

## بررسی رفتار کار گرم فوم کامپوزیتی سلول بسته $Al/SiC_p$

آرمین دهنوی\*<sup>۱</sup>، غلامرضا ابراهیمی<sup>۲</sup>، مسعود گلستانی پور<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی علمی کاربردی جهاد دانشگاهی- مرکز مشهد، خراسان رضوی، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، خراسان رضوی، ایران

۳- عضو هیأت علمی و گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد، خراسان رضوی، ایران

\*عهده دار مکاتبات: Armin.dehnavi@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۱۱)

**چکیده:** در این پژوهش با استفاده از روش فوم سازی مستقیم مذاب با کمک عامل فوم ساز کربنات کلسیم ( $CaCO_3$ ) و با مقادیر مختلف ذرات پایدارساز و تقویت کننده  $SiC$  (۳، ۶ و ۱۰ درصد حجمی) فوم کامپوزیتی زمینه آلومینیومی تولید گردیده است. چگالی فوم های تولیدی ۰/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب اندازه گیری شد. سپس در محدوده حرارتی مختلف  $100^\circ C$ ،  $200^\circ C$ ،  $300^\circ C$  و  $400^\circ C$  و با نرخ کرنش متوسط  $0.1/s^{-1}$  تحت تغییر شکل فشار تک محوری قرار داده شد. نتایج حاصل نشان می دهد که در دمای ثابت تغییر شکل، با افزایش کسر حجمی ذرات  $SiC$ ، تنش تسلیم، تنش مسطح و میزان جذب انرژی افزایش، و با افزایش دما کاهش می یابد. همچنین افزایش میزان ذرات تقویت کننده سبب دندانهای شدن منحنی سیلان شده است، که بیان کننده افزایش تردی دیواره سلولی فوم می باشد.

### واژه های کلیدی:

فوم آلومینیوم، تغییر شکل گرم، ذرات  $SiC$ ، سلول بسته.

### ۱- مقدمه

پرکاربردترین و اقتصادی ترین روش در ساخت فوم های فلزی، روش ذوبی می باشد. روش تولید فوم با استفاده از اضافه کردن عامل فوم ساز به مذاب از جمله روش های پر کاربرد در تولید فوم های آلومینیومی می باشد. در این روش برای تولید فوم آلومینیومی ابتدا ماده ویسکوزیته به مذاب افزوده شده می شود، سپس عامل فوم ساز اضافه شده و تحت تاثیر حرارت مذاب تجزیه شده و گاز آزاد می کند. این امر موجب ایجاد حباب در مذاب و به تبع آن انجام فرآیند فوم سازی می شود. کنترل دقیق دما و میزان ویسکوزیته به مذاب از پارامترهای اصلی تعیین کننده کیفیت فوم تولیدی می باشند [۲].

مطالعات زیادی به منظور بررسی رفتار فشاری و پارامترهای موثر بر تولید، در فوم های سلول بسته آلومینیومی صورت گرفته است.

در دهه اخیر، یک دسته از فلزات سلولی، به نام فوم های فلزی با خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی جدید جذابیت بسیاری یافته اند. فوم ها و دیگر مواد سلولی که یک ساختار متخلخل دارند، ترکیبی از خواص جالب فیزیکی و مکانیکی دارند. از جمله این خواص می توان به وزن بسیار کم، سخت پایی بالا، قابلیت جذب انرژی ناشی از ضربه، هدایت حرارتی اندک، نفوذپذیری مغناطیسی کم و قابلیت جذب ارتعاش اشاره نمود. به این ترتیب فوم های فلزی را می توان در کاربردهایی که به خصوصیات فوق به صورت توأم نیاز دارند به کار گرفت [۱].

روش های مختلفی برای تولید فوم های آلومینیومی وجود دارد. این روش ها به طور کلی به سه گروه روش های حالت جامد، مایع و گازی تقسیم بندی می شوند. در این میان می توان گفت که

در این تحقیق آلیاژ آلومینیوم ریختگی AMS A356.0 به عنوان فلز پایه انتخاب گردید. فاز تقویت کننده شامل ذرات SiC با اندازه متوسط برابر با ۱۰ میکرومتر تهیه شد. عملیات حرارتی ذرات SiC به مدت یک ساعت در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  و سپس به مدت ۲ ساعت در دمای  $650^{\circ}\text{C}$  به منظور حذف آلودگی ها و گازهای جذب شده سطحی و در نتیجه بهبود ترشوندگی ذرات SiC توسط مذاب آلومینیوم انجام گردید [۱۷].

پودر کربنات کلسیم با خلوص ۹۹/۵٪ وزنی و اندازه متوسط ۵ میکرومتر به عنوان عامل فوم ساز استفاده شد. این پودر نیز به منظور توزیع بهتر این ذرات در مذاب آلومینیوم به مدت ۲ ساعت در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی SEM از ذرات SiC و پودر  $\text{CaCO}_3$  مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ قابل مشاهده است.

