

مطالعه خواص مکانیکی کامپوزیت های زمینه سرامیکی (CMC) تقویت شده

با فیبرهای اکسیدی

سعید مرساق دزفولی، سعید باغشاهی، علی نعمتی، ارغوان کاظمی

دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران دانشکده مهندسی مواد گروه سرامیک

Saeed.m.dezfooli@gmail.com

چکیده

کامپوزیت های زمینه سرامیکی تقویت شده با فیبرهای سرامیکی، به دلیل مقاومت به خوردگی بالا و خواص مکانیکی مطلوبی که می توانند داشته باشند، انتخاب هایی مناسب برای کاربردهای دما بالا هستند. در این کامپوزیت ها انتخاب پوشش مناسب برای فیبرها تقریباً اجتناب ناپذیر است. چنین پوشش هایی به منزله فصل مشترک فیبر/ زمینه بوده و کنترل کننده خواص مکانیکی کامپوزیت هستند. کربن در کامپوزیت های اکسید/اکسید (که اعمال آن به طرق مختلف انجام می گیرد) در صورتی که بین فیبر و زمینه قرار گیرد، با ایجاد فصل مشترکی ضعیف بین آن دو، بهبود چقرمگی شکست کامپوزیت را سبب می شود. در این مطالعه، به بررسی رفتار تعدادی از کامپوزیت های زمینه سرامیکی تقویت شده با فیبرهای اکسیدی پرداخته و در ادامه بطور خلاصه کامپوزیت های اکسید/اکسید/کربن مورد بررسی قرار می گیرد.

کلمات کلیدی: کامپوزیت زمینه سرامیکی، خواص مکانیکی، فیبرهای اکسیدی، نانو تیوبهای کربنی

۱- مقدمه

کامپوزیت های زمینه سرامیکی تقویت شده با فیبرهای اکسیدی، با توجه به استحکام، مدول الاستیک و چقرمگی نسبتاً بالا، انتخاب هایی مناسب برای کاربردهای دما بالا می باشند. سرامیک های کامپوزیتی تقویت شده با فیبر، در حذف شکست کاتاستروفیک (که در سرامیک های تقویت نشده رایج است) عملکرد موفقیت آمیزی داشته اند. گسست فیبر از زمینه، پل زنی روی ترک و برون زدگی فیبرها مکانیزم هایی هستند که در پیشگیری از شکست ناگهانی و القای رفتار شبه داکتیل در کامپوزیت های سرامیکی موثرند.

خصوصیات کامپوزیت های سرامیکی به شکل، اندازه و توزیع تقویت کننده و همچنین میکروساختار زمینه سرامیکی و نیز خواص فیزیکی و شیمیایی فصل مشترک بین فیبرها و زمینه (در کامپوزیت های تقویت شده با فیبر) وابسته است. لازم است که کنترلی مناسب روی پارامترهای فرایند به عمل آید تا درجه بهینه ای از اتصال فصل مشترکی بین فیبر و زمینه حاصل شود [۱].

دستیابی به رفتاری شبه داکتیل در سرامیک ها نیازمند حضور فصل مشترک هایی ضعیف است. که به این مهم از دو طریق می توان دست یافت: ۱- حضور یک میان فاز ضعیف که بین فیبرهای مستحکم و ماتریس مستحکم حایل شود، ۲- حضور فیبرهای مستحکم در یک زمینه ضعیف و

متخلخل سرامیکی. در حالت دوم (با فرض عدم حضور یک میان فاز ضعیف)، ماتریس متخلخل قویا با فیبرها پیوند دارد. ولی با این حال به دلیل سفتی^۱ پایین -مدول الاستیک پایین- زمینه که مربوط به متخلخل بودن آن است، ترک‌ها فی الفور از زمینه به فیبر منتقل نمی‌شوند و یک بارگذاری کششی باعث وقوع شکست و خرابی فراوان در زمینه، قبل از انتقال این خرابی به فیبرها می‌گردد تا این که در نهایت برون زدگی فیبرها روی می‌دهد. ضمناً در کامپوزیت‌های با زمینه متخلخل، استحکام شکست تقریباً به حضور عوامل ایجاد کننده تمرکز تنش در زمینه غیر حساس است. حال در صورتی که از یک میان فاز ضعیف و یک زمینه متخلخل استفاده گردد، ترکیبی از دو روش فوق‌الذکر حاصل می‌شود و نتیجتاً مقادیر چقرمگی شکست به مراتب بالاتر و نمودارهای تنش- کرنش که نواحی غیر خطی نیز در آنها موجود است، قابل حصول خواهد بود [۲].

۲- کامپوزیت‌های اکسید/اکسید و مهندسی فصل مشترک

استحکام بالا و مقاومت بالای خزشی فیبرهای اکسیدی تک کریستال و همچنین مقاومت خوب به اکسیداسیون در ماتریس‌های اکسیدی، خواصی هستند که باعث می‌شود کامپوزیت‌هایی با زمینه اکسیدی تقویت شده با فیبرهای اکسیدی، انتخاب‌های بسیار خوبی برای کارکرد در دماهای بالای 1200°C باشند. البته فیبرهای تک کریستال بسیار گران قیمت هستند و فیبرهای پلی کریستال نیز دمای کاری نسبتاً پایینی دارند [۳].

