

اثر مقدار و اندازه دانه فاز ثانویه بر ریزساختار نانوکامپوزیت مولایت/سیلیکون کاربید تهیه شده به روش سینتر دو مرحله‌ای

سید سعید میرزایی*، اسماعیل صلاحی و تورج عبادزاده

کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۱/۰۵/۰۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۱/۰۸/۰۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۱/۱۱/۱۹

چکیده

کامپوزیت مولایت-سیلیکون کاربید با استفاده از فرآیند سینتر دو مرحله‌ای برای دستیابی به چگالی بالا و رشد دانه پایین تهیه شده است. بدین منظور از سیلیکون کاربید نانومتری و میکرومتری با ۵ و ۱۰ درصد وزنی جهت بررسی تاثیر درصد و اندازه دانه فاز تقویت کننده بر ریزساختار کامپوزیت مورد نظر استفاده شده است. فاز تقویت کننده با سازوکار زنر (Zener) از رشد دانه‌های مولایت جلوگیری می‌کند. با استفاده از سیلیکون کاربید نانومتری می‌توان به اندازه دانه پایین تری دست یافت. در عین حال افزایش چگالی قطعات به نسبت سیلیکون کاربید میکرومتری دشوارتر است. همچنین افزایش درصد سیلیکون کاربید از ۵ به ۱۰ درصد وزنی، علی‌رغم جلوگیری از رشد دانه، مانع رسیدن کامپوزیت به چگالی بالا می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سینتر دومرحله‌ای، مولایت، سیلیکون کاربید، ریزساختار.

۱- مقدمه

چقرمگی بالا و یا با اضافه شدن مکانیزم‌های چقرمگی، مثل انحراف ترک، میکروتُرک و غیره افزایش می‌یابد. حالت اول عموماً مربوط به کامپوزیت‌های سرامیک-فلز مانند کامپوزیت‌های آلومینا-مس و آلومینا-نیکل می‌باشد [۱-۶] و حالت دوم را در تعداد زیادی از کامپوزیت‌های سرامیک-سرامیک مثل کامپوزیت‌های آلومینا-زیرکونیا و مولایت-سیلیکون کاربید [۱۳-۱۱] می‌توان مشاهده کرد. انتخاب فاز تقویت کننده در تهیه و خواص کامپوزیت‌ها حیاتی است. سازگاری شیمیایی و تطابق ضریب انبساط حرارتی بین فازهای زمینه و تقویت کننده و مورفولوژی (بشقابی، ویسکر یا ذره‌ای) فاز تقویت کننده بر خواص نهایی کامپوزیت تاثیر می‌گذارد

سرامیک‌ها به دلیل خواص خود از قبیل چگالی کم، پایداری در دمای بالا و مقاومت شیمیایی، دارای کاربردهای گسترده‌ای می‌باشند. اما چقرمگی پایین آنها، همواره یکی از مشکلاتی است که موارد استفاده آنها را محدود می‌کند. به همین علت تحقیقات زیادی به منظور بهبود قابلیت اطمینان سرامیک‌ها انجام شده است [۳-۱]. تهیه کامپوزیت‌ها به دلیل بهبود خواص مکانیکی و ویژگی‌های ریزساختاری سرامیک‌ها، در دهه‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است [۴،۵]. چقرمگی کامپوزیت‌ها به دو صورت حضور فاز تقویت کننده با

* عهده‌دار مکاتبات: سید سعید میرزایی

نشانی: کرج، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی

تلفن: ۰۲۶۳-۶۲۸۰۰۴۶، دورنگار: ۰۲۶۳-۶۲۸۰۰۴۶، پست الکترونیکی: mirzaee@merc.ac.ir

پایین دست پیدا کرد. در تحقیق حاضر از سیلیکون کاربید نانومتری و میکرومتری جهت بررسی اثر اندازه و درصد فاز ثانویه سیلیکون کاربید بر ریزساختار کامپوزیت مولایت-سیلیکون کاربید تهیه شده به روش سینتر دو مرحله‌ای استفاده شده است.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

مواد اولیه شامل مواد زیر می‌باشد:

