



## بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت‌های B<sub>4</sub>C-C تولیدشده به روش پرس داغ

علیرضا مرادخانی<sup>۱</sup>، حمیدرضا بهاروندی<sup>۲</sup>، مهدی تاجداری<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

۲- دانشیار مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، اراک

\* صندوق پستی ۳۸۱۸۱۴۶۷۷۵، iuim.ac.ir@tajdari

**چکیده-** کاربیدبور (B<sub>4</sub>C)، با داشتن خواصی عالی چون سختی بالا، دانسیته کم و سطح مقطع بالا برای جذب نوترون، کاربردهای زیادی در تاسیسات هسته‌ای و صفحات زرهی سبک‌وزن دارد. با توجه به عدم زینترپذیری مناسب کاربیدبور، از رزین فنولیک (کربن) به عنوان کمک زینتر برای این سرامیک استفاده شده است. نمونه‌های B<sub>4</sub>C بدون افزودنی و حاوی ۵ درصدوزنی رزین فنولیک تهیه شدند و در دمای ۲۲۰۰°C به مدت یک ساعت زینتر شدند و خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مذکور بررسی شد. دانسیته نسبی نمونه‌های شامل ۵ درصد وزنی رزین فنولیک برابر ۹۵ درصد و برای نمونه‌های فاقد افزودنی برابر ۸۲ درصد دانسیته تئوری به دست آمد. همچنین، افزایش قابل توجهی در بهبود خواص مکانیکی آن‌ها نسبت به نمونه‌های فاقد افزودنی مشاهده شد؛ به طوری که استحکام خمشی از ۲۶۴ به ۳۱۸ MPa، مدول الاستیسیته از ۴۴۵ به ۴۶۵ GPa، سختی ویکرز از ۳۰۲۰ به ۳۱۵۰ GPa و مقادیر چقرمگی شکست از ۲/۶ به ۴/۲ MPa.m<sup>1/2</sup> بهبود یافت. **کلیدواژگان:** کامپوزیت، کاربیدبور، پرس داغ، خواص مکانیکی

## Investigation of mechanical properties and microstructure of B<sub>4</sub>C-C composites fabricated by hotpress

A. R. Moradkhani<sup>1</sup>, H. R. Baharvandi<sup>2</sup>, M. Tajdari<sup>3\*</sup>

1- MSc., Mech. Eng., Science & Research Branch, Islamic Azad Univ., Tehran, Iran

2- Assoc. Prof., Mat. Eng., Malek Ashtar Univ., Tehran, Iran

3- Prof., Mech. Eng., Science & Research Branch, Islamic Azad Univ., Arak, Iran

\* P. O. B. 3818146775 Arak, tajdari@iuim.ac.ir

**Abstract-** Unique properties of boron carbide (B<sub>4</sub>C) such as high hardness, low density, and comprehensive area for Neutron attraction, have turned this material into a very suitable candidate for many industrial applications such as nuclear facilities and light armored plates. According to inappropriate sinter ability of boron carbide, phenolic resin was utilized as sintered help for this ceramic. Different free additive samples of B<sub>4</sub>C with 5wt% phenolic resin were prepared and sintered at 2200°C. Then their physical and mechanical properties were investigated. Results show that the relative density of samples including 5wt% phenolic resin is equal to 95% and for samples without additive is equal to 82% of theoretical density. Furthermore, it can be seen an improvement in mechanical properties in comparison of free additives samples; so that the flexural strength from 264 to 318MPa, the modulus of elasticity from 445 to 465GPa, Vickers hardness from 3020 to 3150GPa and fracture toughness from 2.6 to 4.2MPa.m<sup>1/2</sup> will be improved.

**Keywords:** Composite, Boron Carbide, Hotpress, Mechanical Properties

## ۱- مقدمه

یک زنجیره خطی بیرون دوازده‌وجهی می‌باشند. این سرامیک دارای نقطه ذوب  $2447^{\circ}\text{C}$  بوده و مذاب حاصله در بالاتر از  $3500^{\circ}\text{C}$  می‌جوشد. دانسیته این ماده  $2/512\text{gr/cm}^3$  است [۵]. نکته قابل توجه در مورد مذاب کاربیدبور مسئله انجماد آن می‌باشد که پس از انجماد تفاوت قابل ملاحظه‌ای از لحاظ ترکیب با مذاب خود دارد که این امر ناشی از تشکیل مقادیری بور و کربن آزاد در ساختار آن است. به همین دلیل، صرف‌نظر از نقطه ذوب بالای آن، شکل‌دهی آن نیز از طریق ریخته‌گری حتی با کنترل‌های دقیق غیرممکن است [۳].

کاربیدبور دارای پیوند کووالانسی می‌باشد؛ لذا استحکام بالایی دارد. از طرف دیگر دارای کمترین مقدار دانسیته در میان مواد فوق سخت می‌باشد [۴]. از این رو به عنوان سرامیکی کاربیدی با نسبت استحکام به وزن بالا استفاده می‌شود. از طرف دیگر استحکام این سرامیک تا  $1500^{\circ}\text{C}$  کاهش پیدا نمی‌کند. بنابراین در صنایع با تکنولوژی بالا و کاربردهای حساس قابل استفاده است [۳-۱۰].

از صفحات زرهی سبک‌وزن کاربیدبور برای حفاظت هلیکوپترها و ساخت جلیقه‌های ضد گلوله استفاده می‌شود [۵]. از دیگر خواص استراتژیک کاربیدبور مسئله جذب نوترون توسط آن است که این خصیصه به همراه دیرگدازی بالای آن سبب کاربرد وسیع آن در ساخت تاسیسات هسته‌ای و به عنوان سپر راکتورها شده است [۱۲، ۱۱]. به دلیل چسبندگی خوب و مقاومت به دمای بالا و اثرات شیمیایی، از کاربیدبور به عنوان پوشش برای گلوله‌های گرافیتی نازل موشک استفاده نیز می‌شود [۱۳]. سرامیک  $B_4C$ ، به دلیل خواص منحصربه‌فردی که اشاره شد، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع به‌ویژه در صنایع نظامی یافته است. این سرامیک پتانسیل ویژه‌ای برای کاربرد در ساخت مواد مقاوم به ضربه و مقاوم به سایش را داراست [۱۴، ۱۱].

