

# بررسی ویژگی های ساختاری، خواص فشاری و جذب انرژی در فوم های نانوکامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با نانوذرات اکسید سیلیسیم

اکرم صالحی<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل باباخانی<sup>۲</sup>، سید مجتبی زبرد<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد و عضو گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، مشهد، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی، شیراز، ایران

\*am\_salehi85@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۷/۱۰، تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۴)

## چکیده

در این تحقیق نانوکامپوزیت های آلومینیومی تقویت شده با ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۰ درصد وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم، با کمک روش های ریخته گری گردابی و امواج مافوق صوت تهیه شدند. در ادامه نانوکامپوزیت های تولید شده، به روش فوم سازی مستقیم مذاب و با به کارگیری ۱ درصد وزنی عامل فوم ساز هیدرید تیتانیوم تبدیل به فوم شدند و سپس فوم های تولید شده تحت آزمون فشار با نرخ کرنش  $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی های ساختاری نشان داد که فوم های تقویت شده با ۰/۷۵ و ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم بهترین ساختار را از خود نشان می دهند. بررسی منحنی های تنش-کرنش فشاری نشان داد که با افزایش چگالی نسبی، تنش شروع منطقه پایا افزایش می یابد اما برای بهبود قابلیت جذب انرژی، علاوه بر افزایش چگالی نسبی بایستی ساختارهای سلولی نیز بهبود پیدا کنند.

## واژه های کلیدی:

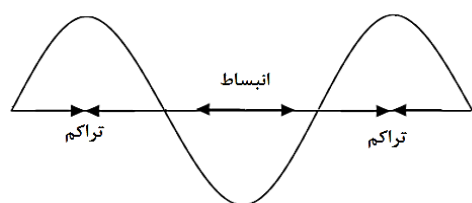
فوم نانوکامپوزیت آلومینیومی، ریخته گری گردابی، امواج مافوق صوت، آزمون فشار، جذب انرژی.

## ۱- مقدمه

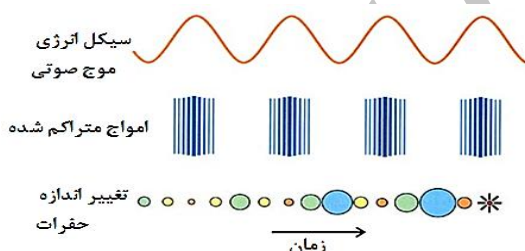
مختلف نظیر خودروسازی، هوافضا، صنایع نظامی و ... شده است که علت اصلی آن، خاصیت جذب انرژی بالا در تنش های فشاری، در این دسته از مواد است [۱-۵].

فوم های فلزی مواد کامپوزیتی هستند که در آن ها، حفرات توسط یک زمینه فلزی و یا حتی ذرات سرامیکی احاطه می شوند. در سال های اخیر، توجه ویژه ای به این مواد در صنایع

شده، حباب کویتاسیون<sup>۴</sup> گفته می شود. به خاطر سینوسی بودن امواج مافوق صوت، حباب های ایجاد شده، حالت های متناوب انبساط و انقباض را تجربه می کنند. تحت شرایط حفره زایی پایدار<sup>۵</sup>، انبساط بیشتر از انقباض است اما اگر اندازه حباب، توان امواج مافوق صوت و یا فرکانس امواج، بیشتر از یک آستانه خاص بشوند، فرایند حفره زایی گذرا<sup>۶</sup> ایجاد می شود. در این فرایند حفرات ایجاد شده مدت زیادی پایدار نمی مانند و فشار ایجاد شده در طول سیکل فشرده گی بعدی، باعث در خود فروپاشی حباب ها می شود. به این پدیده، فروپاشی حفره گفته می شود که می تواند یک محیط غیر معمولی را برای واکنش های شیمیایی ایجاد کند (شکل ۲) [۱۴-۱۷].



شکل (۱): سیکل انرژی برای یک حباب تحت امواج مافوق صوت [۱۴]



شکل (۲): تغییر اندازه حفرات و انفجار آن ها، تحت تاثیر امواج مافوق صوت [۱۴]

لحظه در خود فروپاشی حفرات را نقطه داغ<sup>۷</sup> می نامند که می تواند دمایی تا حدود  $5000^{\circ}\text{C}$  و فشاری در حدود  $1000\text{ atm}$  و نرخ گرم کردن و سرد کردن بیش از  $10^{11}\text{ K/s}$  را ایجاد کند. فشار ایجاد شده ناشی از انفجار حفرات، به نانوذرات خوشه ای شده در زمینه نیرو وارد کرده و باعث از هم پاشیدگی آن ها و در نتیجه پراکنده شدن نانوذرات در زمینه می شود [۱۸-۱۹]. یکی از مهم ترین خواص فوم های فلزی که باعث شده است آن ها در

روش های تولید فوم های فلزی بسیار متنوع است. در این میان تکنیک های فوم سازی مستقیم مذاب با استفاده از عامل فوم ساز، برای تولید در ابعاد صنعتی مناسب می باشد چرا که دسترسی به تجهیزات تولید در آن آسان و هزینه آن به مراتب کمتر از سایر روش ها است. در این روش، برای تولید فوم آلومینیومی ابتدا ماده ویسکوز کننده به مذاب افزوده می شود، سپس عامل فوم ساز اضافه شده که تحت تاثیر حرارت، گاز آزاد می کند. هنگامی که فوم سازی کامل شد، پیش از اینکه گاز تولیدی از داخل مذاب خارج شود، مذاب سرد می شود تا فوم منجمد گردد [۶-۸].