جهت تولید فوم ابتدا شمش های کامپوزیتی  $\text{Al/SiC}_p$  به همراه درصد های حجمی متفاوت (۳، ۶ و ۱۰) از ذرات SiC با استفاده از تکنیک ریخته گری گردابی در دمای  $720-700^{\circ}\text{C}$  تولید و ریخته گری شد. شمش مذکور در مرحله بعد در دمای  $720-700^{\circ}\text{C}$  ذوب مجدد شده و توسط همزن به مدت زمان ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه هم زده می شود تا قبل از اینکه فوم سازی صورت گیرد، مذابی یکنواخت حاصل شود. پس از آن ۳ درصد حجمی پودر  $\text{CaCO}_3$  به مذاب در حال اغتشاش اضافه شده و مخلوط بلافاصله برای مدت کمتر از ۱ دقیقه هم زده شد. سپس مخلوط در دمای  $730-750^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳ دقیقه نگه داشته شد تا کربنات کلسیم تجزیه شده و تولید گاز  $\text{CO}_2$  نماید و به کمک رابطه ۱ درصد تخلخل فوم های کامپوزیتی اندازه گیری شد:

$$P = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

در رابطه فوق P، درصد تخلخل فوم کامپوزیتی،  $\rho$  و  $\rho_s$  به ترتیب چگالی فوم کامپوزیتی و چگالی ماده موجود در دیواره ها می باشد. مقدار چگالی فوم های تولیدی ۰/۵ گرم بر سانتیمتر

همچنین لازم به ذکر است که تحقیقات انجام شده بر روی خواص فشاری و تغییر شکل فوم های سلول بسته اکثرا در دمای محیط صورت گرفته و کمتر به بررسی آن در دماهای بالاتر از محیط توجه شده است.

الی<sup>۱</sup> با بررسی دما و چگالی نسبی بر خواص فشاری فوم سلول بسته آلومینیومی اینطور بیان کرد که با افزایش چگالی نسبی خواص فشاری فوم سلول بسته افزایش داشته و بالعکس با افزایش دما خواص فشاری فوم سلول بسته آلومینیومی کاهش یافته است [۳]. در تحقیق دیگر کدی<sup>۲</sup> و همکارانش به بررسی نرخ کرنش و دما بر رفتار فشاری فوم سلول بسته آلومینیومی پرداختند. مشخص گردید رفتار فشاری فوم سلول بسته به شدت تابعی از دما و نرخ کرنش می باشد [۴].

در پژوهشی مشابه که توسط ساهو<sup>۳</sup> و همکارانش بر روی فوم کامپوزیتی سلول بسته ZA27-SiC صورت گرفت به این نتایج رسیدند که تنش مسطح و میزان جذب انرژی با افزایش چگالی نسبی و نرخ کرنش افزایش و با افزایش دما و سائز سلولی کاهش پیدا کرده است [۵].

همچنین وانگ<sup>۴</sup> و همکاران تاثیر دما بر روی خواص مکانیکی فوم آلومینیومی تحت بارگذاری دینامیکی را مورد مطالعه قرار دادند و آن ها مشاهدات خود را اینطور بیان کردند که با افزایش دما حساسیت به نرخ کرنش در فوم های آلومینیومی افزایش یافته است [۶].

مرور پژوهش های بالا در زمینه بررسی خواص مکانیکی فوم سلول بسته آلومینیوم در دماهایی غیر از دمای محیط نشان می دهد که تاثیر پارمتری همچون کسر حجمی ذرات تقویت کننده SiC مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف از انجام تحقیق حاضر تولید فوم کامپوزیتی سلول بسته  $\text{Al/SiC}_p$  به روش فوم سازی مستقیم با استفاده از عمل فوم ساز  $\text{CaCO}_3$  و بررسی تاثیر ذرات SiC به عنوان فاز تقویت کننده و دما بر خواص فشاری فوم  $\text{Al/SiC}_p$  در درجه حرارت های بالاتر از دمای محیط می باشد.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

مکعب و درصد تخلخل آن‌ها ۸۱ درصد اندازه‌گیری شد [۱۶].

### ۳- نتایج و بحث

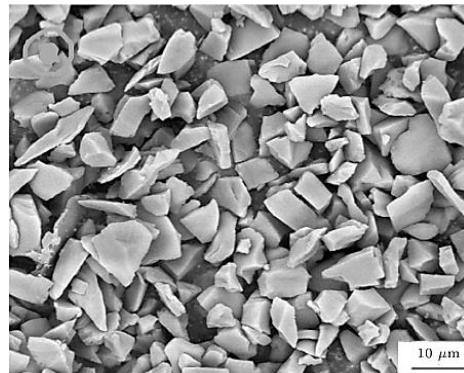
#### ۳-۱- رفتار تغییر شکل فشاری

منحنی تنش- کرنش مهندسی در دماهای مختلف برای فوم کامپوزیتی با ۱۰ درصد حجمی ذرات SiC در شکل ۲- الف و منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های ۶ و ۳ درصد حجمی ذرات تقویت‌کننده به ترتیب در شکل ۲- ب و ۲- ج مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۳، منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی را می‌توان به سه منطقه زیر تفکیک نمود که با خط‌چین بر روی شکل ۲- الف نشان داده شده است:

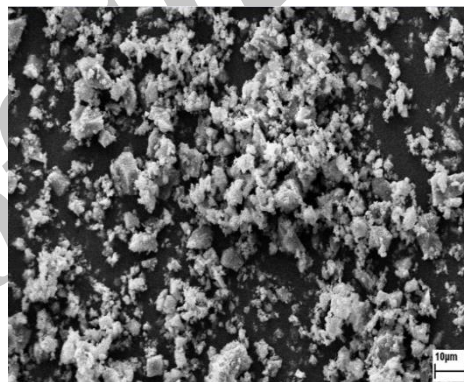
۱- در منطقه اول نمودار با اعمال تنش، یک ناحیه الاستیک خطی که مربوط به خم شدن الاستیک دیواره‌های سلولی است مشاهده می‌شود. با افزایش میزان تنش در دماهای پایین، در کرنش‌هایی در حدود ۰/۱، اولین دیواره‌های سلولی دچار کمانش و فروپاشی شده و پدیده تسلیم در فوم فلزی رخ می‌دهد.

