

جوشکاری همزن اصطکاکی فوم‌های آلومینیم تجاری خالص

تولید شده به روش نورد تجمعی

یادداشت فنی

جواد ملانی میلانی^۱ و توحید سعید^{۱*}^۱دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی مواد

تاریخ ثبت اولیه: ۹۳/۳/۱۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۹۳/۶/۱۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۳/۶/۲۲

چکیده

در این تحقیق جوشکاری فوم‌های آلومینیم خالص تجاری تولید شده به روش نورد تجمعی با استفاده از روش جوشکاری همزن اصطکاکی در سرعت‌های چرخشی ۵۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ rpm و سرعت خطی ۲۵ mm/min بررسی شده است. تمامی جوش‌ها به صورت بدون درز انجام شده است. برای بررسی درشت ساختار و سختی جوش‌های انجام شده، متالوگرافی نوری و آزمون ریزسختی و به منظور تعیین درصد تخلخل فوم آلومینیمی و بررسی تغییرات چگالی ناحیه‌ی جوش در سرعت‌های چرخشی متفاوت از آزمون ارشمیدس استفاده شد. نتایج حاصل نشان دادند که در یک سرعت خطی ثابت، افزایش سرعت چرخشی ابزار سبب افزایش چگالی ناحیه‌ی جوش شده و عیوب موجود در این ناحیه کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از میکروسختی سنجی بیانگر افزایش سختی ناحیه‌ی جوش در اثر افزایش سرعت چرخشی ابزار است.

کلمات کلیدی: فوم آلومینیمی، جوشکاری همزن اصطکاکی، نورد تجمعی.

Friction Stir Welding of Commercially Pure Aluminum Foams Manufactured by Accumulative Roll-Bonding Process

J. M. Milani¹ and T. Saeid^{*1}¹Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology

Abstract

In present study friction stir welding of commercially pure aluminum foams manufactured by accumulative roll-bonding process was investigated at rotational speeds of 500, 700, 900 and 1100 rpm and advancing speed of 25 mm/min. All welds were carried out bead on plate. Optical microscopy and microhardness tests were used to investigate the weldments microstructure and weld regions hardness, respectively. Aluminum foam porosity and density variation of weld region at different rotational speeds were evaluated by Archimedes' principle. Results showed that increasing rotational speed at a constant advancing speed causes an increase in weld region density and a decrease in weld defects. Moreover, microhardness results showed that increasing the rotational speed results in an increase in weld region hardness.

Keywords: aluminum foam, friction stir welding, accumulative roll-bonding.

۱- مقدمه

خواص متفاوت و در برخی موارد متضاد فوم‌های آلومینیمی نظیر چگالی پایین، سفتی بالا و توانایی جذب انرژی ضربه‌ی بیشتر، این مواد را از سایر مواد مهندسی متمایز ساخته و باعث بوجود آمدن زمینه‌های کاربردی بسیاری نظیر عایق‌های صوتی، مبدل‌های حرارتی، فیلترهای تصفیه، کاتالیست‌ها، ایمپلنت‌های پزشکی و قطعات خوردو برای این مواد شده است. فوم‌های فلزی به دو دسته‌ی فوم‌های فلزی سلول بسته و سلول باز تقسیم بندی می‌شوند که توسط روش‌های مختلفی تولید می‌شوند. در حالت کلی تولید فوم‌های فلزی به دو روش مستقیم و غیرمستقیم صورت می‌پذیرد که در روش مستقیم فوم‌سازی با استفاده از افزودن عوامل فوم‌ساز نظیر هیدرید تیتانیم و یا هیدرید زیرکونیم به مذاب انجام می‌پذیرد. در حالیکه در روش غیرمستقیم هدف تولید پیش ماده‌ای است که طی فرآیندهای بعدی قابلیت تبدیل شدن به فوم فلزی را داشته باشد [۱].

روش‌های تولیدی حالت جامد زیرمجموعه‌ی روش‌های غیرمستقیم فوم‌سازی به شمار می‌روند که در سال‌های اخیر به عنوان روش‌های جدید برای تولید فوم‌های سلول بسته مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۲]. فرآیند نورد تجمعی^۱ (ARB) یکی از روش‌های حالت جامد به شمار می‌رود که برای تولید فوم‌های آلومینیمی سلول بسته مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این روش فوم‌های آلومینیمی سلول بسته با درصد تخلخلی در حدود ۴۰٪ قابل تولید است [۳،۴]. در این روش ابتدا کامپوزیتی زمینه آلومینیمی حاوی ذرات عامل فوم‌ساز تولید می‌شود که این کامپوزیت به عنوان پیش ماده‌ی فوم‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی بعدی با استفاده از یک رژیم عملیات حرارتی مناسب، امکان تجزیه ذرات عامل فوم‌ساز در دمای بالا فراهم گردیده و ورق فوم آلومینیمی تولید می‌شود [۵-۸].

