



اثر مقدار عامل فومساز کربنات کلسیم بر ساختار فیزیکی و خواص مکانیکی فوم آلومینیومی LM13

صادق سلطانی^۱، حامد دیلمی عضدی^{۲*}، سید حسین الهی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

* صندوق پستی ۳۸۱۳۵۱۱۷۷، hdazodi@arakut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف این پژوهش بررسی اثر تغییرات مقدار عامل فومساز کربنات کلسیم بر خواص فیزیکی و مکانیکی فوم آلومینیومی LM13 می‌باشد. فوم از جنس آلیاژ آلومینیوم LM13 با استفاده از عامل فومساز کربنات کلسیم (CaCO₃) و ذرات تثبیت کننده فلز کلسیم (Ca) با چگالی‌های از ۰/۳ تا ۰/۵ gr/cm³ (چگالی نسبی ۰/۱۲ تا ۰/۱۸) و اندازه حفره ۰/۲۵ تا ۰/۹۲ میلی‌متر تولید شده است. تأثیر میزان عامل فومساز بر اندازه حفره‌ها، کمترین ضخامت دیواره‌ها و چگالی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه رفتار مکانیکی فوم‌ها با استفاده از آزمون فشار تک محوری مورد بررسی قرار گرفته و تغییرات استحکام فشاری، ویژگی‌های الاستیک و ظرفیت جذب انرژی فوم‌ها در اثر تغییرات مقدار عامل فومساز بررسی شده است. مطابق نتایج بدست آمده استفاده بیشتر از عامل فومساز منجر به تولید فوم‌هایی با اندازه میانگین حفره بزرگتر و چگالی کمتر می‌گردد. همچنین افزایش مقدار عامل فومساز سبب کاهش مقاومت فشاری فوم‌ها در آزمون فشار تک‌محوری و ظرفیت جذب انرژی آن‌ها می‌گردد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۱۲ شهریور ۱۴۰۱
داوری اولیه: ۲۱ شهریور ۱۴۰۱
پذیرش: ۵ مهر ۱۴۰۱
کلیدواژه‌گان:
فوم آلومینیوم
عامل فومساز
مقاومت فشاری
ظرفیت جذب انرژی

The influence of the amount of CaCO₃ foaming agent on the physical structure and mechanical properties of LM13 aluminum foam

Sadegh Soltani, Hamed Deilami Azodi*, Seyed Hossein Elahi

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

* P.O.B. 381351177 Arak, Iran, hdazodi@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 3 September 2022
First Decision: 12 September 2022
Accepted: 27 September 2022

Abstract

This paper aims to investigate the effect of the amount of calcium carbonate as foaming agent on the physical and mechanical properties of LM13 aluminum foam. Aluminum alloy LM13 foams have been made using calcium carbonate (CaCO₃) as foaming agent and calcium metal (Ca) as stabilizing particles with densities from 0.3 to 0.5 gr/cm³ (relative density from 0.12 to 0.18) and the pores size from 0.25 to 0.92 mm. The effects of the amount of foaming agent on the size of the pores, the minimum thickness of the walls and the density have been evaluated. Furthermore, the mechanical behavior of foams has been investigated using uniaxial compression test. The influences of the amount of foaming agent on compressive strength, elastic characteristics and energy absorption capacity of foams have been investigated. According to the obtained results, the use of more foaming agent leads to the production of foams with larger average pores size and less density. Also, increasing the amount of foaming agent reduces the compressive strength of foams in the uniaxial compression test and their energy absorption capacity.

Keywords:

Aluminum Foam
Foaming Agent
Compressive Strength
Energy Absorption capacity

۱- مقدمه

بایین، دسترس بودن و سهولت تشکیل فوم بیشترین کاربرد را دارند. فوم‌های آلومینیومی با روش‌های متعددی از جمله متالورژی پودر، دمیدن گاز به درون مذاب، استفاده از عامل فومساز و ... تولید می‌شوند [۱-۳]. مطالعات تجربی زیادی درباره میزان مقاومت فشاری فوم‌های آلومینیومی با ساختار و شرایط بارگذاری متفاوت صورت گرفته است که نتایج گوناگونی باتوجه به آلیاژ مورد استفاده در فومساز داشته است. به طور کلی، فرایند فشرده‌سازی فوم آلومینیوم را می‌توان به سه مرحله

در سال‌های اخیر استفاده از مواد متخلخل در ساختارهایی که نیاز به نسبت استحکام به وزن بالا دارند و یا به عنوان عایق حرارتی و صوتی در صنایع مختلف از خودروسازی تا هوافضا گسترش یافته است. خاصیت عمده این مواد متخلخل قابلیت جذب انرژی بالای آن‌ها در تنش‌های فشاری می‌باشد. در میان فلزات مختلف که به منظور فومساز مورد استفاده قرار می‌گیرند، آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل داشتن چگالی نسبتاً

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Soltani, H. Deilami Azodi, S. H. Elahi, The influence of the amount of CaCO₃ foaming agent on the physical structure and mechanical properties of LM13 aluminum foam, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 5, pp. 33- 39, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.160057>

همکاران [۹] به وسیله ترکیب آلومینیوم آلیاژی A413، عامل فوم ساز CaCO_3 و NaCl فوم‌هایی با سلول بسته ساختند. آن‌ها بیان کردند افزودن CaCO_3 به مذاب باعث افزایش درصد تخلخل و کاهش چگالی می‌گردد. وجود NaCl نیز به عنوان ماده نفوذی در فوم باعث افزایش تخلخل می‌شود. همچنین مشاهده شد استفاده از عامل فوم ساز CaCO_3 سبب ایجاد حفره‌هایی بسته و استفاده از NaCl سبب ایجاد حفره‌هایی باز که به دیگر حفره‌ها راه دارند می‌گردد.

