

Al-SiO₂ nanocomposite foam Production by ultrasonic technique using pure and heat treated TiH₂ foaming agent

Abstract

In this study, aluminum matrix nanocomposite reinforced with silicon dioxide nanoparticles (SiO₂) was fabricated using ultrasonic technique. Then Al-0.5 wt. % nanocomposite foam fabricated by direct foaming technique using 1 wt.% and 2 wt.% TiH₂ foaming agent (Untreated and pre-treated in 450 °C for 3 hours in air). Microstructural analyses were done by optical and scanning electron microscope to ensure the production of nanocomposite foam. The results of microscopic evaluation showed the polyhedral structure of cells and appropriate distribution of nanoparticles in the cell walls. Also according to the TGA results and microstructural evaluations it is observed by using 1wt% of pre-treated TiH₂, not only foam height become greater but also uniformity of the foam structure will improve.

Keywords: ultrasonic, nanocomposite foam, TiH₂, microstructural evaluations, TGA

ساخت فوم نانوکامپوزیتی Al-SiO₂ با کمک امواج مافوق صوت و عامل فوم ساز TiH₂ خالص و عملیات حرارتی شده

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از امواج مافوق صوت و ریخته گری گردابی، نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانوذرات اکسید سیلیسیم (SiO₂) تولید شد و سپس با استفاده از روش فوم سازی مستقیم مذاب و با به کارگیری ۱٪ وزنی و ۲٪ وزنی عامل فوم ساز هیدرید تیتانیوم (TiH₂) در دو حالت خالص و پیش عملیات حرارتی شده در محیط هوا در ۴۵۰ °C و ۳ h، فوم نانوکامپوزیتی Al-0.5 wt.% SiO₂ تولید گردید. در ادامه، بررسی‌های ریزساختاری جهت اطمینان از تولید فوم نانوکامپوزیتی و ارزیابی نقش نانوذرات، به وسیله میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی انجام پذیرفت. نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی، ساختارهای چند وجهی سلول‌ها و توزیع مناسب نانوذرات در دیواره سلول‌ها را نشان داد. هم‌چنین با توجه به نتایج TGA و بررسی‌های میکروسکوپی مشاهده شد که با استفاده از ۱٪ وزنی عامل فوم ساز TiH₂ پیش عملیات حرارتی شده، نه تنها ارتفاع منطقه فوم شده بیشتر می شود بلکه یکنواختی ساختار نیز بهبود خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: امواج مافوق صوت، فوم نانوکامپوزیتی، TiH₂، بررسی‌های ریزساختاری، TGA

مقدمه

در سال‌های اخیر در صنایع گوناگون نظیر خودروسازی، هوافضا، صنایع نظامی و... توجه ویژه‌ای به فوم‌های فلزی به عنوان یک ساختار سبک با قابلیت جذب انرژی شده است. روش‌های تولید فوم‌های فلزی بسیار متنوع است. در این بین تکنیک‌های فوم سازی مستقیم مذاب با استفاده از عامل فوم ساز برای تولید در ابعاد صنعتی مناسب می‌باشد، چرا که دسترسی به تجهیزات تولید در آن آسان و هزینه آن به مراتب کمتر از سایر روش‌ها است (Ramakrishnan، ۱۹۹۶؛ Hashim، ۲۰۰۱؛ گلستانی پور، ۱۳۹۱) نمی‌توان مذاب فلزات را به آسانی و با افزودن عامل فوم ساز به فوم تبدیل کرد. حرکت و جذب مذاب به سمت پایین دیواره حباب ها معمولاً خیلی سریع رخ می‌دهد و نمی‌تواند برای مدت زمانی طولانی پایدار باقی بماند و منجر به تخریب فوم می‌شود. به این ترتیب لازم است جهت ممانعت از خروج و یا پیوستن حباب‌های گازی به یکدیگر، ویسکوزیته مذاب افزایش یابد. افزودن ذرات کوچک نامحلول و یا ذراتی که به آرامی حل می‌شوند، ویسکوزیته مذاب آلومینیوم را زیاد می‌کنند و مانع از حرکت مذاب در غشاء حباب می‌شوند که به پایداری فوم منجر می‌شود (Curran، ۲۰۰۳؛ IP، ۱۹۹۹؛ Kruglyakov، ۲۰۰۸).

