

مروری بر تاثیر افزودنی‌های مختلف بر سینتر فاز مایع کامپوزیت‌های کاربید بور

مینا سعیدی حیدری، حمیدرضا بهاروندی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

minasaeeedi85@gmail.com

چکیده: کاربید بور (B_4C) به دلیل خواصی مانند سختی بالا، مدول یانگ بالا و وزن مخصوص پائین بسیار مورد توجه است، با این حال کاربرد آن به علت مشکل در سینتر پذیری و چقرمگی شکست پائین نسبتاً محدود شده است. به دست آوردن کاربید بور با دانسیته بالا به وسیله روش‌های سینتر رایج بسیار مشکل و پرهزینه است. استفاده از افزودنی‌هایی که منجر به تولید فاز مایع در سیستم می‌شوند، سینتر پذیری و تراکم کاربید بور را افزایش خواهد داد. رفتار تراکم و رشد دانه در طول سینتر فاز مایع از طریق پارامترهای ساخت قابل کنترل است. در این مقاله اثر افزودنی‌های مختلف که منجر به سینتر فاز مایع در سیستم کاربید بور می‌شوند، بررسی شده است. افزودن برخی از این مواد علاوه بر افزایش خواص مکانیکی محصول نهایی منجر به افزایش دانسیته کاربید بور تا ۹۸ درصد شده است.

کلمات کلیدی: کاربید بور (B_4C)، سینتر فاز مایع، دانسیته، خواص مکانیکی.

۱- مقدمه

کاربید بور به علت خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی یکی از مهمترین سرامیک‌های مهندسی در صنعت می‌باشد. این ماده پس از الماس و نیتريد بور با ساختار مکعبی، به عنوان سخت‌ترین ماده شناخته شده است و به علت دانسیته پایین، سطح مقطع بالا برای جذب نوترون، پایداری شیمیایی و ... به عنوان ماده‌ای استراتژیک مطرح است [۱-۴]. کاربید بور به علت نقطه ذوب بالا و پایداری حرارتی کاربرد بسیاری به عنوان ماده دیرگداز دارد، همچنین به علت دانسیته کم و سختی بالا، کاربرد بالستیکی داشته و به عنوان جاذب اشعه نوترون در کاربردهای هسته‌ای نیز به کار می‌رود [۵]. چسبندگی خوب و مقاومت به دمای بالای کاربید بور منجر به کاربرد آن به عنوان پوشش برای گلوله‌های گرافیتی نازل موشک شده است [۶]. در جدول ۱، خواص کاربید بور با کاربید سیلیسیم و کاربید تیتانیم مقایسه شده است [۷].

جدول ۱- خواص کاربید بور در مقایسه با سایر مواد [۷].

	B_4C	SiC	TiC
دانسیته	۲/۵۲	۳/۲۱	۴/۹۱
نقطه ذوب ($^{\circ}C$)	۲۴۰۰	۲۵۴۵	۳۰۶۷
سختی (GPa)	۲۷/۴-۳۴/۳	۲۴/۵-۲۸/۲	۲۸-۳۵
استحکام خمشی (MPa)	۳۲۳-۴۳۰	۶۸۰-۸۸۰	۲۴۰-۳۹۰
چقرمگی شکست ($MPa m^{1/2}$)	۱/۲-۳/۶	۳/۵-۸	۳/۵-۴/۶

ساخت سرامیک‌های کاربید بور با دانسیته بالا و به وسیله سینتر حالت جامد به علت پیوندهای کوالانسی قوی، نفوذ در خود پایین، مقاومت بالا در برابر لغزش مرز دانه و انرژی سطحی پایین کاربید بور خالص بسیار مشکل است. کاربید بور خالص بدون کاربرد فشار و دماهای بالا، به سختی به دانسیته تئوری بالاتر از ۸۰ درصد خواهد رسید [۸ و ۹]. علاوه بر این، حضور B_2O_3 که بر سطح ذرات کاربید بور می‌نشیند (طبق رابطه ۱)،

سینتر پذیری را خراب می‌کند [۱۰ و ۱۱]. علاوه بر سینتر پذیری ضعیف، به علت چقرمگی شکست پائین نیز کاربرد کاربرد بور محدود شده است [۱۲].



روش‌های عمده سینتر کاربرد بور؛ پرس گرم، روش سینتر فاز مایع و سینتر بدون فشار است. معمولاً بیشتر قطعات سرامیکی کاربرد بور تجاری به وسیله پرس ایزواستاتیک یا پرس تک محوره گرم در اتمسفر خنثی یا خلا، در دماهای ۲۲۰۰-۲۱۰۰ درجه سانتی گراد و فشار ۳۰-۴۰ MPa و در زمان نگهداری ۴۵-۱۵ دقیقه تولید می‌شوند. با این حال، پرس گرم معایبی نظیر عدم امکان ساخت قطعات سه بعدی و پیچیده و لزوم کاربرد قالب در کنار مواد سینتر شده را دارد که ممکن است مواد قالب به داخل قطعه نفوذ کنند. به علاوه در این روش، سرعت تولید کم‌تر است و هزینه‌های تولید بیشتر از فرایند سینتر بدون فشار می‌باشد [۱۳]. برای تولید قطعات مقاوم در برابر خوردگی که به میزان وسیع مورد نیاز است، بیشتر روش سینتر فاز مایع و سینتر بدون فشار به کار می‌رود. اگرچه که فرایند سینتر بدون فشار نسبتاً ساده و کم هزینه است ولی به علت دماهای بالای سینتر کاربرد بور، نیاز به تجهیزات دما بالا افزایش می‌یابد. علاوه بر این خواص مکانیکی مواد حاصل از سینتر بدون فشار خوب نیست [۱۴].