یک شاخه از مهندسی فصل مشترک در علم کامپوزیت‌ها به این مساله می‌پردازد که پوشش ایجاد شده روی فیبر چه خصوصیتی داشته باشد تا بتواند فرایندهای جاذب انرژی نظیر انحراف ترک و برون زدگی فیبر را سبب شده و در نتیجه، کامپوزیت را مقاوم در برابر شکست ترد نماید. شایان ذکر است که وقوع گسیختگی مابین فیبر و زمینه، لازمه رخداد فرایندهایی نظیر انحراف ترک، برون زدگی فیبر و پل زنی روی ترک می‌باشد. خواص پوشش ایجاد شده روی فیبر، نقش مهمی را در نحوه شکست کامپوزیت ایفا می‌نماید.

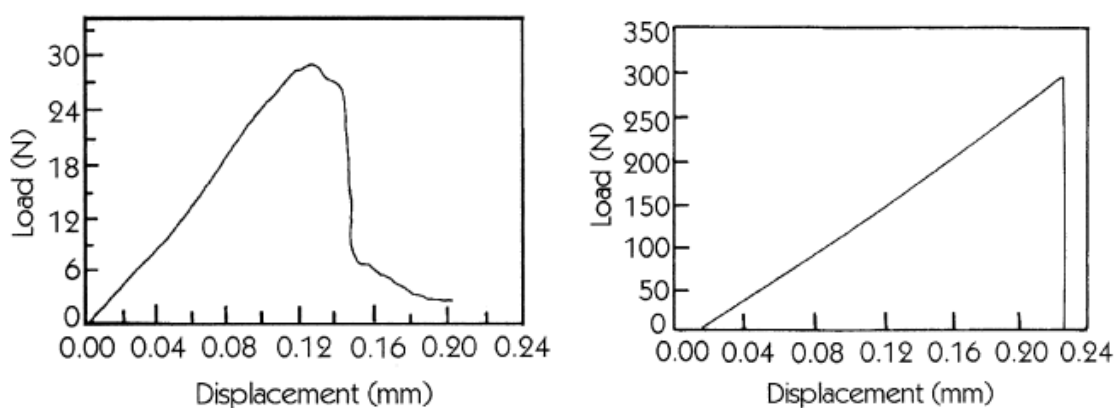
یکی از موضوعاتی که در مورد کامپوزیت‌های اکسید/اکسید مطرح است این است که اغلب واکنش‌های شیمیایی مابین اکسیدها جدی و مهم است. از این رو انتخاب کامپوزیتی مناسب با فیبرهای اکسیدی در زمینه اکسیدی دارای محدودیت‌های فراوانی است که ما را به اعمال پوشش‌های مناسب بر روی فیبرهای اکسیدی به کار رونده در زمینه اکسیدی متقاعد می‌سازد. چنین پوشش‌هایی در حکم فصل مشترک بوده و دارای نقش مهمی در رفتار و خواص کامپوزیت‌های اکسید/اکسید می‌باشد [۴].

با وجود این که روش‌های متعددی در حال حاضر برای تولید کامپوزیت‌های سرامیکی وجود دارد، روش سل-ژل یکی از پر کاربردترین روش‌های ساخت کامپوزیت‌های سرامیکی (علی‌الخصوص

^۱- Stiffness

کامپوزیت‌های اکسید/اکسید) است که مزایای بارزی نظیر هموژنیت به‌تر و دماهای فرایند پایین‌تر را دربر دارد. با این حال این روش نیازمند چندین مرحله اینفیلتراسیون با عملیات حرارتی در بین این مراحل می‌باشد تا مشکل ترک خوردگی در زمینه به دلیل انقباض در طی خشک شدن و سینترینگ مرتفع گردد.

در تحقیقی که توسط ناسکار و همکاران [۱] به منظور بررسی تاثیر خصوصیات فصل مشترک فیبر/زمینه روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اکسید/اکسید صورت گرفت، دو نمونه کامپوزیتی تهیه شده به روش سل-ژل، با زمینه زیرکونیا/ایتريا که با فیبرهای مولایت تقویت شده بودند، مورد آزمایش قرار گرفتند. تفاوت این دو نمونه در ویسکوزیته سل مورد استفاده و تعداد دفعات اینفیلتراسیون می‌باشد که این عوامل روی خصوصیات فصل مشترک فیبر/زمینه تاثیرگذار است. در یکی از دو نمونه که ZY3 نامگذاری شده است، نمودار بار-جابجایی فقط دارای قسمت خطی است که حاکی از شکست ترد این نمونه می‌باشد. در نمونه دیگر که ZY1 نام دارد، رفتار غیر خطی نیز در نمودار بار-جابجایی مشاهده می‌شود که بیانگر رفتاری شبه داکتیل در این نمونه است (شکل ۱).

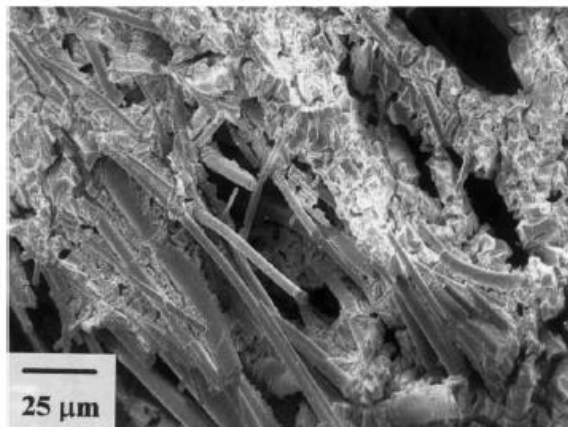


ب

الف

شکل ۱- نمودارهای بار-جابجایی در نمونه‌های الف-ZY3 و ب-ZY1.

