

تأثیر درصد Al_2O_3 بر خواص مکانیکی فوم کامپوزیتی $Al-(0-40\%)Al_2O_3$ تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی کم انرژی

مصطفی علیزاده و مرتضی میرزایی*

گروه پژوهشی فلزات، پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۸/۱۰)

چکیده - در این پژوهش، ابتدا پودرهای کامپوزیتی $Al-Al_2O_3$ با مقادیر مختلف درصد حجمی Al_2O_3 روش آلیاژسازی مکانیکی در یک آب کم انرژی تهیه و عنوان ماده فوم، مورد استفاده قرار گرفتند. سپس با استفاده از روش فضا ساز و بهره گیری از ذرات کربامید کروی با قطر / (بعنوان عامل فضا ساز) فوم های کامپوزیت و درصد تخلخل تهیه. برای بررسی خواص فشاری فوم های تولیدی، از آزمون فشار تک محوری با نرخ کرنش S^{-1} استفاده شد. نشان داد خواص فشاری فوم تراز کسر Al_2O_3 و درصد تخلخل است. ای که با کاهش درصد تخلخل، خواص فشاری بهبود می. همچنین فوم های ساخته شده با درصد Al_2O_3 در این پژوهش رین خواص فشاری را دارا بودند.

واژگان کلیدی: آلیاژسازی مکانیکی، آسیاب کاری کم انرژی، فضا ساز، کربامید

Effect of Al_2O_3 Particles on Mechanical Properties of $Al-(0-40\%)Al_2O_3$ Composite Foams Produced by Low Energy Mechanical Alloying

M. Alizadeh and M. Mirzaei*

1. Metals Research Group, Department of Materials Engineering, Kerman Graduate University of Technology

Abstract: In this study, at first $Al-Al_2O_3$ composite powders having different volume fractions of Al_2O_3 (0, 10, 20, 30 and 40 vol.%) were produced by low energy mechanical alloying, which were used as foam materials. Then, composite foams with 50, 60, and 70 percent of porosity were produced by space-holder technique. Spherical carbamide particles (1-1.4 mm) were used to achieve spherical porosities. In order to investigate the compressive behavior of foams, the compression test with strain rate of $10^{-3} S^{-1}$ was performed on the foam samples. The results showed that the compressive properties depended on the volume fraction

* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: m_mirzaei1355@yahoo.com

of Al_2O_3 and porosity fraction. Generally, by decreasing the porosity fraction, the compressive properties were improved. The composite foams containing 10 vol.% Al_2O_3 showed superior compressive properties in comparison to other foams studied in this work.

Keywords: Mechanical alloying, Low energy milling, Space holder, Carbamide

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر فوم‌های آلومینیمی به دلیل خواص مکانیکی و فیزیکی ویژه‌ای همچون قابلیت بالای جذب انرژی، چگالی پائین، هدایت الکتریکی و گرمایی بالا به‌طور گسترده مورد مطالعه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۱ و ۲]. از آنجایی که در یک فوم فلزی افزایش استحکام فشاری و قابلیت جذب انرژی اهمیت به‌سزایی دارد، بررسی‌ها بیش‌تر در این جهت شکل گرفته است [۳ و ۴]. یکی از راه‌های افزایش استحکام فوم‌ها، تقویت دیواره‌های فوم با کمک ذرات سرامیکی است [۵-۷]. در بین مواد تقویت کننده سرامیکی Al_2O_3 یک تقویت کننده مناسب برای آلومینیوم است زیرا هیچ‌گونه واکنش شیمیایی با آن ندارد، با افزودن به آلومینیوم دمای کاری را افزایش می‌دهد و باعث بهبود مقاومت به خزش کامپوزیت می‌شود [۸].