فوم‌های آلومینیمی به دلیل دارا بودن خواصی نظیر چگالی پایین، توانایی جذب انرژی بالاتر، عایق صوتی و حرارتی کاربردهای صنعتی روز افزونی را به خود اختصاص داده‌اند. به وجود آمدن کاربردهای صنعتی برای فوم‌های

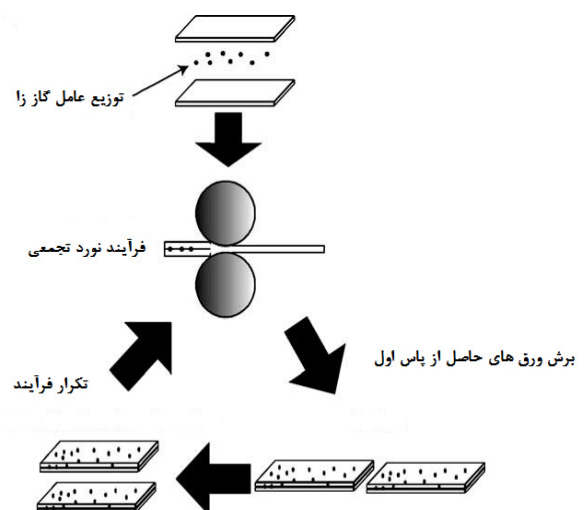
آلومینیمی و به تبع آن نیاز به اتصال آنها و همچنین محدودیت در تولید فوم‌های آلومینیمی با ابعاد بزرگ باعث افزایش اهمیت بررسی اتصال فوم‌های آلومینیمی گردیده است. با توجه به اینکه تولید فومی با شرایط مطلوب نیازمند کنترل دقیق فرآیند فوم‌سازی می‌باشد و در ابعاد بزرگ این کنترل با محدودیت‌هایی همراه است، بنابراین، روش‌های جوشکاری به عنوان راه حلی برای این مشکل پیشنهاد می‌شوند. از طرفی تخریب ساختار متخلخل و سلولی فوم‌های آلومینیمی، امکان استفاده از برخی روش‌های جوشکاری را محدود ساخته است که مطالعات انجام شده با استفاده از دو روش جوشکاری با گاز محافظ و همچنین جوشکاری با لیزر تایید کننده این مطلب است که استفاده از روش‌های ذوبی سبب تخریب ساختار سلولی فوم در مناطق اطراف ناحیه‌ی جوش می‌شود [۹،۱۰].

هدف از جوشکاری فوم‌های آلومینیمی دستیابی به اتصالی با خواص مطلوب و با کمترین میزان تخریب ساختار سلولی می‌باشد. از این نظر، استفاده از روش‌های جوشکاری ذوبی به دلیل اثر تخریبی بر ساختار سلولی فوم‌های آلومینیمی با محدودیت‌های زیادی همراه است. در سال‌های اخیر استفاده از روش جوشکاری همزن اصطکاکی^۲ (FSW)، به عنوان یک روش جوشکاری حالت جامد به منظور اتصال فوم‌های آلومینیمی مورد مطالعه قرار گرفته است که بیانگر قابلیت این روش برای تولید و اتصال فوم‌های آلومینیمی می‌باشد. در این مطالعات اتصال پیش ماده‌ی فوم‌سازی، اتصال فوم‌های تولید شده به روش ریخته‌گری و همچنین اتصال فوم به ورق مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱-۱۴].