ذرات سرامیکی اضافه شده در فرایند فوم سازی، همواره در ابعاد میکرون بوده‌اند که استفاده از مقادیر بالای این ذرات در فوم سازی، باعث می‌شود انعطاف پذیری به شدت کاهش یابد. یکی از موارد جالب برای استفاده از نانوذرات سرامیکی به عنوان فاز تقویت کننده، کاربرد آنها برای استحکام بخشی زمینه فلزی است درحالی‌که انعطاف‌پذیری خوبی را نیز حفظ می‌کنند که به این پیش ماده فوم سازی، نانو کامپوزیت زمینه فلزی (MMNC)^۱ گفته می‌شود (Mussert، ۲۰۰۲؛ Yang، ۲۰۰۴).

فرایند ترکیب کردن نانوذرات با استفاده از امواج مافوق صوت^۲ که بر مبنای روش ذوبی^۳ بوده و اخیراً معرفی شده است، روشی مناسب برای پخش یکنواخت نانوذرات و تولید نانو کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌باشد. امواج مافوق صوت به صورت موج سینوسی از میان یک مذاب عبور کرده و سیکل انبساط ایجاد شده در اثر آن، یک فشار منفی را روی مذاب ایجاد می‌کند که مولکول‌ها را به دور از یکدیگر می‌کشد. اگر موج ایجاد شده به اندازه کافی شدید باشد، سیکل انبساط ایجاد شده می‌تواند حفراتی را در مذاب ایجاد کند که به این فرایند حفره‌زایی^۴ گفته می‌شود. به خاطر نوع سینوسی میدان موج صوتی، حباب‌های گازی کوچک ایجاد شده، حالت‌های متناوب انبساط و انقباض را تجربه می‌کنند و اگر اندازه حباب، توان موج ایجاد شده و یا فرکانس، بیش‌تر از یک آستانه خاص بشوند، فرایند حفره‌زایی گذرا^۵ ایجاد می‌شود (Torres، ۲۰۰۸؛ Suslick، ۱۹۸۹).

در این فرایند، حباب‌ها مدت زیادی پایدار نیستند و فشار ایجاد شده در مراحل بعدی باعث ترکیدن حباب‌ها می‌شود. این همان پدیده انفجار حفره^۶ است که می‌تواند یک محیط غیر معمولی را برای واکنش‌های شیمیایی ایجاد کند. لحظه انفجار را نقطه داغ^۷ می‌نامند که می‌تواند به صورت مقطعی دمایی تا حدود ۵۰۰۰°C و فشار ۱۰۰۰ atm و نرخ گرم کردن و سرد کردن بیش‌تر از K/s ۱۰^{۱۰} را ایجاد کند که به گونه موثری نانوذرات را در فلزات آلیاژی پراکنده کرده و ترشوندگی آنها را افزایش می‌دهد. بنابراین، ساخت محصولات ریخته‌گری شده نانو کامپوزیتی با کارایی بالا را از نظر عملی امکان‌پذیر می‌سازد. از امواج مافوق صوت حتی

¹ metal matrix nanocomposites

² Ultrasonic

³ Melt route

⁴ Cavitation

⁵ Transient cavitation

⁶ Implosion of the cavity

⁷ Hot spot

میتوان به عنوان یک عامل حذف کننده حفرات گازی در ریخته‌گری فلزات استفاده کرد (Wang, ۲۰۰۴, Yang, ۲۰۱۰, Suslick, ۱۹۹۹).