بر پایه مدل های نظری و نتایج آزمایشگاهی، استحکام فوم مستقیماً متناسب با استحکام ماده ای است که به عنوان پیش ماده فوم سازی استفاده می شود. از این دیدگاه اگر از کامپوزیت های آلومینیمی به جای آلیاژهای آلومینیومی غیر کامپوزیتی برای ساخت فوم استفاده شود، استحکام افزایش می یابد [۹-۱۱]. ذرات سرامیکی که در فرایند فوم سازی برای افزایش استحکام اضافه می شوند، همواره در ابعاد میکرون بوده اند که استفاده از مقادیر بالای این ذرات در فوم سازی، باعث می شود انعطاف پذیری به شدت کاهش یابد. یکی از موارد جالب برای استفاده از نانوذرات سرامیکی به عنوان فاز تقویت کننده، کاربرد آن ها برای استحکام بخشی زمینه فلزی است در حالیکه انعطاف پذیری خوبی را نیز حفظ می کنند که به این پیش ماده فوم سازی، نانو کامپوزیت زمینه فلزی (MMNC) گفته می شود [۱۲-۱۳].

فرایند ترکیب کردن نانوذرات با استفاده از امواج مافوق صوت<sup>۱</sup> که بر مبنای روش ذوبی<sup>۲</sup> بوده و اخیراً معرفی شده است، روشی مناسب برای پخش یکنواخت نانوذرات و تولید نانو کامپوزیت های زمینه فلزی می باشد. همان طور که امواج مافوق صوت به صورت موج سینوسی از میان یک مذاب عبور می کنند (شکل ۱)، سیکل انبساط ناشی از امواج مافوق صوت، مولکول های ماده زمینه را، به دور از یکدیگر می کشد و اگر شدت امواج به اندازه کافی قوی باشد، سیکل انبساط می تواند حفراتی را در مذاب ایجاد کند. به این فرایند حفره زایی<sup>۳</sup> و به حباب ایجاد

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ زمینه (درصد وزنی)

عنصر	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Al
درصد	۱۶۲	۱۱۶	۱۸۳	۱۱۴	۱۴۶	۱۱۵	باقی
وزنی	۸	۱	۰	۰	۱	۰	مانده

جدول (۲): مشخصات عامل فوم سازی هیدرید تیتانیم

فرمول شیمیایی	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	جرم مولی (g/mol)	خلوص (%)
TiH <sub>2</sub>	۳/۷۶	۴۹/۸۸	>۹۸

کادوی<sup>۲۳</sup> [۲۳] نشان داد که اگر ذرات هیدرید تیتانیوم در دمای C ۴۵۰<sup>۰</sup> به مدت ۳ ساعت تحت عملیات حرارتی قرار بگیرند، یک لایه اکسیدی روی سطح ذرات تشکیل خواهد شد که نه تنها دمای آزاد شدن گاز از ذرات را به تاخیر می اندازد بلکه فواصل زمانی بین آزاد شدن مولکول های هیدروژن از ذرات هیدرید تیتانیوم را نیز به تاخیر می اندازد که باعث افزایش زمان در دسترس برای انجام فرایند فوم سازی می شود. از این رو پودرهای هیدرید تیتانیوم، پیش از اضافه شدن به مذاب در دمای C ۴۵۰<sup>۰</sup> به مدت ۳ ساعت تحت فرایند عملیات حرارتی قرار گرفتند که با توجه به آنالیز EDS نشان داده شده در شکل ۳ و مشابهت نتایج بدست آمده با تحقیقات ماتیناسویک-لوکس<sup>۹</sup> [۲۴] و همکارانش، انتظار می رود لایه اکسیدی شناسایی شده Ti<sub>3</sub>O باشد.

برای انجام فرایند فوم سازی، ابتدا ۴۰۰ گرم شمش آلومینیومی در یک بوته گرافیتی با قطر دهانه ۱۲ سانتی متر، در کوره ای با دمای C ۷۵۰<sup>۰</sup> ذوب شد و برای افزایش ترشوندگی نانوذرات، ۳/۵ درصد وزنی آلیاژ 50%Al-50%Mg به مذاب اضافه شد. سپس پیش ماده های نانوکامپوزیتی با پنج درصد وزنی مختلف ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۱۰٪ نانوذرات اکسید سیلیسیم، با میانگین ابعاد ۴۰ نانومتر تهیه شدند و مذاب با استفاده از همزن مکانیکی با توان ۸ کیلو وات و با به کارگیری تکنیک ریخته گری گردابی، با سرعت ۷۰۰ دور بر دقیقه در دمای C ۶۸۰<sup>۰</sup>-۶۵۰، به مدت ۱۵ دقیقه هم زده شد. پس از اینکه مذاب به مدت

کاربردهای نظامی و خودروسازی مورد توجه قرار بگیرند، قابلیت جذب انرژی آن ها، تحت نیروهای فشاری است. فوم های فلزی، تحت فشار رفتار متفاوتی در مقایسه با فلزات از خود نشان می دهند. از جمله تفاوت های آن ها این است که زمانی که یک فوم فشرده می شود، منحنی تنش- کرنش آن، سه منطقه را نشان می دهد که وسعت هر منطقه به چگالی نسبی فوم بستگی دارد. در منحنی تنش-کرنش آنها، یک ناحیه مسطح وجود دارد، بطوریکه تحت یک تنش نسبتاً ثابت، کرنش در محدوده وسیعی تغییر می کند. این نوع رفتار فوم های فلزی آن ها را برای استفاده در کاربردهای جذب انرژی، در موقعیت هایی که در یک تنش ثابت نسبتاً کم، تغییر فرم زیادی باید صورت بگیرد، مناسب می سازد. بنابراین یک ماده یا سازه، هنگامی یک جاذب انرژی مناسب محسوب می شود که بتواند بیشترین تنش را تحمل کرده و در این تنش بیشترین مقدار کرنش را داشته باشد [۲۰-۲۲]. تاکنون تحقیق جامعی در جهت تولید فوم نانوکامپوزیتی تقویت شده با نانوذرات، با کمک امواج مافوق صوت و انجام بررسی های ریزساختاری و خواص فشاری بر روی آن ها صورت نگرفته است، از این رو هدف از انجام تحقیق حاضر تولید فوم های نانوکامپوزیتی سلول بسته با استفاده از نانوذرات اکسید سیلیسیم به روش ذوبی و با کمک امواج مافوق صوت، مطالعه ریزساختار، خواص فشاری و جذب انرژی در آن ها می باشد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

آلیاژ آلومینیوم LM2 (BS1490) با ترکیب نشان داده شده در جدول ۱ به عنوان ماده زمینه استفاده شد و برای ساخت پیش ماده های فوم سازی، نانوذرات اکسید سیلیسیم (SiO<sub>2</sub>) با خلوص بیشتر از ۹۸٪ به عنوان فاز تقویت کننده انتخاب شدند. اندازه متوسط نانوذرات با استفاده از دستگاه CORDOUAN مدل VASCO 3 در محدوده ۳۰ تا ۶۰ نانومتر بدست آمد. برای انجام فرایند فوم سازی از هیدرید تیتانیوم با ترکیب نشان داده شده در جدول ۲ استفاده شد.

