

بررسی اثر افزودن ایتریا بر خواص کامپوزیت‌های مولایت-زیرکونیای ساخته شده به روش ریخته‌گری دوغابی

مهسا رحمانی^{*}، کمال جانقربان و سasan اطرج

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۴/۲۷ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۰۹/۰۶)

-چکیده-



واژگان کلیدی :

Evaluating the Effect of Yittria Addition on the Mullite-Zirconia Composites Manufactured by Slip Casting Method

M. Rahmani*, K. Janghorban and S. Otroj

Department of Materials Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Abstract: In this study, the effect of different amounts of Y_2O_3 on the properties of mullite-zirconia composites was investigated. For this purpose, these composites were fabricated by reaction-sintering of alumina and zircon as raw materials.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mahsa Rahmani_65@yahoo.com

Besides, the slip casting method was used for forming these composites, and sintering process was carried out at 1600 °C. Then, the physical and mechanical properties, phase composition and the microstructure of these composites were investigated. The results showed that yttria addition up to 0.5 wt.% has no effect on the properties of these composites. Besides, addition of more than 0.5 wt.% yttria formed solid solution with zirconia grains and led to stabilization of tetragonal zirconia phase and increasing of its amount. Hence, yttria addition increases the hardness and bending strength of composite by stabilizing tetragonal zirconia phase and then, decreasing the micro-crack formation during zirconia phase transformation. As results show, addition of 0.75 wt.% yttria leads to a considerable increase in the bending strength.

Keywords: Composite, Mullite-zirconia, Reaction-sintering, Slip casting, Yttria.

آلومینا از نظر اقتصادی مفرون به صرفه‌تر و توجه بسیاری از محققان را به خود جذب کرده است. شروع دمای تجزیه زیرکن در حدود ۱۶۷۵ °C است، اما وجود برخی از ناخالصی‌ها در مواد اولیه ممکن است دمای تجزیه را کاهش دهد. در طی این واکنش اتصالی، تجزیه زیرکن و تشکیل مولاپت در حدود ۱۴۰۰ °C شروع شده، به طور ویژه تا ۱۶۰۰ °C کامل می‌گردد.^۱

به هنگام سرد شدن در دمای تغییر فاز زیرکونیا یعنی ۱۱۰۰ °C کریستال‌های زیرکونیا از فاز تراگونال به مونوکلینیک^۲ تغییر فاز می‌دهند که منجر به افزایش حجم و در نتیجه توسعه‌ی ترک‌های ریز در زمینه می‌شود که نتیجه‌ی این امر افزایش چقرمگی این نوع کامپوزیت‌ها است. حفظ فاز زیرکونیای تراگونال در دمای اتاق در زمینه مولاپتی مزیتی برای افزایش استحکام و چقرمگی این نوع کامپوزیت‌ها محسوب می‌شود. مشخص شده است که مواد افزودنی می‌تواند به ثبت فاز تراگونال کمک کند. در این ارتباط محققان زیادی نقش افزودنی‌های مختلف را با اندازه‌ی ذرات میکرونی بر روی رفتار تف جوشی و خواص مکانیکی این نوع کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۱-۱۴]. مشخص شده است که اکسیدهای پایدار کننده اثر مهمی روی مقدار فازها و توزیع فاز غیربلوری^۳ در این نوع کامپوزیت‌ها دارند. حضور کمک ذوب‌ها و عناصر پایدار کننده مانند کلسیا^{۱۲}، میزیا^{۱۳} (MgO)، تیتانیا^{۱۴} (TiO₂) در ترکیب مواد اولیه می‌تواند باعث بهبود مکانیزم‌های افزایش چقرمگی شود [۱۵]. میزیا با ایجاد فاز انتقالی شیشه‌ای باعث آرایش بهتر، فشردگی موثرتر ذرات و بهبود چگالی می‌شود. رفتار مشابهی در میکرو ذرات اکسید کروم^{۱۵} (Cr₂O₃) گزارش شده است.

۱- مقدمه

مولایت از فازهای مهم سرامیکی است که به طور وسیعی در سرامیک‌های صنعتی استفاده می‌شود [۱]. در سال‌های اخیر مقالات زیادی در ارتباط با اهمیت مولاپت و سرامیک‌های مولاپتی توسط بسیاری از محققان به چاپ رسیده که نشانگر اهمیت این ماده در صنعت سرامیک است [۲]. مولاپت دارای خواصی مانند ضربه انبساط حرارتی و هدایت گرمایی کم، مقاومت به خرس و خوردگی بسیار خوب، شفافیت در برابر اشعه مادون قرمز و ثابت دی‌الکتریک کوچک است که باعث شده تا مولاپت به عنوان یک ماده‌ی مناسب برای بسیاری از کاربردها مطرح شود [۳ و ۴]. اما عیب اصلی مولاپت چقرمگی^۴ پایین آن است. یکی از روش‌های موثر برای حل این مشکل تشکیل کامپوزیت‌های سرامیکی است [۵]. در دو دهه‌ی اخیر تلاش‌های بسیاری برای بهبود خواص مولاپت با تقویت کننده‌های صفحه‌ای و ذرات به ویژه سیلیکون کارید، زیرکونیا و آلومینا انجام شده است که از این میان بهبود چقرمگی مولاپت به طور موقتی آمیزی از طریق تشکیل کامپوزیت‌های مولاپت با ذرات زیرکونیای یکنواخت توزیع شده، حاصل شده است [۶ و ۷]. علاوه بر زیرکونیا مشخص شده است که افزودن زیرکن نیز می‌تواند تاثیر مشابهی در ترکیب بدن‌های سرامیکی داشته باشد [۸ و ۹]. روش‌های گوناگونی برای ساخت این کامپوزیت‌ها ابداع شده است که در این میان می‌توان به تف جوشی مخلوط مولاپت و زیرکونیا، تف جوشی واکنشی آلومینا و زیرکن، تف جوشی واکنشی آلومینا، سیلیس^۹ و زیرکونیا و روش‌های شیمیابی اشاره نمود [۱۰]. در این ارتباط روش تف جوشی واکنشی مخلوط زیرکن و

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مواد اولیه مصرفی برای ساخت کامپوزیت مولايت-زیرکونیا

آلومنیا (wt. %)	زیرکن	آلومنیا
ZrO ₂	۶۴	-
SiO ₂	۳۶	۰/۲
Al ₂ O ₃	-	۹۹/۶
Na ₂ O	-	۰/۱۵
Fe ₂ O ₃	۰/۱	۰/۰۲
TiO ₂	۰/۱۵	-