استون صنعتی، نیترات آلومینیوم ۹ آبسه $(\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ (محصول Merck به شماره Art ۱۰۶۳/۱۰۱ خلوص ۹۸/۵٪ و وزن مولکولی ۳۷۵/۱۳ گرم بر مول)، سیلیس نانومتری (SiO_2) (محصول Merck به شماره Art ۱۳۱۲۶/۱ خلوص ۹۹٪ و وزن مولکولی ۶۰/۰۸ گرم بر مول)، سیلیکون کاربید نانومتری (SiC) (محصول PlasmaChem GmbH به شماره PL-HK-SiC-5g خلوص ۹۹٪ و وزن مولکولی ۴۰/۱ گرم بر مول، اندازه ذرات ۲۰ نانومتر)، سیلیکون کاربید صنعتی (SiC) (محصول شرکت ایرانی لوازم و تجهیزات آبرکاری و پرداخت) با اندازه ذرات زیر ۳ میکرون، محلول آبی آمونیاک ۲۵٪ (NH_3) (محصول Merck به شماره Art ۱۰۵۴۳۲/۱) برای تنظیم pH، آب دیونیزه برای تهیه محلول اولیه و همچنین شستشوی رسوب استفاده شدند.

۲-۲- سنتز مولایت

به منظور تهیه نانوذرات مولایت از روش سل-ژل استفاده گردید. بدین ترتیب که ابتدا مقداری نیترات آلومینیوم ۹ آب با وزن مشخص در آب مقطر حل شد. سپس سیلیس با توجه به نسبت استوکیومتری تشکیل مولایت $(3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2)$ به محلول فوق اضافه شد. به منظور تشکیل ژل، سوسپانسیون فوق بر روی همزن مغناطیسی دارای هیتر قرار گرفت و محلول آمونیاک برای افزایش pH سوسپانسیون، قطره قطره به آن افزوده شد. با تنظیم دمای 80°C و چرخش آهسته مگنت داخل سوسپانسیون، در حدود pH=۷-۸ ساختار سوسپانسیون به ژل تبدیل شد. ژل بدست آمده به مدت ۲۴ ساعت تحت فرآیند پیرسازی

[۱۴-۱۵]. به هر حال، تهیه کامپوزیت‌های متراکم با مشکلات زیادی همراه است. از آنجاییکه فازهای تقویت کننده عموماً کاربیده‌ها، نیتریدها و بوریده‌ها می‌باشند، متراکم کردن آنها از جمله مشکلات فرآیند است. از مسائل دیگر می‌توان به توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده اشاره کرد. آگلومراسیون فاز تقویت کننده موجب کاهش روند متراکم شدن شده و خواص کامپوزیت را شدیداً تخریب می‌کند [۱۶]. مشکلات فرآیند با کاهش اندازه فاز تقویت کننده بیشتر می‌شود، چرا که تمایل به آگلومراسیون در پودرهای میکرومتری و نانومتری افزایش می‌یابد [۱۷]. مولایت با توجه به خواص مکانیکی دما بالا و مقاومت شیمیایی فوق‌العاده، یک ماده مهم در زمینه سرامیک‌های مهندسی محسوب می‌شود. با این حال، خواص مکانیکی دما پایین آن تبدیل به یک گلوگاه جهت محدود کردن کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف شده است [۱۷-۲۲]. سیلیکون کاربید یکی از موادی است که به دلیل استحکام دما بالا، مقاومت اکسیداسیون خوب، مقاومت به شوک حرارتی و سختی بالا، به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که ضریب انبساط حرارتی مولایت و سیلیکون کاربید بسیار نزدیک به یکدیگر است $(\text{C}/^\circ\text{C}) = 5/4 \times 10^{-6}$ مولایت، $(\text{C}/^\circ\text{C}) = 4/7 \times 10^{-6}$ سیلیکون کاربید)، می‌توان از سیلیکون کاربید جهت بهبود خواص مولایت استفاده کرد [۲۳، ۲۴]. این بهبود خواص را می‌توان به تغییرات ریزساختاری (اصلاح ریزساختار [۲۵])، توزیع سایز عیوب [۲۶])، استحکام مرزدانه-سطح مشترک [۲۷-۲۹] و یا مکانیزم‌های شکست در نانوکامپوزیت‌ها [۳۰-۳۲] نسبت داد. غالباً کامپوزیت‌های سرامیک-سیلیکون کاربید توسط فرآیند سینتر کردن همراه با فشار (پرس گرم یا پرس ایزواستاتیک گرم) [۲۵] متراکم می‌شوند که نیازمند تجهیزات خاص و صرف هزینه بالا است. روش‌های دیگر سینتر کردن بدون حضور فشار شامل افزودن کمک سینترها [۳۲]، سینتر واکنشی [۳۳] و یا فرآیند نوین سینتر دومرحله‌ای [۳۴] می‌باشد. در فرآیند سینتر دو مرحله‌ای، با در نظر گرفتن تفاوت سینتیک نفوذ مرزدانه و مهاجرت مرزدانه، از رشد دانه در مراحل انتهایی فرآیند سینتر کردن جلوگیری می‌شود. بنابراین می‌توان به کامپوزیتی با چگالی بالا و اندازه دانه

همگن شدن هر چه بیشتر مواد اولیه، سوسپانسیونی از مخلوط پودری کامپوزیت در محیط استون به مدت ۲۴ ساعت بالمیل تر شد.