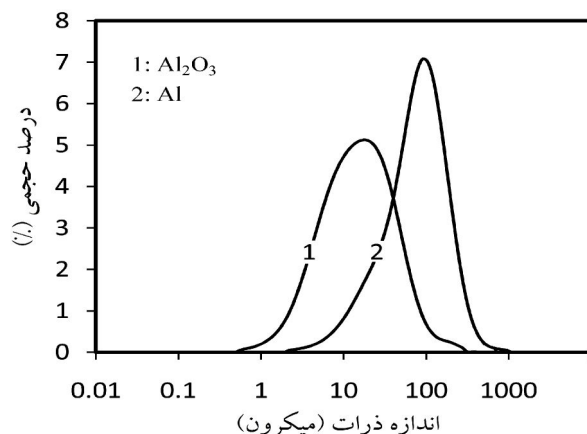
برای ساخت پودر کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ روش آسیاب کردن مکانیکی بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است زیرا در این روش، توزیع یکنواختی از ذرات آلومینا در آلومینیوم به دست می‌آید. در حین آلیاژسازی مکانیکی ذرات آلومینیوم در اثر ضربه ناشی از گلوله‌ها به شدت تغییر شکل یافته، به صورت پهن و ورقه‌ای در می‌آیند. اما ذرات Al_2O_3 خرد شده در زمینه آلومینیوم فرو رفته، توسط آن احاطه می‌شوند. با افزایش زمان آسیاب کردن ذرات آلومینیوم دچار کار سختی شده، ذرات Al_2O_3 در مرز بین لایه‌های جوش خورده آلومینیوم محبوس می‌شوند. در ادامه، این ساختار لایه‌ای شکسته و ریزتر می‌شود و ذرات Al_2O_3 نیز با توزیع یکنواخت‌تری در درون این ساختار قرار می‌گیرند [۸-۱۱]. به دلیل اینکه روش سلول فضا ساز برای ساخت فوم بر پایه متالورژی پودر است، تهیه کامپوزیت به شکل پودر برای استفاده از این روش اهمیت دارد.

در روش فضا ساز با استفاده از یک ماده فضا ساز (معمولاً نمک طعام $NaCl$) با اندازه و شکل مشخص، می‌توان فوم با سلول‌های هم‌شکل و هم اندازه و با توزیع یکنواخت تولید کرد [۱۲-۱۴]. نمک طعام به دلیل سختی بالا، شکل نامنظم و گوشه‌دار و از همه مهم‌تر بروز مشکلات خوردگی ناشی از نمک باقی مانده پس از فرایند حل شدن، پژوهشگران را بر آن داشته است که از مواد دیگری همچون کربامید استفاده کنند. کربامید کروی با قیمت ارزان قابل تهیه در بازار بوده، از طرفی حل شدن آن در آب به مراتب سریع‌تر از نمک است [۱۵-۱۹].

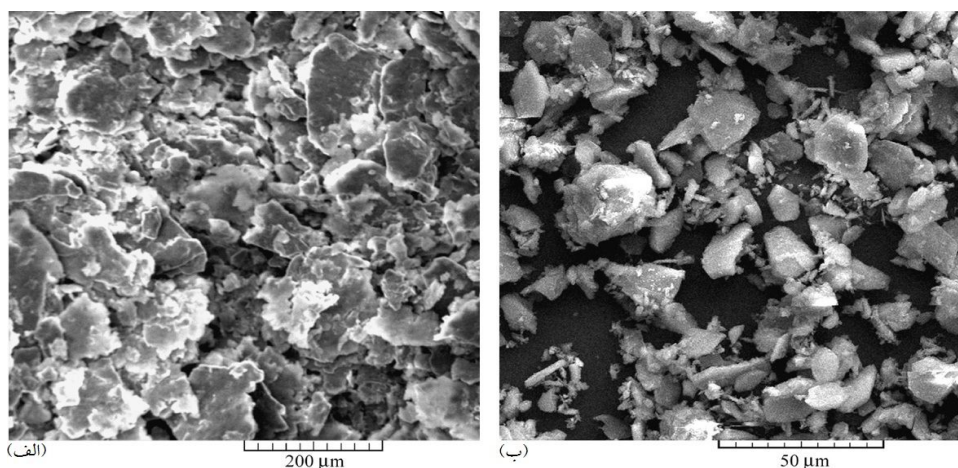
در این پژوهش از کربامید کروی به‌عنوان ماده فضا‌ساز استفاده شد. از آنجایی که این ماده در دمای بالای ۱۳۵ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌شود، به‌جای فرایند لیچینگ از یک سیکل گرمایی برای حذف آن استفاده شد. در این پژوهش ابتدا پودر کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ با استفاده از آلیاژسازی مکانیکی با روش آسیاب کم انرژی تهیه و سپس فوم کامپوزیتی سلول باز $Al-Al_2O_3$ با روش فضا ساز ساخته شد و تاثیر متغیرهایی همچون درصد فاز تقویت کننده Al_2O_3 (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد حجمی) و کسر حجمی تخلخل (۵۰، ۶۰ و ۷۰) بر خواص فشاری مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش انجام کار