کاربیدبور یکی از پایدارترین ترکیبات است و آنتالپی استاندارد تشکیل آن پایین است. این ماده در مقابل محلول‌های آبی اکثر قلیایی‌ها و اسیدهای معدنی معمولی مقاوم است [۱۵]. در صنعت هوافضا، کاربیدبور در کنار وزن مخصوص پایین، به خاطر گرمای احتراق بالایی که در هنگام ترکیب با اکسیژن تولید می‌کند ( $51900\text{J/g}$ )، به عنوان یک سوخت جامد مفید برای موشک‌ها نیز مطرح شده است [۱۶].

کاربیدبور متعلق به گروه مواد سخت غیرفلزی می‌باشد و پس از الماس و نیتريد بور مکعبی سخت‌ترین ماده شناخته شده است [۲، ۱]. در بین کاربیدهای دیرگداز، بعد از کاربیدهای تنگستن، تیتانیوم، سیلیکون، کاربیدبور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و به عنوان یک ماده استراتژیک، به علت سختی بالا، دانسیته پایین، سطح مقطع بالا برای جذب نوترون، پایداری شیمیایی و غیره، به کار برده می‌شود [۳]. کاربیدبور با داشتن نقطه ذوب بالا، سختی بالا، دانسیته کم و سطح مقطع بالا برای جذب نوترون، در تاسیسات هسته‌ای و صفحات زرهی سبک‌وزن به شکل ویژه‌ای به کار برده می‌شود [۵، ۴].

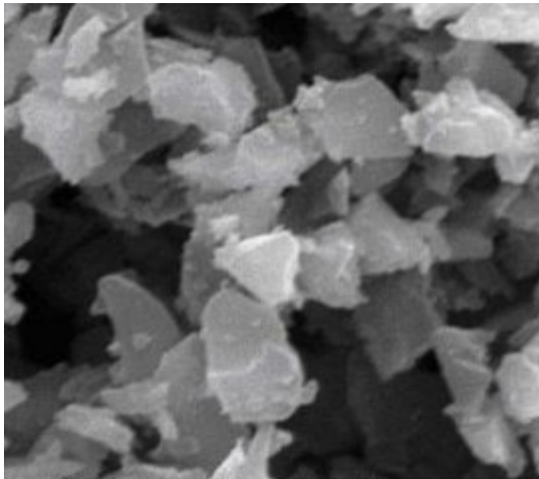
مشکل اصلی کاربیدبور پایداری شیمیایی بالای آن بوده که قابلیت زینترشدن و تراکم‌پذیری آن را محدود می‌کند [۷، ۶]. برای تقویت خاصیت زینترشدن و تراکم‌پذیری این سرامیک، روشی که مورد توافق اکثر محققان [۵-۱۱] می‌باشد، افزودن یک فاز ثانویه به سرامیک است. از طرفی افزودن این مواد در مقادیر زیاد بر اساس قانون اختلاط در بسیاری از موارد باعث کاهش و یا تضعیف خواص مکانیکی سرامیک می‌گردد [۶-۹]. تحقیقات وسیعی برای کاهش این اثرات انجام شده است. علی‌رغم تمام خواص منحصربه‌فرد  $B_4C$ ، این سرامیک دارای چقرمگی شکست پایینی است که این موضوع نیز باعث ایجاد محدودیت‌هایی در کاربرد آن شده است [۴-۶].

برای حل مشکل زینترینگ 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 ثنوری، می‌بایست قطعات را در دمای بالاتر از  $2000^{\circ}\text{C}$  زینتر نمود [۷، ۶، ۵، ۳، ۲، ۱]. اثر افزایش  $W$ ،  $Al$ ،  $Fe$  و  $Si$  بر خاصیت زینترپذیری  $B_4C$  بررسی شده و مشخص گردیده است که افزودن این مواد سبب بهبود قابلیت زینترپذیری  $B_4C$  می‌شود [۷-۱۱].

کاربیدبور پودر کریستالی تیره مایل به سیاه است که دارای ساختار رمبوهدرال می‌باشد [۴]. ساختارش شبیه دوازده‌وجهی منظم است که هر دوازده اتم بور در رئوس و سه اتم کربن در

1. Tungsten
2. Iron
3. Aluminum
4. Silicon

نمونه‌های خام از آسیاب سیاره‌ای<sup>۷</sup> با سرعت ۱۵۰ rpm به مدت ۳ ساعت استفاده شد. هاون مورد استفاده در آسیاب سیاره‌ای از نوع فولاد زنگ‌نزن با جنس دیواره داخلی کاربید تنگستن به حجم مفید حدودی  $550 \text{ cm}^3$  بود که تعداد ۱۷ گلوله کاربید تنگستن به قطر حدود ۱۷ cm و وزن ۵۶/۵۴ gr درون آن قرار می‌گرفت.



شکل ۱ تصویر SEM پودر کاربیدبور مصرفی

از دستگاه پرس هیدرولیک تک‌محوره ۲۰۰ تن با فشار حدود ۲۰ bar به مدت ۳۰ ثانیه جهت شکل‌دهی پودرها استفاده شد.

