

بررسی رفتار فشاری فوم‌های آلومینیمی تولید شده با استفاده از فرآیند اتصال نوردی تجمعی (ARB)

احسان زنده باد*^۱ و حبیب دانش‌منش^۲

چکیده

آلومینیم و آلیاژهای آن به دلیل در دسترس بودن، سهولت تبدیل به فوم و چگالی پایین نسبت به سایر فلزات، به‌عنوان پرکاربردترین مواد در تولید فوم‌های فلزی استفاده می‌شوند. در این پژوهش بمنظور تولید فوم از فرآیند اتصال نوردی تجمعی (ARB) برای توزیع ذرات فوم‌ساز هیدرید تیتانیم، درون ساختار ورق‌های آلومینیمی بکار رفته و با اعمال یک رژیم عملیات حرارتی مناسب، امکان تجزیه‌ی ذرات فوم‌ساز در دمای بالا فراهم شده است. همچنین، استحکام فشاری فوم‌های آلومینیمی تولید شده در جهت‌های گوناگون با استفاده از آزمون فشار تک‌محوری ارزیابی شده و بستگی رفتار فشاری فوم‌های آلومینیمی به درصد تخلخل فوم و جهت بارگذاری، مورد بررسی قرار گرفته است. بیش‌ترین استحکام فشاری فوم‌های با ۳۰ درصد تخلخل در جهت نورد (RD) برابر $21/08 \text{ MPa}$ اندازه‌گیری شده است. همچنین، کاهش استحکام فشاری با افزایش درصد تخلخل و رفتار فشاری متفاوت در جهت‌های گوناگون بارگذاری، مشاهده شده است.

واژه‌های کلیدی: فوم آلومینیمی، هیدرید تیتانیم، مقاومت فشاری.

۱- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم- تحقیقات فارس، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی مواد، پردیس دانشکده‌های مهندسی، دانشگاه شیراز، ایران.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: ehsan.zendehbad@gmail.com

پیشگفتار

امروزه فوم‌های فلزی به دلیل ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مناسب نظیر سختی، استحکام بالا همراه با چگالی پایین، نفوذپذیری گاز بسیار بالا همراه با هدایت حرارتی بالا و... کاربردی گسترده یافته‌اند. در این میان، آلومینیم و آلیاژهای آن به دلیل دارا بودن چگالی پایین نسبت به سایر فلزات، در دسترس بودن و سهولت تبدیل به فوم، به عنوان پرکاربردترین مواد در تولید فوم‌های فلزی بکاربرده می‌شوند. فوم‌های فلزی به گونه‌ی صنعتی به ۹ روش عمده از جمله روش دمیدن گاز به درون مذاب، روش متالورژی پودر و... تولید می‌شوند [۱].

سایر روش‌های تولید فوم مانند روش انجماد یوتکتیک گاز- جامد، به دلایل گوناگون از جمله هزینه‌ی تولید بالا و یا فنآوری تولید پیچیده، هنوز کاربرد صنعتی نداشته‌اند. در کنار پژوهش‌هایی که بمنظور ابداع روش‌های نوین تولید فوم‌های فلزی صورت می‌پذیرد، ارزیابی ویژگی‌های این نوع مواد نیز سهمی عمده از پژوهش‌های علمی را به خود اختصاص داده است [۲-۴]. از دیگر زمینه‌های پژوهشی در مورد فوم‌های فلزی، ساخت مواد جدید و ابداع کاربردهای گوناگون برای آن‌هاست.

از سوی دیگر، روش اتصال نوردی تجمعی که نخستین بار به وسیله‌ی Tsuji و همکارانش [۵ و ۶]، به‌عنوان یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید^۱ (SPD) معرفی شد، به عنوان روشی برای توزیع ذرات فاز ثانویه در ساختار ورق‌های فلزی بکار رفته و از این روش کاموزیت‌های زمینه فلزی [۷ و ۸] و نیز فوم‌های آلومینیمی تولید شده‌اند [۹].

گفتنی است روش اخیر که از روش‌های منحصربه‌فرد در تولید ورق‌های فوم آلومینیمی است، از فرآیند اتصال نوردی تجمعی^۲ (ARB) برای توزیع ذرات فوم‌ساز درون ساختار ورق‌های آلومینیمی استفاده کرده و در نهایت، پیش‌فرم‌هایی حاوی ذرات فوم‌ساز تهیه می‌شود. در مرحله‌ی بعد، با اعمال یک رژیم عملیات حرارتی مناسب، امکان تجزیه‌ی ذرات فوم‌ساز در دمای بالا فراهم شده و

ورق‌های فوم آلومینیم تولید می‌شوند. این روش هم‌چنین، به‌دلیل آن‌که از جوش سرد نوردی که یکی از روش‌های جوشکاری حالت جامد است، استفاده می‌کند، برای تولید سازه‌های ساندویچی دارای پتانسیل بالایی است.

در این پژوهش، فوم‌های آلومینیمی با کاربرد فرآیند اتصال نوردی تجمعی، تولید شده و رفتار این فوم‌ها تحت بارگذاری فشاری، در جهت‌های گوناگون با کاربرد آزمون فشار تک‌محوری مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

روش پژوهش

در این پژوهش از ورق آلومینیم ۱۰۵۰ به ضخامت ۳mm استفاده شد که برخی از ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی این ماده در جدول ۱ نشان داده شده است. از پودر هیدرید تیتانیم با مقدار میانگین ۴۵ μm و درجه خلوص ۹۹/۶ درصد به عنوان عامل فوم‌ساز استفاده شد.