به همین علت مواد افزودنی بسیاری به عنوان کمک سینتر به کاربرد بور افزوده شده‌اند که سبب تقویت سینتر فاز مایع شده و با افزایش نفوذ حجمی و نفوذ مرز دانه ای، تخلخل‌ها کاهش و دانسیته افزایش یافته است. فاز مایع از طریق دو مکانیزم افزایش دانسیته به وسیله لغزش فعال شده و مکانیزم محلول-رسوب مجدد، به سینتر کمک می‌کند [۱۵]. سینتر فاز مایع کاربرد بور از طریق واکنش هم زمان کاربرد بور به همراه ماده‌ای با نقطه ذوب پایین یا به وسیله تشکیل ماده‌ای با نقطه ذوب پایین صورت می‌گیرد. واکنش لوله‌های موئین، انحلال و رسوب مجدد پارامترهای مهمی هستند که بر سینتر پذیری و خواص مکانیکی محصول نهایی اثر گذار می‌باشند [۱۶]. در این مقاله سعی شده است که تاثیر افزودنی‌های مختلف بر سینتر فاز مایع کاربرد بور بررسی شود.

۲- تاثیر افزودنی‌های مختلف بر سینتر کاربرد بور

تاکنون اثر افزودنی‌های بسیاری بر سینتر پذیری و خواص مکانیکی کاربرد بور بررسی شده است. در این بخش اثر این افزودنی‌ها بر حسب مواد اکسیدی و غیر اکسیدی گزارش شده است.

۲-۱- تاثیر مواد اکسیدی

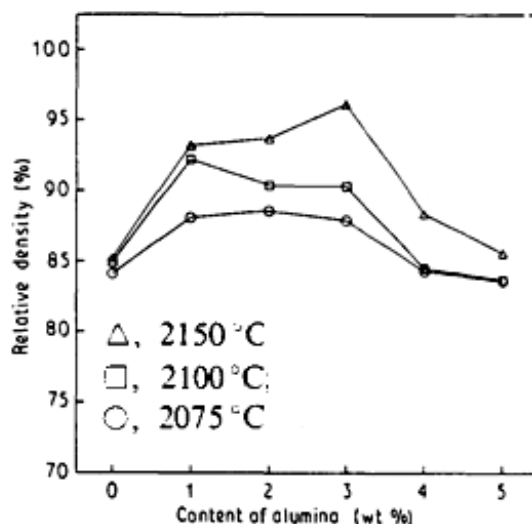
افزودنی‌های اکسیدی بسیاری مانند Al_2O_3 ، ZrO_2 ، SiO_2 ، TiO_2 ، Y_2O_3 ، CeO_2 ، $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ و ... برای بهبود سینتر پذیری و افزایش دانسیته کاربرد بور آزمایش شده‌اند [۲۰-۱۷]. با این حال مواد اکسیدی به علت ناپایداری شیمیایی کاربرد بور در مواجهه با آن‌ها کمتر به عنوان کمک سینتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. به بیان دیگر، کاربرد بور با برخی از اکسیدها در طول سینتر واکنش کرده و تشکیل ترکیبی جدید را می‌دهد که ممکن است منجر به کاهش خواص کاربرد بور شود [۲۱]. به علاوه تنها برخی از این مواد با کاربرد بور تشکیل فاز مایع می‌دهند که در ادامه تاثیر هر یک روی سینتر کاربرد بور بررسی شده است.

۲-۱-۱- آلومینا

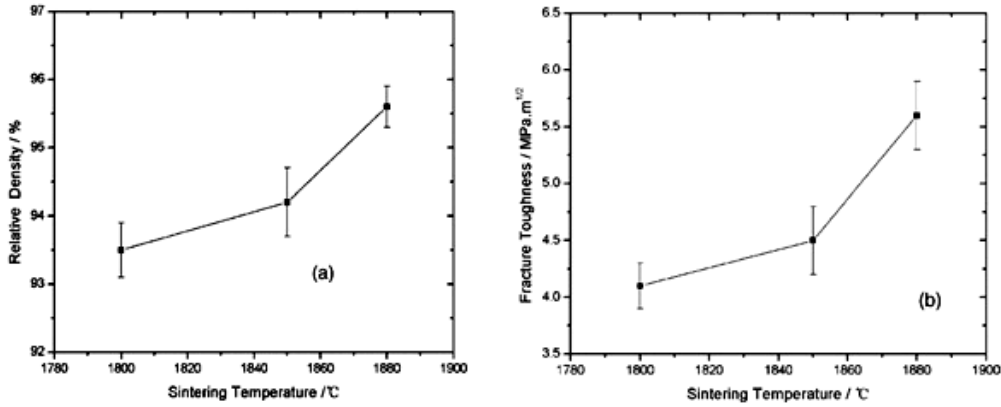
تاکنون کامپوزیت‌های کاربرد بور- آلومینا به روش‌های سینتر بدون فشار و پرس گرم ساخته شده‌اند. با افزودن آلومینا می‌توان به قطعاتی با دانسیته بالا رسید. واسیلوس^۱ و همکارش [۲۲] گزارش کرده‌اند که

