

بررسی تاثیر نانو کاربید بور بر خواص مکانیکی کامپوزیت $B_4C-5\%vol TiB_2$ به روش زینتر بدون فشار

ناهید احمدی*^۱، حمید رضا بهاروندی^۲، ناصر احسانی قمیشلویی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- استادیار، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- دانشیار، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

Ana_a_66@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۳)

چکیده

در این پژوهش تأثیر افزودن نانو کاربید بور بر رفتار زینترپذیری و خواص مکانیکی کامپوزیت کاربید بور- دی بورید تیتانیوم بررسی گردید. مقدار صفر، ۷، ۱۴ و ۲۰ درصد وزنی نانو کاربید بور در ترکیب کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. زینتر بدون فشار در دمای ۲۲۰۰ درجه‌ی سانتیگراد انجام شد. تحت شرایط آزمایشی این پژوهش، ماکزیمم خواص کامپوزیت کاربید بور با ۲۰ درصد وزنی نانو کاربید بور حاصل شده طوری که دانسیته نسبی برابر با ۰/۹۷/۲، میکرو سختی ۳۱/۹ GPa و چقرمگی شکست برابر با $۳/۵۹ MPa.m^{1/2}$ شد. این نتایج را می توان به افزایش درصد نانو کاربید بور نسبت داد به این صوت که با افزایش درصد نانو کاربید بور سطح ویژه و نیروی محرکه برای فرایند زینتر افزایش می یابد و نمونه های متراکم تری بدست می آید. کاهش تخلخل بیشترین تاثیر را روی خواص مکانیکی نمونه های کامپوزیتی ایجاد کرد.

واژه های کلیدی:

کاربید بور، زینتر بدون فشار، خواص مکانیکی، ریزساختار.

۱- مقدمه

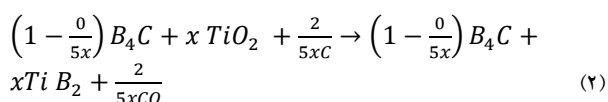
سایش بالا، مدول الاستیک بالا ($۵۴۰ GPa$) و چقرمگی شکست زیاد (۵) در دمای $۲۰۵۰^{\circ}C$ از جمله خواصی هستند که کاربید بور را برای کاربردهای تکنولوژیکی مناسب می سازد [۲، ۴-۶]. به همین دلیل در کاربردهای پوشش زرهی در هلی کوپترها، جلیقه های ضد گلوله، آستر داخل راکتورهای گازی، پوشش-ها، ابزارهای محافظ در مقابل تابش نوترون در راکتورهای هسته-ای، ابزارهای سایشی، افشانک های ماسه پاشی، چرخ های سنگ-

کاربید بور یک ماده سرامیکی مهم با ساختار رمبوهدرال است [۱-۲]. این ماده که به آن الماس سیاه نیز گفته می شود، بعد از الماس و نیتريد بور مکعبی، سخت ترین ماده محسوب می شود [۳]. نقطه ذوب بسیار بالا ($۲۴۴۷^{\circ}C$)، مدول یانگ بالا ($۴۷۰ GPa$)، ۴۵۰ ، سطح مقطع جذب نوترون وسیع، چگالی پایین ($۲/۵۲$)، خنثایی شیمیایی، خواص الکتریکی و حرارتی عالی، سختی بسیار بالا، مقاومت خوب در برابر اکسید شدن و خوردگی، مقاومت به