ذرات هیدرید تیتانیوم معمولاً به عنوان یک عامل حباب‌زا در فوم‌سازی آلیاژهای با نقطه ذوب پایین مانند آلومینیم، روی و آلیاژهای پایه منیزیمی استفاده می‌شوند (Jime'nez, ۲۰۱۲, Yang, ۲۰۰۵). برای ایجاد یک ساختار فومی مناسب، دمای تجزیه عامل فوم-سازی و دمای ذوب فلز بایستی با یکدیگر متناسب باشند. اما آزاد شدن گاز هیدروژن از پودر هیدرید تیتانیوم در دمایی حدود ۴۰۰°C شروع می‌شود که به طور قابل ملاحظه‌ای زیر دمای ذوب بیشتر آلیاژهای آلومینیم تجاری است. این اختلاف بین دمای تجزیه هیدرید تیتانیوم و دمای ذوب آلیاژهای آلومینیمی باعث ایجاد بی‌نظمی در ساختار نهایی فوم می‌شود (Zeppelin, ۲۰۰۳, Matijasevic-lux, ۲۰۰۶). به تازگی چند روش برای به تاخیر انداختن دمای آزاد شدن گاز هیدروژن از هیدرید تیتانیوم شناسایی شده است، مانند عملیات حرارتی کردن آن در محیط هوا و پوشش دادن با لایه‌های آلومینا و لایه‌های سیلیس که روش‌های پوشش دهی معمولاً به خاطر هزینه بالای آن، کاربرد زیادی ندارند (Kadoi, ۲۰۰۹). اگر پودر هیدرید تیتانیوم در هوا پیش گرمایش شود، یک لایه اکسیدی روی سطح ذرات تشکیل می‌شود. این لایه اکسیدی، نه تنها دمای آزاد شدن گاز از ذرات را به تاخیر می‌اندازد بلکه فواصل زمانی بین آزاد شدن مولکول‌های هیدروژن از ذرات هیدرید تیتانیوم را نیز به تاخیر می‌اندازد که می‌تواند زمان در دسترس برای انجام فرایند فوم سازی را افزایش دهد (Matijasevic-Lux, ۲۰۰۶).

تاکنون پژوهش جامعی در جهت تولید فوم نانوکامپوزیتی تقویت شده با نانوذرات، با کمک امواج مافوق صوت و بررسی اثر پیش عملیات حرارتی کردن عامل فوم سازی در ساخت آن‌ها، صورت نگرفته است. از این رو هدف از انجام این پژوهش، تولید فوم نانوکامپوزیتی سلول بسته با استفاده از نانوذرات اکسید سیلیسیم به روش ذوبی و با کمک امواج مافوق صوت و بررسی شرایط بهینه فوم سازی می‌باشد.

روش پژوهش

آلیاژ آلومینیوم با ترکیب نشان داده شده در جدول ۱ به عنوان ماده زمینه انتخاب شد. برای انتخاب یک تقویت کننده مناسب برای نانوکامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با نانوذرات، فاکتورهای مهمی مانند چگالی، ترشوندگی و واکنش‌پذیری شیمیایی در دماهای بالا بایستی در نظر گرفته شود (Donthamsetty, ۲۰۱۰). بر این اساس، اکسید سیلیسیم به خاطر قابلیت ترشوندگی خوب آن و چگالی تقریباً یکسان با آلیاژهای آلومینیوم، به عنوان ماده تقویت کننده استفاده شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ زمینه.

عنصر	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Al
درصد وزنی	۸/۶۲	۱/۱۶	۰/۸۳	۰/۱۴	۰/۲۳	۱/۴۶	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۰۲	باقیمانده

پودر هیدرید تیتانیوم با ترکیب نشان داده شده در جدول ۲ به عنوان عامل فوم‌سازی استفاده شد که برای بررسی اثر پیش عملیات حرارتی کردن آن‌ها روی رفتار آزاد شدن گاز، به مدت ۳ ساعت در دمای ۴۵۰°C تحت فرایند عملیات حرارتی در محیط هوا قرار گرفتند. سپس از هر دو پودر هیدرید تیتانیوم خالص و پودر هیدرید تیتانیوم عملیات حرارتی شده، آزمون TGA در محیط هوا و با نرخ گرمایش ۱۰ °C/min، گرفته شد.

جدول ۲. مشخصات پودر هیدرید تیتانیوم استفاده شده به عنوان عامل فوم سازی.

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

برای تولید محصول فومی، ابتدا شمش آلیاژی در کوره‌ای با دمای 750°C ذوب شد و به منظور افزایش ترشوندگی ذرات سرامیکی، $3/5$ درصد وزنی آلیاژ Al-Mg به مذاب اضافه شد. سپس $0/5$ درصد وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم با میانگین ابعاد 40 نانومتر با استفاده از تکنیک ریخته‌گری گردابی^۱ در دمای $680-650^\circ\text{C}$ و با سرعت 700 دور بر دقیقه به آلومینیوم مذاب اضافه شدند. پس از اینکه مذاب به مدت کافی به کمک همزن مکانیکی هم زده شد، پروب دستگاه آلتراسونیک مدل BANRY، مطابق آن چه در شکل ۳ نشان داده شده است، وارد مذاب شده و با فرکانس 20kHz به مدت $15-10$ دقیقه مذاب را متلاطم کرد تا فرایند ترشوندگی و پخش نانو ذرات در مذاب آلیاژی را بیش از پیش بهبود ببخشد.

