

## ساخت فوم آلومینیومی به روش ARB و بررسی خواص اتصال آن در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

سید جلیل موسوی دولت آبادی<sup>۱</sup> و توحید سعید<sup>۲</sup>

### چکیده

هدف از این پژوهش ایجاد اتصالی با خواص مناسب روی فوم‌های آلومینیومی می‌باشد. در این پژوهش، ورق‌های آلومینیوم خالص تجاری با ابعاد  $1 \text{ mm} \times 100 \times 200$  پس از آماده‌سازی و برس‌زنی به همراه ۲٪ وزنی از پودر هیدرید تیتانیوم روی هم انباشته شده و با استفاده از روش نورد تجمعی (ARB)، تا ۴ پاس با ۵۰٪ کاهش ضخامت، نورد شدند. سپس عملیات حرارتی در دماهای گوناگون  $500-650^\circ\text{C}$  و زمان‌های ۱۰ و ۲۰ دقیقه جهت فوم‌سازی روی تعدادی از ورق‌های ARB شده انجام گرفت و تأثیر دما و زمان نگهداری در کوره بر چگالی و درصد تخلخل فوم تولید شده به وسیله آزمون ارشمیدس اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که فوم‌های تولید شده در دمایی نزدیک به دمای ذوب آلومینیوم درصد تخلخل بیش‌تری دارند. فوم‌های تولید شده از روش ARB، به وسیله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) در سرعت‌های گوناگون چرخشی  $1100\text{rpm}$ - $560$  و سرعت پیشروی  $25 \text{ mm/min}$  جوشکاری شدند و بررسی مقطع اتصال فوم جوشکاری شده نشان داد که اتصال مناسب با خواص قابل قبول به وسیله FSW، قابل دستیابی می‌باشد و با افزایش سرعت چرخشی، سختی در ناحیه هم زده فوم افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: فوم آلومینیومی، نورد تجمعی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد (جوشکاری)، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.

۲- استادیار مهندسی مواد، مدیر پژوهشی دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

\*- نویسنده مسئول مقاله: s.jalil.musavi@gmail.com

## پیشگفتار

در دهه اخیر، دسته‌ای از فلزات سلولی، به نام فوم‌های فلزی با خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی جدید مانند چگالی کم و با این حال، سفتی بالا و عایق بودن صوتی و حرارتی در عین نفوذپذیری گاز بالا، مطرح شده‌اند و جذابیتی بسیار یافته‌اند [۱]. این مواد برای ساختارهای سبک، جذب انرژی و برای مدیریت حرارتی پیشنهاد می‌شوند. از جمله کاربردهای عمده فوم‌های فلزی در صنایع خودرو و هوافضا می‌باشد که علت اصلی آن خاصیت جذب انرژی بسیار بالا در تنش‌های فشاری در این گروه مواد است [۲].

فوم‌های فلزی با استفاده از توزیع عاملی درون فلز که در دمای خاصی با تولید گاز و محبوس شدن آن درون فلز، تخلخل ایجاد کند (عامل فوم ساز) تولید می‌شوند. برای توزیع عامل فوم‌ساز درون قطعه روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود.

از سوی دیگر، روش اتصال نورد تجمعی که نخستین بار به وسیله تیسوجی<sup>۱</sup> و همکارانش [۳] به‌عنوان یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید<sup>۲</sup> (SPD) معرفی گردید، به‌عنوان روشی برای توزیع ذرات فاز ثانویه در ساختار ورق‌های فلزی مورد استفاده قرار گرفته و از این راه کامپوزیت‌های زمینه فلزی و نیز فوم‌های آلومینیومی تولید شده‌اند [۴].

مزیت این روش توانایی در تولید ورق با ساختار نانو در مقیاس صنعتی می‌باشد. به‌همین دلیل، از این روش بتازگی در تولید کامپوزیت‌های چند لایه استفاده شده است. این روش در واقع نوعی از فرایند ایجاد تغییر شکل پلاستیک در ماده است که به‌کمک آن‌ها می‌توان بدون تغییر قابل ملاحظه در ابعاد قطعه، کرنش‌های پلاستیک بسیار زیادی در ماده ایجاد کرد. در سال‌های اخیر کامپوزیت‌های فلزی چند لایه به دلیل خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی برجسته مورد توجه زیادی واقع شده‌اند. ایده کلی برای افزودن ذرات به کامپوزیت‌ها جهت مستحکم کردن و تقویت آن‌ها می‌باشد. خواص مکانیکی و

سایشی این کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات می‌تواند به‌صورت قابل توجهی نسبت به فاز زمینه بهبود یابد [۵]. کیتازونو<sup>۳</sup> به‌صورت آزمایشی اثبات کرده است که فرآیند<sup>۴</sup> ARB برای توزیع پودر  $TiH_2$  درون ورق‌های آلومینیومی، قابل استفاده است. تخلخل و اندازه سلول ورق فومی آلومینیومی ساخته شده نیز بررسی شد [۶].

زنده باد برای تولید فوم آلومینیومی، از روش ARB برای توزیع پودر هیدرید تیتانیم در ورق آلومینیومی استفاده کرد و استحکام فشاری فوم‌های تولید شده را با استفاده از آزمون فشار تک محوری اندازه‌گیری کرد. وی کاهش استحکام فشاری را با افزایش درصد تخلخل مشاهده کرد [۷].

<sup>۵</sup>FSW در ابتدا برای اتصال فلزات و آلیاژها گسترش یافته بود. برخی بررسی‌ها روی داده‌های اتصالات لب به لب بین آلیاژ آلومینیوم و فولاد زنگ نزن به وسیله FSW گزارش شده است. در پژوهشی که به وسیله هانگای<sup>۶</sup> و دوستان در سال ۲۰۱۰ انجام شد، کامپوزیت فومی آلومینیومی با فلز متراکم به وسیله FSW تولید شد [۸]. آن‌ها متوجه شدند که میزان تخلخل و روش توزیع آن در کیفیت نهایی فوم‌های فلزی تأثیر بسزایی دارد. در پژوهش دیگری که به وسیله هانگای و دوستان در سال ۲۰۱۱ انجام شد، فوم آلومینیوم مدرج<sup>۷</sup> (FG) همراه ساختارهای گوناگون متخلخل با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی<sup>۸</sup> (FSP) و مشخصات فشاری فوم حاصل، نشان داده شد و هم‌چنین، نشان داده شد که فوم‌های FG از نظر تغییر شکل، قابل کنترل هستند [۹].