۲- پس از منطقه الاستیک و در منطقه دوم نمودار، در محدوده وسیعی از کرنش، تنش ثابت می‌ماند. میانگین تنش در این محدوده همان تنش مسطح<sup>۵</sup> می‌باشد. نوسانات تنش بر روی منحنی تنش- کرنش مهندسی به علت تخریب دیواره‌ها و در اثر اعمال نیرو به وجود آمده و منجر به تغییر شکل دائمی می‌شود. بسته به ساختار سلولی و خواص ماده جامد، ناحیه مسطح منحنی تنش- کرنش مهندسی ممکن است کاملاً مسطح نبوده و شیب کمی داشته باشد و یا دندانه‌ای و موج‌دار باشد [۷]. دندانه‌ای شدن نمودار در این مرحله را که در دماهای پایین و تا دمایی که استحکام دیواره سلول بر اثر افزایش دما حفظ شود می‌توان مشاهده نمود.

۳- منطقه سوم نمودار در کرنش‌هایی بیشتر از ۰/۵ رخ می‌دهد. با افزایش کرنش، باندهای تغییر شکل بیشتری تشکیل می‌شوند. در این شرایط تنش به دلیل له شدن ساختار فومی به میزان زیادی افزایش یافته و با از بین رفتن بیشتر سلول‌ها ناحیه تراکم<sup>۶</sup> منحنی در نمودار ظاهر می‌شود.



(الف)



(ب)

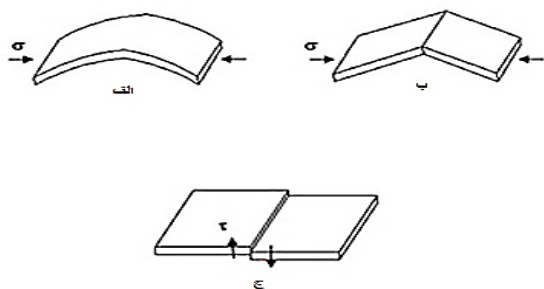
شکل (۱): تصویر SEM از: (الف): ذرات SiC و (ب): پودر CaCO<sub>3</sub> عملیات حرارتی شده

به منظور بررسی رفتار کار گرم و خواص مکانیکی فوم‌های تولید شده از آزمون فشار گرم استفاده شد. ابتدا نمونه‌های با ابعاد 25mm×25mm×30mm به شکل مکعبی از فوم کامپوزیتی Al/SiC<sub>p</sub> تولید شده با کسر حجمی متفاوت ذرات SiC تهیه شدند سپس آزمایش فشار گرم تک محوری توسط دستگاه آزمون Zwick Z250 و در محدوده حرارتی مختلف ۱۰۰°C، ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C و با نرخ کرنش متوسط ۰/۱s<sup>-1</sup> انجام شد. پس از تغییر شکل، نمونه‌ها جهت بررسی ریزساختار در هوا سرد شد. میکروسکوپ نوری مدل Olympus PM3 و الکترونی روبشی SEM مدل LEO 1450 (35 KV) برای بررسی ساختار سلول‌ها و توزیع ذرات SiC در فوم کامپوزیتی Al/SiC<sub>p</sub> استفاده قرار گرفت.

ج مشاهده می‌شود با افزایش ذرات SiC طول منطقه کرنش الاستیک نسبت به نمونه‌های با ۳ و ۶ درصد حجمی ذرات SiC افزایش یافته و تنش تسلیم مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد. در ناحیه دوم نمودار برای نمونه‌های با ۱۰ درصد حجمی ذرات تقویت‌کننده در مقایسه با دو نمونه دیگر نوسانات تنش بیشتری نشان داده و در نتیجه تنش مسطح افزایش یافته است. میزان جذب انرژی به سطح زیر منحنی تنش-کرنش مهندسی بستگی دارد. با افزایش ذرات تقویت‌کننده، سطح زیر نمودار در شکل ۲-الف نسبت به شکل ۲-ب و ۲-ج افزایش یافته و این امر نشان‌دهنده قابلیت جذب انرژی بالاتری می‌باشد.

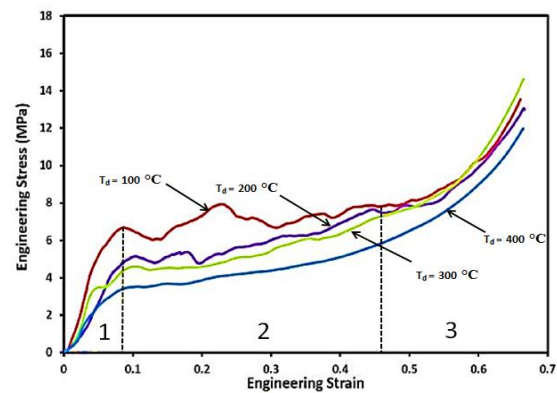
در شکل ۲ با تغییرات شرایط آزمون از جمله دما ظاهر نمودارهای تنش-کرنش مهندسی تغییر یافته است. دلیل این امر را می‌توان این‌طور بیان کرد که با تغییر دمای آزمون در حین تغییر شکل گرم فوم کامپوزیتی، مکانیزم تغییر شکل در دیواره سلولی تغییر می‌کند.