در این پژوهش با ساخت فوم‌های آلومینیومی به روش آلپوراس با استفاده از عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم، تأثیر مقدار عامل فوم‌ساز بر خواص فیزیکی و مکانیکی فوم تولیدی از قبیل اندازه حفره‌ها و ضخامت دیواره‌ها و متعاقب آن چگالی، میزان مقاومت فشاری و قابلیت جذب انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آزمایش فشار تک محوری شبه استاتیک برای تعیین خواص مکانیکی فوم‌های آلومینیومی استفاده می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

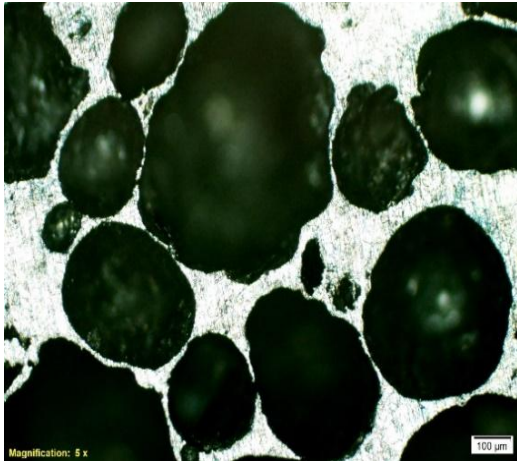
از آلیاژ آلومینیوم LM13 برای ساخت فوم فلزی به روش آلپوراس استفاده شد. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی این آلیاژ آورده شده است. فلز کلسیم (Ca) فاز تقویت‌کننده و عامل افزایش ویسکوزیته مذاب بوده است. حرارت‌دهی و اختلاط ذرات کلسیم به مدت ۲۰ دقیقه و در دمای ۷۲۰ درجه سانتیگراد انجام گرفت. پودر کربنات کلسیم (CaCO_3) با خلوص ۹۸ درصد وزنی و اندازه متوسط ۵ میکرومتر استفاده شد. با هدف حذف رطوبت، آلودگی سطح و بهبود خصوصیات و به تبع آن توزیع بهتر پودر کربنات کلسیم در مذاب آلومینوم، پودر به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد.

جدول ۱ درصد عناصر موجود در آلومینیوم LM13 [۱۳]

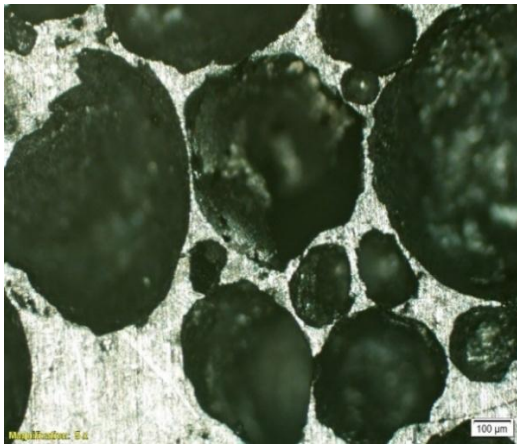
Elements	Al	Si	Cu	Zn	Fe	Other
Wt%	۸۴/۹۹	۹/۷۳	۱/۱۹	۱/۸۶	۰/۱۸	۰/۷۲

برای تولید محصول فومی ابتدا شمش آلومینیوم آلیاژی LM13 در دمای ۷۲۰ درجه سانتیگراد ذوب شده، سپس ذرات فلزی Ca در همان دما به آلومینیوم مذاب افزوده گردید و به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه هم زده شد. پس از رسیدن مذاب به بالاترین حد غلظت مقادیر ۱/۵، ۱/۸ و ۲/۱ درصد وزنی پودر CaCO_3 در دمای ۷۲۰-۷۵۰ درجه سانتیگراد به مذاب در حال اغتشاش اضافه شده و مخلوط بلافاصله به مدت

