



جوشکاری اصطکاکی تلاطمی فلز مس مورد استفاده در پسمانداری هسته‌ای

حسن، رضائی؛ افشین، بابانژاد*؛ احمد، نوزاد گلی کند؛ مهرداد، عجبشیری؛ مهرداد، تیمورزاده

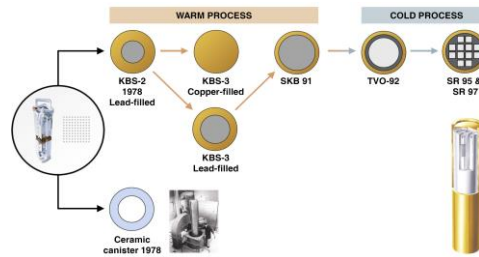
سازمان انرژی اتمی - پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای - پژوهشکده مواد

چکیده

در این پژوهش ریزساختار حاصل از سرعت‌های مختلف جوشکاری اصطکاکی تلاطمی و تأثیر آن بر خواص مکانیکی ورق مس تجاری خالص مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ورق‌های مسی در ضخامت ۴mm با شرایط سرعت خطی ثابت در سرعت‌های چرخشی مختلف توسط فرآیند FSW جوشکاری گردید. جوشکاری‌ها بدون عیب بوده و آنالیز تصاویر نشان داد که افزایش سرعت چرخشی باعث افزایش اندازه دانه فلز مس در منطقه بهم زده شده (NZ) می‌گردد. بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های جوش نیز حاکی از آن بود که ماکزیمم سختی در سرعت چرخشی ۹۰۰rpm بدست می‌آید. نتایج کلی نشان می‌دهد که سختی و استحکام حاصله، مستقل از اندازه دانه در منطقه NZ بوده و از رابطه هال-پچ تبعیت نمی‌کند. واژه‌های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی تلاطمی، میکروساختار، خصوصیات مکانیکی، مس

۱- مقدمه

جوشکاری اصطکاکی تلاطمی در سال ۱۹۹۱ برای اولین بار توسط انستیتوی جوشکاری انگلستان برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار گرفت [۱ و ۲]. فرآیند این گونه آغاز می‌شود که نوک ابزار مصرف نشدنی با طراحی مناسب، نیروی عمودی کافی و حرکت دورانی مشخص پایین آمده و با لبه‌های درز دو ورق یا صفحه تماس برقرار کرده و به خاطر حضور نیرو پین در قطعه فرو رفته و حرارتی ناشی از اصطکاک ایجاد می‌شود. با فرو رفتگی و اعمال هرچه بیشتر نیرو اصطکاک بین سطح ابزار و سطح فوقانی قطعه بیشتر شده و حرارت ایجاد شده بالاتر می‌رود. در این حین حرکت خطی ابزار در راستای فصل مشترک دو فلز منجر به اتصال آن دو می‌شود و از آنجایی که این اتصال بدون عمل ذوب فلز صورت گرفته به آن جوشکاری اصطکاکی تلاطمی در حالت جامد می‌گویند. حرکت ابزار چرخشی در طول درز جوش باعث ایجاد گرمای اصطکاکی بین ابزار و ماده شده که در اثر آن ماده سیلان یافته و درز جوش را پرمی‌کند [۳-۶]. در صنعت هسته‌ای برای دفع و دفن زباله‌های هسته‌ای تولید شده در راکتورها و آزمایشگاه‌های هسته‌ای باید از مخازنی با مقاومت خوردگی مناسب استفاده شود. این مخازن باید توانایی مقاومت به خوردگی در مقابل عوامل محیطی و بیولوژیکی در عمق حداقل ۵۰۰ متر زیر زمین را داشته باشند [۷]. برای رفع این نیاز از فلز مس با مقاومت به خوردگی بسیار خوب برای جداره بیرونی و از چدن برای شبکه‌های داخلی استفاده می‌شود. شکل (۱) ابعاد جداره مسی و شبکه‌های چدنی را نشان می‌دهد، که پسماندهای هسته‌ای در داخل آن قرار می‌گیرد. [۷ و ۸].



شکل (۱): مراحل تکامل ساخت مخازن پسماندهای هسته‌ای [۷].