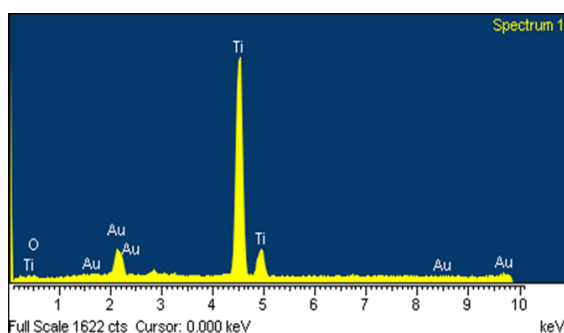
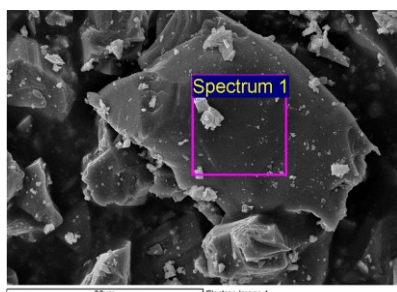
پس از آن، پودر هیدرید تیتانیوم (خالص و پیش عملیات حرارتی شده) به مذاب اضافه شدند و مخلوط بلافاصله به مدت 1 دقیقه به وسیله همزن مکانیکی هم زده شد. سپس مخلوط در دمای $660 \pm 10^\circ\text{C}$ به مدت $2 \pm 0/25$ دقیقه نگه داشته شد تا هیدرید تیتانیوم تجزیه شده و تولید گاز هیدروژن نماید. در ادامه فوم تولید شده از کوره خارج و در هوا خنک شد. به منظور مشاهده ساختار سلولی و توزیع نانوذرات اکسید سیلیسیم در فوم نانوکامپوزیتی حاصل، بررسی‌های میکروسکوپی به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (LEO 1450VP(35kV و میکروسکوپ نوری Olympus انجام گرفت.

تجزیه و تحلیل داده ها

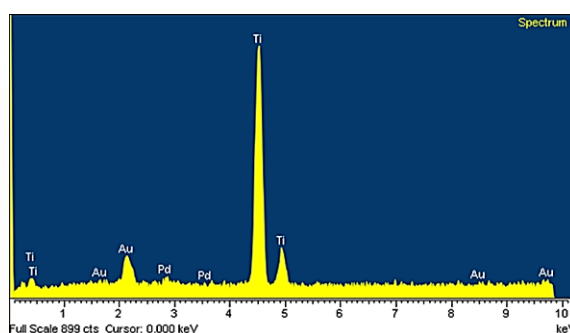
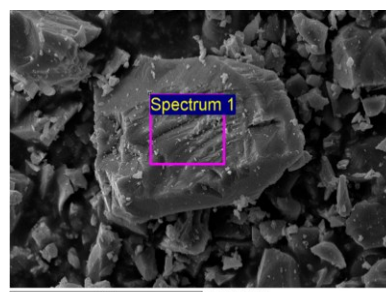
نتیجه آنالیز EDS پودرهای هیدرید تیتانیوم، قبل و بعد از عملیات حرارتی، در شکل ۱ نشان داده شده است.

محاسبه درصد وزنی عناصر، بر طبق آنالیز EDS نمونه پیش عملیات حرارتی شده در محیط هوا، حضور لایه اکسیدی Ti_3O روی سطح ذرات هیدرید تیتانیوم را ثابت می کند (جدول ۳). کادوی و همکارانش (۲۰۰۹) نیز نشان دادند که با انجام عملیات حرارتی پودرهای هیدرید تیتانیوم به مدت 3 ساعت در دمای 450°C ، لایه های اکسیدی TiO_2 و Ti_3O روی سطح پودرهای هیدرید تیتانیوم تشکیل می‌شوند که با به تاخیر انداختن زمان آزاد شدن گاز از پودرهای هیدرید تیتانیوم باعث بهبود ساختار فوم های تشکیل شده، می شوند.

