

تولید فوم کامپوزیتی زمینه آلومینیومی AA356/SiC_p به روش فومسازی درجا در مذاب با عامل فومساز CaCO₃ و بررسی خواص فشاری آن

مسعود گلستانی پور^{۱*}، ابوالفضل باباخانی^۲ و سید مجتبی زبرجد^۳

۱- گروه پژوهشی مواد و مؤسسه آموزش عالی علمی کاربردی جهاددانشگاهی خراسان رضوی، مشهد

۲- گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- گروه مهندسی متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۳۰ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۲/۲۱)

DOI: 10.18869/acadpub.jame.35.4.51

چکیده - در این پژوهش فوم‌های آلومینیومی AA356 با مقادیر مختلف از ذرات سیلیسیم کاربید (SiC) به عنوان عامل تقویت‌کننده و پایدارساز و پودر کلسیم کربنات (CaCO₃) به عنوان عامل فومساز با استفاده از روش فومسازی مستقیم مذاب تولید شد. چگالی محصولات فومی بین ۰/۳۸ تا ۰/۶۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. پس از آن ریزساختار و خواص فشاری فوم‌های کامپوزیتی AA356/SiC_p تولید شده بررسی شد. ارتباط بین تنش مسطح، چگالی، درصد وزنی CaCO₃ و کسر حجمی ذرات SiC با قطر متوسط ثابت نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخص شد که منحنی تنش-کرنش فشاری محصولات یکنواخت نیست و ظاهری دندان‌های دارد. از سوی دیگر نشان داده شد که در یک چگالی ثابت، تنش مسطح با افزایش محتوای ذرات SiC و کاهش مقدار پودر CaCO₃ مصرفی، افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: فوم کامپوزیتی، آلیاژ آلومینیوم AA356، ذرات SiC، کلسیم کربنات، خواص فشاری

Fabrication of AA356/SiC_p Aluminum Composite Foam via In-Situ Foaming Route of Melt using CaCO₃ Foaming Agent and an Investigation of its Compressive Properties

M. Golestanipour^{1*}, A. Babakhani² and S.M. Zebarjad³

1- Materials Research Group and Iranian Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran

2- Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran

* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: m.golestanipour@gmail.com

Abstract: In this study, aluminium composite foams reinforced by different volume fractions of SiC particles as reinforcement and stabilizing agent were fabricated with the direct foaming route of melt using different contents of CaCO₃ as foaming agent. The density of produced foams were measured to be from 0.38 to 0.68 g/cm³. The microstructural features and compressive properties of the AA356/SiC_p composite foams were investigated. The relation between plateau stress, density and, weight percentage of CaCO₃ and SiC_p volume fraction with a given particle size was also investigated. The results showed that compressive stress-strain curves of the products were not smooth and exhibit some serrations. Also, it was shown that in the same density of composite foams, the plateau stress of the composite foams increases with increasing volume fraction of SiC particles and decreasing weight percentage of CaCO₃.

Keywords: Composite foams, AA356 aluminium alloy, SiC particles, Calcium carbonate, Compressive properties

۱- مقدمه

آلومینیوم (AlMn10) بر روی ساختار تخلخل‌ها توسط فوشنگ و همکارانش [۵] بررسی شد. کاهش چگالی محصول فومی با افزایش زمان هم‌زدن، افزایش چگالی با افزایش میزان MnO₂، کاهش چگالی با افزایش دمای فوم‌سازی و نیز کاهش چگالی با افزایش مقدار TiH₂ از جمله یافته‌های این بررسی است. فوم‌شوندگی مذاب آلومینیوم خالص به کمک عامل فوم‌ساز TiH₂ و عامل پایدارساز کلسیم توسط سانگ و نات [۶] مورد پژوهش قرار گرفت. در این بررسی مشخص شد که نرخ انبساط با سطح مقطع محفظه قالب افزایش و با ارتفاع و گرانیوز مذاب، کاهش می‌یابد. اندازه و توزیع تخلخل‌ها نیز با زمان نگهداری تغییر می‌نماید. داوو و همکارانش [۷] مشخصات فوم‌های آلومینیوم خالص تولید شده به‌روش ذوبی با عامل فوم‌ساز روی‌هیدرید (ZrH₂) و عامل پایدارساز کلسیم را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه مشخص شده است که کنترل مناسب مقدار کلسیم، میزان ZrH₂، دمای آزمون و زمان هم‌زدن و نگهداری مذاب سبب تولید محصول یکنواخت با چگالی پایین می‌شود. هم‌چنین ترکیبات بین‌فلزی و اکسیدهایی نظیر آلومینیوم‌اکسید (Al₂O₃) سبب افزایش گرانیوز مذاب و پایداری بیش‌تر سلول‌ها می‌شود. پاپادوپولوس و همکارانش [۸] از دولومیت به‌عنوان عامل فوم‌ساز در تولید فوم آلومینیوم خالص به‌روش ذوبی با عامل پایدارساز کلسیم استفاده نمودند و محصولات را با فوم‌های تولیدی با عامل فوم‌ساز TiH₂ از لحاظ تأثیر نوع عامل فوم‌ساز بر ریزساختار فوم‌های تولیدی مقایسه کردند. آن‌ها مشخص نمودند که کنترل فرایند با استفاده از TiH₂ مشکل و حساس است اما دولومیت با زمان تجزیه بیش‌تر و امکان کنترل بهتر

استفاده از فوم‌های فلزی در سازه‌هایی که نیاز به استحکام ویژه بالا دارد یا دارای مزایایی نظیر عایق بودن حرارتی و صوتی هستند، در سال‌های اخیر گسترش یافته است. این مواد سبک و در عین حال مستحکم، در ساختمان‌سازی، صنایع نظامی، هوافضا، خودروسازی، حمل و نقل و غیره استفاده‌های فراوانی دارند. خاصیت عمده این مواد متخلخل قابلیت جذب انرژی بالا در تنش‌های فشاری است. روش‌های فوم‌سازی مستقیم توسط عامل فوم‌ساز به سبب هزینه کم و قابلیت تولید انبوه، برای تولیدات صنعتی به کار گرفته شده است. با این حال ساختار سلولی فوم‌های فلزی غالباً نامنظم با توزیع اندازه سلولی غیرهمگن است [۱-۳].

طی سال‌های اخیر به‌منظور بهبود ریزساختار و به تبع آن خواص مکانیکی محصولات فومی حاصل از روش فوم‌سازی مستقیم مذاب با عامل فوم‌ساز، پژوهش‌های به نسبت زیادی صورت گرفته است. در پژوهشی که توسط ناکامورا و همکارانش [۴] انجام گرفت، عوامل فوم‌ساز تیتانیوم-هیدرید (TiH₂) و کلسیم‌کربنات CaCO₃ با پوشش کلسیم-فلورید (CaF₂)، برای تولید فوم‌های آلومینیومی به‌روش ذوبی با زمینه آلیاژ A356 و عامل پایدارساز کلسیم، مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش مشخص شد که چگالی بالاتر برای عامل فوم‌ساز CaCO₃ بدون پوشش حاصل می‌شود و فوم تولیدی نیز با این عامل فوم‌ساز، دارای تخلخل‌های به مراتب ریزتر از عامل فوم‌ساز TiH₂ است. اثر متغیرهای فرایند تولید به‌روش ذوبی با عامل فوم‌ساز TiH₂ و عامل پایدارساز منیزیم-اکسید (MnO₂) و ترکیب آلیاژ پایه (آلومینیوم خالص و آلیاژ

فرایند، می‌تواند هم به‌عنوان عامل فوم‌ساز و هم عامل پایدارساز عمل نماید و باعث ایجاد سلول‌های کوچک‌تر و دیواره‌های نازک‌تر شود. در پژوهش دیگری که توسط لازارو و همکارانش [۹] صورت گرفت، از عامل فوم‌ساز حاصل از اختلاط منیزیت و دولومیت برای تولید فوم آلومینیومی با زمینه AA2030 استفاده شد. از نتایج این پژوهش مشخص شد که چگالی‌های مشابه با عامل فوم‌ساز CaCO_3 ، با مقادیر کم‌تر عامل فوم‌ساز پیشنهادی و با زمان هم‌زدن کوتاه‌تر قابل حصول است. در مقاله‌ای دیگر بایاکووا و همکارانش [۱۰] به بررسی نقش عامل فوم‌ساز و فرایند تولید بر عملکرد مکانیکی فوم آلومینیومی پرداختند. در این مقاله از روش ذوبی با عوامل فوم‌ساز CaCO_3 و TiH_2 به همراه عامل پایدارساز کلسیم در زمینه آلومینیوم خالص و آلیاژهای AA356، 6061، 5356 و 7075 استفاده شد. از این پژوهش مشخص شد که ترد شدن ساختار سلولی به دلیل تشکیل رسوبات Al_3Ti ، ترکیبات حاصل از واکنش ناقص TiH_2 ، ترکیبات حاوی کلسیم و ایجاد مناطق یوتکتیک رخ می‌دهد. علاوه بر این یافته‌های پژوهش فوق با نظریه‌های متداول ارائه شده برای عملکرد مکانیکی فوم‌های آلومینیومی تطابق داشت. از میان مقالات مرور شده فوق تعداد معدودی از ذرات SiC به منظور پایدارسازی مذاب و افزایش گرانیروی استفاده نموده‌اند. استفاده از این ذرات سرامیکی علاوه بر افزایش گرانیروی و پایدار نمودن دیواره‌های تشکیل می‌شود و به تبع آن تسهیل فرایند فوم‌سازی، به سبب ایجاد زمینه کامپوزیتی در بهبود خواص مکانیکی فوم تولیدی نیز نقش اساسی دارد. هم‌چنین در اکثر پژوهش‌ها از TiH_2 و سایر ترکیبات هیدریدی به‌عنوان عامل فوم‌ساز استفاده شده است. برخی از مشکلات استفاده از ترکیبات هیدریدی و به خصوص هیدرید تیتانیوم به‌عنوان عامل فوم‌ساز قیمت بالای آن و نیز ترد نمودن ساختار در اثر تولید هیدروژن و هم‌چنین پایین بودن دمای تجزیه و به تبع آن واکنش بسیار سریع آن در مذاب آلومینیوم است. در تحقیقات جدید از سایر عوامل فوم‌ساز ارزان نظیر کربنات‌ها به خصوص CaCO_3 یا نیترات‌ها با دمای تجزیه

بالا و در محدوده مناسب برای آلیاژهای آلومینیوم نیز استفاده شده است [۲].