بمنظور ایجاد جوش سرد نوردی، تسمه‌هایی از ورق آلومینیم به ابعاد ۲۰۰×۲۵×۳ میلی‌متر از ورق خام اولیه بریده و به مدت ۱ ساعت در دمای ۶۲۳ درجه‌ی کلون، عملیات آنیل روی آن‌ها انجام شد [۱۰]. سپس عملیات سوراخ‌کاری در چهار گوشه‌ی تسمه‌ها، با سوراخ‌هایی به قطر ۱/۵ mm بمنظور جلوگیری از ایجاد ضایعات، انجام گردید. بمنظور از بین بردن هرگونه آلودگی سطحی از جمله چربی موجود روی تسمه‌های مورد بررسی، دو مرحله شستشو در استن انجام گرفت. سپس برس‌کاری به کمک برس فولادی خورشیدی به قطر ۹ سانتی‌متر با سیم‌های فولادی به قطر ۱ میلی‌متر با سرعت چرخش ۲۸۵۰ دور بر دقیقه انجام گردید. ۰/۵ wt درصد از ذرات فوم‌ساز هیدرید تیتانیم به کمک دو لایه الک به گونه‌ای کاملاً یکنواخت بین دو تسمه پاشیده شده و پس از روی هم قرار دادن تسمه‌ها، چهار گوشه‌ی آن‌ها به کمک سیم‌های فولادی بسته شد تا از هرگونه لغزش احتمالی تسمه‌ها روی یکدیگر در حین نورد جلوگیری شود. سپس مجموعه‌ی بالا با تغییر ضخامت ۶۶ درصد، از ضخامت ۶ mm به ضخامت ۲ mm نورد شد و در این حالت جوش سرد بین تسمه‌های آلومینیمی در حضور ذرات فوم‌ساز، ایجاد گردید. سپس تسمه‌ی دو لایه‌ی بدست آمده، از طول به سه بخش مساوی بریده شده و مراحل

¹- Severe Plastic Deformation

²- Accumulative Roll-Bonding

هریک از نمونه‌ها با کاربرد روش ارشمیدس مورد بررسی و تأیید قرار گرفتند. پس از عملیات حرارتی فوم‌سازی، فوم‌های بدست آمده با سنباده‌زنی به ابعاد مورد نظر (مکعبی به ضلع ۱۰ mm) ماشین‌کاری شدند. آزمون فشار چنان‌که در شکل ۱ نشان داده شده است، برای هر درصد تخلخل، در راستای طولی^۱ (RD)، در راستای ضخامت^۲ (ND) و راستای عرضی^۳ (TD) به کمک دستگاه کشش Instron انجام گردید و نمودارهای تنش مهندسی- کرنش بدست آمد.

نتایج و بحث

رفتار فشاری فوم‌های تولید شده

نمودارهای تنش-کرنش بدست آمده برای نمونه‌هایی با ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد تخلخل، به ترتیب در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمودار از روند کلی نمودارهای آزمون فشار تک محوری فوم‌های فلزی پیروی می‌کند. مقادیر تنش تسلیم فشاری نمونه‌های بالا برای راستای نورد (RD)، راستای عمود (ND) و راستای عرضی (TD) در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

با بررسی شکل نمودارهای تنش-کرنش که از شکل کلی نمودارهای تنش-کرنش فوم‌های فلزی در آزمون فشار پیروی می‌کند [۱۱ و ۱۲]، سه ناحیه به گونه‌ای متمایز قابل تشخیص‌اند:

الف) در ناحیه‌ی نخست، فوم همانند یک فلز نامتخلخل، تنش فشاری را بدون تسلیم تحمل می‌کند. در این ناحیه دیواره‌های حفره‌ها به دلیل تمرکز تنش، در تنش‌های واقعی بالاتر از تنش اسمی اعمال شده قرار دارند، اما مقادیر این تنش‌های افزایش یافته^۴ هنوز از تنش تسلیم ماده‌ی زمینه بالاتر نرفته است و حتی به حدی نرسیده است که سبب خمیدگی^۵ دیواره‌ی حفره‌ها شود [۳].

گوناگون فرآیند جوش سرد نوردی دوباره روی آن اعمال گردید تا در نهایت پس از ۶ بار تکرار، توزیعی مناسب از ذرات فوم‌ساز در زمینه‌ی فلز بدست آمد. شمار لایه‌های ورق آلومینیم و شمار لایه‌های ذرات فوم‌ساز پس از ۶ مرحله نورد به ترتیب برابر ۹۶ و ۴۸ لایه محاسبه شد. لذا، با توجه به تعداد لایه‌های بالا می‌توان گفت که ضخامت هر لایه از ورق اولیه به $31/2 \mu\text{m}$ رسیده و در هر $62/5 \mu\text{m}$ در جهت ضخامت ورق، یک لایه ذرات فوم‌ساز وجود خواهد داشت که نشان‌دهنده‌ی توزیع مناسب ذرات فوم‌ساز در زمینه‌ی آلومینیمی است. در نهایت، پیش‌فرمی به ابعاد مفید $122 \times 41 \times 3$ میلی‌متر بدست آمد.