جدول ۲- خواص و ویژگی‌های ایتریای مصرفی

نقطه ذوب (°C)	چگالی (gr/cm ³)	متوسط اندازه ذرات (μm)	خلوص (%)
۲۴۳۵	۵/۰۳	۳	۹۹/۹۹

شده است. در این ارتباط خواصی همانند خواص فیزیکی، مکانیکی، ترکیب فازی و ریزساختار کامپوزیت‌های تف جوشی شده در دمای ۱۶۰۰°C مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

۱- مواد اولیه مورد استفاده

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق شامل پودر زیرکن (ZrSiO₄) با مت�单 اندازه ذرات ۲/۶۳ میکرومتر (محصول شرکت کربوترونیت^{۱۷} آلمان) و آلومنیا (Al₂O₃) با مت�单 اندازه ذرات ۵/۴۴ میکرومتر (محصول شرکت پنچینی^{۱۸} فرانسه) بود که تحلیل شیمیایی آنها در جدول (۱) ارائه شده است.

خواص و ویژگی‌های ایتریای مصرفی (محصول شرکت گودفلو^{۱۹} انگلستان) در جدول (۲) ارائه شده است. برای بررسی اثر ایتریا مقادیر آنها به صورت مثبت تا مقدار یک درصد وزنی به ترکیب مواد اولیه اضافه شد.

تیتانیا باعث بهبود تفجوشی و چگالی از طریق تشکیل فاز شیشه‌ای می‌شود [۱۳-۱۱]. به طور کلی نوع ریزساختار کامپوزیت‌ها از جمله عوامل مهم در تعیین خواص نهایی شان محسوب می‌شود. برای اطمینان از کسب ریزساختارهای یکنواخت، دارای ذرات ریزدانه و بدون ذرات تجمع یافته^{۱۶} و در نتیجه اطمینان از خواص مکانیکی مناسب، از روش ریخته‌گری دوغابی برای ساخت این نوع کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. روش ریخته‌گری دوغابی از جمله روش‌های مناسب برای ساخت بدنه‌های کامپوزیتی به شمار می‌رود، زیرا می‌توان از ذراتی با اندازه‌های کوچک استفاده نمود و مخلوط‌سازی اجزاء نیز می‌تواند در حد بسیار مطلوبی صورت گیرد [۱۸-۹]. بنابراین استفاده از روش ریخته‌گری دوغابی برای ترکیبات دارای افزودنی می‌تواند علاوه بر پراکنده شدن بهتر افزودنی‌ها در سیستم، تاثیر بیشتری نیز بر خواص این نوع کامپوزیت‌ها داشته باشد. در این تحقیق استفاده از زیرکن و آلومنیا با بهره‌گیری از روش تف جوشی واکنشی برای ساخت بدنه کامپوزیت مولايت-زیرکونیا مدنظر قرار گرفته است. سپس به بررسی تاثیر افزودن ایتریا بر خواص و ویژگی‌های این نوع بدنه‌های کامپوزیتی پرداخته

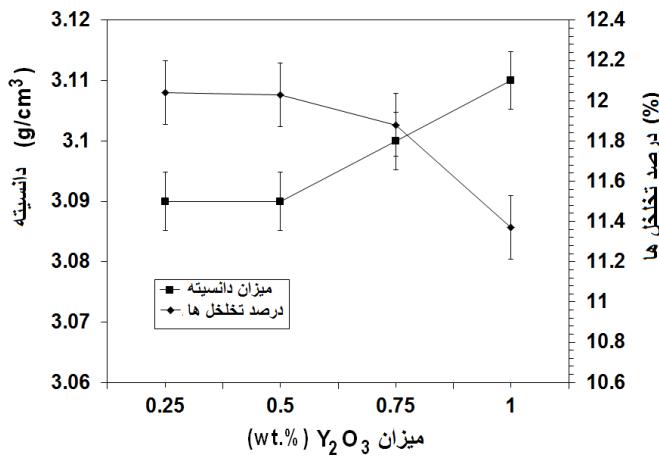
۲-۲- ترکیب و روش ساخت نمونه‌ها

ریخته‌گری برخوردار بود. بنابراین در تمامی دوغاب‌های تهیه شده میزان افزودنی پراکنده ساز و نسبت آب به جامد به گونه‌ای تغییر داده شد تا زمان عبور ۱۰۰ ثانیه بدهست آید. با انجام آزمون روانسازی، از طریق ارزیابی خواص جریان یابی دوغاب حاصل، مقدار مناسب افزودنی پراکنده ساز آلی (۰/۲۴ درصد وزنی دلپیکس) و نسبت آب به جامد بهینه (۶۵ درصد وزنی جامد و ۳۵ درصد وزنی آب) تعیین شد که این نسبت به دست آمده با مقادیر گزارش شده در مقالات نیز هم خوانی دارد [۱۲-۹ و ۱۸]. از طرف دیگر با توجه به اینکه درصد روانساز محاسبه شده بر اساس درصد جامد به کار رفته در دوغاب است، بنابراین با اضافه شدن ذرات میکرونی ایتریا مقدار روانساز لازم کمتر از حد مورد نیاز شده، دوغاب سیالیت کافی را برای ریختن در قالب نخواهد داشت و با افزایش ویسکوزیته روپرو می‌شود. بنابراین مناسب با افزودن ذرات ایتریا به ترکیب مقدار روانساز نیز افزایش داده شد که تعیین مقدار دقیق آن از طریق آزمایش و اندازه‌گیری زمان عبور دوغاب صورت گرفت. برای شکل دهن قطعات از روش ریخته‌گری دوغابی استفاده شد. بدین منظور از قالب گچی برای شکل دهن نمونه‌ها به صورت استوانه‌ای شکل استفاده شد که پس از خشک شدن نمونه‌ها در خشک کن با دمای 110°C در کوره الکتریکی با دمای 1600°C و به مدت ۳ ساعت پخت نمونه‌ها انجام شد [۱۲-۹ و ۱۸].

