

ساخت و بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های آلومینا-زیرکونیا

جعفر جعفری پور میبیدی^۱، یعقوب علی^۱، صاحبعلی منافی^{۲*} و احمد هادی^۱

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مواد و متالورژی

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، گروه مهندسی مواد

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۹/۰۴/۱۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۹/۰۵/۰۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۹/۰۷/۲۹

چکیده

هدف از این تحقیق، ارتباط ریزساختار نانوکامپوزیت دارای ماتریس آلومینا و حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد حجمی نانوذرات زیرکونیا با خواص مکانیکی و مقاومت سایشی این نوع کامپوزیت‌ها است. آنالیز میکروساختاری تاثیر ذرات زیرکونیا را در ماتریس آلومینا بر رشد دانه و بهبود خواص نشان داد، بدین صورت که بالای ۸٪ برای ریزسختی، ۱۱٪ برای استحکام پیچشی و ۲۳٪ برای مقاومت سایشی نانوکامپوزیت‌های حاوی ۵٪ حجمی ذرات نسبت به نانوکامپوزیت بدون آلومینا می‌شود.

واژه‌های کلیدی: چقرمگی، نانوکامپوزیت، ریزساختار، خواص مکانیکی.

۱- مقدمه

محسوب شده و کاربرد این مواد را محدود می‌کند. به همین دلیل بحث بررسی نانوکامپوزیت‌ها برای بهبود این خواص در سال‌های اخیر مطرح شده است. نانوکامپوزیت‌های سرامیکی، یک زمینه سرامیکی تقویت شده به وسیله ذرات نانومتری هستند [۱]. فلسفه ساخت آنها در حقیقت ارائه راه‌حلی برای جبران ضعف عمده سرامیک‌ها یعنی تردی این مواد است. طبق نظریه گریفیث، استحکام شکست مواد ترد تنها با افزایش چقرمگی شکست و یا کاهش طول ترک بحرانی بهبود

در سال‌های اخیر بررسی ریزساختار به عنوان مهمترین پارامتر تعیین کننده خواص مکانیکی و کاربرد نهایی مواد مورد توجه بسیار قرار گرفته است. به دلیل ماهیت پیوند اتمی در مواد سرامیکی که بیشتر از نوع کووالانت و یونی هستند این مواد دارای چقرمگی و استحکام به ضربه پایین و عدم تغییر شکل پلاستیک می‌باشند که این نقطه ضعف سرامیک‌ها برخلاف خیلی ویژگی‌های منحصر به فرد آنها

* عهده‌دار مکاتبات: صاحبعلی منافی

نشانی: شاهرود، بلوار دانشگاه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود

تلفن: ۰۲۷۳-۳۳۹۴۲۸۱، دورنگار: ۰۲۷۳-۳۳۹۴۲۸۳، پست الکترونیکی: ali_manafi2005@yahoo.com

یکی از روش‌های مرسوم در تولید نانوکامپوزیت روش سل-ژل می‌باشد. فرآیند سل-ژل شامل مجموعه‌ای از واکنش‌های شیمیایی تغییرناپذیر است که در حقیقت این واکنش‌ها باعث تبدیل مولکول‌های محلول هموزن اولیه به عنوان سل به یک مولکول سنگین سه بعدی پلیمری به عنوان ژل می‌شوند. در حقیقت جامد الاستیک به وجود آمده باعث پر شدن حجم محلول موجود می‌شود [۵].

آماده‌سازی ذرات در اندازه و مقیاس نانو مستلزم آماده‌سازی و فراهم کردن یک زمینه پیوسته از یک حلال می‌باشد که به آن سل کلوییدی می‌گویند. در این روش معمولاً به یک سیستم دیسپرز بسیار ریز، که دارای انرژی آزاد بسیار بالایی است، جهت در هم شکستن و بهم ریختن ساختار جامد نیاز است. به دلیل ریز دانه بودن ذرات و در نتیجه افزایش سطح ویژه، مواد و سیستم‌های کلوییدی تمایل و گرایش به آگلومره شدن دارند که این امر ناشی از نیروهای جاذبه و اندروالس بین ذرات و پایین بودن نیروهای دافعه برای عبور از سد انرژی ذاتی به وجود آمده در این فرآیند است. بزرگی و مقدار این سد انرژی آگلومره شدن بستگی به تعادل نیروهای جاذبه و دافعه بین ذرات دارد. در فرآیند سل-ژل انتقال سل به ژل اغلب به وسیله تغییر pH و یا تغییر غلظت محلول به دست می‌آید. مزیت اصلی فرآیند سل-ژل در تولید محصولی با خلوص بالا و دست یافتن به نانوساختاری یکنواخت در دمای پایین است. از روش سل-ژل اغلب جهت سنتز نانواکسیدهای فلزی استفاده می‌شود. همچنین با مخلوط کردن نمک‌های اولیه مورد استفاده می‌توان سیستم‌های دوتایی و یا سه تایی تولید کرد. هر مولکول از نمک‌های اولیه دارای سرعت واکنش مربوط به خودش است که این سرعت واکنش بستگی به شرایطی چون pH، غلظت، حلال و دما دارد [۶،۷]. هدف از این پژوهش، بررسی ریزساختار کامپوزیت‌های زمینه آلومینایی با افزودن مقادیر متفاوت نانوپودر زیرکونیا و تهیه بدنه‌هایی از این نانوکامپوزیت و ارزیابی خواص مکانیکی آنها می‌باشد.