¹ Vasilos

افزودن Al_2O_3 به کاربید بور و استفاده از روش سینتر بدون فشار، سرعت سینتر کاربید بور را افزایش می‌دهد که به علت تشکیل فاز مایع در دماهای بالاتر از $1950^\circ C$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. لی^۱ و همکارش [۲۳] نیز رفتار سینتر و واکنش‌های بین کاربید بور و آلومینا را به روش سینتر بدون فشار بررسی کرده‌اند. افزودن آلومینا، تراکم کاربید بور را با تشکیل فاز مایع $AlB_{12}C_2$ به وسیله واکنش بین کاربید بور و آلومینا بهبود می‌بخشد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، بیشترین میزان دانسیته تئوری با افزودن ۳ درصد وزنی آلومینا و در $2150^\circ C$ درجه سانتی‌گراد، به میزان ۹۶ درصد بوده است.



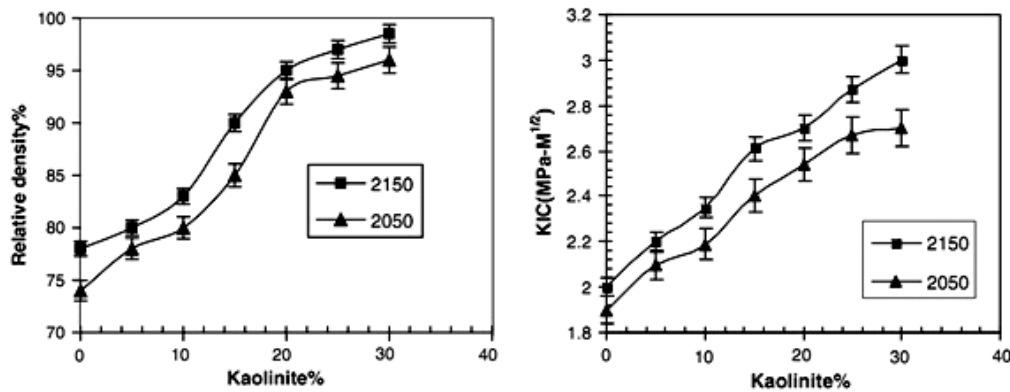
شکل ۱- تغییرات دانسیته نمونه‌های سینتر شده در دماهای سینتر $2075^\circ C$ ، $2100^\circ C$ و $2150^\circ C$ درجه سانتی‌گراد [۲۳].
با این حال، هنگامی که میزان آلومینا به ۴ درصد وزنی افزایش یافته، دانسیته نهایی کاهش یافته است. این امر به علت رشد بیش از حد دانه در طول سینتر بوده است. همچنین در واکنش بین کاربید بور و آلومینا، ترشوندگی خوب فاز مایع روی دانه‌های کاربید بور مشاهده شده است [۲۳].
یوها^۲ و همکارانش [۷]، سینتر فاز مایع را با افزودنی‌های اکسیدی نظیر Al_2O_3 و Y_2O_3 و به منظور کاهش دمای سینتر کاربید بور بررسی کرده‌اند. دیاگرام فاز دو تایی Al_2O_3 و Y_2O_3 دارای سه ترکیب یوتکتیک YAG ($Y_3Al_5O_{13}$)، نقطه ذوب $1760^\circ C$ درجه سانتی‌گراد، YAP ($YAlO_3$)، نقطه ذوب $1850^\circ C$ درجه سانتی‌گراد و YAM ($Y_4Al_2O_9$)، نقطه ذوب $1940^\circ C$ درجه سانتی‌گراد است. معمولاً، YAG بهترین انتخاب برای کاهش دمای سینتر است. در بررسی‌های که گوکسین^۳ و همکارانش [۲۴] انجام داده‌اند، به این نتیجه رسیده‌اند که سینتر فاز مایع در این سیستم در دماهای بالاتر از $1600^\circ C$ درجه سانتی‌گراد و تحت فشار بالا صورت می‌گیرد. به علاوه نقطه ذوب YAG نیز به علت فشار بالا و ناخالصی‌های موجود در پودر اولیه کمی متفاوت است. بنابراین YAG در دمایی کمتر از $1760^\circ C$ درجه سانتی‌گراد ذوب شده و فاز مایع منجر به توزیع مجدد ذرات و پر شدن فضاهای بین ذرات می‌شود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی Al_2O_3 و Y_2O_3 ، ۱۰ درصد وزنی SiC و TiC و ۲۰ درصد وزنی $\alpha-Si_3N_4$ که در دمای $1880^\circ C$ درجه سانتی‌گراد و به روش پرس گرم در خلا سینتر شده است، دارای $95/6$ درصد دانسیته نسبی، 540 MPa استحکام خمشی و $5/6$ MPa.m^{1/2} چقرمگی شکست می‌باشد. ترکیب این مواد منجر به ایجاد فازهای جدیدی مانند SiC، TiB₂ و BN و در نتیجه بهبود خواص شده است [۷].



شکل ۲- (a) دانسیته نسبی و (b) چقرمگی شکست نمونه‌های حاوی ۶۰ درصد وزنی کاربید [۷].