۲-۳- روش‌های ارزیابی خواص

پس از تف جوشی، خواص فیزیکی نمونه‌ها شامل چگالی و تخلخل و میزان انقباض پس از پخت نیز به ترتیب طبق روش‌های استاندارد ASTM-C373-8 و ASTM-C326-09. اندازه‌گیری شد. استحکام خمی بر طبق استاندارد ASTM-C1161-02 و ASTM-C1327-08 سختی نمونه‌ها توسط استاندارد ارزیابی شد. استحکام خمی سرد نمونه‌ها مطابق با بارگذاری سه نقطه‌ای تعیین شد، اما به دلیل مشکل بودن

ابتدا آلومینا و زیرکن به نسبت وزنی ۴۵/۵ به ۵۴/۵ (نسبت استوکیومتری 2°) مخلوط و سپس برای خردایش بیشتر ذرات، مخلوط سازی مناسب مواد اولیه مصرفی و شکستن تجمع ذرات از آسیاب سریع^{۲۱} گلوله‌ای با بدنه و گلوله‌های آلومینای استفاده شد. با توجه به اندازه‌ی نسبتاً درشت مواد اولیه مصرفی (مواد موجود در بازار) و با توجه به تحقیقات انجام شده مشخص شد که برای انجام مناسب و کامل واکنش‌ها در دمای بالا بایستی مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش به مدت ۲ ساعت توسط بالمیل ترساب شوند تا به اندازه‌ی ذرات مناسب جهت انجام واکنش‌ها برسند [۱۸]. متوسط اندازه‌ی ذرات دوغاب پس از انجام آسیاب توسط دستگاه لیزر^{۲۲} اندازه‌گیری شد که متوسط $1/1$ میکرومتر به دست آمد. به طور کلی اندازه‌ی ذرات از طریق سطح ویژه بر روی میزان روانساز (پراکنده ساز) مورد نیاز تاثیر دارد، زیرا روانساز بر روی سطح ذرات جامد قرار گرفته، اثر می‌گذارد. اما در طی انجام این پژوهش در ابتدا مواد اولیه ترساب و سپس روانسازی آنها انجام شد. بدین ترتیب تاثیر کوچک کردن ذرات بر رفتار جریان یابی^{۲۳} دوغاب حذف شد. نسبت آب به جامد بهینه و مقدار مناسب افزودنی پراکنده‌ساز از طریق آزمایش روانسازی برای این نوع دوغاب‌ها به دست آمد. بدین منظور در ابتدا با نسبت آب به جامد ثابت 50° دوغاب‌هایی (پس از ترساب کردن توسط آسیاب گلوله‌ای) با درصدهای مختلف روانساز (پراکنده ساز - دلپیکس پی سی 67°) تهیه و پس از ارزیابی خواص رئولوژی دوغاب، همانند زمان عبور به عنوان معیاری از جریان یابی^{۲۴} درصد روانساز مناسب به دست آمد. سپس دوغاب‌هایی با درصد روانساز ثابت و با نسبت آب به جامد متفاوت ساخته شد که پس از ساخت و بررسی خواص رئولوژی (زمان عبور) نسبت آب به جامد مناسب به دست آمد. با توجه به بررسی‌های اولیه، دوغابی با زمان عبور 100 ثانیه در ویسکوزیمتر ریزشی استاندارد از شرایط مناسبی برای



شکل ۱- اثر افزودن ایتریا بر چگالی و درصد تخلخل کامپوزیت مولایت-زیرکونیا

نیز باعث کاهش جزئی تخلخل و متناسب با آن باعث افزایش جزئی چگالی کامپوزیت می‌گردد که البته تغییرات حاصل جزئی و احتمالاً به خطای اندازه‌گیری‌ها مربوط است. بنابراین نتیجه‌ی مشخصی از این نتایج نمی‌توان برداشت نمود. گزارش شده است که افزودن ایتریا به مولایت باعث تشکیل فاز مایع در دمای پایین و در نتیجه کاهش تخلخل‌ها و افزایش چگالی می‌شود [۱۹]. بنابراین ایجاد فاز مذاب باعث انجام تغییر جوشی در حضور فاز مایع شده، درصد تخلخل را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر تغییر فاز تراگونال به مونوکلینیک همراه با ۴-۵ درصد افزایش حجم است که نتیجه‌ی آن ایجاد میکروترک و تخلخل در ساختار بوده که این تغییر فاز موجب کاهش چگالی می‌شود [۱۴-۹]. افزودن ایتریا می‌تواند باعث ثبیت فاز تراگونال شود و از این تغییر حجم و ایجاد تخلخل جلوگیری کند که این پدیده می‌تواند از طریق نتایج تحلیل فازی، بیشتر مورد بررسی قرار گیرد. به هر حال ثبیت فاز تراگونال می‌تواند منجر به افزایش چگالی گردد.

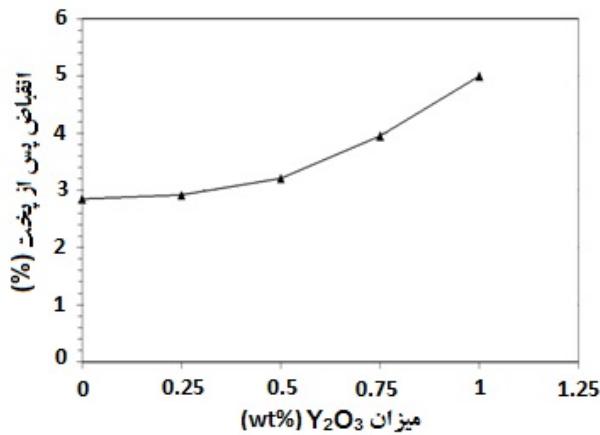
در شکل (۲) تغییرات میزان انقباض پس از پخت بر حسب میزان افزودنی ایتریا ارائه شده است. مشاهده می‌شود

ساخت قطعات بزرگ با ابعاد استاندارد ($16 \times 2 / 5 \times 2 / 5$ سانتی متر مکعب) از نمونه‌هایی با ابعاد کوچک‌تر و قابل ساخت ($4 \times 4 \times 30$ میلی متر مکعب) استفاده گردید [۱۲-۹]. برای تحلیل فازی از دستگاه پراش پرتو ایکس^{۲۵} (ساخت شرکت بروکر آکس^{۲۶} آلمان، مدل D8 Advance) استفاده شد. سپس برای شناسایی فازهای موجود و بررسی‌های نیمه کمی از نرم افزار X-pert Highscore استفاده شد. میزان سختی قطعات به کمک روش میکروسختی سنجی ویکرز^{۲۷} تعیین شد. هم‌چنین بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی رویشی^{۲۸} (مدل Leica Cambridge انگلستان) انجام شد.