هیدروژن در مذاب تشکیل شوند. پس از این زمان، نمونه های فومی که به صورت مذاب بودند از کوره خارج و در هوای آزاد سرد شدند تا فوم مذاب تبدیل به فوم جامد شود. در ادامه به منظور مشاهده ساختار سلولی و توزیع نانوذرات اکسید سیلیسیم در فوم های نانوکامپوزیتی حاصل، از میکروسکوپ الکترونی روبشی Olympus LEO 1450VP(35Kv) و میکروسکوپ نوری بهره گرفته شد و قطر سلول ها با استفاده از نرم افزار MIP محاسبه شد. سپس با داشتن حجم و وزن نمونه ها، چگالی نسبی و درصد تخلخل آن ها با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه گردید.

$$(1) \text{ درصد تخلخل} = [1 - (\rho_f / \rho_s)] \times 100$$

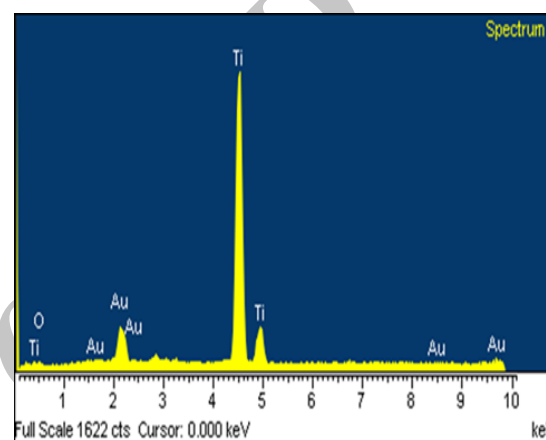
$$(2) \text{ چگالی نسبی} = \rho_f / \rho_s$$

در روابط ۱ و ۲،  $\rho_f$  چگالی فوم و  $\rho_s$  چگالی نانوکامپوزیت استفاده شده برای فوم سازی می باشد که با توجه به جرم و حجم نمونه ها، محاسبه می گردد.

پس از بررسی ساختارهای سلولی، آزمون فشار با استفاده از دستگاه ZWICK (Z250) بر روی هر نمونه انجام گرفت. برای این منظور نمونه های فومی به شکل مکعبی تهیه شدند تا از کماتش حین فشار جلوگیری شود، پوسته ایجاد شده روی آن ها به طور کامل جدا شد و نمونه ها تا فروپاشی کامل تحت آزمایش قرار گرفتند (شکل ۵). نرخ کرنش بر اساس تحقیقات کوزا [۲۵] و ملک جعفریان [۲۶]، بر اساس استاندارد JIS H 7902 ژاپن، در  $S^{-1} \times 10^{-3}$  تنظیم شد. مقدار تنش منطقه پایا<sup>۱</sup> نیز بر اساس استاندارد JIS H 7902، در محدوده کرنش ۲۰٪ تا ۳۰٪ محاسبه شد و کرنش چگالش با توجه به استاندارد DIN 50134 آلمان، در کرنش مطابق با ۱/۳ برابر تنش منطقه پایا بدست آمد. پس از انجام آزمون فشار، مقدار جذب انرژی در فوم های نانوکامپوزیتی تولید شده، بر اساس استاندارد DIN 50134، با توجه به سطح زیر منحنی تنش-کرنش آزمون فشار تا نقطه چگالش و با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد [۲۷].

$$(3) \text{ انرژی جذب} = \int_0^{\epsilon_D} \sigma d\epsilon \quad (\text{MJ/m}^3)$$

کافی توسط همزن مکانیکی هم زده شد، پروب دستگاه آلتراسونیک مدل BANRY با قطر پروب ۳ سانتی متر مطابق آنچه در شکل ۴ نشان داده شده است، وارد مذاب شده و به مدت ۱۰-۱۵ دقیقه (وابسته به میزان نانوذرات افزوده شده به مذاب)، با فرکانس ۲۰ kHz مذاب را متلاطم کرد تا فرایند ترشوندگی و پخش نانوذرات در مذاب آلیاژی را بیش از پیش بهبود ببخشد.



شکل (۳): آنالیز EDS پودرهای هیدرید تیتانیوم، بعد از عملیات حرارتی

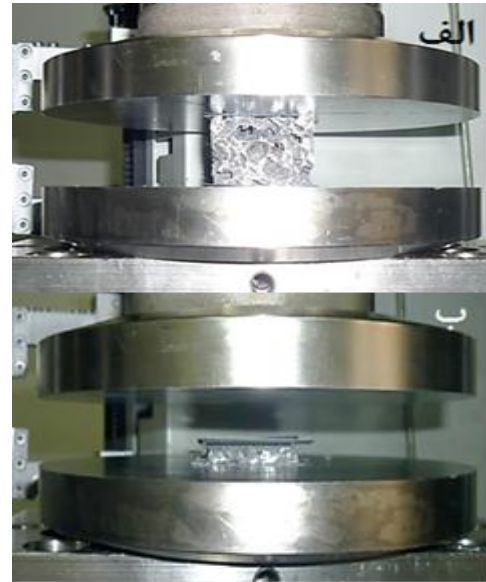


شکل (۴): دستگاه آلتراسونیک به همراه کوره استفاده شده در فرایند فوم سازی

پس از اینکه پروب دستگاه آلتراسونیک از مذاب خارج شد، برای هر نمونه ۱ درصد وزنی پودر هیدرید تیتانیوم پیش عملیات حرارتی شده به مذاب اضافه شد و مذاب بلافاصله به مدت ۱ دقیقه توسط همزن مکانیکی هم زده شد. سپس مخلوط در دمای  $660 \pm 10^\circ \text{C}$  به مدت ۲ دقیقه، داخل کوره نگه داشته شد تا هیدرید تیتانیوم به طور کامل تجزیه شده و حباب های گاز