شکل (۲) جداره مسی و شبکه‌های چدنی را نشان می‌دهد که پسماندهای هسته‌ای در داخل آن قرار می‌گیرد. در حال حاضر برای جوشکاری اولیه و بستن نهایی درب این مخازن از جوشکاری اصطکاکی تلاطمی استفاده می‌شود [۷].



شکل (۲): مخازن پسمانداری با جداره مسی [۸].

۲- روش تحقیق

ترکیب شیمیایی ورقهای مسی مورد جوشکاری در جدول (۱) نشان داده شده است. در این تحقیق از ورقهای مسی با ابعاد $200 \times 75 \times 3$ mm استفاده شد. چون ورقها در شرایط نورد شده قرار داشتند بدین منظور نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای 400°C آنیل شدند. برای جوشکاری اصطکاکی تلاطمی از دستگاه CNC استفاده گردید. فرآیند جوشکاری، نحوه و ابزارهای آن در مقدمه شرح داده شده است. در جدول (۲) شرایط ابزار جوشکاری مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی ورق مس مورد جوشکاری

عنصر	درصد وزنی (Wt.%)
Cu	۹۹/۸۵
Al	۰/۰۰۶
Si	۰/۰۰۷
Sb	۰/۰۰۱
Ni	۰/۰۸۰
Mn	۰/۰۰۶
Zn	۰/۰۴۱
Fe	۰/۰۰۶

جوشکاری نمونه‌ها با سرعت خطی ثابت 25mm/min با سرعتهای چرخشی متفاوت 400 ، 600 ، 900 ، 1200 و 1500 rpm انجام شد. بعد از جوشکاری نمونه‌ها از نظر ظاهری تحت بازرسی چشمی قرار گرفتند.

جدول (۲): شرایط ابزار جوشکاری

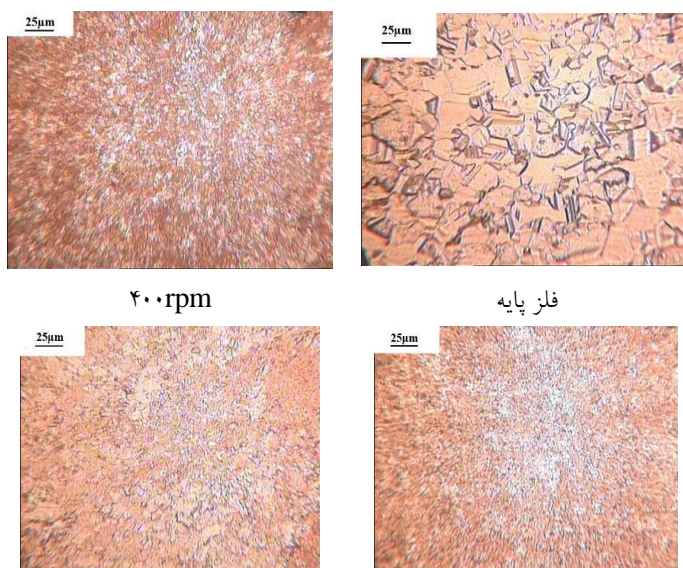
زاویه ابزار	۲ درجه
جنس ابزار	فولاد گرم کار H۱۳
گام ابزار (گام/cm)	۸ گام در هر سانتیمتر
شکل ابزار	پیچی چپ گرد
قطر شانه	۱۵
طول پین	۳/۹۵
قطر پین	۵

برای بررسی میکروساختاری از میکروسکوپ نوری استفاده شد. نمونه‌های متالوگرافی طبق استاندارد آماده شده و از محلول ۱۵ ml اسید هیدروکلریک، ۱۰۰ ml آب مقطر و ۲/۵ گرم کلرید آهن جهت اچ کردن نمونه‌ها استفاده شد. اندازه دانه‌ها توسط روش متقاطع خطی متوسط اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری میکروسختی نمونه‌ها از دستگاه Qualitest مدل QV-۱۰۰۰ DAT با میزان بار ۱۰۰ گرم به مدت ۱۰ ثانیه استفاده شد. از دستگاه تست کشش یونیورسال ستام ۴۰ تن با نرخ کرنش ۲ mm/min نیز جهت انجام تست کشش و ارزیابی خواص مکانیکی استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ مشخصات میکروساختاری