کیفیت فوم رابطه مستقیمی با افزایش میزان تخلخل فوم همراه با حفظ شکل و یکنواختی تخلخل‌های فوم دارد [۱]. در این پژوهش پس از تلاش برای بهبود کیفیت فوم‌های تولید شده، سعی شد تا با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اتصالی مناسب روی فوم‌های تولید شده، بدست آید.

<sup>3</sup> -Kitazono

<sup>4</sup> -Accumulate Roll Bonding

<sup>5</sup> - Friction Stir Welding

<sup>6</sup> -Yoshihiko Hangai

<sup>7</sup> -Functionally Graded

<sup>8</sup> -Friction Stir Processing

<sup>1</sup> -Tsuji

<sup>2</sup> -Sever Plastic Deformation

شرایط عملیات حرارتی در جدول ۱ قابل مشاهده است. برای عملیات حرارتی از کوره مقاومتی ساخت شرکت آذر، استفاده شد. پس از بدست آوردن دما و زمان بهینه (۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه)، سایر ورق‌های ARB شده برای فوم سازی در این دما عملیات حرارتی شدند.

### ساخت ابزار FSW

متناسب با ضخامت فوم‌های تولید شده، برای انجام FSW، ابزاری طراحی و ساخته شد. ابزار جوشکاری مورد استفاده فولاد H1۳ (۲۳۴۴) می‌باشد. این فولاد یک آلیاژ گرم کار می‌باشد که برای ساخت قالب‌های برش مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای ساخت ابزار ابتدا یک میل‌گرد به قطر ۲۰ mm و به طول ۱۲ cm تهیه شد و ساخت ابزار با مشخصات جدول ۲ انجام گرفت. با این توضیح که پین و شانه در هر دو طرف ابزار ساخته شد تا در موقع ساییده شدن ابزار و از بین رفتن پین، در یک طرف ابزار، از طرف دیگر آن بتوان برای ادامه جوشکاری استفاده کرد. شکل پین مورد استفاده به صورت استوانه‌ای به قطر ۳ میلی‌متر می‌باشد که در شکل ۲ قابل مشاهده است.

### جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

در مرحله بعد برای بررسی تاثیر تغییر پارامترهای جوشکاری، فوم تولید شده در ابعاد ۱۰×۵ cm تهیه شده و به وسیله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سرعت‌های گوناگون چرخشی قابل دستیابی در دستگاه فرز مورد استفاده (۵۶۰-۱۱۰۰ rpm) به وسیله ابزار ساخته شده، جوشکاری شد. در حین جوشکاری فوم‌ها، بمنظور افزایش حرارت ورودی برای ورود مناسب مواد ناحیه همزده به منطقه پلاستیک، با توجه به نوع دستگاه فرز کم‌ترین سرعت پیشروی موجود (۲۵ mm/min)، به عنوان سرعت پیشروی آزمایش‌ها، در نظر گرفته شد و فقط سرعت چرخش تغییر می‌کرد. در هنگام شروع جوشکاری، ابتدا پین با سرعت مشخص به چرخش در آمده و با سطح قطعه کار تماس پیدا کرده و سپس به مقدار مشخص که

فوم‌های تولید شده، در شرایط گوناگونی از سرعت‌های چرخشی به وسیله FSW جوشکاری شده‌اند و مقطع اتصال جوشکاری شده مورد بررسی قرار گرفته است. تغییرات پارامترهای فرآیند و بررسی تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی اتصال بررسی شده است.

### مواد و روش‌ها

مواد اولیه عبارت از ورق آلومینیومی خالص تجاری و پودر هیدرید تیتانیم با اندازه دانه ۱۰-۲ μm ساخت مرک آلمان می‌باشد. ابعاد صفحه اولیه عبارت است از: طول ۱۰۰ cm و عرض ۱۰۰ cm و ضخامت ۱ mm. این ورق به وسیله گیوتین به نمونه‌هایی با ابعاد ۲۰۰×۱۰۰×۱ mm برش داده شد.

### فرایند نورد تجمعی

پس از فرایند آماده‌سازی سطحی که شامل چربی زدایی و برس‌زنی می‌باشد، سطوح آماده شده ورق‌ها روی هم گذاشته و پودر هیدرید تیتانیم در پاس نخست نورد بین آن‌ها قرار گرفته و فرایند نورد با ۵۰٪ کاهش ضخامت انجام پذیرفت. برای عملیات نورد از دستگاه نورد ۲۵ ton با سرعت چرخشی ۳ rpm استفاده شد. پس از این نمونه بدست آمده از مرحله نخست نورد از راستای طولی آن به دو بخش تقسیم شده و مراحل گذشته دوباره روی آن تکرار شد. این فرایند تا چهار مرحله اعمال گردید. شماتیک فرایند در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

### عملیات حرارتی و آزمون ارشمیدس

کامپوزیت تولید شده در دماها و زمان‌های نگهداری گوناگون جهت فوم سازی، عملیات حرارتی شدند. چگالی و درصد تخلخل برای نمونه‌های عملیات حرارتی شده به وسیله آزمون ارشمیدس محاسبه شد. برای این کار وزن نمونه‌ها در هوا و سپس در آب، به وسیله ترازوی دیجیتالی دقیق اندازه‌گیری شده و چگالی به وسیله رابطه ۱ [۷] برای نمونه‌ها بدست آمد.

$$(۱) \text{ چگالی آب} \times \frac{\text{وزن در هوا}}{\text{وزن در آب} - \text{وزن در آب}} = \text{چگالی ماده}$$

### سختی سنجی

بمنظور بدست آوردن توزیع سختی در ناحیه جوش آزمایش ریزسختی سنجی ویکرز در یک نمونه با دستگاه مدل M-400-G1 تحت نیروی ۵۰ گرم و برای مدت ۱۵ ثانیه روی سطح مقطع عرضی<sup>۵</sup> (TD) و نیز در راستای ضخامت<sup>۶</sup> (ND) نمونه عمود بر سطح جوش انجام گرفت. برای گزارش ریزسختی در نمونه‌ها از ناحیه همزده و ناحیه متأثر از حرارت دو نقطه گوناگون اندازه‌گیری شده و میانگین آن در نظر گرفته شد.