۲- فعالیت‌های تجربی

مواد اولیه مورد استفاده برای آماده‌سازی نانوکامپوزیت‌ها

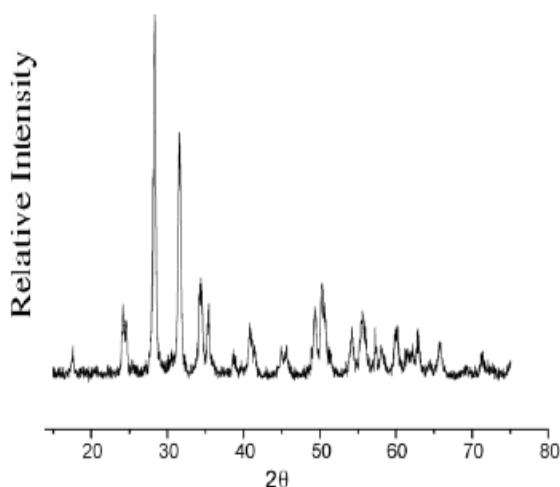
می‌یابد [۲]. تعریفی که برای نانوکامپوزیت‌ها ارائه شده است بیان می‌کند که این دسته از مواد دارای بیش از یک فاز جامد هستند که حداقل یکی از این فازها دارای ابعاد نانومتری است. فاز جامد نانومتری می‌تواند کریستالی، شبه کریستالی و یا آمورف باشد. در حقیقت افزودن ذرات در ابعاد نانومتری سبب کنترل بهتر ریزساختار و در نهایت رسیدن به خواص مطلوب می‌شود [۲،۳]. مهمترین ویژگی مواد اولیه نانومتری، میانگین اندازه ذرات خیلی ریز و خلوص بالاست. تنها در صورتی که فاز زمینه و تقویت کننده بسیار ریزدانه باشند امکان توزیع یکنواخت فاز نانومتری در بدنه نهایی بوجود می‌آید و همچنین خلوص بالای پودر اولیه نیز مانع از تشکیل فاز ثانویه در حین زینتر می‌شود. آلومینا از جمله مواد سرامیکی است که از سختی و استحکام فشاری و خمشی قابل قبولی برخوردار می‌باشد ولی چقرمگی شکست آن پائین است [۴]. از این رو برای بهینه‌سازی ویژگی‌های مذکور از کامپوزیت‌های زمینه آلومینایی استفاده می‌شود. از میان مطالعاتی که بر روی کامپوزیت‌ها صورت گرفته، سیستم‌های زمینه آلومینایی شامل ذرات نانومتری نظیر SiC، TiC و NbC قابل توجه‌تر می‌باشند [۹-۱]. در این میان خواص مکانیکی نانوکامپوزیت Al_2O_3/SiC بهبود فوق‌العاده‌ای یافته است بطوریکه Niihara چنین گزارش کرده‌اند که با ساخت نانوکامپوزیت $Al_2O_3-5\%volSiC$ استحکام بدنه آلومینای مونولیتیک را از 350 MPa به بیش از 1 GPa و چقرمگی را از $3/25\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ به حدود $4/7\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ برساند [۲].

در چندین دهه گذشته تحقیقات وسیعی در زمینه استفاده از زیرکونیا به عنوان فاز دوم در ساخت کامپوزیت‌ها آغاز شد [۵-۷]. ریزساختار کامپوزیت‌های آلومینا/زیرکونیا بر پایه حضور دو فاز جداگانه، بدون انجام واکنش و تشکیل محلول جامد میان این دو بنا شده است. حضور ذرات زیرکونیا در زمینه آلومینا، به عنوان ذرات مجزا که قابلیت انجام دگرگونی فازی را دارند، سازوکار اصلی افزایش چقرمگی در کامپوزیت‌های آلومینا/زیرکونیا می‌باشد [۱۰]. در حقیقت این دگرگونی فازی سبب ایجاد ریز ترک و ایجاد تنش فشاری در سطح و انحراف ترک خواهد شد [۱۰،۱۱].