استاپنکو و همکاران [۲۳] تاثیر تخلخل و اندازه‌ی دانه را روی خواص مکانیکی کاربید بور ساخته شده توسط روش پرس گرم که از سنتز عناصر تولید شده است، مورد مطالعه قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد که خواص مکانیکی کاربید بور تا اندازه‌ی زیادی به اندازه‌ی دانه وابسته است. کوپستون و همکارانش [۲۴] اثر افزودن کربن و اندازه ذرات B_4C را بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت $B_4C-24\%volTiB_2$ مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار کوپستون و همکارانش حاکی از این بود که کامپوزیت‌هایی که از پودر کاربید بور با اندازه‌ی دانه‌ی کوچکتر ساخته شده بودند دارای مدول ینگ، استحکام کششی و سختی بالاتر نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی بودند که از پودر کاربید بور با اندازه‌ی دانه‌ی بزرگتر ساخته شده بودند. با توجه به موارد مذکور، افزودن همزمانی بورید تیتانیوم و نانو کاربید بور تاکنون مورد بررسی محققین قرار نگرفته است. در این پژوهش تلاش شده است که تأثیر افزودن نانو کاربید بور برزینترپذیری و خواص مکانیکی کامپوزیت کاربید بور-دی بورید تیتانیوم مورد بررسی قرار گیرد.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق پودر B_4C با اندازه‌ی ۲/۵ میکرومتر ساخت کشور چین به عنوان ماده‌ی زمینه، نانو پودر TiO_2 با متوسط اندازه‌ی ذرات ۸۰ نانومتر، نانو پودر B_4C با ابعاد ۵۰ نانومتر به عنوان فاز تقویت کننده و به میزان صفر، ۱۴، ۲۰ درصد وزنی مورد استفاده قرار گرفت، همچنین رزین فنولیک به عنوان منبع کربن انتخاب شد. واکنش (۲) جهت ساخت نمونه‌های B_4C-TiB_2 5% wt ملاک قرار داده شد.

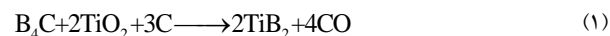


جدول (۱) درصد مواد اولیه و محصولات را برای کامپوزیت $B_4C-5\%wt TiB_2$ نشان می‌دهد.

زنی در پولیش کاری محیط و فیها بای کامپوزیت سرامیکی تقویت شده استفاده می‌شود [۷]. مشکل اصلی کاربید بور پایداری شیمیایی بالای آن بوده که قابلیت زینتر شدن و تراکم-پذیری آن را محدود می‌کند. ساخت سرامیک‌های کاربید بور با دانسیته بالا و به وسیله زینتر حالت جامد بسیار مشکل است که علت آن، پیوندهای کووالانت قوی، پلاستیسیته کم، نفوذ در خود پایین، مقاومت بالا در برابر لغزش مرز دانه و انرژی سطحی پایین کاربید بور خالص می‌باشد. علاوه بر زینترپذیری ضعیف، چقرمگی شکست پایین کاربید بور (کمتر از $2/2Mpa.m^{1/2}$) نیز، کاربرد آن را محدود کرده است [۸].

برای حل مشکل زینتر کاربید بور، راه‌های متفاوتی ارائه شده است که مهم‌ترین آن‌ها استفاده از یک فاز ثانویه به عنوان کمک زینتر می‌باشد. با این وجود حتی در حضور این کمک زینترها برای رسیدن به دانسیته تئوری می‌بایست قطعات را در دمای بالاتر از $2000^\circ C$ زینتر نمود [۹-۱۲]. از بهترین افزودنی‌ها برای بهبود دمای پخت، خواص مکانیکی و اصلاح ریزساختار TiB_2 می‌باشد. همچنین، استفاده از نانو ذرات TiB_2 به جای ذرات درشت‌تر، باعث می‌شود که دمای پخت B_4C به مقدار بیشتری کاهش یابد، که خود یک مزیت بزرگ به شمار می‌رود [۱۳-۱۹].

روش‌های متفاوتی برای ساخت کامپوزیت‌های B_4C-TiB_2 وجود دارد یکی از این روش‌ها افزودن همزمان C و TiO_2 به کاربید بور است. این روش مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۲۰-۲۲]. طبق بررسی‌های انجام شده افزودن همزمان C و TiO_2 منجر به تشکیل درجا TiB_2 با ابعاد کمتر از ۱۰۰ در مرز دانه‌های B_4C مطابق واکنش (۱) می‌شود.