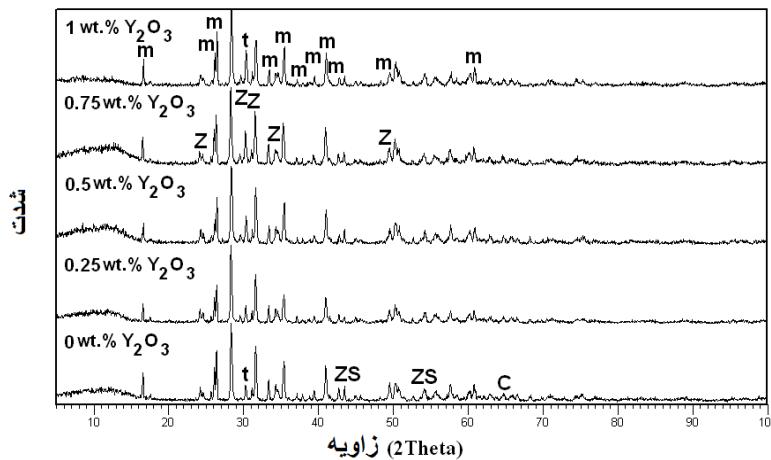
۳- نتایج و بحث

۱-۱- اثر افزودن ایتریا بر خواص فیزیکی

در شکل (۱) اثر مقدار ایتریا بر میزان چگالی و درصد تخلخل بدنه‌ی کامپوزیت مولایت-زیرکونیا ارائه شده است. با توجه به نتایج به نظر می‌رسد که با افزودن ایتریا تا مقدار تقریباً ۰/۵ درصد وزنی به ترکیب، تغییری در مقدار تخلخل بدنه و در نتیجه چگالی آن ایجاد نمی‌شود. مقادیر بیشتر آن



شکل ۲- اثر افزودن ایتریا بر میزان انقباض پس از پخت کامپوزیت مولایت-زیرکونیا



شکل ۳- نتایج تحلیل فازی مربوط به اثر افزودن مقادیر مختلف ایتریا بر کامپوزیت مولایت-زیرکونیا

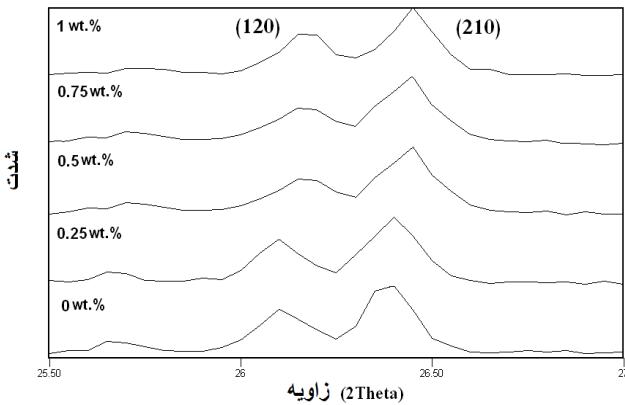
(m: mullite, Z: m-ZrO_2 , t: t-ZrO_2 , C: Corundum, ZS: Zircon)

۲-۳- اثر افزودن ایتریا بر آنالیز فازی

نتایج مربوط به تاثیر افزودن مقادیر مختلف ایتریا بر تحلیل فازی کامپوزیت مولایت-زیرکونیا در شکل (۳) ارائه شده است.

نتایج تحلیل فازی مشخص می‌کند که پس از تف جوشی در دمای مورد استفاده، فازهای مولایت و زیرکونیای مونوکلینیک در تمام ترکیبات وجود دارند. همچنین مقدار کمی از مواد اولیه به صورت فازهای کوراندوم^{۲۹} و زیرکن در

که در اثر افزایش ایتریا میزان انقباض پس از پخت نیز افزایش یافته است که این امر می‌تواند به دلیل نزدیک شدن دانه‌ها و کاهش تخلخل‌های بدنی باشد که نتیجه‌ی آن افزایش بیشتر فشردگی بدنی است. در این ارتباط تشکیل فاز مایع در بدنی می‌تواند تاثیر زیادی بر افزایش انقباض داشته باشد. نتایج شکل (۲) نشان می‌دهد که افزایش میزان انقباض در مقادیر بیشتر از $5/5^{\circ}$ درصد وزنی این افزودنی اتفاق می‌افتد.



شکل ۴- اثر افزودن ایتریا بر جایه‌جایی پیک‌های مربوط به صفحات (۱۲۰) و (۲۱۰) مولایت

مکانیزم ایجاد تنش القابی باعث بسته شدن ترک‌ها و در نتیجه افزایش چقرمگی شکست شود. وقتی یک ترک تحت تنش گسترش می‌پاید، تنش‌های کششی بزرگی در اطراف ترک به ویژه در منطقه نوک ترک به وجود می‌آید. این تنش‌ها، فشارهای شبکه بروی ذرات زیرکونیایی تراگونال را آزاد می‌کند و اگر به حد کافی بزرگ باشند تنش کششی خالصی بر ذرات وارد می‌کند که در نتیجه تبدیل، فاز تراگونال به مونوکلینیک اتفاق می‌افتد. در اثر این تبدیل انبساط حجمی در ذرات ایجاد می‌شود که نتیجه‌ی آن ایجاد کرنش فشاری در اطراف ذرات است. به دلیل ایجاد این تنش‌های فشاری به ویژه روی نوک ترک، ترک بسته شده یا احتیاج به انرژی بیشتری برای گسترش پیدا می‌کند. در هر صورت تغییرات فازی ذرات زیرکونیا باعث جذب انرژی ترک و در نتیجه افزایش چقرمگی بدنی می‌شود. ذرات زیرکونیایی مونوکلینیک به دلیل ایجاد میکروترک باعث انحراف ترک‌های بحرانی در ساختار شده، به عنوان مکانیزم اولیه، چقرمگی شکست را افزایش می‌دهند. در صورت وجود ذرات تراگونال مکانیزم دیگری می‌تواند باعث بسته شدن نوک ترک‌ها گردد و در نتیجه در کنار مکانیزم اول باعث افزایش بیشتر چقرمگی شود [۱۰-۱۵]. بنابراین پیش‌بینی

ترکیب باقی مانده و در واکنش شرکت نکرده‌اند. به طور کلی زیرکن مورد استفاده به عنوان ماده‌ی اولیه با افزایش دما شروع به تجزیه می‌کند و در نتیجه سیلیس و زیرکونیا تشکیل می‌شود. سپس سیلیس با آلومینا به عنوان یکی دیگر از مواد اولیه مورد استفاده وارد واکنش شده، تشکیل مولایت می‌دهند. به طور کلی زیرکن در اثر تجزیه در دمای بالا به فاز تراگونال تبدیل می‌شود، اما با سرد شدن، تبدیل فازی تراگونال به مونوکلینیک در دمای ۱۱۰°C همراه با افزایش حجم اتفاق می‌افتد که باعث می‌شود تا در دمای انتقال در ریزساختار، فاز مونوکلینیک وجود داشته باشد که به دلیل افزایش حجم اطراف ذرات زیرکونیایی مونوکلینیک ترک‌های ریزی ایجاد می‌شود.