شکل ۱: فلوجارت فرآیند سنتز کامپوزیت مولایت-سیلیکون کاربید.

در نهایت سوسپانسیون بدست آمده جهت خشک کردن و خروج استون روی همزن مغناطیسی با دمای °C ۵۰ قرار گرفت. پودر کامپوزیت بدست آمده در این مرحله به صورت قرص با قطر ۱ cm تحت پرس تک محوره با فشار ۵۵ مگاپاسکال قرار گرفته و به منظور دست‌یابی به بالاترین دانسیته خام با فشار ۱۸۰ مگاپاسکال پرس ایزواستاتیک سرد شد. قرص‌های بدست آمده جهت انجام فرآیند سنتز دو مرحله‌ای تحت دماهای مختلف قرار گرفتند.

۲-۴- تعیین دمای اولیه سینتر (T_i)

در فرآیند سینتر دو مرحله‌ای، انتخاب دمای اولیه سینتر بسیار حائز اهمیت است. دو فاکتوری که برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند چگالی و اندازه ذرات می‌باشد. بنابراین بهینه دمای اولیه به دمایی اطلاق می‌شود که در آن دما نمونه‌ها چگالی حدود ۸۰ تا ۸۵ درصد چگالی تئوری و کمترین رشد دانه را نسبت به شرایط بعد از سینتر داشته باشند. بدین ترتیب برای تعیین دمای اولیه، قرص‌های پرس شده نانوکامپوزیت مولایت-سیلیکون کاربید در ۳ دمای ۱۵۰۰، ۱۵۵۰ و °C ۱۶۰۰ حرارت داده

قرار گرفته و سپس چندین بار با آب مقطر جهت خروج نیترات آمونیوم حاصل از واکنش زیر که به صورت محلول وجود دارد، شسته شد.

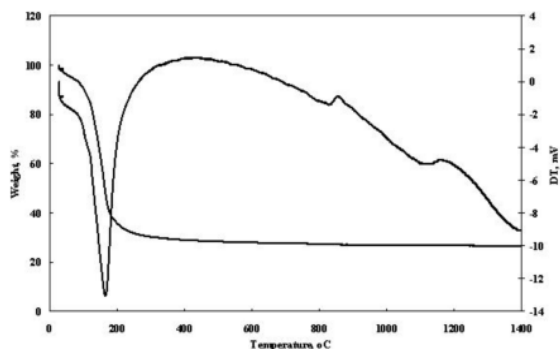


زل شستشو شده، بعد از فیلتر شدن، به منظور خشک شدن درون خشک کن با دمای °C ۸۰ قرار گرفت و به مدت ۲۴ ساعت در آن دما جهت خروج کامل آب باقی ماند. زل بدست آمده در این مرحله به منظور بررسی رفتار حرارتی در حین خروج مواد فرار و همچنین تغییر و تحولات ناشی از تشکیل کریستالیت‌های مولایت، مورد آزمایش آنالیز حرارتی همزمان در محدوده دمایی صفر تا °C ۱۴۰۰ قرار گرفت. آزمایش آنالیز حرارتی همزمان (STA) با دستگاه PL1640 انجام شد. سرعت گرم کردن ۵ درجه بر دقیقه در نظر گرفته شد. بدین ترتیب به طور همزمان نمودارهای TG و DTA رسم گردید. در ادامه، پودر بدست آمده در دماهای مختلف سینتر شده و تشکیل فاز مولایت توسط آزمایشات پراش اشعه ایکس با دستگاه مدل Unisantis XMD30 و زاویه پراش ۱۰ تا ۸۰ درجه انجام گرفت. همچنین به منظور بررسی اندازه دانه‌های پودر مولایت بدست آمده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips XL30 استفاده شد. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها برای تصویربرداری، سوسپانسیونی از آنها در محیط استون آماده شد و سپس تحت التراسونیک به منظور باز شدن کامل دانه‌ها از یکدیگر قرار گرفت. در نهایت یک قطعه از سوسپانسیون فوق بر روی جا نمونه‌ای دستگاه قرار گرفت و با استفاده از یون‌های طلا نمونه‌ها پوشش داده شده و آماده تصویربرداری شدند.