بمنظور انجام آزمون فشار تک محوری، بهتر است نمونه مکعبی و با ابعاد دست‌کم $10 \times 10 \times 10$ میلی‌متر انتخاب گردد [۲]. با توجه به ضخامت ۳ میلی‌متری پیش‌فرم‌ها و این‌که بیش‌ترین انبساط ممکن، این ضخامت را به ۶ mm می‌رساند، با بهره‌گیری از روش جوش سرد نوردی، ابتدا سه تسمه‌ی پیش‌فرم آماده، پس از انجام مراحل معمول سوراخ‌کاری و آماده‌سازی سطحی، روی هم قرار گرفته و مجموعه‌ی بدست آمده با درصد تغییر ضخامت ۵۰ درصد، از ضخامت ۹ mm به ضخامت $4/5 \text{ mm}$ نورد شدند. پس از انجام عملیات آنیل به مدت ۴۰ دقیقه در دمای ۶۲۳ درجه‌ی کلوین، دوباره تسمه‌ی بدست آمده به سه بخش مساوی تقسیم شده و پس از آماده‌سازی سطحی و روی هم قراردادن با درصد تغییر ضخامت ۴۸ درصد از ضخامت $13/5 \text{ mm}$ به ضخامت ۷ mm نورد گردیدند. در این حالت تعداد لایه‌های ذرات فوم ساز ۴۳۲ لایه است که گویای توزیع به نسبت یکنواخت و مناسب ذرات فوم ساز در ضخامت ۷ mm پیش‌فرم آلومینیمی می‌باشد. تسمه‌ی بدست آمده به ابعاد $15 \times 15 \text{ mm}$ ماشین‌کاری شده و بدین ترتیب، پیش‌فرم‌های آزمون فشار تهیه گردیدند. بمنظور انجام آزمون فشار تک محوری، عملیات حرارتی فوم‌سازی در دمای ثابت، در کوره‌ی مقاومتی عملیات حرارتی روی پیش‌فرم‌های تولید شده انجام گرفت و نمونه‌هایی با درصد تخلخل ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد بدست آمد. فراسنج‌های عملیات حرارتی فوم‌سازی شامل دمای فوم‌سازی و زمان نگه‌داری در جدول ۲ نشان داده شده است. درصد تخلخل

¹ - Rolling Direction

² - Normal Direction

³ - Transverse Direction

⁴ - Rised Stresses

⁵ - Buckling

ساختار حفره‌های نهایی همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، تقریباً حالتی تخم‌مرغی شکل داشته باشند [۲]. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از یک نمونه‌ی تولید شده، تاییدکننده‌ی جهت‌گیری حفره‌ها در جهت‌های یادشده می‌باشد (شکل ۹).

از دیدگاه مکانیک مواد، تنش ایجاد شده در نوک یک بیضی به گونه‌ی زیر محاسبه می‌گردد [۱۴]:

$$\sigma = \sigma_{app} \left(1 + \frac{2c}{b} \right) \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، σ_{app} (تنش اعمال شده، c) نصف قطر بزرگ و b) نصف قطر کوچک بیضی است. برای درک بهتر مطلب، می‌توان گفت که اگر قطر بزرگ بیضی، دو برابر قطر کوچک آن باشد، برای حالت بارگذاری شکل (الف-۸)، تنش ایجاد شده در اثر تمرکز تنش، ۵ برابر و در حالت بارگذاری شکل (ب-۸)، تقریباً برابر با تنش اعمال شده به قطعه می‌باشد. با توجه به تشابه مطالب بیان شده با نمونه‌ی مورد بررسی، می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که در وضعیت بارگذاری ND، به دیواره‌های حفره‌ها، تنشی چندین برابر تنش اسمی، اعمال شده و این سبب تخریب سریع‌تر حفره‌ها در تنش‌های اسمی کم‌تر نسبت به جهت‌گیری‌های TD و RD خواهد شد.

از نظر تئوری، نسبت تنش تسلیم فشاری در جهت‌های TD و RD به تنش تسلیم فشاری در جهت ND را می‌توان با توجه به نسبت ابعاد حفره‌ها از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد [۲]:

$$\frac{\sigma^{TD(orRD)}}{\sigma^{ND}} = \frac{2R}{1 + (1/R)} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، R نسبت ابعادی^۴ است. با توجه به مقادیر تنش تسلیم فشاری در جهت‌های گوناگون که در جدول ۳ نشان داده شده است، می‌توان نسبت میانگین ابعاد حفره‌ها را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\frac{21.08^{MPa}}{9.2^{MPa}} = \frac{2R}{1 + (1/R)} \Rightarrow R = 1/64 \quad (3)$$

به بیان دیگر، مقطع حفره‌های تولید شده در این روش فوم‌سازی، به شکل بیضی با نسبت قطرهای تقریباً ۱/۶۴ می‌باشد.

