

## مروری بر سینتر بدون فشار نانو کامپوزیت‌های SiC-AYM

مهدی خدایی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا بهاروندی<sup>۲</sup>، ناصر احسانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار مجتمع مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران  
<sup>۳</sup> استاد مجتمع مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران  
 \*مسئول مکاتبات: mahdi.khodaei01@gmail.com

### چکیده

### واژگان کلیدی

نانو کامپوزیت  
 کاربرد سیلیسیم  
 SiC-AYM  
 $Al_2O_3 - Y_2O_3MgO$   
 سینتر بدون فشار

### تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۷/۱۳  
 تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

کاربرد سیلیسیم (SiC) به دلیل خواصی مانند دانسیته پایین، هدایت حرارتی بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین، سختی و مدول بالا به عنوان یک سرامیک ساختاری مهم شناخته شده است. استفاده از این ماده با ساختار نانو می‌تواند خواص آن را افزایش داده و موجب گسترش کاربردهای آن در صنایع مختلف شود. سینتر بدون فشار ساده‌ترین روش سینتر است که می‌تواند به راحتی در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این روش برای سینتر نانو ذرات SiC نیازمند دمای بالای ۲۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است. به منظور کاهش دمای سینتر می‌توان از مواد افزودنی استفاده نمود. در بین مواد افزودنی ترکیب (AYM)  $Al_2O_3 - Y_2O_3MgO$  با تشکیل ترکیب یونکتیک به کاهش دمای سینتر منجر می‌شود که این امر علاوه بر بهبود سینترپذیری SiC امکان کنترل ریزساختار به منظور بهبود خواص مکانیکی را فراهم می‌کند. از این رو در این مقاله تلاش شده است تا تأثیر ترکیب  $Al_2O_3 - Y_2O_3MgO$  بر سینترپذیری و خواص نانو کامپوزیت‌های SiC-AYM مورد بررسی قرار گیرد.

### ۱ مقدمه

نانو کامپوزیت‌ها<sup>۱</sup> را می‌توان موادی با دو جزء جامد قابل تفکیک تعریف نمود که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها در محدوده نانومتر باشد. هر یک از این اجزا می‌توانند به شکل آمورف، نیمه بلوری یا بلوری باشند [۱]. بیشتر بودن سطح در ذرات نانو می‌تواند باعث افزایش برخی خواص در محصولات شود [۲]. کاربرد سیلیسیم (SiC) به عنوان سرامیکی ساختاری [۱] دارای کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف است [۳، ۴] و در صورتی که بتوان قطعاتی با ساختار نانو SiC را به خوبی سینتر کرد، دستیابی به خواص مکانیکی مناسب امری بدیهی است.

از طرف دیگر وجود سطح زیاد در پودرهای نانو موجب به وجود آمدن حفرات در بین آن‌ها خواهد شد؛ بنابراین تلاش برای اتصال پودرهای کامپوزیتی با مقیاس نانو از طریق روش‌های سینتر معمول فرایندی بسیار سخت است [۵].

به منظور سینتر این دسته از مواد می‌توان از روش‌هایی که دما و فشار بالا را همزمان به نمونه وارد می‌کنند استفاده کرد اما از آنجا که این روش‌ها معمولاً روش‌های پرهزینه‌ای هستند بسیاری از دانشمندان تلاش کرده‌اند که با استفاده از کمک سینترها، دما و زمان سینتر را کاهش دهند. با این کار علاوه بر کاهش هزینه‌ها می‌توان ریزساختار نهایی نمونه را نیز کنترل کرده و از این طریق خواص مکانیکی آن را تقویت نمود.

در بین کمک سینترهایی که تاکنون برای سینتر نانو SiC استفاده شده

ترکیب  $Al_2O_3$  و  $Y_2O_3$  و MgO به علت ارزان بودن MgO و نتایج موفقیت‌آمیز سینتر سایر سرامیک‌ها (مثل نیتريد سیلیسیم) با استفاده از این ماده و همچنین توانایی تشکیل ترکیب یونکتیک در صورت واکنش با  $SiO_2$  موجود در سطح پودرهای SiC باعث جلب توجه بسیاری از محققین شده است. همچنین MgO می‌تواند کنترل ریزساختار و چگال شدن را تسهیل نماید [۶-۸].

