



Sci. and Tech. note
یادداشت علمی و فنی

سرعت چرخشی بهینه در جوش کاری اصطکاکی تلاطمی فلز مس مورد استفاده در مخازن پس مانداری هسته‌ای

مهرداد عجیشیری*، حسن رضائی، عزت نظری، احمد نوزاد گلی کند

پژوهشکده‌ی مواد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۹-۸۱۴۶۵، اصفهان - ایران

چکیده: برای دفن پس ماند‌های هسته‌ای تولید شده در رآکتورهای هسته‌ای از مخزن‌های مسی جدار ضخیم و با مقاومت بالا در برابر خوردگی استفاده می‌کنند. در سال‌های اخیر برای بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی مخزن‌های مسی از روش جوش کاری اصطکاکی تلاطمی استفاده شده است. پیش از این برای جوش کاری این مخازن از روش جوش کاری با باریکه‌ی الکترونی استفاده می‌شد. جوش کاری اصطکاکی تلاطمی به دلیل این که در حالت جامد انجام می‌شود تنش پس ماند کم‌تری در فلز ایجاد می‌کند و در نتیجه مقاومت در برابر خوردگی فلز نسبت به دیگر روش‌های جوش کاری که در حالت مذاب صورت می‌گیرند، بهبود می‌یابد. در این مقاله برای دست‌یابی به سرعت چرخشی بهینه در جوش کاری اصطکاکی تلاطمی، ورق‌های مسی به ضخامت ۴ mm با سرعت خطی ثابت ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه به روش جوش کاری اصطکاکی تلاطمی جوش کاری شدند. توزیع دمایی اندازه‌گیری شده در منطقه‌ی جوش حاکی از افزایش شدید دما با افزایش سرعت چرخشی از ۹۰۰ به ۱۲۰۰ دور بر دقیقه بود. تجزیه و تحلیل تصویرهای فلزنگاری نشان داد که افزایش سرعت چرخشی باعث افزایش اندازه‌ی دانه‌ی فلز مس در منطقه‌ی مرکزی جوش می‌شود. در بررسی‌های مربوط به خواص مکانیکی نمونه‌ها مشاهده شد که سختی بیشینه در سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه به دست می‌آید. هم‌چنین استحکام بیشینه و درصد ازدیاد کمینگی طول نیز در این سرعت چرخشی حاصل می‌شود.

کلیدواژه‌ها: پس ماند‌های هسته‌ای، جوش کاری اصطکاکی تلاطمی، خواص مکانیکی، مس

Optimum rotational speed in FSW of copper canisters for nuclear waste

M. Ajabshiri*, H. Rezaei, E. Nazari, A. Nozad Golikand

Materials Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 81465-1589, Esfahan - Iran

Abstract: The high-level radioactive waste will be encapsulated in copper canisters and stored in a deep repository. High power electron beam welding was the only viable method available at that time for welding thick section copper. In recent years, friction stir welding has been replaced with electron beam welding because of the promotion in mechanical properties and corrosion resistance of copper canisters. FSW is used in solid state, therefore residual stresses produced in the weld is less than that of other welding processes which are performed in the molten state. To obtain optimum rotational speed, FSW was carried out in copper plates with a thickness of 4 mm at a constant speed of 25 mm/minute. The temperature distribution indicated a severe increasing of temperature upon increasing the rotational speed from 900 to 1200 rpm. Also, analysis of the metallographic images showed that the grain size in the nugget zone increases by increasing the rotational speed. Vickers hardness test was conducted on the welded samples and the maximum hardness was obtained at a rotational speed of 900 rpm. Results of tensile tests and their comparison with those of the base metal showed that the maximum strength and minimum elongation are achieved at the same rotational speed.

Keywords: Nuclear waste, FSW, Mechanical properties, Copper

*email: mehrdad_165@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۲/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۲/۲۰