### نتایج و بحث

#### شکل ظاهری ورق‌های ARB شده

همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ورق پس از اعمال ۴ مرحله نورد پی در پی، دچار ترک خوردگی لبه‌ای شده است. چیزی که اعمال نورد تجمعی را محدود می‌نماید ترک خوردگی لبه‌ای است. ترک ایجاد شده در جهت عمود بر جهت نورد و به سبب تغییر شکل ناهمگن ایجاد می‌شود که به دلیل قفل شدن نابه جایی‌ها پس از تغییر شکل شدید حین کار سرد اعمالی، اتفاق می‌افتد [۱۰].

یکی از مسایل جدی در حین انجام ARB ترک خوردن و شکستن ورق می‌باشد. از آنجایی که در این روش کرنش پلاستیک زیادی در ماده ذخیره می‌شود و در حین نورد تنش‌های هیدرواستاتیک به ورق وارد نمی‌شود لذا، در برخی از موارد در گوشه‌های ورق ترک‌هایی ایجاد می‌شود و این پدیده بویژه در پاس‌های بیش‌تر، محتمل‌تر است. در اثر سیلان ماده در جهت عرضی در کناره‌های ورق تنش‌های کششی ایجاد می‌شود که منجر به ایجاد ترک در این ناحیه می‌شود. از این رو، نباید نسبت عرض به ضخامت ورق کم‌تر از ۱۰ باشد [۱۰].

#### نتایج عملیات حرارتی

نتایج بدست آمده از عملیات حرارتی ورق‌های ARB شده برای فوم سازی، به صورت نمودار در شکل ۴ قابل مشاهده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با

در این‌جا ۱/۵ mm بود، در فوم فرو رفته و با سرعت پیشروی تعیین شده FSW انجام گرفت.

در این پژوهش با ثابت در نظر گرفتن اثر نیروی فشاری دستگاه و هندسه و زاویه ابزار نسبت به قطعه کار حین FSW، پارامترهای گوناگونی از سرعت‌های چرخشی در اتصال فوم‌های آلومینیومی اعمال شد که در جدول ۳ قابل مشاهده است. برای انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از دستگاه فرز ساخت هکر آلمان استفاده شد.

#### میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> (SEM)

در این پژوهش به وسیله SEM تصاویری از سطح ناحیه جوش در حالت‌های الکترون‌های برگشتی<sup>۲</sup> (BSE) و ثانویه<sup>۳</sup> (SE) تهیه شد. SE برای تصویربرداری در حالت توپوگرافی و مورفولوژی و BSE برای کنتراست توزیع فازی مناسب است. برای مشخص کردن ترکیب عنصری نمونه تهیه شده از ناحیه جوش از آنالیز طیف‌سنجی اشعه X (EDX<sup>۴</sup>) استفاده شد.

#### متالوگرافی

بمنظور ارزیابی تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روی ریزساختار حاصل در فوم، از متالوگرافی نوری استفاده شد. جهت بررسی ریز ساختار بدست آمده، نمونه‌هایی در جهت عمود بر سطح جوش تهیه شدند. بمنظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای متالوگرافی ابتدا سطح نمونه‌ها به وسیله کاغذهای سنباده ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ سنباده‌زنی شدند. به دلیل تفاوت شرایط ریز ساختار در فوم تولید شده و ناحیه جوشکاری شده اچ کردن نمونه‌ها موفقیت آمیز نبود، اما تصاویر ماکروسکوپی گرفته شده به وسیله میکروسکوپ نوری برای بررسی مورفولوژی فوم جوشکاری شده، استفاده شد. متالوگرافی نوری نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ نوری PMG3، انجام گرفت.

<sup>۱</sup> - Scanning Electron Microscope

<sup>۲</sup> - Back Scattered Electrons

<sup>۳</sup> - Secondary Electrons

<sup>۴</sup> - Energy Dispersive X ray

<sup>۵</sup> - Transverse direction

<sup>۶</sup> - Normal direction

پاس نورد شده و در دمای °C ۶۵۰ به مدت ۱۰ دقیقه نگهداری شده است) از ورق‌های ARB شده، مشاهده می‌شود. توزیع و اندازه تخلخل‌ها، یکنواخت می‌باشد زیرا پس از ۴ مرحله نورد تجمعی ۱۶ لایه‌ی فلزی و ۸ لایه از پودر هیدرید تیتانیوم در ضخامت ۱ میلی‌متر از نمونه، موجود می‌باشد که باعث می‌شود توزیع مناسبی از پودر عامل فوم ساز درون فلز به وسیله فرایند ARB انجام شود.

#### نمای ظاهری فوم جوشکاری شده

در شکل ۷ نمای ظاهری فوم جوشکاری شده در سرعت‌های چرخشی ۷۰۰ rpm و ۹۰۰ rpm و سرعت پیشروی ۲۵ mm/min قابل مشاهده است. مشاهده می‌شود که افزایش سرعت چرخشی، باعث تلاطم جریان و خروج مواد از اطراف شانه ابزار و تشکیل پلیسه بیش‌تر شده است [۱۱].

نمونه‌هایی از مقطع اتصال جوشکاری فوم آلومینیومی تهیه شد و پس از آماده سازی تصاویری از مقطع اتصال جوشکاری شده به وسیله میکروسکوپ نوری تهیه شد. نمونه‌ای از این تصاویر که مربوط به فوم جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۷۰۰ rpm با سرعت پیشروی ۲۵ mm/min می‌باشد، در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

مشاهده می‌شود که اکثر تخلخل‌ها در ناحیه اتصال از بین رفته است. که این به دلیل حرارت ورودی در اثر اصطکاک بین شانه و قطعه کار و تغییر شکل پلاستیک شدید در ناحیه اتصال می‌باشد که باعث شده است که گاز محبوس شده در حفرات خارج شده و حفرات از بین رفته و حجم فوم کاهش پیدا کند.