مورفولوژی نمونه‌ها توسط TEM انجام گرفت. چگالی نمونه‌ها به روش قانون ارشمیدوس مطابق استاندارد ASTM-C373 انجام شد.

۳- نتایج و بحث

شکل ۱ الگوی XRD از نانوپودر زیرکونیا را نشان می‌دهد. همه پیک‌ها ساختار مونوکلنیک زیرکونیا را تایید می‌کنند. به کمک رابطه شرر (Scherrer) اندازه کریستال‌ها ۲۷ نانومتر بدست آمد.



شکل ۱: آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) از نانوپودر زیرکونیا.

جدول ۱ مشخصات مربوط به پودرهای زیرکونیا که شامل سطح ویژه و متوسط اندازه ذرات می‌باشد را نشان می‌دهد. سطح ویژه و قطر ذرات کروی به اندازه ذرات بدست آمده در میکروگراف نشان داده شده در شکل ۲ وابسته است که تقریباً ۳۰ نانومتر می‌باشد. ذرات ریزتر از آن بنا به دلایلی از جمله اینکه خوب در ریزساختار دیسپرز نشده‌اند یا مقدار آنها کم است، تخمین زده نشدند.

شکل ۲ که مربوط به تصاویر SEM و TEM از نانوپودر زیرکونیا است نشان می‌دهد که پودرهای ZrO_2 آگلومره شده‌اند. قابل ذکر است که عملیات سایش (آسیاب کردن) و ترکیب با آلومینا تا حدودی این آگلومراسیون را از بین می‌برد. البته همانطور که ذکر شد نوع محیط سوسپانسیون جهت آسیاب به روش تر هم در تشکیل آگلومرها تاثیر دارند [۴]، که با کنترل آن می‌توان این آگلومراسیون را

شامل پودر آلومینا (MR) - خلوص % ۹۹/۹۹ با سطح ویژه $13/6 \text{ m}^2/\text{g}$ و نانو پودر زیرکونیا (Tosoh, TZ-3) $99/9\%$ با سطح ویژه $19/8 \text{ m}^2/\text{g}$ و اسید آمینوبنزن به عنوان دفلوکولانت بود. مشخصات نانوپودر زیرکونیا توسط روش پراش پرتو X و همچنین اندازه کریستال‌ها با رابطه شرر و سطح ویژه به کمک روش BET (Gemini 2370) و ریزساختار آن بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) بررسی شد. در مورد مخلوط کردن پودرها برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها می‌توان گفت پودرها را می‌توان بوسیله آسیاب تر در محیط آبی یا محلول‌های آلی به صورت مخلوط هموزن درآورد. مطالعات نشان داده است که استفاده از آب سبب تشکیل آگلومره‌های سخت در حین فرآیند خشک کردن می‌شود. در صورتی که استفاده از محیط اتانول سبب پایداری و دفلوکوله شدن ذرات می‌شود و از تشکیل آگلومره‌های سخت جلوگیری می‌کند [۴].

بوسیله یک بالمیل گلوله‌ای و به روش تر به مدت ۱۲ ساعت یک سوسپانسیونی از نانوپودر زیرکونیا با %wt ۰/۵ اسید آمینوبنزن (به عنوان دفلوکولانت) در الکل تهیه شد. بطور همزمان یک سوسپانسیونی از Al_2O_3 در محیط الکل با افزودن مقدار %wt ۰/۲ اسید آمینوبنزن در یک بالمیل سیاره‌ای و به مدت ۱ ساعت آماده گردید. سوسپانسیون زیرکونیا با درصد‌های حجمی ۱، ۳ و ۵ به سوسپانسیون آلومینا اضافه شد.

مخلوط نهایی در یک بالمیل گلوله‌ای به مدت ۲۲ ساعت خوب مخلوط گردید. سپس دوغاب به مدت ۵ ساعت در دمای 120°C خشک شد. در انتها از پودرهای حاصله قطعات مورد نظر توسط پرس تک محوره ساخته شد. یک عملیات حرارتی در دمای 500°C به مدت ۳ ساعت جهت خروج ترکیبات آلی از بدنه که به عنوان افزودنی به بچ اولیه افزوده شده‌اند صورت گرفت. تست دیلاتومتری برای تعیین رنج دمایی شروع انقباض جهت ایتیمم فرآیند زینترینگ انجام گرفت. جهت آنالیز ریزساختار توسط SEM، نمونه‌ها اچ و پولیش شدند. آزمایشات سختی سنجی بوسیله تجهیزات سختی سنج با فروبرنده الماسه در یک بارگذاری ۲۰۰ گرم انجام شد. استحکام خمشی نمونه‌ها طبق استانداردهای موجود صورت گرفت. بررسی