با توجه به عدم بررسی اتصال فوم‌های آلومینیمی تولید شده به روش نورد تجمعی در مطالعات انجام شده‌ی اخیر، هدف از این تحقیق، استفاده از روش اتصال حالت جامد FSW به منظور اتصال فوم‌های سلول بسته‌ی آلومینیمی تولید شده به روش نورد تجمعی می‌باشد. بدین منظور تاثیر سرعت چرخشی ابزار بر چگالی، میزان عیوب و همچنین خواص مکانیکی ناحیه‌ی جوش مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از ورق‌های آلومینیمی سری ۱۱۰۰ با ضخامت ۱ mm به عنوان ماده‌ی اولیه استفاده شد. ابتدا ورق‌های آلومینیمی در ابعادی به طول ۲۰۰ mm و عرض ۱۰۰ mm برشکاری شدند. در ادامه، چربی زدایی ورق‌های برش داده شده توسط استن صورت پذیرفته و به منظور آماده سازی سطحی ورق‌ها از برس سیمی استفاده شد. عامل فوم‌ساز مورد استفاده پودر هیدرید تیتانیم با خلوص ۹۸/۵ درصد و با اندازه‌ی ذرات کوچکتر از $1\mu\text{m}$ بود. پس از آماده‌سازی ورق‌ها، پودر هیدرید تیتانیم به میزان ۲ درصد وزنی در بین ورق‌ها توزیع می‌شود. بدین منظور پودر هیدرید تیتانیم با مقدار مناسبی از استن مخلوط شده تا ترکیب خمیری حاصل شود که این ترکیب با استفاده از یک شابلون در بین ورق‌ها توزیع می‌شود. در بخش بعدی هر دو انتهای ورق‌ها توسط سیم مسی به یکدیگر بسته می‌شوند تا از حرکت ورق‌ها حین فرآیند ARB ممانعت به عمل آید. پس از انجام هر پاس از فرآیند ARB، ورق‌های نورد شده به دو قسمت مساوی برش داده شده و آماده سازی و توزیع پودر عامل فوم‌ساز بر روی ورق‌های جدید اجرا می‌شود. این مرحله به دفعات متعدد قابل تکرار است. شکل (۱) طرحواره‌ای از انجام این مراحل را نشان می‌دهد.



شکل ۱. طرحواره‌ی فرآیند ARB [۳]

دستیابی به توزیع مناسبی از عامل فوم‌ساز و به تبع آن توزیع مناسب تخلخل‌ها در فوم‌های فلزی یکی از اهداف استفاده از فرآیند ARB می‌باشد. مطالعات انجام شده بیانگر دستیابی به توزیع بهتری از ذرات عامل فوم‌ساز در داخل زمینه‌ی آلومینیمی با تکرار تعداد پاس‌های فرآیند ARB می‌باشد [۳، ۱۵].

فرآیند ARB با استفاده از یک دستگاه نورد دو غلتکی عمودی صورت پذیرفت که قطر غلتک‌های دستگاه ۴۰۰ mm و سرعت چرخشی آنها ۴ rpm بود. کاهش ضخامت در هر پاس از فرآیند ARB به میزان ۵۰ درصد بوده و فرآیند تا ۴ پاس تکرار شد. لازم به ذکر است فرآیند ARB انجام شده در این تحقیق بدون پیش گرم کردن مواد اولیه و همچنین بدون استفاده از ماده‌ی روانساز انجام پذیرفت. پس از اتمام فرآیند ARB محصول به دست آمده کامپوزیت زمینه آلومینیمی حاوی ذرات توزیع شده‌ی عامل فوم‌ساز می‌باشد که به عنوان پیش ماده‌ی فوم‌سازی به شمار می‌آید. برای تولید فوم آلومینیمی پیش ماده‌ی مذکور در دمای ۶۵۰ درجه‌ی سانتیگراد و به مدت زمان ۱۰ دقیقه تحت عملیات حرارتی قرار گرفت تا در اثر تجزیه‌ی عامل فوم‌ساز، فوم آلومینیمی تولید شود. جهت تعیین درصد تخلخل فوم آلومینیمی تولید شده از روش ارشمیدس استفاده شد.

به منظور انجام FSW از یک دستگاه فرز نیمه سنگین استفاده شد. ابزار مورد استفاده از جنس فولاد گرم کار بود که به منظور جلوگیری از سایش ابزار حین جوشکاری، تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. قطر پین و شانه ابزار به ترتیب ۲ mm و ۱۴ mm بود و ارتفاع پین ۱/۲ mm و تقعر شانه در حدود ۳ درجه بود. لازم به ذکر است با توجه به اینکه ضخامت پیش ماده حین فرآیند فوم‌سازی به میزانی در حدود ۳۰ درصد افزایش یافت از پینی به ارتفاع ۱/۲ mm استفاده شد. در تمامی نمونه‌ها، ابزار در حین جوشکاری، نسبت به خط عمود بر جهت جوشکاری زاویه‌ی ۳ درجه داشته و تمامی جوش‌ها به صورت بدون درز انجام پذیرفت. جهت چرخش ابزار در تمامی نمونه‌ها به صورت ساعتگرد انتخاب شد. جوشکاری‌ها در سرعت‌های چرخشی ۵۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰ و