ب) ناحیه‌ی دوم که تقریباً حالت خطی دارد، از نقطه‌ی تسلیم فوم فلزی که با تخریب نخستین حفره‌های فوم آغاز می‌شود، شروع و تا تخریب و فشردن^۱ تمامی حفره‌های فوم فلزی ادامه می‌یابد. در آغاز این ناحیه، تنش افزایش‌یافته در دیواره‌ی حفره‌ها به اندازه‌ای می‌رسد که دیواره‌ی حفره‌ها دچار خمیدگی شده و تخریب حفره‌ها شروع می‌شود [۱۲]. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از حفره‌های در حال تخریب در مراحل آغازین تسلیم در شکل ۵ نشان داده شده است. گفتنی است که پس از تخریب نخستین حفره، تخریب حفره‌های بعدی به سرعت آغاز شده و نمودار تا تخریب تمامی حفره‌ها روند خطی را می‌پیماید. شکل ۶، تخریب بخشی گسترده از حفره‌های فوم و فشردن شدن هرچه بیشتر فوم در تنش‌های تقریباً ثابت را نشان می‌دهد.

ج) در این ناحیه تمامی حفره‌ها تخریب شده و ماده به ماده‌ای تقریباً چگال^۲ تبدیل شده است. از این ناحیه به بعد، نیروی اعمالی در حقیقت صرف فشردن ماده‌ی چگال زمینه شده و نمودار دوباره روند صعودی را می‌پیماید [۱۲]. شکل ۷ تصویری از نمونه‌ی فوم مورد بررسی را در آغاز این ناحیه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تخلخل‌های موجود در فوم در آغاز این مرحله به کم‌ترین حد خواهند رسید.

اثر جهت بارگذاری بر رفتار فشاری فوم‌ها

همان‌گونه که در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است، در کرنش‌های یکسان مقادیر تنش برای جهت‌های TD و RD بالاتر از مقادیر تنش برای جهت ND می‌باشد. هر چند که ناهم‌سان‌گردی^۳ ویژگی‌های فوم‌های فلزی در جهت‌های گوناگون، در روش‌های متالورژی پودر نیز گزارش شده است [۱۳]، اما بمنظور تجزیه و تحلیل این پدیده بایستی به فرآیند تولید پیش‌فرم‌ها با دقت بیشتری توجه شود. ذرات TiH_2 در حین نورد در بین لایه‌های آلومینیم له و شکسته می‌شوند و شکلی دیسک مانند به خود می‌گیرند. لذا، می‌توان انتظار داشت که

¹ - Densification

² - Dense

³ - Anisotropy

⁴ - Aspect Ratio

اثر درصد تخلخل بر مقاومت فشاری فوم‌ها

پیش‌بینی می‌شود که افزایش درصد تخلخل در فوم‌ها سبب کاهش مقاومت فشاری آن‌ها شود. دلیل این موضوع، باریک‌تر شدن دیواره‌ی حفره‌ها و افزایش تمرکز تنش در اطراف حفره‌ها عنوان شده است [۱۵ و ۱۳ و ۳]. نمودار تغییر مقاومت فشاری با افزایش درصد تخلخل برای جهت RD در شکل ۱۰ نشان داده شده است که نشان دهنده‌ی کاهش مقاومت فشاری فوم‌ها با افزایش درصد تخلخل آن‌هاست. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، این کاهش استحکام را می‌توان به باریک‌تر شدن دیواره‌ی حفره‌ها و افزایش هرچه بیشتر تنش واقعی نسبت به تنش اسمی نسبت داد. هم‌چنین، اثر درصد تخلخل بر استحکام تسلیم فشاری فوم‌های آلومینیم در جهت‌های گوناگون بارگذاری، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. که نشان‌دهنده‌ی کاهش استحکام فشاری با افزایش درصد تخلخل فوم‌هاست.

نتیجه‌گیری

فوم‌های آلومینیمی با کاربرد فرآیند اتصال نوردی تجمعی با موفقیت تولید و استحکام فشاری آن‌ها با کاربرد آزمون فشار تک‌محوری مورد بررسی قرار گرفت. استحکام فشاری فوم‌های تولید شده در درصد تخلخل‌های گوناگون و جهت‌های گوناگون بارگذاری، بررسی شده و مقادیر استحکام فشاری از $7/1 \text{ MPa}$ برای جهت بارگذاری ND و درصد تخلخل ۴۰ درصد تا $21/08 \text{ MPa}$ برای جهت بارگذاری RD و درصد تخلخل ۳۰ درصد تعیین گردید. تاثیر جهت بارگذاری و درصد تخلخل بر استحکام فشاری، مورد مطالعه قرار گرفت. در درصد تخلخل ثابت بالاترین استحکام فشاری در جهت بارگذاری ND و در جهت‌های بارگذاری ثابت، بالاترین استحکام در پایین‌ترین درصد تخلخل اندازه‌گیری شد.