در این پژوهش برای ساخت پودر کامپوزیت از پودرهای آلومینیوم و Al_2O_3 خالص و با توزیع اندازه ذرات نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شد. منحنی توزیع اندازه ذرات آلومینیوم و Al_2O_3 به صورت توزیع نرمال بوده، ولی ذرات Al_2O_3 به مراتب ریزتر از ذرات آلومینیوم هستند به‌گونه‌ای که میانگین اندازه ذرات پودرهای آلومینیوم و Al_2O_3 به ترتیب



شکل ۱- منحنی توزیع اندازه ذرات پودرهای آلومینیم و Al_2O_3

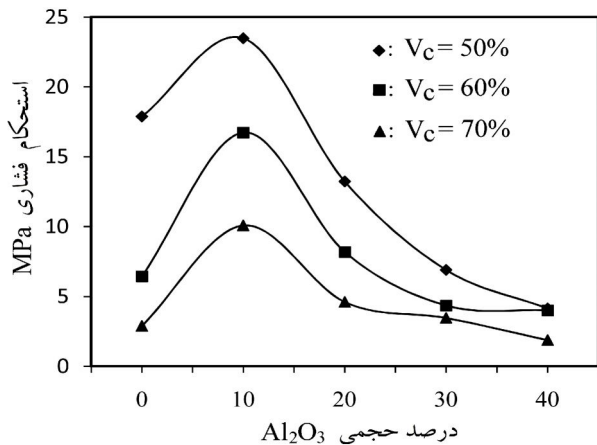


شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از پودرهای اولیه: الف) آلومینیم و ب) Al_2O_3

ذرات کروی کربامید در یک مخلوط کن افقی به مدت ۱۵ دقیقه و در حضور ۰/۵ میلی متر مکعب اتانول مخلوط شدند. اتانول در این مرحله برای مرطوب و در نتیجه چسبناک شدن سطح ذرات کربامید استفاده شد. نسبت ذرات کروی کربامید (فضا ساز) به پودر کامپوزیت ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد حجمی در نظر گرفته شد. در نهایت این مخلوط با استفاده از یک دستگاه پرس تک محوره و با فشار ۴۰۰ مگاپاسکال به نمونه‌های استوانه‌ای با قطر و طول ۱۳ میلی‌متر تبدیل شدند. عملیات خروج کربامید از نمونه‌ها و سپس زیتتر شدن به صورت سیکل نشان داده شده در شکل ۴ و با استفاده از یک کوره الکتریکی و در اتمسفر کنترل شده صورت گرفت. برای بررسی رفتار فشاری نمونه‌ها و میزان جذب انرژی،

۷۸ و ۱۴ میکرون است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودرهای اولیه در شکل ۲ نمایش داده شده است. از کربامید کروی شکل تجاری با ابعاد ۱ تا ۱/۴ میلی‌متر به عنوان ماده فضا ساز استفاده شد (شکل ۳).

برای ساخت کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ پودر آلومینیم با ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد حجمی از Al_2O_3 مخلوط و با استفاده از یک آسیاب افقی کم انرژی با سرعت ۸۰ دور در دقیقه به مدت ۲۴ ساعت و در اتمسفر آرگون و با نسبت گلوله به پودر ۱۰ به ۱ آسیاب شدند. برای جلوگیری از کلوخه شدن پودرها و چسبیدن آنها به گلوله‌ها و جداره آسیاب حدود ۳ درصد وزنی پودر اتانول به مخلوط پودرها اضافه شد. برای ساخت نمونه‌های فومی، پودر کامپوزیت به همراه



شکل ۶- استحکام فشاری نمونه‌ها بر حسب درصد حجمی Al_2O_3 در کسرهای حجمی مختلف تخلخل

آزمون فشار با نرخ کرنش $10^{-3} S^{-1}$ با استفاده از یک دستگاه (اینسترون ۵۵۸۶) و بر طبق استاندارد (ASTM E9-89a) انجام شد. درصد تخلخل نمونه‌ها با استفاده از روش ارشمیدس به دست آمد.