شکل ۳ مکانیزم‌های تغییر شکل دیواره سلولی را نشان می‌دهد. در منطقه اول بر روی شکل ۳-الف مشاهده می‌شود با افزایش دما فوم کامپوزیتی تنش تسلیم پایین‌تری را از خود نشان می‌دهد. همچنین میزان نوسانات تنش بر روی منحنی تنش-کرنش مهندسی با افزایش دما کاهش یافته و تنش مسطح فوم و میزان جذب انرژی را تحت تاثیر قرار می‌دهد بدین صورت که با افزایش دما میزان تنش مسطح و جذب انرژی کاهش می‌یابد. تغییر مکانیزم تغییر شکل از کمانش و پارگی به خم شدن دیواره سلولی می‌تواند علت کاهش خواص فشاری فوم کامپوزیتی باشد.

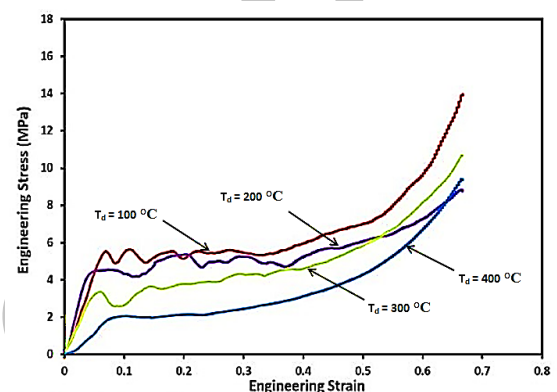


شکل (۳): مکانیزم‌های تغییر شکل سلولی: (الف): خم شدن، (ب): کمانش و

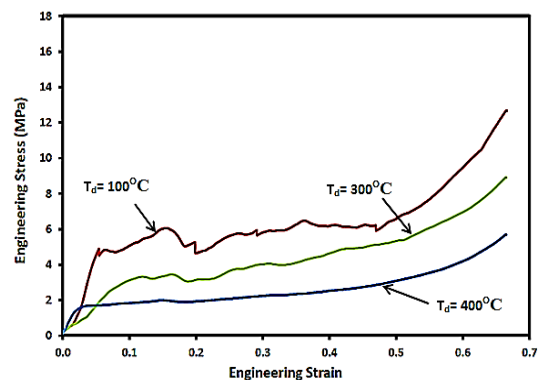
(ج): پاره شدن [۸]



(الف)



(ب)

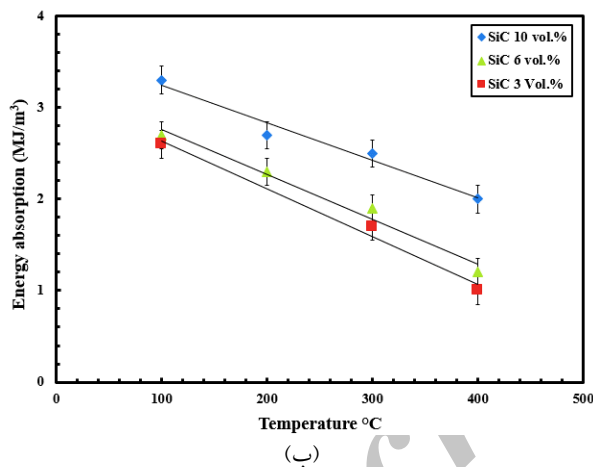
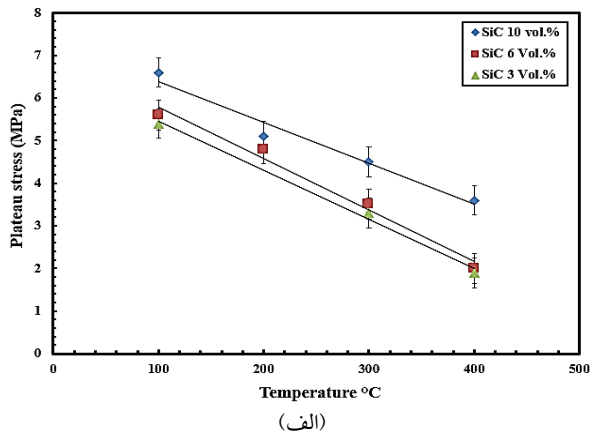


(ج)

شکل (۲): منحنی تنش کرنش فشاری فوم‌های کامپوزیتی تولید شده با: (الف): ۱۰، (ب): ۶ و (ج): ۳ درصد حجمی SiC با دماهای مختلف

با توجه به شکل ۲ و نمودارهای تنش-کرنش مهندسی سه نمونه با ۱۰، ۶ و ۳ درصد حجمی از ذرات SiC مشخص است که در نمونه‌ای با ۱۰ درصد حجمی ذرات SiC میزان استحکام فشاری افزایش یافته است. همچنین با مقایسه شکل ۲-الف با ۲-ب و ۲-ج

تنش تسلیم، تنش مسطح و میزان جذب انرژی کاهش پیدا کرده است.