تاکنون از روش‌های بسیاری برای ساخت سرامیک نانو ساختار SiC استفاده شده است که می‌توان به پرس داغ [۹، ۱۰]، پرس داغ ایزواستاتیک<sup>۲</sup> (HIP) [۹، ۱۱]، سینتر جرقه پلاسما<sup>۳</sup> (SPS) [۱۲، ۱۳]، سینتر دو مرحله‌ای [۱۴] و آهنگری داغ<sup>۴</sup> [۱۵] اشاره کرد. در بین روش‌های بررسی شده روش سینتر بدون فشار<sup>۵</sup> به علت هزینه کمتر و سادگی انجام کار می‌تواند به روشی صنعتی تبدیل شود؛ به همین علت در این مقاله تلاش شده است تا روش سینتر بدون فشار نانو کامپوزیت‌های SiC-AYM مورد مطالعه قرار گیرد.

### ۲ سینتر بدون فشار نانو کامپوزیت‌های

#### SiC-AYM

فوستر<sup>۶</sup> و همکارش [۶] اثر MgO را به همراه  $Al_2O_3$  و  $Y_2O_3$  به عنوان کمک سینتر برای تراکم  $\alpha$ -SiC مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش،

<sup>1</sup>Nano Composite

<sup>2</sup>hot isostatic press

<sup>3</sup>Sprk plasms Sinter

<sup>4</sup>Hot Forging

<sup>5</sup>Pressureless Sinter

<sup>6</sup>Foster

فازی دارند. فازهای بلوری  $YAM - Y_2Al_2O_9$ ،  $YAG - Y_3Al_5O_{12}$  و  $MgAl_2O_4$  - اسپینل محتمل ترین فازهایی هستند که به وسیله واکنش بین افزودنی‌ها تشکیل می‌شوند.

در نمونه‌هایی با ترکیب  $40\% Y_2O_3 + 60\% Al_2O_3$  در مقادیر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد افزودنی، آلومینای آزاد نیز مشاهده شده است. شکل ۱ آنالیزهای نقطه‌ای و خطی EDS از فازهای اکسیدی را نشان می‌دهد. تصویر ریزساختاری مواد اچ نشده حضور فازهای دیگر را درون زمینه SiC نشان می‌دهد و آنالیز EDS تأیید می‌کند که این فازها غنی از اکسیدهای آلومینیوم و ایتریوم هستند. با استفاده از مشاهدات ریزساختاری نمونه‌های حاصل، اسپینل منیزیم-آلومینیوم شناسایی نشده است ولی با استفاده از XRD حضور این فاز گزارش شده است [۱۶].

نتایج سختی ویکرز نمونه‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سختی ویکرز به‌طور قابل ملاحظه‌ای برای سه گروه از مواد سینتر شده تغییر می‌کند. بالاترین میزان سختی که بالاتر از  $20\text{ GPa}$  بود در نمونه‌های گروه  $40\% Y_2O_3 + 60\% Al_2O_3$  حاصل شده است. در گروه نمونه‌های  $60\% Y_2O_3 + 40\% Al_2O_3$ ، بیشترین سختی حدود  $20\text{ GPa}$  در میزان ۱۵ درصد افزودنی به دست آمده است درحالی‌که برای همین ترکیب با میزان ۲۰ درصد افزودنی، میزان سختی بیشتر از  $20\text{ GPa}$  نشده است.

در گروه افزودنی‌های اکسیدی حاوی MgO، ترکیب  $MgO : Y_2O_3 : Al_2O_3$  با نسبت وزنی ۱۲ : ۶۱ : ۲۷ سختی کمتری ( $16\text{ GPa} - 20$ ) نسبت به  $MgO : Y_2O_3 : Al_2O_3$  با نسبت وزنی ۴۲ : ۴۴ : ۱۴ ( $22\text{ GPa} - 26$ ) داشته است. لازم به ذکر است که نمونه‌های متراکم‌تر سختی بالاتری داشته و نمونه‌هایی با رسوبات فازهای اکسیدی بیشتر سختی کمتری داشته‌اند [۱۶].

### ۳ نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش شده است نتایج بررسی‌های دانشمندان مختلف بر سینتر بدون فشار نانوکامپوزیت‌های SiC-AYM مورد بررسی قرار گیرد.

بر اساس تحقیقات انجام شده اگرچه که هر یک از مواد  $Y_2O_3$ ،  $Al_2O_3$  و MgO دمای ذوب بالای  $2000$  درجه سانتی‌گراد دارند اما در ترکیب با یکدیگر و در کنار  $SiO_2$  که بر سطح پودرهای SiC وجود دارد این امکان فراهم می‌شود که با تشکیل ترکیب یونکتیکی منجر به افزایش سینترپذیری SiC شوند.