جدول ۲ دانسیته ظاهری و بالک نمونه‌های زینتر شده با مقدارهای متفاوت ZrO_2 که شامل ۱، ۳ و ۵ درصد حجمی است در مقایسه با دانسیته تئوری را نشان می‌دهد. این ارقام نشان می‌دهد که دانسیته بالک وقتی مقدار زیرکونیا افزایش می‌یابد، زیاد می‌شود که علت آن حضور ذرات نانومتری زیرکونیا در بین ذرات آلومینا زمینه و پر شدن فضای خالی بین آنها می‌باشد.

جدول ۲: دانسیته‌های نمونه‌های آلومینا با درصد‌های مختلف نانوپودر زیرکونیا.

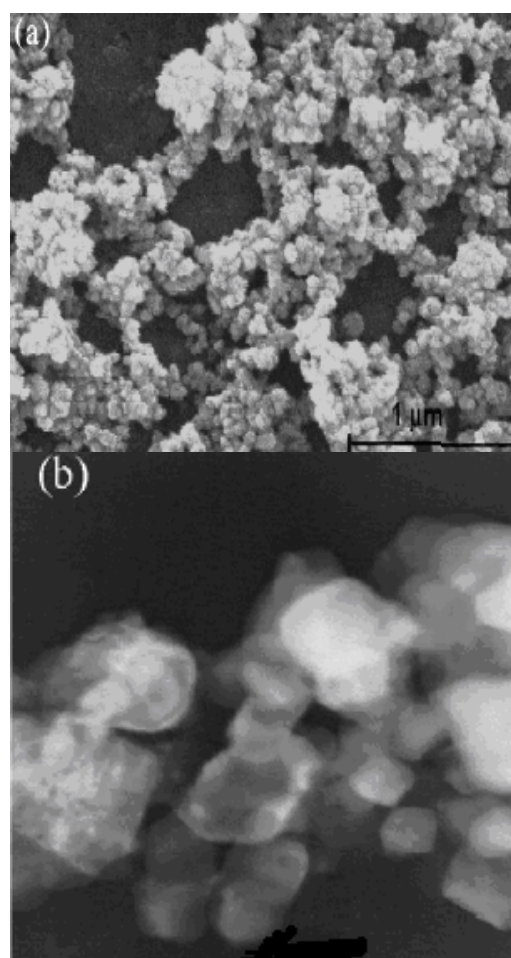
درصد‌های حجمی زیرکونیا در زمینه آلومینا	0%ZrO ₂	1%ZrO ₂	3%ZrO ₂	5%ZrO ₂
دانسیته بالک	۶۰/۶±۰/۳	۶۰/۷±۰/۴	۶۴/۴±۰/۴	۶۴/۷±۰/۳
دانسیته ظاهری	۹۹/۶±۰/۲	۹۸/۹±۰/۳	۹۸/۳±۰/۴	۹۸/۰±۰/۳
دانسیته تئوری	۳/۹۸	۳/۹۹	۴/۰۲	۴/۰۴

از طرفی با افزایش مقدار زیرکونیا به دلیل تفاوت ضرایب انبساط حرارتی فازهای آلومینا و زیرکونیا مقداری عیب در ساختار بوجود می‌آید. از جمله می‌توان به پیدایش تخلخل اشاره کرد در نتیجه دانسیته ظاهری با افزایش مقدار زیرکونیا، کاهش و به تناسب آن استحکام کمی افت می‌کند. شکل ۳ منحنی سرعت انقباض نمونه‌های آلومینایی که با افزودن مقدارهای متفاوت زیرکونیا (۱، ۳ و ۵) متغیر است را نشان می‌دهد. این منحنی راهنمای خوبی برای تعیین بهترین دمای زینترینگ جهت هر ترکیب می‌باشد. این منحنی نشان می‌دهد که ماکزیمم سرعت انقباض در دماهای مختلف برای هر ترکیب اتفاق می‌افتد. ماکزیمم سرعت انقباض برای ترکیب‌هایی شامل ۱، ۳ و ۵ درصد حجمی نانوپودر زیرکونیا به ترتیب در دماهای ۱۳۹۰، ۱۴۲۰، ۱۴۴۰ و ۱۴۶۰ درجه سانتیگراد اتفاق می‌افتد. با توجه به جدول نتایج حاصله حتی با افزایش دانسیته بالک نمونه‌ها و ابعاد نانومتری زیرکونیا تراکم نمونه‌های زینتر شده با افزایش مقدار زیرکونیا کاهش می‌یابد.