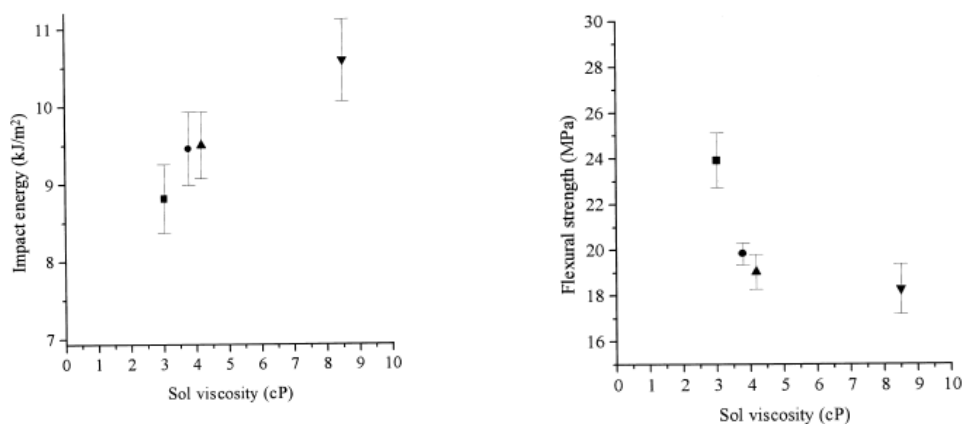
محققین مذکور چنین بیان می‌نمایند که به نظر می‌رسد در نمونه ZY1، فصل مشترک فیبر/زمینه زیاد قوی نبوده و گسترش ترک رسنده از زمینه را در امتداد خود مجاز می‌سازد، در حالی که در نمونه ZY3 اتصال قوی مابین فیبر با زمینه در محل فصل مشترک وجود دارد که اجازه مانور را به ترکی که از زمینه به فیبر رسیده است نمی‌دهد و انتقال سریع ترک به فیبر را موجب شده و باعث شکست ترد کامپوزیت می‌گردد. نتایج میکروسکوپی روی نمونه ZY1 حاکی از وقوع مکانیزم برون زدگی فیبر است که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- برون زدگی فیبر در نمونه ZY1.

ضمناً در نمونه‌های آزمایش شده توسط محققین مذکور، زیرکونیای موجود در زمینه نیز به بهبود داکتیلیته کمک می‌کند. در واقع در دماهای بالا، زیرکونیای تتراگونال جوانه می‌زند و با ایجاد تنش-های داخلی (ناشی از استحاله)، از رشد غیرعادی دانه‌های مجاور (که مخرب خواص مکانیکی است) جلوگیری می‌کند.

تأثیر ویسکوزیته سل مورد استفاده در روش سل-ژل روی خواص فصل مشترک فیبر با زمینه و در نتیجه، تأثیر آن بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولید شده به این روش را لیو و هوانگ [۵] نیز در کار خود تایید کرده‌اند. این محققین در بررسی خود بر روی کامپوزیت‌های آلومینو سیلیکاتی تقویت شده با فیبرهای کربن تولید شده به روش فوق به این نتیجه رسیدند که با افزایش ویسکوزیته سل، فصل مشترک فیبر/زمینه ضعیف‌تر شده و باعث تسهیل وقوع مکانیزم‌های "چقرمگی بخشی" می‌شود. البته محققین اخیر به این نتیجه نیز دست یافتند که ضعیف بودن فصل مشترک، علیرغم چقرمه کردن کامپوزیت، باعث افت استحکام خمشی می‌گردد، به گونه‌ای که با افزایش ویسکوزیته سل، استحکام خمشی به صورت اکسپننسیالی کاهش می‌یابد (شکل ۳).



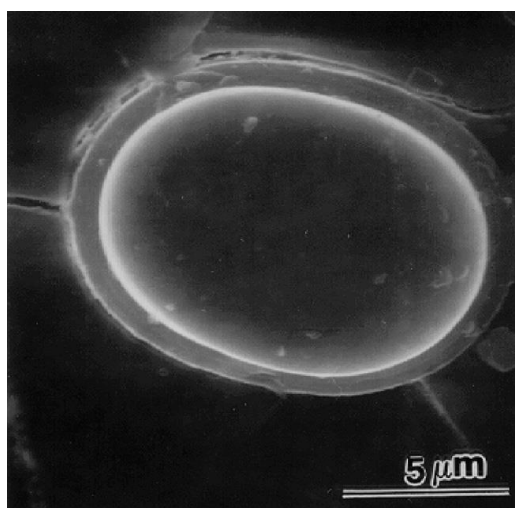
شکل ۳- تغییرات استحکام خمشی و داکتیلیته (انرژی ضربه) با ویسکوزیته سل.

البته این موضوع که با ایجاد یک فصل مشترک چقرمه کننده، استحکام خمشی کاهش می‌یابد، عمومیت نداشته و نتایج تحقیق چاولا [۴] و نیز فنگ ژو و همکاران [۶] که در سطرهای پایین‌تر آورده شده است، عکس این مطلب را نشان می‌دهد.

۲-۱- کامپوزیت‌های زمینه مولایتی

کامپوزیت‌های زمینه مولایتی تقویت شده با فیبرهای مولایت دسته مهمی از کامپوزیت‌های اکسید/اکسید را تشکیل می‌دهند. کامپوزیت‌های مبتنی بر مولایت، به دلیل مقاومت ذاتی بالا در مقابل اکسیداسیون در دماهای بالا، شوک پذیری حرارتی مناسب و تحمل پذیری خوب در مقابل خرابی^۱، توجه فراوانی را به خود معطوف داشته است.