متخلخلی که انتهای نمونه‌ها باقی می‌ماند، یکی از اثرات نسبتاً غیرقابل حذف در فوم‌های ساخته شده به روش ذوبی می‌باشد اما آنچه که اهمیت دارد این است که بتوان مقدار آن را به حداقل رساند و در کنار آن، ارتفاع بخش فوم شده را افزایش داد. کاهش مقدار جامد غیر متخلخل، نیازمند کنترل کردن عوامل بسیار زیادی همچون دمای فوم سازی، زمان فوم سازی و درصد فاز تقویت کننده، می‌باشد.

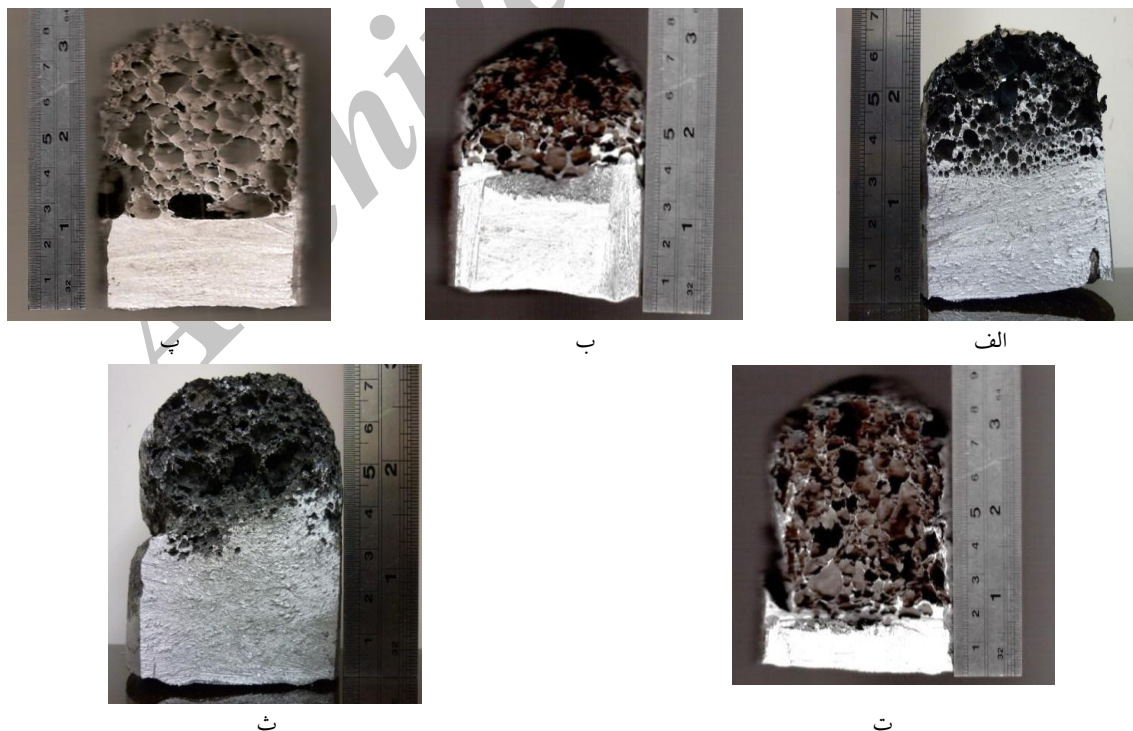
از آنجا که در نمونه‌های تولید شده در این مرحله تنها پارامتری که تغییر می‌کند ویسکوزیته مذاب است، می‌توان با قیاس ارتفاع بخش فوم شده و بخش غیر متخلخل با مقدار فاز تقویت کننده، بهترین درصد وزنی از نانوذرات اکسیدسیلیسیم را برای ساخت فوم بدست آورد (شکل ۷).



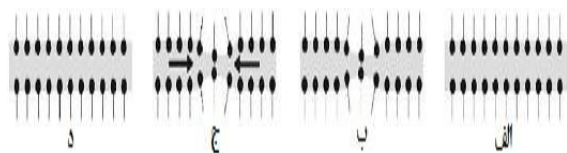
شکل (۵): یک نمونه فوم آلومینیومی: (الف): قبل، (ب): بعد از آزمون فشار

### ۳- نتایج و بحث

نمونه‌های فومی تولید شده با درصد‌های وزنی مختلف نانوذرات اکسید سیلیسیم در شکل ۶ نشان داده شده است. جامد غیر

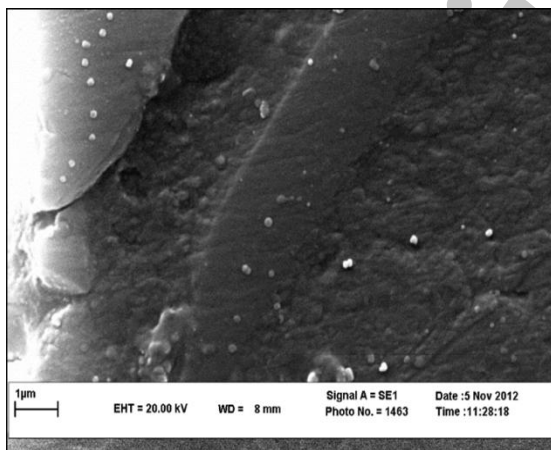


شکل (۶): تصویر مقطع طولی فوم‌های تولید شده: (الف): آلیاژ آلومینیم غیر کامپوزیتی، (ب): آلومینیم + ۰/۲۵٪ وزنی نانوسیلیس، (پ): آلومینیم + ۰/۵٪ وزنی نانوسیلیس، (ت): آلومینیم + ۰/۷۵٪ وزنی نانوسیلیس، (ث): آلومینیم + ۱/۰٪ وزنی نانوسیلیس