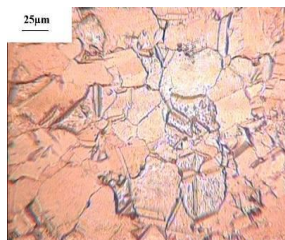
نمونه‌های جوشکاری شده در محدوده سرعت چرخشی ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ rpm بدون عیب جوشکاری گردیدند. تصاویر متالوگرافی از میکروساختار منطقه NZ در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که میکروساختار نمونه‌های جوشکاری شده در شکل نشان می‌دهد با افزایش سرعت چرخشی از ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ rpm اندازه دانه افزایش یافته است. تغییرات اندازه دانه نمونه‌ها با سرعت چرخشی اعمالی در جدول (۳) نشان داده شده است. در دماهای بالا (تقریباً $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{3}$) دمای ذوب فلزات، بازیابی و تبلور مجدد در حین تغییر شکل می‌تواند اتفاق بیافتد.



۹۰۰rpm



۶۰۰rpm



۱۵۰۰rpm

۱۲۰۰rpm

شکل (۳): تصاویر متالوگرافی از نمونه‌های جوشکاری شده

در این فرآیند با افزایش سرعت چرخشی مقدار تغییر فرم حاصله افزایش یافته و مقدار تغییر فرم حاصله، مکانیزم غالب در تعیین اندازه دانه خواهد بود. در نتیجه در سرعت‌های چرخشی پایین ۴۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰rpm ساختار دانه ریز خواهد بود. با افزایش سرعت چرخشی مقدار تغییر فرم حاصله افزایش یافته و به تبع آن دما نیز افزایش خواهد یافت. در این حالت مکانیزم آنیلینگ مکانیزم غالب در تعیین اندازه دانه نمونه‌ها خواهد بود و در نتیجه در سرعت‌های چرخشی بالای ۹۰۰ تا ۱۵۰۰rpm ساختار دانه درشت خواهد شد.

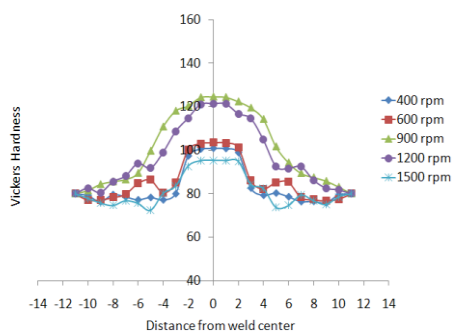
جدول (۳): تغییرات اندازه دانه با سرعت

اندازه دانه	سرعت چرخشی (rpm)
۱۷	فلز پایه
۵	۴۰۰
۶/۵	۶۰۰
۸	۹۰۰
۱۹	۱۲۰۰
۲۶	۱۵۰۰

۲-۳ مشخصات سختی

در شکل (۴) توزیع سختی نمونه‌های جوشکاری شده در مقطع عرضی جوش در سرعت‌های چرخشی متفاوت نشان داده شده است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت:

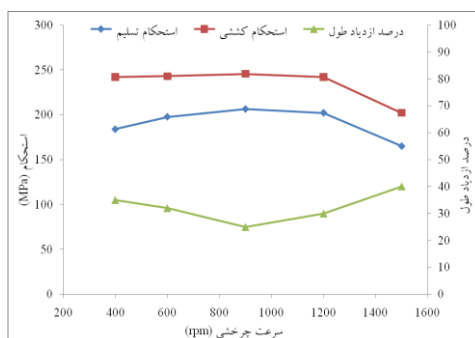
- ۱- ماکزیمم مقدار سختی در همه نمونه‌ها در منطقه مرکزی جوش حاصل شده است.
- ۲- سختی همه نمونه‌ها در منطقه مرکزی جوش بیشتر از سختی فلز پایه است.
- ۳- نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت ۹۰۰، ۱۲۰۰، ۶۰۰، ۴۰۰ و ۱۵۰۰rpm به ترتیب بیشترین سختی را در منطقه مرکزی جوش دارا می‌باشند.