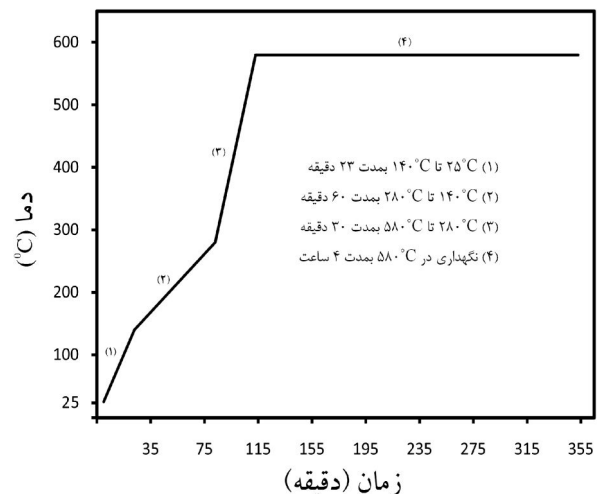
نتایج و بحث

در شکل ۵ اثر درصد حجمی Al_2O_3 بر منحنی تنش-کرنش فشاری در میزان تخلخل ثابت ۵۰٪ نشان داده شده است. این منحنی‌ها همانند منحنی عمومی فوم‌های فلزی از سه ناحیه تشکیل شده است. این ناحیه‌ها شامل ناحیه تغییر شکل الاستیک (که تغییرات تنش با کرنش به صورت خطی است)، ناحیه مسطح (که تنش به صورت دندان‌های با کرنش در یک محدوده وسیع از نمودار تنش-کرنش تغییر می‌کند) و ناحیه تراکم (که تمامی حفره‌ها به صورت متراکم در می‌آید و تنش به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد) می‌شوند.

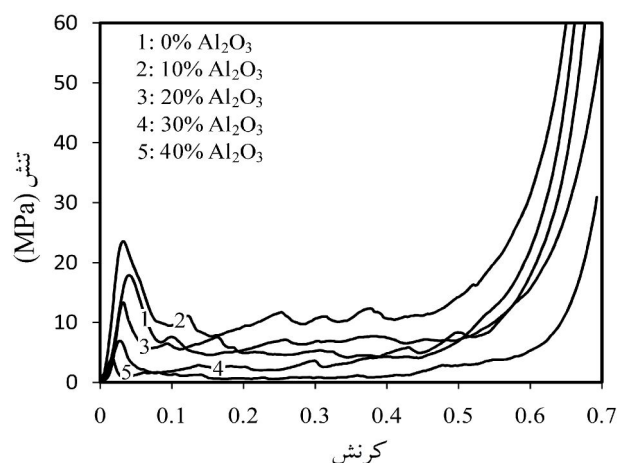
با افزایش کسر حجمی Al_2O_3 تا ۱۰ درصد، استحکام فشاری و تنش ناحیه مسطح افزایش می‌یابد (شکل‌های ۶ و ۷). ولی در ادامه با افزایش کسر حجمی Al_2O_3 تا ۴۰ درصد روند نزولی استحکام تسلیم و تنش ناحیه مسطح مشاهده می‌شود. افت خواص مکانیکی فوم‌ها با افزایش ذرات تقویت کننده سرامیکی به بیش از ۱۰٪ می‌تواند ناشی از رفتار ترد این