منابع

- 1- J. Banhart, "Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams", Progress in Materials Science, Vol. 46, pp. 559-632, 2001.
- 2- K. Kitazono, Y. Kikuchi, E. Sato and K. Kuribayashi, "Anisotropic Compressive Behaviour of Al-Mg Alloy Foams Manufactured through Accumulative Roll-Bonding Process", Materials Letters, Vol. 61, pp. 1771-1774, 2007.
- 3- E. Koza, M. Leonowicz, S. Wojciechowski, and F. Simancik, "Compressive Strength of Aluminum Foams", Materials Letters, Vol. 58, pp. 132-135, 2003.
- 4- O. B. Olurin, N. A. Fleck and M. F. Ashby, "Deformation and Fracture of Aluminum Foams", Materials Science and Engineering, Vol. A291, pp. 136-146, 2000.
- 5- 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.
- 6- 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.
- 7- M. Alizadeh and 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.
- 8- Ch. Lu, K. Tieu and 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.
- 9- K. Kitazono, E. Sato and K. Kuribayashi, "Novel Manufacturing of Closed-Cell Aluminum Foam by Accumulative Roll-Bonding", Scripta Materialia, Vol. 50, pp. 495-498, 2004.
- 10- "ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys", Fourth Edition, Chapter 3, pp. 290-328.
- 11- J. Banhart and J. Baumeister, "Deformation Characteristics of Metal Foams",

Journal of Materials Science, Vol. 33, pp. 1431-1440, 1998.

12- M. S. Aly, "Behavior of Closed Cell Aluminum Foams upon Compressive Testing at Elevated Temperatures: Experimental Results", *Materials Letters*, Vol. 61, pp. 3138-3141, 2007.

13- K. Y. G. McCullough, N. A. Fleck and M. F. Ashby, "Uniaxial Stress-Strain Behavior of

Aluminum Alloy Foams", *Acta Materialia*, Vol. 47, pp. 2323-2330, 1999.

14- E. P. Popov, "*Mechanics of Materials*", Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 2nd Edition, p. 50, 1976.

15- A. Kim, M. A. Hasan, S. H. Nahm and, S. S. Cho, "Evaluation of Compressive Mechanical Properties of Al-Foams Using Electrical Conductivity", *Composite Structures*, Vol. 71, pp. 191-198, 2005.

پیوست‌ها

جدول ۱- ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی آلیاژ آلومینیم مورد استفاده در این پژوهش [۱۰].

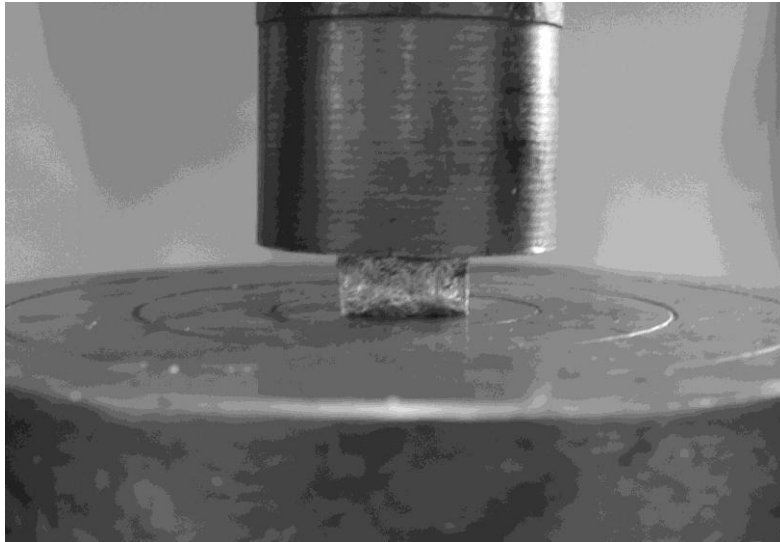
ویژگی‌های فیزیکی		ویژگی‌های مکانیکی	
۲/۷۱ g/cm ³	چگالی	۸۰ MPa	استحکام تسلیم
۶۵۰ °C	دمای ذوب	۴۲٪	درصد تغییر طول
۲۲۲ w/m.K	هدایت حرارتی	۷۱ GPa	مدول الاستیک
۲۴×۱۰ ^{-۶} K ^{-۱}	ضریب انبساط حرارتی	۲۰ HV	سختی ویکرز
۰/۰۲۸۲×۱۰ ^{-۶} Ω.m	مقاومت الکتریکی	۵۰ MPa	استحکام برشی

جدول ۲- فراسنج‌های عملیات حرارتی فوم‌سازی.

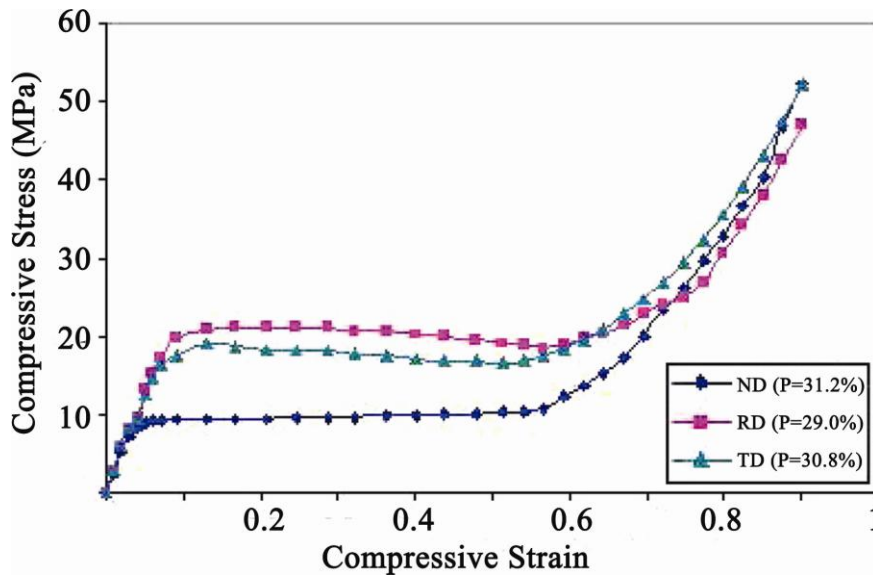
درصد تخلخل (%)	زمان نگهداری (دقیقه)	دمای فوم‌سازی (K)
۳۰	۵	۶۹۰
۳۵	۵	۷۰۰
۴۰	۷	۷۰۰

جدول ۳- مقادیر تنش تسلیم فشاری در جهت‌های گوناگون برای نمونه‌های با درصد تخلخل متفاوت.