ساخت قطعات آزمایش با استفاده از دستگاه پرس گرم با حرارت‌دهی همزمان و با اعمال فشار مخلوط پودرهای مواد اولیه بر طبق پژوهش مرادخانی و همکارانش [۱۸] انجام گرفت. به همین منظور ۵ درصد وزنی از رزین فنولیک و ۹۵ درصد وزنی از کاربیدبور با ترازوی دیجیتالی توزین شد. پس از توزین مواد اولیه، سوسپانسیون مخلوط آن‌ها با ایزوپروپانول آماده شده و درون محفظه آسیاب فولادی جهت همگن‌سازی قرار گرفت. دوغاب حاصل پس از خروج از آسیاب به مدت ۲۴ ساعت در خشک‌کن حرارتی در دمای  $90^\circ \text{C}$  قرار گرفت و سپس با استفاده از دستگاه پرس با فشار حدود ۲۰ bar و زمان نگهداری بار به مدت ۳۰ ثانیه شکل‌دهی شد. قطعات حاصل در دستگاه پرس گرم قرار گرفت و با سرعت حرارت‌دهی ۱۰ درجه سانتی‌گراد در هر دقیقه در محیط آرگون با قالب گرافیتی تا

برای کامپوزیت‌های ذره‌ای زمینه سرامیکی چندین مکانیزم جهت افزایش چقرمگی شکست<sup>۱</sup> پیشنهاد شده است. بر اساس این بررسی‌ها قفل‌شوندگی<sup>۲</sup>، انحراف ترک<sup>۳</sup>، چقرمه‌شدن با ریزترک<sup>۴</sup>، پل‌زدن ترک<sup>۵</sup> و تنش‌های پسماند از مکانیزم‌های عمده افزایش چقرمگی بوده که هر کدام به تنهایی یا به همراه مکانیزم‌های دیگر می‌توانند عمل کنند. به همین دلیل در بسیاری از موارد تعیین اینکه کدام مکانیزم باعث افزایش چقرمگی شده است دشوار می‌باشد [۱۷].

رزین فنولیک یا رزین فنل فرمالدئید، که به آن فنل‌پلاست نیز می‌گویند، رزینی است که از واکنش فنل یا مشتقات آن با یک آلدئید به دست می‌آید. در این تحقیق، از رزین فنلی به عنوان کمک رزینتر استفاده شد و خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های با افزودنی و نمونه‌های فاقد افزودنی با یکدیگر مقایسه گردیدند.

## ۲- مواد، تجهیزات و روش ساخت

پودر کاربیدبور با فرمول شیمیایی  $\text{B}_4\text{C}$  و وزن مولکولی ۵۵ اصلی‌ترین ماده مورد استفاده در این پژوهش است. این پودر به عنوان منبع تامین‌کننده بور عمل می‌کند و از کمپانی چنگ‌دو رنگ‌فنگ چین<sup>۶</sup> تهیه شد. ترکیب شیمیایی پودر مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی پودر کاربیدبور مصرفی

درصد وزنی	ترکیب شیمیایی
۷۶/۱	B
۲۰/۳	C
۹۶/۴	B+C
۱/۹۶	$\text{B}_2\text{O}_3$

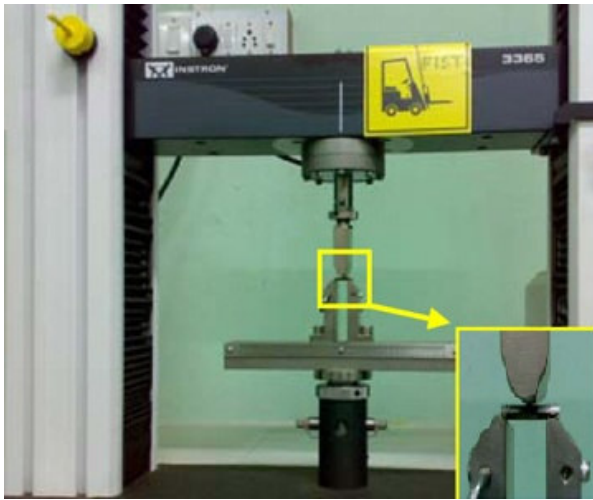
در شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) پودر مذکور نمایش داده شده است.

ترازوی دیجیتالی مورد استفاده برای توزین پودرها دقت توزین تا  $0.01 \text{ gr}$  را داشت. برای همگن‌سازی و مخلوط کامل

1. Fracture toughness
2. Crack pinning
3. Crack deflection
4. Microcrack toughening
5. Crack bridging
6. Chengdu Rong feng Chin

$$MOR = \frac{3Fl}{2bd^2} \quad (1)$$

که در آن  $F$  نیروی شکست بر حسب  $N$ ،  $l$  فاصله تکیه‌گاه بر حسب  $mm$ ،  $b$  پهنای نمونه بر حسب  $mm$  و  $d$  ضخامت نمونه بر حسب  $mm$  می‌باشد. شکل ۲ تصویری از دستگاه تست خمش در حال تست کردن را نشان می‌دهد.



شکل ۲ تصویر دستگاه تست خمش

سختی نمونه‌ها با روش ویکرز بر اساس استاندارد ASTM C1327 [۲۲] محاسبه شد. بدین ترتیب سطح نمونه‌ها با دستگاه پولیش آماده‌سازی شد و با اعمال بار  $98 N$  به مدت  $30$  ثانیه به وسیله دستگاه سختی‌سنجی اثر ویکرز بر هر نمونه اعمال شد.

چقرمگی شکست نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۲)، که توسط آنستیس و همکارانش [۲۳] حاصل شده است، به‌دست آمد.

$$K_{IC} = a \left( \frac{E}{H} \right)^{0.5} \left( \frac{P}{C^{3/2}} \right) \quad (2)$$

پارامتر چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) بر حسب  $MPa.m^{1/2}$  محاسبه شد که در آن  $a$  عدد ثابت مستقل از ماده است که آنستیس آن را برابر با  $0.04 \pm 0.16$  به‌دست آورد.  $E$  مدول الاستیسیته بر حسب  $MPa$ ،  $P$  نیروی اعمالی برای گذاشتن اثر ویکرز بر حسب  $N$ ،  $C$  طول ترک شعاعی/میانی بر حسب  $mm$  و  $H$  مقدار سختی ویکرز بر حسب  $MPa$  می‌باشد.