۲-۱-۲- کائولینیت

بهاروندی و همکارش [۲۵] تاثیر افزودن کائولینیت $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$ را بر رفتار تراکم کاربید بور به روش سینتر بدون فشار بررسی کرده‌اند. در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، کائولینیت به مولایت $(3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2)$ و SiO_2 تجزیه شده و در دماهای زیر ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مایع تبدیل می‌شود. این فازهای مایع در دمای سینتر با کاربید بور جهت تشکیل ترکیبات کاربید سیلیکون و آلومینا واکنش می‌دهند. بنابراین می‌توان گفت که در این سیستم سینتر فاز مایع ناپایدار رخ می‌دهد و همین امر شرایط را برای ایجاد دانسیته بالا بدون اعمال فشار و بهبود خواص نمونه‌ها فراهم آورده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، افزودن ۳۰ درصد وزنی کائولینیت در دمای ۲۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در اتمسفر آرگون منجر به افزایش دانسیته تا حدود ۹۸/۵ درصد شده است و این امر به علت افزایش انتقال جرم در داخل فازها و یا محصولات واکنشی کاربید سیلیکون و آلومینا در مرزهای دانه می‌باشد.



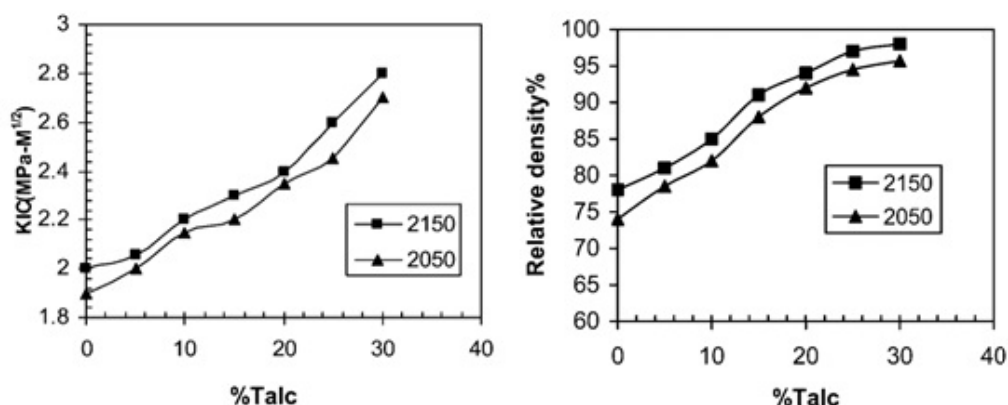
شکل ۳- تاثیر افزایش میزان کائولینیت بر دانسیته و چقرمگی کامپوزیت‌های کاربید بور- کائولینیت در دماهای ۲۰۵۰ و ۲۱۵۰ درجه سانتی‌گراد [۲۵].

۲-۱-۳- تالک

بهاروندی و همکارانش [۲۶]، تاثیر افزودن پودر تالک آلومینا بالا ($26.62\% Al_2O_3$; $47.7\% SiO_2$; $25.6\% MgO$) را به کاربید بور بررسی کرده‌اند. نمونه‌های سینتر شده در ۲۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت یک ساعت در اتمسفر آرگون، منجر به تشکیل فازهای Al_2O_3 ، SiC ، MgB_2 و Al_2O_3 شده است. مکانیزم سینتر، تشکیل فاز مایع انستاتیت^۱ در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، واکنش با کاربید بور و تشکیل MgB_2 ، SiC و Al_2O_3 است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، دانسیته (۹۸/۵-۷۸ درصد) و چقرمگی شکست

¹ Enstatite

نمونه‌ها با افزایش میزان تالک به بیش از ۳۰ درصد، افزایش یافته است.



شکل ۴- تاثیر افزودن تالک بر دانسیته و چقرمگی شکست نمونه‌های سینتر شده در دماهای ۲۰۵۰ و ۲۱۵۰ درجه سانتی‌گراد [۲۶].

افزایش قابل ملاحظه دانسیته نسبی به علت بالا رفتن انتقال جرم در داخل این فازها و یا محصولات واکنشی MgB_2 , SiC , Al_2O_3 در مرزهای دانه می‌باشد. بهبود چقرمگی نیز می‌تواند به علت کاهش تخلخل باشد که منبع اصلی آغاز ترک است [۲۶].

۲-۲- تاثیر مواد غیر اکسیدی

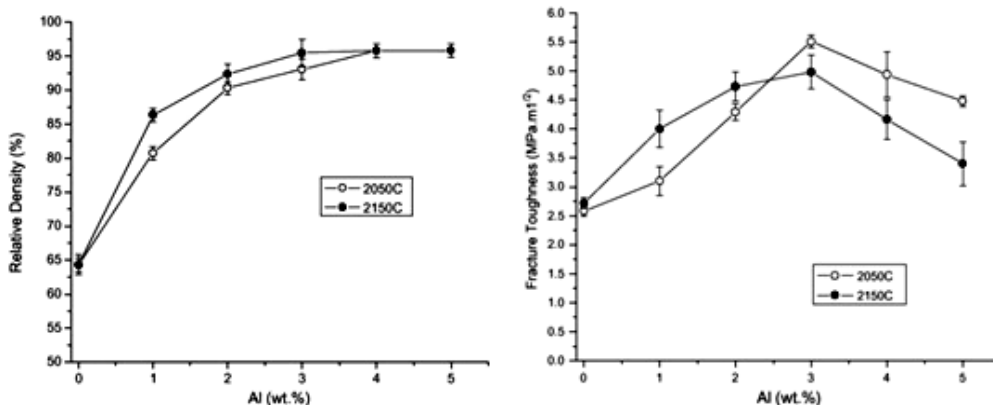
افزودن مواد غیر اکسیدی بسیاری به روش‌های سینتر بدون فشار، پرس گرم، نفوذدهی و جرقه پلازما به منظور بهبود خواص مکانیکی و رفتار سینتر کاربرد بور مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این بین روش سینتر بدون فشار نسبت به روش‌های دیگر نسبتاً ساده و اقتصادی‌تر است. سرامیک‌های کاربرد بور می‌توانند به وسیله این روش و همراه با افزودنی‌هایی به عنوان کمک سینتر مانند TiN , TiC , TiB_2 ، کربن و سیلیکون در دماهایی کمتر از ۲۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به دانسیته مطلوب برسند [۲۷-۳۱].