شکل (۴): توزیع سختی در مقطع عرضی جوش

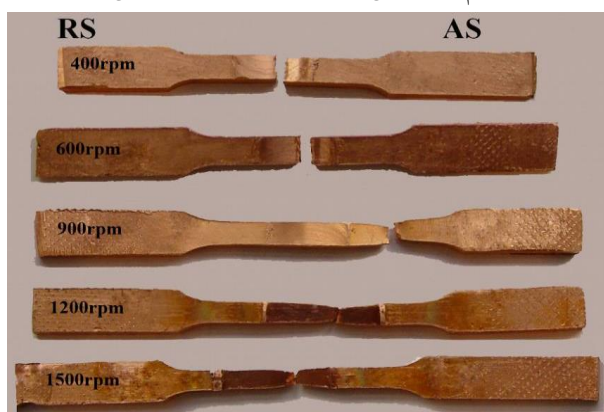
۳-۳ مشخصات کششی

در شکل (۵) خواص کششی از مقطع عرضی نمونه‌های جوشکاری شده نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۵) دیده می‌شود استحکام کششی و تسلیم نمونه‌ها با افزایش سرعت چرخشی تا ۹۰۰rpm افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. ولی در کل استحکام کششی نمونه‌ها با افزایش سرعت چرخشی تا ۱۲۰۰rpm تفاوت چندانی نمی‌کند. درصد ازدیاد طول نمونه‌ها با افزایش سرعت چرخشی تا ۹۰۰rpm کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد.



شکل (۵): خواص کششی از مقطع عرضی

با توجه به موقعیت محل شکست در نمونه‌های تست کشش (شکل ۶) در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت‌های چرخشی ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ rpm که در مناطق متأثر از حرارت و عملیات ترمومکانیکی بوده و همچنین در نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ rpm که از فلز پایه شکسته شده است، می‌توان نتیجه گرفت که این مناطق دارای کمترین استحکام و سختی در بین مناطق موجود می‌باشند.



شکل (۶): موقعیت شکست نمونه‌های جوش شده

۴- نتایج

با توجه به بررسی‌های انجام شده، نتایج زیر از این تحقیق بدست آمدند.

- ۱- همه نمونه‌ها در محدوده جوشکاری ۱۵۰۰-۴۰۰ rpm بدون عیب جوشکاری گردیدند.
- ۲- با افزایش سرعت چرخشی در سرعت خطی ثابت، اندازه دانه نمونه‌ها در منطقه NZ افزایش می‌یابد.



۳- علیرغم افزایش اندازه دانه در سرعت‌های چرخشی بالاتر از ۹۰۰rpm نسبت به فلز پایه، سختی این مناطق بیشتر از سختی فلز پایه بوده و عدد سختی مستقل از اندازه دانه است. فاکتور غالب در تعیین سختی جوشها، به طور عمده به دانسیته نابعائیها بستگی دارد تا به اندازه دانه‌ها.

۴- با افزایش سرعت چرخشی در سرعت خطی ثابت، استحکام کششی تا ۱۲۰۰rpm تغییر چندانی نکرده و سپس کاهش یافته است. استحکام تسلیم ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است ولی درصد ازدیاد طول ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

۵- مراجع

- [۱] R.S. Mishra, Z.Y. Ma. "*Friction stir welding and processing*", Materials Science and Engineering: R: Reports. ۵۰ (۲۰۰۵) ۱-۷۸.
- [۲] W.M. Thomas, E.D. Nicholas. "*Friction stir welding for the transportation industries*" Materials and Design. ۱۸ (۱۹۹۷) ۲۶۹-۷۳.
- [۳] H.J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi. "*Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of ۲۰۱۷-T۳۵۱ aluminum alloy*", Journal of Materials Processing Technology. ۱۴۲ (۲۰۰۳) ۶۹۲-۶.
- [۴] T.R. McNelley, S. Swaminathan, J.Q. Su. "*Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys*" Scripta Materialia. ۵۸ (۲۰۰۸) ۳۴۹-۵۴.
- [۵] 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 ۱۹۹۹).
- [۶] T.T. T. Hautala. "*Friction stir welding method*", Proceedings of the Sixth International Conference on Trends in Welding Research. (۲۰۰۳) ۳۲۴-۸.
- [۷] Therese Källgren Stockholm "*Friction Stir Welding of Copper Canisters for Nuclear Waste*", Sweden ۲۰۰۵
- [۸] T. Hedman, A. Nyström, C. Thegerström, "*Swedish containers for disposal of spent nuclear fuel and radioactive waste*", Applied physics ۳ (۲۰۰۲) ۹۰۳-۹۱۳