دستیابی به چگالی ۹۵٪ در دمای سینتر  $1950$  درجه سانتی‌گراد و زمان ۱ ساعت در مطالعات انجام شده مشاهده شده است. از طرف دیگر استفاده از مواد افزودنی می‌تواند باعث بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌ها شود. تحقیقات صورت گرفته بیانگر آن است که با افزایش رسوبات فازهای اکسیدی در نمونه سختی کاهش یافته و در مقابل هر چه نمونه متراکم‌تر باشد سختی بیش‌تری را از خود بروز می‌دهد.

نمونه‌های SiC حاوی افزودنی در دمایی بین  $1750^\circ\text{C}$  و  $2000^\circ\text{C}$  به‌وسیله روش بدون فشار سینتر شده‌اند.

دانشیه نمونه‌های SiC حاوی ۹ درصد وزنی MgO،  $Al_2O_3$  و  $Y_2O_3$  در ترکیبات مختلف در جدول ۱ آورده شده است. دو نمونه به‌منظور کاهش اتلاف وزن<sup>۱</sup> در بستری از پودرهای MgO،  $Al_2O_3$  و  $Y_2O_3$  سینتر شدند درحالی‌که سایر نمونه‌ها در بستری از پودر BN قرار گرفتند.

نتایج نشان‌دهنده این است که تراکم کمی در دمای  $1750^\circ\text{C}$  حاصل شده است که نزدیک به ۷۸ درصد دانشیه تئوری می‌باشد. با افزایش دما تا  $2000^\circ\text{C}$  نیز دانشیه به ۸۶ درصد دانشیه تئوری رسیده است. همچنین اتلاف وزن زیاد بوده و پودرهای بستر تأثیر بسیار کمی داشته‌اند.

گوبرنات<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۶] نیز اثر MgO را به همراه  $Al_2O_3$  و  $Y_2O_3$  به‌عنوان کمک سینتر برای تراکم  $\alpha\text{-SiC}$  به روش سینتر بدون فشار بررسی کرده‌اند. این محققان با تغییر سرعت حرارت‌دهی، تغییر میزان افزودنی و نیز تغییر پودر بستر<sup>۳</sup> به نتایج بهتری دست یافته‌اند.

آن‌ها از طرفی ریزساختار و خواص مکانیکی سرامیک‌های  $\alpha\text{-SiC}$  سینتر شده به روش بدون فشار با افزودنی‌های اکسیدی  $Al_2O_3$  و  $Y_2O_3$  و نسبت‌های متفاوت ۶۰ : ۴۰ با مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی و نیز ۴۰ : ۶۰ با مقادیر متفاوت ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی را بررسی کرده‌اند و از طرف دیگر تأثیر افزودن MgO را در کنار  $Al_2O_3$  و  $Y_2O_3$  با مقادیر متفاوت مورد بررسی قرار داده‌اند.

میزان افزودنی‌های اکسیدی MgO،  $Al_2O_3$  و  $Y_2O_3$  به میزان ۱۰ درصد وزنی و به‌صورت  $MgO : Y_2O_3 : Al_2O_3$  با نسبت‌های ۴۲ : ۴۴ : ۱۴ و ۱۲ : ۶۱ : ۲۷ بوده است. مخلوط مواد اولیه در دماهای  $1900$ ،  $1950$  و  $2000$  درجه سانتی‌گراد در مدت زمان‌های ۱ و ۲ ساعت سینتر شدند. اتمسفر کوره تا  $1200$  خلأ و پس از این دما آرگون بوده است. همچنین سرعت حرارت‌دهی تا  $1000^\circ\text{C}$ ،  $2^\circ\text{C}/\text{min}$ ، در محدوده  $1000^\circ\text{C} - 1650^\circ\text{C}$ ،  $15^\circ\text{C}/\text{min}$  و از  $1650^\circ\text{C}$  تا دمای نهایی،  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  بود.

طبق نتایج به دست آمده، افزودنی‌های اکسیدی<sup>۴</sup> تراکم سینتر را تسهیل کرده و به شکل قابل توجهی خواص مکانیکی<sup>۵</sup> سرامیک‌های SiC را بهبود بخشیده‌اند.