در بررسی اثر پوشش‌های مختلف، چاولا [۴] مشاهده نمود که در یک کامپوزیت با زمینه مولایت، تقویت شده با فیبرهای مولایت، که فیبرها پوشش داده نشده بودند، برون زدگی فیبر مشاهده نشده است. در مورد پوشش BN، که به لحاظ ساختار کریستالی شبیه پوشش کربنی است، موازی بودن صفحات پایه (0002) از پوشش با صفحات طولی فیبر تک کریستال مولایت، حالتی مطلوب در ایجاد چقرمگی شکست مناسب در کامپوزیت است، چرا که در این حالت لغزش آسان در فصل مشترک (یا به عبارتی پوشش ایجاد شده روی فیبر) امکان پذیر می‌گردد و باعث ایجاد فصل مشترکی ضعیف شده که سبب می‌شود ترک در امتداد این فصل مشترک، فیبر را دور بزند. این موضوع باعث می‌شود که انحراف ترک و برون زدگی فیبر قابل انجام بوده و کامپوزیتی نسبتاً چقرمه حاصل می‌شود. شکل ۴، انحراف ترک در محل پوشش BN ایجاد شده روی فیبر را نشان می‌دهد.

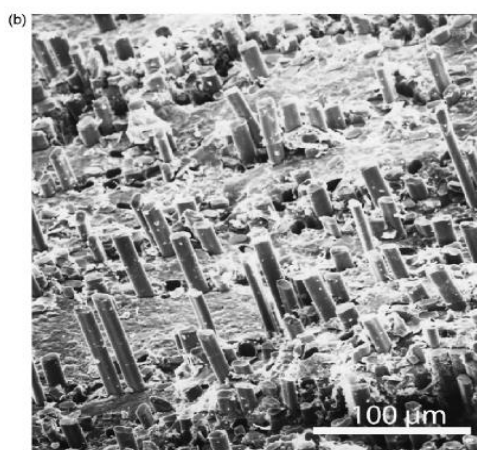
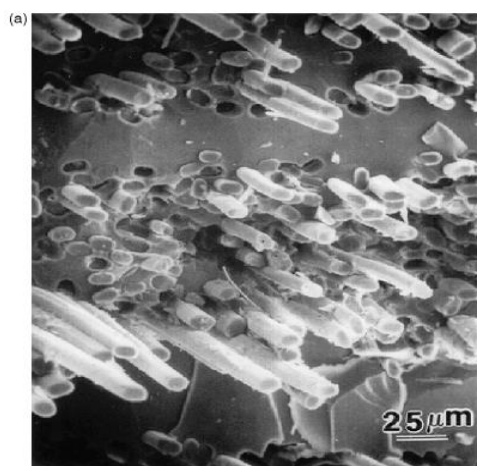


شکل ۴- انحراف ترک در محل پوشش BN ایجاد شده روی فیبر مولایتی.

^۱- Damage Tolerance

البته BN با وجود محاسنی که دارد، در مقابل اکسیداسیون دمای بالا ضعیف است که این معضل را می‌توان با ایجاد پوشش SiC روی پوشش BN (که مقاوم در برابر اکسیداسیون دمای بالا می‌باشد)، مرتفع کرد.

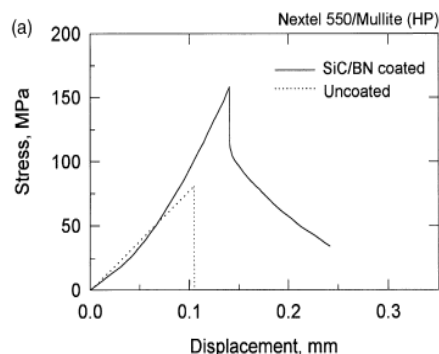
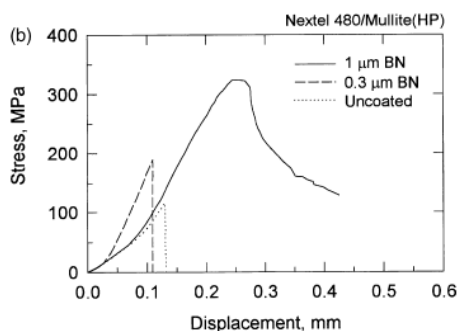
نتایج تحقیق چاولا نشان داد که در کامپوزیت‌های مولایت/مولایت با فصل مشترک BN یا SiC/BN، مکانیزم برون زدگی فیبر وجود دارد (شکل ۵) که باعث بروز رفتار نسبتاً داکتیل در کامپوزیت مولایت/مولایت می‌گردد.



شکل ۵- برون زدگی فیبر در کامپوزیت با زمینه مولایت با فیبرهای مولایتی پوشش داده شده با

BN (a) و SiC/BN (b).

علاوه بر این مساله، با ایجاد پوشش‌های فوق، قابلیت تحمل بار ماده نیز در نمونه‌های پوشش داده شده افزایش می‌یابد که باعث افزایش استحکام کامپوزیت می‌گردد (شکل ۶).



شکل ۶- نمودار تنش بر حسب جابجایی در نمونه‌های کامپوزیتی مولایت/مولایت پوشش داده شده با (a) SiC/BN و (b) BN، در مقایسه با نمونه‌های پوشش داده نشده.