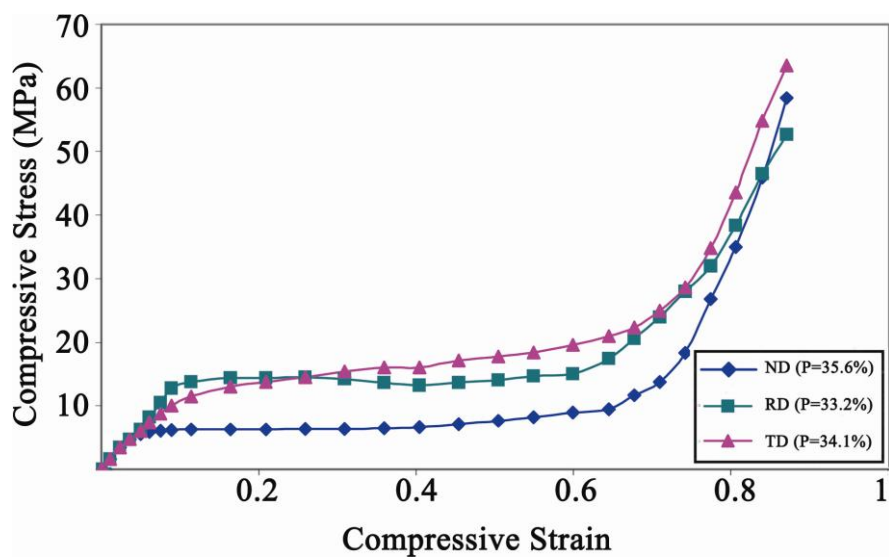
تنش تسلیم فشاری (MPa)			درصد تخلخل
جهت TD	جهت ND	جهت RD	
۱۹/۲	۹/۲	۲۱/۰۸	۳۰
۱۱/۸	۶/۱	۱۳/۷	۳۵
۹/۸	۷/۱	۱۰/۴	۴۰



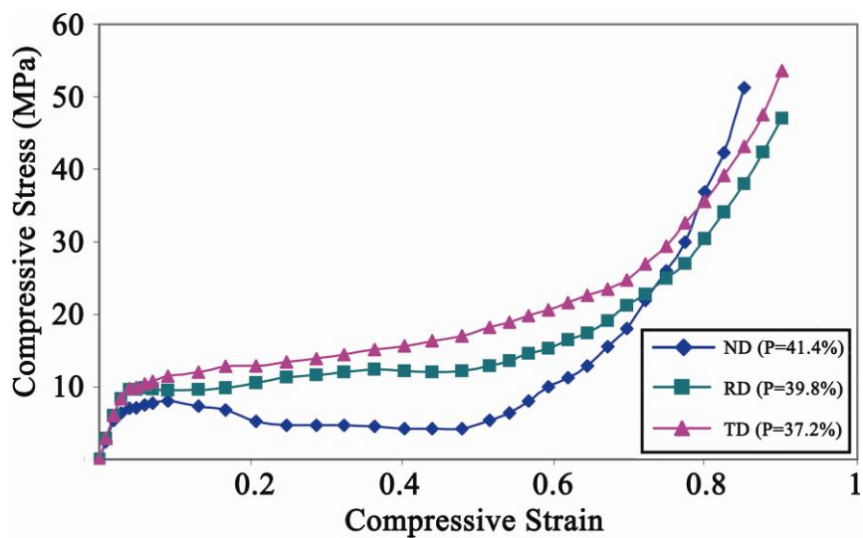
شکل ۱- تصویر چگونگی انجام آزمون فشار تک محوری.



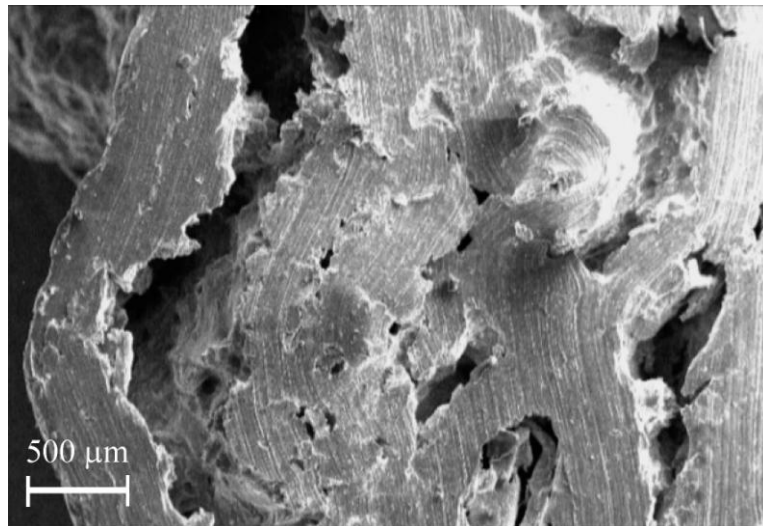
شکل ۲- رفتار تنش فشاری- کرنش فشاری نمونه با ۳۰ درصد تخلخل در جهت‌های گوناگون بارگذاری.