به دلیل اندازه خیلی کم ناحیه متأثر از حرارت در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ساختار سلول‌های فوم در اطراف ناحیه جوشکاری شده تغییری پیدا نکرده است و در نتیجه درصد تخلخل فوم در اطراف ناحیه جوشکاری شده تغییر نیافته است.

افزایش دما درصد تخلخل فوم‌ها افزایش می‌یابد که این به دلیل نرم شدن و افزایش میزان شکل‌پذیری آلومینیوم در دماهای بالا می‌باشد که باعث می‌شود در اثر آزاد شدن گاز، آلومینیوم تغییر شکل بیش‌تری دهد و تخلخل‌هایی با اندازه بزرگ‌تر تشکیل شود. بیش‌ترین درصد تخلخل در دمای نزدیک به دمای ذوب که ناحیه خمیری می‌باشد، بدست آمده است.

مشاهده می‌شود که در این دما (ناحیه خمیری) با افزایش زمان نگهداری، درصد تخلخل کاهش یافته است. زیرا زمان کافی برای خروج گاز از حفره‌ها بوجود آمده و گاز از حفره‌ها خارج شده و حفره‌ها بسته شده و از بین رفته‌اند.

هم‌چنین، ملاحظه می‌گردد که با افزایش تعداد پاس‌های نورد، درصد تخلخل افزایش یافته است زیرا با افزایش تعداد پاس‌های نورد توزیع بهتر و یکنواخت‌تری از عامل فوم ساز در بین لایه‌های آلومینیوم بوجود می‌آید و تعداد مکان‌های مستعد برای ایجاد تخلخل افزایش می‌یابد.

#### نمای ظاهری فوم تولید شده

در شکل ۵ نمای ظاهری از فوم تولید شده نمونه ۱۵ (۴ پاس نورد شده و در دمای °C ۶۵۰ به مدت ۱۰ دقیقه نگهداری شده است) از ورق‌های ARB عملیات حرارتی شده که به وسیله دوربین عکاسی ثبت شده است، قابل مشاهده است. مشاهده می‌شود پس از عملیات حرارتی ضخامت فوم (بیش‌تر از ۱ میلی‌متر) نسبت به ضخامت ورق‌های ARB شده (۱ میلی‌متر) افزایش یافته است که این امر به دلیل آزاد شدن گاز حین عملیات حرارتی و محبوس شدن آن درون نمونه می‌باشد که باعث ایجاد تخلخل‌ها و افزایش حجم نمونه شده است.

تغییر شکل ظاهری مشاهده شده پس از فوم سازی به دلیل این بود که عملیات حرارتی برای فوم سازی، در دمای نزدیک به دمای ذوب آلومینیوم که ناحیه خمیری می‌باشد، انجام گرفت. هم‌چنین، آزاد شدن گاز هیدروژن در حین عملیات حرارتی و محبوس شدن آن درون نمونه، باعث ایجاد تخلخل و تغییر شکل ظاهری فوم شد.

در شکل ۶ تصویر میکروسکوپ نوری فوم سلول بسته تولید شده به وسیله عملیات حرارتی نمونه ۱۵ (۴)

### نتایج آنالیز SEM از ناحیه جوشکاری ورق‌های ARB شده

در این پژوهش به وسیله SEM تصاویری از سطح ناحیه جوش در حالت‌های BSE و SE تهیه شده که در شکل ۹ مشاهده می‌شود. به دلیل این که اچ کردن نمونه‌ها موفقیت آمیز نبود، مرز دانه‌ها و ریزساختار در SEM به وضوح مشاهده نشد.

به دلیل این که در تصویر الکترون‌های برگشتی، فازهای حاوی عناصر سنگین، روشن‌تر و فازهای سبک‌تر، تیره‌تر دیده می‌شوند، نقاط روشن مشاهده شده در تصویر ۹-الف، به احتمال زیاد، مربوط به ذرات هیدرید تیتانیم، ذرات تیره رنگ مربوط به حفرات و فاز طوسی Al زمینه می‌باشد.

طیف EDX بدست آمده از آنالیز عنصری از ناحیه همزده نمونه ۳، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. مشاهده می‌شود آلومینیوم و تیتانیم تنها عناصری بودند که در این آنالیز با شدت جریان‌های بالا پیک دادند که این دلیلی بر صحت مواد اولیه بکار گرفته در این پژوهش بود.

نتایج بدست آمده از آنالیز عنصری نمونه‌های گوناگون از ورق‌های فراوری شده در جدول ۴ قابل مشاهده است.

مشاهده می‌شود که میانگین درصد وزنی تیتانیم در نمونه‌ها تقریباً برابر با ۲٪ می‌باشد که نشان دهنده صحت توزیع پودر هیدرید تیتانیم درون ورق‌های آلومینیوم در پاس نخست نورد می‌باشد.

مشاهده می‌شود که درصد وزنی تیتانیم محاسبه شده در نمونه‌ها دقیقاً برابر ۲٪ نیست. که این اتفاق به دلیل ابعاد کوچک ناحیه آنالیز شده است.

### نتایج سختی سنجی

عملیات ریز سختی سنجی به وسیله وزنه ۵۰ گرمی از منطقه همزده، برای نمونه‌های جوشکاری شده انجام گرفت که نمودار تغییرات سختی مناطق همزده بر حسب سرعت‌های گوناگون چرخشی بدست آمده در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

ملاحظه می‌گردد که با افزایش سرعت چرخشی، سختی در ناحیه همزده افزایش یافته است زیرا با افزایش

سرعت چرخشی میزان حرارت تولید شده در واحد طول جوش افزایش می‌یابد و مواد ناحیه جوش به میزان مناسب وارد منطقه پلاستیک می‌شوند و در نتیجه، مواد دو قطعه به صورت مناسب به هم جوش می‌خورند [۱۱].