شکل (۵): منحنی: (الف): تنش مسطح و (ب): جذب انرژی فوم‌های

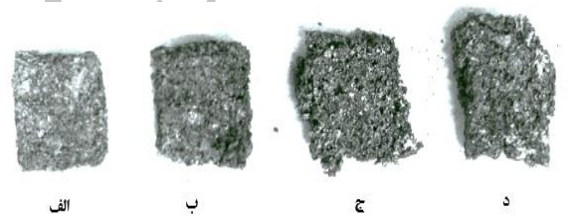
کامپوزیتی تولیدشده با مقادیر ثابت SiC با دماهای مختلف

به منظور بررسی تغییرات تنش تسلیم فوم فلزی رابطه ۲ توسط قش [۹] بیان شد:

$$\sigma = \sigma_m \left( 1 - \frac{AT}{T_m} \ln \frac{\epsilon_0}{\epsilon} \right)$$

که در این فرمول  $\sigma$  تنش تسلیم فوم فلزی،  $\sigma_m$  تنش تسلیم زمینه،  $A$  و  $\epsilon_0$  خواص ماده،  $T$  دمای آزمون،  $T_m$  دمای ذوب ماده،  $\epsilon$  نرخ کرنش می‌باشد. با ثابت در نظر گرفتن نرخ کرنش و افزایش دمای آزمون میزان تنش تسلیم فوم فلزی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه میزان تنش مسطح به استحکام زمینه وابسته است، با افزایش دما استحکام دیواره سلولی و زمینه کاهش پیدا کرده و میزان تنش

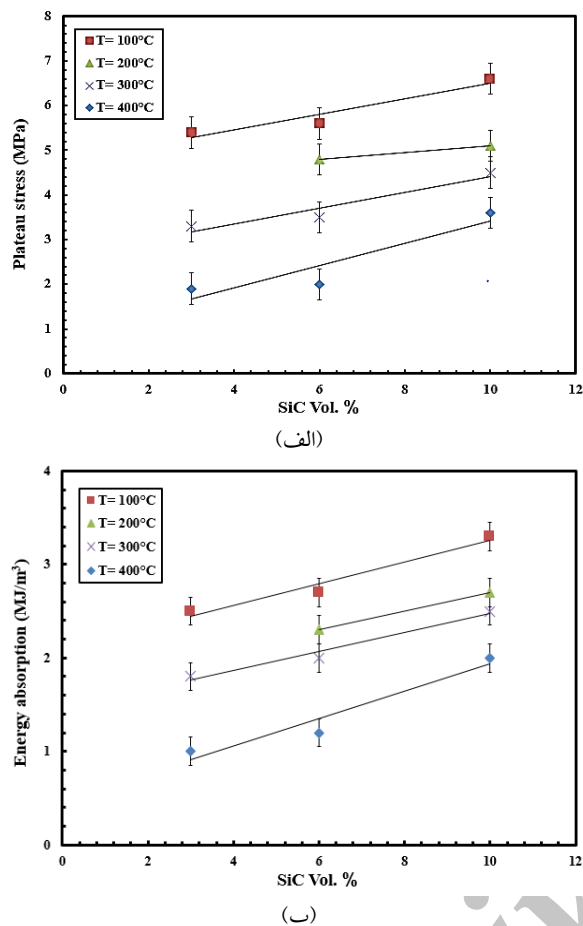
در شکل ۵ نمونه‌های با ۱۰ درصد حجمی ذرات SiC بعد از تغییر شکل گرم مشاهده می‌شود. در شکل ۴-الف و ۴-ب به ترتیب بعد از پایان آزمون و چگال شدن نمونه‌ها پس از کرنش متراکم (منطقه سوم نمودار تنش-کرنش مهندسی)، دیواره‌های سلولی دچار شکست و بخشی از آن‌ها جدا شده است، این امر ناشی از کماتش شدید دیواره سلولی در حین آزمون در دماهای پایین می‌باشد. با افزایش دما که در شکل ۴-ج و ۴-د می‌توان مشاهده کرد، پس از تغییر شکل و اتمام منطقه کرنش متراکم، خورد شدن دیواره سلولی و جدا شدن از ساختار مشاهده نمی‌شود و با خم شدن دیواره سلول نمونه‌ها قابلیت بیشتری از له شدن را از خود نشان می‌دهند.



شکل (۴): نمونه‌های تغییر شکل یافته در دماهای: (الف): ۱۰۰°C، (ب): ۲۰۰°C، (ج): ۳۰۰°C و (د): ۴۰۰°C

### ۲-۳- تأثیر دما بر رفتار تغییر شکل گرم

شکل ۵-الف تغییرات میزان تنش مسطح را با تغییرات دما در مقادیر ثابت ذرات SiC نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش دما میزان تنش مسطح کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به از دست دادن استحکام زمینه و دیواره سلول با افزایش دما و کاهش میزان نوسانات تنش در منطقه دوم نمودار نسبت داد. به عنوان مثال در فوم کامپوزیتی با ۱۰ درصد ذرات تقویت‌کننده، مقدار تنش مسطح ۶/۶ MPa در دمای ۱۰۰°C بوده و با افزایش دما به ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C به ترتیب به مقادیر ۵/۱ MPa، ۴/۵ MPa و ۳/۶ MPa کاهش پیدا کرده است. افزون بر این، در شکل ۵-ب مشاهده می‌شود با افزایش دما میزان جذب انرژی روندی مشابه با تنش مسطح را دنبال می‌کند. به طور کل می‌توان این‌طور بیان کرد با افزایش دما خواص فشاری از جمله



شکل (۷): منحنی: (الف): تنش مسطح و (ب): جذب انرژی فوم‌های کامپوزیتی تولیدشده با مقادیر مختلف SiC در دمای ثابت

رابطه ۳ تغییرات تنش تسلیم فوم کامپوزیتی با کسر حجمی ذرات تقویت کننده را نشان می‌دهد [۱۱].