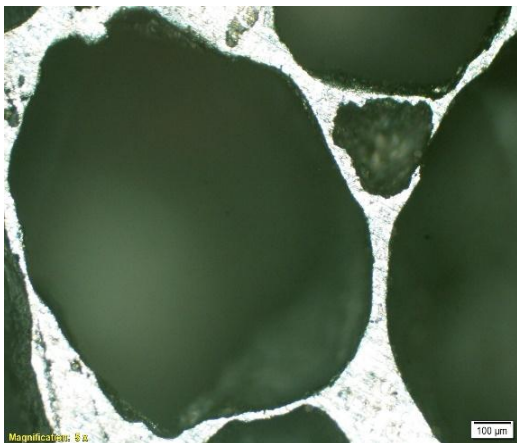
تغییر شکل تقسیم کرد: مرحله تغییر شکل الاستیک خطی، مرحله تغییر شکل پلاستیک و مرحله تراکم. در مرحله تغییر شکل پلاستیک، تنش وارده به فوم تحت فشار به حالت پایدار می‌رسد در حالی که میزان تغییر شکل به بالاترین مقدار رسیده، که سبب بهبود ظرفیت جذب انرژی در آن می‌گردد [۴-۶]. کومار و همکاران [۷] به بررسی اثر اندازه دانه‌های عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم CaCO_3 بر خواص فیزیکی فوم‌های Al-Si پرداختند. آن‌ها بیان کردند با افزایش اندازه دانه‌های عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم تعداد حفره‌ها در هر اینچ کاهش، تخلخل افزایش و چگالی روندی کاهشی دارد. پژوهشگران در بررسی‌های متعددی اثر عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم بر خواص فیزیکی فوم‌های ساخته شده از آلیاژهای مختلف آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد با افزایش میزان عامل فوم‌ساز CaCO_3 میزان تخلخل افزایش و چگالی فوم روندی کاهشی خواهد داشت [۸،۹]. مطابق تحقیقات کاهش چگالی با کاهش مقاومت خمشی و جذب انرژی همراه است [۶،۱۰]. سوتارنو و همکاران [۱۰] به بررسی و بهینه‌سازی میزان عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم برای دستیابی به بالاترین مقاومت فشاری پرداختند. آن‌ها بیان کردند، استفاده از عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم به میزان ۴ درصد وزنی می‌تواند سبب ایجاد چگالی 0.15 و 0.85 gr/cm³ تخلخل گردد که بالاترین میزان تخلخل می‌باشد. در این بررسی، تغییرات ساختاری عامل فوم‌ساز CaCO_3 و مدت زمان نگهداری بر فوم آلیاژی LM13 همچنین اثر چگالی نسبی بر خواص فشاری و ظرفیت جذب انرژی بررسی شده است. لینول و همکاران [۱۱] فوم‌های آلومینیومی با ساختاری یکسان را تحت باگذاری فشاری دینامیکی و شبه استاتیکی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند خواص مکانیکی در فوم‌ها بستگی زیادی به چگالی آنها دارد، به همین منظور آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های فوم به منظور تعیین تأثیر چگالی فوم بر خواص مکانیکی آنها انجام دادند. مشاهدات نشان داد در هر دو آزمایش شبه استاتیکی با افزایش چگالی نمونه میزان مقاومت فشاری آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. راجک و همکاران [۸] به بررسی اثر متقابل افزایش عامل فوم‌ساز و میزان هم‌زدن بر اندازه حفره‌های فوم‌های فلزی آلپوراس پرداختند. در این بررسی مشاهده شد که با اضافه کردن ۳ درصد وزنی عامل غلیظ‌کننده، گرانروی یکنواخت مذاب و ساختار فوم همگن با تخلخل بهینه حاصل می‌شود؛ همچنین افزودن ۵ درصد وزنی عامل فوم‌ساز و افزایش سرعت هم‌زدن تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، باعث افزایش تخلخل و کاهش ضخامت دیواره سلولی می‌شود. کاروپاسامی و

Fig. 1 Microstructure of LM13 foam with 1.5% CaCO₃

شکل ۱ ریزساختار فوم LM13 با ۱/۵ درصد CaCO₃

Fig. 2 Microstructure of LM13 foam with 1.8% CaCO₃

شکل ۲ ریزساختار فوم LM13 با ۱/۸ درصد CaCO₃

Fig. 3 Microstructure of LM13 foam with 2.1% CaCO₃

شکل ۳ ریزساختار فوم LM13 با ۲/۱ درصد CaCO₃

اندازه حفره‌ها در نمونه فوم با ۱/۵ درصد عامل فوم ساز CaCO₃ از ۰/۰۵ تا ۰/۴ میلی‌متر متغیر می‌باشد. میانگین کمترین ضخامت دیواره‌ها نیز برابر ۰/۰۲ میلی‌متر است. با

یک دقیقه هم زده شد. سپس مخلوط در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان ۱/۵ دقیقه نگه داشته شد تا CaCO₃ تجزیه شده و تولید گاز CO₂ و در نتیجه تولید تخلخل نماید. در ادامه، فوم تولید شده از کوره خارج شده و در آب خنک می‌شود تا از رشد بیش از حد سلول‌ها و در نتیجه تخریب آن‌ها جلوگیری شود. در حین تجزیه کربنات کلسیم، اکسید آلومینیوم ایجاد می‌شود که در جدار داخلی سلول‌ها قرار گرفته و به پایداری سلول‌ها کمک می‌نماید. به منظور مشاهده ساختار سلولی و توزیع ذرات پایدار کننده فلز کلسیم در فوم آلومینیومی، فوم‌های آلومینیومی تولیدی توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus مورد ارزیابی قرار گرفت. تصاویر ریز ساختاری برای بررسی میانگین اندازه حفره‌ها و کمترین ضخامت دیواره‌ها حاصل از تغییرات درصد عامل فوم‌ساز CaCO₃ و مدت زمان استراحت فوم با استفاده از نرم‌افزار MIP Cloud انجام شد. خواص فشاری نمونه‌ها با دستگاه STM-250 اندازه‌گیری شد. نیروی پانچ به صورت تک محوری و موازی با جهت رشد حفره‌ها با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه به نمونه‌ها اعمال شد. نمونه‌های آزمون به صورت مکعبی با سطح مقطع ۵۰×۵۰ میلی‌متر مربع و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر بریده شدند تا اطمینان حاصل شود اندازه حفره‌ها بیش از ۱۰ برابر فوم است. هر نمونه تا رسیدن به مقدار ۷۰ درصد کرنش متوقف شد و جهت بررسی صحت نتایج، آزمون سه بار تکرار و میانگین نتایج بدست آمده گزارش گردید. استحکام فشاری، مدول الاستیک و انرژی جذب شده در هر نمونه اندازه‌گیری و مقایسه شدند. چگالی نمونه‌ها قبل از آزمایش محاسبه گردید. چگالی نسبی نمونه‌ها با استفاد از رابطه (۱) محاسبه گردید که ρ_{rel} چگالی نسبی ρ^* چگالی فوم و ρ_s چگالی آلومینیوم آلیاژی می‌باشد [۱۲].