میکروترک‌های ایجاد شده با انحراف ترک بحرانی می‌توانند انرژی آن را جذب یا پراکنده کنند. بدین ترتیب چقرمگی شکست کامپوزیت افزایش می‌پاید [۹-۱۴]. با توجه به نتایج، افزودن مقادیر بالای ۵/۰ درصد وزنی ایتریا باعث افزایش مقدار فاز تراگونال و در عوض کاهش مقدار فاز زیرکونیایی مونوکلینیک می‌شود، بنابراین ایتریا می‌تواند باعث ثبت جزئی زیرکونیا گردد. از دلایل این امر می‌توان به انحلال ایتریا در داخل ذرات زیرکونیا اشاره نمود که باعث پایداری فاز تراگونال می‌شود. نتیجه‌ی این ثبت، حضور فاز زیرکونیای تراگونال در ریزساختار است که می‌تواند از طریق

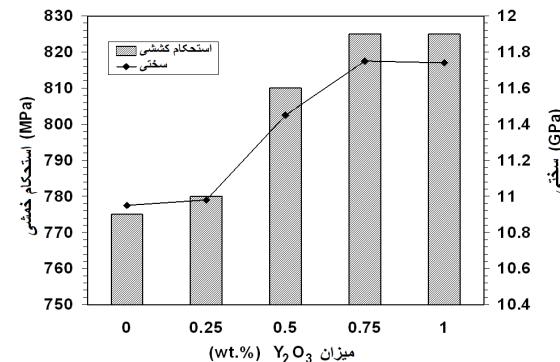
۳-۳- اثر افزودن ایتریا بر خواص مکانیکی

در شکل (۵) اثر افزودن ایتریا بر میزان استحکام خمشی و سختی کامپوزیت مولایت-زیرکونیا ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده مشخص می‌شود که افزودن ایتریا باعث افزایش سختی این نوع کامپوزیت‌ها می‌گردد. از جمله مهم‌ترین دلایل این امر می‌توان به تشکیل فاز زیرکونیایی تتراتگونال در ترکیب فازی بدنه با افزودن ایتریا اشاره نمود که در نتایج تحلیل فازی نیز این امر دیده می‌شود. این فاز سختی بیشتری نسبت به فاز مونوکلینیک داشته و در افزایش سختی ترکیب می‌تواند موثر باشد. از طرف دیگر با افزودن ایتریا مطابق نتایج خواص فیزیکی از مقدار تخلخل بدنه به دلیل تشکیل فاز مایع کاسته می‌شود که این کاهش تخلخل نیز در افزایش سختی موثر است. هم‌چنین با توجه به نتایج، با افزودن این اکسید، استحکام خمشی کامپوزیت افزایش می‌یابد. این افزایش استحکام را می‌توان به تشکیل فاز مایع و در نتیجه پر شدن تخلخل‌ها و هم‌چنین ثبیت فاز تتراتگونال نسبت داد. فاز مونوکلینیک در هنگام سرد شدن در بدنه تشکیل و به دلیل افزایش حجم باعث ایجاد میکروترک‌هایی در اطراف ذرات زیرکونیا می‌شود که نتیجه‌ی آن کاهش استحکام مکانیکی است. بنابراین با ثبیت فاز تتراتگونال توسط ایتریا از تبدیل فاز مورد نظر جلوگیری و به افزایش استحکام کمک می‌کند. با توجه به نتایج، افزودن مقدار ۰/۷۵ درصد وزنی ایتریا می‌تواند افزایش قابل توجهی برای استحکام مکانیکی این نوع کامپوزیت‌ها فراهم کند.

۴-۳- اثر افزودن ایتریا بر ریزساختار

در شکل‌های (۶) و (۷) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به ریزساختار کامپوزیت زیرکونیا-مولایت بدون افزودنی ایتریا پس از تف جوشی در دو بزرگ نمایی مختلف ارائه شده است.

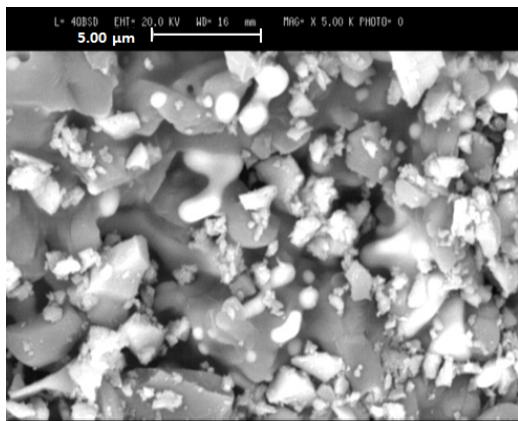
با توجه به بررسی‌های ریزساختاری و نتایج تحلیل



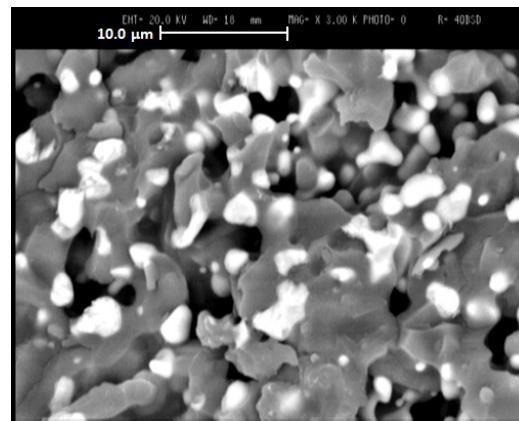
شکل ۵- اثر افزودن ایتریا بر استحکام خمشی و سختی کامپوزیت مولایت-زیرکونیا

می‌گردد که افزودن مقادیر مناسب ایتریا باعث بهبود چقرمگی شکست این نوع کامپوزیت‌ها گردد. جهت بررسی اثر ایتریا بر تشکیل محلول جامد با ذرات این نوع کامپوزیت‌ها تأثیر افزودن ایتریا بر جابه‌جایی پیک‌های مربوط به صفحات (۱۲۰) و (۲۱۰) مولایت مورده بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۴) ارائه شده است.