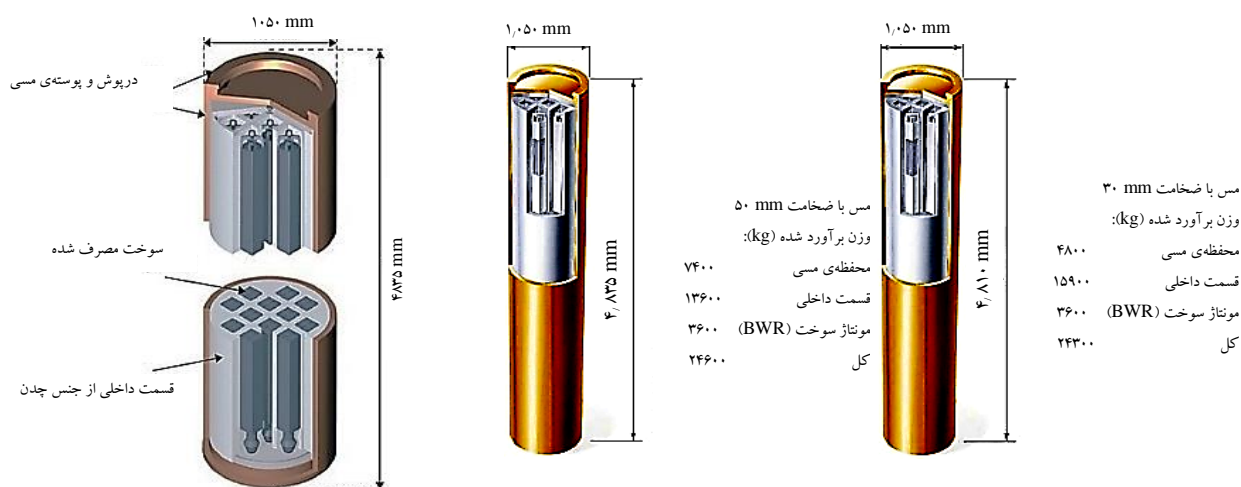
**۱. مقدمه**

بهبود می‌یابد. ضمناً با توجه به ضخامت ۵ سانتی متری جداره‌ی مخزن، روش جوش کاری اصطکاکی تلامبی نسبت به روش جوش کاری با باریکه‌ی الکترونی با بهبود خواص مکانیکی فلز مس همراه است [۱]. کشور سوئد در زمینه‌ی جوش کاری مخازن پس مانداری به روش اصطکاکی تلامبی یکی از کشورهای پیشگام در این زمینه است که در سال ۱۹۹۷ با طراحی مخزن‌هایی با جداره‌ی ۵۰ میلی متری از مس خالص نمونه‌ی جدیدی از مخزن‌های پس مانداری را ارائه داد. این مخزن‌ها ارتفاع ۴۸۵۰ میلی متر و وزنی در حدود ۲۵ تا ۲۷ تن دارند [۲].

جوش کاری اصطکاکی تلامبی در سال ۱۹۹۱ برای اولین بار توسط انستیتو جوش کاری انگلستان برای جوش کاری آلیاژهای آلومینیم مورد استفاده قرار گرفت [۳]. در روش جوش کاری اصطکاکی تلامبی، یک ابزار جوش کاری غیرمصرفی برای تولید حرارت بین ابزار و قطعه‌ی کار، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳، ۴، ۵]. این فرایند شامل تغییر شکل شدید پلاستیک و تبلور مجدد پویا در منطقه‌ی به هم زده شده (NZ) در حین فرایند جوش کاری است [۶]. بیش تر پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی جوش کاری اصطکاکی تلامبی عمدتاً بر روی آلومینیم و آلیاژهای آن بوده است و بر روی مس و آلیاژهای آن و جزییات متالورژیکی و ویژگی‌های مکانیکی مس کم تر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این در این گزارش‌ها نتیجه‌هایی نامتناسب بسیاری راجع به ویژگی‌های مکانیکی در جوش ارائه شده است [۷، ۸، ۹، ۱۰].

در صنعت هسته‌ای برای دفن پس ماندای هسته‌ای تولید شده در رآکتورها و آزمایشگاه‌های هسته‌ای از مخزن‌هایی با مقاومت در برابر خوردگی بالا استفاده می‌شود. این مخزن‌ها باید توان مقاومت در برابر خوردگی و عامل‌های محیطی و زیست‌شناختی در عمق حداقل ۵۰۰ متری زیر زمین را داشته باشند. در ساخت این مخزن‌ها از فلز مس با مقاومت در برابر خوردگی بالا برای جداره‌ی بیرونی و از چدن برای شبکه‌های داخلی استفاده می‌شود. شکل ۱ اندازه‌ی جداره‌ی مسی و شبکه‌های چدنی درون آن را نشان می‌دهد. پس ماندای هسته‌ای در درون این شبکه‌ی چدنی قرار گرفته و کل مجموعه در عمق ۵۰۰ متری زمین دفن می‌شود [۱، ۲].

پس ماندای هسته‌ای باید به مدت حداقل ۱۰۰ هزار سال بدون این که آسیبی متوجه آن‌ها شود در درون این مخزن‌ها مدفون شوند. از این رو، از فلز مس که دارای مقاومت در برابر خوردگی و استحکام مکانیکی بالایی است در جداره‌ی این مخزن‌ها استفاده می‌شود. برای جوش کاری چنین مخزن‌هایی پیش از این از روش جوش کاری با باریکه‌ی الکترونی^(۱) (EBW) استفاده می‌شد. در سال‌های اخیر از روش جوش کاری اصطکاکی تلامبی^(۲) (FSW) برای این منظور استفاده شده است. جوش کاری اصطکاکی تلامبی به دلیل این که در حالت نیمه جامد انجام می‌شود تنش پس ماند کم‌تری در فلز ایجاد می‌کند و از این رو مقاومت در برابر خوردگی فلز نسبت به دیگر روش‌های جوش کاری که در حالت مذاب به انجام می‌رسد،



شکل ۱. مخزن‌های پس مانداری با جداره‌ی مسی و شبکه‌ی چدنی درون آن.