کاهش داد. وجود ذرات بزرگ (آگلومره‌ها) می‌توان یکی از عوامل کاهش استحکام در بدنه‌ها باشد.

جدول ۱: متوسط اندازه ذرات و سطح ویژه نانوپودر زیرکونیا.

ماده	متوسط اندازه ذرات (nm)	سطح ویژه (m ² /g)
نانوپودر زیرکونیا	۱۰۰/۰۰	۲۰/۰۰

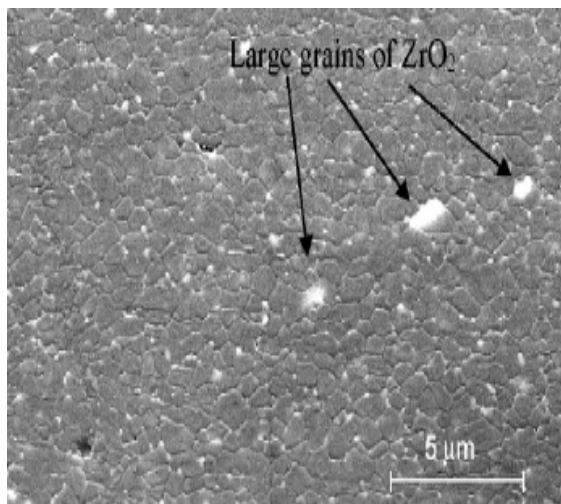


شکل ۲: تصاویر مربوط به SEM (a) و TEM (b) نانوپودر زیرکونیا.

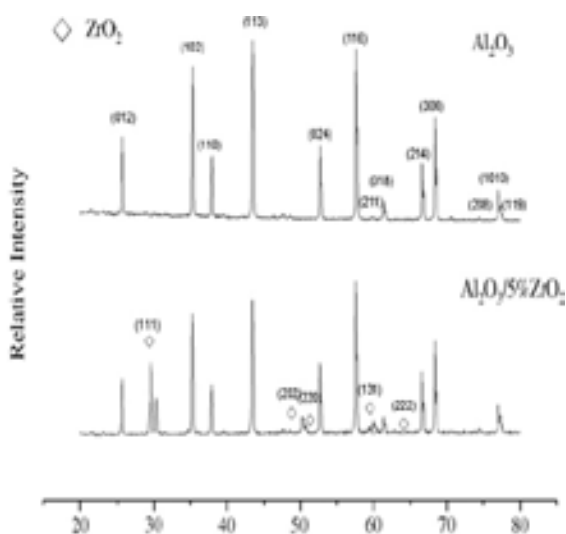
جدول ۲ دانسیته ظاهری و بالک نمونه‌های زینتر شده با مقدارهای متفاوت ZrO_2 که شامل ۱، ۳ و ۵ درصد حجمی است در مقایسه با دانسیته تئوری را نشان می‌دهد. این ارقام نشان می‌دهد که وقتی مقدار زیرکونیا افزایش می‌یابد، دانسیته بالک زیاد می‌شود که علت آن حضور ذرات نانومتری زیرکونیا در بین ذرات آلومینا زمینه و پر شدن فضای خالی بین آنها می‌باشد.

۵%vol زیرکونیا). در نتیجه در حین فرآیند زینترینگ بدنه‌ها، تخلخل در ساختار بوجود می‌آید و این عیب استحکام بدنه‌ها را تا حدودی کاهش می‌دهد. قابل ذکر است که با این نوع آگلومراسیون، نمونه‌های متراکم‌تری در مقایسه با مواد مشابه که در مقالات گزارش شده‌اند بدست آمده است [۹-۴].