در این پژوهش فوم‌های کامپوزیتی زمینه آلومینیومی با مقادیر مختلف از ذرات SiC به‌عنوان عامل تقویت‌کننده و پایدارساز و پودر CaCO_3 به‌عنوان عامل فوم‌ساز با استفاده از روش فوم‌سازی مستقیم مذاب تولید شد. پس از آن ریزساختار و خواص فشاری فوم‌های کامپوزیتی AA356/SiC_p تولید شد و ارتباط بین تنش مسطح، چگالی، درصد وزنی CaCO_3 و کسر حجمی ذرات SiC با قطر متوسط ثابت، مورد بررسی قرار گرفت.

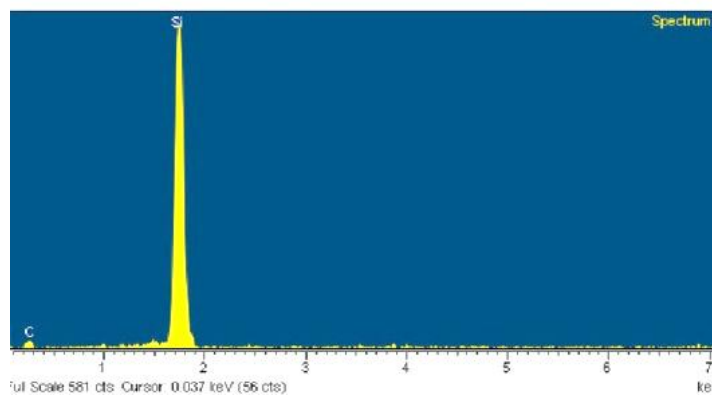
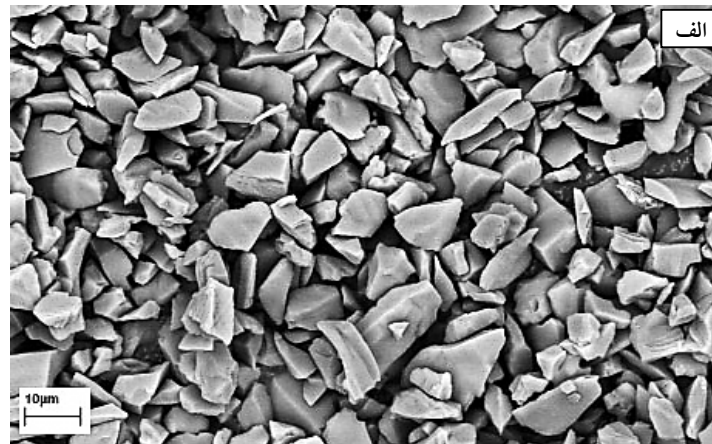
۲- مواد و روش‌ها

به منظور تولید فوم کامپوزیتی زمینه آلومینیومی از روش ذوبی با استفاده از عامل فوم‌ساز کلسیم کربنات (CaCO_3) و عامل پایدارساز کاربید سیلیسیوم (SiC) با زمینه از جنس آلیاژ آلومینیوم AA356.0 (AA 356.0) AlSi7Mg استفاده شد. دلیل استفاده از آلیاژ آلومینیوم اشاره شده وجود عنصر سیلیسیوم در ترکیب آن و در نتیجه خواص سیلان و ذوب‌ریزی مطلوب و نیز وجود منیزیم در راستای افزایش قدرت ترکنندگی مذاب، است. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در این پژوهش در مقایسه با استاندارد، در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

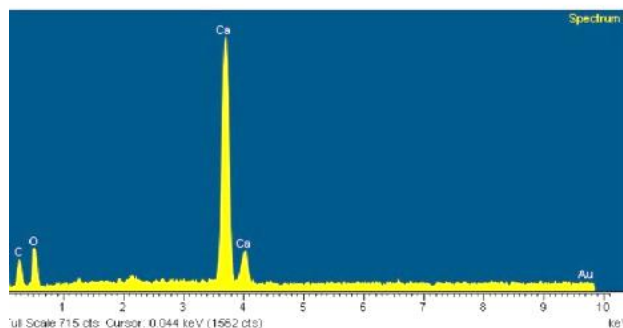
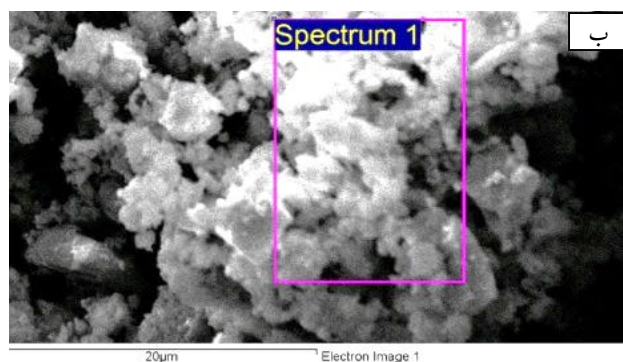
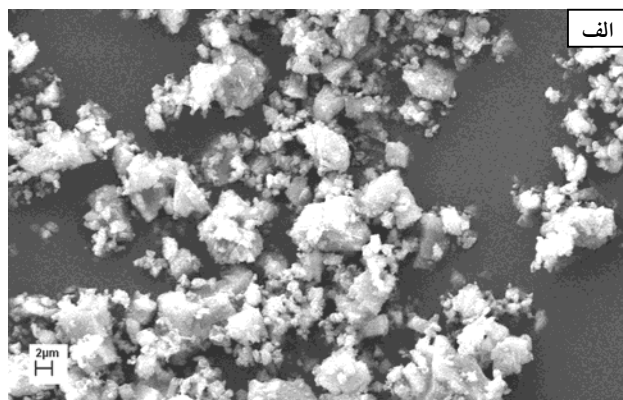
ذرات SiC مورد استفاده در این مطالعه محصول شرکت کاربوراندوم آلمان با اندازه متوسط در حدود ۱۰ میکرومتر، مورفولوژی گوشه‌دار و خلوص ۹۸ درصد بود. تصویر میکروسکوپی الکترونی رویشی از ذرات SiC مورد استفاده به همراه آزمون طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS) این ذرات به ترتیب در شکل‌های ۱-الف و ۱-ب قابل مشاهده است. هم‌چنین در بررسی حاضر از پودر CaCO_3 با اندازه متوسط حدود ۵ میکرومتر و خلوص ۹۹/۵ درصد استفاده شد. تصویر میکروسکوپی الکترونی رویشی به همراه آزمون EDS پودر CaCO_3 مورد استفاده به ترتیب در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب قابل مشاهده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی برحسب درصد وزنی برای آلیاژ مورد استفاده در مقایسه با ترکیب استاندارد AA 356.0

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
شمش مورد استفاده	۶/۸۱	۰/۱۹	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۳۵	۰/۰۲	۰/۰۷
AA 356.0	۶/۵-۷/۵	<۰/۲۰	<۰/۲۰	<۰/۱۰	۰/۲۵-۰/۴۵	<۰/۱۰	<۰/۲۰



شکل ۱- الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و ب) نمودار طیفسنجی پراکندگی انرژی از ذرات SiC



شکل ۲- الف) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و ب) طیف‌سنجی پراکندگی انرژی از پودر CaCO_3

۲-۲-۱ فرایند تولید فوم کامپوزیتی به روش ذوبی با کمک عامل فوم‌ساز CaCO_3 شامل مراحل اولیه است که در ادامه ارائه شده است.

۲ ساعت در دمای 650°C درجه سانتی‌گراد و خنک کردن در دمای محیط است [۱۱، ۱۲].

۲-۲-۲ تولید شمش کامپوزیتی AA356/SiC_p با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی

۲-۲-۱- عملیات آماده‌سازی ذرات SiC به منظور افزایش ترشوندگی ذرات SiC توسط مذاب، این ذرات تحت فرایند آماده‌سازی حرارتی قرار گرفت. این فرایند شامل حرارت دادن به مدت ۱ ساعت در دمای 950°C درجه سانتی‌گراد و خنک کردن در داخل کوره و مجدداً حرارت دادن به مدت

در این مرحله ابتدا مذاب آلیاژ آلومینیوم AA356 در دمای $690-670^\circ\text{C}$ درجه سانتی‌گراد آماده و توسط سیستم هم‌زن با سرعت تقریبی 900 دور بر دقیقه هم زده شد. با افزودن ۲

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۵، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵

درصد وزنی آلیاژ منیزیم-آلومینیوم (۵۰ درصد آلومینیوم و ۵۰ درصد منیزیم) قدرت ترکندگی مذاب افزایش یافت و ذرات SiC در مقادیر ۳، ۶ و ۱۰ درصد حجمی (معادل ۳/۵، ۷ و ۱۱/۶ درصد وزنی)، طی مدت زمان ۲۰ دقیقه و به صورت تدریجی وارد مذاب در حال اغتشاش شد. پس از آن مذاب کامپوزیتی به داخل قالب‌های شمش تخلیه و منجمد شد. شکل ۳ مراحل تولید شمش کامپوزیتی را نشان می‌دهد [۱۲].