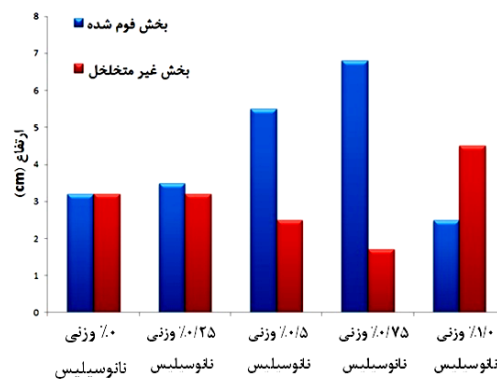
شکل (۸): مکانیزم پایداری دینامیکی فوم ها: (الف): حالت اولیه فیلم نازک، (ب): کشش سطحی موضعی بیشتر، به خاطر نازک شدن موضعی، (ج): گرادیان کشش سطحی، مولکول های سرفکتانت را به سمت قسمت نازک شده می کشد، (د): فیلم اصلاح شده با مکانیزم های انتقال سطح [۲۸]

پس از تهیه فوم های نانوکامپوزیتی، نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (از نوع الکترون برگشتی<sup>۱۳</sup>) نشان داده شده در شکل ۹ که از دیواره سلول گرفته شده است، توزیع یکنواخت نانوذرات اکسید سیلیسیم در دیواره سلول ها را نشان می دهد. این یکنواختی در پراکندگی نانوذرات سرامیکی در زمینه آلیاژ، ناشی از اثرات حفره زایی امواج مافوق صوت در مذاب می باشد که می توانند با اعمال انرژی، نانوذرات کلوخه ای شده در زمینه را از یکدیگر جدا کرده و آن ها را در مذاب پراکنده کنند.



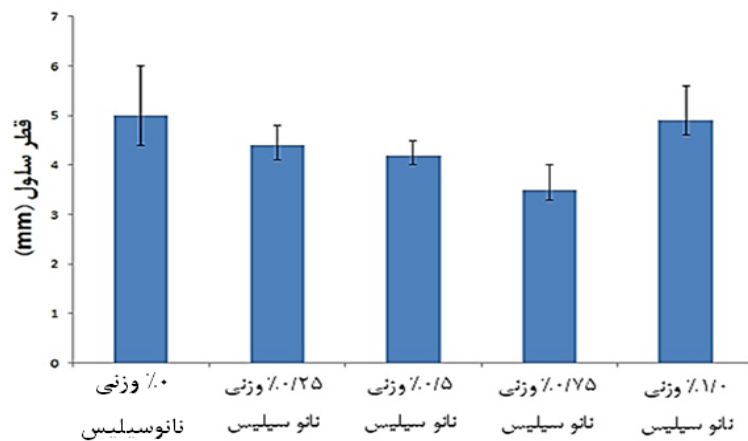
شکل (۹): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دیواره سلول در بزرگنمایی ۳۰۰۰۰ برابر

محاسبه قطر سلول (شکل ۱۰) با استفاده از نرم افزار Corel روی حداقل ۵ تصویر از مقطع عرضی نمونه ها که در هر تصویر به طور میانگین چهار سلول حضور داشتند (شکل ۱۱)، انجام گرفت.