اعمال پوشش روی فیبر علاوه بر این که به خاطر ایجاد یک فصل مشترک ضعیف، به لحاظ مکانیزم‌های چقرمگی مهم است، روی استحکام خود فیبر نیز تاثیر گذار است زیرا در صورتی که پوشش صاف و هموار باشد، می‌تواند با پر نمودن خلل و فرج سطحی فیبر، استحکام فیبر را افزایش دهد، البته در صورتی که ضخامت چنین فیبری بیشتر از یک حدی باشد، به دلیل این که ضعیف‌تر از فیبر است باعث افت استحکام فیبر می‌گردد.

با وجود این که کربن، BN و سایر پوشش‌های غیر اکسیدی که روی فیبرها ایجاد می‌گردند، باعث چقرمه شدن کامپوزیت‌های اکسید/اکسید می‌شوند ولی حساس به اکسیداسیون در دمای بالا و در معرض هوا هستند و نیاز به ایجاد پوشش‌های مقاوم به اکسیداسیون بر روی این پوشش‌ها می‌باشد.

۳- کامپوزیت‌های اکسید/اکسید/کربن

۳-۱- کامپوزیت آلومینا/زیرکونیا/کربن

کاربردهای متعددی برای نانو تیوب‌های کربنی^۱ (CNT) از بدو اکتشاف آن‌ها در سال ۱۹۹۱ توسط لیجیما^۲، تا به امروز پیشنهاد شده است. این مواد، جزو مواد فوق‌العاده مستحکم می‌باشند و حجم بزرگی از کارهای تحقیقاتی در سال‌های اخیر، به بررسی امکان استفاده از این مواد در داخل زمینه‌های فلزی، سرمیکی و علی‌الخصوص پلیمری اختصاص یافته است. به نظر می‌رسد که این مواد، چقرمه کننده‌های خوبی برای مواد ترد هستند که قادرند توسط مکانیزم پل زنی روی ترک یا برون زدگی فیبر، باعث افزایش چقرمگی به هنگام بارگذاری کششی نمونه شوند. از طرفی CNTها به دلیل سخت بودن نسبی‌شان می‌توانند خواص تریبولوژیکی ماده را نیز بهبود بخشند. علیرغم این

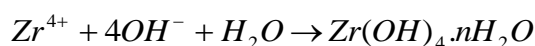
^۱- Carbon Nano Tubes (CNTs)

^۲- Lijima

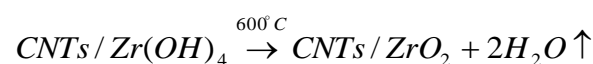
موارد، CNTها نسبت طول به قطر بزرگ (بزرگتر از ۱۰۰۰) و قطر کوچکی دارند که این مساله توزیع یکنواخت آنها را در زمینه مشکل می‌سازد. پدیده آگلومره شدن، مشکلی است که به طور معمول در مورد CNTها، بالخصوص وقتی که زمینه حالتی دانه‌ای داشته باشد نظیر زمینه‌های سرامیکی قابل مشاهده است. این پدیده مخرب خواص فیزیکی و شیمیایی می‌باشد. به منظور غلبه بر مشکل اخیر، پیگنی^۱ و همکاران، تولید درجای^۲ نانو تیوب‌های کربنی را در داخل پودر اکسیدی پیشنهاد کرده‌اند.

در یک تحقیق، لئو و همکاران، CNTها را در فرایند تولید ZrO_2 دخیل کرده و توانستند زیرکونیای نانو با ساختار مکعبی و پایدار در دمای اتاق به دست آورند. لازم به ذکر است که از پلی مورف‌های دمای بالای زیرکونیا (تتراگونال و مکعبی)، می‌توان به منظور چقرمه کردن سرامیک‌ها بهره گرفت. کربورایزینگ و نیترایزینگ می‌تواند باعث پایدار سازی پلی مورف‌های دمای بالای زیرکونیا در دمای اتاق گردد که نیتروژن باعث پایداری ساختار تتراگونال و کربن باعث پایداری ساختار مکعبی در دمای اتاق می‌گردند [۶].

فنگ ژو و همکاران [۶] توانستند به روش زیر، ذرات زیرکونیا با ابعاد نانو و ساختار مکعبی را روی CNTها بنشانند: از افزودن کلرید زیرکونیوم به آب دیونیزه، هیدروکسید هیدراته زیرکونیوم حاصل می‌شود:



با خشک نمودن هیدروکسید هیدراته زیرکونیوم در دمای ۲۰۰ الی ۳۰۰ درجه سانتیگراد، پودر بدون آب هیدروکسید زیرکونیوم به دست آمد. آنگاه در دمای ۶۰۰°C عملیات کلسینه کردن $Zr(OH)_4$ در حضور CNTها انجام گرفت که در طی آن ذرات زیرکونیا به حالتی نشانده شده روی CNTها، طبق واکنش زیر به وجود آمد:



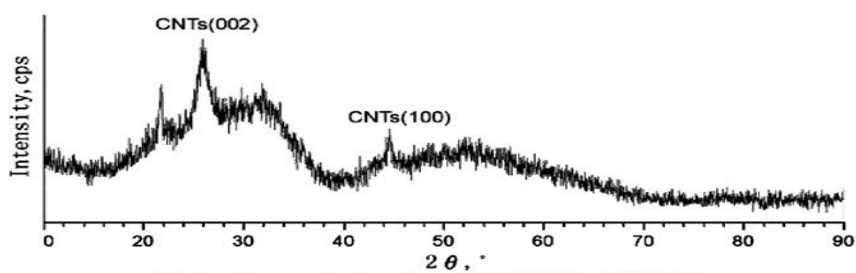
نانو تیوب‌های کربنی خود توسط فرایند CVD^۳ تهیه شده بودند و سپس به منظور زدوده شدن کربن آمورف از سطحشان، به مدت ۲ ساعت در اسید هیدرفلوریک جوشان قرار گرفته بودند. بلافاصله پس از آن، نانو تیوب‌ها در آب دیونیزه خنثی مستغرق شده بودند.