در صورتیکه در سینتر بدون فشار کاربرد بور از افزودنی‌هایی که تشکیل فاز مایع می‌دهند استفاده شود، به علت افزایش نفوذ حجمی و نفوذ مرز دانه‌ای، تخلخل‌ها کاهش یافته و علاوه بر افزایش دانسیته، خواص مکانیکی بهبود خواهد یافت. به همین علت در این بخش تاثیر افزودنی‌های غیر اکسیدی مختلف که منجر به سینتر فاز مایع کاربرد بور شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲-۱- آلومینیوم

آلومینیوم به علت اینکه یک فاز فلزی پایدار با وزن مخصوص کم است برای ساخت کامپوزیت‌های کاربرد بور انتخاب شده است. به علاوه این فلز نرم، غیر سمی، نسبتاً ارزان و مقاومت به خوردگی بالایی دارد. سرامت کاربرد بور- آلومینیوم پتانسیل کاربرد در ساختارهای سبک با چقرمگی و سختی بالا را دارد [۳۲]. مشهودی و همکارانش [۳۳]، اثر افزودن آلومینیوم را بر سینتر کاربرد بور به روش سینتر بدون فشار بررسی کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که مکانیزم سینتر در سیستم کاربرد بور- آلومینیوم، سینتر فاز مایع است. در شکل ۵، نمودارهای تغییرات دانسیته و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های کاربرد بور- آلومینیوم بر حسب افزایش میزان آلومینیوم پس از سینتر در دماهای ۲۰۵۰ و ۲۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در اتمسفر آرگون آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزودن ۴ درصد وزنی آلومینیوم، دانسیته به ۹۵ درصد افزایش یافته است. آلومینیوم مذاب با کاربرد بور واکنش داده و تشکیل فازهای سرامیکی جامد مثل Al_3BC و AlB_2 را می‌دهد که منجر به کاهش تخلخل و انقباض شده و با مکانیزم سینتر فاز مایع مرتبط است. آلومینیوم باقیمانده به وسیله دو مکانیزم پل زدن ترک و تغییر فرم پلاستیک ذرات آلومینیوم و تنش حرارتی باقیمانده، می‌تواند منجر به افزایش چقرمگی شکست گردد. همچنین به نظر می‌رسد که واکنش بین ترک‌ها

و فاز آلومینیوم نرم تر یا انحراف ترک به وسیله ریز ترک‌ها در اطراف ترکیب‌های فازی آلومینیوم، منجر به افزایش چقرمگی شکست شده است. همچنین ممکن است ترک‌های ریزی در اطراف ذرات آلومینیوم ایجاد شود که به علت عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی آلومینیوم و کاربید بور است. چقرمگی شکست با افزودن بیش از ۳ درصد وزنی آلومینیوم و در دماهای بالاتر سینتر، کاهش یافته است. علت این امر افزایش اندازه دانه بوده که منجر به کاهش طول پل زدن و در نتیجه کاهش چقرمگی شکست شده است [۳۳].



شکل ۵- تاثیر افزودن آلومینیوم بر دانسیته نسبی و چقرمگی شکست کامپوزیت کاربید بور- آلومینیوم [۳۳].

ترشوندگی کاربید بور به وسیله آلومینیوم مذاب بین ۹۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به وسیله لین^۱ و همکارانش [۳۴] بررسی شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که ترشوندگی کاربید بور به شدت به دما و تشکیل محصولات واکنشی مختلف مانند $Al_2B_5C_8$ ، Al_3BC ، AIB_2 و $Al_3B_4C_2$ در فصل مشترک مرتبط است. در دماهای نزدیک به نقطه ذوب آلومینیوم (۶۶۰ درجه سانتی‌گراد)، قابلیت ترشوندگی در سیستم کاربید بور- آلومینیوم ضعیف است. آلومینیوم در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع به تر کردن سطح کاربید بور می‌کند و در نتیجه نیروی محرکه واکنش‌های شیمیایی را افزایش می‌دهد [۳۴]. با این حال مذاب آلومینیوم در دماهای سینتر که معمولاً بالای ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است، زاویه تماس کمی با کاربید بور جامد دارد و بین ذرات کاربید بور حرکت می‌کند [۳۳].

دنی^۲ و همکارانش [۳۵] مشکلات ساخت کامپوزیت B_4C-Al را بررسی کرده و شرح داده‌اند که واکنش شیمیایی بین کاربید بور و آلومینیوم بین ۸۰۰ و ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بسیار سریع‌تر از آرایش مجدد مایع رخ می‌دهد که نشان دهنده فرایند تراکم است. به نظر می‌رسد که کاربرد فشار خارجی در طول سینتر منجر به افزایش سرعت تراکم نسبت به سرعت تشکیل فاز می‌شود. تلاش‌هایی که برای ساخت کامپوزیت B_4C-CeB_6/Al به وسیله روش نفوذدهی بدون فشار صورت گرفته، منجر به محصولی با استحکام و چقرمگی بهبود یافته شده است [۱۶].