$$\sigma_f = \sigma_m [(1 - V_p) - 0.89 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^{-0.007}] + 235.9V_p^{3.16} \quad (3)$$

که در این رابطه  $\sigma_f$  تنش تسلیم فوم کامپوزیتی،  $\sigma_m$  تنش تسلیم زمینه،  $\rho_f/\rho_s$  دانسیته نسبی فوم فلزی و  $V_p$  کسر حجمی ذرات تقویت کننده می‌باشد. با توجه به این رابطه میزان تغییرات تنش تسلیم فوم کامپوزیتی با میزان مقادیر ذرات تقویت کننده در زمینه رابطه مستقیم دارد و با افزایش کسر حجمی ذرات تقویت کننده افزایش می‌یابد. تنش تسلیم با میزان مقادیر ذرات SiC به صورت خطی تغییر نمی‌کند.

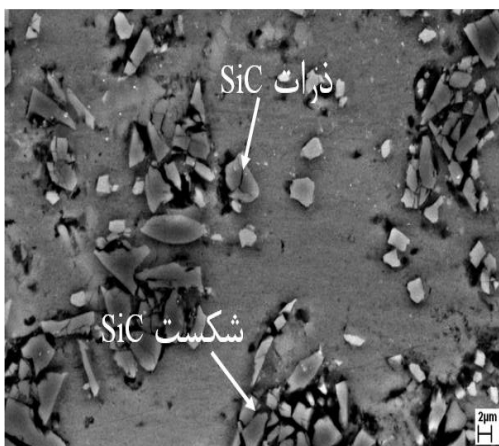
مسطح کاهش می‌یابد. مطالعات صورت گرفته در چندین تحقیق [۵،۳-۶] تایید کننده این موضوع می‌باشد.

### ۳-۳- تأثیر SiC بر رفتار تغییر شکل گرم

شکل ۶ تأثیرات کسر حجمی ذرات SiC بر روی فوم کامپوزیتی با تغییرات دما را نشان می‌دهد. با افزایش کسر حجمی ذرات SiC و در نظر گرفتن دما به صورت ثابت، میزان تنش مسطح و جذب انرژی افزایش یافته است. شکل ۶-الف تأثیرات تنش مسطح با میزان تغییرات کسر حجمی ذرات تقویت کننده را نشان می‌دهد. با ثابت در نظر گرفتن دما میزان تنش مسطح با افزایش کسر حجمی ذرات تقویت کننده افزایش یافته و این امر را می‌توان مربوط به نقش ذرات SiC به عنوان یک عامل تقویت کننده در زمینه و دیواره سلول دانست. با بررسی شکل ۶-الف مشخص شد که تغییرات تنش مسطح با افزایش ذرات به میزان ۱۰ درصد حجمی در مقایسه با نمونه‌هایی با ۳ و ۶ درصد اختلاف بین مقادیر تنش مسطح در دماهای بالای آزمون کاهش یافته و می‌توان این طور بیان کرد که وجود ذرات در زمینه باعث حفظ استحکام دیواره سلولی در دماهای بالا می‌شود. وجود ذرات SiC در دیواره سلولی فوم کامپوزیتی نیروی فشاری را تا حدی تحمل می‌کنند و باعث افزایش استحکام می‌شوند تا اینکه نیروی وارده فراتر از حد تحمل دیواره سلول شود و باعث شکست از فصل مشترک یا از درون ذرات SiC می‌شود. تحقیقات کایزر<sup>۸</sup> و همکارانش [۱۰] در بررسی اثر ذرات SiC بر فوم آلومینیوم صحت این موضوع را تایید می‌کند. در نمونه‌هایی با مقادیر ۳ و ۶ درصد حجمی میزان تنش مسطح در دماهای مختلف مقادیر نزدیک به هم را نشان می‌دهد و تأثیری در افزایش تنش مسطح نداشته است. می‌توان این طور بیان کرد که برای رسیدن به استحکام قابل قبول در دماهای بالا برای فوم‌های کامپوزیتی  $Al/SiC_p$  به مقادیر بالایی از ذرات تقویت کننده نیاز است. در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود با کاهش میزان ذرات و افزایش دمای آزمون میزان جذب انرژی به علت کاهش سطح زیر نمودار تنش و کرنش مهندسی کاهش می‌یابد.

### ۳-۴- بررسی ریزساختاری

به منظور بررسی عوامل مؤثر بر رفتار فوم آلیاژی سلول بسته، ریزساختار آن مورد ارزیابی قرار گرفت. رفتار فوم کامپوزیتی سلول بسته علاوه بر شرایط آزمون فشار به عواملی همچون ساختار سلولی، اندازه سلول، ضخامت دیواره سلولی و توزیع ذرات تقویت کننده مرتبط می شود [۱۲].