شکل ۳- تصویر ذرات کروی کربامید



شکل ۴- سیکل عملیات خروج کربامید و زینتر شدن نمونه‌ها

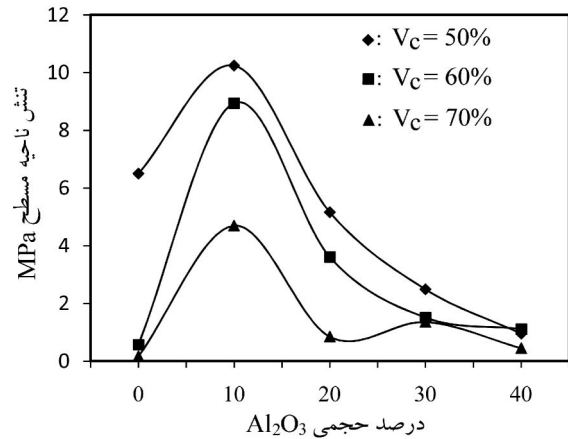


شکل ۵- منحنی تنش-کرنش فشاری نمونه‌های فومی بر حسب درصد حجمی Al_2O_3 در تخلخل ۵۰٪

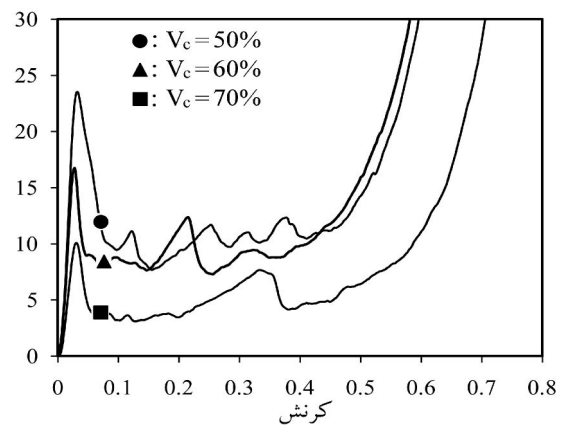
فوم‌های کامپوزیتی با درصد زیاد فاز تقویت کننده باشد. این مسأله در بررسی اثر ذرات SiC بر رفتار مکانیکی فوم‌ها نیز دیده شده است [۵]. به این صورت که با افزودن ۱۰ درصد وزنی از ذرات SiC به فوم کامپوزیتی، افزایش استحکام فشاری و تنش ناحیه مسطح مشاهده می‌شود ولی برای فوم با ۲۰ درصد وزنی از ذرات SiC افت استحکام فشاری و تنش ناحیه مسطح حتی نسبت به فوم بدون ذرات SiC دیده می‌شود. در واقع می‌توان عنوان نمود که خواص مکانیکی فوم‌ها با افزایش ذرات تقویت کننده Al_2O_3 به بیش از ۱۰ درصد حجمی، به دلیل افزایش پدیده تمرکز تنش در مرز بین فاز زمینه آلومینیم با ذرات Al_2O_3 افت محسوسی پیدا می‌کند.

در شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات منحنی تنش- کرنش فشاری با درصد تخلخل به ترتیب در درصد‌های حجمی ۱۰ و ۴۰ از Al_2O_3 دیده می‌شود. به وضوح مشخص است که محدوده ناحیه مسطح در تخلخل‌های بالاتر به مراتب گسترش یافته است هر چند که تنش ناحیه مسطح کاهش یافته و حتی در نمونه شامل ۴۰ درصد حجمی Al_2O_3 به صفر نزدیک شده است. این مسأله به دلیل زمان طولانی‌تر فشرده و بسته شدن حفره‌ها در نمونه‌های با تخلخل بیش‌تر است. این نتایج با مطالعات سایر پژوهشگران درباره اثر تخلخل بر خواص مکانیکی در فوم‌های فلزی مطابقت دارد به گونه‌ای که هر چه میزان تخلخل فوم‌ها افزایش یابد، محدوده ناحیه مسطح افزایش یافته و مقدار تنش در این ناحیه با افزایش کرنش، با یک شیب ملایم‌تری افزایش می‌یابد [۱۷].

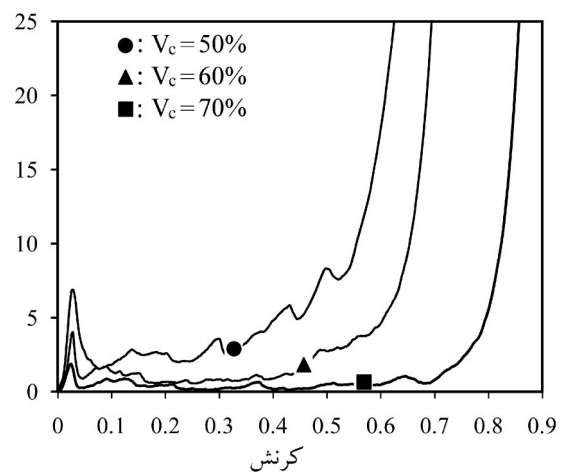
با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان دریافت شیب تغییرات تنش با کرنش در انتهای ناحیه دوم با کاهش درصد تخلخل افزایش می‌یابد. به عبارتی در مرز نواحی دوم و سوم در نمونه‌های با تخلخل کم‌تر تنش با نرخ شدیدتری افزایش می‌یابد. در شکل ۱۰ تغییرات شیب ناحیه مسطح نمونه‌ها با کسر حجمی تخلخل در درصد‌های مختلف حجمی Al_2O_3 نشان داده شده است. در نمونه شامل ۱۰ درصد حجمی از Al_2O_3 تنش با شیب به مراتب بیش‌تری با افزایش کرنش، زیاد می‌شود. این