شکل ۲. فوم آلومینیمی تولید شده به روش ARB

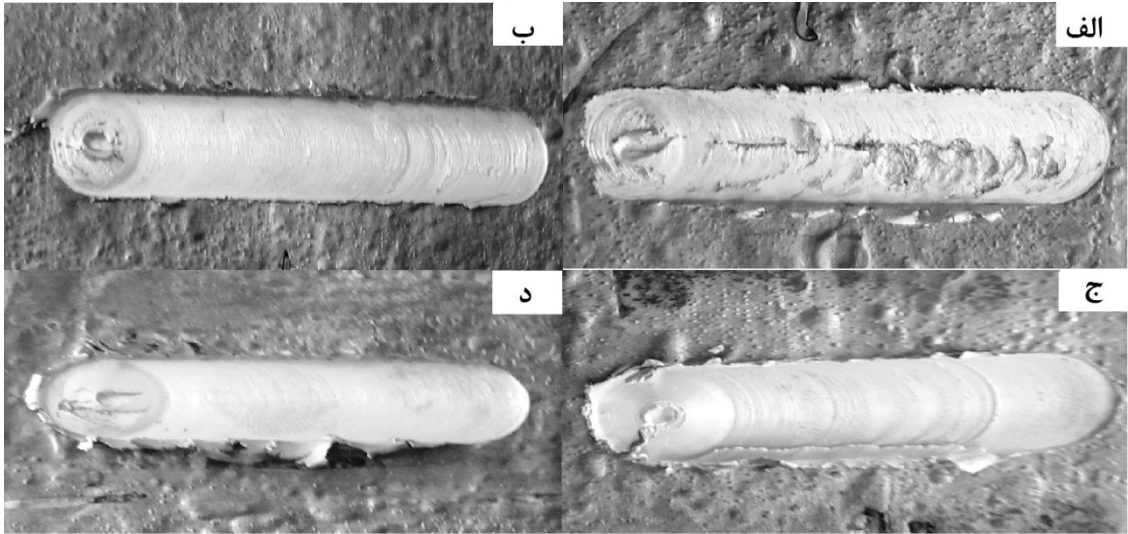
در FSW دو بخش نسبت به خط مرکزی جوش قابل مشاهده است که دارای ویژگی‌های متفاوتی هستند. بخشی که بردار سرعت چرخشی و سرعت خطی در یک جهت قرار دارند با عنوان سمت پیش‌رونده (AS) و بخشی که بردار سرعت چرخشی و سرعت خطی در خلاف جهت یکدیگرند با عنوان سمت پس‌رونده (RS) می‌باشند [۱۶] که در شکل (۳) بخش پایینی تصاویر سمت پیش‌رونده و بخش بالایی تصاویر سمت پس‌رونده می‌باشد. با توجه به شکل (۳-الف) مشخص می‌گردد که میزان عیوب در سمت پیش‌رونده در مقایسه با سمت پس‌رونده بیشتر است زیرا بیشتر جریان مواد در لبه پس‌رونده به وقوع می‌پیوندد و انتقال مواد خمیری شکل و نرم به پشت ابزار اتصال را تشکیل می‌دهد. همچنین، در قسمت پس‌رونده مواد ناحیه جوش به میزان مناسب وارد منطقه پلاستیک می‌شوند و در نتیجه میزان عیوب در این ناحیه به نسبت ناحیه‌ی پیش‌رونده کمتر می‌باشد که این امر علاوه بر ظاهر جوش در ساختار داخلی ناحیه‌ی جوش نیز قابل مشاهده است. علاوه بر این لازم به ذکر است که در این شکل عیب شیاری نیز در قسمت میانی جوش قابل مشاهده است. شکل (۵) تخلخل‌های موجود در دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده را در جوشکاری انجام شده در سرعت چرخشی ۹۰۰ rpm و سرعت خطی ۲۵ mm/min نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به توضیحات فوق میزان تخلخل در سمت پیش‌رونده نسبت به سمت پس‌رونده بیشتر است که این امر با توجه به جریان مناسب مواد پلاستیک در ناحیه‌ی پس‌رونده می‌باشد.