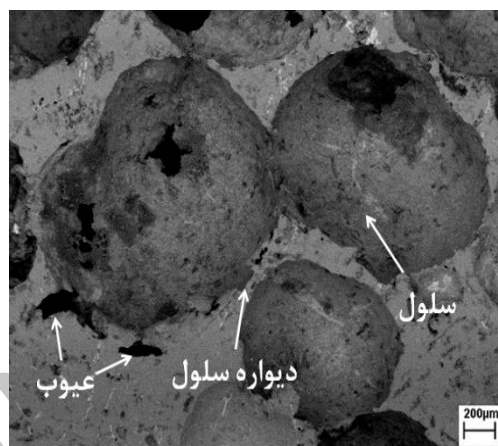


(ج)

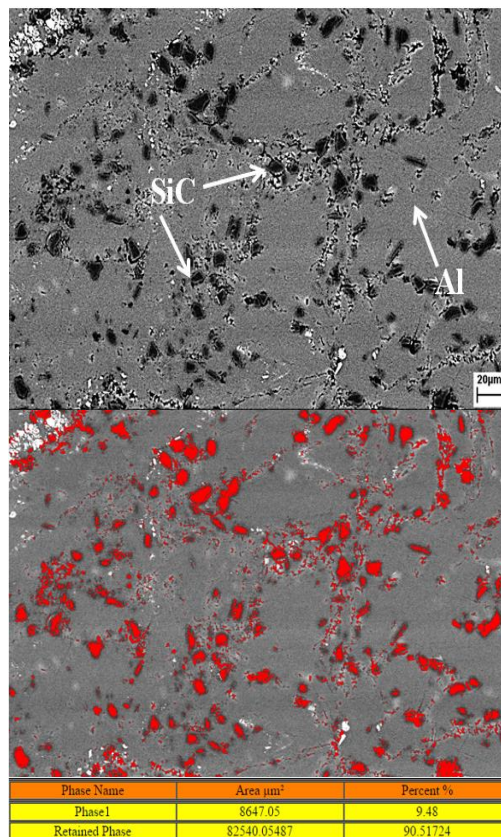
شکل (۷): ریزساختار حاصل از بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی

SEM

شکل ۷- الف ریزساختار الکترونی روبشی از سطح فومی با ۱۰ درصد ذرات تقویت کننده را نشان می دهد. قسمت های مختلف ساختار مانند سلول، دیواره سلولی، عیوب موجود بر دیواره سلول در شکل مشخص شده است. وجود عیوب در دیواره سلولی باعث می شود که تنش در کرنش های پایین تری از حد تنش تسلیم فوم تجاوز کند، که این مسئله باعث تغییر فرم پلاستیک زود هنگام و کوتاه شدن منطقه الاستیک خطی بر روی نمودار تنش-کرنش مهندسی می شود [۱۳]. وجود عیوب در دیواره و سلول را می توان این طور تقسیم کرد. ۱- فشار گاز درون حباب بیشتر از فشار بیرون است و گاز داخل حباب جهت کاهش فشار به درون فیلم مذاب نفوذ می کند. ۲- ناشی از جوانه زنی حباب در دیواره و رشد آن در اثر زمان نگه داری بالا در سطح مذاب است. ۳- عدم پایداری دیواره فوم در برابر اختلاف فشار داخل حباب و فشار محیط می باشد. وجود عیوب با افزایش ذرات SiC در مذاب کاهش می یابد [۱۴]. وجود ذرات تقویت کننده در سطح و داخل دیواره سلولی باعث افزایش استحکام زمینه و در عین حال افزایش تندی دیواره سلولی می گردد. شکل ۷- ب توزیع ذرات SiC به همراه آنالیز کمی آن در سطح را نشان می دهد که نشان از تر شونده گی مناسب ذرات در حین تولید می باشد [۱۵]. همچنین در شکل ۷- ج شکست ذرات SiC و خرد شدن آن ها قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)

- [1] J. Banhart, "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metallic foams", *Progress in Material Science*, Vol. 46, pp. 559-632, 2001.
- [2] H. P. Degischer & B. Kriszt, "Handbook of cellular metals", Weinheim, Wiley-VCH, 2002.
- [3] M. S. Aly, "Behavior of closed cell aluminium foams upon compressive testing at elevated temperatures: Experimental results", *Materials Letters*, Vol. 61, pp. 3138-3141, 2007.
- [4] C. M. Cady, G. T. Gray, C. Liu, M. L. Lovato & T. Mukai, "Compressive properties of a closed-cell aluminum foam as a function of strain rate and temperature", *Materials Science and Engineering*, Vol. 525A, pp. 1-6, 2009.
- [5] S. Sahu, M. D. Goel, D. P. Mondal & S. Das, "High temperature compressive deformation behavior of ZA27-SiC foam", *Materials Science and Engineering*, Vol. 607A, pp. 162-172, 2014.
- [6] P. Wang, S. Xu, Z. Li, J. Y. H. Zheng & S. Hu, "Temperature effects on the mechanical behavior of aluminum foam under dynamic loading", *Materials Science and Engineering*, Vol. 559A, pp. 174-179, 2014.
- [7] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson & H. N. G. Wadley, "Metal Foams: A Design Guide", Butterworth Heinemann, 2000.
- [8] D. P. Myriounis, S. T. Hasan & T. E. Matikas, "Microdeformation behavior of Al-SiC metal matrix composites", *Composite Interfaces*, Vol. 15, pp. 495-514, 2008.
- [9] A. K. Ghosh, "On the measurement of strain-rate sensitivity for conventional and ultra-fine grain alloys Mater", *Materials Science and Engineering*, Vol. 463A, pp. 36-40, 2007.
- [10] M. T. Kiser, F. W. Zok & D. S. Wilkinson, "Plastic flow and fracture of a particulate metal matrix composite", *Acta Material*, Vol. 44, pp. 3465-3476, 1996.
- [11] C. Chen, T. J. Lu & N. A. Fleck, "Effect of imperfections on the yielding of two-dimensional foams", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 47, pp. 2235-2272, 1999.