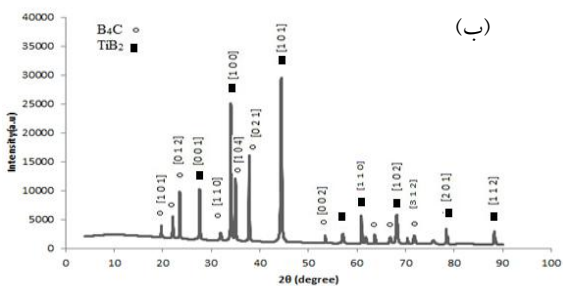
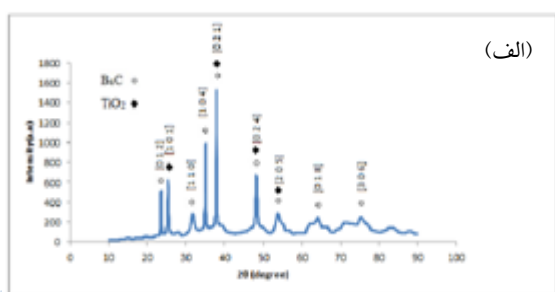


با توجه به نوآوری در سنتز پودر، تحقیقات اخیر بر روی زینتر بدون فشار نانو پودرها انجام شده است. این فرضیه ارایه شده است که افزایش سطح و فاصله‌ی کمتر دیفوزیون نانو پودرها منجر به افزایش نیروی محرکه برای فرایند زینتر می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز فازی

در شکل (الف) تصویر XRD مربوط به نمونه‌ی حاوی B₄C، TiO₂ و رزین فنولیک پیش از زینتر و در شکل (ب) تصویر XRD نمونه‌ی B₄C-5% wt TiB₂ حاوی ۲۰ درصد وزنی نانو کاربرد بور پس از زینتر در دمای ۲۲۰۰°C به مدت یک ساعت دیده می‌شود. در شکل (الف) پیکهای مربوط به فازهای TiO₂ و B₄C مشاهده می‌شود و به دلیل اینکه رزین فنولیک فازی آمورف است پیکی را نشان نمی‌دهد. در شکل (ب) مشاهده می‌شود در دمای ۲۲۰۰°C فازهای حاصل B₄C و TiB₂ می‌باشند و تمام TiO₂ و کربن موجود در مواد اولیه وارد واکنش شده است و کامپوزیت TiB₂B₄C حاصل شده است. همچنین با توجه به بحث‌های استوکیومتری مقداری از فاز B₄C ممکن است به فازهای دیگری با استوکیومتری‌های مختلفی از B و C تبدیل شود اما با توجه به مقدار کم و پراکندگی این فازها قابل تفکیک نیستند.



شکل (۱): الگوی پراش اشعه‌ی X کامپوزیت B₄C-TiB₂ حاوی ۲۰ درصد وزنی نانو کاربرد بور: (الف): پیش از زینتر و (ب): بعد از زینتر در دمای ۲۲۰۰°C به مدت یک ساعت

جدول (۱) درصد مواد اولیه و محصولات را برای کامپوزیت B₄C-5% wt TiB₂

| TiB ₂ | | | محصول | |
|--------------------------|---------------------------|-----------|------------------------|-------------------------|
| مواد اولیه | | | | |
| B ₄ C, % mass | TiO ₂ , % mass | C, % mass | B ₄ C, % wt | TiB ₂ , % wt |
| ۸۸/۱۰ | ۹/۲۳ | ۲/۰۸ | ۹۵ | ۵ |