$$\rho_{rel} = \rho^* / \rho_s \quad (1)$$

۳- ارائه نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ساختاری

تصاویر ریزساختار نمونه‌های فوم آلومینیومی تولید شده با ۱/۵، ۱/۸ و ۲/۱ درصد عامل فوم‌ساز CaCO₃ که با استفاده از میکروسکوپ نوری به دست آمده است در شکل‌های ۱ تا ۳ قابل مشاهده می‌باشد. ریزساختار نمونه فوم‌های تولیدی گویای ساختار نسبتاً یکنواخت حفره‌ها در محصول می‌باشد. همچنین حفره‌های کروی شکل و همگن در فوم با ۱/۵ درصد عامل فوم‌ساز حاکی از تجزیه مناسب عامل فوم‌ساز و عدم ترکیب حفره‌ها با یکدیگر است.

منحنی‌ها دارد. به طور کلی رفتار فشاری فوم‌های آلومینیومی تحت آزمون فشار تک محوری مشابه یکدیگر هستند. مقاومت فشاری نیز با افزایش درصد عامل فوم ساز (کاهش چگالی نسبی) روندی کاهشی دارد [۱۶].

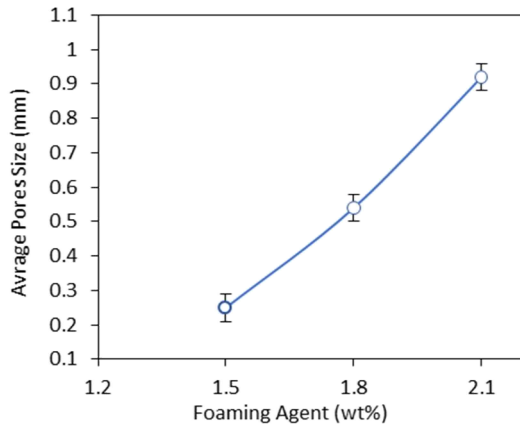


Fig. 4 Variation of average pores size with increasing CaCO₃

شکل ۴ تغییرات میانگین اندازه حفره‌ها با افزایش عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم.

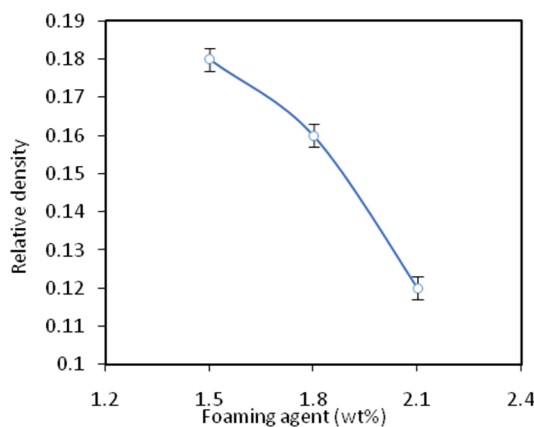


Fig. 5 Variation of relative density with increasing CaCO₃

شکل ۵ تغییرات چگالی نسبی با افزایش عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون‌های فشار، اثر میزان عامل فوم‌ساز CaCO₃ بر مقاومت فشاری فوم‌های آلومینیومی در جدول ۲ آورده شده است. مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری فوم‌های آلومینیومی با افزایش مقدار عامل فوم‌ساز CaCO₃ کاهش می‌یابد؛ که دلیل آن افزایش اندازه حفره‌ها ناشی از افزایش مقدار عامل فوم‌ساز می‌باشد. از طرفی افزایش چگالی فوم با کاهش تخلخل و تراکم پذیری همراه است [۱۷، ۱۸]. میزان تنش از حدود کرنش ۰/۲ تا ۰/۶ تقریباً در همه منحنی‌ها ثابت است. مقدار مقاومت فشاری در فوم‌ها با چگالی نسبی ۰/۱۸ و ۰/۱۶ (میزان ۱/۵ و ۱/۸ درصد عامل فوم ساز) نسبت به نمونه

افزایش درصد عامل فوم‌ساز به ۱/۸ درصد اندازه حفره‌ها افزایش یافته، در بازه ۰/۳ تا ۰/۸ میلی‌متر خواهد بود. میانگین کمترین ضخامت دیواره‌ها نیز به ۰/۱۶ میلی‌متر می‌رسد. در نمونه فوم با ۲/۱ درصد عامل فوم‌ساز اندازه حفره‌ها نسبت به سایر نمونه‌ها بزرگتر بوده، در محدوده ۰/۷۵ تا ۱/۲ میلی‌متر تغییر می‌کند. در این حالت اما میانگین کمترین ضخامت دیواره‌ها به ۰/۰۱ میلی‌متر کاهش یافته است. شکل ۴ تغییرات میانگین اندازه حفره‌ها را بر حسب درصد عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم نشان می‌دهد. چنانکه ذکر شد افزایش عامل فوم‌ساز منجر به بزرگ‌تر شدن اندازه متوسط حفره‌ها شده است. درصد عامل فوم‌ساز رابطه معکوس با چگالی فوم خواهد داشت. مطابق شکل ۵ استفاده بیشتر از عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم به دلیل ایجاد حفره‌های بزرگتر باعث تولید فوم با چگالی کمتر شده است.