### نتیجه گیری

۱. در ساخت فوم آلومینیومی با افزایش دما، درصد تخلخل فوم‌ها افزایش می‌یابد که این به دلیل نرم شدن و افزایش میزان شکل‌پذیری آلومینیوم در دماهای بالا می‌باشد. بیشترین درصد تخلخل در دمای نزدیک به دمای ذوب که ناحیه خمیری می‌باشد، بدست آمده است.

۲. با افزایش زمان نگهداری در کوره در دمای خمیری درصد تخلخل فوم تولید شده کاهش یافته است زیرا زمان کافی برای خروج گاز از حفره‌ها بوجود آمده و گاز از حفره‌ها خارج شده و حفره‌ها بسته شده و از بین رفته‌اند.

۳. با افزایش تعداد پاس‌های نورد، درصد تخلخل فوم تولید شده افزایش یافته است زیرا با افزایش تعداد پاس‌های نورد توزیع بهتر و یکنواخت‌تری از عامل فوم ساز در بین لایه‌های آلومینیوم بوجود می‌آید و تعداد مکان‌های مستعد برای ایجاد تخلخل افزایش می‌یابد.

۴. با توجه به این که کاهش چگالی و افزایش درصد تخلخل تاثیر مستقیمی در کیفیت نهایی فوم تولید شده دارد، در این پژوهش فوم بهینه از عملیات حرارتی ورق‌های ۴ پاس نورد شده در دمای  $650^{\circ}\text{C}$  با زمان نگهداری ۱۰ دقیقه بدست آمد.

۵. در جوشکاری فوم، بیش‌تر تخلخل‌ها در ناحیه اتصال از بین رفته است. که این به دلیل حرارت ورودی در اثر اصطکاک بین شانه و قطعه کار، و تغییر شکل پلاستیک شدید در ناحیه اتصال می‌باشد. همچنین، به دلیل اندازه خیلی کم ناحیه متأثر از حرارت در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ساختار سلول‌های فوم در اطراف ناحیه جوشکاری شده تغییری پیدا نکرده است و در نتیجه درصد تخلخل فوم در اطراف ناحیه جوشکاری شده تغییر نیافته است.

۷. نمی‌خورند و جوش معیوب و ناکارآمد خواهد بود. در نتیجه در سرعت‌های چرخشی بالاتر ناحیه اتصال با خواص مناسب بدست آمده است.

۸. با توجه به این‌که افزایش میزان سختی ناحیه همزده باعث بهبود خواص اتصال می‌شود، در این پژوهش اتصال مناسب با سختی ۷۶/۱ ویکرز در سرعت چرخشی ۱۱۰۰rpm و سرعت پیشروی ۲۵ mm/min بدست آمد.

### References

- ۱- م. دیوانداری، ع. واحد گلپایگانی، ح. شاه‌رودی، فوم‌های فلزی، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۰.
- 2- M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, and J. Hutchinson, *Metal Foams*, University of Cambridge, 2000.
- 3- Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai and R.G. Hong, "Ultra-Fine Grained Bulk Aluminum Produced by Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process", *Scripta Materialia*, vol. 39, No. 9, pp. 1221-1227, 1998.
- 4- Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, and T. Sakai, "Novel Ultra-High Straining Process for Bulk Materials, Development of the Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process", *Acta Materialia*, vol. 47, No. 2, pp. 579-583, 1999.
- ۵- ا. ح. اسلامی، م. م. مشکسار و س. م. زبرجد، "بررسی بر رفتار ( $MoSi_2$ ) اثرات ذرات دی سیلیساید مولیبدن به شده تولید مس مکانیکی و الکتریکی ماده مرکب زمینه"، *مجله مواد نوین (ARB)* تجمعی نوردی اتصال روش جلد ۴، شماره ۱، ص ۵۷-۵۸، پاییز ۱۳۹۲.
- 6- K. Kitazono, E. Sato, and K. Kuribayashi, "Novel Manufacturing Process of Closed-cell Aluminum Foam by Accumulative Roll-Bonding", *Institute of Space and Astronautical Science*, vol 43, pp. 229-510, 2003.

۶. با افزایش سرعت چرخشی، سختی در ناحیه همزده افزایش یافته است زیرا اگر سرعت چرخشی ابزار پایین باشد، به دلیل این‌که میزان حرارت تولید شده در واحد طول جوش پایین می‌آید مواد ناحیه جوش به مقدار مناسب وارد منطقه پلاستیک نمی‌شوند و در نتیجه مواد دو قطعه به صورت مناسب به هم جوش

- ۷- ا. زنده باد و ح. دانش منش، "بررسی رفتار فشاری فوم‌های آلومینیومی تولید شده با استفاده از فرایند نورد تجمعی"، پنجمین همایش مشترک انجمن متالوژی و جامعه علمی ریختگری ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۹.
- 8- Y. Hangai, and S. Koyama, "Fabrication of Aluminum Foam/Dense Steel Composite by Friction Stir Welding", *ASM International*, vol 41A, pp. 710-719, 2010.
- 9- Y. Hangai, and K. Takahashia, "Fabrication of Functionally Graded Aluminum Foam Using Aluminum Alloy Die Castings by Friction Stir Processing", *Materials Science and Engineering*, A534, pp. 716-719, 2012.
- 10- I. Nikulin, S. Malopheyev, A. Kipelova and R. Kaibyshev, "Effect of SPD and Friction Stir Welding on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Cu-Mg-Ag Sheets", *Materials Letters*, vol 66, pp. 311-313, 2012.
- 11- K. Elangovan and V. Balasubramanian, "Influences of Pin Profile and Rotational Speed Of the Tool on the Formation of Friction Stir Processing Zone in AA2219 Aluminium Alloy", *Materials Science and Engineering*, A459, pp. 7-18, 2006.

## پیوست‌ها

جدول ۱- نمونه‌های نورد شده در دماها و زمان‌های گوناگون برای فوم‌سازی عملیات حرارتی شده‌اند.