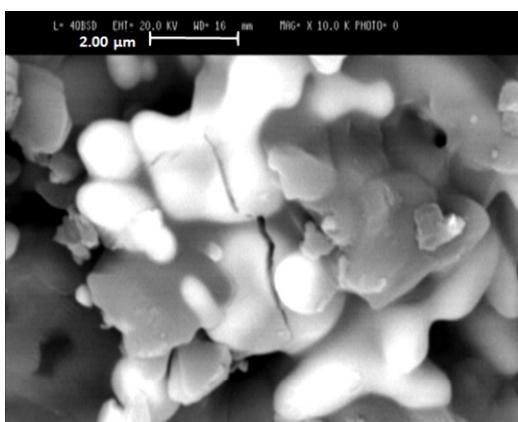
با توجه به نتایج مشخص می‌شود که بیشترین جابه‌جایی پیک‌های مربوط به صفحات اصلی مولایت در مقدار ۰/۵ درصد وزنی ایتریا اتفاق می‌افتد. با تابعی مقدار ۰/۵ درصد وزنی این افزودنی اثر زیادی در تشکیل محلول جامد با ذرات سیستم شامل زیرکونیا و مولایت دارد. به طورکلی یون Ce^{3+} دارای شعاع یونی برابر با 1.04 \AA نانومتر است که در اثر ورود به ساختار مولایت می‌تواند جایگزین یون Al^{3+} با شعاع یونی 0.54 \AA نانومتر شده و در نتیجه باعث تشکیل محلول جامد گردد. این جانشینی می‌تواند باعث انبساط شبکه مولایت در جهت محور C آن شود. هم‌چنین باعث کرنش القابی در ریزساختار شده که می‌تواند به افزایش تافنس کمک کند. رفتار مشابهی نیز برای تأثیر اکسید کروم گزارش شده است [۱۲].



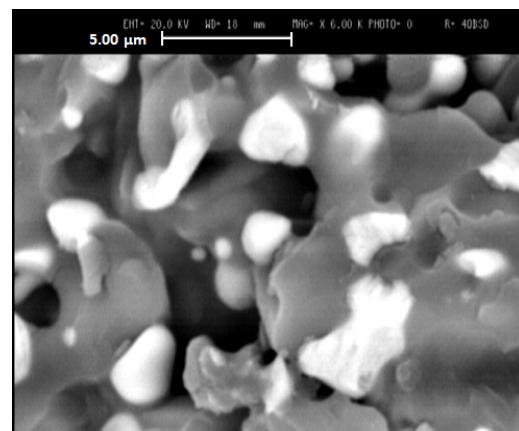
شکل ۹- تصویر ریزساختار مربوط به کامپوزیت مولایت-
زیرکونیا شامل ۲۵٪ درصد وزنی ایتریا



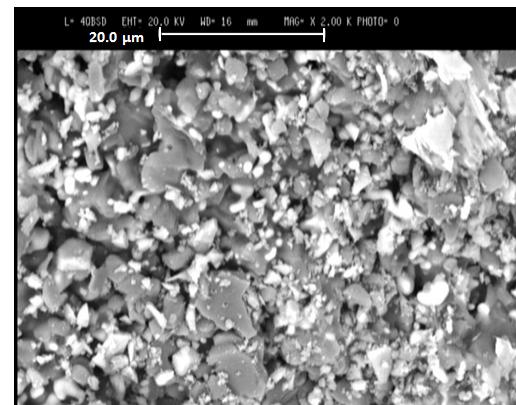
شکل ۶- تصویر ریزساختار مربوط به کامپوزیت مولایت-
زیرکونیا بدون افزودنی ایتریا



شکل ۱۰- تصویر ریزساختار مربوط به کامپوزیت مولایت-
زیرکونیا شامل ۲۵٪ درصد وزنی ایتریا



شکل ۷- تصویر ریزساختار مربوط به کامپوزیت مولایت-
زیرکونیا بدون افزودنی ایتریا



شکل ۸- تصویر ریزساختار مربوط به کامپوزیت مولایت-
زیرکونیا شامل ۲۵٪ درصد وزنی ایتریا

فازی شکل (۳) ریزساختار این نوع کامپوزیت‌ها از فازهای مولایت به عنوان فاز زمینه (اتصالی) و زیرکونیا به صورت دانه‌های پراکنده شده در زمینه تشکیل شده است. به طورکلی تفاوت در عدد اتمی باعث می‌شود که فازهای حاوی عناصر سنگین تر در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشن تر دیده شوند. زیرکونیم عدد اتمی بالاتری نسبت به آلومنینیم و سیلیسیم دارد. بنابراین زیرکونیا به صورت دانه‌های سفید رنگ از زمینه مولایت با رنگ خاکستری به خوبی قابل تشخیص است [۱۲-۸]. به طورکلی تجزیه شعاعی ذرات زیرکن از

بوده و اندازه‌های کوچک‌تری نیز دارند. با توجه به نتایج تحلیل فازی شکل (۳) این ذرات می‌تواند مربوط به فاز زیرکونیای تراگونال ثبت شده باشند. هم‌چنین با توجه به بررسی‌های ریزساختاری، مقداری افزایش طول در دانه‌های مولایت ترکیبات حاوی $5/0$ درصد وزنی ایتریا مشاهده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی اثر افزودن ایتریا بر خواص و ویژگی‌های کامپوزیت‌های مولایت-زیرکونیای تهیه شده به روش تف جوشی واکنشی و روش شکل‌دهی ریخته‌گری دوگانه نتایج ذیل حاصل گردید:

۱- افزودن کمتر از $5/0$ درصد وزنی ایتریا بر روی خواص این نوع کامپوزیت‌ها تاثیری ندارد، اما مقدادر بیشتر آن تأثیر زیادی بر خواص این نوع کامپوزیت‌ها دارد.

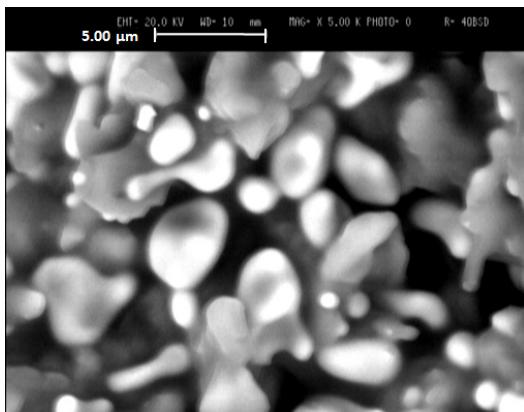
۲- با توجه به نتایج مشخص شد که استفاده از ایتریا باعث افزایش زیرکونیای تراگونال و در نتیجه کاهش زیرکونیای مونوکلینیک در ترکیب کامپوزیت می‌شود.