۳-۲- استحکام فشاری

برای ارزیابی استحکام فشاری فوم‌های ساخته شده مطابق شکل ۶ فوم‌ها تا تغییر طول نسبی ۷۰٪ تحت آزمون فشار تک محوری قرار گرفتند. منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های فوم آلومینیوم LM13 ساخته شده با ۱/۵، ۱/۸ و ۲/۱ درصد عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم در شکل ۷ نشان داده شده است. منحنی تنش-کرنش فوم‌ها از سه ناحیه تشکیل شده است [۱۲، ۱۵]:

- منطقه تغییر شکل الاستیک خطی تا کرنش ۴٪ که در آن خم شدن دیواره‌های حفره‌ها تا حدی برگشت پذیر می‌باشد.
- منطقه تغییر شکل پلاستیک که در بازه کرنش ۴٪ تا ۶۰٪ روی می‌دهد. فروپاشی در فوم‌ها به تدریج در همه دیواره‌ها منتشر شده و در نهایت با فروپاشی تمام دیواره‌ها، متراکم شدن حفرات در نمونه فومی شروع می‌شود.

- ناحیه تراکم نهایی که در آن تنش به سرعت افزایش می‌یابد. دیواره‌های حفرات به یکدیگر فشار آورده، و نمونه‌های فومی به مرحله تراکم می‌رسند. برون‌یابی روشی خوبی برای شناسایی ناحیه آغاز کرنش تراکم در نمونه‌های تحت فشار می‌باشد. با استفاده از این روش کرنش تراکم در منحنی‌های تنش-کرنش شناسایی گردید.

عموماً تفاوت بین منحنی‌های تنش-کرنش در ناحیه الاستیک کمتر از ناحیه‌های پلاستیک و تراکم نهایی است و اختلاف آنها با افزایش کرنش شدت می‌یابد. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که فوم‌های آلومینیومی با درصد عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم ۱/۵ و ۱/۸ درصد (به ترتیب دارای چگالی نسبی ۰/۱۶ و ۰/۱۸) تا کرنش ۰/۱ رفتاری یکسان داشته، اختلاف آن‌ها با افزایش کرنش بیشتر شده است. اما نمونه فوم دارای ۲/۱ درصد کربنات کلسیم (چگالی نسبی ۰/۱۲) تفاوت مشهودی با سایر

که در آن W مقدار انرژی جذب شده می‌باشد، ϵ_D کرنش تراکم نهایی است که از محل برخورد خطوط مماس بر منحنی تنش-کرنش در نواحی II و III تعیین می‌شود. بررسی نتایج آزمون فشار نمونه‌های فوم آلومینیوم LM13 با عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم نشان می‌دهد افزایش درصد کربنات کلسیم از ۱/۵٪ تا ۲/۱٪ منجر به کاهش ظرفیت جذب انرژی فوم‌های تولیدی شده است. شکل ۸ انرژی جذب شده توسط فوم‌ها را بر حسب میزان کرنش حین آزمون فشار نشان می‌دهد. مطابق نتایج تفاوت انرژی جذب شده توسط فوم‌های تولید شده با درصد‌های مختلف عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم در کرنش‌های بالاتر (کرنش‌های بزرگتر از حدود کرنش ۰/۳) مشهود است. به طور کلی مقدار انرژی جذب شده (سطح زیر نمودار منحنی تنش-کرنش)، با افزایش استحکام افزایش می‌یابد. کم‌مانش و تسلیم دو مکانیسم تأثیرگذار بر جذب انرژی در فلزات متخلخل هستند که با خم شدن دیواره‌های حفره‌ها و در پی آن فرورفتن حفره‌ها به درون یکدیگر انجام می‌شود، این مکانیسم‌ها امکان جذب انرژی در تنش‌های نسبتاً کم در فوم‌های فلزی را فراهم می‌کند. انرژی جذب شده در فوم‌ها تا قبل از آغاز تراکم (کرنش ۰/۶) کارآمد می‌باشد و پس از آن نمونه متراکم و سپس خرد می‌شود.

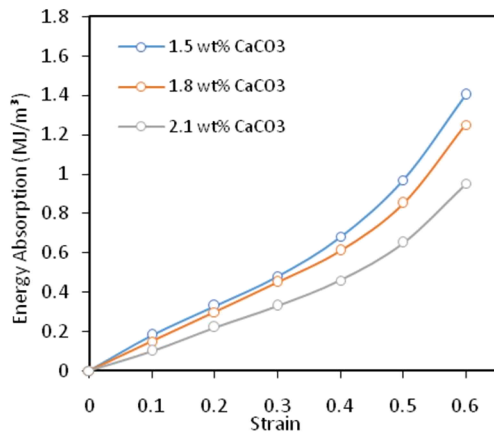


Fig. 8 Energy absorbed in aluminum foams during uniaxial compression tests

شکل ۸ انرژی جذب شده در فوم‌های آلومینیومی حین آزمون فشار تک محوری

۳-۴- مدول الاستیک

مدول الاستیسیته هر یک از نمونه با استفاده از شیب خط ناحیه الاستیک منحنی‌های تنش-کرنش محاسبه گردید. در جدول ۳ تأثیر میزان عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم بر مدول الاستیک فوم‌های آلومینیومی تولید شده آورده شده است. همچنین در شکل ۹ مدول الاستیک نسبی فوم‌های آلومینیومی E^*/E

فوم با چگالی نسبی ۰/۱۲ (میزان ۲/۱ درصد عامل فوم ساز) بیشتر می‌باشد. مطابق نتایج افزایش میزان عامل فوم ساز منجر به کاهش مقاومت فشاری در فوم‌ها شده است. در نتیجه می‌توان مشاهده نمود که افزایش درصد عامل فوم ساز راندمان جذب انرژی در فوم‌ها را کاهش داده است.