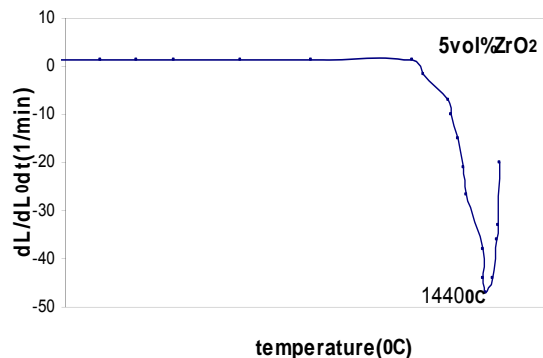
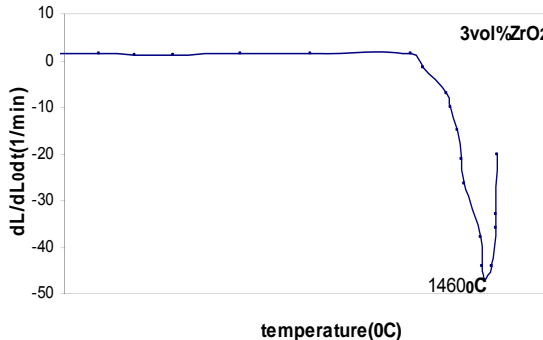
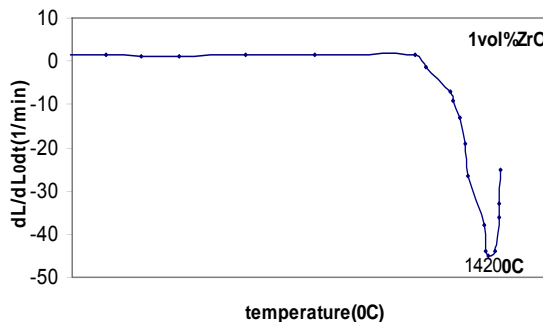
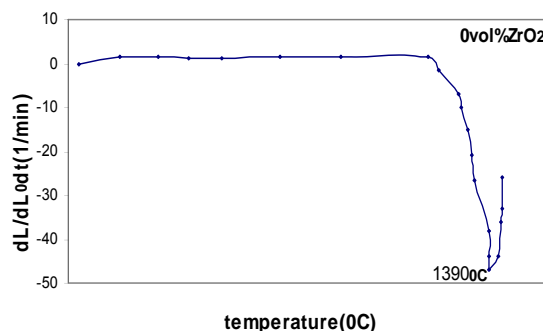
شکل ۵ الگوی XRD مربوط به نمونه‌های آلومینایی و نانوکامپوزیت آلومینا-زیرکونیا (با درصد حجمی ۵) را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با انتخاب یک دمای مناسب جهت فرآیند زینترینگ بدنه‌ها، تنها فازهای تشکیل شده در بدنه‌ها شامل ZrO_2 و Al_2O_3 می‌باشد.



شکل ۴: تصویر SEM مربوط به کامپوزیت Al_2O_3 -5vol% ZrO_2



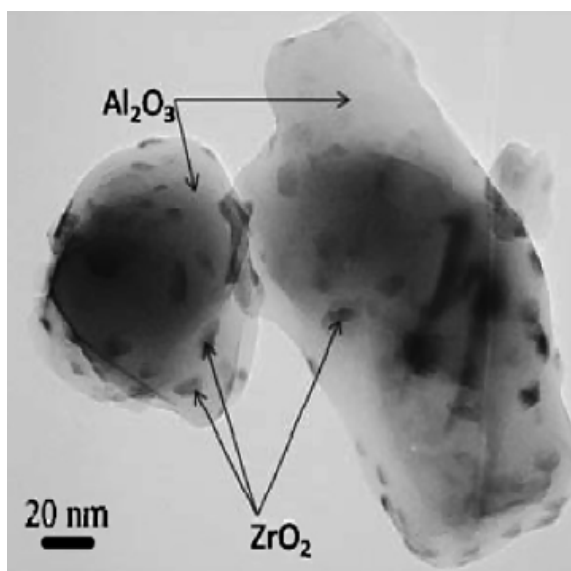
شکل ۵: الگوی XRD مربوط به نمونه‌های آلومینایی و نانوکامپوزیت آلومینا-زیرکونیا (با درصد حجمی ۵).



شکل ۳: منحنی‌های سرعت انقباض نمونه آلومینایی و نانوکامپوزیت آلومینا-زیرکونیا (درصدهای حجمی شامل ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد).

این کاهش ممکن است ناشی از آگلومراسیون پودر زیرکونیا باشد که همچنین این مشکل در حین فرآیند آمیختن پودرها هم قابل رفع نمی‌باشد. این آگلومراسیون منجر به تشکیل دانه‌های بزرگ زیرکونیا می‌شود. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است (برای سیستم شامل

نتایج تست‌های خمشی سه نقطه‌ای به عنوان یک عملکردی از غلظت ذرات زیرکونیا در زمینه آلومینا در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود استحکام خمشی قطعات با افزایش مقدار زیرکونیا، افزایش یافته است. بطوریکه برای نمونه‌ای شامل ۵ vol% زیرکونیا استحکامی معادل ۴۵۰ MPa بدست آمده است. تنها عاملی که از افزایش بیشتر این استحکام ممانعت به عمل می‌آورد همان بحث آگلومراسیون و ایجاد تخلخل در قطعات می‌باشد. که این اثر منفی را هم می‌توان با کنترل بهتر بر روی اختلاط مواد اولیه و دمای پخت تا حدودی تقلیل داد.