۲-۳- عملیات آماده‌سازی پودر CaCO_3

به منظور افزایش قدرت تجزیه ذرات CaCO_3 و توزیع مناسب آن در داخل مذاب، این ذرات تحت فرایند آماده‌سازی حرارتی و خشک کردن قرار گرفت. حرارت دادن به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و سرمایش در دمای محیط صورت می‌گیرد. منحنی‌های مربوط به آزمون وزن‌سنجی حرارتی (TGA) و نوع مشتقی آن (DrTGA) انجام شده بر روی پودر CaCO_3 عملیات شده که به ترتیب معیار تعیین دمای شروع و دمای بالاترین نرخ تجزیه در فرایند فوم‌سازی را مشخص می‌نماید، در شکل ۴ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۴-الف، دمای شروع واکنش با رسم مماس بر منحنی حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و با توجه به نمودار ۴-ب این شکل، دمای بالاترین نرخ تجزیه در حدود ۷۶۹ درجه سانتی‌گراد است [۱۲، ۱۱].

۲-۴- تولید فوم کامپوزیتی AA356/SiC_p به کمک عامل

فوم‌ساز CaCO_3

در این مرحله با توجه به نتایج آزمون TGA ذوب مجدد شمش کامپوزیتی در محدوده دمایی ۷۱۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و در داخل قالب فلزی صورت گرفت و هم‌زمان عمل هم‌زدن مذاب با سرعت ۹۰۰ دور بر دقیقه بر روی مذاب انجام پذیرفت. در این وضعیت پودر کلسیم کربنات (CaCO_3) به عنوان عامل فوم‌ساز با مقادیر ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی و در داخل فویل‌های آلومینیومی طی مدت زمان کوتاه یک دقیقه وارد مذاب در حال

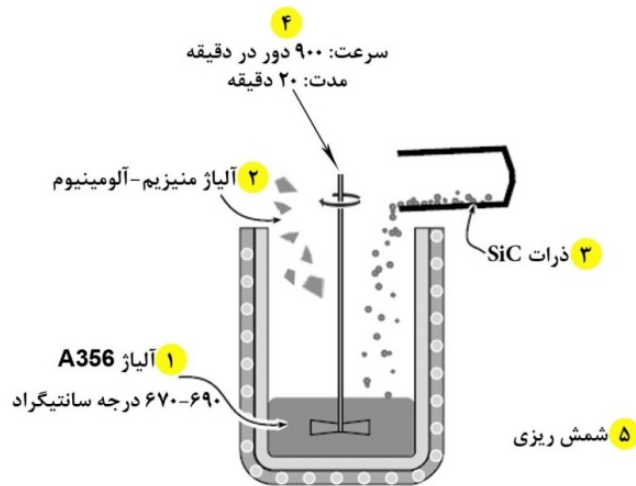
اغتشاش شد. بلافاصله عمل فوم‌شدن شروع و با خروج هم‌زن از داخل قالب تکمیل شد. قالب از داخل کوره خارج و محصول متخلخل داخل آن در دمای محیط سرد و منجمد شد. شکل ۵ مراحل تولید فوم کامپوزیتی زمینه آلومینیومی را نشان می‌دهد [۱۱، ۱۲].

با توجه به مراحل تولید فوم کامپوزیتی به روش ذوبی با استفاده از عامل فوم‌ساز کلسیم کربنات تعداد ۹ نمونه محصول فومی با مشخصات جدول ۲ تولید و توسط اهر نواری به ابعاد مورد نظر برش خورد و در نهایت مورد بررسی ریزساختاری و خواص مکانیکی فشاری قرار گرفت.

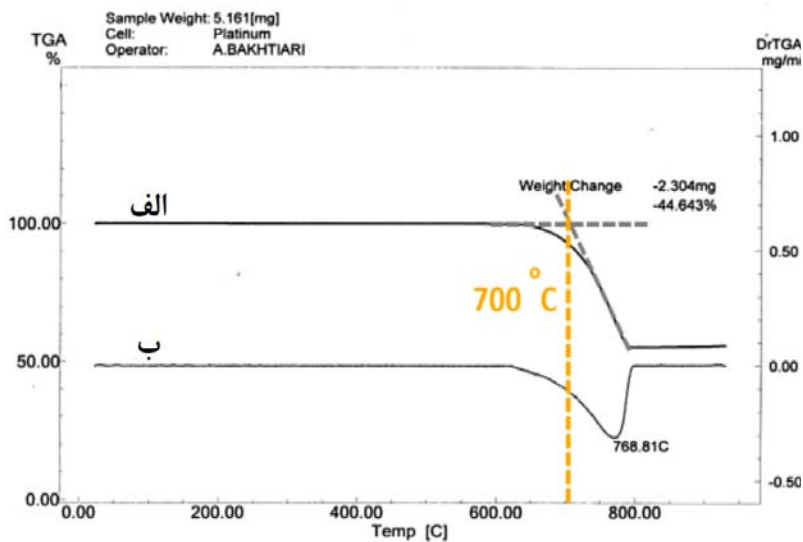
برای اندازه‌گیری چگالی (ρ) بلوک‌های فومی برش خورده، ابتدا ابعاد آن توسط یک کولیس با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و از روی این ابعاد، حجم بلوک محاسبه شد. پس از آن با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم، وزن محصولات فومی اندازه‌گیری و با تقسیم وزن به حجم، چگالی محصولات در گستره خطای $\pm 0/03$ گرم بر سانتی‌متر مکعب محاسبه شد. چگالی نسبی محصولات فومی (ρ/ρ_s) نیز از تقسیم چگالی فوم (ρ) بر چگالی توده ماده (ρ_s) حاصل شد. مقدار تقریبی چگالی توده برابر با ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری درصد تخلخل (P) کافی است مطابق با رابطه ۱، مقدار چگالی نسبی از عدد یک کم و حاصل در عدد ۱۰۰ ضرب شود.

$$P = (1 - \frac{\rho}{\rho_s}) \times 100 \quad (1)$$

با استفاده از میکروسکوپ نوری بازتابی مدل Olympus PM3 چگونگی توزیع ذرات SiC در داخل شمش کامپوزیتی AA356/SiC_p تولیدی و کیفیت توزیع حفرات در فوم کامپوزیتی نهایی مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، برای هر نمونه از سه مقطع مشخص تصویربرداری توسط اسکنر نوری در بزرگ‌نمایی پایین انجام گرفت و اندازه متوسط حفرات از طریق ارزیابی تصاویر توسط نرم‌افزار MIP محاسبه و میانگین آن گزارش شد. توزیع ذرات SiC در دیواره‌های فوم تولیدی نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی



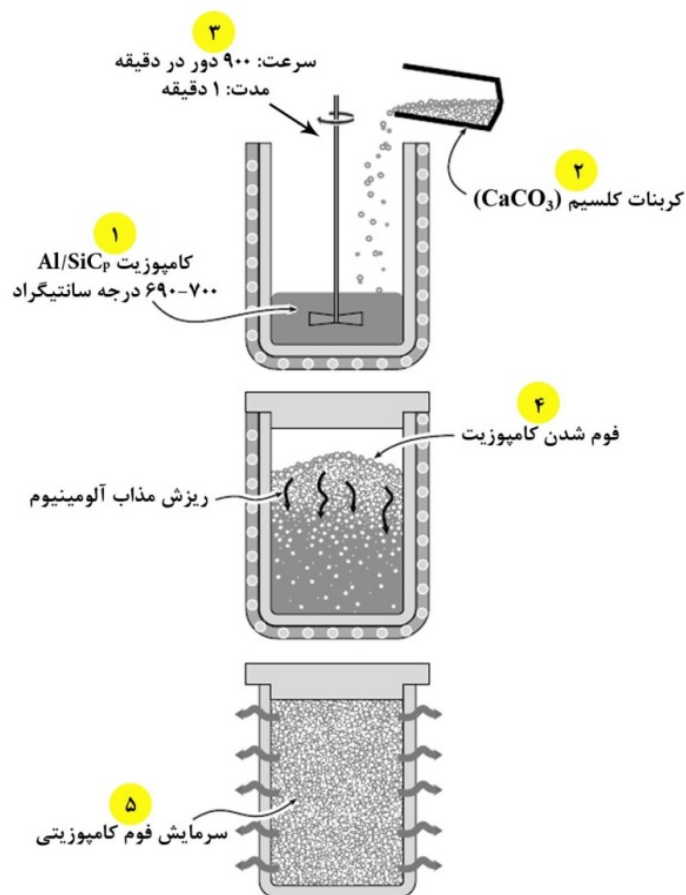
شکل ۳- مراحل تولید کامپوزیت شامل: (۱) ذوب آلیاژ در دمای مناسب، (۲) افزودن آلیاژ منیزیم-آلومینیوم برای افزایش قدرت ترکنندگی مذاب، (۳) افزودن ذرات SiC، (۴) هم‌زدن مخلوط و (۵) شمش ریزی و تهیه شمش کامپوزیتی



شکل ۴- منحنی الف) تغییر وزن و ب) نرخ تغییر وزن حاصل از آزمون TGA بر روی پودر CaCO_3 پس از عملیات حرارتی

دستیابی به خواص مکانیکی آن نظیر تنش تسلیم، مدول الاستیک، تنش مسطح، کرنش تراکم و میزان جذب انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطابق با استاندارد، نمونه‌های فوم مورد استفاده برای آزمون فشار به صورت مکعبی یا استوانه‌ای باید در هر بُعد خود حداقل شش تا هفت سلول را شامل شوند تا از اثر اندازه در نتایج آزمون ممانعت شود [۱-۳].