دمای  $2200^\circ C$  به مدت یک ساعت و اعمال هم‌زمان فشار در حد  $30 MPa$  مورد عملیات زینتر قرار گرفتند. با پایان‌یافتن زمان زینتر نمونه‌ها، کوره خاموش شده و اجازه داده می‌شود تا به طور طبیعی تا دمای محیط سرد شود. با حرارت نمونه‌ها در دمای  $900^\circ C$  درون کوره عملیات حرارتی در محیط آرگون به مدت دو ساعت، گرافیت متصل به قطعات در مرحله زینتر، جدا شده و ضمن آن عملیات حرارتی نمونه‌ها جهت بررسی ریزساختاری آن‌ها انجام می‌گیرد. قطعات حاصل جهت انجام آزمایش‌های مورد نظر برش داده شده و پولیش می‌شوند که جزئیات هر کدام در ادامه ذکر می‌شود.

دانسیتته و تخلخل نمونه‌ها با روش ارشمیدس و بر اساس استاندارد ASTM B311 [۱۹] انجام گرفت. نمونه‌ها با استفاده از خشک‌کن حرارتی در دمای  $110^\circ C$  به مدت  $24$  ساعت خشک شده و وزن خشک آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال دقیق با دقت  $0.0001 gr$  اندازه‌گیری شد.

مدول الاستیسیته<sup>۱</sup> نمونه‌ها بر پایه استاندارد ASTM C769 [۲۰] بر اساس تغییرات سرعت صوت در نمونه به‌دست آمد. برای این منظور قطعاتی به ابعاد  $2/5 \times 2/5 \times 2/5 cm^3$  از نمونه‌ها تهیه شده و پس از آماده‌سازی سطح آن‌ها با دستگاه پولیش با خمیرهای الماسه  $30 \mu m$ ،  $6 \mu m$  و  $1 \mu m$  صیقلی شد. سپس پالس مافوق صوتی<sup>۲</sup> با فرکانس  $4 MHz$  تولید شده بر سطح نمونه ارسال و دریافت شد.

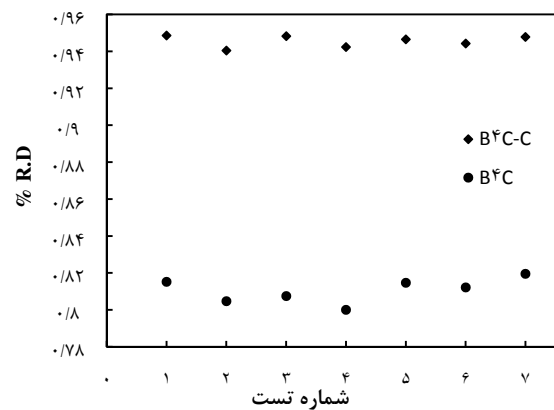
استحکام خمشی<sup>۳</sup> نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C1161 [۲۱] به روش سه‌نقطه‌ای به‌دست آمد. بدین ترتیب که نمونه‌های استحکام خمشی به ابعاد  $4 \times 4 \times 45 mm^3$  از نمونه‌های اولیه به وسیله دستگاه برش تهیه شده و با دستگاه پولیش، سطحی از نمونه که تحت اعمال بار کششی قرار گرفته و به وسیله خمیر الماسه تا یک میکرون پولیش داده شد. سپس، با اعمال بار توسط دستگاه استحکام خمشی با سرعت اعمال بار  $0.5 mm/min$  و قراردادن فاصله تکیه‌گاه ( $l$ ) برابر  $20 mm$  نمودار نیرو بر کنش ترسیم شده و حداکثر نیروی شکست ( $F$ ) ثبت شد. با استفاده از رابطه (۱)، استحکام خمشی یا مدول گسیختگی ( $MOR$ )<sup>۴</sup> بر حسب  $MPa$  محاسبه می‌گردد.

1. Modulus of Elasticity
2. Ultrasonic pulse
3. Flexural strength
4. Modulus of Rupture

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- دانسیته

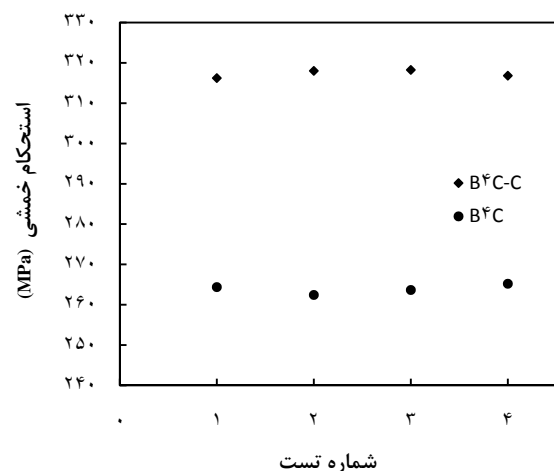
در شکل ۳ نتایج حاصل از اندازه‌گیری دانسیته برای هفت نمونه نشان داده شده است که در آن %R.D نسبت دانسیته ظاهری به دانسیته تئوری می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دانسیته حاصل از افزودن ۵ درصد کمک زینتر رزین فنولیک برابر ۹۵ درصد دانسیته تئوری می‌باشد.



شکل ۳ دانسیته نسبی نمونه‌های زینترشده

## ۳-۲- استحکام خمشی

در شکل ۴ نتایج حاصل از اندازه‌گیری استحکام خمشی برای چهار نمونه نشان داده شده که بیانگر افزایش حدود ۲۰ درصد میزان استحکام خمشی نمونه‌های حاوی افزودنی نسبت به نمونه‌های فاقد افزودنی می‌باشد.