۳- ایجاد فاز زیرکونیای تراگونال می‌تواند باعث کاهش میکروترک‌های ایجاد شده ناشی از حضور فاز مونوکلینیک و در نتیجه افزایش سختی و استحکام این نوع بدنه‌ها گردد.

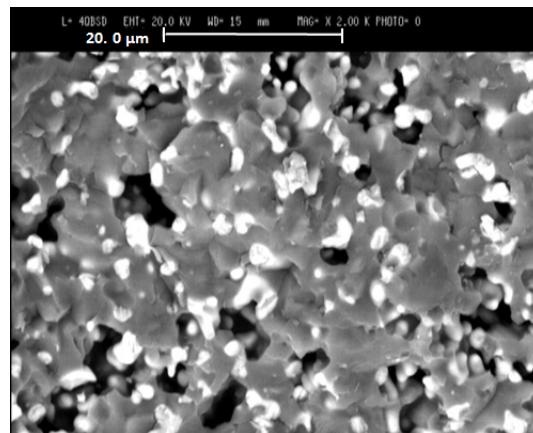
۴- تشکیل محلول جامد با مولایت و رشد ذرات مولایت نیز در مقدار $5/0$ درصد وزنی این افزودنی مشاهده می‌شود و مقدادر بیشتر این افزودنی تاثیری بر این اتحال ندارد. با توجه به نتایج مقدار $7/5$ درصد وزنی از این اکسید می‌تواند باعث بهبود خواص این نوع کامپوزیت‌ها شود.

سطح به داخل و مرکز دانه شروع می‌شود که منجر به تبلور سریع زیرکونیا و تشکیل سیلیس آمورف می‌گردد با افزایش دما سیلیس آمورف شروع به نرم شدن می‌کند، سپس به داخل ذرات و آگلومره‌های آلومینا نفوذ کرده، باعث اتحال آلومینا در خود می‌گردد و تشکیل فاز آلومینوسیلیکات آمورف می‌دهد. وقتی که غلظت آلومینا در فاز آمورف به حد غلظت اشباع رسید فاز مولایت شروع به جوانه زنی می‌کند [۱۰-۱۴]. در تصاویر ارائه شده ترک‌های مویی بسیار کوچک (به صورت میکروترک) نیز در داخل فاز زمینه یعنی مولایت دیده می‌شوند. همان طور که اشاره شد، میکروترک‌های ایجاد شده ناشی از تغییر فاز زیرکونیای تراگونال به مونوکلینیک و افزایش حجم ناشی از آن است. این عامل از طرفی می‌تواند باعث اتحاف ترک‌های بحرانی در ساختار و در نتیجه افزایش چقرمگی شکست و از طرف دیگر باعث کاهش استحکام مکانیکی کامپوزیت شود. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی ارائه شده در شکل‌های (۸) تا (۱۶) ریزساختار کامپوزیت مولایت-زیرکونیا شامل درصدهای مختلفی ایتریا پس از تف جوشی نشان داده شده است.

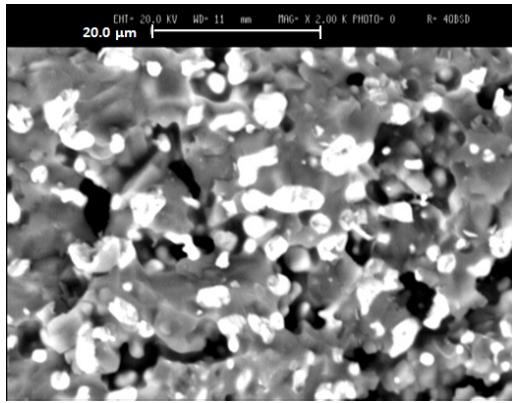
با توجه به تصاویر دیده می‌شود که با اضافه شدن ایتریا تا مقدار $5/0$ درصد وزنی تاحدی موجب رشد ذرات مولایت و افزایش تخلخل در ساختار شده است. اما در ترکیبات حاوی مقدادر بیشتر این افزودنی میزان تخلخل‌های کمتری در ریزساختار مشاهده می‌شود. تشکیل فاز مایع در دمای بالا بین ذرات باعث پر شدن و کاهش تخلخل‌ها و در نتیجه باعث بهبود شرایط تف جوشی این کامپوزیت‌ها به واسطه‌ی حضور فاز مایع می‌شود. این فاز مایع پس از سرد شدن به صورت فاز آمورف بین ذرات تشکیل می‌شود. در نمونه‌های شامل ایتریا ذرات زیرکونیای (فاز سفید رنگ) متفاوت با ذرات زیرکونیای قبلی نیز دیده می‌شوند که کروی شکل



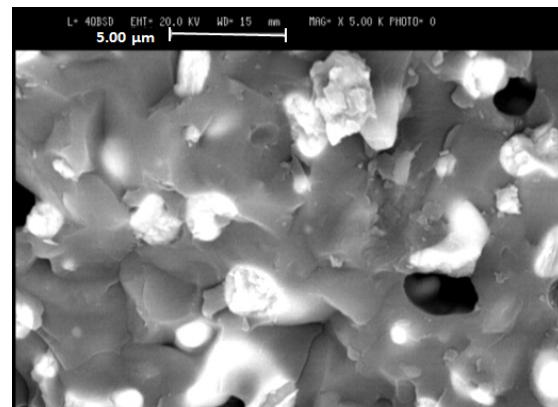
شکل ۱۴- تصویر ریزساختار مربوط به کامپوزیت مولايت-
زیرکونیا شامل ۷۵٪ درصد وزنی ایتریا



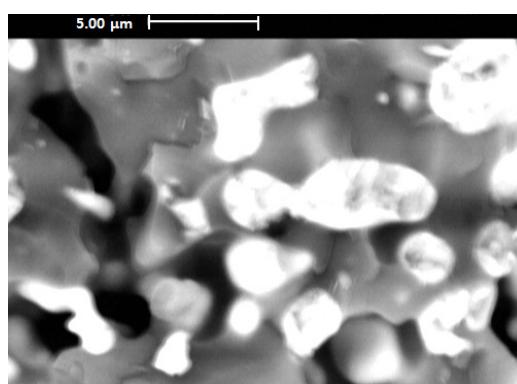
شکل ۱۱- تصویر ریزساختار مربوط به کامپوزیت مولايت-
زیرکونیا شامل ۵٪ درصد وزنی ایتریا