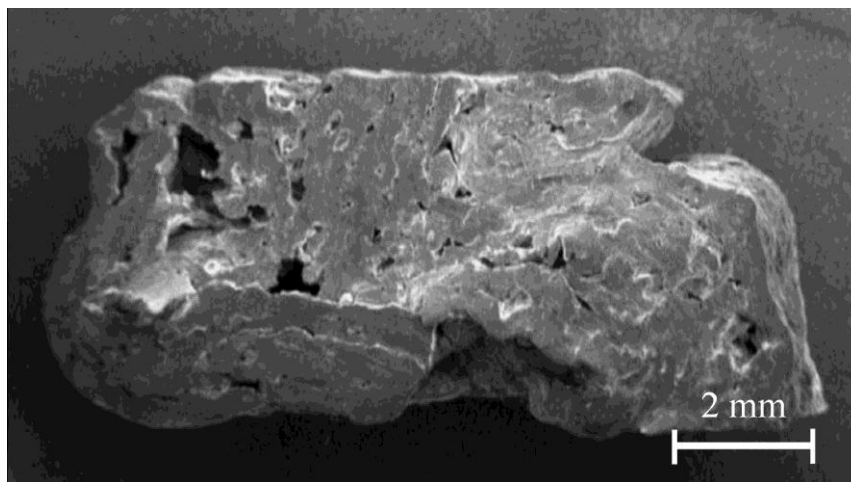
شکل ۳- رفتار تنش فشاری- کرنش فشاری نمونه با ۳۵ درصد تخلخل در جهت‌های گوناگون بارگذاری.



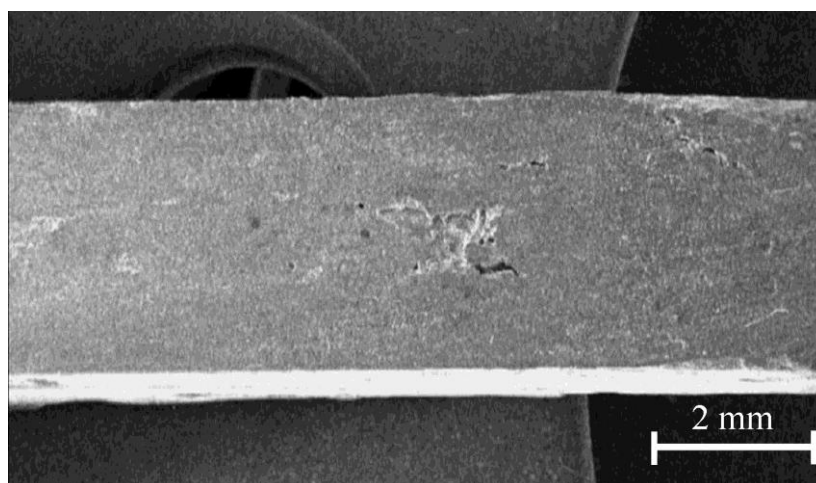
شکل ۴- رفتار تنش فشاری- کرنش فشاری نمونه با ۴۰ درصد تخلخل در جهت‌های گوناگون بارگذاری.



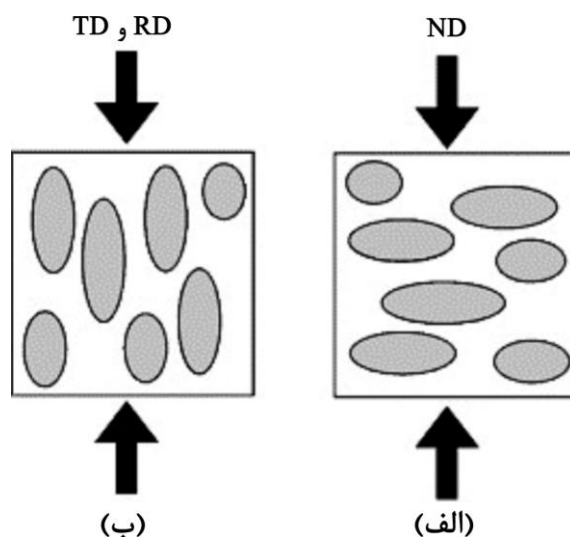
شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از تخریب دیواره‌ی حفره‌های نمونه‌ی فوم در آزمایش فشار در مراحل آغازین تسلیم.