روشنی مدل LEO 1450VP (35 kV) بررسی شد. بررسی خواص مکانیکی فشاری محصولات فومی تولیدی با استفاده از دستگاه آزمون کشش و فشار مدل Zwick Z250 و با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفت. آزمون فشار تک محوری به‌عنوان آزمونی متداول در بررسی خواص مکانیکی فوم‌های فلزی برای بررسی محصول فومی تولیدی و



شکل ۵- مراحل تولید فوم کامپوزیتی زمینه آلومینیومی شامل: (۱) ذوب کامپوزیت حاصل از مرحله قبل در دمای مناسب، (۲) افزودن عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم، (۳) هم‌زدن مخلوط، (۴) فوم شدن مذاب کامپوزیتی و (۵) انجماد مذاب و ایجاد فوم جامد

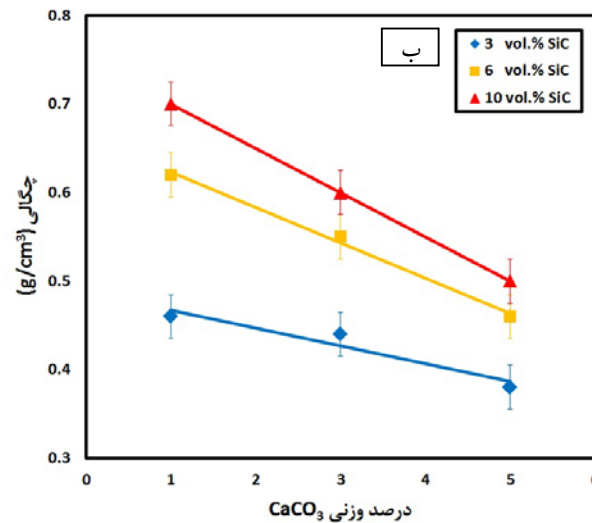
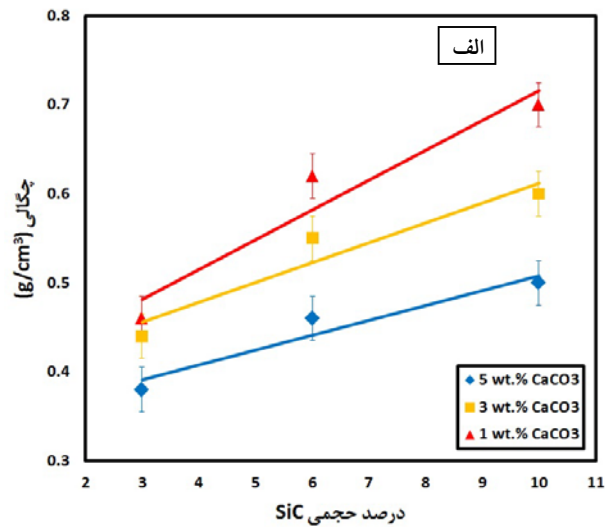
۳- نتایج و بحث

۳-۱- چگالی و درصد تخلخل

نتایج حاصل از اندازه‌گیری چگالی و محاسبه چگالی نسبی و درصد تخلخل، در جدول ۴ قابل مشاهده است. طبق رابطه ۱، افزایش چگالی و یا چگالی نسبی به معنی کاهش درصد تخلخل است. با توجه به این جدول و شکل ۶- الف مشخص است که با افزایش میزان عامل پایدارساز SiC در یک مقدار مشخص از عامل فوم‌ساز CaCO_3 ، چگالی فوم تولیدی افزایش می‌یابد. فوشنگ و همکارانش [۵] نشان دادند که در تولید فوم آلومینیومی به‌روش ذوبی، پایدارسازی و ضخیم نمودن دیواره حباب‌های شکل می‌گیرد و به‌عبارت دیگر افزایش گرانشی

جدول ۲- مشخصات محصولات فومی تولیدی

کد نمونه	میزان SiC (درصد حجمی)	میزان CaCO_3 (درصد وزنی)
۱	۳	۱
۲	۳	۳
۳	۳	۵
۴	۶	۱
۵	۶	۳
۶	۶	۵
۷	۱۰	۱
۸	۱۰	۳
۹	۱۰	۵



شکل ۶- الف) تأثیر مقدار عامل پایدارساز SiC و ب) تأثیر مقدار عامل فوم‌ساز CaCO₃ بر چگالی فوم تولیدی

$$P_n > P_a + P_h + P_c \quad (2)$$

در این رابطه P_n فشار داخل حباب، P_a فشار اتمسفر، P_h فشار هیدرواستاتیکی مذاب در عمق h از سطح مذاب و P_c فشار اضافی ناشی از کشش سطحی مذاب است. برای آلومینیوم و اغلب آلیاژهای آن معمولاً روند تغییرات کشش سطحی همانند تغییرات گرانیوی مذاب است. در صورتی که گرانیوی مذاب زیاد باشد، جوانه‌زنی و رشد حباب مشکل می‌شود و به این ترتیب محصول فومی با اندازه کوچک‌تر سلول‌ها، دیواره‌های

مذاب به منظور ممانعت از شناور شدن گاز رها شده از عامل فوم‌ساز، امری ضروری است. آن‌ها مشخص نمودند که رابطه مستقیمی بین گرانیوی مذاب و چگالی فوم تولیدی وجود دارد و لذا با افزایش میزان عامل پایدارساز، گرانیوی مذاب و به تبع آن چگالی محصول فومی نهایی افزایش می‌یابد. طبق رابطه ۲، هر حبابی برای تشکیل و رشد در داخل مذاب، باید دارای فشار گاز بالاتر از مجموع فشار اتمسفر، فشار هیدرواستاتیکی مذاب و کشش سطحی باشد:

جدول ۳- چگالی، چگالی نسبی و درصد تخلخل محصولات فومی تولیدی

کد نمونه	میزان SiC (درصد حجمی)	میزان CaCO ₃ (درصد وزنی)	چگالی (g/cm ³)	چگالی نسبی (ρ/ρ _s)	درصد تخلخل (%)
۱	۳	۱	۰/۴۶	۰/۱۷	۸۳
۲	۳	۳	۰/۴۴	۰/۱۶	۸۴
۳	۳	۵	۰/۳۸	۰/۱۴	۸۶
۴	۶	۱	۰/۶۲	۰/۲۳	۷۷
۵	۶	۳	۰/۵۵	۰/۲۰	۸۰
۶	۶	۵	۰/۴۶	۰/۱۷	۸۳
۷	۱۰	۱	۰/۷۰	۰/۲۵	۷۵
۸	۱۰	۳	۰/۶۰	۰/۲۲	۷۸
۹	۱۰	۵	۰/۵۰	۰/۱۸	۸۲

حجمی کلسیم کربنات (f_{CaCO₃(V)}) به معنای افزایش کسر حجمی گاز تولیدی (f_G) و به تبع آن افزایش تخلخل موجود در ساختار و در نتیجه کاهش چگالی محصول فومی است [۱۱].

۳-۲- ریزساختار فوم کامپوزیتی AA 356/SiC_p

شکل ۷ تصویر اسکن نوری در بزرگ‌نمایی پایین از ساختار ماکروسکوپی و کیفیت توزیع حفرات در محصولات فوم کامپوزیتی AA 356/SiC_p با توجه به مقدار ذرات SiC و CaCO₃ به همراه مقادیر تقریبی اندازه متوسط حفرات (D_m) که از طریق ارزیابی تصویر و به وسیله نرم‌افزار محاسبه شده است را نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش میزان ذرات SiC و به تبع آن ارتقای عملکرد پایدارسازی، ضخامت دیواره‌ها و در نتیجه چگالی افزایش و اندازه متوسط حفرات کاهش می‌یابد و از ریزش دیواره‌ها و به هم پیوستن تخلخل‌ها که در مقادیر کم‌تر ذرات پایدارساز مشهود است، ممانعت به عمل می‌آید. به‌عنوان نمونه افزایش SiC از ۳ تا ۱۰ درصد حجمی در مقدار ثابت ۱ درصد وزنی CaCO₃، مطابق با داده‌های جدول ۳ سبب افزایش ۵۲ درصدی در چگالی می‌شود و کاهش ۵۴ درصدی از ۴/۱ تا ۱/۹ میلی‌متر را در اندازه متوسط حفرات به دنبال خواهد داشت. از سوی دیگر با افزایش مقدار CaCO₃ به‌عنوان