۲-۲-۲- آهن

به منظور کاهش دمای سینتر و در نتیجه جلوگیری از رشد ذرات و افزایش خواص مکانیکی، افزودنی آهن بررسی شده است. نقش آهن در سینتر پذیری کاربید بور به وسیله اندازه گیری زاویه تماس و آزمایش دیلاتومتری بررسی شده است. ناحیه واکنش شامل مخلوط گرافیت و FeB بوده است. سرعت‌های سینتر تأیید کرده‌اند که سینتر فاز مایع منجر به بهبود انتقال ماده شده است [۳۶]. میز راهی^۳ و همکارانش [۳۷] ابتدا پیش‌شکلی از پودر کاربید بور و آهن ساخته‌اند و سپس سیلیکون مایع را در آن نفوذ دادند. دیاگرام فازی

¹ Lin
² Danny
³ Mizrahi

حاصل نشان دهنده فازهای $B_{12}(C, Si, B)_3$ ، Si ، SiC و $FeSi_2$ است. حضور $FeSi_2$ در این کامپوزیت به علت واکنش بین سیلیکون مایع و FeB است. این واکنش منجر به کاهش مقدار قابل توجهی سیلیکون باقیمانده در ساختار شده و خواصی مانند سختی بهبود یافته است. نویسندگان، افزایش نرخ سینتر را به حضور فاز مایع نسبت داده‌اند که انتقال ماده را افزایش داده و منجر به کاهش انرژی فعالسازی متراکم شدن شده است. فراگ^۱ و همکارانش [۳۸] اثر افزودن آهن به کاربید بور را با استفاده از روش سینتر جرقه پلاسما در اتمسفر خلا و فشار تک محوره ۵۰ کیلو نیوتن بررسی کرده‌اند. تشکیل فاز مایع منجر به افزایش دانسیته قطعه نهایی شده است. آن‌ها با افزودن ۵/۵ درصد وزنی آهن به کاربید بور، بهبود بسیاری را در نتایج مشاهده کرده‌اند. علاوه بر اینکه دمای سینتر به سبب تشکیل فاز مایع به ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است، میزان تخلخل‌های باز در کامپوزیت نهایی به ۷ درصد حجمی کاهش یافته است.

۲-۲-۳- سیلیکون

تاکنون کامپوزیت‌های کاربید بور- سیلیکون به روش‌های سینتر بدون فشار، پرس گرم، جرقه پلاسما و نفوذدهی ساخته شده‌اند. تله^۲ و همکارش با استفاده از روش سینتر بدون فشار کاربید بور، بور آمورف و سیلیکون در ۲۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به دانسیته ۹۸ درصد رسیده‌اند [۳۹].

سیلیکون تمایل بسیاری برای واکنش شیمیایی با کربن و بور داشته و تشکیل فاز پایدار کاربید سیلیکون و بوریدهای SiB_4 و SiB_6 را می‌دهد. در کارهای دیگر سیستم سه تایی بور- سیلیکون- کربن بررسی شده و فاز سه تایی B_6SiC_2 با میکرو سختی بالای ۷۰ GPa گزارش شده است [۱۵ و ۲۱]. سیلیکون با نقطه ذوب ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد، هنگام اضافه شدن به کاربید بور به عنوان کمک سینتر مایع عمل کرده و به علاوه با کربن موجود در کاربید بور واکنش داده و تشکیل سیلیکون کاربید می‌دهد و بنابراین به فرایند سینتر کمک کرده و منجر به افزایش استحکام زمینه خواهد شد. کاربید سیلیکون خواصی نظیر سختی بالا (۲۸ GPa)، وزن مخصوص پایین ($3/1 \text{ g.cm}^{-3}$) و مقاومت پوششی خوب دارد که مشابه کاربید بور است و بنابراین به عنوان کمک سینتر به کاربید بور افزوده می‌شود [۱۶].

پاناسوک^۳ [۲۱] گزارش کرده است که سیلیکون مایع زاویه تر شوندگی کمی با کاربید بور دارد (۲۰ درجه). در نتیجه واکنش بین سیلیکون مایع و کاربید بور منجر به تشکیل β -SiC در ناحیه تماس شده و رشد کریستال‌ها را از طریق کریستالیزاسیون مجدد در فاز مایع به همراه دارد [۲۱]. علاوه بر این گزارش شده است که سیلیکون می‌تواند به جای اتم‌های بور و کربن با بیشترین میزان حلالیت ۲٪ در ردیف اتم‌های بین نشین بنشیند. با این وجود، اگر پودر کاربید بور استفاده شده کربن محلول کمی داشته باشد، هیچ گونه تغییر یا انحلال بور در ردیف اتم‌های بین نشین ممکن نیست. بنابراین نفوذ کربن اضافی می‌تواند درون ماده و در طول سینتر رخ دهد. در نتیجه واکنش با سیلیکون خالص فقط منجر به تشکیل سیلیکون کاربید می‌شود [۱۵].