اصطکاکی تلاطمی از دستگاه CNC استفاده شد. در جدول ۱ شرایط ابزاری جوش کاری استفاده شده نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری توزیع دما در منطقه‌ی جوش، چهار ترموکوپل در فاصله‌ی ۰/۷ میلی‌متر از خط مرکزی جوش، ۰/۸ میلی‌متر زیر سطح و به فاصله‌های ۱۰، ۷۰، ۱۳۰ و ۱۹۰ میلی‌متر از نقطه‌ی شروع جوش کاری تعبیه شدند. موقعیت ترموکوپل‌های درون قطعه‌ی کار در شکل ۲ نشان داده شده است. یک سیستم تبدیل ADV/ADAM-۴۵۲۰-D۲E برای انتقال داده‌های دمایی به کامپیوتر مورد استفاده قرار گرفت.

برای شروع جوش کاری، دو ورق مسی به صورت لب به لب بر روی یک ورق فولادی محکم ثابت نگه داشته شدند. ابزار جوش کاری در حال چرخش در محل اتصال دو ورق فرو رفته و به مدت ۱۵ ثانیه عمل پیش گرمایش در ابتدای جوش انجام شد. سپس ابزار با سرعت خطی ثابت ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه و با سرعت‌های چرخشی متفاوت ۴۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در امتداد خط اتصال حرکت کرده و عمل جوش کاری را انجام داد. بعد از جوش کاری نمونه‌ها از نظر ظاهری تحت بازرسی چشمی قرار گرفتند.

جدول ۱. شرایط ابزاری جوش کاری

قطر شانه (mm)	شکل ابزار	گام ابزار	جنس ابزار	زاویه‌ی ابزار
۱۵	پیچی چپ گرد	۸ گام در هر سانتی‌متر	فولاد گرم کار H _{۱۳}	۲ درجه



شکل ۲. موقعیت ترموکوپل‌ها در درون قطعه‌ی کار.

این محدودیت، به دمای ذوب بالا و رسانندگی گرمایی خوب مس نسبت داده می‌شود که در طی فرایند جوش کاری اصطکاکی تلاطمی نیازمند گرمای ورودی بالاتر برای دست‌یابی به جوش بدون عیب است. اگرچه مس دارای ساختار مکعبی مرکز وجوه پُر (FCC) و مفتول‌پذیری خوبی است، به دست آوردن جوش مس سالم بسیار مشکل‌تر از جوش آلیاژهای آلومینیم و منیزیم است. نیاز به گرمای ورودی بالاتر در حین جوش کاری بدین معنی است که جوش کاری باید در سرعت خطی پایین‌تر و یا در سرعت‌های چرخشی بالاتر انجام شود [۱۱، ۱۲، ۱۳]. رسانندگی گرمایی مس در حدود ۳ برابر آلیاژهای آلومینیم است، بنابراین ایجاد گرما در فلز مس در مجاورت ابزار، برای ایجاد فلز نرم و گران‌رو مشکل‌تر است. علاوه بر این دمای ذوب مس در حدود ۱/۷ بار بزرگ‌تر از آلیاژهای آلومینیم است؛ در نتیجه دمای بالاتری نیز برای نرم کردن فلز مس مورد نیاز خواهد بود [۱۴، ۱۵، ۱۶].

سرعت چرخشی ابزار با توجه به تأثیرگذار بودن آن بر روی میزان گرمای ایجاد شده در حین فرایند جوش کاری، می‌تواند نقش مؤثری در کیفیت و کاستی‌های حاصل از جوش کاری ایفا نماید. بنابراین یکی از پارامترهای مهم برای رسیدن به جوش با کیفیت بالا سرعت چرخشی ابزار است. با افزایش سرعت چرخشی ابزار، گرمای ورودی به قطعه‌ی کار افزایش می‌یابد و این باعث تغییرهای ساختاری در منطقه‌ی جوش می‌شود. سرعت چرخشی برای جوش کاری مس با توجه به ضخامت قطعه‌ی کار و نوع آلیاژ آن، شکل ابزار و سرعت خطی آن متفاوت خواهد بود.