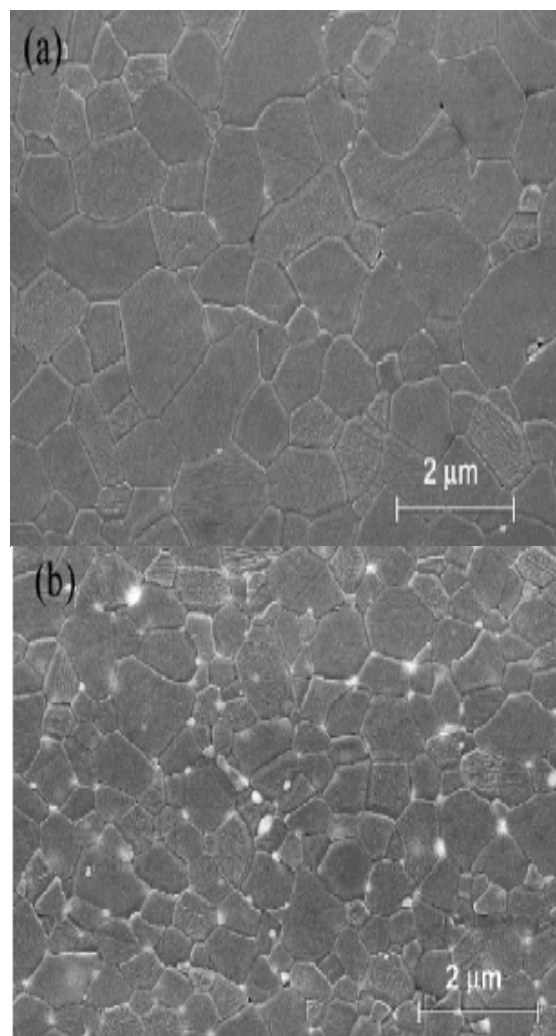


شکل ۷: تصویر TEM مربوط به ریزساختار بدست آمده از نمونه شامل ۵ درصد حجمی زیرکونیا.

جدول ۳ نتایج میکروسختی Al_2O_3 و نانوکامپوزیت آلومینا شامل مقادیر ۱، ۳ و ۵ درصد حجمی زیرکونیا را نشان می‌دهد که این نتایج حاکی از افزایش سختی با افزایش مقدار زیرکونیا می‌باشد. در کامپوزیت‌های آلومینا/زیرکونیا بدلیل تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی فازها در حین سرمایش و گرمایش تنش‌هایی به ساختار وارد می‌شود که این تنش‌ها موجب انحراف ترک و جلوگیری از اشاعه آن شده، در نتیجه تاثیر مثبتی بر روی استحکام و سختی دارد. شکل ۹ سرعت سائیدگی (سایش) در مقابل غلظت ذرات زیرکونیا را نمایش می‌دهد. سرعت سائیدگی با افزایش زیرکونیا کاهش می‌یابد. این سرعت در نمونه‌ای با

شکل ۶a و ۶b به ترتیب یک میکروگرافی از نمونه‌های آلومینا و آلومینایی با ۱ vol% زیرکونیا را نشان می‌دهند. در این شکل ملاحظه می‌شود که به دلیل حضور ذرات ZrO_2 بر روی مرزخانه‌های آلومینا مانع از رشد آنها می‌شوند.

با اندازه‌گیری بعمل آمده، اندازه ذرات آلومینا بدون زیرکونیا $1/21 \pm 0/33$ میکرومتر بدست آمده است در حالی که برای نمونه‌ای با ۱ vol% زیرکونیا اندازه ذرات به $0/68 \pm 0/12$ میکرومتر تقلیل یافته است. در این تصاویر هم ذرات آگلومره ZrO_2 در ریزساختار مشاهده می‌شود. شکل ۷ تصویر TEM در بزرگنمایی بالاتر دیسپرساسیون ذرات زیرکونیا در زمینه آلومینایی و آگلومره شدن آنها را بهتر نشان می‌دهد.



شکل ۶: ریزساختار آلومینا (a) بدون زیرکونیا و (b) با ۱ درصد حجمی زیرکونیا.

۴- نتیجه گیری

- افزودن نانوپودر زیرکونیا به زمینه آلومینایی خواص مکانیکی (Mechanical Properties) و چقرمگی شکست (Fracture Toughness) این سیستم را افزایش می دهد.
- افزودن ۱ درصد حجمی نانوپودر زیرکونیا به زمینه آلومینا برای جلوگیری از رشد دانه های آلومینا کافی است. در نتیجه ساختار ریز دانه تر به خوبی زینتر شده و استحکام افزایش می یابد.
- قطعات نانوکامپوزیت آلومینا/زیرکونیا (Al_2O_3/ZrO_2) با ۵ درصد حجمی نانوپودر زیرکونیا (سختی (Hardness) معادل ۲۱ GPa و استحکام خمشی 450 MPa را از خود نشان می دهد. که این مقادیر برای بدنه های آلومینایی به ترتیب معادل ۱۰ GPa و 250 MPa می باشد.
- سرعت ساییدگی با افزایش زیرکونیا کاهش می یابد. این سرعت در نمونه های با ۵%vol زیرکونیا در مقایسه با نمونه آلومینایی بدون زیرکونیا ۲۳% کاهش یافته است.