۲-۳- سنتز نانوکامپوزیت مولایت-سیلیکون کاربید

فرآیند سنتز پودر مولایت شکل ۱ نشان داده شده است. در این مرحله جهت تهیه کامپوزیت مولایت، ۵ و ۱۰ درصد وزنی سیلیکون کاربید، از دو نوع سیلیکون کاربید با اندازه ذرات نانومتری و میکرومتری استفاده شد و به پودر مولایت بدست آمده از مرحله قبل اضافه شد. به منظور

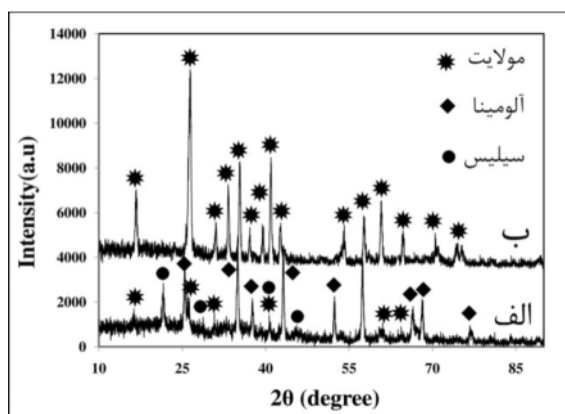
منحنی DTA را می‌توان ناشی از ایجاد ساختار اسپینل همگن Al-Si دانست. پیک گرمای دیگری که در منحنی در دمای 1170°C مشاهده می‌شود ناشی از شروع کریستالیزاسیون فاز مولایت است.



شکل ۲: نمودار آنالیز حرارتی همزمان پودر مخلوط شده ژل پایه آلومینا و نانوسیلیس از دمای محیط تا دمای 1400°C .

۲-۲- بررسی الگوی پراش اشعه ایکس مولایت

در شکل ۳ الگوی پراش اشعه ایکس نمونه کلسینه شده از مخلوط ژل پایه آلومینا و نانوسیلیس در دمای 1400°C و 1500°C در کوره به مدت ۲ ساعت مشاهده می‌شود.



شکل ۳: الگوهای XRD الگوی پراش اشعه ایکس ژل پایه آلومینا و نانوسیلیس کلسینه شده به مدت ۲ ساعت در دماهای (الف) 1400°C و (ب) 1500°C .

با توجه به این شکل، پودر اولیه خشک شده پس از انجام عملیات کلسیناسیون در دمای 1400°C در درون کوره (شکل ۳-الف) به فازهای آلومینا و سیلیس و مولایت تبدیل شده است. فازهای آلفا آلومینا، سیلیس و مولایت به راحتی در کنار هم قابل شناسایی هستند. این امر

شده و به محض رسیدن دمای کوره به دمای مورد نظر، کوره خاموش و نمونه‌ها سرد شدند. برای بررسی شرایط بهینه مورد نظر از روش غوطه‌وری ارشمیدس برای محاسبه چگالی و از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای محاسبه اندازه دانه‌ها استفاده شد.

در روش غوطه‌وری ارشمیدس با داشتن وزن خشک نمونه‌ها، نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در آب در حال جوشیدن قرار داده شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت ماندگاری در آن، وزن اشباع و وزن غوطه‌وری با وسایل مربوطه اندازه‌گیری شده و با استفاده از فرمول زیر دانسیته آنها محاسبه می‌شود:

$$(2) \times 100 = \frac{(\text{وزن غوطه‌وری} - \text{وزن اشباع})}{(\text{وزن خشک})} = \text{چگالی}$$

۲-۵- تعیین دمای ثانویه سینتر (T_2)

پس از اتمام مرحله اول سینتر و یافتن دمای T_1 ، نمونه‌ها به ترتیب در دماهای ۵۰، ۱۰۰ و 150°C زیر دمای اولیه در مدت زمان‌های ۴ و ۸ ساعت حرارت داده شدند و با بررسی دانسیته و اندازه دانه‌ها، شرایط بهینه دما و زمان سینتر کامپوزیت تعیین شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مطالعات آنالیز حرارتی همزمان مولایت