در این مقاله تأثیر سرعت چرخشی در سرعت خطی ثابت ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه بر روی ریزساختار و خاصیت‌های مکانیکی ورق مس (به ضخامت ۴ میلی‌متر) مورد استفاده در مخزن‌های پس‌مانداری هسته‌ای، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

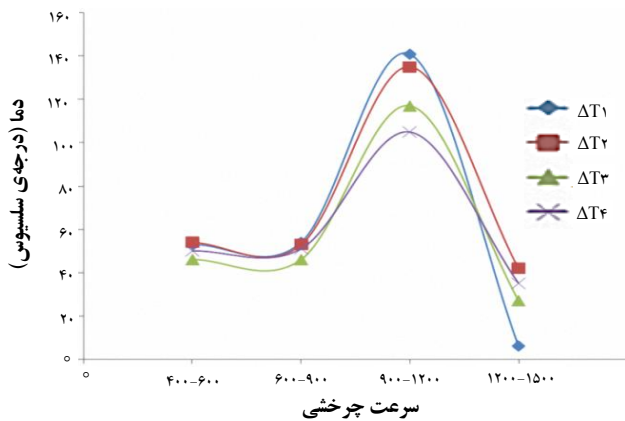
۲. روش پژوهش

در این پژوهش ورق‌های مسی در اندازه‌های $200\text{mm} \times 75\text{mm} \times 3\text{mm}$ و با خلوص ۹۹/۸۵٪ مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌ها، چون ورق‌ها نورد شده بودند، به مدت ۲ ساعت در دمای 400°C تابکاری شدند. برای جوش کاری



جدول ۲. حداکثر دمای ثبت شده به وسیله ترموکوپل ها به عنوان تابعی از

سرعت چرخشی				سرعت چرخشی (دور بر دقیقه)
دما				
T_f	T_r	T_p	T_1	
۲۵۵	۲۱۹	۱۷۸	۱۶۳	۴۰۰
۳۰۵	۲۶۵	۲۳۲	۲۱۶	۶۰۰
۳۵۶	۳۱۱	۲۸۵	۲۷۰	۹۰۰
۴۶۱	۴۲۸	۴۲۰	۴۱۱	۱۲۰۰
۴۹۶	۴۵۵	۴۶۲	۴۱۷	۱۵۰۰



شکل ۳. رابطه‌ی دما و سرعت چرخشی.

۲.۳ مشخصه‌های ریزساختاری

نمونه‌ها در محدوده‌ی سرعت چرخشی ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه بدون عیب جوش کاری شدند. شکل ۴ درشت‌نگار^(۳) نمونه‌ی جوش کاری شده با سرعت چرخشی ۶۰۰ دور بر دقیقه در سرعت خطی ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. در این تصویر ۴ منطقه‌ی مجزا قابل شناسایی است: منطقه‌ی به هم‌زده شده (NZ)، منطقه متأثر از عملیات گرم‌مکانیکی (TMAZ)، منطقه‌ی متأثر از حرارت (HAZ) که بین منطقه‌های مرکزی و منطقه‌ی متأثر از عملیات گرم‌مکانیکی قرار گرفته است و فلز پایه (BM).

فلزنگاره‌های ریزساختار منطقه‌ی به هم‌زده شده در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ریزساختار نمونه‌های جوش کاری شده در شکل نشان می‌دهد با افزایش سرعت چرخشی از ۴۰۰ به ۱۵۰۰ دور بر دقیقه اندازه‌ی دانه افزایش یافته است. تغییرات اندازه‌ی دانه‌ی نمونه‌ها با سرعت چرخشی در جدول ۳ درج شده است. در دماهای بالای برابر با تقریباً یک دوم تا یک سوم دمای ذوب فلزها، بازیابی و باز تبلور می‌تواند در حین تغییر شکل اتفاق بیفتد. اگر چنین فرایندی در حین کرنش دما-بالا رخ دهد بازیابی، بازیابی پویا و باز تبلور، باز تبلور پویا نامیده می‌شود. بازیابی و باز تبلور پویا بر روی ریزساختار ایجاد شده در جوش‌های اصطکاکی تلاطمی تأثیر می‌گذارد.

برای بررسی ریزساختاری از میکروسکوپ نوری استفاده شد. نمونه‌های فلزنگاری طبق استاندارد آماده شده و از محلول محتوی ۱۵ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید، ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۲٫۵ گرم آهن کلرید برای سونش نمونه‌ها استفاده شد. اندازه‌ی دانه‌ها به روش متقاطع خطی متوسط اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ریزسختی نمونه‌ها از دستگاه Qualitest QV-۱۰۰۰ DAT با بار ۱۰۰ گرم و به مدت ۱۰ ثانیه استفاده شد. از دستگاه سنجش کشش یونیورسال سنتام ۴۰ تن با نرخ کرنش ۲ میلی‌متر بر ثانیه برای سنجش کشش و ارزیابی خواص مکانیکی استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳ توزیع دما

در جدول ۲ حداکثر دمای ثبت شده به وسیله ترموکوپل‌ها به صورت تابعی از سرعت چرخشی درج شده است. اطلاعات این جدول حاکی از آن است که با افزایش سرعت چرخشی، دما در منطقه‌ی جوش افزایش می‌یابد. تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک بین ابزار و قطعه‌ی کار با افزایش سرعت چرخشی افزایش می‌یابد. هر دوی این عامل‌ها در افزایش دما در منطقه‌ی جوش سهم دارند. شکل ۳ افزایش دما با افزایش سرعت چرخشی از ۴۰۰ به ۶۰۰، از ۶۰۰ به ۹۰۰، از ۹۰۰ به ۱۲۰۰ و از ۱۲۰۰ به ۱۵۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل دما با افزایش سرعت چرخشی از ۹۰۰ به ۱۲۰۰ دور بر دقیقه افزایش چشمگیری داشته است. برای مثال افزایش دما با افزایش سرعت چرخشی از ۹۰۰ به ۱۲۰۰ دور بر دقیقه در موقعیت ترموکوپل اولی در حدود 141°C بوده است در حالی که این افزایش دما با افزایش سرعت چرخشی از ۴۰۰ به ۶۰۰، از ۶۰۰ به ۹۰۰ و از ۹۰۰ به ۱۲۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب، در حدود 53°C و 54°C بوده است. با افزایش سرعت چرخشی از ۹۰۰ به ۱۲۰۰ دور بر دقیقه حداکثر تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک بین ابزار و قطعه‌ی کار رخ داده است. هر چند با افزایش سرعت چرخشی از ۹۰۰ به ۱۲۰۰ دور بر دقیقه، افزایش تغییر شکل پلاستیک باعث افزایش دما شده است اما از طرف دیگر با افزایش دما اصطکاک بین ابزار و قطعه‌ی کار کاهش می‌یابد. سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه را می‌توان به عنوان نقطه‌ی عطف در تغییرات دمایی در روش جوش کاری اصطکاکی تلاطمی مس عنوان کرد.

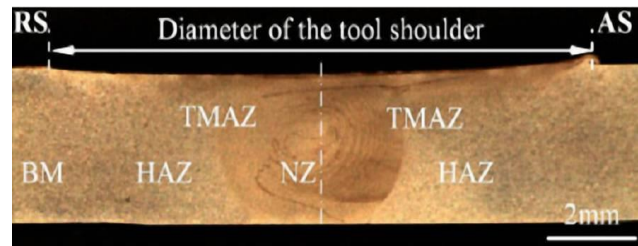
جوانه‌زنی و رشد دانه‌های جدید آزاد شود. آزاد شدن انرژی و کاهش اندازه‌ی دانه‌ها در حین جوش کاری دلیلی بر باز تبلور پویا است.

با توجه به اصول باز تبلور، در جوش کاری با سرعت خطی ثابت، افزایش سرعت چرخشی منجر به افزایش در میزان تغییر شکل و افزایش دمای قله‌ای خواهد شد. بنابراین افزایش در میزان تغییر شکل از یک طرف منجر به کاهش اندازه‌ی دانه‌ی باز تبلور یافته، و از طرف دیگر باعث افزایش در دمای قله‌ای جوش کاری می‌شود که خود به رشد دانه‌های باز تبلور می‌انجامد. بنابراین تغییر اندازه‌ی دانه باز تبلور یافته با سرعت چرخشی بستگی به عامل غالب خواهد داشت.

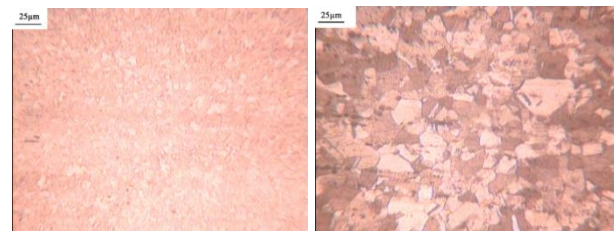
در این فرایند با افزایش سرعت چرخشی، مقدار تغییر شکل حاصله افزایش یافته و مقدار تغییر شکل، سازوکار غالب در تعیین اندازه‌ی دانه خواهد بود. در نتیجه در سرعت‌های چرخشی پایین ۴۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ دور بر دقیقه، ساختار دانه‌ریز خواهد بود. با افزایش سرعت چرخشی مقدار تغییر شکل حاصله افزایش یافته و به تبع آن دما نیز افزایش می‌یابد. در این حالت سازوکار تابکاری سازوکار غالب در تعیین اندازه‌ی دانه‌ی نمونه‌ها خواهد بود و در نتیجه در سرعت‌های چرخشی بالای ۹۰۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه، ساختار دانه درشت خواهد شد.