دانشیه نسبی نمونه‌های SiC با مقادیر و نسبت‌های وزنی مختلف افزودنی‌های اکسیدی در جدول ۲ آورده شده است. دو روش سینتر در تماس با اتمسفر و در تماس با پودر قالب SiC درشت دانه اعمال شده است. بیشترین مقدار دانشیه نزدیک به ۹۵ درصد دانشیه تئوری به‌وسیله همه مواد سینتر شده در پودر قالب SiC درشت دانه در دمای  $1950^\circ\text{C}$  و نگهداری به مدت ۲ ساعت به دست آمده است [۱۶].

احتمال دارد که این فازها باقیمانده‌هایی از فازهای مایع<sup>۶</sup> تشکیل شده در شرایط سینتر باشند یا در نتیجه واکنش حالت جامد افزودنی‌ها حاصل شده باشند [۱۶].

در جدول ۳ نتایج آنالیز فازی به دست آمده از پراش اشعه ایکس گزارش شده است. این نتایج تأیید می‌کند که مواد حاصل، طبیعت چند

<sup>1</sup>Weight Loss    <sup>2</sup>Gubernat    <sup>3</sup>Bed Powder    <sup>4</sup>Oxide Additives    <sup>5</sup>Mechanical Properties    <sup>6</sup>Liquid Phases

**جدول ۱:** سینتر بدون فشار نمونه‌های SiC حاوی ۹ درصد وزنی MgO، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [۱۶]

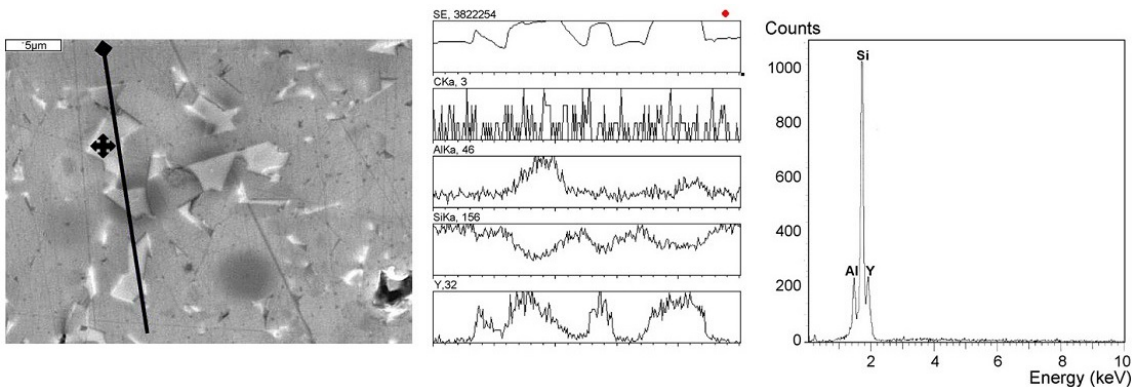
افزودنی			درجه حرارت (°C)	زمان (دقیقه)	پودر بستر	افت وزنی (wt.%)	دانسیته (g/cm <sup>3</sup> )	دانسیته تئوری (g/cm <sup>3</sup> )
MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						
۵۶	۱۷	۲۷	۱۷۵۰	۱۸۰	BN, MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۹	۲/۴۱	۳/۳۰
۶۴	۲۵	۱۱	۱۷۵۰	۱۸۰	BN	۴/۱	۲/۵۷	۳/۲۸
۷۶	۱۰	۱۳	۱۷۵۰	۱۸۰	BN	۰/۵	۲/۵۶	۳/۲۸
۷۶	۱۰	۱۳	۱۸۰۰	۱۴۰	BN, MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۸/۴	۲/۵۵	۳/۲۸
۶۴	۲۵	۱۱	۱۸۵۰	۱۲۰	BN	۵/۸	۲/۵۶	۳/۲۸
۷۶	۱۰	۱۳	۱۸۵۰	۱۲۰	BN	۵/۰	۲/۶۱	۳/۲۸
۶۴	۲۵	۱۱	۲۰۰۰	۶۰	BN	۶/۹	۲/۸۳	۳/۲۸
-	۵۳	۴۷	۲۰۰۰	۳۰	BN, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۸/۵	۲/۸۵	۳/۳۱