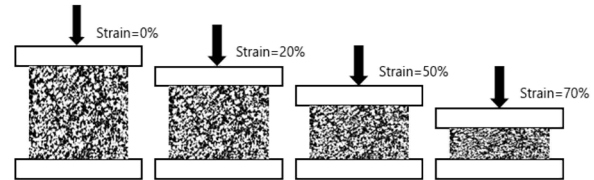


Fig. 6 Compressing of LM13 foam to strain 70%

شکل ۶ مراحل فشرده‌سازی فوم آلومینیومی تا تغییر طول نسبی ۷۰ درصد

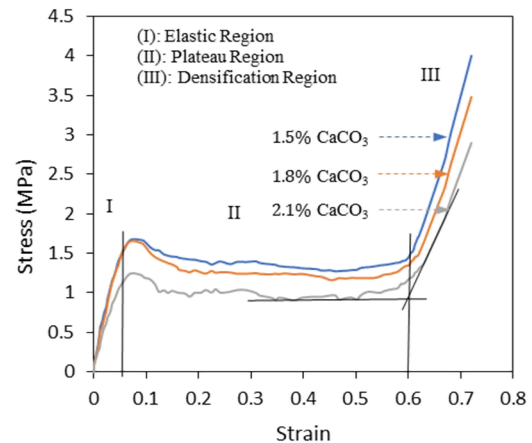


Fig. 7 Stress-strain curves of foamed aluminum with 1.5, 1.8 and 2.1 wt% CaCO_3 , mixing time= 20 min and holding time= 1.5 min

شکل ۷ منحنی‌های تنش-کرنش فوم‌های آلومینیومی با ۱/۵، ۱/۸، ۲/۱ درصد عامل فوم ساز کربنات کلسیم، مدت زمان اختلاط، ۲۰ دقیقه و مدت زمان نگهداری، ۱/۵ دقیقه

جدول ۲ استحکام فشاری حاصل از منحنی‌های تنش-کرنش فوم آلومینیوم.

Table 2 Compressive strength of aluminum foam (MPa)

Foaming agent (wt%)	Relative density	Stress at 20% strain	Stress at 30% strain	Stress at 60% strain	Stress at 70% strain
۱/۵	۰/۱۸	۱/۴	۱/۳	۱/۴۵	۲/۵
۱/۸	۰/۱۶	۱/۳	۱/۲۵	۱/۳	۳
۲/۱	۰/۱۲	۱	۰/۹	۱/۲	۲/۶

۳-۳- انرژی جذب شده

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌ها در فوم‌های فلزی جذب انرژی در آن‌ها است و همین ویژگی منحصر به فرد سبب استفاده گسترده فوم‌های فلزی در صنعت شده است. ظرفیت انرژی جذب شده، ناحیه زیر منحنی تنش-کرنش تا قبل از مرحله تراکم نهایی می‌باشد (رابطه ۲) [۱۸، ۱۹].

$$W = \int_0^{\epsilon_D} \sigma d\epsilon \quad (2)$$

با این حال مدول الاستیک فوم آلومینیومی با درصد کربنات کلسیم ۱/۸ بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. این روند افزایش برخلاف اکثر بررسی‌های پیشین می‌باشد. پژوهش‌های قبلی بیانگر افزایش مدول الاستیک با افزایش چگالی فوم می‌باشد [۱۹، ۲۰]. این رفتار ممکن است به دلیل همگن بودن ساختار حفره‌ها در فوم آلومینیومی با ۱/۸ درصد کربنات کلسیم باشد. در شکل ۱۰ نواحی ناهمگن در فوم‌های با درصد متفاوت عامل فوم ساز و در نتیجه چگالی نسبی متفاوت نشان داده شده است.

افزایش درصد عامل فوم ساز CaCO_3 در نمونه‌های تولیدی سبب متلاشی شدن دیواره‌ها و ترکیب حفره‌ها با یکدیگر می‌شود [۲۱، ۲۲]. این را می‌توان یکی از دلایل تغییرات میانگین اندازه حفره‌ها و انحراف استاندارد در حفره‌های فوم‌های آلومینیومی تلقی کرد. میانگین اندازه حفره‌ها و انحراف استاندارد آن در فوم آلومینیومی با ۱/۸ درصد عامل فوم ساز CaCO_3 به ترتیب ۰/۵۴ میلی‌متر و ۰/۹۲ است که کمترین میزان انحراف از معیار را بین نمونه‌های فومی دارد. این رفتار در مدول الاستیک فوم آلومینیومی تولید شده با عامل فوم ساز TiH_2 با اندازه سلول‌های مختلف نیز مشاهده شده است [۱۲، ۲۳]. بنابراین به نظر می‌رسد که تاثیر همگنی ساختار بر مدول الاستیک بیشتر از تاثیر چگالی فوم باشد. از نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که رابطه‌ای خطی بین مدول یانگ نسبی و چگالی نسبی و به تبع آن درصد عامل فوم ساز برقرار نیست؛ این در حالی است که برای نمونه‌های فوم ساخته شده با TiH_2 به عنوان عامل فوم ساز رابطه خطی حاکم بوده است. این را می‌توان به عدم برابری چگالی در نمونه‌ها نیز نسبت داد؛ چرا که همه فوم تولیدی دارای حفره‌ها و دیواره‌هایی با اندازه‌ها یکسانی نیستند. بنابراین مدول الاستیک در فوم‌ها با اندازه حفره متفاوت متغیر است [۲۳، ۲۴].