شماره نمونه	تعداد پاس	دمای عملیات حرارتی °C	زمان عملیات حرارتی (دقیقه)
۱	۳	۵۰۰	۱۰
۲	۳	۵۰۰	۲۰
۳	۳	۵۵۰	۱۰
۴	۳	۵۵۰	۲۰
۵	۳	۶۰۰	۱۰
۶	۳	۶۰۰	۲۰
۷	۳	۶۵۰	۱۰
۸	۳	۶۵۰	۲۰
۹	۴	۵۰۰	۱۰
۱۰	۴	۵۰۰	۲۰
۱۱	۴	۵۵۰	۱۰
۱۲	۴	۵۵۰	۲۰
۱۳	۴	۶۰۰	۱۰
۱۴	۴	۶۰۰	۲۰
۱۵	۴	۶۵۰	۱۰
۱۶	۴	۶۵۰	۲۰

جدول ۲- مشخصات ابزار ساخته شده برای اعمال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

تقعر شانه	طول پین	قطر پین	قطر شانه	سختی	جنس ابزار
۳°	۱/۵mm	۳mm	۱۲mm	۵۳ HRC	فولاد H۱۳

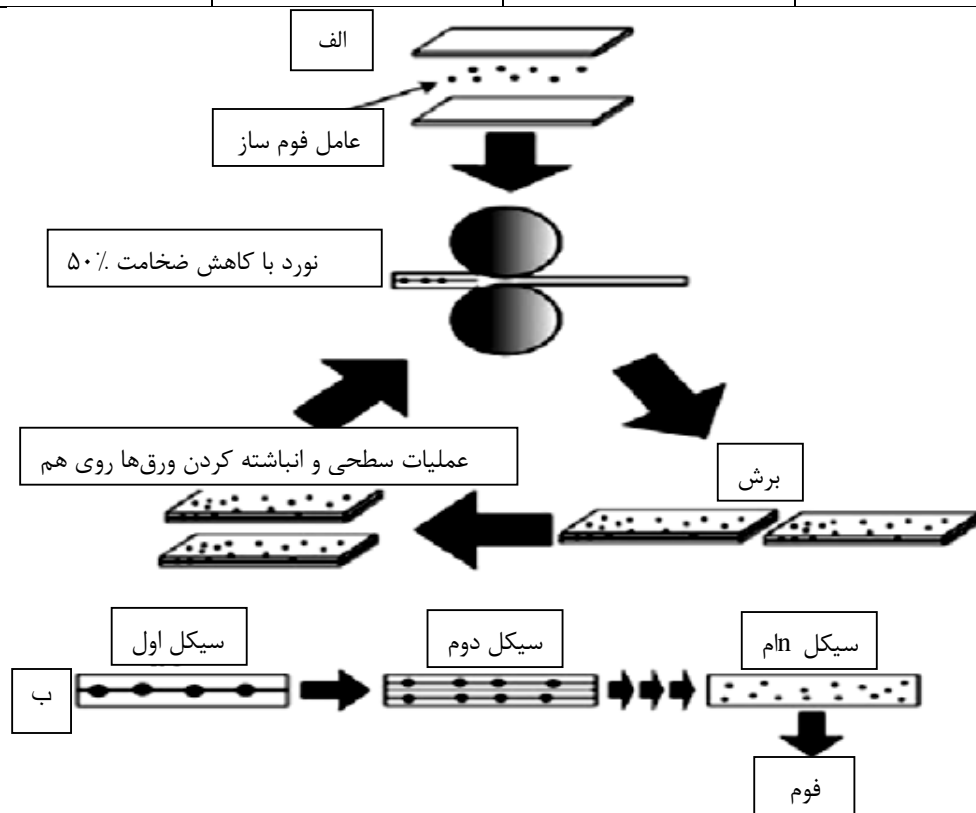
جدول ۳- پارامترهای اعمال شده در جوشکاری فوم‌ها

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴
سرعت چرخشی (rpm)	۵۶۰	۷۰۰	۹۰۰	۱۱۰۰
سرعت پیشروی (mm/min)	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵



جدول ۴- آنالیز عنصری مربوط به ناحیه فراوری ورق‌های ARB شده.

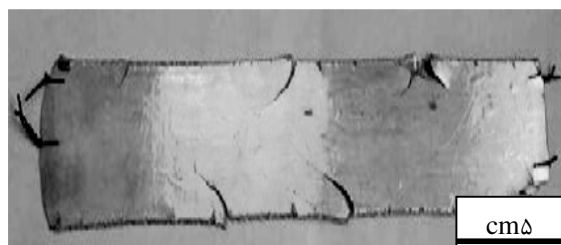
عنصر	شدت جریان	درصد وزنی متوسط	درصد اتمی
Al	۱/۳۴۵	۹۷/۹۸ ±۰/۵	۹۹/۱
Ti	۰/۸۳۵	۲/۰۲ ±۰/۵	۰/۹



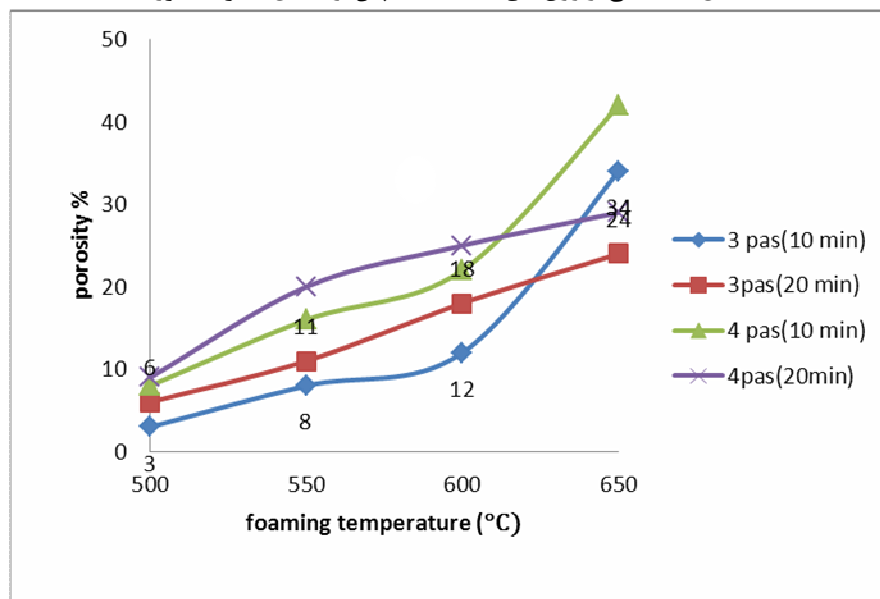
شکل ۱- الف: شماتیکی از فرآیند تولید یک صفحه پیش ساخته از راه فرایند ARB  
 ب: روند توزیع تدریجی ذرات عامل فوم ساز [۵].