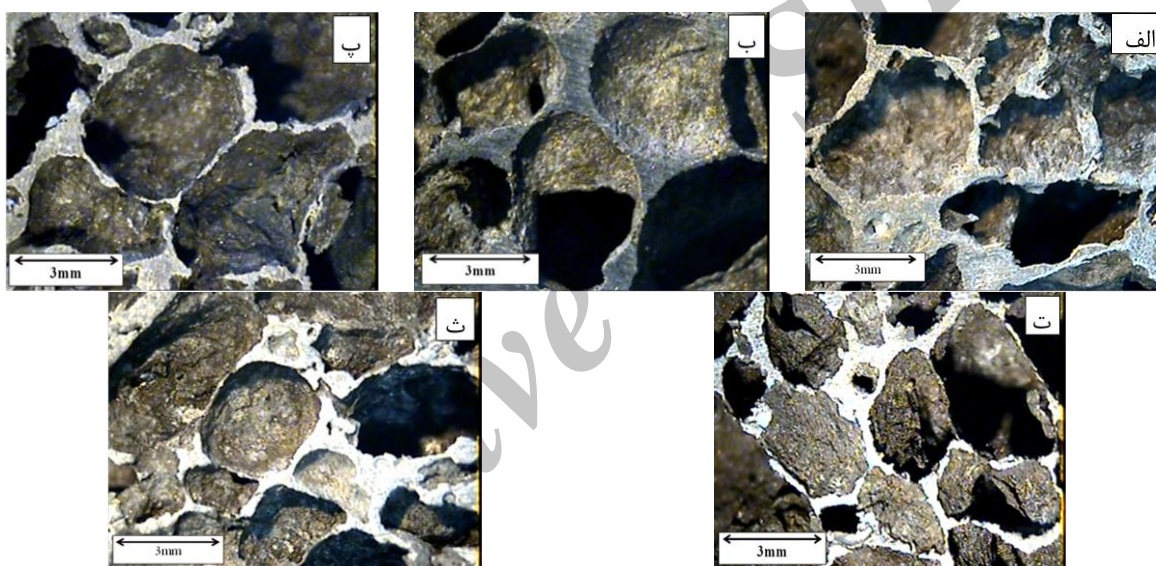


شکل (۷): ارتفاع بخش فوم شده و غیر متخلخل در فوم های تولید شده

همان طور که دیده می شود، مقدار مذاب تجمع کرده در بخش انتهایی نمونه آلومینیم غیر کامپوزیتی که ویسکوزیته پایینی داشته است و همچنین در نمونه تقویت شده با ۱٪ وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم، بیش از سایر نمونه هاست. این اثر به خوبی توسط تحقیقات گرنر<sup>۱۱</sup> [۲۸] توضیح داده شده است. طبق تحقیقات وی ذرات فاز تقویت کننده در فوم های فلزی مانند یک عامل فعال کننده سطحی (سرفکتانت)<sup>۱۲</sup> عمل می کنند که به پایداری فوم های فلزی کمک خواهند کرد. یکی از عواملی که باعث پایداری فوم های شامل سرفکتانت می شود، اثر گیبس است. بر طبق این اثر و همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، نازک شدن موضعی فیلم مذاب، منجر به کم شدن چگالی سرفکتانت در آن منطقه می شود. اما گرادیان کشش سطحی به سمت بخش نازک شده ی فیلم، منجر به از بین رفتن این حالت بحرانی می شود. حال اگر غلظت فاز تقویت کننده خیلی کم باشد، نیروی اعمال شده نیز کم است و این حالت بحرانی از بین نمی رود. از سوی دیگر، در غلظت های خیلی بالای فاز تقویت کننده نیز، نازک شدن موضعی، هیچ نوع گرادیان را در غلظت سرفکتانت ایجاد نمی کند زیرا مولکول های سرفکتانتی در حجم مذاب وجود دارند که می توانند بلافاصله به فصل مشترک نفوذ کنند و در نتیجه اجازه بوجود آمدن گرادیان کشش سطحی را نمی دهند. این اتفاق منجر خواهد شد که فرایند نازک شدن دیواره سلول ادامه یافته و ساختار فوم، از بین برود.



شکل (۱۰): بررسی تغییرات قطر سلول با تغییر درصد وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم



شکل (۱۱): تصویر سطح مقطع عرضی فوم های ساخته شده با ویسکوزیته های مختلف: (الف): آلیاژ آلومینیوم غیر کامپوزیتی، (ب): آلومینیوم + ۲۵٪ وزنی نانوسیلیس، (پ): آلومینیوم + ۵٪ وزنی نانوسیلیس، (ت): آلومینیوم + ۷.۵٪ وزنی نانوسیلیس، (ث): آلومینیوم + ۱۰٪ وزنی نانوسیلیس

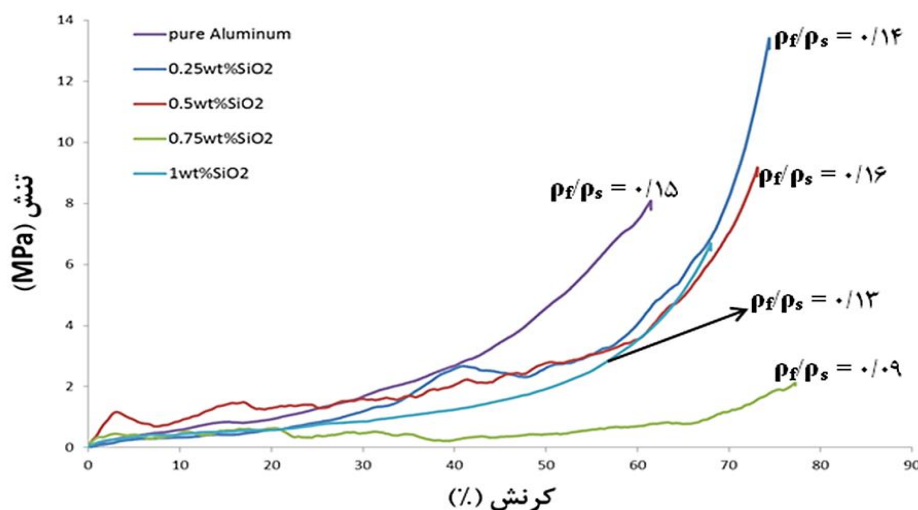
تجزیه شوند، در نتیجه ساختارهای سلولی بزرگ و غیر یکنواختی در زمینه تشکیل شده است. بعلاوه بررسی داده های بدست آمده از محاسبه اندازه سلول ها نشان داد که نمونه های ساخته شده با آلیاژ آلومینیوم غیر کامپوزیتی و نانوکامپوزیت تقویت شده با ۱٪ وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم، بیشترین پراکندگی را در اندازه سلول دارند که این اثر، نشان دهنده نامناسب بودن ویسکوزیته این دو نمونه برای پایدار شدن ساختارهای سلولی فوم می باشد.

نمودارهای نشان داده شده در شکل ۱۰ به خوبی نقش ویسکوزیته مذاب را در پایداری و یکنواختی ساختارهای سلولی نشان می دهند، از یک سو در نمونه آلیاژ آلومینیوم بدون فاز تقویت کننده، به خاطر کم بودن ویسکوزیته مذاب، حباب های گاز هیدروژن ناشی از تجزیه هیدرید تیتانیوم به خوبی در زمینه محبوس نشده اند و از سوی دیگر در نمونه تقویت شده با ۱۰٪ وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم، ویسکوزیته مذاب برای پایدار سازی ساختارهای سلولی، بیش از اندازه زیاد بوده است و اجازه نداده است که ذرات هیدرید تیتانیوم به خوبی در زمینه پراکنده و