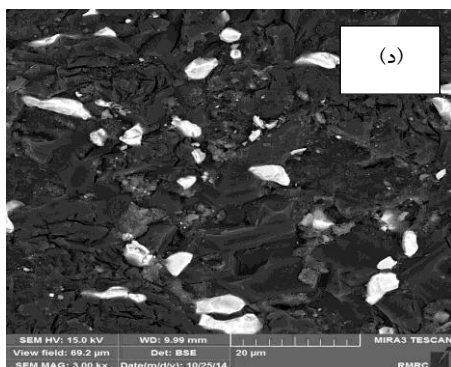
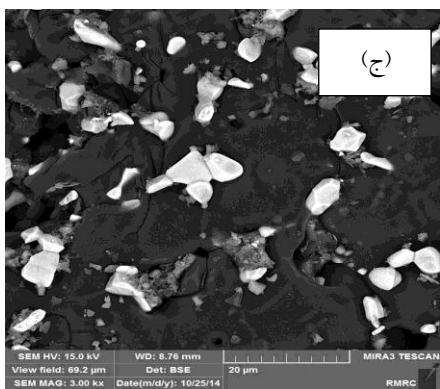
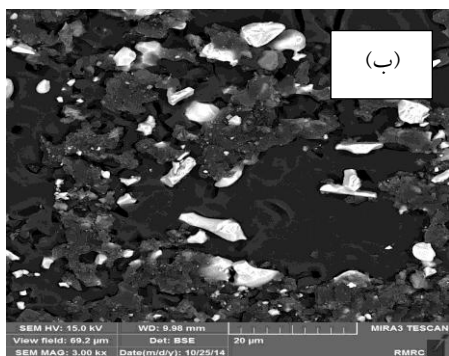
نمونه‌های مورد آزمایش به ترتیب دارای صفر، ۱۴، ۷ و ۲۰ درصد وزنی نانو کاربرد بور در ترکیب می‌باشند. پودرها با ایزوپروپانول به مدت سه ساعت درون آسیاب سیاره‌ای با سرعت ۲۳۰ rpm مخلوط و سپس جهت خشک شدن به مدت ۴ ساعت درون آون با دمای ۱۰۰°C قرار گرفتند. پس از عبور مخلوط پودرها از الک با مش ۶۰ استفاده از دستگاه پرس تک محوره تحت فشار ۸۰ مگا پاسگال نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۲cm و ارتفاع ۱cm زده شد. سپس عملیات زینتر در کوره‌ی عملیات حرارتی گرافیتی تحت خلا ساخت ایران در دماهای ۲۲۰۰°C به مدت یک ساعت انجام گرفت. نرخ گرمایش و سرمایش کوره 10°C/min بود. به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌ها از سنباده‌هایی با مش‌های ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۲۰۰، ۸۰۰ و ۱۵۰۰ و خمیرهای الماسه ۳μm و ۳μm و سنگ CBN استفاده گردید. سپس سطح نمونه‌ها با محلولی حاوی یک درصد وزنی KOH و به مدت ۹۰ ثانیه اچ شده و به وسیله دستگاه SEM (مدل MIRA3 TESCAN) و انجام شده توسط مرکز پژوهش متالورژی رازی) مشاهده گردید. آنالیز فازی با استفاده از دستگاه پراش اشعه X (مدل Pert Pro MPD) انجام شده در مجتمع آزمایشگاهی فناوری نانو (کفا) صورت گرفت. میزان دانسیته نمونه‌ها با استفاده از روش ارشمیدس اندازه‌گیری و سختی نمونه‌ها با استفاده از روش ویکرز محاسبه شد. هر نمونه تحت بار ۱ KgF به مدت ۱۵ ثانیه قرار گرفت. پس از آماده‌سازی سطح نمونه‌ها، اثر ویکرز به وسیله دستگاه میکروسختی سنجی با نیروی ۳۰۰-۱۰۰ gf و به مدت ۲۰ ثانیه بر هر نمونه اعمال گردید، پس از ایجاد ترک با استفاده از میکروسکوپ نوری طول ترک‌ها اندازه‌گیری و با استفاده از طول ترک چقرمگی شکست محاسبه شد.

۳-۲- ریزساختار

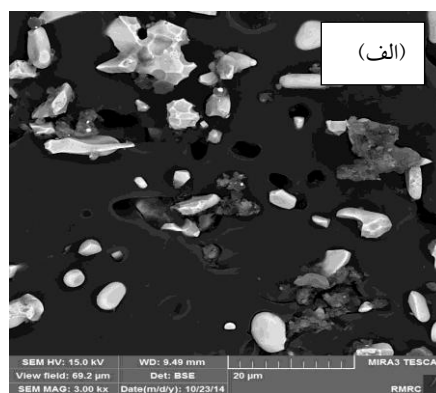
شکل ۲ تصویر SEM مربوط به افزودن مقادیر مختلف نانو کاربید بور را در دما 2200°C نشان می‌دهد. نقاط تیره رنگ در شکل فاز B_4C و نقاط روشن فاز TiB_2 می‌باشد.

تفاوت رنگ موجود در تصویر به علت تشکیل کاربید بور با استوکیومتری‌های متفاوت است. در نقاط تیره رنگ نسبت بور به کربن بیشتر است و در نقاط روشن، نسبت کربن به بور بیشتر می‌باشد. با افزایش درصد نانو کاربید بور در هر یک از نمونه‌ها مشاهده می‌شود که میزان تخلخل کم شده است. که این موضوع را می‌توان به حضور نانو پودرهای کاربید بور در ترکیب و افزایش درصد آن نسبت داد. حضور نانو پودرهای سرامیکی نسبت به سرامیک‌های معمولی در ترکیب کامپوزیت‌ها منجر به افزایش نرخ تراکم می‌شوند [۲۵].