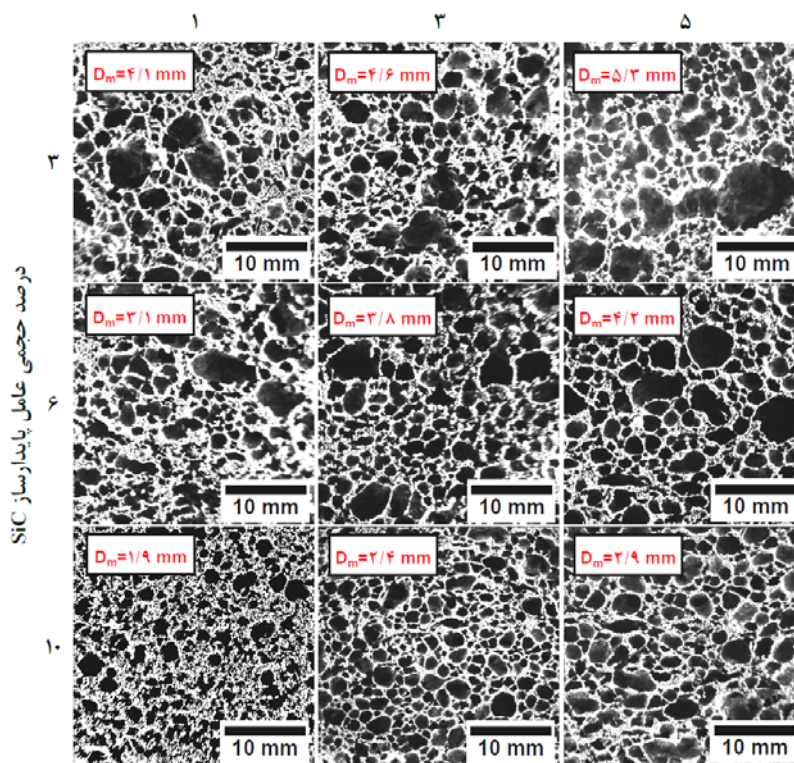
ضخیم‌تر و چگالی بالاتر حاصل می‌شود. به عکس اگر حباب به راحتی رشد نماید، اندازه سلول‌ها افزایش و چگالی محصول کاهش می‌یابد [۵].

از سوی دیگر داده‌های جدول ۳ و شکل ۶- ب نشان می‌دهند که با افزایش میزان CaCO₃ در یک مقدار مشخص از عامل پایدارساز SiC، به سبب تولید حباب‌های گازی بیش‌تر، درصد تخلخل فوم افزایش و مطابق با رابطه ۱ چگالی محصول تولیدی کاهش می‌یابد. گرگلی و همکارانش [۱۱] با ارائه رابطه ترمودینامیکی ۳ نشان دادند که افزایش کسر حجمی پودر CaCO₃ در داخل مذاب سبب افزایش میزان گاز تولیدی می‌شود.

$$f_{CaCO_3(C)} = \frac{p f_G M_{CaCO_3}}{R T f_L f_{CaCO_3(V)} \rho_{CaCO_3(V)}} \quad (3)$$

در این رابطه، f_{CaCO₃(C)} کسر کلسیم کربنات تجزیه شده، p فشار گاز داخل حباب‌ها، f_G کسر حجمی گاز تولیدی در داخل مذاب، M_{CaCO₃} جرم حجمی کربنات کلسیم، R ثابت گازها، T دمای فوم‌سازی، f_L کسر حجمی مذاب، f_{CaCO₃(V)} کسر حجمی کلسیم کربنات اضافه شده به مذاب و ρ_{CaCO₃} چگالی کلسیم کربنات است. مشخص است که در شرایط یکسان و کسر کلسیم کربنات تجزیه شده ثابت (f_{CaCO₃(C)})، افزایش کسر

درصد وزنی عامل فوم ساز CaCO_3



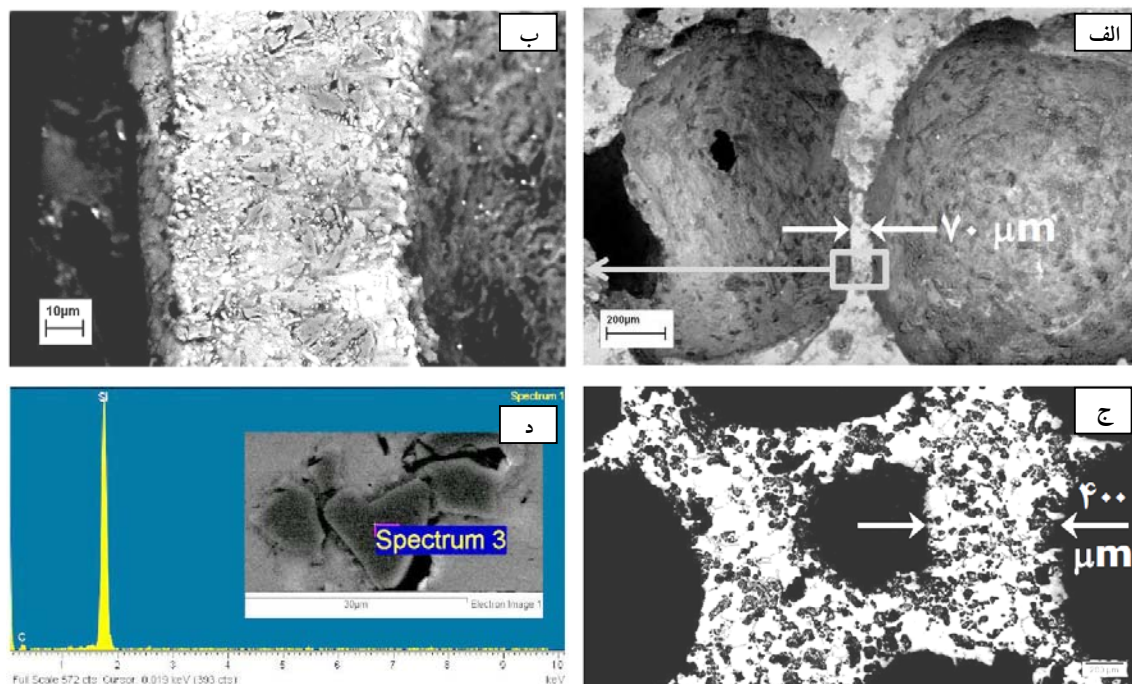
شکل ۷- تصاویر اسکن نوری از ساختار و کیفیت توزیع حفرات و اندازه آن‌ها در محصولات فومی

تشکیل مقادیر زیاد از اکسیدهای فلزی شامل MgO ، Al_2O_3 و MgAl_2O_4 در سطح حباب‌ها و در نتیجه ممانعت از رشد آن‌ها عنوان نمودند. در مقادیر بحرانی از عامل فوم‌ساز به سبب تشکیل لایه‌های اکسیدی ضخیم بر روی دیواره‌ها، به جای رشد سلول‌ها، پارگی و به هم پیوستن آن‌ها رخ می‌دهد. در عین حال شکل‌گیری اکسیدهای فلزی اشاره شده سبب پایدارسازی مضاعف علاوه بر پایدارسازی ناشی از به کارگیری ذرات سرامیکی در فرایند تولید فوم با عامل فوم‌ساز کلسیم کربنات می‌شود.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) از ریزساختار سطح پولیش شده محصول فوم کامپوزیتی با چگالی ۰/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب حاوی ۱۰ درصد حجمی ذرات SiC در شکل ۸- الف و ۸- ب به ترتیب در بزرگ‌نمایی‌های پایین و بالا قابل مشاهده است. در این تصاویر حداقل ضخامت دیواره به میزان تقریبی ۷۰ میکرومتر (شکل ۸- الف) و توزیع تقریباً

عامل فوم‌ساز و به دنبال آن کاهش چگالی، اندازه متوسط حفرات افزایش و ضخامت دیواره‌ها کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در مقدار ثابت ۱۰ درصد حجمی از ذرات SiC، افزایش مقدار CaCO_3 از ۱ تا ۵ درصد وزنی و به تبع آن کاهش ۲۸/۵ درصدی در چگالی (مطابق با داده‌های جدول ۳)، اندازه متوسط حفرات افزایش ۵۳ درصدی دارد و از ۱/۹ به ۲/۹ میلی‌متر می‌رسد [۵، ۱۱].