لازم به ذکر است که بر اساس نتایج حاصل از XRD، هیدروکسید بدون آب زیرکونیوم، حالتی آمورف دارد ولی پس از کلسینه شدن در حضور CNTها (که به زیرکونیا تبدیل می‌گردد) به حالت کریستالی و با ساختار مکعبی درمی‌آید (شکل ۶).

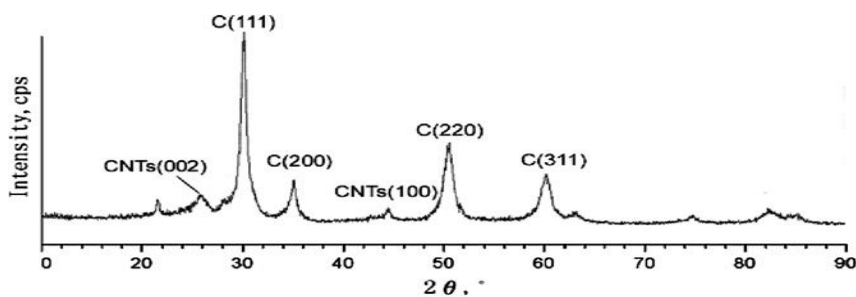
^۱- Peigney

^۲- In-situ

^۳- Chemical Vapor Deposition



(a) before calcination ($Zr(OH)_4/CNTs$)

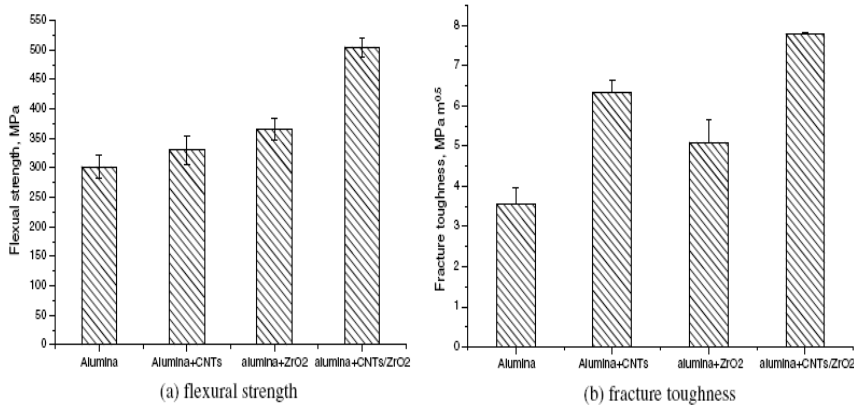


(b) after calcination at $600^\circ C$ ($ZrO_2/CNTs$)

شکل ۷- نتایج حاصل از XRD در مورد هیدروکسید بدون آب زیرکونیوم در دو حالت قبل و بعد از کلسینه شدن.

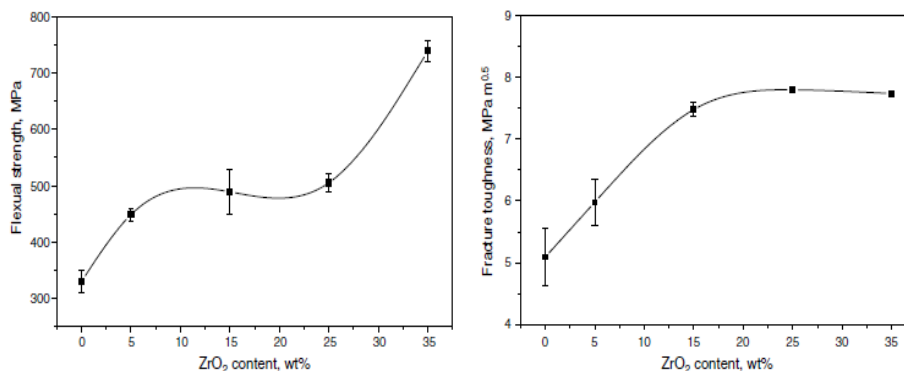
در ادامه، پودر آلومینا به صورت سوسپانسیون درآمد و CNTهای حاوی ذرات زیرکونیا-تولید شده با فرایند بالا- در داخل آن قرار گرفت. کامپوزیت حاصل، پس از خشک شدن در دمای $1000^\circ C$ سینتر شد. اندازه ذرات نانومتری زیرکونیا را (که بر روی CNTها قرار گرفته‌اند) می‌توان با تنظیم شرایط فرایند، نظیر مقدار ماده زیرکونیوم دار- کلرید زیرکونیوم- افزوده شده به آب دیونیزه و زمان فرایند کلسینه کردن تغییر داد.