**جدول ۲:** دانسیته نسبی نمونه‌های SiC با مقادیر مختلف افزودنی [۱۶]

درصد وزنی افزودنی	ترکیب وزنی (نسبت وزنی)			TD (g/cm <sup>3</sup> )	دانسیته نسبی (%)				
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO		۱۹۰۰°C	۱۹۵۰°C	۱۹۵۰°C	۱۹۵۰°C, ۲h	۲۰۰۰°C
					۱h	۱h	۲h	(پودر بستر)	۱h
۵	۶۰	۴۰	-	۳/۲۵	۹۰	۹۴	۹۵	۹۴	۸۵
۱۰	۶۰	۴۰	-	۳/۳۰	۹۴	۹۴	۹۴	۹۶	۸۴
۱۵	۶۰	۴۰	-	۳/۳۴	۹۱	۹۵	۹۳	۹۵	۸۲
۲۰	۶۰	۴۰	-	۳/۳۹	۹۳	۹۳	۹۲	۹۵	۸۳
۱۵	۴۰	۶۰	-	۳/۳۶	۹۵	۹۱	۹۳	۹۵	۸۶
۲۰	۴۰	۶۰	-	۳/۴۱	۹۴	۹۵	۹۳	۹۴	۸۱
۱۰	۴۲	۴۴	۱۴	۳/۲۹	۸۲	۸۹	۷۷	۹۶	۷۹
۱۰	۱۲	۶۱	۲۷	۳/۲۹	۸۰	۸۱	۸۱	۹۳	۷۴

**جدول ۳:** نتایج آنالیز فازی حاصل از نمونه‌های SiC با مقادیر مختلف افزودنی [۱۶]

درصد وزنی افزودنی	ترکیب افزودنی (نسبت وزنی)			نتایج XRD
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	
۵	۶۰	۴۰	-	۶H - SiC, ۴HSiC
۱۰	۶۰	۴۰	-	۶H - SiC, ۴HSiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Y <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>9</sub> (YAM)
۱۵	۶۰	۴۰	-	۶H - SiC, ۴HSiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Y <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (YAG)
۲۰	۶۰	۴۰	-	۶H - SiC, ۴HSiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Y <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (YAG); C (graphite)
۱۵	۴۰	۶۰	-	۶H - SiC, ۴HSiC, Y <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (YAG)
۲۰	۴۰	۶۰	-	۶H - SiC, ۴HSiC, Y <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (YAG)
۱۰	۴۲	۴۴	۱۴	۶H - SiC, ۴HSiC, MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , Y <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (YAG)
۱۰	۱۲	۶۱	۲۷	۶H - SiC, ۴HSiC, MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , Y <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>9</sub> (YAM)



**شکل ۱:** آنالیزهای نقطه‌ای و خطی EDS از فازهای اکسیدی [۱۶].

[6] Foster, D and Thompson, DP. The use of mgo as a densification aid for  $\alpha$ -sic. *Journal of the European Ceramic Society*, 19(16):2823–2831, 1999.

[7] Gu, Hui, Nagano, Takayuki, Zhan, Guo-Dong, Mitomo, Mamoru, and Wakai, Fumihiko. Dynamic evolution of grain-boundary films in liquid-phase-sintered ultrafine silicon carbide material. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(10):1753–1760, 2003.

[8] Pillai, Sunil Kumar C, Baron, Benoit, Pomeroy, Michael J, and Hampshire, Stuart. Effect of oxide dopants on densification, microstructure and mechanical properties of alumina-silicon carbide nanocomposite ceramics prepared by pressureless sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(12):3317–3326, 2004.

[9] Mitomo, Mamoru, Kim, Young-Wook, and Hirotsuru, Hideki. Fabrication of silicon carbide nanoceramics. *Journal of materials research*, 11(7):1601–1604, 1996.

[10] Nagano, Takayuki, Kaneko, Kenji, Zhan, Guo-Dong, and Mitomo, Mamoru. Effect of atmosphere on weight loss in sintered silicon carbide during heat treatment. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(11):2781–2787, 2000.

[11] Vassen, Robert and Stöver, Detlev. Processing and properties of nanograin silicon carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(10):2585–2593, 1999.