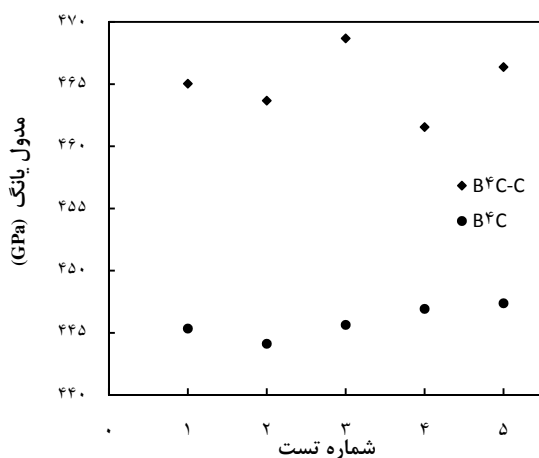
شکل ۴ استحکام خمشی نمونه‌های زینترشده

برای نمونه‌های زینترشده در دمای ۲۲۰۰°C مشاهده می‌شود که مقدار استحکام خمشی بیشتر از نمونه‌های فاقد کمک زینتر با استحکام خمشی ۱۹۲MPa می‌باشد. عوامل افزایش دانسیته و کاهش تخلخل به عنوان عوامل افزایش‌دهنده استحکام خمشی و افزایش درصد فاز نرم‌تر کربن، و ایجاد ریزترک‌ها به عنوان عوامل کاهش‌دهنده استحکام خمشی نقش بازی می‌کنند که مجموع برهم‌کنش این عوامل باعث تغییرات در استحکام خمشی می‌باشد. همچنین، اضافه‌کردن ذرات فاز ثانویه، ضمن جلوگیری از رشد غیرعادی دانه‌ها و کوچک نگه‌داشتن ابعاد آن‌ها، سبب یکنواختی ساختار خواهد شد که در بهبود خواص مکانیکی از جمله افزایش استحکام خمشی بسیار مؤثر می‌باشد.

## ۳-۳- مدول الاستیسیته

مدول یانگ کاربیدبور در محدوده ۳۶۰ تا ۴۶۰GPa گزارش شده است [۲۴]. این مقدار در میان سرامیک‌ها مقدار بسیار بالایی است. مدول یانگ، با افزایش دما (۲۰۰°C) و افزایش تخلخل، کاهش خواهد یافت [۲۵].

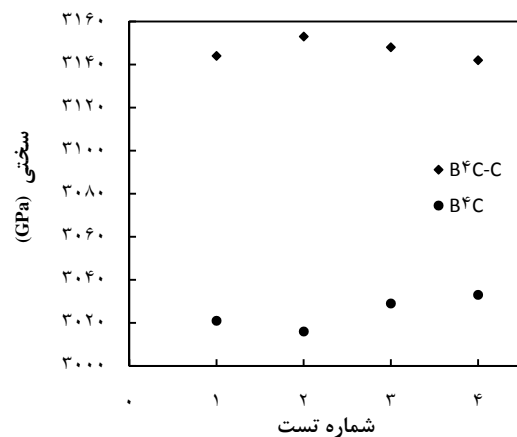
میانگین سرعت صوت (v) عبوری از نمونه‌های حاوی ۵ درصد رزین فنولیک بین ۱۳۳۰۰ تا ۱۳۷۶۰ m/s به دست آمد و مدول یانگ نمونه‌ها برای پنج نمونه مطابق شکل ۵ به دست آمد. چنانچه از شکل بر می‌آید، مدول یانگ نمونه‌های حاوی ۵ درصد رزین فنولیک حدود ۶ درصد نسبت به نمونه‌های فاقد افزودنی افزایش یافته است.



شکل ۵ مدول یانگ نمونه‌های زینترشده

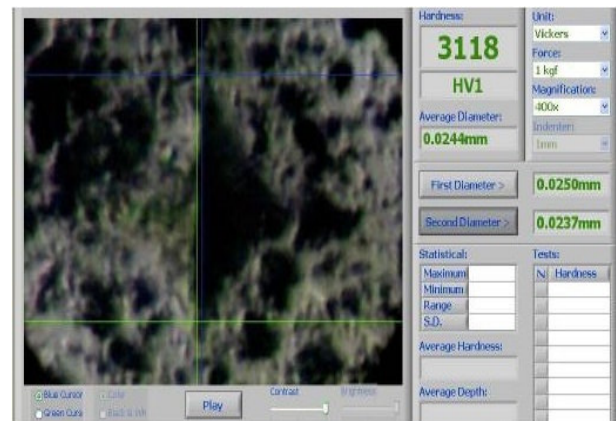
## ۳-۴- سختی

شکل ۶ نتایج اثر ویکرز با نیرویی معادل ۱ کیلوگرم بر تعدادی از نمونه‌ها جهت سختی‌سنجی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل بر می‌آید، با افزایش رزین فنولیک، به سختی بیشتری (در حدود ۴ درصد) دست پیدا می‌شود. افزایش مقدار سختی با افزودن کمک زینتر را می‌توان به افزایش دانسیته نسبت داد. افزایش دانسیته نسبی همراه کاهش مقدار تخلخل باز می‌باشد که مجموع این دو عامل یعنی کاهش تخلخل و افزایش دانسیته باعث افزایش مقدار ریزسختی می‌شود.