در واقع مکانیزم افزایش تراکم و کاهش تخلخل از مهمترین مواردی است که منجر به پیشرفت فرایند زینتر می‌شود. علاوه بر این وجود ذرات TiB_2 انتقال جرم سطح به سطح را مابین ذرات B_4C محدود می‌کند و لذا از رشد بی رویه‌ی دانه‌ها ممانعت به عمل می‌آورد علاوه بر این از انتقال مواد از طریق فاز بخار به وسیله‌ی CO و CO_2 جلوگیری می‌کند [۲۶].



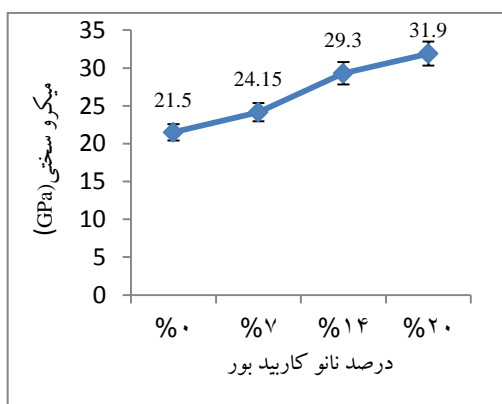
شکل (۲): ریزساختار نمونه‌های زینتر شده در دمای 2200°C حاوی (الف): صفر٪ نانو کاربید بور، (ب): ۷٪ نانو کاربید بور، (ج): ۱۴٪ نانو کاربید بور و (د): ۲۰٪ نانو کاربید بور



۳-۳- دانسیته

شکل ۳ دانسیته نسبی نمونه‌های کامپوزیتی با مقادیر مختلف نانو کاربید بور و زینتر شده در دمای 2200°C را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد نانو کاربید بور دانسیته‌ی نسبی افزایش پیدا کرده است. این موضوع می‌تواند به دلیل حضور نانو پودرهای کاربید بور در ترکیب کامپوزیت

این کاربید بور دارای سختی بالایی می باشد، استفاده از نانو کاربیدبور منجر به افزایش مرز دانه می شود و از مکانیزم های کارسختی جلوگیری می کند و در نهایت سختی افزایش می یابد [۲۸].

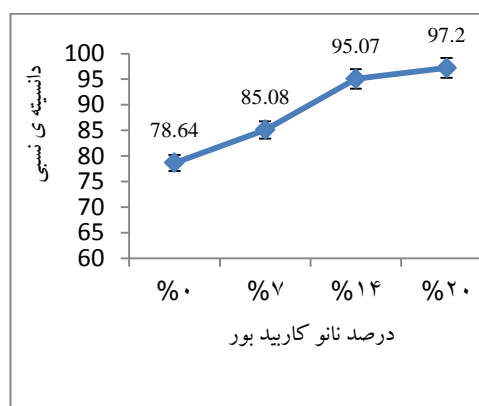


شکل (۴) میکرو سختی نمونه های کامپوزیتی با مقادیر مختلف نانو کاربیدبور و زینتر شده در دمای ۲۲۰۰ °C

۳-۵- چقرمگی شکست

شکل ۵ چقرمگی شکست نمونه های زینتر شده در دمای ۲۲۰۰ درجه ی سانتیگراد را نشان می دهد. چقرمگی قطعات زینتر شده در دمای ۲۲۰۰ °C از $2/83 \text{MPa.m}^{1/2}$ به $3/59 \text{MPa.m}^{1/2}$ برای نمونه های حاوی ۲۰ درصد وزنی نانو کاربید بور افزایش می یابد. در اینجا نیز مجموع برهم کنش عوامل موثر بر چقرمگی مانند افزایش دانسیته، کاهش تخلخل به عنوان مراکز تمرکز تنش و ایجاد ترک، حضور فاز چقرمه تر و ایجاد ریزترک ها ناشی از اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی باعث تغییرات مقدار چقرمگی شکست می شود. با افزایش درصد نانو کاربیدبور چقرمگی شکست افزایش یافته است. کوچک بودن اندازه ی دانه منجر به بهبود چقرمگی شکست می شود. معمولاً سرامیک های ریزدانه مقاومت بهتری در برابر رشد ترک دارند. این امر مورد قبول واقع شده است که مقادیر بالای استحکام نشان دهنده ی مقادیر بالای چقرمگی شکست نیز می باشد. مطابق رابطه ی هال پیچ با کوچک شدن اندازه ی دانه استحکام افزایش و در نتیجه ی آن چقرمگی نیز افزایش می یابد [۲۸]. معادله ی (۱) نشان می دهد