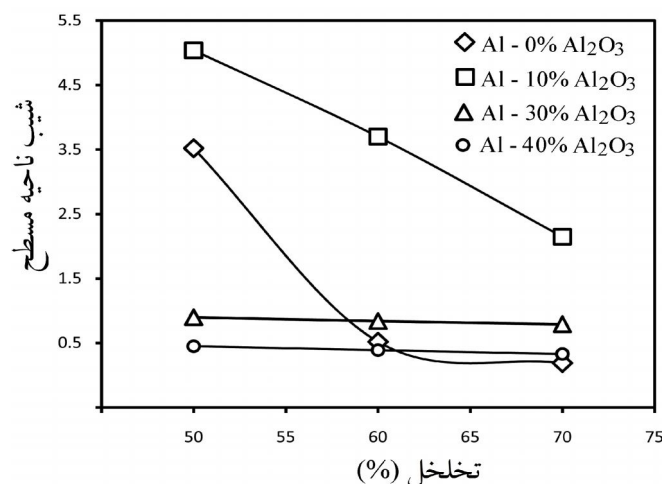
شکل ۷- تغییرات تنش ناحیه مسطح نمونه‌ها با درصد حجمی Al_2O_3 در کسرهای حجمی مختلف تخلخل



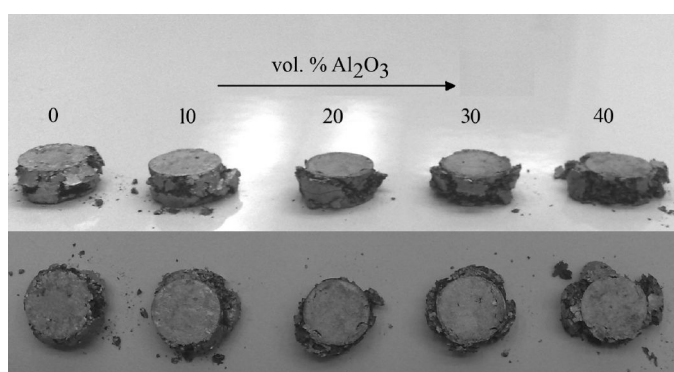
شکل ۸- تغییرات منحنی- تنش کرنش فشاری نمونه‌های فومی با درصد تخلخل در نمونه‌های با ۱۰٪ حجمی Al_2O_3



شکل ۹- منحنی تنش- کرنش فشاری نمونه‌های فومی بر حسب درصد تخلخل در نمونه‌های با ۴۰٪ حجمی Al_2O_3



شکل ۱۰- تغییرات شیب ناحیه مسطح نمونه‌ها با کسر حجمی تخلخل در درصد‌های مختلف حجمی Al_2O_3



شکل ۱۱- تصویر نمونه‌ها پس از آزمون فشار در ۵۰٪ تخلخل

حجمی بیش‌تر Al_2O_3 مکانیزم دوم غالب بوده، پس از هر مرحله تخریب سلول‌ها افت شدید تنش مشاهده می‌شود. مشاهدات حین آزمون فشار در نمونه‌های مختلف نیز این مکانیزم را تایید می‌کند به‌گونه‌ای که در نمونه‌های با درصد حجمی بیش‌تر Al_2O_3 (۳۰ و ۴۰ درصد) در حین آزمون فشار، قسمت‌هایی از نمونه‌ها از آن جدا شده و فقط درصد کمی در نهایت به‌صورت متراکم شده در می‌آید (در واقع نمونه متلاشی می‌شود). این در حالی است که در نمونه‌های با درصد حجمی کم‌تر Al_2O_3 نمونه کاملاً به‌صورت متراکم شده در می‌آید (شکل ۱۱).

در مقایسه رفتار فشاری نمونه کامپوزیتی شامل ۱۰ درصد حجمی Al_2O_3 با نمونه آلومینیمی (بدون Al_2O_3) مشخص می‌شود ذرات فاز تقویت کننده باعث افزایش استحکام دیواره