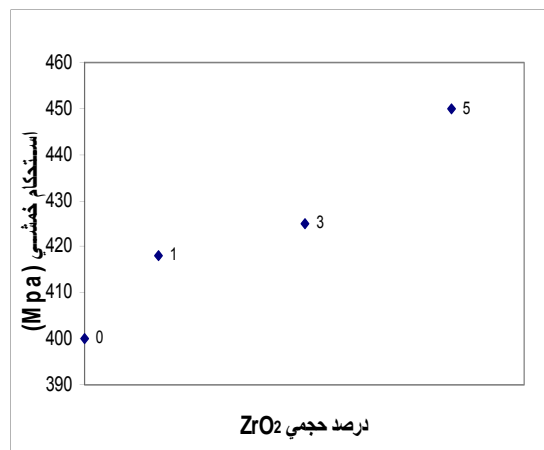
سپاسگزاری

وظیفه خود می دانیم از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، محققین، مسئولین و کارشناسان محترم آزمایشگاه های دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات و تمام افرادی که ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند تشکر و قدردانی نماییم.

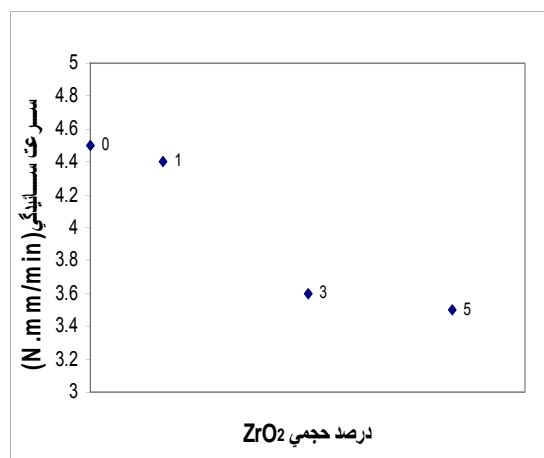
مراجع

[1] A.J. Drehman, A.L. Greer, *Acta Metallurgica*, **32**, 1984, 323.
 [2] K. Niihara, *J. ceram.Soc. Jpn.*, **99**, 1991, 974.
 [3] A. Nakahira, K. Niihara, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **100**, 1992, 448.
 [4] M. Furukawa, *Ceramic bulletin*, **62**, 1983, 1275.
 [5] J. Wang, R. Stevens, *Journal of Materials Science*, **24**, 1989, 3421.
 [6] F.F. Lange, *Journal of Materials Science*, **17**, 1982, 234.
 [7] H. Ruf, G.Evans, *J. Am. Ceram. Soc.*, **66**, 1983, 328.
 [8] J.A. Pallone, V. Trombini, W.J. Botta, R. Tomasi, *Journal of Materials Processing Tecnology*, **143**, 2003, 185.

۵%vol زیرکونیا در مقایسه با نمونه آلومینایی بدون زیرکونیا ۲۳ درصد کاهش یافته است. که عامل اصلی چنین ویژگی افزایش سختی نمونه ها با افزایش مقدار زیرکونیا می باشد.



شکل ۸: استحکام خمشی نانوکامپوزیت آلومینا/زیرکونیا بر حسب درصد حجمی زیرکونیا.



شکل ۹: تغییرات سرعت ساییدگی نمونه های نانوکامپوزیت آلومینا/زیرکونیا.

جدول ۳: نتایج سختی سنجی ویکرز برای نمونه های آلومینایی و نانوکامپوزیت آلومینا/زیرکونیا.

نمونه ها	سختی (GPa)
$Al_2O_3 + 0\text{vol}\% ZrO_2$	19.39 ± 0.180
$Al_2O_3 + 1\text{vol}\% ZrO_2$	19.77 ± 0.162
$Al_2O_3 + 3\text{vol}\% ZrO_2$	20.82 ± 0.196
$Al_2O_3 + 5\text{vol}\% ZrO_2$	21.01 ± 0.140

[10] F.F. Lange, *Journal of Materials Science*, **17** 1984, 255.
[11] F. Xiong, R.R. Manory, *Wear*, **236**, 1999, 240.

[9] T. Wang, C.H. Cheng, P.S. Kuo, *Eur. Ceram. Soc.*, **22**, 2002, 2827.