۱۱۰۰ rpm و سرعت خطی ۲۵ mm/min انجام شد. درشت ساختار حاصل از جوشکاری فوم‌های آلومینیمی با میکروسکوپ نوری و خواص مکانیکی جوش‌های حاصل با استفاده از آزمون میکروسختی سنجی ویکرز مورد بررسی قرار گرفت. چگالی و درصد تخلخل نمونه‌ها نیز توسط آزمون ارشمیدس تعیین گردید. جهت بررسی درشت ساختار نمونه‌های موردنظر به صورت عمود بر سطح مقطع جوش برش داده شده و سپس بر روی آنها عملیات سمباده‌زنی و پولیش انجام گرفت. آزمون میکروسختی سنجی ویکرز نیز بر اساس استاندارد ASTM E384-99 و با وزنه‌ی ۵۰g در مدت زمان بارگذاری ۱۰s انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

شکل (۲) فوم آلومینیمی تولید شده به روش فرآیند ARB را با درصد تخلخلی در حدود ۴۲ درصد نشان می‌دهد که توزیع نسبتاً یکنواخت تخلخل‌ها در نواحی مختلف این فوم قابل مشاهده است.

شکل (۳) کیفیت ظاهری جوش‌های انجام شده را در سرعت خطی ۲۵mm/min و در سرعت‌های چرخشی مختلف ۵۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ rpm نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در سرعت چرخشی ۵۰۰ rpm عیوب ظاهری جوش قابل مشاهده است و جوش از کیفیت مناسبی برخوردار نیست و اتصال به طور کامل صورت نپذیرفته است. اما با افزایش سرعت چرخشی، عیب‌ها برطرف شده و اتصال کیفیت مناسبی دارد. برطرف شدن عیوب جوشکاری فوم‌های آلومینیمی تولید شده به روش ARB با افزایش سرعت چرخشی را می‌توان به عنوان تابعی از میزان تغییر شکل پلاستیک در پارامترهای مختلف FSW در نظر گرفت. به طوریکه در یک سرعت خطی ثابت با افزایش سرعت چرخشی ابزار میزان تغییر شکل پلاستیک در داخل حوضچه‌ی جوش افزایش می‌یابد که این افزایش سبب بهبود کیفیت اتصال خواهد شد. شکل (۴) درشت ساختار حاصل از FSW فوم تولید شده به روش ARB را نشان می‌دهد. این ساختار مربوط به جوشکاری انجام شده در سرعت چرخشی ۹۰۰ rpm می‌باشد. با توجه به شکل، جوشی با عمق نفوذ کامل به دست آمده که تخلخل‌های ریز در داخل ناحیه‌ی همزده قابل مشاهده است.

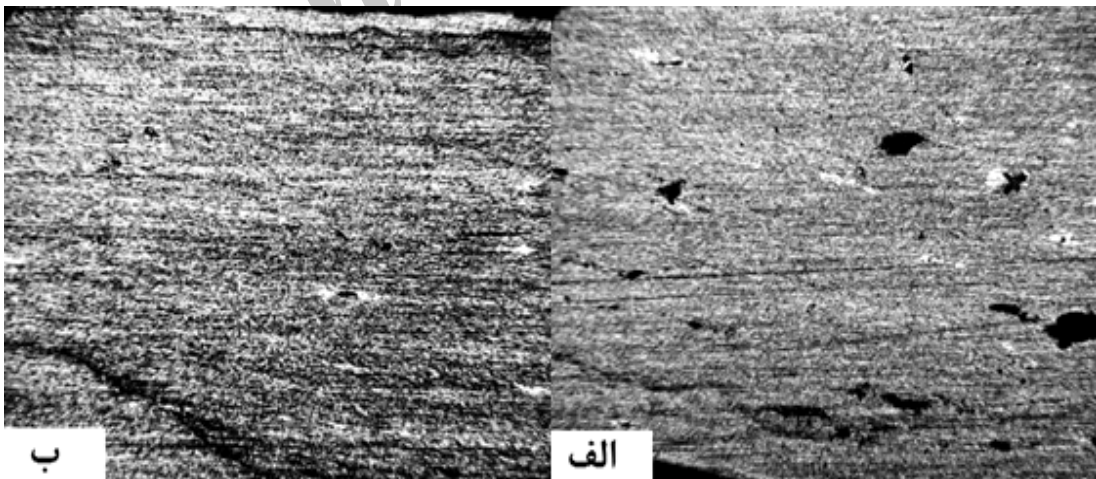


14 mm

شکل ۳. کیفیت ظاهری جوش‌های انجام پذیرفته در سرعت‌های چرخشی مختلف: الف) ۵۰۰، ب) ۷۰۰، ج) ۹۰۰ و د) ۱۱۰۰ rpm