افزایش در درصد‌های مختلف تخلخل نیز وجود دارد. در نمونه فومی آلومینیم بدون ذرات تقویت کننده با افزایش درصد تخلخل کاهش بسیار شدیدی در شیب ناحیه مسطح دیده می‌شود در حالیکه در نمونه‌های شامل ۳۰ و ۴۰ درصد حجمی Al_2O_3 این شیب تغییرات چندانی با میزان تخلخل نمونه‌ها ندارد. تغییر در رفتار فشاری نمونه‌های فوم کامپوزیتی توسط سایر پژوهشگران هم مورد مطالعه قرار گرفته است [۶ و ۷]. اصولاً تغییر شکل فوم‌ها در ناحیه مسطح با دو مکانیزم خمیدگی دیواره‌های سلول‌ها و از هم پاشیده شدن یا شکست ناگهانی دیواره‌های سلول‌ها اتفاق می‌افتد. در نمونه‌های با درصد حجمی کم‌تر Al_2O_3 مکانیزم اول غالب است و در نتیجه در ناحیه مسطح با افزایش کرنش، تنش هم با شیب ملایمی افزایش پیدا می‌کند [۲۰]. اما در مقابل در نمونه‌های با درصد

ذرات کرومی کربامید مطلوب نمی‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت فوم کامپوزیتی آلومینیم با ۱۰ درصد حجمی Al_2O_3 با استفاده از روش ساخت مورد استفاده در این پژوهش بهترین خواص فشاری را از خود نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش فوم کامپوزیتی $Al-Al_2O_3$ با روش فضا‌ساز تولید شد. بررسی‌ها نشان داد افزایش درصد حجمی فاز تقویت‌کننده (Al_2O_3) تا ۱۰٪ موجب افزایش استحکام فشاری و تنش ناحیه مسطح می‌شود. این افزایش می‌تواند به دلیل بهبود استحکام دیواره سلول فوم‌ها باشد که به صورت ساختار کامپوزیتی در آمده است. هم‌چنین افت خواص استحکام فشاری و تنش ناحیه مسطح در نمونه‌های با بیش‌تر از ۱۰٪ حجمی Al_2O_3 به دلیل تغییر مکانیزم تغییر شکل و فشردن حفره‌ها و متغیرهای تولید است.

فوم شده و در نتیجه خواص فشاری و جذب بهبود پیدا کرده است. اما روند افت خواص فشاری با افزایش درصد حجمی Al_2O_3 از ۱۰ به ۲۰، ۳۰ و ۴۰ می‌تواند به دلیل‌های زیر باشد:

- ۱- ترد شدن دیواره‌ها و تغییر مکانیزم بسته شده حفره‌ها
 - ۲- از آنجایی‌که با افزایش ذرات سرامیکی در یک کامپوزیت زمینه فلزی نیاز به فشردن نمونه‌های پودری با روش‌های پیشرفته‌تری همانند پرس گرم و پرس هیدرو استاتیک است، روش پرس تک محوره در دمای محیط نمی‌تواند نتیجه مناسبی را ایجاد کند [۲۱ و ۲۲].
 - ۳- با افزایش ذرات بسیار ریز فاز تقویت‌کننده تمایل به کلوخه شدن آنها بیش‌تر و یکنواختی توزیع ذرات تقویت‌کننده در فاز زمینه کم می‌شود. این مساله منجر به افت خواص مکانیکی می‌شود [۲۳].
- با توجه به استفاده از کربامید به‌عنوان ماده فضا‌ساز در این پژوهش، استفاده از روش‌های شکل‌دهی گرم به دلیل تبخیر کربامید و روش‌های شکل‌دهی با فشار بالاتر به دلیل تغییر شکل

مراجع

1. Wang, Z., Ning, L.J., and Zhao, L., "Effect of Heat Treatments on the Crushing Behavior and Absorbing Performance of Aluminum Alloys Foams", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 977-982, 2009.
2. Campana, F., and Pilone, D., "Effect of Heat Treatments on the Mechanical Behaviour of Aluminum Alloy Foams", *Scripta Materialia*, Vol. 60, pp. 679-682, 2009.
3. Kolluri, M., Kartheyan, S., and Ramamurty, U., "Effect of Lateral Constraint on the Mechanical Properties of a Closed-Cell Al Foam: 1. Experiments", *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. A 38, pp. 2006-2013, 2007.
4. Greene, S.A., Hall, I.W., and Guden, M., "Improving the Energy Absorption of Closed Cell Aluminum Foams", *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 21, pp. 1591-1593, 2002.
5. Guden, M., and Yuksel, S., "SiC-Particulate Aluminum Composite Foams Produced from Powder Compacts: Foaming and Compression Behavior", *Journal of Materials Science*, Vol. 41, pp. 4075-4084, 2006.
6. Yu, S., Luo, Y., and Liu, J., "Effects of Strain Rate and SiC Particle on the Compressive Property of SiCp/AlSi9Mg Composite Foams", *Materials Science and Engineering*, Vol. A 487, pp. 394-399, 2008.
7. Zhao, N.Q., Jiang, B., Du, X.W., Li, J.J., and Shi, C.S., "Effect of Y_2O_3 on the Mechanical Properties of Open Cell Aluminum Foams", *Materials Letters*, Vol. 60, pp. 1665-1668, 2006.
8. Prabhu, B., Suryanarayana, C., Ana, L., and Vaidyanathan., "Synthesis and Characterization of High Volume Fraction Al- Al_2O_3 Nanocomposite Powders by High-Energy Milling", *Materials Science and Engineering*, Vol. A 425, pp. 192-200, 2006.
9. Razavi Hesabi, Z., Simchi, A., and Seyed Reihani, S.M., "Structural Evolution During Mechanical Milling of Nanometric and Micrometric Al_2O_3 Reinforced Al Matrix Composites," *Materials Science and Engineering*, Vol. A 428, pp. 159-168, 2006.
10. Alizadeh, M., and Mirzaei Aliabadi, M., "Synthesis Behavior of Nanocrystalline Al- Al_2O_3 Composite During Low Time Mechanical Milling Process",

- Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 4978-4986, 2011.
11. Benajmin, J.S., and Volin, T.E., "The Mechanism of Mechanical Alloying", *Metallurgical Transactions*, Vol. 5, pp. 1929-1934, 1974.
 12. Ozan, S., and Bilhan, S., "Effect of Fabrication Parameters on the Pore Concentration of the Aluminum Metal Foam Manufactured by Powder Metallurgy Process," *International Journal of Advanced Manufactured Technology*, Vol. 39, pp. 257-260, 2008.
 13. Wang, Q.Z., Cui, C.X., Liu, S.J., and Zhao, L.C., "Open-Celled Porous Cu Prepared by Replication of NaCl Space-Holders", *Materials Science and Engineering*, Vol. A 527, pp. 1275-1278, 2010.
 14. Surace, R., De Filippis, L.A.C., Ludocico, A.D., and Boghetich, G., "Influence of Processing Parameters on Aluminum Foam Produced by Space Holder Technique", *Materials and Design*, pp. 1878-1885, 2009.
 15. Wenjuan, N., Chenguang, B., Guibao, Q., and Qiang, W., "Processing and Properties of Porous Titanium Using Space Holder Technique", *Materials Science and Engineering*, Vol. A 506, pp. 148-151, 2009.
 16. Jiang, B., Zhao, N.Q., Shi, C.S., and Li, J.J., "Processing of Open Cell Aluminum Foams with Tailored Porous Morphology," *Scripta Materialia*, Vol. 53, pp. 781-785, 2005.
 17. Bin, J., Zejun W., and Naiqin, Z., "Effect of Pore Size and Relative Density on the Mechanical Properties of Open Cell Aluminum Foams," *Scripta Materialia*, Vol. 56, pp. 169-172, 2007.
 18. Jiang, B., Zhao, N. Q., Shi, C.S., Li, J.J., and Man, H.C., "A Novel Method for Making Open Cell Aluminum Foams by Powder Sintering Process", *Materials Letters*, Vol. 59, pp. 3333-3336, 2005.
 19. Li, D.S., Zhang, Y.P., Eggeler, G., And Zhang, X.P., "High Porosity and High-Strength Porous NiTi Shape Memory Alloys with Controllable Pore Characteristics", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 470, pp. L1-L5, 2009.
 20. Alizadeh, M., and Mirzaei Aliabadi, M., "Compressive Properties and Energy Absorption Behavior of Al-Al₂O₃ Composite Foam Synthesized by Space-Holder Technique", *Materials and Design*, Vol. 35, pp. 419-424, 2012.
 21. Eskandari, H., Ghasemi, H.M., and Emamy, M., "Microstructure and Interface Studies of Al/SiCp Composites Produced by Dynamic Compaction", *Materials Science Forum*, Vol. 465-466, pp. 213-218, 2004.
 22. Bond, G.M., and Inal, O.T., "Shock-Compacted Aluminum/Boron Carbide Composites", *Composites Engineering*, Vol. 5, pp. 9-16, 1995.
 23. Kim, K.T., Choi, S.W., and Park, H., "Densification Behavior of Ceramic Powder Under Cold Compaction", *Transactions of the ASME*, Vol. 122, pp. 238-244, 2000.