افزایش هر کدام از دو جزء زیرکونیا یا نانو تیوب‌های کربنی به زمینه آلومینا، استحکام (خمشی) و چقرمگی شکست زمینه را افزایش می‌دهد. می‌توان استنباط کرد که افزایش توامان این دو جزء به شکل ذرات زیرکونیا بر روی CNTها، امکان استفاده از فوائد هر دو جزء و تقویت بهتر زمینه آلومینایی را فراهم سازد. شکل ۸ این استنباط را تایید می‌کند. در این شکل، که حالتی مقایسه‌ای دارد، نمونه Alumina+CNTs، حاوی ۲ درصد وزنی نانو تیوب است، نمونه Alumina+ ZrO_2 ، ۲۵ درصد وزنی زیرکونیا در خود دارد و نمونه Alumina+ $ZrO_2/CNTs$ ، ۱/۵ درصد وزنی نانو تیوب و ۲۵ درصد وزنی زیرکونیا را احتوا می‌کند که ذرات زیرکونیا بر روی نانو تیوب‌ها قرار گرفته‌اند.



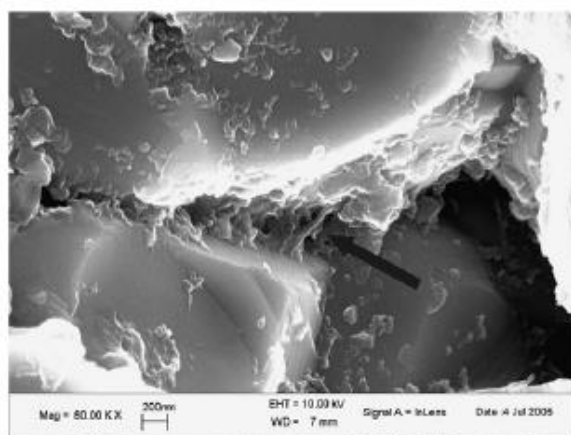
شکل ۸- اثر تقویت زمینه آلومینایی با نانو تیوب‌های کربنی، ذرات زیرکونیا و هر دو تقویت کننده.

لازم به ذکر است که با افزایش درصد وزنی ذرات زیرکونیای قرار گرفته بر روی نانو تیوب‌ها (در حالتی که درصد وزنی خود نانو تیوب‌ها ثابت است)، هم استحکام خمشی و هم چقرمگی شکست کامپوزیت آلومینا/زیرکونیا/کربن دارای یک سیر صعودی است. این موضوع در شکل ۹ نشان داده شده است.

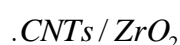


شکل ۹- تاثیر درصد وزنی ذرات زیرکونیای قرار گرفته بر سطح CNTها روی خواص مکانیکی.

شکل ۱۰ تصویر SEM از مقطع شکست نمونه آلومینایی تقویت شده با فیبرهای CNTs/ZrO₂ را نشان می‌دهد که فیبرهای مذکور، اثر پل زنی روی ترک را به نمایش می‌گذارند.



شکل ۱۰- اثر پل زنی روی ترک در کامپوزیت با زمینه آلومینا تقویت شده با فیبرهای



چقرمگی شکست آلومینای تقویت شده با زیرکونیا منتج از اثرات زیر است:

۱- چقرمگی ذاتی زمینه آلومینا؛ ۲- نمو ایجاد شده در چقرمگی، ناشی از حضور ذرات زیرکونیا در اثر الف- استحاله فازی، ب- ایجاد میکروتکرک (که خود با استحاله فازی در ارتباط است) و ج- تنش‌های داخلی، که با تفاوت در ضریب انبساط حرارتی آلومینا و زیرکونیا در ارتباط است و باعث اعمال تنش پسماند فشاری در زمینه آلومینا می‌گردد.

در مورد تقویت آلومینا با نانو تیوب‌های کربنی نیز علاوه بر چقرمگی ذاتی آلومینا می‌توان اثرات پل زنی روی ترک و برون زدگی نانو تیوب‌ها را در افزایش چقرمگی موثر دانست.

برای بهبود خواص آلومینای تقویت شده با نانو تیوب‌های کربنی، راهکارهای زیر را می‌توان پیشنهاد نمود:

الف- خواص خود CNTها بایستی بهینه سازی شود؛ ب- CNTها بایستی به اندازه کافی با زمینه پیوند داشته باشند تا در حمل بار مشارکت کنند؛ ج- نانو تیوب بایستی به گونه‌ای باشد که بار اعمالی در کل ضخامت آن توزیع شده باشد، چرا که این تیوب‌ها معمولاً چند لایه هستند و اگر بار اعمالی عمدتاً به لایه آخر اعمال شود، باعث می‌گردد که این لایه بریده شده و از لایه‌های دیگر جدا گردد.

در صورتی که ذرات زیرکونیا روی CNTها قرار گیرد، باعث می‌شود که اثر چقرمه کنندگی قوی‌تری در زمینه آلومینا نسبت به شرایط حضور زیرکونیای تنها یا نانو تیوب‌های تنها ایجاد گردد. در حقیقت ذرات زیرکونیای نشانده شده روی CNTها، از طریق ایجاد باند شیمیایی یا باند مکانیکی مابین نانو تیوب‌ها و زمینه آلومینایی، به عنوان فصل مشترک فیبر و زمینه عمل می‌نماید و خواص آن به گونه‌ای است که با تسهیل اثر مصرف انرژی ترک، باعث القای چقرمگی بیشتر در آلومینا می‌-

گردد. از طرفی پایه CNT که ذرات زیرکونیا روی آن قرار گرفته‌اند، خود باعث القای ساختار مکعبی در زیرکونیای نشانداده شده می‌گردد و همان طور که در سطرهای بالا اشاره شد این ساختار در ایجاد چقرمگی، ساختاری کارآمد است. اثر دیگری که حضور ذرات زیرکونیا روی CNTها در پی دارد این است که باعث توزیع بهتر CNTها در زمینه آلومینا و دوام و بقای این توزیع مطلوب می‌گردد [۶].