شکست ذرات در حین فرایند تولید در اثر هم زدن مکانیکی مذاب باعث توزیع بهتر ذرات در زمینه شده و استحکام فشاری فوم‌های تولیدی را افزایش می‌دهد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی رفتار تغییر شکل گرم فوم سلول بسته کامپوزیتی Al/SiC<sub>p</sub> پرداخته شد و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- ذرات SiC باعث افزایش استحکام دیواره سلولی و ترد شدن آن می‌شوند. در نتیجه در دمای پایین مکانیزم قالب کمانش و پارگی دیواره سلولی است و بر روی نمودار باعث نوسانات تنش می‌شود ولی در دماهای بالا دیواره سلولی بر روی یکدیگر خم می‌شوند و میزان دامنه تغییرات در منطقه تنش مسطح کاهش می‌یابد و بر روی نمودار تنش- کرنش مهندسی به صورت منطقه صاف مشاهده می‌شود.

۲- افزایش کسر حجمی ذرات SiC در مقادیر ثابت دما سبب افزایش تنش مسطح فوم کامپوزیتی سلول بسته و همچنین میزان جذب انرژی آن می‌گردد.

۳- خواص فشاری به شدت تابعی از دما می‌باشد و با افزایش دما در مقادیر ثابت ذرات SiC سبب کاهش تنش مسطح و میزان جذب انرژی فوم کامپوزیتی سلول بسته می‌گردد.

۴- با افزایش دما منحنی تنش- کرنش مهندسی از حالت دندانه‌ای به صورت صاف تغییر شکل می‌دهد، که علت آن را می‌توان به تغییر مکانیزم‌های تغییر شکل و از دست دادن استحکام دیواره سلولی و نرم شدن آن نسبت داد.

#### ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از کارشناسان و اعضای گروه پژوهشی مواد و مجتمع فنی جهاد دانشگاهی واحد مشهد، به خاطر فراهم آوردن کلیه امکانات انجام این تحقیق، تشکر نمایند.

#### ۶- مراجع



- [12] J. Banhart, "Metal Foams: Production and Stability", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 8, No. 9, 2006.
- [13] J. J. Bikerman, J. M. Perri, R. B. Booth & C. C. Currie, "Foams: Theory and Industrial Applications", Reinhold, New York, 1953.
- [14] D. C. Curran, Ph.D. Thesis, "Aluminium Foam Production using Foaming Agent", Cambridge, 2003.
- [15] N. Babcsán, J. Banhart & D. Leitmeier, "Metal foams – manufacture and physics of foaming, International Conference Advanced metallic materials", Smolenice, Slovakia, 2003.

[۱۶] م. گلستانی پور، م. توکلی، س. م. زبرجد، ا. باباخانی و ب. نادری، "بررسی جذب انرژی پنبه ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تحت آزمون سوراخ کاری"، *مجله مواد نوین*، جلد ۳، شماره ۲، صفحه ۳۸-۲۵، زمستان، ۱۳۹۱.

[۱۷] آ. دهنوی، م. گلستانی پور، ح. خدیوی آیسک، م. ص. ابروی، م. ملک جعفریان و م. حسین زاده، "رسی جذب انرژی پنبه ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تحت آزمون سوراخ کاری"، *مجله مواد نوین*، جلد ۸، شماره ۴، صفحه ۹۷-۸۹، زمستان ۱۳۹۳.

## ۷- پی نوشت

- [1] M.S.Aly  
 [2] C.M. Cady  
 [3] S. Sahu  
 [4] P. Wang  
 [5] Plateau  
 [6] Densification  
 [7] A.K. Ghosh  
 [8] M.T. Kiser

## Influence of SiC particles on hot deformation behavior of closed cell Al/SiC<sub>p</sub> foam

Armin Dehnavi<sup>1\*</sup>, Golam Reza Ebrahimi<sup>2</sup>, Masoud Golestanipour<sup>3</sup>

1- MSc, University of Applied Science and Technology, Iranian Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad Branch, Khorasan Razavi, Iran

2- Associate Professor, Hakim Sabzevari University, Faculty of Engineering, Sabzevar, Khorasan Razavi, Iran

3- Member of Materials Research Group, Iranian Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad Branch, Khorasan Razavi, Iran

\*Corresponding author: Armin.dehnavi@yahoo.com

---

### Abstract:

In this research, closed-cell aluminum foams reinforced by SiC particles were fabricated using direct melt-foaming method and CaCO<sub>3</sub> as a blowing agent. The effect of adding reinforcement particles on mechanical properties of foams was investigated by adding different volume percentages of SiC particles (3%, 6%, and 10%). To obtain the mechanical properties of produced foams, uniaxial compression test was carried on samples at different temperature (100°C, 200°C, 300°C, and 400°C) and constant strain rate equal to 0.1s<sup>-1</sup>. The compression tests result show that at the constant temperature, the yield stress, Plateau stress and energy absorption stresses of composite foams will increase by increasing the volume percentage of SiC particles and decrease with increase in temperature. Reinforcement particles also increase the number of indentation in the stress-strain curve of foams, which reflects increasing brittleness of the foams' cell wall.

### Keywords:

Aluminum Foams, SiC Particles, Hot Deformation, Closed-Cell.

---

Journal homepage: [ma.iaumajlesi.ac.ir](http://ma.iaumajlesi.ac.ir)

### Please cite this article using:

Armin Dehnavi, Golam Reza Ebrahimi, Masoud Golestanipour, Influence of SiC particles on hot deformation behavior of closed cell Al/SiC<sub>p</sub> foam, in Persian, New Process in Material Engineering, 2018, 12(2), 41-50.