شکل ۴. درشت ساختار حاصل از جوشکاری همزن اصطکاکی فوم تولید شده به روش ARB (۲۵ mm/min - ۹۰۰ rpm)



500 μ m

شکل ۵. تخلخل‌های موجود در دو سمت الف) پیش‌رونده و ب) پس‌رونده در شرایط جوشکاری سرعت چرخشی ۹۰۰ rpm و سرعت خطی ۲۵ mm/min

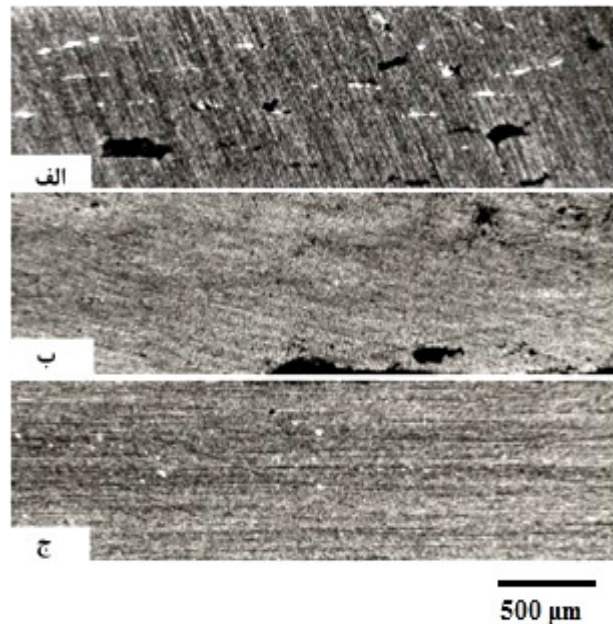
ناحیه‌ی جوش از آزمون میکروسختی سنجی ویکرز استفاده شده است که نتایج آن در نمودار شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که سختی ناحیه‌ی جوش با افزایش سرعت چرخشی ابزار افزایش یافته است. در FSW و در یک سرعت خطی ثابت، افزایش سرعت چرخشی باعث افزایش میزان حرارت و ورودی و همچنین افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک در ناحیه‌ی جوش می‌شود که افزایش حرارت و ورودی باعث کاهش سختی و افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک باعث افزایش سختی می‌شود. در نتیجه بسته به اینکه کدامیک از این دو عامل به عنوان عامل غالب عمل نماید، سختی ناحیه‌ی جوش می‌تواند کاهش یا افزایش یابد [۱۷]. بررسی نتایج نشانگر این امر است که در این مطالعه تاثیر میزان تغییر شکل پلاستیک ناحیه‌ی جوش به عنوان عامل اصلی تغییرات ریز ساختاری بوده که باعث افزایش سختی در سرعت های چرخشی بیشتر شده است.

نمودار شکل (۸) تغییرات چگالی ناحیه‌ی جوش را در سرعت‌های چرخشی متفاوت نشان می‌دهد که بیانگر افزایش چگالی این ناحیه با افزایش سرعت چرخشی ابزار است که این امر نیز افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک رخ داده در ناحیه‌ی جوش را تایید می‌کند. بنابراین در یک سرعت خطی ثابت افزایش سرعت چرخشی ابزار علاوه بر افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک و در نتیجه کار سختی ناشی از آن، سبب کاهش میزان تخلخل‌های موجود در ناحیه‌ی جوشکاری نیز می‌شود که در نتیجه‌ی تاثیر این دو عامل سختی ناحیه‌ی جوش افزایش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر سرعت چرخشی ابزار در FSW فوم‌های آلومینیمی تولید شده به روش ARB بر چگالی، میزان عیوب و همچنین خواص مکانیکی ناحیه‌ی جوش مورد مطالعه قرار گرفت که با توجه به بررسی‌ها و مشاهدات موجود، نتایج زیر قابل حصول می‌باشد:

۱- روش FSW می‌توند به عنوان روشی مناسب برای جوشکاری فوم‌های آلومینیمی تولید شده به روش ARB مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۶. تخلخل‌های موجود در ناحیه‌ی جوش در سرعت خطی ثابت و سرعت های چرخشی مختلف: الف) ۷۰۰، ب) ۹۰۰ و ج) ۱۱۰۰ rpm

میزان تخلخل‌های موجود در ناحیه‌ی جوش به میزان تغییر شکل پلاستیک اتفاق افتاده در این ناحیه وابسته است به طوریکه با افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک از میزان تخلخل‌ها کاسته خواهد شد. بنابراین در یک سرعت خطی ثابت، با افزایش سرعت چرخشی میزان تخلخل‌ها در ناحیه‌ی جوش کاهش خواهد یافت که به دلیل افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک در این ناحیه می‌باشد که این امر در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در سرعت چرخشی ۷۰۰ rpm (شکل الف) تخلخل‌ها بوضوح قابل مشاهده‌اند که میزان این تخلخل‌ها در حدود ۱۰ درصد می‌باشد. اما در سرعت چرخشی ۹۰۰ rpm (شکل ب) تخلخل‌ها به صورت ریز و پراکنده‌تر مشاهده می‌شوند که میزان آنها در حدود ۵ درصد است. با افزایش سرعت چرخشی به ۱۱۰۰ دور بر دقیقه به دلیل افزایش مناسب تغییر شکل پلاستیک میزان تخلخل‌ها در ناحیه‌ی جوش به شدت کاهش می‌یابد که درصد تخلخل در این نمونه در حدود ۰/۷ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به کیفیت نه چندان مناسب اتصال ایجاد شده در سرعت چرخشی ۵۰۰ rpm، ساختار مربوط به این پارامتر ارائه نگردیده است. به منظور بررسی تاثیر سرعت چرخشی ابزار FSW بر خواص مکانیکی

چگالی این ناحیه افزایش می‌یابد. و چگالی این ناحیه افزایش می‌یابد.

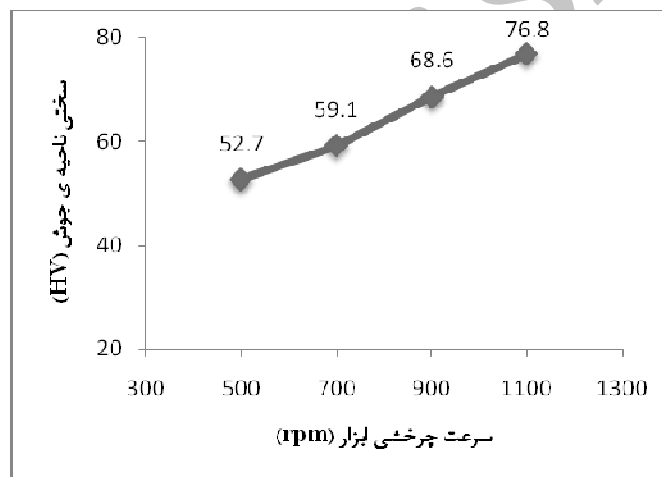
۶- در یک سرعت خطی ثابت، افزایش سرعت چرخشی سبب افزایش سختی ناحیه‌ی جوش می‌شود.

۲- در جوشکاری فوم‌های آلومینیومی تولید شده به روش ARB با استفاده از روش FSW، در یک سرعت خطی ثابت، با افزایش سرعت چرخشی، میزان عیوب موجود در ناحیه‌ی جوشکاری کاهش یافته و کیفیت جوش افزایش می‌یابد.

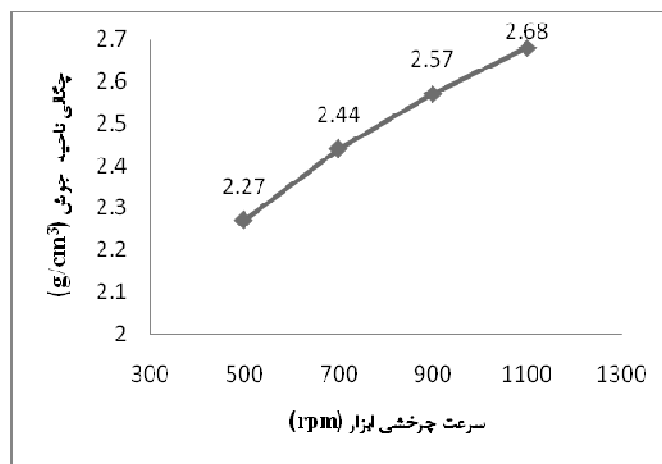
۳- وجود عیب شیاری شدن در مرکز خط جوش در سرعت چرخشی پایین قابل مشاهده است که با افزایش سرعت چرخشی این عیب برطرف می‌شود.