۳-۲- کامپوزیت زیرکونیا/ایتريا/مولایت/کربن

ناسکار و همکاران [۱] نمونه‌هایی را که از فیبرهای مولایت در زمینه زیرکونیا/ایتريا تشکیل شده بود و گروه‌های استات نیز در زمینه آن‌ها حضور داشت، وقتی در دمای 500°C به مدت یک ساعت و در هوا تحت عملیات حرارتی قرار دادند، مشاهده نمودند که این نمونه‌ها به رنگ سیاه درآمدند که این امر ناشی از راسب شدن کربن از گروه‌های استات موجود در زمینه بود. مشاهده شد که حضور کربن، افزایشی را در استحکام خمشی در این کامپوزیت‌ها در مقایسه با کامپوزیت‌های فاقد کربن سبب می‌شود. همچنین مشاهده شد که حضور کربن در زمینه کامپوزیت، باعث افزایش مدول الاستیک و مشاهده رفتار شبه داکتیل می‌گردد.

نتیجه‌ای که محققین فوق‌الذکر در کار خود ذکر کرده‌اند این است که به جای استفاده از فیبرهای پوشش داده شده با کربن، می‌توان از گروه‌های کربن‌زا در زمینه کامپوزیت استفاده کرد که باعث راسب شدن کربن به صورت درجا شده و از طریق بهسازی خواص فصل مشترک فیبر با زمینه، فعالیت مکانیزم‌هایی نظیر برون زدگی فیبر را مجاز ساخته و باعث بهبود داکتیلیته کامپوزیت می‌گردند.

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

از این مطالعه که بر روی کامپوزیت‌های اکسید/اکسید و اکسید/اکسید/کربن صورت گرفت، نتیجه گیری‌های زیر قابل حصول است:

۱- کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی تقویت شده با فیبرهای سرامیکی این قابلیت را دارند که رفتار نسبتا داکتیلی را به نمایش گذارند و از اینرو در صنعت و در کاربردهای دمای بالا مورد استفاده قرار گیرند.

۲- دستیابی به رفتاری نسبتا داکتیل در کامپوزیت‌های سرامیکی نیازمند بهسازی خواص فصل مشترک و ایجاد یک پیوند بهینه مابین فصل مشترک با زمینه و نیز با تقویت کننده می‌باشد.

۳- به دلیل این که واکنش بین اکسیدها در دماهای بالا جدی و مهم است، نیاز به اعمال پوشش بر روی فیبرهای اکسیدی به کار رونده در زمینه‌های اکسیدی است. این پوشش‌ها در حکم فصل مشترک زمینه/فیبر بوده و کنترل کننده خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اکسید/اکسید است.

۴- بر اساس این مطالعه، کربن به سه صورت می‌تواند در ساختار کامپوزیت‌های اکسید/اکسید اعمال شود:

الف- فیبرهای اکسیدی با کربن پوشش داده شوند و آنگاه این فیبرهای پوشش داده شده، در زمینه اکسیدی به کار روند.

ب- یکی از اجزای اکسیدی بر روی فیبرهای کربنی نشانداده شود و آنگاه این فیبرها در یک زمینه اکسیدی اعمال شوند.

ج- فیبرهای اکسیدی در یک زمینه اکسیدی که محتوی گروه‌های کربن را است، قرار گیرند. در این صورت پس از عملیات سینترینگ، کربن به صورت درجا از گروه‌های کربن زای موجود در زمینه به وجود می‌آید.

۵- کربن در صورتی که بین فیبر و زمینه قرار گیرد، فصل مشترکی ضعیف بین آن دو به وجود آورده و باعث تسهیل وقوع پدیده‌های "چقرمگی بخشی" شده و بروز رفتار شبه داکتیل در کامپوزیت‌های اکسید/اکسید را سبب می‌گردد.

مراجع

- [1] M.K. Naskar, M. Chatterjee, A. Dey, K. Basu; "Effects of processing parameters on the fabrication of near-net-shape fibre reinforced oxide ceramic matrix composites via sol-gel route"; *Ceramics International*; Vol. 30; 2004; 257-265.
- [2] J. B. Davis, D. B. Marshall, P. E. D. Morgan; "Oxide Composites of Al₂O₃ and LaPO₄"; *Journal of the European Ceramic Society*; Vol. 19; 1999; 2421-2426.
- [3] A.A. Kolchin, V.M. Kiiiko, N.S. Sarkissyan, S.T. Mileiko; "Oxide/oxide composites with fibers produced by internal crystallization"; *Composites Science and Technology*; Vol. 61; 2001; 1079-1082.
- [4] K.K. Chawla; "Interface engineering in mullite fiber/mullite matrix composites"; *Journal of the European Ceramic Society*; Vol. 28; 2008, 447-453.
- [5] Hsien-Kuang Liu, Chuan-Cheng Huang; "Impact response and mechanical behavior of 3-D ceramic matrix composites"; *Journal of the European Ceramic Society*; Vol. 21; 2001; 251-261.
- [6] Yue-Feng Zhu, Lei Shi, Ji Liang, David Hui, Kin-tak Lau; "Synthesis of zirconia nanoparticles on carbon nanotubes and their potential for enhancing the fracture toughness of alumina ceramics"; *Composites: Part B*; Vol. 39; 2008; 1136-1141.