نتایج آنالیز حرارتی همزمان نمونه پودر خشک شده مخلوط ژل پایه آلومینا و پودر نانو سیلیس در دمای محیط تا دمای 1400°C در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، اولین کاهش وزن در محدوده دمایی $100-250^{\circ}\text{C}$ به صورت یک واکنش گرماگیر قابل شناسایی می‌باشد. این کاهش وزن در منحنی TG و رخ دادن واکنش گرماگیر بر روی منحنی DTA را می‌توان به خروج آب آزاد جذب شده و آب‌های موجود در ساختار ژل و خروج سایر مواد فرار نظیر یون‌های نیترات نسبت داد. این کاهش وزن طبق منحنی TG در حدود ۷۰٪ می‌باشد. دومین تغییر قابل تشخیص بر روی نمودار آنالیز حرارتی همزمان مربوط به محدوده دمایی $880-835^{\circ}\text{C}$ و وجود یک پیک گرمای در دمای 860°C بر روی منحنی DTA است. این تغییرات بر روی

۱۴۰۰ و ۱۵۰۰ °C به مدت ۲ ساعت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۴-الف و ۴-ب مشاهده می‌شود که مولایت سنتز شده دارای ابعادی در حد ۱۰۰ nm می‌باشد. مولایت سنتز شده در دمای ۱۵۰۰ °C دارای اندازه ذراتی در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ nm بوده، در حالیکه مولایت سنتز شده در دمای ۱۴۰۰ °C دارای توزیع اندازه ذرات ریزتری بوده و متوسط آن در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ nm است. بنابراین ملاحظه می‌شود که با افزایش دما رشد دانه‌ها در حال افزایش است.

۴-۳- نتایج دمای اولیه و ثانویه فرآیند سینتر دو مرحله‌ای

با قرار دادن نمونه‌ها در دماهای مختلف، دمای ۱۶۰۰ °C به عنوان دمای اولیه سینتر در نظر گرفته شد که چگالی نمونه‌ها در این دما در حدود ۸۵-۸۰ درصد چگالی تئوری محاسبه شد. شرایط دمایی و زمان نگهداری در دمای ثانویه مورد استفاده برای سینتر دو مرحله‌ای کامپوزیت مولایت-۵ درصد وزنی سیلیکون کاربرد در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱: شرایط فرآیند سینتر دو مرحله‌ای (MS5N4): کامپوزیت مولایت-۵ درصد وزنی سیلیکون کاربرد نانومتری که ۴ ساعت در دمای ثانویه سینتر نگهداری شده است).

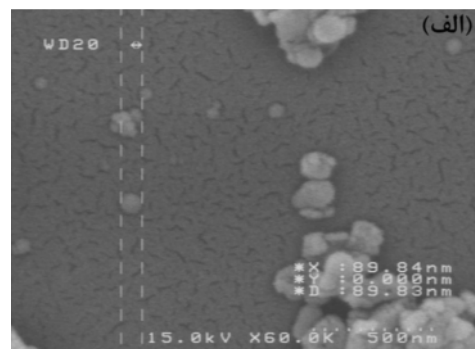
نمونه	شرایط فرآیند سینتر
MS5N4	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۴۰۰ °C/۴ h
	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۴۵۰ °C/۴ h
	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۵۰۰ °C/۴ h
MS5N8	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۴۰۰ °C/۸ h
	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۴۵۰ °C/۸ h
	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۵۰۰ °C/۸ h
MS5M4	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۴۰۰ °C/۴ h
	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۴۵۰ °C/۴ h
	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۵۰۰ °C/۴ h
MS5M8	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۴۰۰ °C/۸ h
	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۴۵۰ °C/۸ h
	۱۶۰۰°C/۰ h → ۱۵۰۰ °C/۸ h

همین روند برای کامپوزیت مولایت-۱۰ درصد وزنی سیلیکون کاربرد نیز تکرار شده است. چگالی نمونه‌ها بعد