فوشنگ و همکارانش [۵] نشان دادند که کاهش چگالی فوم تولیدی در اثر افزودن مقادیر بیش‌تر از عامل فوم‌ساز به مذاب، با افزایش اندازه سلول‌ها و کاهش ضخامت دیواره‌ها همراه است. از سوی دیگر و در پژوهشی مشابه گرگلی و همکارانش [۱۱] مشخص نمودند که این افزایش اندازه سلول‌ها در محتوای بالاتر از عامل فوم‌ساز کلسیم کربنات کند و کندتر می‌شود. آن‌ها دلیل این امر را افزایش میزان گاز CO_2 ناشی از تجزیه و واکنش بیش‌تر آن‌ها با فلزات محلول در آلیاژ و



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از الف) ضخامت دیواره‌ها، ب) توزیع ذرات SiC در دیواره‌های نازک، ج) تصویر میکروسکوپ نوری از توزیع ذرات SiC در دیواره‌های ضخیم از سطح پولیش شده محصول فومی با چگالی ۰/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب حاوی ۱۰ درصد حجمی ذرات SiC و د) آزمون طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS) ذرات SiC توزیع شده در زمینه

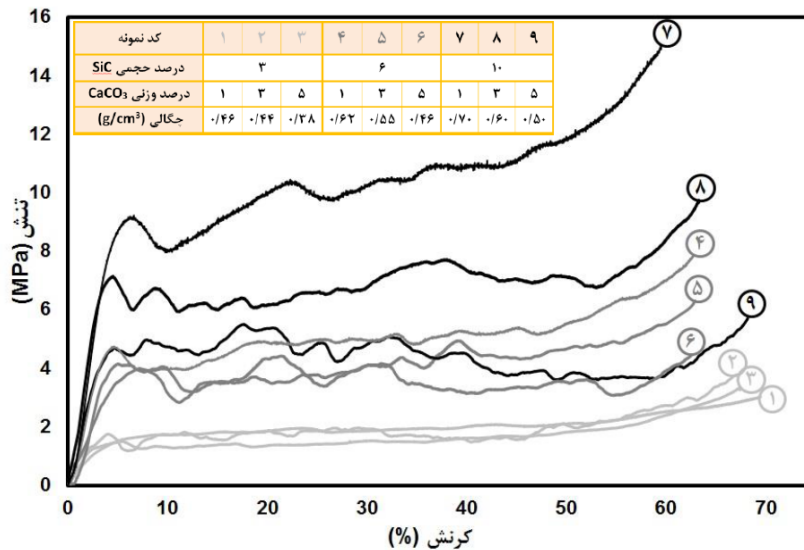
افزایش چگالی افزایش می‌یابد، چرا که استحکام ماده سازنده دیواره‌های سلول‌ها افزایش یافته است. ذرات سرامیکی SiC توزیع شده در دیواره سلول‌ها (شکل ۸) تنش فشاری اعمالی را تا رسیدن به منطقه تنش مسطح و شرایط تسلیم تحمل می‌نماید. پس از آن و با رسیدن تنش به حد بحرانی، شکست در فصل مشترک ذرات و زمینه و یا شکست در خود ذرات رخ می‌دهد و منطقه تنش مسطح با تخریب دیواره‌های سلولی آغاز و به شکل دندان‌های ادامه می‌یابد [۱۳].

در بارگذاری فشاری تمامی انواع فوم‌های سلول‌بسته به دلیل مورفولوژی سلولی، توزیع کرنش غیریکنواخت است و کرنش تمایل به موضعی شدن در لایه‌های نازک را دارد که این امر بسته به نرمی یا تردی ساختار به کماتش و یا پاره شدن دیواره‌های سلول‌ها منجر می‌شود. نقطه شروع تغییر شکل پلاستیک بستگی به ساختار سلولی دارد، اما عموماً تغییر شکل در سطح تماس با سطح بارگذاری آغاز می‌شود و لایه به لایه

یکنواخت ذرات SiC در ضخامت دیواره‌های نازک (شکل ۸-ب) و دیواره‌های ضخیم با ضخامت تقریبی ۴۰۰ میکرومتر (شکل ۸-ج) و به تبع آن عملکرد پایدارسازی و حفظ ساختار دیواره، مطابق با یافته‌های فوشنگ و همکارانش [۵] که در بخش قبل ذکر شد، مشخص است. آزمون EDS از ذرات SiC توزیع شده در زمینه فوم کامپوزیتی مذکور نیز در شکل ۸-د قابل مشاهده است.

۳-۳- خواص مکانیکی فشاری فوم کامپوزیتی AA 356/SiC_p
 منحنی‌های تنش-کرنش فشاری فوم‌های کامپوزیتی تولیدی با مقادیر چگالی و محتوای ذرات SiC متفاوت در شکل ۹ مشاهده می‌شود. از این منحنی‌ها و با توجه به کد نمونه‌ها در جدول ۳، مشخص است که رفتار فشاری تابعی از چگالی و مقدار ذرات SiC محصولات است.

با توجه به شکل ۹ سطح تنش در منطقه تنش مسطح با



شکل ۹- منحنی تنش- کرنش فشاری نمونه‌های فوم کامپوزیتی تولیدی با توجه به کد نمونه

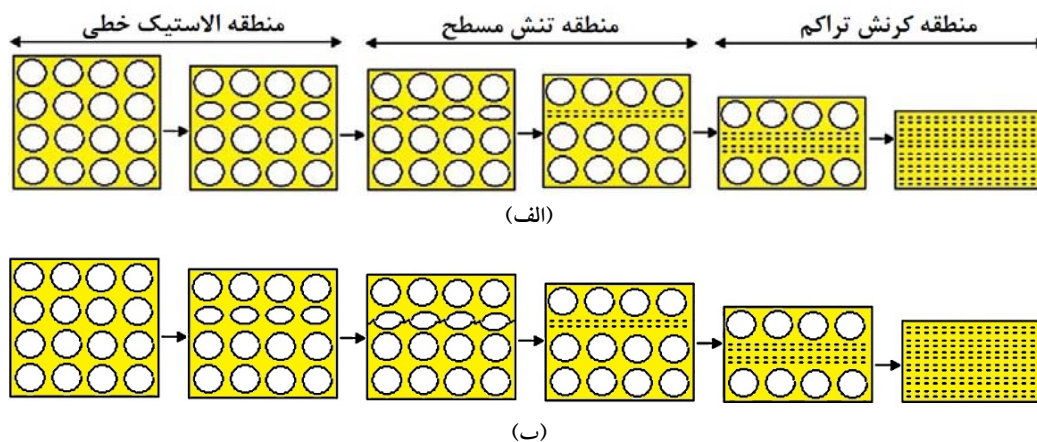
افزایش کرنش فشاری و له شدن دیواره‌های گسسته شده روی یکدیگر، سطح تنش مجدداً ارتقا می‌یابد. در ادامه اعمال نیروی فشاری، این چرخه برای سایر دیواره‌های سلولی نیز تکرار می‌شود و شکل دندان‌های منحنی ایجاد می‌شود. پس از تخریب آخرین لایه‌های سلولی، در منحنی تنش-کرنش و در امتداد منطقه تراکم، سطوح داخلی سلول‌های تخریب شده به هم می‌رسند، فوم بیش از پیش متراکم می‌شود و سطح تنش افزایش می‌یابد [۳، ۱۵-۱۸].

مقادیر تنش مسطح، کرنش تراکم و ظرفیت جذب انرژی فشاری محصولات فومی تولیدی به شرح مندرج در فصل روش پژوهش و با توجه به استانداردهای JIS H 7902 و DIN 50134 از روی منحنی‌های تنش-کرنش فشاری حاصل از آزمون فشار تک‌محوری، استخراج و در جدول ۴ گزارش شده است.

با توجه به داده‌های جدول ۴ و شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ به ترتیب تأثیر محتوای ذرات SiC، درصد وزنی پودر CaCO₃ مصرفی به‌عنوان عامل فوم‌ساز و چگالی را بر تنش مسطح و میزان جذب انرژی محصولات فومی نشان می‌دهند. از شکل ۱۱- الف و ۱۱- ب مشخص است که با افزایش

توسعه می‌یابد [۱۴].

ساختارهای فومی بر اساس خواص مکانیکی به سه دسته الاستیک، پلاستیک و ترد تقسیم‌بندی می‌شوند. در این میان فوم‌های آلومینیومی بدون وجود ذرات ترد سرامیکی یا با مقادیر اندک از این ذرات، غالباً رفتار پلاستیک با منطقه تنش مسطح یکنواخت و صاف دارند که این پدیده ناشی از تغییر شکل پلاستیک و نرم دیواره‌های سلولی به صورت موضعی و لایه‌لایه تحت تأثیر تنش وارده به فوم است که در شکل ۱۰- الف به صورت شماتیک نمایش داده شده است. از سوی دیگر فوم‌های آلومینیومی حاوی مقادیر بالا از ذرات سرامیکی، رفتاری مشابه با فوم‌های ترد از خود نشان می‌دهند و دارای منحنی تنش-کرنش فشاری با منطقه تنش مسطح دندان‌های می‌باشند که با افزایش میزان ذرات سرامیکی، این رفتار تشدید می‌شود. زمانی که تنش وارده به فوم به حداکثر مقدار خود برسد ورود به منطقه تنش مسطح آغاز می‌شود. مطابق با شکل ۱۰- ب با افزایش کرنش فشاری دیواره‌های سلول‌ها در یک لایه دچار ترک موضعی می‌شود و به صورت ناگهانی گسسته می‌شوند و به تبع آن تنش نیز به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. در این شرایط فضای بین این سلول‌ها کاهش و با



شکل ۱۰- تصاویر طرحواره‌ای از تغییر شکل فشاری فوم‌های آلومینیومی الف) نرم و ب) ترد [۱۵]

جدول ۴- خواص فشاری محصولات فومی تولیدی

کد نمونه	میزان SiC (درصد حجمی)	میزان CaCO ₃ (درصد وزنی)	چگالی (g/cm ³)	تنش مسطح (MPa)	کرنش تراکم (%)	ظرفیت جذب انرژی (kJ/mm ³)
۱	۳	۱	۰/۴۶	۱/۸۸	۵۹	۰/۸۹
۲	۳	۳	۰/۴۴	۱/۸۵	۵۶	۰/۸۳
۳	۳	۵	۰/۳۸	۱/۴۱	۵۱	۰/۷۱
۴	۶	۱	۰/۶۲	۴/۹۱	۵۵	۲/۳۰
۵	۶	۳	۰/۵۵	۳/۸۹	۵۶	۱/۹۱
۶	۶	۵	۰/۴۶	۳/۷۴	۶۲	۱/۷۲
۷	۱۰	۱	۰/۷۰	۱۰/۰۰	۵۵	۴/۷۵
۸	۱۰	۳	۰/۶۰	۶/۵۲	۶۰	۳/۲۶
۹	۱۰	۵	۰/۵۰	۴/۷۳	۶۹	۲/۲۰