اینکه مقادیر چگالی نسبی و تنش شروع منطقه پایا تقریباً در دو نمونه به هم نزدیک است اما مقدار جذب انرژی نمونه ۳ بسیار بیشتر از نمونه ۱ است. این اثر را می توان با نگاهی به نمودارهای رسم شده در شکل ۱۰ به خوبی درک کرد. همان طور که در شکل ۱۰ دیده می شود، نمونه تقویت شده با ۰/۵٪ وزنی نانو سیلیس (نمونه ۳) نسبت به نمونه بدون فاز تقویت کننده (نمونه ۱) هم، اندازه سول های کوچکتری دارد و هم از سویی دیگر، یکنواختی ساختارهای سلولی در آن بسیار بیشتر است که این دو اثر در کنار یکدیگر سبب شده اند میزان جذب انرژی در نمونه شماره ۳ اینگونه تغییر کند. این نتایج همگی بیانگر این مطلب می باشند که خواص ساختاری همچون اندازه سلول، پراکنندگی اندازه سلول و یکنواختی ساختارهای سلولی در کنار چگالی نسبی بر قابلیت جذب انرژی تاثیر می گذارند [۲۹]. در این راستا، موندال<sup>۱۴</sup> [۳۰] و همکارانش نیز نشان دادند که با کوچکترین تغییراتی در میزان چگالی نسبی فوم ها، خواص فشاری از جمله میزان جذب انرژی تغییر خواهد کرد، بعلاوه نشان دادند که برخی ناهماهنگی ها در مقادیر محاسبه شده از منحنی های تنش- کرنش دیده می شود که لزوم بررسی های بیشتر در زمینه خواص جذب انرژی فوم ها را می رساند.

پس از بررسی های ساختاری، فوم های نانوکامپوزیتی حاصل، تحت آزمون فشار قرار گرفتند که نتایج آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مقادیر چگالی نسبی، درصد تخلخل، تنش شروع منطقه پایا و جذب انرژی برای پنج نمونه نشان داده شده در شکل ۱۲، در جدول ۳ آورده شده است. همان طور که دیده می شود، تنش شروع منطقه پایا، تنها تابعی از چگالی نسبی بوده و با اندک تغییراتی در چگالی نسبی، تغییر یافته است. همین امر سبب شده است نمونه ۴ (نمونه تقویت شده با ۰/۷۵٪ وزنی نانو سیلیس) با اینکه فاز تقویت کننده بیشتری نسبت به نمونه های ماقبل خود دارد، اما به خاطر کمتر بودن چگالی نسبی اش، تنش شروع منطقه پایای کمتری را به نمایش بگذارد. از این رو می توان تغییرات چگالی نسبی و تنش شروع منطقه پایا را برای پنج نمونه نشان داده شده در جدول ۳، به صورت زیر خلاصه کرد: تغییرات چگالی نسبی ~ تغییرات تنش شروع منطقه پایا = نمونه ۳ > ۱ > ۲ > ۵ > ۴

اما جذب انرژی بر خلاف تنش شروع منطقه پایا، فقط از الگوی چگالی نسبی تبعیت نمی کند به طوریکه نمونه شماره ۴ با کمترین چگالی نسبی و تنش شروع منطقه پایا، مقدار جذب انرژی بیشتری نسبت به دو نمونه ۲ و ۵ از خود نشان داده است. به عنوان یک مثال بهتر، در مورد دو نمونه ۱ و ۳ می توان دید با



شکل (۱۲): آزمون فشار فوم های تولید شده با درصد های وزنی مختلف نانوذرات اکسید سیلیسیم



جدول (۳): نتایج حاصل از آزمون فشار و مشخصات فوم های تولید شده با درصد های وزنی مختلف فاز تقویت کننده

نمونه	درصد وزنی نانو سیلیس	چگالی نسبی	درصد تخلخل	تنش شروع منطقه پایا (MPa)	جذب انرژی ( $\text{MJ/m}^3$ )
۱	٪۰	۰/۱۵	۸۵	۱/۲۸	۲۴/۱۲
۲	٪۰/۲۵	۰/۱۴	۸۶	۰/۸۳	۱۳/۶۷
۳	٪۰/۵	۰/۱۶	۸۴	۱/۴۲	۴۶/۱۶
۴	٪۰/۷۵	۰/۰۹	۹۱	۰/۴۴	۲۳/۰۱
۵	٪۱/۰	۰/۱۳	۸۷	۰/۷۴	۱۸/۳۱

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق فوم های نانوکامپوزیتی آلومینیومی با پنج درصد وزنی مختلف نانوذرات اکسید سیلیسیم و با استفاده از تکنیک ریخته گری گردابی و با به کارگیری امواج مافوق صوت تهیه شدند. سپس نمونه های تولید شده تحت آزمون فشار و بررسی های ساختاری قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی های ساختاری نشان داد که فوم های تقویت شده با ۰/۷۵ و ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم، بیشترین ارتفاع ماده فوم شده و بهترین ساختار سلولی را نشان می دهند. نتایج حاصل از آزمون فشار نیز نشان داد که با افزایش چگالی نسبی، تنش شروع منطقه پایا افزایش می یابد اما جذب انرژی از الگوی چگالی نسبی تبعیت نمی کند و پارامترهای ساختاری، بر آن موثر خواهد بود.

#### ۵- تشکر و قدردانی

از آنجا که مراحل تولید فوم های نانوکامپوزیتی در آزمایشگاه گروه مواد جهاد دانشگاهی مشهد انجام شده است، وظیفه خود می دانیم از پرسنل محترم جهاد دانشگاهی مشهد، بالاخص جناب آقای مهندس ابروی و جناب آقای مهندس ملک جعفریان صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم.