تیلر^۴ و همکارانش [۴۰]، سیلیکون را در داخل یک بدنه متخلخل کاربید بور نفوذ داده و سپس در دماهای ۱۵۰۰-۲۲۰۰ درجه سانتی‌گراد سینتر کرده‌اند و به بدنه‌ای عاری از تخلخل و با دانسیته $2/57 \text{ g.cm}^{-3}$ دست یافته‌اند که به شدت سخت است (مدول شکست ۲۳۵ MPa و مدول الاستیسیته ۳۵۳ GPa). در نمودار پراش اشعه X حاصل، کاربید بور نرمال، کاربید بور ثانویه دارای شبکه وسیع، کاربیدهای سیلیکون آلفا و بتا و سیلیکون قابل مشاهده است. آنالیز شیمیایی حاصل مقدار ۱۲/۶٪ سیلیکون واکنش نکرده را نشان می‌دهد

¹ Frage

² Telle

³ Panasyuk

⁴ Taylor

که سبب کاهش خواص مکانیکی کاربرد بور شده است. میزان سیلیکون آزاد با افزایش دانسیته خام بدنه متخلخل کاربرد بور اولیه کاهش یافته است. ملیک^۱ و همکارانش [۴۱] نیز امکان ساخت کامپوزیت از طریق نفوذ دهی مذاب سیلیکون به داخل پیش شکل اولیه کاربرد بور و کربن را اثبات کرده‌اند. چن^۲ و همکارانش [۴۲] مکانیزم‌های سینتر و تشکیل کامپوزیت‌های کاربرد بور/ سیلیکون کاربرد را بررسی کرده‌اند. در محصولات سینتر شده در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، یک فاز غیر استوکیومتری $(C, Si, B)_3$ و مقدار کمی فاز غنی از $B_{10}C$ یا $B_{49}C_{1.82}$ مشاهده شده است. همچنین ریزترک‌هایی در دانه‌های کاربرد بور دیده شده است.

۲-۲-۴- هگزا بورید سیلیکون

بوریدهای فلزی به علت خواص دما بالا، سختی بالا و هدایت الکتریکی عالی بسیار مورد توجه می‌باشند. چندین فاز بورید سیلیکون مانند SiB_4 ، SiB_6 ، SiB_{6-x} ، SiB_{6+x} و $Si_{11}B_{31}$ گزارش شده‌اند [۴۳]. هگزا بورید سیلیکون (SiB_6) به علت اینکه از نظر ساختار، خواص فیزیکی و مکانیکی مشابه کاربرد بور است به عنوان ماده افزودنی مورد بررسی قرار گرفته است. این ماده سختی بالا (۲۲۰۰ ویکرز) و دانسیته کمی ($2/18 \text{ g/cm}^3$) دارد و به علت اینکه نقطه ذوب آن کمتر از نقطه ذوب کاربرد بور است (نقطه ذوب بورید سیلیکون : ۱۸۵۰ درجه سانتی‌گراد)، در دمای سینتر تشکیل فاز مایع داده و منجر به بهبود سینتر پذیری کاربرد بور خواهد شد. قدمی و همکارانش [۴۴] اثر هگزا بورید سیلیکون را بر سینتر کاربرد بور به روش سینتر بدون فشار بررسی کرده‌اند. بیشترین دانسیته با افزودن ۵ درصد وزنی هگزا بورید سیلیکون و به میزان ۹۸ درصد گزارش شده است که به علت سینتر فاز مایع و بهبود انتقال جرم صورت گرفته است.

۲-۲-۵- دی‌بورید تیتانیوم

محققان بسیاری تاثیر افزودن دی‌بورید تیتانیوم بر سینتر پذیری و خواص کاربرد بور را بررسی کرده‌اند. کاربرد بور و دی‌بورید تیتانیوم به علت پیوندهای کوالانت نیاز به دماهای سینتر بالاتر از ۲۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به روش سینتر بدون فشار دارند [۴۵]. با این حال افزودن مقادیر کمی آهن به این ترکیب، علاوه بر کاهش دمای سینتر منجر به افزایش دانسیته نهایی نیز شده است.

تاف^۳ و همکارانش [۴۶] با افزودن مقدار کمی آهن (۵/۰ درصد) به کامپوزیت‌های B_4C-TiB_2 بهبود خواص را مشاهده کرده‌اند. همچنین به علت تشکیل فاز مایع غنی از آهن-تیتانیوم، دانسیته نهایی نیز افزایش یافته است. سینتر بدون فشار مخلوط $B_4C - 10\text{wt}\% TiB_2 - 1\text{wt}\% Fe$ در دمای حدود ۲۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در اتمسفر آرگون منجر به دانسیته بالاتر از ۹۷ درصد شده است. تنها حضور یک درصد وزنی آهن منجر به تشکیل فاز مایعی غنی از آهن در بین ذرات سرامیکی شده و دانسیته کامپوزیت B_4C-TiB_2 را افزایش داده است. پس از سینتر، حضور فاز FeB در کنار فازهای دی‌بورید تیتانیوم و کاربرد بور نیز شناسایی شده است [۳۶]. این فاز به علت نقطه ذوب نسبتاً پائین (۱۷۵۰ درجه سانتی‌گراد)، شرایط را برای سینتر فاز مایع کاربرد بور در دماهای نسبتاً کم فراهم می‌کند [۳۷].

با افزایش میزان آهن به ۵ درصد وزنی رشد بیش از حد دانه‌ها مشاهده شده است. تراکم قابل توجه در حضور مقدار کم آهن با وجود واکنش‌های شیمیایی قوی و تشکیل فازهای جدید در فصل مشترک آلیاژ مذاب-کاربرد بور، به علت سینتر فاز مایع است [۳۶].