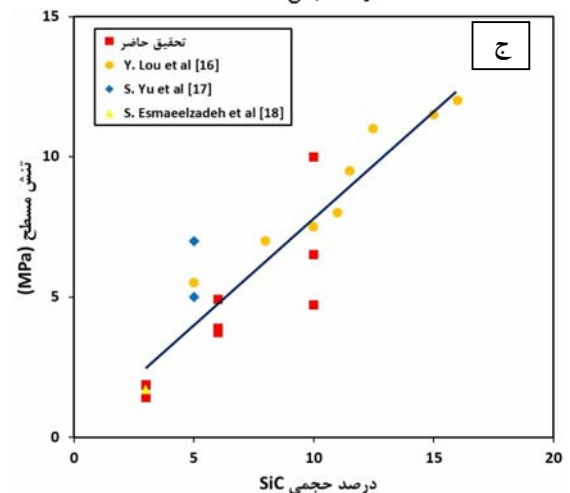
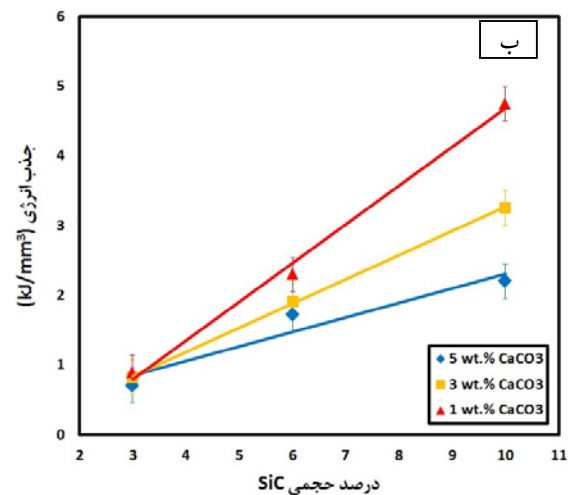
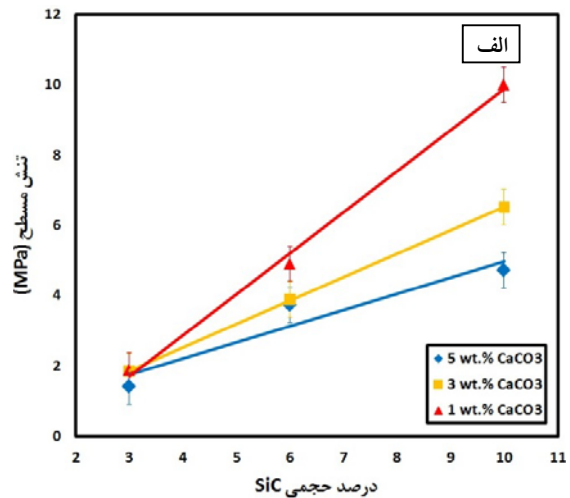
بالاتر) به دلیل تشکیل دیواره‌های ضخیم‌تر و تولید فوم با حداقل میزان به هم پیوستگی تخلخل‌ها و ریزش دیواره‌ها حین تولید، با شیب بیش‌تری صورت خواهد گرفت. مطابق با شکل ۱۱- ج ارتباط خطی و تطابق مطلوبی بین داده‌های حاصل از پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌ها مشاهده می‌شود [۵، ۱۶-۱۸].

شکل ۱۲- الف و ۱۲- ب نشان می‌دهد که با افزایش میزان عامل فوم‌ساز CaCO₃، به علت رشد بیش‌تر سلول‌ها و تشکیل

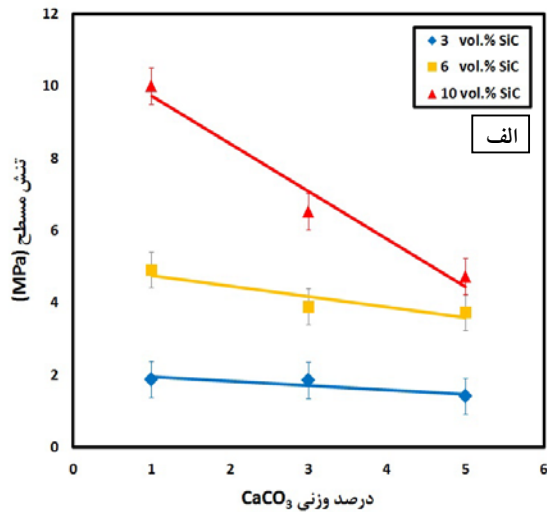
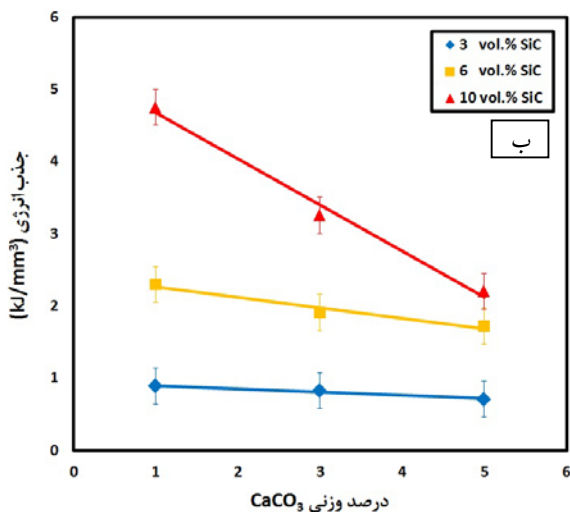
مقدار ذرات SiC به‌عنوان عامل تقویت‌کننده در زمینه و ارتقای عملکرد استحکام‌بخشی ذرات سرامیکی، تنش مسطح و ظرفیت جذب انرژی و به‌طور کلی عملکرد مکانیکی محصول فومی افزایش می‌یابد. علاوه بر این افزایش محتوای ذرات سرامیکی SiC سبب افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها می‌شود و به این ترتیب مقاومت در برابر نیروی فشاری اعمالی افزایش می‌یابد و دیواره‌ها در سطوح بالاتر تنش دچار شکست و پارگی می‌شوند. این افزایش در درصد‌های وزنی کم‌تر از CaCO₃ (چگالی

دیواره‌های نازک و افزایش احتمال پارگی آن‌ها و هم‌چنین ریزش مذاب و به تبع آن احتمال زیادتر برای ایجاد عیوب در محصولات فومی (شکل ۷)، خواص مکانیکی شامل تنش مسطح و ظرفیت جذب انرژی کاهش می‌یابد که این کاهش با افزایش مقدار ذرات SiC، با شیب تندتری صورت خواهد گرفت. این امر نشان‌دهنده وابستگی زیاد خواص مکانیکی به محتوای ذرات SiC به‌عنوان عامل تقویت‌کننده و استحکام‌زا در ساختار است [۷، ۱۹-۲۱].

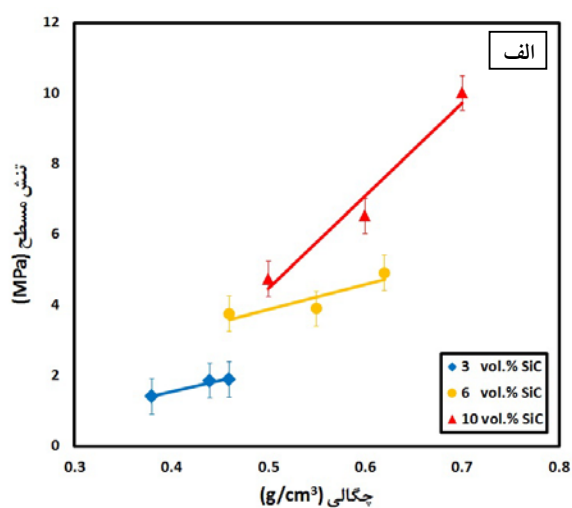
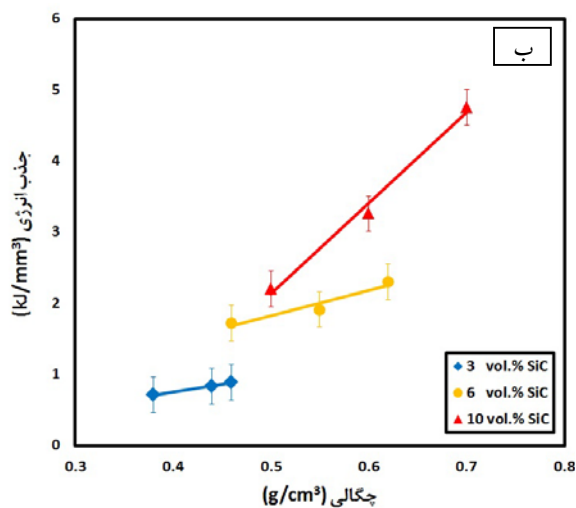
از شکل ۱۳ نیز مشخص است که با افزایش چگالی محصول و به تبع آن افزایش ضخامت دیواره‌ها، مقدار تنش مسطح و ظرفیت جذب انرژی افزایش می‌یابد که این افزایش به ترتیب برای نمونه‌های حاوی ۳، ۶ و ۱۰ درصد حجمی از ذرات SiC، شدید و شدیدتر خواهد شد. به‌عنوان مثال و با توجه به داده‌های جدول ۴، افزایش ۳۸ درصدی در چگالی (از ۰/۴۶ به ۰/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) برای محصولات فومی با ۶ درصد حجمی SiC، تنش مسطح و ظرفیت جذب انرژی را به ترتیب تنها به میزان ۳۱ و ۳۴ درصد افزایش می‌دهد در حالی که همین مقدار افزایش در چگالی (حدود ۴۰ درصد از چگالی ۰/۵ به ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) برای محصولات فومی با ۱۰ درصد حجمی ذرات SiC، سبب افزایش ۱۱۱ درصدی در تنش مسطح و افزایش ۱۱۶ درصدی در ظرفیت جذب انرژی می‌شود. دلیل این امر نیز همان‌گونه که ذکر شد اثر تقویت‌کنندگی و استحکام‌بخشی ذرات سرامیکی SiC در ساختار کامپوزیتی محصولات فومی تولیدی است. از سوی دیگر و با توجه به یافته‌های سایر پژوهشگران و داده‌های جدول ۴ ملاحظه می‌شود که با تغییر در میزان ذرات SiC و درصد وزنی CaCO₃ مورد استفاده در فرایند تولید فوم، تغییرات تقریباً اندکی در کرنش تراکم محصولات رخ می‌دهد. دلیل این امر این است که در محصولات فومی، کرنش تراکم بیش‌تر به ساختار ماکروسکوپی فوم و توزیع سلول‌ها وابسته است و کم‌تر از استحکام و خواص مکانیکی دیواره‌های سلولی تأثیر می‌پذیرد [۵، ۱۶].