باشد. حضور نانو پودرها در ترکیب باعث توزیع یکنواخت تر ذرات میکرون در نمونه ها می شوند. علاوه بر این مجموع انرژی سطحی بالا و مسافت نفوذ کوتاه منجر به افزایش زینتر پذیری در حالت جامد خواهد شد و دانسیته ماده زینتر شده بهبود می یابد. همچنین ورود ناخالصی هایی نظیر آهن و تنگستن در حین فرایند آسیاب ممکن است منجر به افزایش نرخ تراکم گردد.



شکل (۳) دانسیته نسبی نمونه های کامپوزیتی با مقادیر مختلف نانو کاربیدبور و زینتر شده در دمای ۲۲۰۰ °C

۳-۴- سختی

در شکل (۴) میزان سختی نمونه ها بر حسب مقدار نانو کاربیدبور در دمای ۲۲۰۰ °C مشاهده می شود. در این دما، بیشترین میزان سختی برای نمونه های حاوی ۲۰٪ وزنی نانو کاربیدبور، ۳۱/۹ GPa است. مقدار سختی کامپوزیت $\text{B}_4\text{C-TiB}_2$ تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند نسبت B/C، درصد TiB_2 موجود در ساختار، درصد TiO_2 اولیه، اندازه ی ذرات اجزای کامپوزیت، دمای زینتر و ... دارد.

طبق بررسی هایی که توسط لوین و شورخود [۲۷] صورت گرفت حضور ۵ درصد وزنی TiB_2 در ترکیب این کامپوزیت منجر به دستیابی به سختی مناسب می شود. با افزایش درصد نانو کاربید بور دانسیته ی کامپوزیت افزایش می یابد و از آنجائیکه سختی ارتباط مستقیم با میزان دانسیته دارد بنابراین هر چه میزان دانسیته افزایش پیدا کند میزان سختی نیز افزایش می یابد. علاوه بر

- ۴- حضور نانوکاربید بور باعث توزیع یکنواخت کریستالی، نقص تراکم کمتر، ترکیب یکنواخت تر ذرات میکرون در نمونه‌ها شد.
- ۵- حضور ذرات TiB_2 در مرز دانه‌ی B_4C از رشد بی رویه‌ی دانه‌ها در دمای بالا جلوگیری کرده است.
- ۶- برترین خواص برای نمونه‌های حاوی ۲۰٪ درصد وزنی نانوکاربید بور به دست آمد که در آن‌ها دانسیته ۹۷/۲٪، سختی ۳۱/۹ GPa، و چقرمگی شکست $3/59 MPa.m^{1/2}$ حاصل شد.