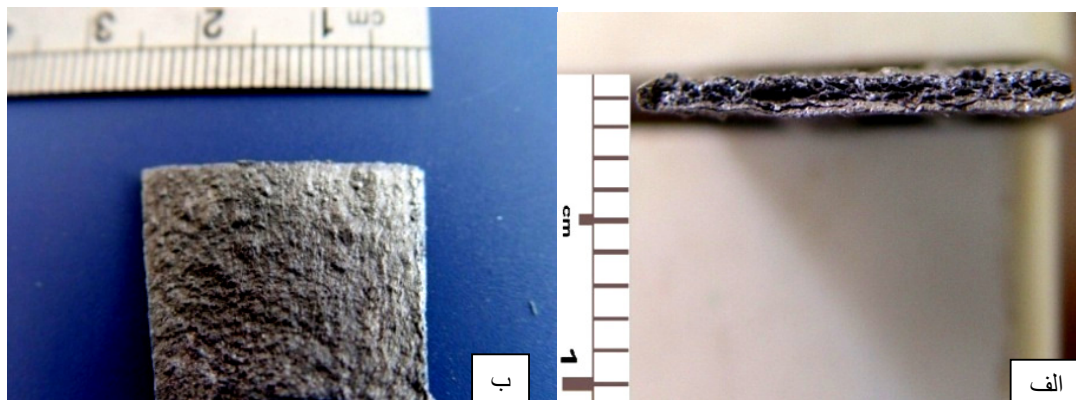
شکل ۲- تصویر ابزار مورد استفاده برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فومها



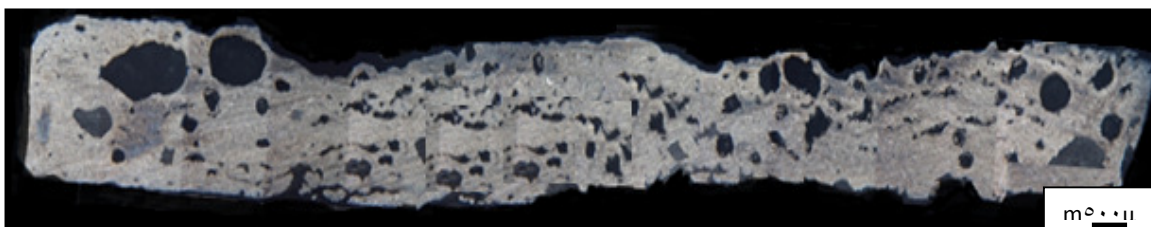
شکل ۳- نمایی از ورقهای ARB شده پس از اعمال ۴ مرحله نورد.



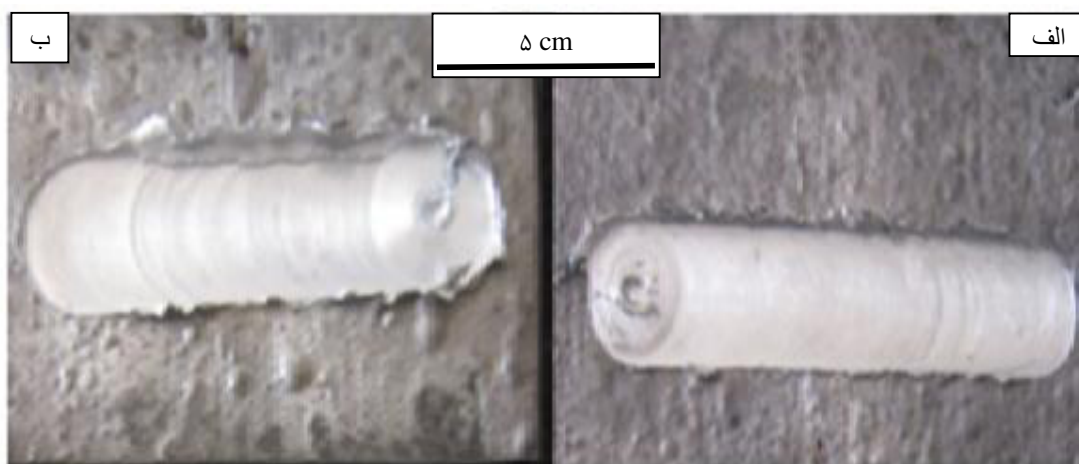
شکل ۴- نتایج بدست آمده از آزمون ارشمیدس فومها



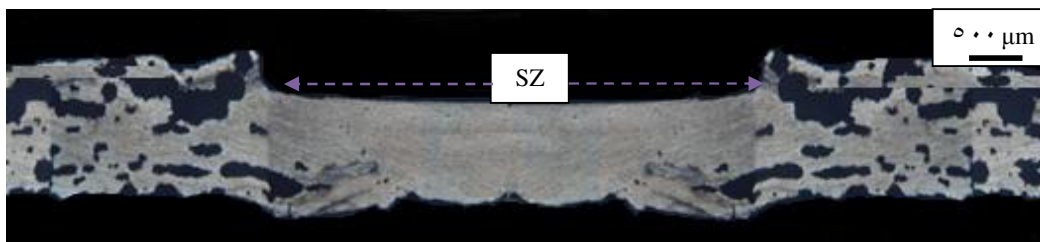
شکل ۵- نمای ظاهری از فوم تولید شده از ورق‌های ۴ ARB پاس نورد شده که در دمای  $650^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه نگهداری عملیات حرارتی شده. الف) سطح فوم ب) ضخامت فوم.