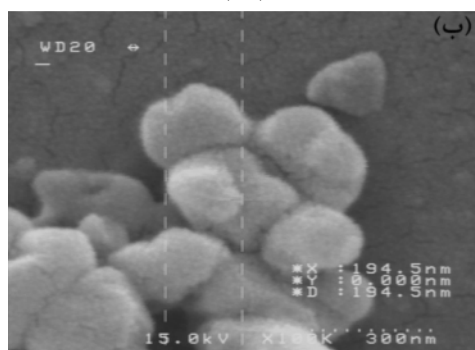
نشان دهنده آن است که فرآیند کریستالیزاسیون فاز مولایت انجام شده ولی دما به حدی نبوده است که این فرآیند به طور کامل انجام شود. به همین جهت برای کامل شدن فرآیند تشکیل مولایت به دمای بالاتری نیاز است. لذا عملیات حرارتی در دمای ۱۵۰۰ °C در کوره انجام شد. الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به پودر کلسینه شده در دمای ۱۵۰۰ °C توسط کوره در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۳-ب مشاهده می‌شود که با افزایش دما از ۱۳۰۰ به ۱۵۰۰ °C فرآیند تشکیل مولایت به طور کامل انجام شده و تمامی فازهای سیلیس و آلومینا حذف شده‌اند.

۳-۳- نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی مولایت

به منظور بررسی اندازه دانه‌های پودر مولایت سنتز شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.



(الف)



(ب)

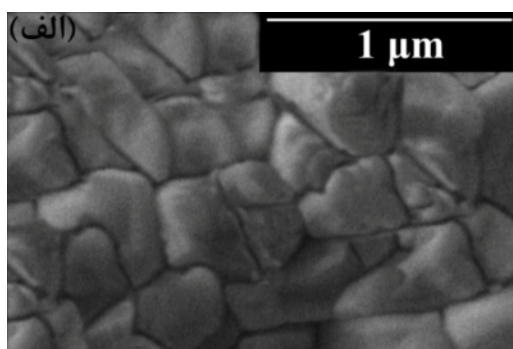
شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، (الف) نانوپودر مولایت سنتز شده در دمای ۱۴۰۰ °C و (ب) نانوپودر مولایت سنتز شده در دمای ۱۵۰۰ °C.

شکل‌های ۴-الف و ۴-ب به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به مولایت سنتز شده در دماهای

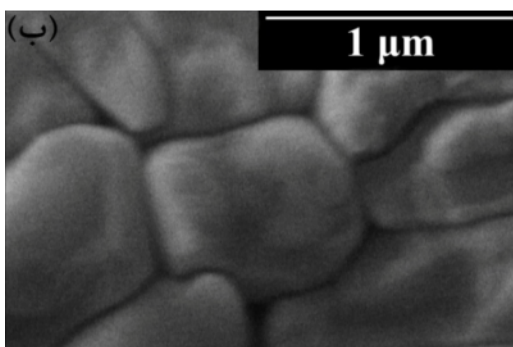
بیشتری بر ریزساختار داشته است. نتایج مربوط به اندازه دانه در قسمت میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بحث قرار گرفته است.

۳-۵- نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت مولایت سیلیکون کاربید

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت مولایت-سیلیکون کاربید در شکل ۷ نشان داده شده است.



(الف)

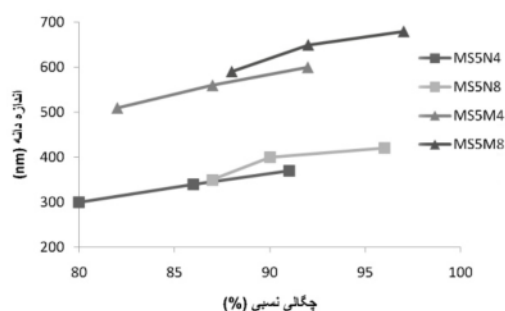


(ب)

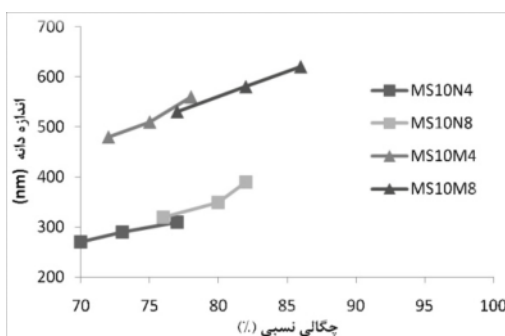
شکل ۷: تصاویر SEM، الف) کامپوزیت مولایت-سیلیکون کاربید نانومتری و ب) کامپوزیت مولایت/سیلیکون کاربید میکرومتری. چگالی نمونه‌ها ۹۷ درصد چگالی تئوری است.