۵- منابع

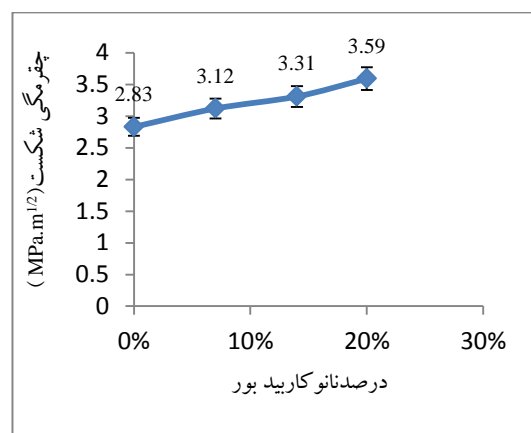
- [1] H. Baharvandi & A. Hadian, "Pressureless Sintering of TiB_2 - B_4C Ceramic Matrix Composite", Journal of materials engineering and performance, Vol. 17, No. 6, pp. 838-841, 2008.
- [2] A. O. Sezer & J. Brand, "Chemical vapor deposition of boron carbide", Materials Science and Engineering, Vol. 79B, No. 3, pp. 191-202, 2001.
- [3] S. Chen, D. Wang, J. Huang & Z. Ren, "Synthesis and characterization of boron carbide nanoparticles", Applied Physics, Vol. 79A, No. 7, pp. 1757-1759, 2004.
- [4] ع.علیزاده، ع.عبداللهی و ز.نصیری، "مقایسه ریزساختار و خواص مکانیکی نانو کامپوزیت $Al-B_4C$ تولید شده به روشهای ریخته گری گردابی، متالورژی پودر و آلیاژسازی مکانیکی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳.
- [5] Sinha, T. Mahata & B. Sharma, "Carbothermal route for preparation of boron carbide powder from boric acid-citric acid gel precursor", Journal of Nuclear Materials, Vol. 301, No. 2, 2002.
- [6] L. Jacobsohn, M. Nastasi, L. Daemen, Z. Jenei & P. Asoka-Kumar, "Positron annihilation spectroscopy of sputtered boron carbide films, Diamond and related materials", Vol. 14, No. 2, pp. 201-205, 2005.

- [7] م. شکوی دیسفانی، م. سعیدی حیدی و ح. بهاروندی، "مروری ب تاثیر کمک سینتهای اکسیدی بر فتار سینترپذیری کامپوزیت‌های کاربید بور (B_4C)"، فصلنامه علمی پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.

چقرمگی شکست با میزان تخلخل رابطه‌ی نمایی دارد [۲۹]. افزایش درصد نانوکاربید بور در ترکیب کامپوزیت منجر به کاهش میزان تخلخل و به طبع آن افزایش دانسیته می‌شود.

$$K_C(P) = K_0 \exp(-bP) \quad (۳)$$

در این رابطه b ثابت و K_0 چقرمگی شکست کامپوزیت فاقد تخلخل و P میزان تخلخل می‌باشد [۳۰]. علاوه بر این بالاتر بودن سطح ویژه‌ی این نانوذرات نسبت به کاربید بور میکرونیزه، منجر به تسریع واکنش بین کاربید بور و TiO_2 می‌گردد و واکنش‌های مربوط به زینتر به صورت کامل تر انجام می‌شود. باتشکیل فاز TiB_2 به دلیل اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی اجزای کامپوزیت یک میدان تنشی در اطراف ذرات فاز ثانویه ایجاد ریز ترک‌ها در قطعه می‌شود، ریزترک‌ها باعث پراکندگی تمرکز ترک می‌شوند و منجر به افزایش چقرمگی شکست کامپوزیت می‌شود [۳۱].



شکل (۵) چقرمگی شکست نمونه‌های کامپوزیتی با مقادیر مختلف کاربید بور در مقیاس نانو و زینتر شده در دمای $2200^\circ C$

۴- نتیجه گیری

- ۱- افزایش درصد نانوکاربید بور باعث افزایش سطح ویژه و در نتیجه‌ی آن افزایش نیروی محرکه برای فرایند زینتر و دستیابی به نمونه‌های متراکم تر شد.
- ۲- کاهش تخلخل بیشترین تاثیر را روی خواص
- ۳- مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی ایجاد کرد.