¹ Stir Casting



(ب)



(الف)

شکل ۱. نتیجه آنالیز EDS پودرهای هیدرید تیتانیم. (الف) قبل، (ب) بعد از عملیات حرارتی.

جدول ۳. درصد وزنی عناصر موجود در لایه اکسیدی روی سطح ذرات هیدرید تیتانیم.

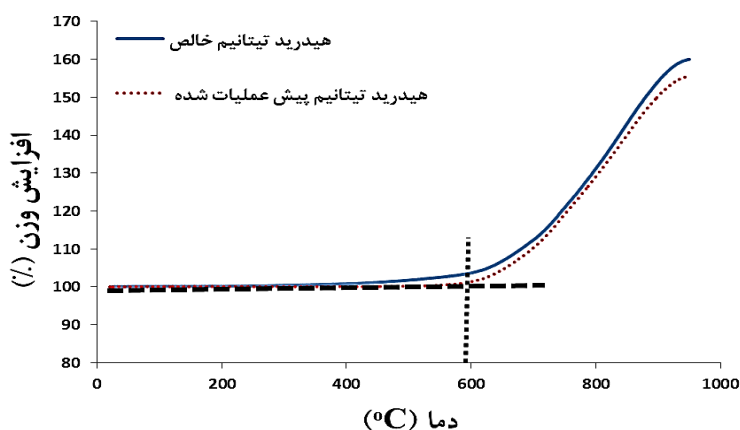
اکسیژن	تیتانیم	عنصر
۱۱/۴۲	۸۸/۵۸	درصد وزنی (wt%)

برای انجام فرایند فوم سازی، چهار نمونه با ویژگی‌های نشان داده شده در جدول ۴ ریخته‌گری شدند تا اثر انجام عملیات حرارتی پودر هیدرید تیتانیم و درصد وزنی آن، بر ساختار فوم بررسی شود.

نتایج حاصل از آزمون TGA پودرهای TiH_2 نشان می‌دهد که پودرهای هیدرید تیتانیم پیش عملیات حرارتی شده به مدت ۳ ساعت در دمای $450^\circ C$ ، تا رسیدن به دمای $600^\circ C$ که نزدیک به دمای فوم‌سازی می‌باشد، هیچ اکسید شدن مجددی را نشان نمی‌دهند. این اثر باعث یکنواختی رفتار آزاد شدن گاز از ذرات هیدرید تیتانیم، زمانی که به مذاب افزوده می‌شوند، خواهد شد که بالنتیجه منجر به تشکیل ساختارهای سلولی یکنواخت در محصول فوم نهایی می‌شود (شکل ۲).

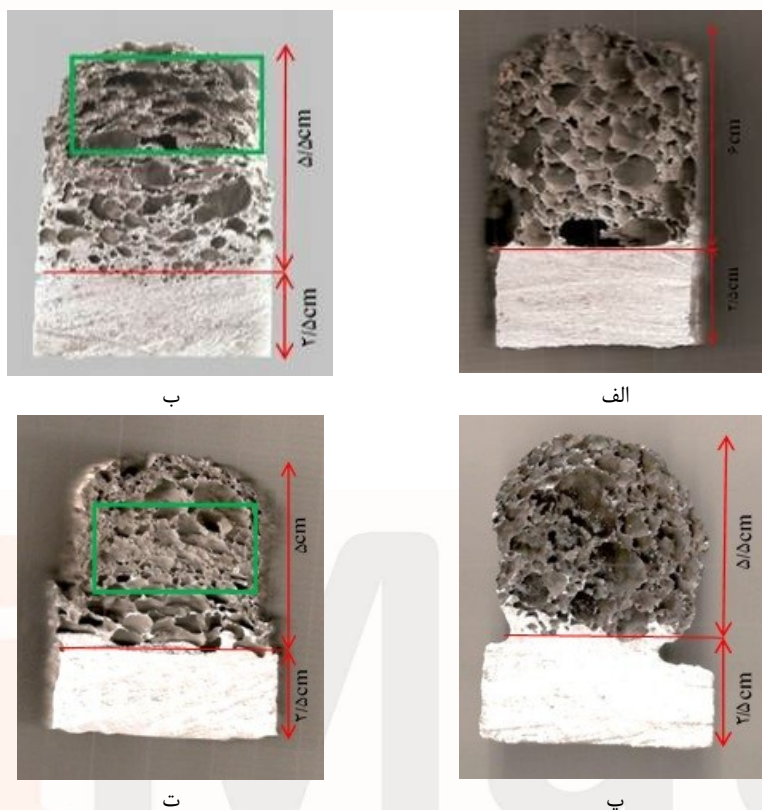
جدول ۴. مشخصات فوم‌های ساخته شده با درصد‌های وزنی مختلف هیدرید تیتانیوم پیش عملیات حرارتی شده و خالص.