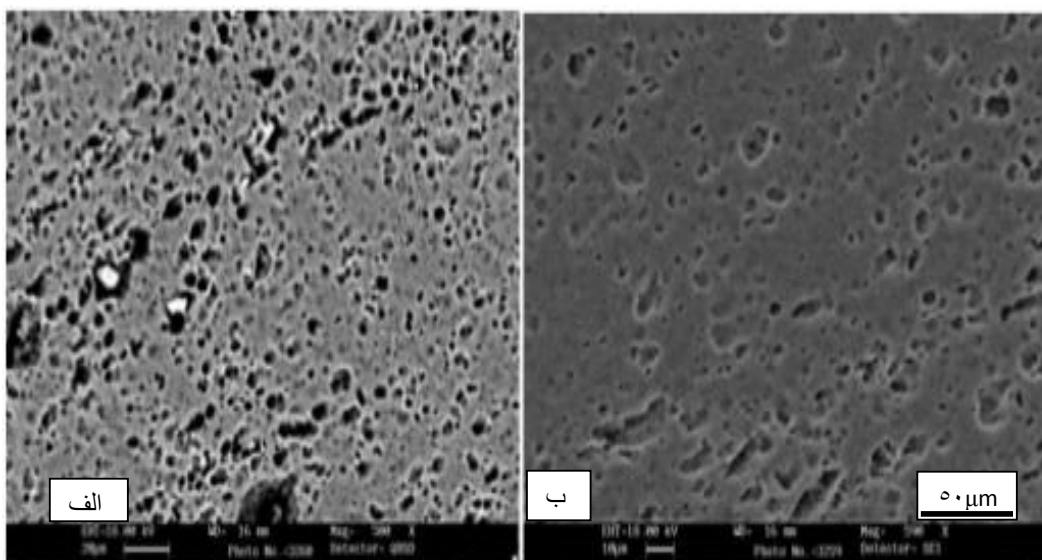
شکل ۶- تصویر میکروسکوپ نوری بدست آمده از فوم تولیدی ورق ۴ پاس نورد شده که در دمای  $650^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه عملیات حرارتی شده است.



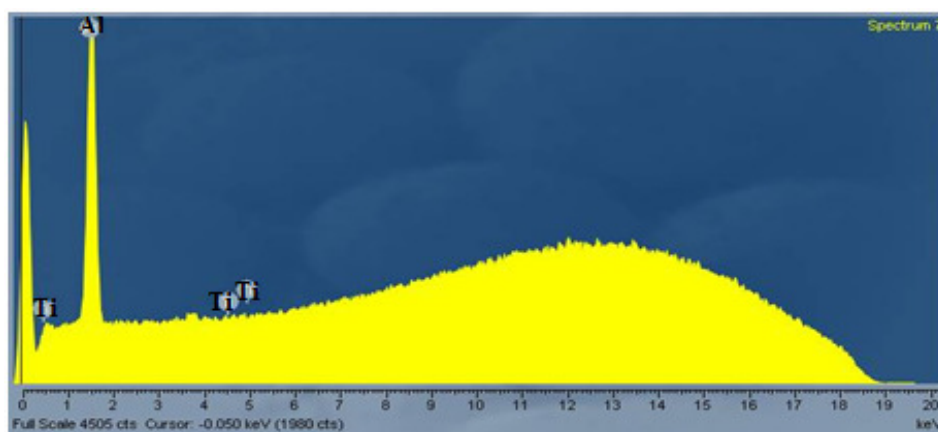
شکل ۷- نمای ظاهری فوم جوشکاری شده با سرعت پیشروی  $25\text{ mm/min}$  و سرعت‌های چرخشی الف)  $700\text{ rpm}$  ب)  $900\text{ rpm}$



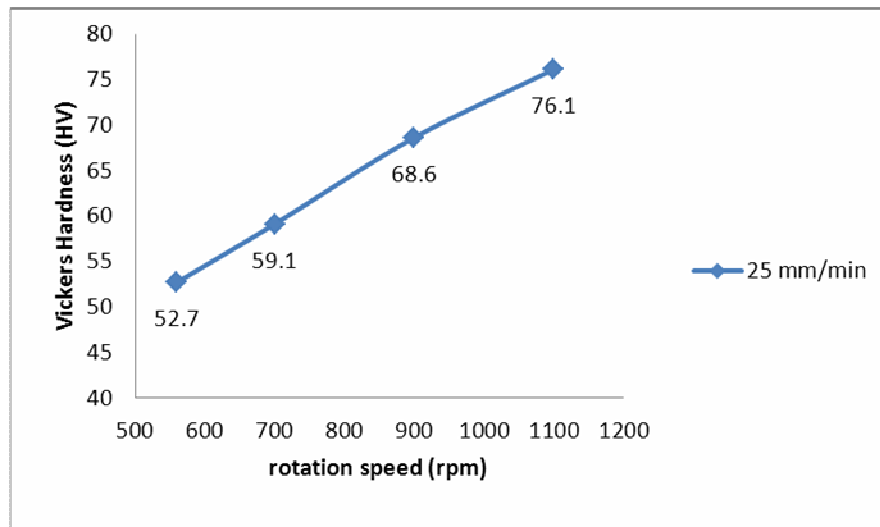
شکل ۸- تصویر نوری از مقطع اتصال فوم آلومینیومی جوشکاری شده (سرعت چرخشی ۷۰۰ rpm و سرعت پیشروی ۲۵ mm/min).



شکل ۹- تصاویر SEM از مقطع فراوری نمونه‌های ARB (الف) BSE و (ب) SE



شکل ۱۰- نتایج بدست آمده از آنالیز عنصری از ناحیه هم زده نمونه ۳ با استفاده از تجهیزات جانبی EDX متصل به SEM



شکل ۱۱- نمودار تغییرات سختی بر حسب سرعت‌های گوناگون چرخشی در جوشکاری فوم آلومینیومی به وسیله FSW