- Ru, "Synthesis and properties of hot pressed B₄C-TiB₂ ceramic composite", *Materials Science and Engineering*, Vol. 527A, pp. 7215-7219, 2010.
- [19] L. Levin, N. Frage & M. P. Dariel, "The Effect of Ti and TiO₂ Additions on the Pressureless Sintering of B₄C", *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 30A, pp. 3201-3210, 1999.
- [20] F. Thevenot, "Boron Carbide-A Comprehensive Review", *J. Euro. Ceram. Soc.*, Vol. 6, pp. 205-225, 1990.
- [21] Cardarelli & Francois, "material Hand book: A concise desktop Reference", *springer*, pp. 637, 2008.
- [22] K. A. Schwetz & A. Lipp, "Boron Carbide, Boron Nitride and metal Borides", *Uhlmann's Encycl. Indust. Chem*, ed. F. T. Cambell, R. Pfefrkon and J. F. Rounsaville, Vol. 4A, pp. 295-307, 1985.
- [23] A. D. Oslpov, V. V. Slezov & V. P. Podtykan, "Effect of prosity and grain size on the mechanical properties of hot pressed boron carbide", *american ceramic society*, 2008.
- [24] R. C. McCuiston & j. c. LaSalvia, "effect of carbon additions B₄C particle size on the microstructure and properties of B₄C-TiB₂composites", *soviet powder metallurgy and metal ceramics*, Vol. 21, pp. 55-58, 1982.
- [25] R. K. Goyal, A. N. Tiwari & Y. S. Negi, "Microhardness of PEEK/ceramic micro-and nanocomposites: Correlation with Halpin-Tsai model", *Materials Science and Engineering*, Vol. 491, pp. 230-236, 2008.
- [26] k. kundsen & W. Refaniello, "Titanium Diborid Boron Carbide Composites with High Hardness and Toughness", *U. S. Patent 4957884*, 1990.
- [27] V. V. Shorokhod, M. D. Vlajic & V. D. Kristic, "Pressureless sintering of B₄C - TiB₂ ceramic composites", *Materials science forum*, Vol. 282-283, pp. 219-224, 1998.
- [28] ک. دولت خواه، "ساخت نانو کامپوزیت زرهی کاربید بور-دی بورید تیتانیوم با استفاده از نانوذرات اکسید تیتانیوم به روش زینتر بدون اعمال فشار"، *دانشگاه صنعتی مالک اشتر*، ۱۳۸۸.
- [29] B. W. John, W. C. Roger, M. John, "Mechanical Properties of Ceramics", *John Wiley &*
- [8] D. C. Halverson, "Processing of Boron Carbide-Aluminum Composites", *J. Am. Cerum. Soc.*, Vol. 72, pp. 775-780, 1989.
- [9] D. Gosset & B. Provot, "Boron Carbide as a Potential Inert Matrial", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 38, No. 3-4, pp. 263-266, 2001.
- [10] M. K. Aghajanian, B. N. Morgan, J. R. Singh J. Mears & R. A. Wolffe, "A New Family of Reaction Bonded Ceramics for Armor Applications", *Pac Rim 4*, November 4-8, Maui, Hawaii 1, Paper No. PAC6-H-04-2001.
- [11] H. D. Espinosaand & N. S. Brar, "Enhanced Ballistic Performance of Confined Multi-layered Ceramic Targets Against Long Rod Penetrators through Interface Defeat", *Int. J. of solid and structures*, Vol. 37, pp. 4893-4913, 2000.
- [12] k. kundsen & William Refaniello, "Titanium Diborid Boron Carbide Composites with High Hardness and Toughness", *U. S. Patent 4957884*, 1990.
- [13] L. Levin, N. Frage & M. P. Dariel, "A novel approach for the preparation of B₄C-based cermets", *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 18, pp. 131-135, 2000.
- [14] L. Z. Pei & H. N. Xiao, "B₄C/TiB₂ composite powders prepared by carbothermal reduction method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 2122-2127, 2009.
- [15] J. E. Zorzi, C. A. Perottoni & J. A. H. da Jornada, "Hardness and wear resistance of B₄C ceramics prepared with several additives", *Materials Letters*, Vol. 59, pp. 2932-2935, 2005.
- [16] S. G. Huang, K. Vanmeensel, O. Van der Biest & J. Vleugels, "In situ synthesis and densification of submicrometer-grained B₄C-TiB₂ composites by pulsed electric current sintering", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 31, pp. 637-644, 2011.
- [17] T. S. Srivatsan, G. Guruprasad, D. Black, R. Radhakrishnan & T. S. Sudarshan, "Influence of TiB₂ content on microstructure and hardness of TiB₂-B₄C composite", *Powder Technology*, Vol. 159, pp. 161-167, 2005.
- [18] X. Y. Yue, S. M. Zhao, P. Lü, Q. Chang & H. Q.

[31] S. Huang, K. Vanmeensel, O. Malek, O. Van der Biest & J. Vleugels, Microstructure and mechanical sintered B_4C-TiB_2 composites, Materials Science and Engineering, Vol. 528A, pp. 1302-1309, 2011.

Sons, Vol. 2, 2009.

[30] M. Kohler & W. Fritzsche, "Nanotechnology, An introduction to Nanostructuring Techniques", McGraw-Hill Book Company, 2004.