۳.۳ مشخصه‌های سختی

در شکل ۶ توزیع سختی نمونه‌های جوش کاری شده در مقطع عرضی جوش در سرعت‌های چرخشی متفاوت نشان داده شده است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که بیشینه مقدار سختی در همه‌ی نمونه‌ها در منطقه مرکزی جوش حاصل شده است. با توجه به این که در سرعت‌های چرخشی بالای ۹۰۰ دور بر دقیقه اندازه‌ی دانه‌ی منطقه‌ی به هم زده شده (NZ) بیش تر از اندازه‌ی دانه فلز پایه است ولی سختی این منطقه مستقل از اندازه‌ی دانه بوده و دارای سختی بیش تر از سختی فلز پایه است، در این مورد سازوکار افزایش سختی از رابطه‌ی هال-پچ پیروی نمی‌کند. رابطه‌ی هال-پچ تنها در شرایطی که دانه‌ها عاری از نابه‌جایی باشند، صادق خواهد بود. این افزایش سختی در منطقه‌ی به هم زده شده را می‌توان به چگالی بالایی از مرزهای فرعی، دانه‌های فرعی و نابه‌جایی‌ها نسبت داد [۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱]. هم‌چنین حضور فازهای ثانویه نیز می‌تواند در افزایش سختی این منطقه تأثیر گذار باشد [۵].

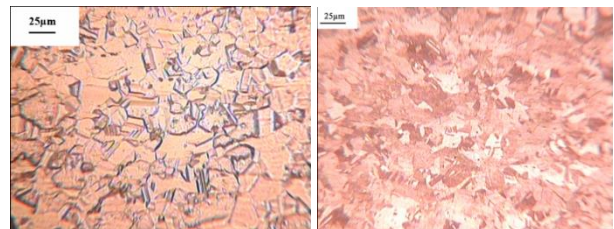


شکل ۴. درشت‌نگار سطح مقطع نمونه‌ی جوش کاری شده‌ی مس با سرعت چرخشی ۶۰۰ دور بر دقیقه در سرعت خطی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه.



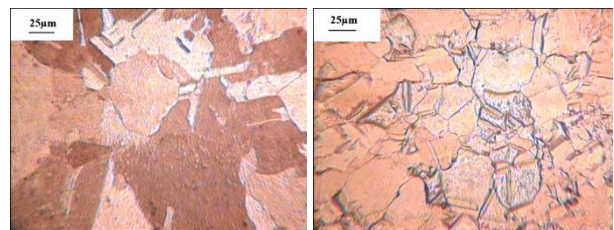
۴۰۰ دور بر دقیقه

فلز پایه



۹۰۰ دور بر دقیقه

۶۰۰ دور بر دقیقه



۱۵۰۰ دور بر دقیقه

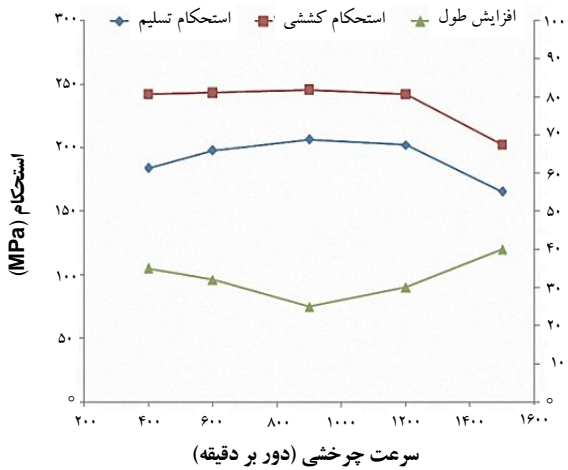
۱۲۰۰ دور بر دقیقه

شکل ۵. فلزنگاره‌های نمونه‌های جوش کاری شده با سرعت چرخشی متفاوت در سرعت خطی ثابت ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه.

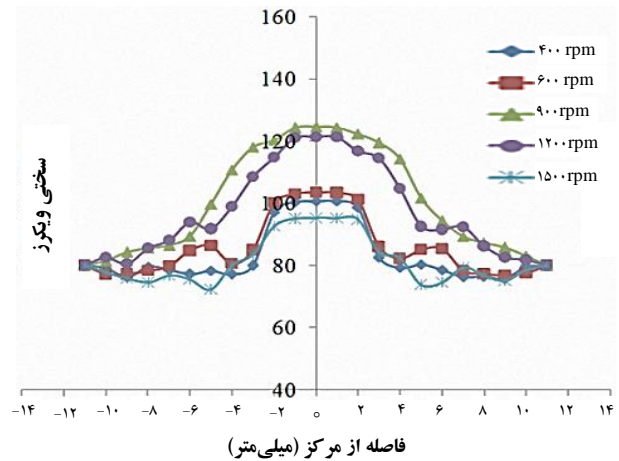
جدول ۳. تغییر اندازه‌ی دانه با سرعت چرخشی

سرعت چرخشی (rpm)	فلز پایه	۴۰۰	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰	
اندازه‌ی دانه (میکرون)		۱۷	۵	۶٫۵	۸	۱۹	۲۶

کرنش فلز تحت جوش کاری، از گام جوش (جابه‌جایی پسین در جهت حرکت در یک دور چرخش ابزار)، تعداد رزوه‌ها در هر اینچ و عمق رزوه تأثیر می‌پذیرد. در این فرایند، نرخ کرنش به سرعت چرخشی بستگی دارد. به دلیل این نرخ کرنش بالا و کرنش‌های بسیار زیاد در ارتباط با جوش اصطکاکی تلاطمی، انرژی کرنشی عظیمی در جوش ذخیره می‌شود که می‌تواند با



شکل ۷. خاصیت‌های کششی مقطع عرضی نمونه‌های جوش کاری اصطکاکی تلامپی مس.