#### ۶- منابع و مراجع

- [1] م. گلستانی پور، م. توکلی و س. م. زبرجد، "بررسی جذب انرژی پل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تحت آزمون سوراخ کاری"، مجله مواد نوین، جلد ۳، ص ۳۸-۲۵، ۱۳۹۱.
- [2] J. Banhart, "Metal Foams: Production and Stability", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 8, No. 9, pp. 781–794, 2006.
- [3] P. Kenesei, Cs. Kadar, Zs. Rajkovits & J. Lendvai, "The influence of cell-size distribution on the plastic deformation in metal foams", *Scripta Materialia*, Vol. 50, pp. 295–300, 2004.
- [4] G. Kavei & K. Ahmadi, "Processing aluminum foams using NaCl powder with controlled particle size and studying the microstructural and mechanical properties of the foams", *Special Topics & Reviews in Porous Media — An International Journal*, Vol. 1, No. 4, pp. 337–344, 2010.
- [5] J. Shena, G. Lu & D. Ruan, "Compressive behaviour of closed-cell aluminium foams at high strain rates", *Composites, Part B*, Vol. 41, pp. 678–685, 2010.
- [6] J. Banhart, "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, pp. 559–632, 2001.
- [7] V. C. Srivastava & K. L. Sahoo, "Processing, stabilization and applications of metallic foams. Art of science", *Materials Science-Poland*, Vol. 25, pp. 733-753, 2007.
- [8] B. Y. Hur, S. J. Park, K. H. Song, W. H. Lee, S. H. Park & S. Y. Kim, "Foaming characterization reological, thermal mechanical properties of Al alloy foam", *International Conference: ADVANCED METALLIC MATERIALS*, Smolenice, Slovakia, 2003.
- [9] W. Jiejun, L. Chenggong & Wang Dianbin, "Damping and sound absorption properties of particle reinforced Al matrix composite foams",

- [20] M. F. Ashby, A. G. Evans & N. A. Fleck, "Metal Foams: A Design Guide", Butterworth-Heinemann, United States of America, 2000.
- [21] P. Pinto, N. Peixinho, F. Silva & D. Soares, "Compressive properties and energy absorption of aluminum foams with modified cellular geometry", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, pp. 571-577, 2014.
- [22] L. Filice, F. Gagliardi & D. Umbrello, "Simulation of aluminum foam behavior in compression tests", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 34, pp. 129-137, 2009.
- [23] K. Kadoi, N. Babcsan & H. Nakae, "Heat Treatment of TiH<sub>2</sub> Powder to Control Decomposition Phenomenon for Aluminum Foam Fabrication by Melt Route", *Materials Transactions*, Vol. 50, pp. 727-733, 2009.
- [24] B. Matijasevic-Lux, J. Banhart, S. Fiechter, O. Gorke & N. Wanderka, "Modification of titanium hydride for Improved aluminum foam manufacture", *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 1887-1900, 2006.
- [25] E. Koza, M. Leonowicz, S. Wojciechowski & F. Simancik, "Compressive strength of aluminium foams", *Materials Letters*, Vol. 58, pp. 132-135, 2004.
- [۲۶] م. ملک جعفریان، س. خ. ا. صدر نژاد، م. گلستانی پور و م. ص. ابروی، "بررسی خواص فشاری فوم آلومینیومی سلول بسته"، چهارمین همایش مشترک انجمن مهندسان متالورژی و جامعه علمی ریخته گری ایران، ۱۳۸۹.
- [27] U. Ramamurty & A. Paul, "Variability in mechanical properties of a metal foam", *Acta Materialia*, Vol. 52X, pp. 869-876, 2003.
- [28] C. Koerner, "Integral Foam Molding of Light Metals", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2008.
- [29] T. Hamada, H. Kanahashi, T. Miyoshi & N. Kanetake, "Effects of the Strain Rate and Alloying on the Compression Characteristics of Closed Cell Aluminum Foams", *Materials Transactions*, Vol. 50, pp. 1418-1425, 2009.
- Composites Science and Technology, Vol. 63, pp. 569-574, 2003.
- [10] Jeon & T. Asahina, "The effect of structural defects on the compressive behavior of closed-cell Al foam", *Acta Materialia*, Vol. 53, pp. 3415-3423, 2005.
- [11] X.F. Tao & Y.Y. Zhao, "Compressive behavior of Al matrix syntactic foams toughened with Al particles", *Scripta Materialia*, Vol. 61, pp. 461-464, 2009.
- [12] K. M. Mussert, W.P. Vellinga & A. Bakker, "A nano-indentation study on the mechanical behaviour of the matrix material in an AA6061-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC", *Journal of Materials Science*, Vol. 37, pp. 789-794, 2002.
- [13] Y. Yang, J. Lan & X. Li, "Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy", *Materials Science and Engineering*, Vol. 380, pp. 378-383, 2004.
- [14] S. M. C. Torres, "Generation of heterogeneous cellular structures by sonication", ph. D. Thesis, University of Heriot-Watt, United Kingdom, 2008.
- [15] J. Hashim, L. Looney & M.S.J. Hashmi, "The wettability of SiC particles by molten aluminium alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, pp. 324-328, 2001.
- [16] K. S. Suslick, "The chemical and physical effects of ultrasound", *Scientific American*, pp. 80-86, 1989.
- [17] J. Wang, Z. He, J. Wu & Z. Wan, "Effect of ultrasonic wave on melt foaming process of aluminum foam", *Advanced Materials Research*, Vol. 97-101, pp. 227-230, 2010.
- [18] X. Li, Y. Yang & X. Cheng, "Ultrasonic-assisted fabrication of metal matrix nanocomposites", *Materials Science*, Vol. 39, pp. 3211-3212, 2004.
- [19] K. S. Suslick, Y. Didenko & M. Fang, "Acoustic cavitation and its chemical consequences", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Vol. 357, pp. 335-353, 1999.

CaCO<sub>3</sub> as foaming agent”, Materials Science & Engineering A, Vol. 560, pp. 601–610, 2013.

[30] D. P. Mondal, N. Jha, B. Gull, S. Das & A. Badkul, “Microarchitecture and compressive deformation behavior of Al-alloy (LM13)-cenosphere hybrid Al-foam prepared using

۲- پی نوشت

- [1] Ultrasonic
- [2] Melt route
- [3] Cavitation
- [4] Cavitation bubble
- [5] Stable cavitation
- [6] Transient cavitation
- [7] Hot spot
- [8] Kadoi
- [9] Matijasevic-Lux
- [10] Plateau
- [11] Koerner
- [12] Surfactant
- [13] Backscatter
- [14] Mondal

Archive of SID