شکل ۱۱- تأثیر درصد حجمی SiC بر الف) تنش مسطح، ب) میزان جذب انرژی محصولات فومی و ج) مقایسه داده‌های تنش مسطح در پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌ها



شکل ۱۲- تأثیر درصد وزنی CaCO₃ (عامل فومساز) بر (الف) تنش مسطح و (ب) جذب انرژی محصولات فومی



شکل ۱۳- تأثیر چگالی بر (الف) تنش مسطح و (ب) میزان جذب انرژی محصولات فومی

متوسط ثابت، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به پژوهش

انجام شده می‌توان نتایج زیر را به‌طور خلاصه بیان نمود:

- با افزایش میزان عامل پایدارساز SiC، به دلیل مقاومت بیش‌تر مذاب در برابر رشد سلول‌ها و به تبع آن کاهش اندازه سلول‌ها و افزایش ضخامت دیواره‌ها، چگالی فوم تولیدی افزایش و با افزایش میزان CaCO₃، به سبب تولید حباب‌های گازی بیش‌تر و افزایش اندازه سلول‌ها، چگالی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش فوم‌های کامپوزیتی زمینه آلومینیومی با مقادیر مختلف از ذرات SiC به‌عنوان عامل تقویت‌کننده و پایدارساز و پودر CaCO₃ به‌عنوان عامل فومساز با استفاده از روش فوم‌سازی مستقیم مذاب تولید شد و ریزساختار و خواص فشاری فوم‌های AA356/SiC_p و ارتباط بین تنش مسطح، چگالی، درصد وزنی CaCO₃ و کسر حجمی ذرات SiC با قطر

محصول تولیدی کاهش خواهد یافت.

- با افزایش مقدار ذرات SiC به عنوان عامل تقویت کننده در زمینه، تنش مسطح و ظرفیت جذب انرژی و به طور کلی عملکرد مکانیکی محصول فومی افزایش می یابد.
- با افزایش میزان CaCO_3 ، به علت رشد بیش تر سلول ها و تشکیل دیواره های نازک و ریزش مذاب و به تبع آن احتمال زیاده تر ایجاد عیوب در محصولات فومی، تنش مسطح و ظرفیت جذب انرژی کاهش می یابد که این کاهش با افزایش مقدار ذرات SiC، با شیب تندتری صورت خواهد گرفت.
- با افزایش چگالی محصول فومی و به تبع آن افزایش ضخامت دیواره ها، مقدار تنش مسطح و ظرفیت جذب

انرژی افزایش می یابد اما تغییرات اندکی در کرنش تراکم محصولات رخ می دهد.

۵- قدردانی

نویسندگان این مقاله از کارشناس محترم آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد جناب آقای مهندس جعفری برای انجام آزمون های مکانیکی و کارشناس محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد سرکار خانم مهندس هوشیارصادقیان به جهت انجام میکروسکوپی الکترونی روبشی، تشکر و قدردانی می نمایند.

مراجع

1. Ashby, M.F., Evans, A., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., and Wadley, H.N.G., "Metal Foams-A Design Guide", Butterworth-Heinemann, London, 2000.
2. Banhart, J., "Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metallic Foams", *Progress in Material Science*, Vol. 46, pp. 559-632, 2001.
3. Degischer, H.P., and Kriszt, B., "Handbook of cellular metals", Weinheim, Wiley-VCH, 2002.
4. Nakamura, T., Gnyloskurenko, S., Sakamoto, K., Byakova, A.V., and Ishikawa, R., "Development of New Foaming Agent for Metal Foam", *Materials Transactions*, Vol. 43, pp. 1191-1196, 2002.
5. Fusheng, H., Jianing, W., Hefa, C., and Junchang, G., "Effects of Process Parameters and Alloy Compositions on the Pore Structure of Foamed Aluminum", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 138, pp. 505-507, 2003.
6. Song, Z., and Nutt, S.R., "Rheology of Foaming Aluminum Melts", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 458, pp. 108-115, 2007.
7. Da-wu, L., Jie, L., Tao, L., Ting, S., Xiao-ming, Z., and Guang-chun, Y., "Preparation and Characterization of Aluminum Foams with ZrH_2 as Foaming Agent", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, pp. 346-352, 2011.
8. Papadopoulos, D.P., Omar, H., Stergioudi, F., Tsipas, S.A., and Michailidis, N., "The Use of Dolomite as Foaming Agent and its Effect on the Microstructure of Aluminium Metal Foams-Comparison to Titanium Hydride", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 382, pp. 118-123, 2011.
9. Lázaro, J., Solórzano, E., and Rodríguez-Pérez, M.A., "Alternative Carbonates to Produce Aluminium Foams via Melt Route", *Procedia Materials Science*, Vol. 4, pp. 275-280, 2014.
10. Byakova, A., Kartuzov, I., Nakamura, T., and Gnyloskurenko, S., "The Role of Foaming Agent and Processing Route in Mechanical Performance of Fabricated Aluminum Foams", *Procedia Materials Science*, Vol. 4, pp. 109-114, 2014.
11. Gergely, V., Curran, D.C., and Clyne, T.W., "The FOAMCARP Process: Foaming of Aluminium MMCs by the Chalk-Aluminium Reaction in Precursors", *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 2301-2310, 2003.
12. Golestanipour, M., Amini Mashhadi, H., Abravi, M.S., Malekjafarian, M., and Sadeghian, M.H., "Manufacturing of Al/SiC_p Composite Foams Using Calcium Carbonate as Foaming Agent", *Materials Science and Technology*, Vol. 27, pp. 923-927, 2011.
13. Gui, M.C., Wang, D.B., Wu, J.J., Yuan, G.J., and Li, C.G., "Deformation and Damping Behaviors of Foamed Al-Si-SiC_p Composite", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 286, pp. 282-288, 2000.
14. Gibson, L.J., and Ashby, M.F., "Cellular Solids: Structures and Properties", 2nd edition, Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
15. Ramamury, U., and Kumaran, M.C., "Mechanical Property Extraction through Conical Indentation of a

- Closed-Cell Aluminum Foam”, *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 181-189, 2004.
16. Luo, Y., Yu, S., Li, W., Liu, J., and Wei, M., “Compressive Behavior of SiC_p/AlSi9Mg Composite Foams”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 460, pp. 294-298, 2008.
17. Yu, S., Luo, Y., and Liu, J., “Effects of Strain Rate and SiC Particle on the Compressive Property of SiC_p/AlSi9Mg Composite Foams”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 487, pp. 394-399, 2008.
18. Esmaeelzadeh, S., Simchi, A., and Lehmhus, D., “Effect of Ceramic Particle Addition on the Foaming Behavior, Cell Structure and Mechanical Properties of P/M AlSi7 Foam”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 424, pp. 290-299, 2006.
19. Xia, X., Zhang, Z., Wang, J., Zhang, X., Zhao, W., Liao, B., and Hur, B., “Compressive Characteristics of Closed-Cell Aluminum Foams after Immersion in Simulated Seawater”, *Materials and Design*, Vol. 67, pp. 330-336, 2015.
20. Crupi, V., Kara, E., Epasto, G., Guglielmino, E., and Aykul, H., “Prediction Model for the Impact Response of Glass Fiber Reinforced Aluminium Foam Sandwiches”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 77, pp. 97-107, 2015.
۲۱. میرباقری، س.م.ح.، دانشمند، م.، و طباطبایی، س.ی.، “اثر ساختار سلولی فوم آلومینیم کامپوزیتی ۱۰vol.%SiC A356-10 بر رفتار شبه استاتیکی کمانش پلاستیک پیشرونده قوطی‌های برنجی پرشده با آن”، *مجله مواد پیشرفته در مهندسی (استقلال)*، دوره ۳۳، شماره ۳، ص.ص ۱۰۵-۱۲۴، خرداد ۱۳۹۳.