برحسب درصد عامل فوم ساز کربنات کلسیم نمایش نشان داده شده است، که E^* مدول الاستیک فوم و E مدول الاستیک آلومینیوم آلیاژی می‌باشد. مطابق نتایج بررسی‌های انجام شده، افزایش میزان کربنات کلسیم مورد استفاده از ۱/۵ تا ۲/۱٪ به‌طور کلی باعث کاهش مدول الاستیک و مدول الاستیک نسبی شده است.

جدول ۳ مدول الاستیک فوم آلومینیومی با ۱/۵، ۱/۸ و ۲/۱ درصد کربنات کلسیم.

Table 3 Elastic modulus of foamed aluminum with 1.5, 1.8 and 2.1wt% CaCO_3

Foaming agent (wt%)	Relative density	Density (g/cm^3)	Elastic modulus (MPa)	Average cell size (mm)
۱/۵	۰/۱۸	۰/۵	۲۷	۰/۲۵
۱/۸	۰/۱۶	۰/۴۳	۳۰	۰/۵۴
۲/۱	۰/۱۲	۰/۳	۱۹	۰/۹۲

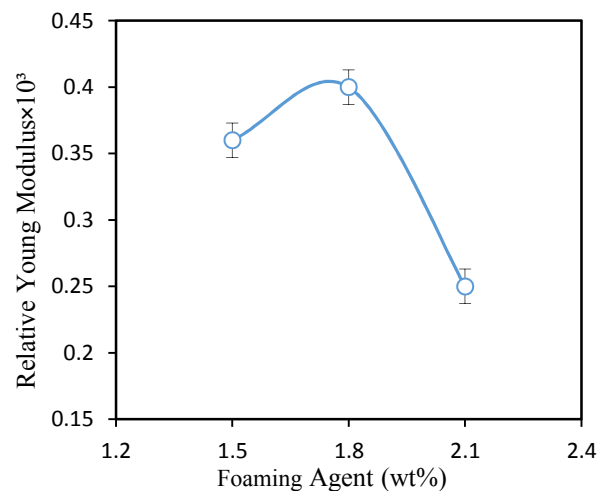


Fig. 9 Variation of relative elastic modulus with increasing CaCO_3

شکل ۹ منحنی مدول الاستیک نسبی نسبت به تغییرات درصد عامل فوم ساز

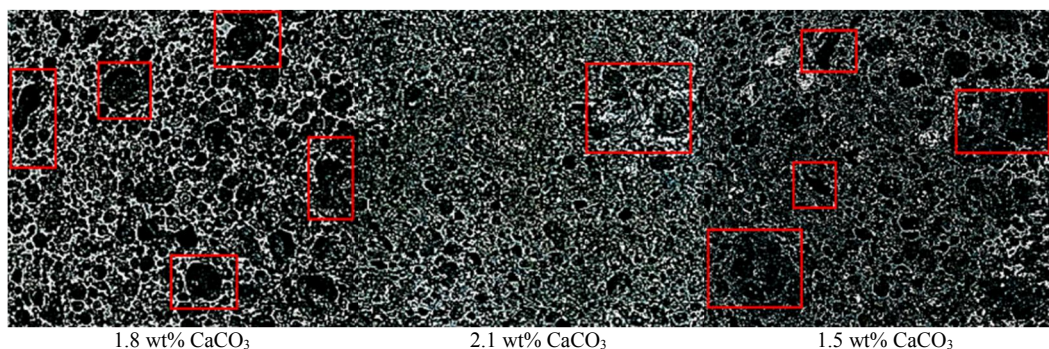


Fig. 10 Foam structures with 1.5, 1.8 and 2.1 wt% foaming agent

شکل ۱۰ ساختار نمونه فوم‌های تولیدی با ۱/۵، ۱/۸ و ۲/۱ درصد عامل فوم ساز

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق فوم‌های آلیاژ آلومینیوم LM13 به روش آلپوراس با استفاده از عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم (CaCO_3) و با ذرات تثبیت کننده فلز کلسیم (Ca) ساخته شد. تأثیر میزان عامل فوم‌ساز بر اندازه حفره‌ها، کمترین ضخامت دیواره‌ها و چگالی مطالعه شد. با کمک آزمون فشار تک محوری اثر مقدار کربنات کلسیم بر استحکام فشاری، خصوصیت‌های الاستیک و جذب انرژی فوم‌ها بررسی شد. مهمترین نتایج بدست آمده عبارتند از:

- با بررسی منحنی تنش-کرنش فوم‌های آلومینیوم تحت آزمون فشار تک محوری نشان داده شد مقاومت فشاری فوم‌ها با افزایش عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم کاهش یافته است.
- افزایش درصد کربنات کلسیم از ۱/۵٪ تا ۲/۱٪ موجب کاهش ظرفیت جذب انرژی فوم‌های تولیدی شد.
- بیشترین شیب ناحیه الاستیک در فوم آلومینیومی با درصد کربنات کلسیم ۱/۸ مشاهده گردید. هرچند مطابق بررسی‌های پیشین مدول الاستیک فوم عموماً با افزایش چگالی افزایش می‌یابد لیکن رفتار مشاهده شده اهمیت نقش همگنی ساختار فوم در رفتار الاستیک را نشان می‌دهد. فوم تولید شده با ۱/۸ درصد کربنات کلسیم دارای همگن‌ترین ساختار بود. لذا نتیجه گرفته شد تأثیر میزان همگنی ساختار فوم بر رفتار الاستیک فوم بیش از چگالی نسبی می‌باشد.

