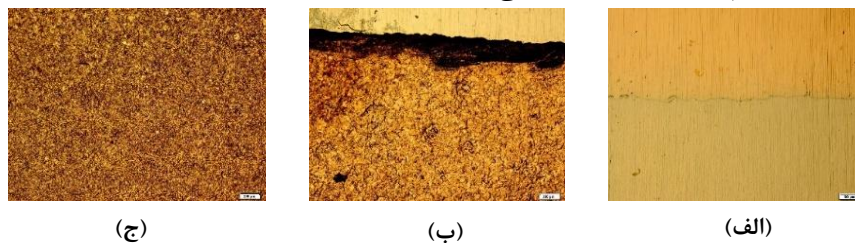
۱.۳. تست‌های متالورژیکی جوشکاری اصطکاک مس به فولاد زنگ نزن

قبل از انجام تست‌های متالورژیکی، نمونه‌ها تحت شرایط استاندارد برش داده شد (شکل ۵).



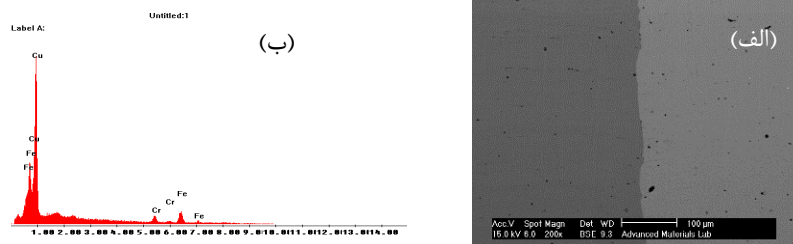
شکل ۴. نمونه‌های برش خورده جهت انجام تست‌های متالورژیکی.

در شکل ۵ نمونه‌های تست ماکرو مربوط به نواحی اتصال مس به استیل نشان داده شده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، در تمامی نمونه‌ها، هیچ‌گونه عدم اتصال ناقص و حفره دیده نشده است؛ همچنین، تست متالوگرافی مربوط به نواحی اتصال با هدف بررسی تغییرات اندازه دانه قبل و بعد از انجام فرآیند جوش اصطکاک صورت گرفته، آورده شده است.



شکل ۵. الف) تست ماکرو بر روی ناحیه اتصال مس به استیل؛ ب) متالوگرافی ناحیه اتصال مس به استیل؛ ج) متالوگرافی متریال مس پایه.

شکل ۶-الف، تصویر میکروساختاری نواحی اتصال مس به استیل بعد از انجام فرآیند جوش اصطکاک با هدف بررسی باند ایجاد شده در ناحیه اتصال را نشان می‌دهد که با میکروسکوپ الکترونی تصویربرداری شده است. در شکل ۶-ب، نتایج تست طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس مربوط به نواحی اتصال مس به استیل با هدف بررسی میزان ناخالصی و ترکیبات بین فلزی به وجود آمده نشان داده شده است.



شکل ۶. نتایج تست طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس. (الف) باند ایجاد شده در ناحیه اتصال؛ (ب) میزان ناخالصی و ترکیبات بین فلزی.

۲.۳. تست‌های فشار مثبت و خلأ

ابتدا، تست فشار مثبت مطابق با استاندارد ASME Sec-8 در مدت زمان ۳۰ ثانیه، ۵۰ درصد از فشار نامی ۹۰ بار بر نمونه اعمال گردید و ۳ دقیقه در این فشار نگه داشته شد، سپس طی ۳۰ ثانیه به فشار ۱۹۰ بار رسید و به مدت ۳۰ ثانیه در این شرایط نگه داشته شد. در مرحله بعد، تست فشار منفی یا خلأ برای دستیابی به میزان فشار خلأ 10^{-1} میلی بار انجام شد. قبل از انجام تست فشار خلأ، تست نشتیابی هلیمی به منظور عدم نشتی با نرخ نشتی 10^{-12} میلی‌بار.لیتر بر ثانیه برای نمونه‌ها انجام شده است. تست فشار مثبت و خلأ نمونه‌ها مورد تأیید قرار گرفت.

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

جوش اصطکاکی برای اتصال مس خالص به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی در تجهیزات خلأ بسیار بالا مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر حاصل گردید:

- در ناحیه اتصال مس به استیل، هیچگونه ترکیبات بین فلزی ناشی از حرارت ایجاد شده تحت تأثیر مالش و اصطکاک بین دو قطعه مشاهده نشد.
 - حداقل تغییرات در میزان اندازه دانه بین ناحیه اتصال و مواد پایه مشاهده شد.
 - هر چه فشار فورج کم و سرعت چرخش بالا باشد، در نتیجه از نرخ فرو بردن کاسته می‌شود و بالعکس.
 - نرخ بالای فرو بردن، پهنای منطقه متأثر از حرارت جوش را کاهش می‌دهد.
 - منطقه متأثر از حرارت جوش اصطکاکی، خصوصیات هدایت الکتریکی فلز مس برای کاربرد در شتاب‌دهنده‌ها را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.
 - زمان بهینه فرآیند جوش اصطکاکی ۲/۳ ثانیه و فشار فورج ۲۵ بار به ازای کاهش طول ۲/۵ میلی‌متر به دست آمد.
 - دستیابی به میزان خلأ بسیار بالا 10^{-10} میلی‌بار در تمامی نمونه‌ها که هدف اصلی از این پژوهش می‌باشد، گویای عدم وجود هرگونه حفره و اتصال ناقص در ناحیه جوش می‌باشد.
- باتوجه به نتایج به دست آمده، می‌توان فرآیند جوشکاری اصطکاکی را روشی جایگزین برای فرآیندهای پرهزینه‌ای چون جوشکاری پرتو الکترونی و لحیم‌کاری القایی معرفی نمود.



۵. مراجع

1. E. Huttel, *Materials for accelerator vacuum system*, in *Proceedings of CERN ACCELERATOR OF SCHOOL*, Platja d'Aro, Spain, (2006) 237-254.
2. S. Sgobba, *Materials for high vacuum technology: an overview*, in *Proceedings of CERN ACCELERATOR OF SCHOOL*, Platja d'Aro, Spain, (2006) 117-144.
3. C Shanjeevi et al. *Multi-objective optimization of friction welding parameters in AISI 304L austenitic stainless steel and copper joints*, Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture 1-9, (2014).
4. Jian Luo et al. *Friction Interface Migration of Copper Alloy and Carbon Steel Dissimilar Metal Joints in Inertia Radial Friction Welding*, State Key Lab of Mechanical Transmission, College of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, 275-282 (2015).
5. A. G. Wahyu Wibowo et al. *Microstructure Analysis in Friction Welding of Copper and Aluminum*, The 3rd International Conference on Advanced Materials Science and Technology. Volume 1725 (ICAMST 2015).
6. Mumin Sahin, *OPTIMIZING THE PARAMETERS FOR FRICTION WELDING STAINLESS STEEL TO COPPER PARTS*, Department of Mechanical Engineering, Trakya University, 22180 Edirne, Turkey, 02-13 (2015).
7. F. A. Besler et al. *Friction crush welding of aluminum, copper and steel sheetmetals with flanged edges*, Journal of Materials Processing Technology **234** 72-83 (2016).
8. A V. I. Vill, *Friction Welding of Metals*, AWS, New York, (1962).
9. ASM Specialty Handbook: *Copper and Copper Alloys*, ASM International. All Rights Reserved. **10** (2001).