همانطور که در تصاویر مشخص است، در چگالی یکسان ۹۶٪، کامپوزیت حاوی سیلیکون کاربید نانومتری (شکل ۷-الف) رشد دانه کمتری به نسبت کامپوزیت حاوی سیلیکون کاربید میکرومتری (شکل ۷-ب) داشته است. این رشد کم را می‌توان به توزیع بیشتر سیلیکون کاربید نانومتری در زمینه کامپوزیت نسبت داد که به دلیل اثر میخکوب‌کنندگی مرزخانه‌ها (زئر)، منجر به رشد کمتری شده است. در شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد وزنی

از فرآیند به روش غوطه‌وری ازشمیدس اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با استفاده از سیلیکون کاربید میکرومتری چگالی بالاتری بدست آمده است و همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش دما و زمان ماندگاری، چگالی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است که در مقایسه با شرایط سینتر معمولی در دمای پایین‌تری به چگالی بالاتری، به نسبت اندازه دانه نهایی کامپوزیت، رسیده است. این کمتر بودن اندازه دانه در مقایسه با سینتر معمولی به دلیل شرایط سینتر دو مرحله‌ای و نبودن انرژی فعال‌سازی کافی در دسترس جهت مهاجرت مرزخانه است.



شکل ۵: نمودار اندازه دانه نمونه‌های کامپوزیت مولایت ۵ درصد وزنی سیلیکون کاربید بر حسب چگالی نسبی.



شکل ۶: نمودار اندازه دانه نمونه‌های کامپوزیت مولایت ۱۰ درصد وزنی سیلیکون کاربید بر حسب چگالی نسبی.

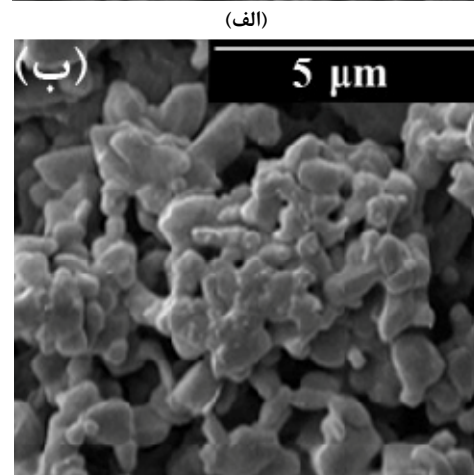
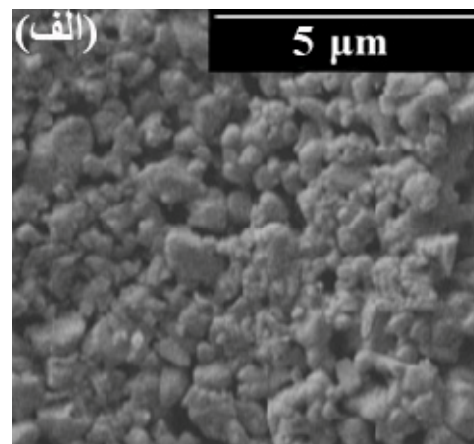
شکل ۶ اندازه دانه بر حسب چگالی برای کامپوزیت مولایت-۱۰ درصد وزنی سیلیکون کاربید را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان مشاهده کرد که افزایش سیلیکون کاربید باعث کاهش رشد دانه شده و از متراکم شدن کامپوزیت نیز جلوگیری می‌کند. البته در هر دو حالت استفاده از سیلیکون کاربید نانومتری تاثیر

استفاده از فاز تقویت کننده از رشد دانه‌های زمینه با سازوکار زبر جلوگیری می‌کند. با استفاده از ذرات سیلیکون کاربید نانومتری، کامپوزیت بدست آمده دارای اندازه دانه کوچکتر می‌باشد. در عین حال، دارای چگالی پایین تری نسبت به کامپوزیت حاوی ذرات سیلیکون کاربید میکرومتری می‌باشد. همچنین افزایش درصد سیلیکون کاربید باعث کند شدن روند تراکم کامپوزیت می‌شود.

سیلیکون کاربید نانومتری (شکل ۸-الف) و میکرومتری (شکل ۸-ب) مشاهده می‌شود. همانطور که در تصاویر مشخص است، با افزایش درصد سیلیکون کاربید به ۱۰ درصد، چگالی نمونه‌ها نسبت به کامپوزیت با ۵ درصد وزنی فاز ثانویه کاهش پیدا کرده است و همچنین رشد دانه‌ها به دلیل اثر سیلیکون کاربید کاهش پیدا کرده است که می‌توان مشاهده کرد که این اثر با استفاده از ۱۰ درصد فاز سیلیکون کاربید نانومتری در زمینه مولایت بیشتر است.