نمونه	هیدرید تیتانیوم (درصد وزنی)	عملیات حرارتی	مقدار پودر نانو سیلیس استفاده شده	دمای فوم سازی (°C)
۱	۱	✓	۰/۵ درصد وزنی	۶۵۰±۱۰
۲	۱	×	۰/۵ درصد وزنی	۶۵۰±۱۰
۳	۲	✓	۰/۵ درصد وزنی	۶۵۰±۱۰
۴	۲	×	۰/۵ درصد وزنی	۶۵۰±۱۰



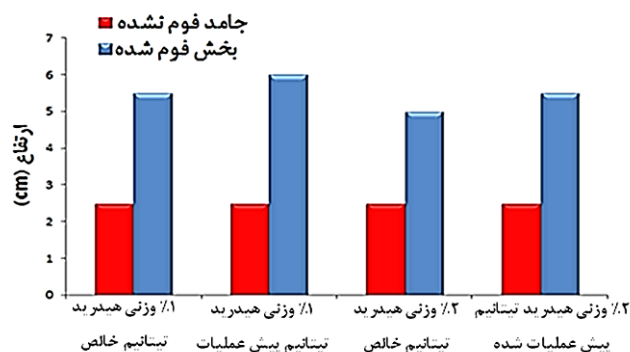
شکل ۲. نتایج حاصل از آزمون TGA پودرهای هیدرید تیتانیوم خالص و پیش عملیات حرارتی شده در محیط هوا.

تصاویر نمونه‌های ریخته‌گری شده، بعد از برش در راستای مقطع طولی آن‌ها، در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از مشاهده تصاویر مقطع طولی نمونه‌های فوم شده در شکل ۳ دیده می‌شود، در هر دو درصد وزنی مختلف از پودرهای هیدرید تیتانیوم (۱٪ و ۲٪)، فوم حاصل از افزودن پودرهای عملیات حرارتی شده به عنوان عامل فوم‌سازی، ارتفاع منطقه‌ی فوم شده‌ی بیشتری را نشان می‌دهد زیرا حضور لایه اکسیدی روی سطح ذرات هیدرید تیتانیوم باعث به تأخیر انداختن زمان آزاد شدن گاز شده و بنابراین زمان در دسترس برای تشکیل حفرات و پایداری آن‌ها بیشتر شده است. بعلاوه همان‌طور که در تصاویر نمونه‌های فوم شده با هیدرید تیتانیوم خالص که با کادر سبز رنگ مشخص شده است، دیده می‌شود، در این نمونه‌ها، برخی از سلول‌های فوم فروپاشیده شده‌اند.



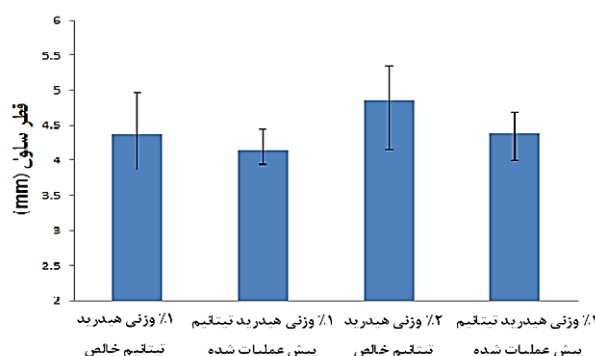
شکل ۳. ساختار فوم‌های بدست آمده با استفاده از عامل فوم ساز هیدرید تیتانیم، (الف) ۱٪ وزنی هیدرید تیتانیم پیش عملیات حرارتی شده، (ب) ۱٪ وزنی هیدرید تیتانیم خالص، (پ) ۲٪ وزنی هیدرید تیتانیم پیش عملیات حرارتی شده، (ت) ۲٪ وزنی هیدرید تیتانیم خالص