شکل ۶. توزیع سختی در مقطع عرضی جوش کاری اصطکاکی تلامپی.

منطقه‌های متأثر از حرارت (HAZ) یا عملیات گرم‌مکانیکی (TMAZ) در اتصال از طریق جوش کاری اصطکاکی تلامپی منطقه‌های تأثیرگذار هستند به طوری که این منطقه‌ها اغلب دارای حداقل سختی بوده و شکست همیشه در این منطقه‌ها اتفاق می‌افتد [۳، ۲۲، ۲۳]. هم‌چنین تغییر ناگهانی سختی در این منطقه‌ها نیز می‌تواند منجر به ضعیف شدن آن منطقه‌ها شده و شکست در آن منطقه‌ها اتفاق بیفتد.

با توجه به موقعیت شکست در نمونه‌های آزمون کشش (شکل ۸) که در نمونه‌های جوش کاری شده در سرعت‌های چرخشی ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در منطقه‌های متأثر از گرما و متأثر از عملیات گرم‌مکانیکی و در نمونه‌ی جوش کاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه در فلز پایه بوده است، می‌توان نتیجه گرفت که این منطقه‌ها دارای کم‌ترین استحکام و سختی در بین منطقه‌های موجود هستند. هم‌چنان‌که یافته‌های سختی نیز نشان داد نمونه‌های جوش کاری شده با سرعت چرخشی ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در منطقه‌های متأثر از گرما و عملیات گرم‌مکانیکی و نمونه‌ی جوش کاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه در منطقه‌ی فلز پایه دارای کم‌ترین سختی و بیش‌ترین تغییرات سختی هستند.

افزایش سرعت چرخشی و در نتیجه افزایش درجه‌ی تغییر شکل، منجر به افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها در داخل دانه‌های باز تبلور یافته می‌شود. با افزایش بیش‌تر سرعت چرخشی، درجه‌ی حرارت افزایش یافته و باعث تابکاری دانه‌های باز تبلور یافته خواهد شد و در نتیجه مقدار سختی افت می‌کند. در این فرایند با افزایش سرعت چرخشی از ۴۰۰ تا ۹۰۰ دور بر دقیقه، میزان سختی افزایش یافته است ولی با افزایش بیش‌تر سرعت چرخشی از ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه، سازوکار تابکاری غالب و باعث کاهش سختی در این نمونه‌ها شده است.

۴.۳ مشخصه‌های کششی

در شکل ۷ خاصیت‌های کششی مقطع عرضی نمونه‌های جوش کاری شده نشان داده شده است. با توجه به این‌که مقطع عرضی نمونه‌های کششی شامل هر چهار منطقه‌ی مرکزی جوش، منطقه‌ی متأثر از عملیات گرم‌مکانیکی، منطقه‌ی متأثر از حرارت و فلز پایه است، استحکام نمونه‌ها، میانگین استحکام منطقه‌های موجود خواهد بود.

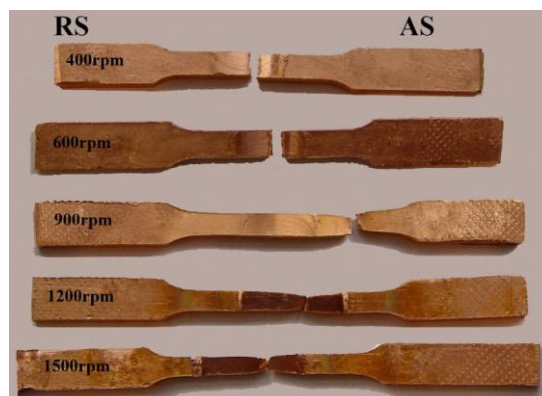
همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود استحکام کششی و تسلیم نمونه‌ها با افزایش سرعت چرخشی تا ۹۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. ولی در کل استحکام کششی نمونه‌ها با افزایش سرعت چرخشی تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه تفاوت چندانی نمی‌کند. افزایش طول نمونه‌ها با افزایش سرعت چرخشی تا ۹۰۰ دور بر دقیقه کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد.