شکل ۶ سختی نمونه‌های زینترشده

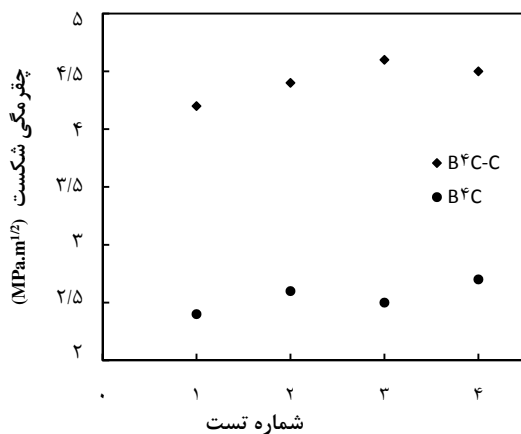
در شکل ۷ تصویر نرم‌افزار اندازه‌گیری سختی ویکرز مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۷ تصویر ریزساختار اثر ویکرز بر نمونه B<sub>4</sub>C حاوی ۵ درصد رزین فنولیک و نرم‌افزار اندازه‌گیری اثر سختی

## ۳-۵- چقرمگی شکست

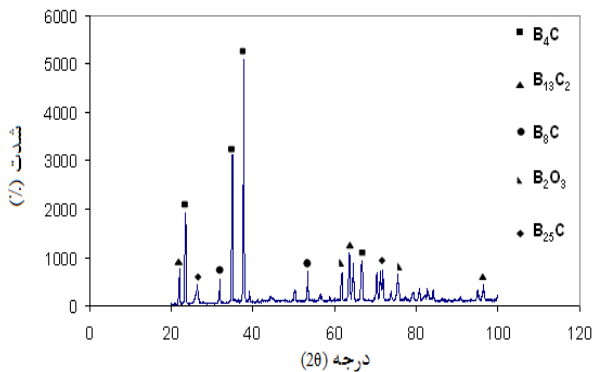
مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های آزمایش‌شده در شکل ۸ نشان داده شده است. چقرمگی شکست کاربیدبور در محدوده ۲/۹ تا ۳/۶ MPa.m<sup>1/2</sup> گزارش شده است [۵]. همچنین، با استفاده از رابطه گریفیث برای پودر کاربیدبور متراکم، مقدار چقرمگی شکست حدود ۱/۳ ± ۰/۳ MPa.m<sup>1/2</sup> محاسبه شده است [۲۶]. بایستی توجه کرد که شکست در کاربیدبور در تمام دماها از نوع بین‌دانه‌ای است و حضور کربن آزاد باعث کاهش چقرمگی می‌شود [۵، ۲۶]. محاسبه چقرمگی شکست این نمونه‌ها نشان‌دهنده آن است که افزودن کمک زینتر بر چقرمگی شکست تاثیر بسیار مفیدی داشته و مقدار آن را تا حدود ۵۰ درصد نسبت به نمونه‌های فاقد افزودنی افزایش داده است. وجود تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی اجزای سازنده باعث ایجاد یک میدان تنشی در اطراف ذرات فاز ثانویه و ایجاد ریزترک‌ها در قطعه می‌شود. مجموعه برهم‌کنش عوامل موثر بر چقرمگی مانند افزایش دانسیته، کاهش تخلخل به عنوان مراکز تمرکز تنش و ایجاد ترک، افزایش درصد فاز چقرمه‌تر و ایجاد شبکه ریزترک‌های ناشی از اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی باعث تغییرات مقدار چقرمگی شکست می‌شوند.



شکل ۸ چقرمگی شکست نمونه‌های زینترشده

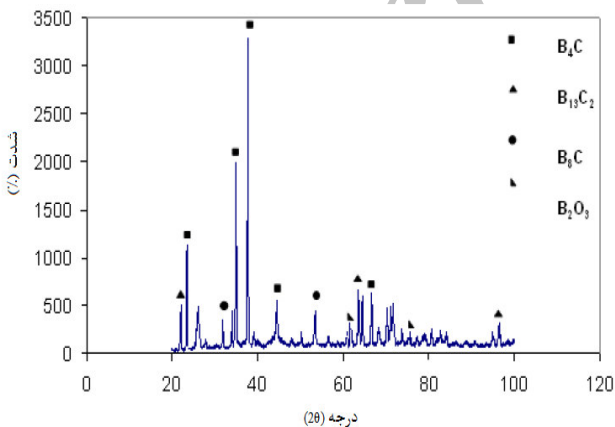
در تست چقرمگی شکست نمونه‌های مورد آزمایش به ابعاد ۳۰×۳۰×۶۰ mm<sup>3</sup> در آمد و سطح نمونه‌ها با دستگاه پولیش تا ۱ میکرون آماده‌سازی و صیقلی شد و با اعمال بار عمودی ۱۵۰ نیوتونی به مدت ۱۵ ثانیه به وسیله دستگاه سختی‌سنجی اثر

در شکل ۱۰ نمودار الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه خالص  $B_4C$  در دمای  $2200^\circ C$  می‌باشد. پیک  $B_2O_3$  بیانگر وجود لایه اکسید سطحی روی ذرات کاربیدبور یا ذرات  $B_2O_3$  همراه کاربیدبور باقی‌مانده از فرایند سنتز کاربیدبور می‌باشد.



شکل ۱۰ نمودار الگوی پراش اشعه ایکس نمونه  $B_4C$  خالص

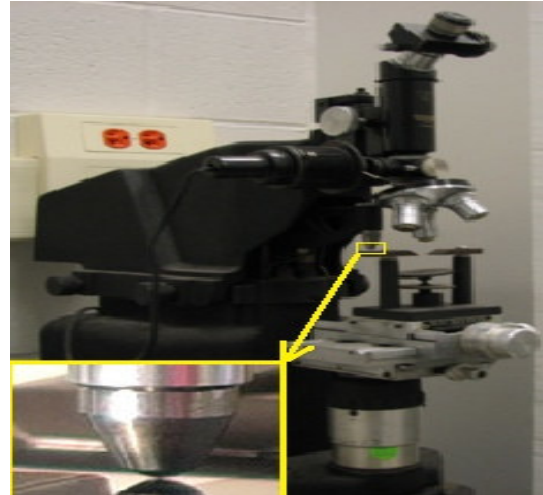
شکل ۱۱ نمودار الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه حاوی ۵ درصد وزنی از رزین فنولیک بعد از زینترینگ در دمای  $2200^\circ C$  را نمایش داده است. در این شکل معادل ۳ درصد کربن مشاهده شده و با مقایسه شکل ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌گردد که اگر چه شدت پیک مربوط به  $B_2O_3$  تغییر پیدا کرده است، ولی همچنان مقداری از  $B_2O_3$  باقی مانده است.