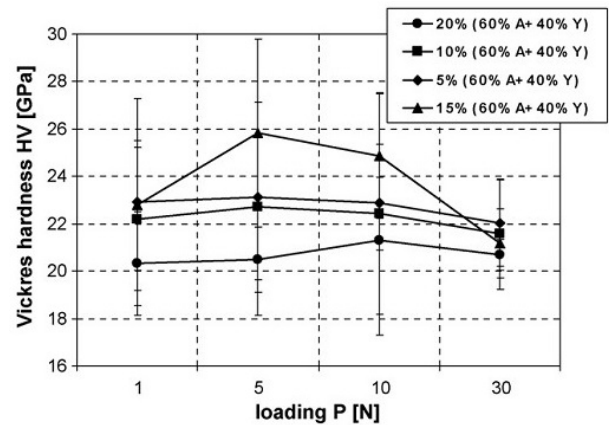
[12] Ohyanagi, Manshi, Yamamoto, Takeshi, Kitaura, Hidetoshi, Kodera, Yasuhiro, Ishii, Takeshi, and Munir, Zuhair A. Consolidation of nanostructured sic with disorder–order transformation. *Scripta Materialia*, 50(1):111–114, 2004.

[13] Tamari, Nobuyuki, Tanaka, Takahiro, Tanaka, Koji, Kondoh, Isao, Kawahara, Masakazu, and Tokita, Masao. Effect of spark plasma sintering on densification and mechanical properties of silicon carbide. *Journal of the ceramic society of Japan*, 103(1199):740–742, 1995.

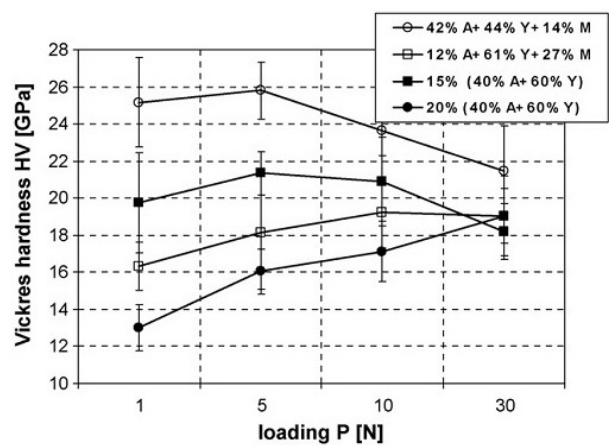
[14] Lee, Young-Il, Kim, Young-Wook, Mitomo, Mamoru, and Kim, Doh-Yeon. Fabrication of dense nanostructured silicon carbide ceramics through two-step sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(10):1803–1805, 2003.

[15] Wetzel, Karin, Rixecker, Georg, Kaiser, Gerhard, and Aldinger, Fritz. Preparation of dense nanocrystalline silicon carbide ceramics by sinter forging in the presence of a liquid phase. *Advanced Engineering Materials*, 7(6):520–524, 2005.

[16] Gubernat, Agnieszka, Stobierski, Ludosław, and Łabaj, Paweł. Microstructure and mechanical properties of silicon carbide pressureless sintered with oxide additives. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2-3):781–789, 2007.



شکل ۲: سختی ویکرز نمونه‌های SiC با مقادیر مختلف افزودنی  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (A)،  $\text{MgO}$ (M) و  $\text{Y}_2\text{O}_3$ (Y) [۱۶].



شکل ۳: سختی ویکرز نمونه‌های SiC با مقادیر مختلف افزودنی  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (A)،  $\text{MgO}$ (M) و  $\text{Y}_2\text{O}_3$ (Y) [۱۶].

## مراجع

[1] Sternitzke, Martin. Structural ceramic nanocomposites. *Journal of the European Ceramic Society*, 17(9):1061–1082, 1997.

[2] Zhan, Guo-Dong, Kuntz, Joshua D, Wan, Julin, and Mukherjee, Amiya K. Single-wall carbon nanotubes as attractive toughening agents in alumina-based nanocomposites. *Nature materials*, 2(1):38, 2003.

[3] Ortiz, AL, Borrero-López, O, Quadir, Md Zakaria, and Guiberteau, F. A route for the pressureless liquid-phase sintering of sic with low additive content for improved sliding-wear resistance. *Journal of the European Ceramic Society*, 32(4):965–973, 2012.

[4] Ribeiro, Sebastião, Genova, Luis Antonio, Ribeiro, Gislaiane C, Oliveira, MR, and Bressiani, Ana Helena A. Effect of heating rate on the shrinkage and microstructure of liquid phase sintered sic ceramics. *Ceramics International*, 42(15):17398–17404, 2016.

[5] Kear, BH, Colaizzi, J, Mayo, WE, and Liao, S-C. On the processing of nanocrystalline and nanocomposite ceramics. *Scripta Materialia*, 44(8-9):2065–2068, 2001.