پی‌نوشت‌ها

1. Electron beam welding
2. Friction stir welding
3. Macrograph

مرجع‌ها

- [1] L. Cederqvist, T. Oberg, Reliability study of friction stir welded copper canisters containing Sweden's nuclear waste, Reliability Engineering and System Safety, 93 (2008) 1491-1499.
- [2] T. Källgren, Friction Stir Welding of Copper Canisters for Nuclear Waste, Department of Materials Science and Engineering. Licentiate Thesis, Stockholm, Sweden (2005).
- [3] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering, R: Reports., 50 (2005) 1-78.
- [4] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, Friction stir welding for the transportation industries, Materials and Design., 18 (1997) 269-273.
- [5] H.J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi, Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology., 142 (2003) 692-696.
- [6] T.R. McNelley, S. Swaminathan, J.Q. Su, Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys, Scripta Materialia., 58 (2008) 349-354.
- [7] R.E.A.C.G. Andersson, Fabrication of containment canisters for nuclear waste by friction stir welding, Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, (June 1999).
- [8] T.T.T. Hautala, Friction stir welding method, Proceedings of the Sixth International Conference on Trends in Welding Research, (2003) 324-328.
- [9] K.T. PARK Hwa Soon, NAGANO Yoshitaka, NAKATA Kazuhiro, USHIO Masao. Friction stir welding of copper and copper alloys, Osaka University, Joining and Welding Research Institute., 32, 1 (2003) 43-46.



شکل ۸. موقعیت شکست نمونه‌های جوش کاری شده.

۴. یافته‌ها

با توجه به بررسی‌های انجام شده، یافته‌های زیر از این پژوهش به دست آمد.

۱. همه‌ی نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده‌ی جوش کاری با سرعت چرخشی ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه بدون عیب جوش کاری می‌شوند.
۲. با افزایش سرعت چرخشی از ۹۰۰ به ۱۲۰۰ دور بر دقیقه، دما به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده و منجر به رشد سریع دانه‌ها می‌شود.
۳. با افزایش سرعت چرخشی در سرعت خطی ثابت، اندازه‌ی دانه‌ی نمونه‌ها در منطقه به هم زده شده (NZ) افزایش می‌یابد.
۴. با وجود افزایش اندازه‌ی دانه در سرعت‌های چرخشی بالاتر از ۹۰۰ دور بر دقیقه نسبت به فلز پایه، سختی این منطقه‌ها بیش‌تر از سختی فلز پایه بوده و عدد سختی مستقل از اندازه‌ی دانه است. عامل غالب در تعیین سختی جوش‌ها، به طور عمده به چگالی نابه‌جایی‌ها بستگی دارد تا به اندازه‌ی دانه‌ها.
۵. با افزایش سرعت چرخشی در سرعت خطی ثابت، استحکام کششی تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه تغییر چندانی نکرده و سپس کاهش می‌یابد. استحکام تسلیم ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد ولی درصد ازدیاد طول ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.



- [10] T.M. Sakhivel, J. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper, *Journal of Materials Science.*, 42 (2007) 8126-8129.
- [11] G.M. Xie, Z.Y. Ma, L. Geng, Development of a fine-grained microstructure and the properties of a nugget zone in friction stir welded pure copper, *Scripta Materialia.*, 57 (2007) 73-76.
- [12] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, Recent advances in friction-stir welding-Process, weldment structure and properties, *Progress in Materials Science.*, 53 (2008) 980-1023.
- [13] J.J. Shen, H.J. Liu, F. Cui, Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper, *Materials & Design.* 31 (2010) 3937-3942.
- [14] P. Xue, G.M. Xie, B.L. Xiao, Z.Y. Ma, L. Geng, Effect of Heat Input Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of Friction-Stir-Welded Pure Copper, *Metallurgical and Materials Transactions A.*, 41 (2010) 2010-2021.
- [15] J.E.I. A Polar, Microstructural Assessment of Copper Friction Stir Welds, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 131 (2009) 031012.
- [16] W.B. Lee, S.B. Jung, The joint properties of copper by friction stir welding, *Materials Letters.*, 58 (2004) 1041-1046.
- [17] M. Mahoney, C. Rhodes, J. Flintoff, W. Bingel, R. Spurling, Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum, *Metallurgical and Materials Transactions A.*, 29 (1998) 1955-1964.
- [18] G. Liu, L.E. Murr, C.S. Niou, J.C. McClure, F.R. Vega, Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum, *Scripta Materialia*, 37 (1997) 355-361.
- [19] Y. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto, S. Jogan, Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction-stir welding, *Metallurgical and Materials Transactions A.*, 30 (1999) 2429-2437.
- [20] B. Heinz, B. Skrotzki, Characterization of a friction-stir-welded aluminum alloy 6013, *Metallurgical and Materials Transactions B.*, 33 (2002) 489-498.
- [21] K. Jata, K. Sankaran, J. Ruschau, Friction-stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050-T7451, *Metallurgical and Materials Transactions A.*, 31 (2000) 2181-2192.
- [22] C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum, *Scripta Materialia.*, 36 (1997) 69-75.
- [23] Y.K. Sato, Hiroyuki, Distribution of tensile property and microstructure in friction stir weld of 6063 aluminum, *Metallurgical and Materials Transactions A.*, 32 (2001) 3023-2031.