شکل ۱۱ نمودار الگوی پراش اشعه ایکس نمونه حاوی ۵ درصد وزنی رزین فنولیک

در شکل ۱۲ تصویر ریزساختار نمونه  $B_4C$  خالص که در دمای  $2200^\circ C$  زینتر شده نمایش داده شده است. مشاهده

ویکرز بر هر نمونه مشاهده شد. شکل ۹ نشان‌دهنده دستگاه تست ویکرز می‌باشد.

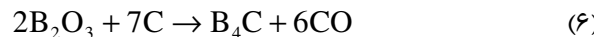
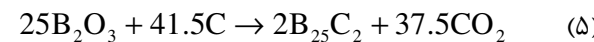
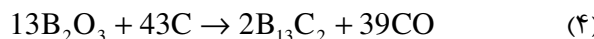
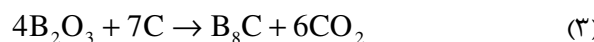


شکل ۹ دستگاه تست ویکرز

### ۳-۶- بررسی ریزساختار

از جمله مواد همراه کاربیدبور، که از اکسیداسیون کاربیدبور حاصل می‌شود،  $B_2O_3$  می‌باشد. وجود اکسید بور، که معمولاً به صورت فیلم بر سطح ذرات کاربید بور وجود دارد، یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش قابلیت زینترینگ کاربیدبور می‌باشد. کربن حاصل از رزین فنولیک می‌تواند این اکسید سطحی را احیاء نموده و به کاربیدبور تبدیل نماید.

واکنش‌های احتمالی کربن با  $B_4C$  می‌تواند به صورت زیر باشد:



انجام این واکنش‌ها می‌تواند باعث بهبود فرایند انتقال جرم و در نتیجه منجر به بهبود فرایند زینترپذیری و افزایش دانسیته گردد.

به علت وجود تخلخل در نمونه  $B_4C$  و همچنین نقاط تماس گسترش‌یافته بین ذره‌های پودر به هنگام متراکم کردن، در طی حرارت‌دادن قطعه خام تا رسیدن به درجه حرارت زینتر، نیروهای ناشی از کشش سطحی سطوح آزاد و کشش بین سطحی سطوح بین‌دانه‌ای فعال گردیده و به عبارتی قطعه خام شروع به ازدست دادن انرژی سطحی درون خود می‌کند.

نمونه‌های فاقد افزودنی این مقدار حدود ۸۲ درصد دانسیته تئوری به دست آمد.

- افزایش دانسیته در  $B_4C-C$  موجب افزایش ۲۰ درصدی میزان استحکام خمشی شده است.

- مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی رزین فنولیک حدود ۶ درصد و سختی آن‌ها ۴ درصد بیشتر از نمونه‌های خالص است.

- با افزودن ۵ درصد رزین فنولیک به کاربیدبور، چقرمگی شکست آن بیش از ۵۰ درصد بهبود یافت.

- انجام واکنش‌های  $B_2O_3$  موجود در کاربیدبور با کربن موجود در رزین فنولیک موجب بهبود فرایند زینترپذیری می‌شود.

- افزایش رزین فنولیک باعث کاهش قابل توجه مقدار تخلخل در ریزساختار کاربیدبور می‌شود.

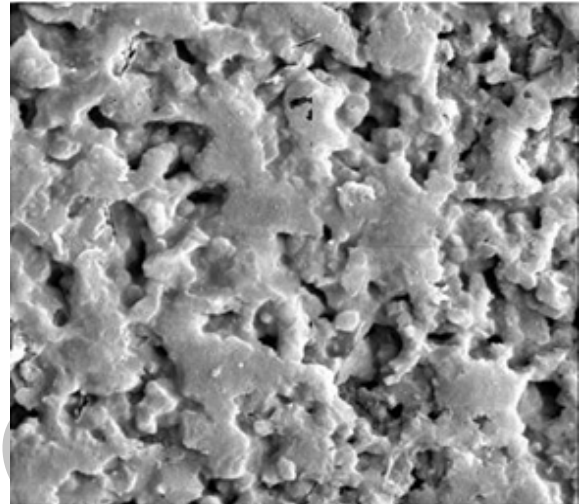
#### ۵- تقدیر و تشکر

بدین وسیله از مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، به خاطر تقبل هزینه‌های ناشی از انجام این پژوهش و همچنین گروه تخصصی شهید رجایی و جناب آقای مهندس حسین مهرداد به خاطر انجام همکاری‌های لازم، کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