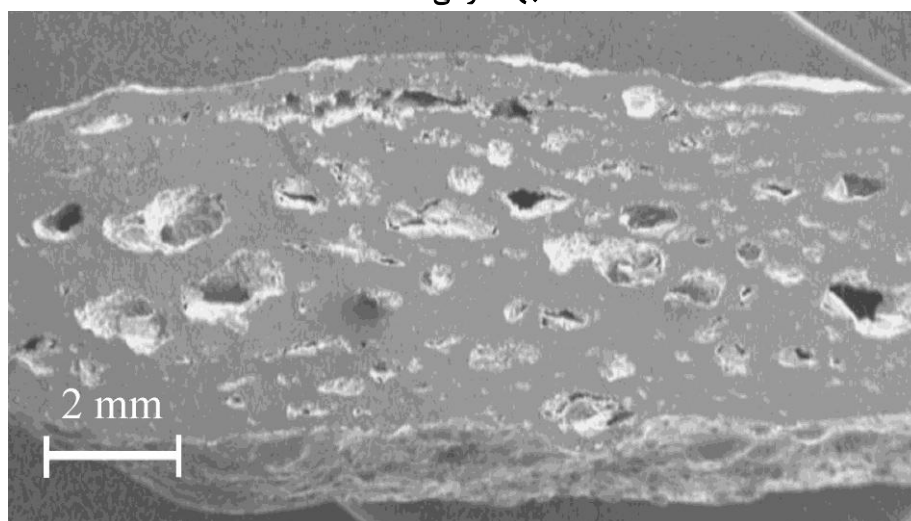
شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه فوم در آزمایش فشار در مراحل میانی آزمون.



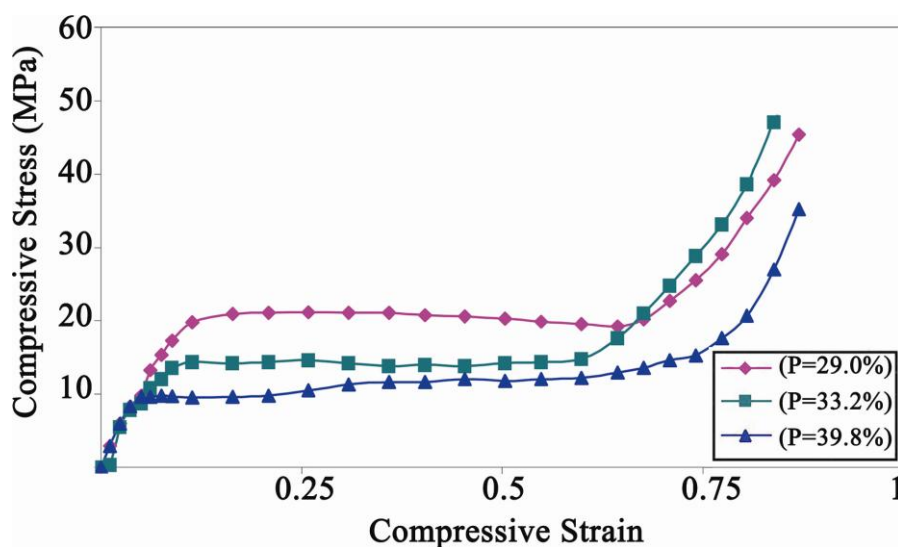
شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فوم چگال شده در مراحل پایانی آزمون فشار.



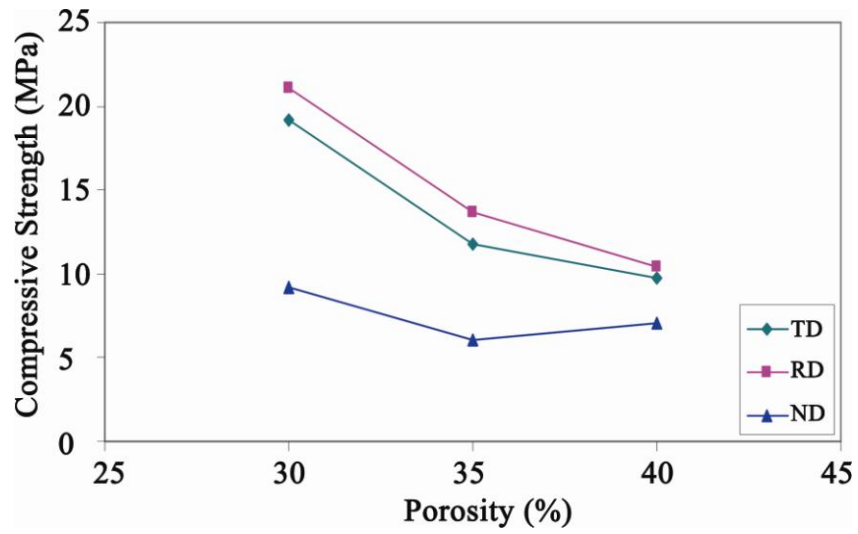
شکل ۸- تصویر شماتیک از چگونگی جهت‌گیری حفره‌ها در فوم‌های ساخته شده با کاربرد فرآیند ARB در الف) جهت عمود ب) نورد و جهت عرضی [۲].



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از چگونگی جهت‌گیری حفره‌ها در فوم‌های آلومینیومی تولید شده با کاربرد فرآیند ARB.



شکل ۱۰- نمودار رفتار تنش فشاری - کرنش فشاری فوم‌های آلومینیومی در جهت بارگذاری RD در درصد تخلخل‌های گوناگون.



شکل ۱۱- نمودار تغییرات استحکام تسلیم فشاری فوم‌های آلومینیم نسبت به درصد تخلخل در جهت‌های گوناگون بارگذاری.