نتایج حاصل از محاسبه ارتفاع منطقه فوم شده و ارتفاع جامد فوم نشده در نمونه‌های تولید شده با درصد های وزنی و شرایط پیش عملیات حرارتی شدن مختلف عامل فوم سازی، در شکل ۴ آورده شده است. همان طور که دیده می‌شود، نمونه‌ای که با استفاده از ۱٪ وزنی پودر هیدرید تیتانیم پیش عملیات حرارتی شده، تولید شده است، بیشترین ارتفاع منطقه فوم شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقایسه ارتفاع منطقه فوم شده و جامد فوم نشده، در نمونه‌های ساخته شده با درصد های وزنی مختلف از پودر هیدرید تیتانیم خالص و پیش عملیات حرارتی شده.

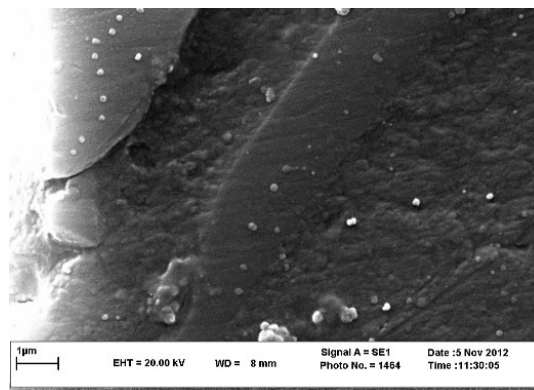
برای مشخص شدن بهترین درصد وزنی پودر هیدرید تیتانیم (در حالت‌های مختلف پیش عملیات حرارتی شده و خالص) برای ساخت فوم، علاوه بر بررسی‌های ماکروسکوپی لازم است که اندازه ساختارهای سلولی نیز بررسی شود، زیرا هرچه اندازه سلول‌های بدست آمده یکنواخت‌تر باشد، خواص مکانیکی فوم حاصل نیز بهتر خواهد شد (Liu, ۲۰۰۸). از این رو بررسی اندازه سلول (قطر سلول) فوم‌های ساخته شده با درصد‌های وزنی مختلف از پودرهای هیدرید تیتانیم خالص و پیش عملیات حرارتی شده با استفاده از نرم افزار corel انجام گرفت (شکل ۵).



شکل ۵. بررسی تغییرات قطر سلول با تغییر درصد وزنی و شرایط عملیات حرارتی عامل فوم‌سازی.

بررسی شکل ۵ نشان می‌دهد که: (۱) در یک درصد وزنی ثابت از عامل فوم سازی، با انجام عملیات حرارتی، اندازه سلول‌ها کوچکتر و یکنواخت تر می‌شود و (۲) با کاهش درصد وزنی عامل فوم سازی در هر دو حالت پیش عملیات حرارتی شده و پودر خالص، اندازه سلول‌ها کوچک می‌شوند.

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده در شکل ۶ که از مرز دیواره سلول گرفته شده است علاوه بر این که نقش ذرات در پایداری دیواره‌های سلول را به خوبی نشان می‌دهد، توزیع یکنواخت نانوذرات اکسید سیلیسیم در دیواره سلول‌ها را نیز بازگو می‌کند. این یکنواختی در پراکندگی نانوذرات سرامیکی در زمینه آلیاژ، ناشی از اثرات حفره‌زایی امواج مافوق صوت در ماده می‌باشد که می‌تواند با اعمال انرژی، نانو ذرات کلوخه‌ای شده در زمینه را از یکدیگر جدا کرده و آنها را در مذاب پراکنده کند.



شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از دیواره سلول در بزرگنمایی ۳۰۰۰۰ برابر.

نتیجه گیری

در این پژوهش، فوم نانوکامپوزیتی SiO_2 -0.5wt.% Al با استفاده از تکنیک‌های ریخته‌گری گردابی و امواج مافوق صوت و به وسیله عامل فوم ساز هیدرید تیتانیم در دو حالت خالص و پیش عملیات حرارتی شده ($3\text{h}/450^\circ\text{C}$) در محیط هوا، تولید گردید. ساختار چند وجهی سلول‌ها در محصول تولیدی و همچنین توزیع مناسب و یکنواخت نانو ذرات در زمینه نانوکامپوزیت حاصل، گویای موفقیت در تولید فوم نانوکامپوزیتی بود. نتیجه آنالیز TGA عملکرد بهتر عامل فوم ساز TiH_2 بعد از پیش عملیات حرارتی کردن را نشان داد که بررسی های انجام شده در رابطه با ارتفاع منطقه فوم شده و اندازه سلول ها، این مشاهده را تایید کردند.