۴- در شرایط جوشکاری مشخص میزان تخلخل موجود در سمت پیش‌رونده‌ی ناحیه‌ی جوشکاری در مقایسه با سمت پس‌رونده‌ی ناحیه‌ی جوشکاری بیشتر می‌باشد.

۵- با افزایش سرعت چرخشی در یک سرعت خطی ثابت میزان تخلخل‌های موجود در ناحیه‌ی جوشکاری کاهش و



شکل ۷. تغییرات سختی ناحیه‌ی جوش در سرعت‌های چرخشی متفاوت و سرعت خطی ثابت ۲۵ mm/min



شکل ۸. تغییرات چگالی ناحیه‌ی جوش در سرعت‌های چرخشی متفاوت و سرعت خطی ثابت ۲۵ mm/min

مراجع

10. H. Haferkamp, J. Bunte, D. Herzog, A. Ostendorf, "Laser Based Welding of Cellular Aluminum", Science and Technology of Welding&Joining, vol.9, pp. 65-71, 2004.
11. Kramer, F.Simancik, R.Florek, M. Nosko; K.Müllerová, P.Tobolka, O. Mishina, "Friction Stir Welding of Foamable Materials and Foam Core Sandwiches", Conference on Materials, Processes, Friction and Wear MATRIB'06, Vela Luka, 22-24.06.2006.
12. H. Horn, "Friction Stir Welding of Aluminium Foam Materials", Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, D-20099 Hamburg.
13. Y. Hangai, S. Koyama, M. Hasegawa, T. Utsunomiya, "Fabrication of Aluminum Foam/Dense Steel Composite by Friction Stir Welding", Metallurgical and Materials Transaction A, VOLUME 41A
14. Y. Hangai, K. Takahashi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa, "Fabrication of Functionally Graded Aluminum Foam Using Aluminum Alloy Die Castings by Friction Stir Processing", Materials Science and Engineering A, vol. 534, pp. 716-719, 2012.
15. M. Alizadeh, M. H. Paydar, Study on the effect of presence of TiH₂ particles on the roll bonding behavior of aluminum alloy strips, Materials and Design 30(2009)82-86.
16. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R 50 (2005) 1-78.
17. Gurmeet Singh, Kulwant Singh, Jagtar Singh, "Effect of Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties in Friction Stir Welding of Aluminum Alloy", Trans Indian Inst Met (August-October 2011) 64(4-5):325-330.
1. J. Banhart, J. Balumeister, "Production Methods for Metallic Foams", Fraunhofer-Institute for Applied Materials Research.
2. V.C. Srivastava, K. L. Sahoo, " Processing, Stabilization and Applications of Metallic Foams", Materials Science-Poland, Vol. 25, No. 3, 2007.
3. K. Kitazono, E. Sato, K. Kuribayashi, " Novel Manufacturing Process of Closed-Cell Aluminum Foam by Accumulative Roll-Bonding", ScriptaMaterialia 50 (2004) 495-498.
4. K. Kitazono, Y. Kikuchi, E. Sato, K. Kuribayashi, "Anisotropic Compressive Behaviour of Al-Mg Alloy Foams Manufactured through Accumulative Roll-Bonding Process", Materials Letters, Vol 61, pp. 1771-1774, (2007).
5. M. Alizadeh, M. H. Paydar, "Fabrication of Al/SiCP composite strips by repeated roll-bonding (RRB) process", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 477, pp. 811- 816 (2009).
6. Ch. Lu, K. Tieu, D. Wexler, "Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding process using nano-sized SiO₂ particles", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 4830-4834, (2009).
7. J. Banhart, " Aluminium Foams for Lighter Vehicles", Int. J. Vehicle Design, Vol. 37, Nos. 2/3, 2005.
8. J. Banhart, "Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams", Progress in Materials Science, Vol. 46, pp. 559-632, (2001).
9. S. J. Shiang, T.Y. Fong, Y. J. Bin, "Principal Component Analysis for Multiple Quality Characteristics Optimization of Metal Inert Gas