مراجع

- [1] C. Mroz, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **72**, 1993, 89.
- [2] G. Gerger, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **70**, 1991, 212.
- [3] J. Wang, M.R. Piramoon, C.B. Ponton, P.M. Marquis, *Brit. Ceram. Trans.*, **90**, 1991, 105.
- [4] M. Sternitzke, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **17**, 1997, 1061.
- [5] A.V. Sergueeva, D.M. Hulbert, N.A. Mara, A.K. Mukherjee, *Frontiers of Nanoscience*, **1**, 2009, 127.
- [6] S.T. Oh, T. Sekino, K. Niihara, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **18**, 1998, 31.
- [7] S.T. Oh, M. Sando, K. Niihara, *J. Am. Ceram. Soc.*, **18**, 1998, 3013.
- [8] T. Sekino, K. Niihara, *J. Mater. Sci.*, **32**, 1997, 3943.
- [9] T. Sekino, T. Nakajima, S. Ueda, K. Niihara, *J. Am. Ceram. Soc.*, **80**, 1997, 1139.
- [10] W.H. Tuan, R.J. Brook, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **6**, 1990, 31.
- [11] A.H. De Aza, J. Chevalier, G. Fantozzi, M. Schehl, R. Torrecillas, *Biomaterials*, **23**, 2002, 937.
- [12] K. Ando, M.C. Chu, K. Tsuji, T. Hirasawa, Y. Kobayashi, S. Sato, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **22**, 2002, 1313.
- [13] S. Akpınar, I.A. Altun, K. Onel, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **30**, 2010, 2727.
- [14] C. Nischik, M.M. Seibold, N.A. Travitzky, N. Claussen, *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**, 1991, 2464.
- [15] B. Derby, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, **3**, 1998, 490.
- [16] J. Rodriguez, A. Martin, J.Y. Pastor, J.L. Lorca, J.F. Bartolome, J.S. Moya, *J. Am. Ceram. Soc.*, **82**, 1999, 2252.
- [17] I.A. Chou, H.M. Chan, M.P. Harmer, *J. Am. Ceram. Soc.*, **81**, 1998, 1203.
- [18] T.J. Whalen, *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **7**, 1986, 1135.
- [19] G.C. Wei, P.F. Becher, *J. Am. Ceram. Soc.*, **67**, 1984, 571.
- [20] M.A. Janney, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **65**, 1986, 357.
- [21] W.H. Gu, K.T. Faber, R.W. Steinbreech, *Acta Metall. Mater.*, **40**, 1992, 3121.
- [22] M.A. Janney, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **66**, 1987, 322.
- [23] S. Wu, N. Claussen, *J. Am. Ceram. Soc.*, **77**, 1994, 2898.
- [24] S.C. Samanta, S. Musikant, *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **8**, 1987, 663.
- [25] K. Niihara, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **99**, 1991, 974.
- [26] J. Zhao, L.C. Stearns, M.P. Harmer, H.M. Chan, G.A. Miller, R.F. Cook, *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**, 1993, 503.
- [27] I. Levin, W.D. Kaplan, D.G. Brandon, A.A. Layyous, *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**, 1995, 254.
- [28] D.S. Cheong, K.T. Hwang, C.S. Kim, *J. Am. Ceram. Soc.*, **82**, 1999, 981.
- [29] T. Ohji, T. Hirano, A. Nakahira, K. Niihara, *J. Am. Ceram. Soc.*, **79**, 1996, 33.
- [30] E.P. Chen, D.P. Hasselman, *J. Am. Ceram. Soc.*, **59**, 1976, 525.
- [31] T. Ohji, Y.K. Jeong, Y.H. Choa, K. Niihara, *J. Am. Ceram. Soc.*, **81**, 1998, 1453.



شکل ۸: تصاویر SEM، الف) کامپوزیت مولایت-۱۰ درصد وزنی سیلیکون کاربید نانومتری و ب) کامپوزیت مولایت ۱۰ درصد وزنی سیلیکون کاربید میکرومتری.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر اندازه ذرات فاز تقویت کننده بر ریزساختار کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی بررسی شد.

27, 2007, 2095.

[34] X.H. Wang, P.L. Chen, I.W. Chen, *J. Am. Ceram. Soc.*,
89, 2006, 431.

[32] A. Gubernat, L. Stobierski, P. Labaj, *Materials Chemistry
and Physics*, 67, 2001, 180.

[33] S. Ding, S. Zhu, Y.P. Zeng, D. Jiang, *J. Eur. Ceram. Soc.*,