۵- مراجع

- property correlation of closed-cell aluminum foam." *Journal of Alloys and Compounds* (2009)467(1-2): 550-556.
- [9] Karuppasamy, R., et al. "Investigation on the effect of aluminium foam made of A413 aluminium alloy through stir casting and infiltration techniques." *International Journal of Materials Engineering Innovation* (2020) 11(1): 34-50.
- [10] Sutarno, et al. Optimization of calcium carbonate content on synthesis of aluminum foam and its compressive strength characteristic. AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC (2017).
- [11] Linul, E., et al. "Dynamic and quasi-static compression tests of closed-cell aluminium alloy foams." *Proc. Roman. Acad.* (2017) A 18(4): 361-369.
- [12] H.P. Degischer, B. Kriszt, "Handbook of cellular metals", Weinheim, Wiley, VCH, 2002
- [13] BOMMANA, Divakar, et al. Effect of Blowing Agent CaCO_3 Content on the Microstructure and Mechanical Properties of AA 5083 Foam. *International Journal of Metalcasting*, 2021, 1-17
- [14] P.J. Tan, S.R. Reid, J.J. Harrigan, Z. Zou, S. Li, Dynamic compressive strength properties of aluminum foams, part I—experimental data and observations. *J. Mech. Phys. Solids* 53, 2174–2205 (2005)
- [15] Y. Sun, Q.M. Li, T. Lowe, S.A. McDonald, P.J. Withers, Investigation of strain-rate effect on the compressive behaviour of closedcell aluminium foam by 3D image-based modelling. *Mater. Des.* 89, 215–224 (2016)
- [16] I. Jeon, T. Asahina, The effect of structural defects on the compressive behavior of closed-cell Al foam. *Acta Mater.* 53, 3415–3423 (2005)
- [17] O.B. Olurin, N.A. Fleck, M.F. Ashby, Deformation and fracture of aluminum foams. *Mater. Sci. Eng. A* 291, 136–146 (2000)
- [18] Pinto, P., N. Peixinho, F. Silva, and D. Soares. "Compressive properties and energy absorption of aluminum foams with modified cellular geometry." *Journal of Materials Processing Technology* 214, No. 3 (2014): 571-577.
- [19] Byakova, Alexandra, Yuri Bezim'yanny, Svyatoslav Gnyloskurenko, and Takashi Nakamura. "Fabrication method for closed-cell aluminium foam with improved sound absorption ability." *Procedia Materials Science* 4 (2014): 9-14.
- [20] Q. Fang, J. Zhang, Y. Zhang, J. Liu, Z. Gong, Mesoscopic investigation of closed-cell aluminum foams on energy absorption capability under impact. *Compos. Struct.* 124, 409–420 (2015)
- [21] Wichianrat, Ekkapak, Yuttanant Boonyongmaneerat, and Seksak Asavavisithchai. "Microstructural examination and mechanical properties of replicated aluminium composite foams." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 22, No. 7 (2012): 1674-1679.
- [22] R. Huang, S. Ma, M. Zhang, J. Xu, Z. Wang, Dynamic deformation and failure process of quasi-closed-cell aluminum foam manufactured by direct foaming technique. *Mater. Sci. Eng. A* (2019).
- [23] Cao, Xiao-qing, Zhi-hua Wang, Long-mao ZHAO, and Gui-tong YANG. "Effects of cell size on compressive properties of aluminum foam." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 16, No. 2 (2006): 351-356.
- [24] S.F. Fischer, P. Schuler, C. Fleck, A. Buhig-Polaczek, Influence of the casting and mould temperatures on the (micro)structure and compression behaviour of investment-cast open-pore aluminium foams. *Acta Mater.* 61, 5152–5161 (2013).
- [1] L J Gibson, M F Ashby. *Cellular Solids: Structure and Properties*, Cambridge University Press, UK, Cambridge, 1997.
- [2] Raj, R. E. and B. Daniel. "Structural and compressive property correlation of closed-cell aluminum foam." *Journal of Alloys and Compounds* (2009)467(1-2): 550-556.
- [3] Banhart, J. and H. W. Seeliger. "Aluminium foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and applications." *Advanced Engineering Materials* (2008) 10(9): 793-802.
- [4] Linul, E., et al. "The temperature and anisotropy effect on compressive behavior of cylindrical closed-cell aluminum-alloy foams." *Journal of Alloys and Compounds* (2018) 740: 1172-1179.
- [5] Wang, Z., et al. "Compressive behavior of closed-cell aluminum alloy foams at medium strain rates." *Materials Science and Engineering: A* (2011) 528(6): 2326-2330.
- [6] Heidari Ghaleh, M., et al. "Compressive properties of A356 closed-cell aluminum foamed with a CaCO_3 foaming agent without stabilizer particles." *Metals and Materials International* (2021) 27(10): 3856-3861.
- [7] Praveen Kumar, T., et al. "Effect of Grain Size of Calcium Carbonate Foaming Agent on Physical Properties of Eutectic Al-Si Alloy Closed Cell Foam." *Transactions of the Indian Institute of Metals* (2015) 68(1): 109-112.
- [8] Raj, R. E. and B. Daniel. "Structural and compressive