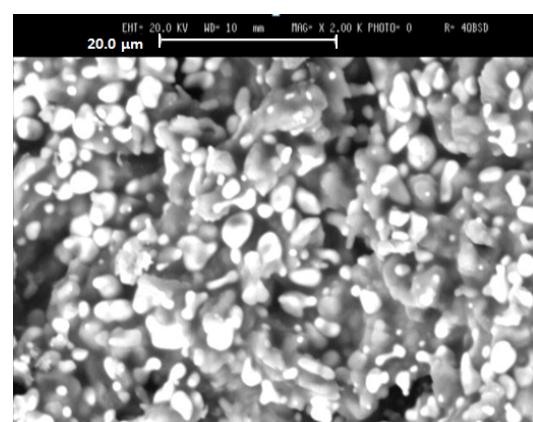
شکل ۱۵- تصویر ریزساختار مربوط به کامپوزیت مولايت-
زیرکونیا شامل ۱ درصد وزنی ایتریا



شکل ۱۲- تصویر ریزساختار مربوط به کامپوزیت مولايت-
زیرکونیا شامل ۵٪ درصد وزنی ایتریا



شکل ۱۶- تصویر ریزساختار مربوط به کامپوزیت مولايت-
زیرکونیا شامل ۱ درصد وزنی ایتریا



شکل ۱۳- تصویر ریزساختار مربوط به کامپوزیت مولايت-
زیرکونیا شامل ۷۵٪ درصد وزنی ایتریا

1. composites	11. amorphous	21. fast mill
2. Mullite-Zirconia	12. Calcium oxide	22. LPSA
3. reaction sintering.	13. Magnesium oxide	23. flow ability
4. Alumina	14. Titanium oxide	24. Dolapix PC 67
5. Zircon	15. Chrome oxide	25. XRD
6. Yttrium oxide	16. agglomerations	26. Bruker Axs
7. tetragonal.	17. Kreutzonit	27. Vickers
8. toughness	18. Penchiny	28. SEM
9. Silica	19. Goodfellow	29. Corundum
10. monoclinic	20. stoichiometric	

مراجع

- Ibarra Castro, M.N., Almanza Robles, J.M., Cortes Hernández, D.A., Escobedo Bocardo, J.C., and Torres, J., "Development of Mullite/Zirconia Composites from a Mixture of Aluminum Dross and Zircon", *Ceramics International*, Vol. 35, pp. 921-924, 2009.
- Schneider, H., Schreuer, J., and Hildmann, B., "Structure and Properties of Mullite-A Review", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, pp. 329-344, 2008.
- Bouchetou, M.L., Idefonse, J.P., Poirier, J., and Daniellou, P., "Mullite Grown from Fired Andalusite Grains: the Role of Impurities and of the High Temperature Liquid Phases on the Kinetics of Mullitization and Consequences on Thermal Shocks Resistance", *Ceramic International*, Vol. 31, pp. 999-1005, 2005.
- Suriyanarayanan, N., Kannan nithin, V.K., and Bernardo, E., "Mullite Glass Cermics Production from Coal Ssh and Alumina by High Temperature Plasmas," *Journal of Non-Oxide Glasses*, Vol. 1, pp. 247-260, 2009.
- Wang, X., Tian Xuegang, J., Yan Shan, Y., Liu, Z., and Yi, Y., "Effect of Microstructure on the Fracture Behavior of Micro-Nano ZTA Composite", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 112, pp. 213-221, 2008.
- Kanka, B., and Schneider, H., "Aluminosilicate Fiber/Mullite Matrix Composites with Favorable High-Temperature Properties", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 20, pp. 619-623, 1981.
- Sarkar, D., Adak, S., Chu, M.C., Cho, S.J., and Mitra, N.K., "Influence of ZrO₂ on the Thermo-Mechanical Response of Nano-ZTA", *Ceramics International*, Vol. 33, pp. 255-261, 2007.
- Rendtorff, N., Garrido, L., and Aglietti, E., "Mullite-Zirconia-Zircon Composites: Properties and Thermal Shock Resistance", *Ceramics International*, vol. 35, pp. 779-786, 2009.
- Aksel, C., "The Influence of Zircon on the Mechanical Properties and Thermal Shock Behavior of Slip-Cast Alumina–Mullite Refractories", *Materials Letters*, Vol. 57, pp. 992-997, 2002.
- Awaad, M., Zawrah, M.F., and Khalil, N.M., "In situ Formation of Zirconia–Alumina– Spinel–Mullite Ceramic Composites", *Ceramics International*, Vol. 34, pp. 429-434, 2008.
- Haldar, M.K., "Effect of Magnesia Additions on the Properties of Zirconia–Mullite Composites Derived from Sillimanite Beach Sand", *Ceramics International*, Vol. 29, pp. 573-581, 2003.
- Maitra, S., Pal, S., Nath, S., Pandey, A., and Lodha, R., "Role of MgO and Cr₂O₃ Additives on the Properties of Zirconia–Mullite Composites", *Ceramics International*, Vol. 34, pp. 819-826, 2002.
- Ebadzadeh, T., and Ghasemi, E., "Effect of TiO₂ Addition on the Stability of t-ZrO₂ in Mullite–ZrO₂ Composites Prepared from Various Starting Materials", *Ceramics International*, Vol. 28, pp. 447–450, 2002.
- Haldar, M.K., Pal, T.K., and Banerjee, G., "Preparation and Properties of Y₂O₃ Containing Zirconia–Mullite Composites Derived from Sillimanite Beach sand", *Ceramics International*, Vol. 28, pp. 3513-3520, 2002.
- Garrido, L.B., Aglietti, E.F., "Reaction-Sintered Mullite–Zirconia Composites by Colloidal Processing of Alumina–zircon–CeO₂ Mixtures", *Materials Science and Engineering*, Vol. 369, pp. 250-257, 2004.
- Galassi, C., Biasini, V., and Guicciardi, S., "Correlation Between Casting Parameters and Mechanical Properties of an Al₂O₃–ZrO₂ Composite", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 12, pp. 441-448, 1993.
- Garrido, L.B., and Aglietti, E.F., "Pressure Filtration and Slip Casting of Mixed Alumina–Zircon Suspensions", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 21, pp. 2259-2266, 2001.

18. Rahmani, M., Jangorban, K., Otroj, S., "Relation Between Particles Size of Raw Materials and Properties of Mullite-ZrO₂ Composites Prepared by Reaction-Sintering", *Ceramics-Silikaty*, Vol. 56, pp. 215-221, 2012.
19. Chandran, R.G., Chandrashekhar, B.K., Ganguly, C., Patil, K.C., "Sintering and Microstructural Investigations on Combustion Processed Mullite", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 16, pp. 843–849, 1996.