منابع و مراجع

- گلستانی پور، مسعود و توکلی، مینو. زمستان ۹۱. "بررسی جذب انرژی پل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تحت آزمون سوراخ کاری"، مجله مواد نوین، جلد ۳، شماره ۲، صفحه ۳۸-۲۵.
- Curran, David C. (2003). "Aluminum foam production using calcium carbonate as a foaming agent", ph. D. Thesis University of Cambridge, United Kingdom.
- Donthamsetty, S., Rao, N. (2010). "Investigation on mechanical properties of A356 nanocomposites fabricated by ultrasonic assisted cavitation", Mechanical Engineering, Vol. 41, pp. 121-129.
- Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M. S. J. (2001). "The wettability of SiC particles by molten aluminum alloy", Materials processing Technology, Vol. 119, pp. 324-328.
- IP, S. W., Wang, Y. and Togury, J. M. (1999). "Aluminum foam stabilization by solid particles", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 38, pp. 81-92.
- Jime'nez, Garcia-Moreno, F. and Rack, A. (2012). "Partial Decomposition of TiH_2 Studied in Situ by Energy-Dispersive Diffraction and Ex situ by Diffraction Microtomography of Hard X-Ray Synchrotron Radiation", Scripta Materialia, 66, 757-760.
- Kadoi, K., Babcsan, N. and Nakae, H. (2009). "Heat Treatment of TiH_2 Powder to Control Decomposition Phenomenon for Aluminum Foam Fabrication by Melt Route", Materials Transactions, 50, 727-733.
- Kruglyakov, P. M., Karakashev, S. I., Nguyen, A. V. and Vilkova, N. G. (2008). "Foam drainage", Current Opinion in Colloid & Interface Science, Vol. 13, pp. 163-170.
- Liu, J., Yu, S., Zhu, X., Wei, M., Luo, Y., Liu, Y. (2008). "The Compressive Properties of Closed-Cell Zn-22Al Foams", Materials Letters, 62, 683-685.
- Matijasevic-Lux, B., Banhart, J., Fiechter, S., Gorke, O. and Wanderka, N. (2006) "Modification of Titanium Hydride for Improved Aluminium Foam Manufacture", Acta Materialia, 54, 1887-1900.
- Mussert, K. M., Vellinga, W. P., Bakker, A. and Zwaag, S. (2002). "A nano-indentation study on the mechanical behavior of the matrix material in an AA6061- Al_2O_3 MMC", Materials Science, and Vol. 37, pp. 789-794.
- Ramakrishnan, N. (1996). "An analytical study on strengthening of particulate reinforced metal matrix composites", Acta Materialia, Vol. 44, pp. 69-77.
- Suslick, K. S., Didenko, Y., Fang, M. (1999). "Acoustic cavitation and its chemical consequences", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, Vol. 357, pp. 335-353.
- Suslick, K. S. (1989). "The chemical and physical effects of ultrasound", Scientific American, pp. 80-86.
- Torres, M. C. (2008). "Generation of heterogeneous cellular structures by sonication", ph. D. Thesis University of Heriot-Watt, United Kingdom.
- Wang, J., He, Z., Wu, J., Wan, Z. (2010). "Effect of ultrasonic wave on melt foaming process of aluminum foam", Advanced Materials Research, Vol. 97-101, pp. 227-230.
- Yang, Y., Lan, J., Li, X. (2004). "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.

Yang, Y., Cheng, X., Xiaochunli. (2004). "Ultrasonic-assisted fabrication of metal matrix nanocomposites", Materials Science, Vol. 39, pp. 3211-3212.

Yang, Z., Fang, J. and Ding, B. (2005). "Effect of SiO₂ Coating layer Morphology on TiH₂ Gas Release Characteristic", Journal of Colloid and Interface Science, 290, 305-309.

Zeppelin, F., Hirscher, M., Stanzick, H. and Banhart, J. (2003). "Desorption of Hydrogen from Blowing Agents Used for Foaming Metals", Composites Science and Technology, 63, 2293-2300.

iMat
Conference 2014