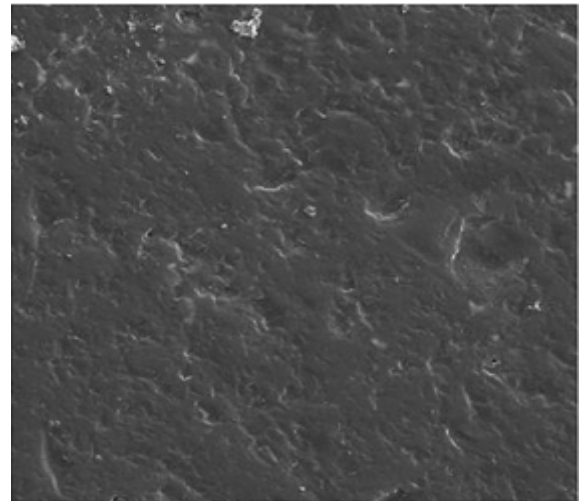
#### ۶- مراجع

- [1] Chantikul P., Anstis G., Lawn B., Marshall D., "A Critical Evaluation on Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: II, Strength Method", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 64, 1981, pp. 539-543.
- [2] Bart R. K., Lindberg J. C., "Ceramic Bodyguards", *Journal of Advance Material and Production*, Vol. 132, No. 3, 1987, pp. 69-72.
- [3] Medvedovski E., "Alumina Ceramics for Ballistic Protection, part 1", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 81, No. 3, 2002, pp. 27-32.
- [4] Medvedovski E., "Alumina Ceramics for Ballistic Protection, part 2", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 81, No. 4, 2002, pp. 45-50.
- [5] Richerson D. W., *Modern Ceramic Engineering*, 2nd Ed., Marcel Dekker Tnc., NewYork, Basel, 1992. pp. 356-362.
- [6] متیام ورودی، مواد مهندسی دمایی بالا، ترجمه ناصریان رنانی مجتبی، حائریان اردکانی علی، مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، چاپ اول، ۱۳۸۵.
- [7] Harper A. C., *Handbook of Materials for Product Materials for Product Design*, 3rd Ed., McGraw Hill, 2001.

می‌گردد که نمونه حاوی مقادیر زیادی از تخلخل‌های ریز و درشت بوده و لذا بایستی از دانسیته پایینی برخوردار باشد. در شکل ۱۳ تاثیر افزایش ۵ درصد کمک زینتر رزین فنولیک بر ریزساختار  $B_4C$  در دمای  $2200^\circ C$  نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار تخلخل در قیاس با نمونه فاقد افزودنی رزین فنولیک کاهش یافته است.



شکل ۱۲ تصویر SEM نمونه  $B_4C$  خالص



شکل ۱۳ تصویر SEM نمونه  $B_4C$  حاوی ۵ درصد وزنی رزین فنولیک

#### ۴- نتیجه‌گیری

- افزودن رزین فنولیک به کاربیدبور باعث افزایش دانسیته تا حدود ۹۵ درصد دانسیته تئوری می‌شود. در حالی که در



- [۱۸] مرادخانی علیرضا، بهاروندی حمیدرضا، تاجداری مهدی، وفایی‌صفت عباس، "تحلیل و بررسی چقرمگی شکست با استفاده از فرورونده ویکرز در سرامیک‌های نانوکامپوزیت  $Al_2O_3-SiC$ "، مجله مهندسی مکانیک مجلسی، سال چهارم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۰، صص ۱-۱۱.
- [19] ASTM B311, "Test Method for Density Determination for Powder Metallurgy (P/M) Materials Containing Less Than Two Percent Porosity", *Developed by Subcommittee: B09.11, Book of Standards*, Vol. 2, No. 5, 2002.
- [20] ASTM C769, "Standard Test Method for Sonic Velocity in Refractory Materials at Room Temperature and Its Use in Obtaining an Approximate Young's Modulus", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 15, No. 1, 2005.
- [21] ASTM C1161, "Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature", *Developed by Subcommittee: C28.01, Book of Standards*, Vol. 15, No. 1, 2008.
- [22] ASTM C1327, "Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics", *Developed by Subcommittee: C28.01, Book of Standards*, Vol. 15, No. 1, 2008.
- [23] Anatis G. R., Chantikul P., Lawn B. R., Marshall D. B., "A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I, Direct Crack Measurements", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 64, No. 9, 1981, pp. 532-538.
- [24] Warren R. R., *Ceramic Fabrication Technology*, CRC Press Publishing, New York, 2002.
- [25] Heuer A., Hobbs L. W., "Advances in Ceramics, Science and Technology Zirconia", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 21, 1981, pp. 9-40.
- [26] Rahaman M. N., *Ceramic processing*, CRC Press Publishing, Boca Raton, 2006.
- [8] Welham N. J., Setoudeh N., "Formation of an Alumina-Silicon Carbide Nanocomposite", *Journal of the Materials Science*, Vol. 40, 2005, pp. 3271- 3273.
- [9] Gadalla A., Elmasry M., Kongkachuichay P., "High Temperature Reactions within  $Al_2O_3-SiC$  Composites" *Journal of materials research*, Vol. 7, No. 9, 1992, pp. 2585-2592.
- [10] Wang H. Z., Gao L., Guo J. K., "The Effect of Nanoscale SiC Particles on the Microstructure of  $Al_2O_3$  Ceramics", *Ceramics International*, Vol. 26, 2000, pp. 391-396.
- [۱۱] مغربی مرتضی، شاهوردی محمودرضا، سمت و سوی تحقیقات در نانوفناوری، گروه کاری بین سازمانی علوم، مهندسی و فناوری نانو (IWGN)، تهران، انتشارات آتنا، ۱۳۸۳.
- [12] Yang P., *The Chemistry of Nanostructured Materials*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Hackensack, 2003.
- [13] Nalwa H. S., *Nano Structured Materials and Nanotechnology*, Academic press, San Diego, California, 2002.
- [۱۴] ریچرسون دیوید، مهندسی سرامیک‌های مدرن، جلد دوم: فرآیند ساخت و طراحی، ترجمه ابراهیمی محمد ابراهیم، عسگری عباسی سالومه، سلام تبریزی سیمین، نشر دانش پژوهان، چاپ اول، تهران، ۱۳۸۴.
- [۱۵] بنگسیو مورات، سرامیک‌های مهندسی، ترجمه ابراهیمی محمد ابراهیم، نشر کاوشگران، چاپ اول، تهران، ۱۳۸۳.
- [16] Viechnicki D. J., Slavin M. J. and Kliman M. I., "Development and Current Status of Armor Ceramics", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 70, No. 6, 1991, pp. 1035-1039.
- [17] Bagley R. D., Johnson D. L., "Effect of Magnesia on Grain Growth in Alumina", *Journal of Advance Ceramic*, Vol. 10, 1984, pp. 666-678.