۲-۲-۶- دی‌بورید کروم

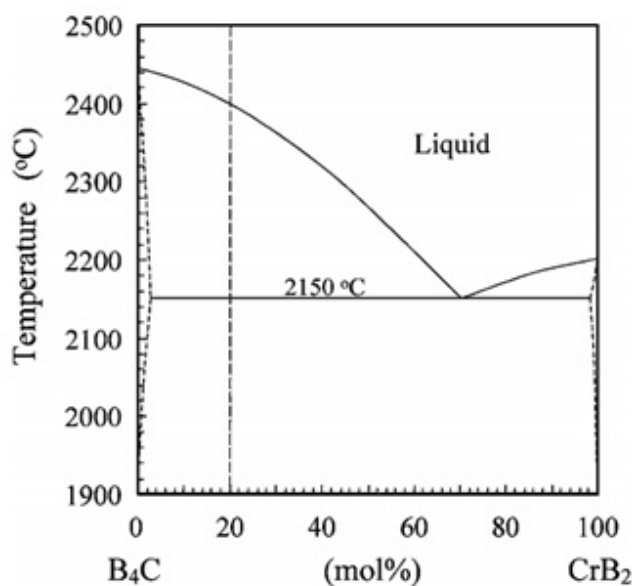
به نظر می‌رسد که دی‌بورید کروم افزودنی موثری برای تقویت سینتر فاز مایع سرامیک‌های بر پایه

¹ Mallic

² Chen

³ Tuffe

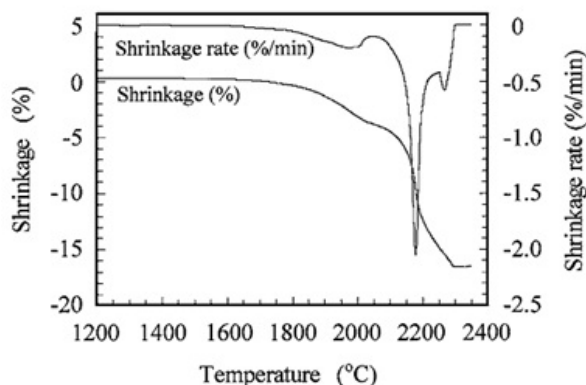
کاربید بور باشد؛ به دلیل اینکه دمای یوتکتیک در سیستم دو فاز B_4C-CrB_2 ، $2150^\circ C$ درجه سانتی‌گراد است که نسبتاً کم می‌باشد. دیاگرام فاز دوتایی این سیستم در شکل ۶ آورده شده است [۴۷-۴۹].



شکل ۶- دیاگرام فاز سیستم [۴۹].

تاکنون برای ساخت کامپوزیت‌های کاربید بور-دی‌بورید کروم، از دو روش پرس گرم و سینتر بدون فشار استفاده شده است. یامادا^۱ و همکارانش [۴۸] کامپوزیت‌های B_4C-CrB_2 را به وسیله پرس گرم و بدون هیچ فاز مایعی در دمای $1900^\circ C$ درجه سانتی‌گراد ساخته‌اند که این دما کمتر از دمای یوتکتیک سیستم B_4C-CrB_2 است. در دماهای بالاتر به علت تشکیل فاز مایع یوتکتیکی، سینتر فاز مایع رخ می‌دهد. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که در دمای $2050^\circ C$ درجه سانتی‌گراد نیز فاز مایع تشکیل شده است که به علت عدم خلوص پودرهای اولیه و یا استوکیومتری نبودن کاربید بور اولیه بوده است. همچنین با افزایش میزان دی‌بورید کروم در این دما و به علت تشکیل فاز مایع، دانسیته افزایش یافته است. با افزودن $22/5$ درصد مولی دی‌بورید کروم به کاربید بور، استحکام خمشی آن به $684 MPa$ و چقرمگی شکست آن به $3/2 MPa.m^{1/2}$ افزایش یافته است [۴۸ و ۵۰]. با استفاده از روش سینتر بدون فشار در سیستم B_4C-CrB_2 و در دماهای مختلف نیز آزمایش‌هایی صورت گرفته است. با افزودن 20 درصد مولی دی‌بورید کروم به کاربید بور، دانسیته نسبی نمونه‌های سینتر شده در $2000^\circ C$ درجه سانتی‌گراد حدود $60/4$ درصد بوده و با افزایش دمای سینتر تا $2200^\circ C$ درجه سانتی‌گراد، به $89/1$ درصد رسیده است، درحالی‌که تغییر قابل ملاحظه‌ای در اندازه ذرات کاربید بور صورت نگرفته است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نرخ انقباض در دمای $2180^\circ C$ سانتی‌گراد رخ داده که به آرایش مجدد ذرات کاربید بور نسبت داده شده است و علت آن تشکیل فاز مایع یوتکتیکی B_4C-CrB_2 بوده است [۴۹]. در دماهای بالای $2200^\circ C$ درجه سانتی‌گراد، رشد بیش از حد دانه‌های کاربید بور منجر به افزایش دانسیته شده است. به نظر می‌رسد پیکی که در دمای $2260^\circ C$ درجه سانتی‌گراد ظاهر شده است، مربوط به رشد غیر معمول دانه‌ها باشد که منجر به باقیماندن تخلخل در اطراف دانه‌های کاربید بور شده و در نتیجه به دانسیته تئوری نرسیده است [۴۹]. نمونه‌ای با $98/1$ درصد دانسیته تئوری که در دمای $2030^\circ C$ درجه سانتی‌گراد سینتر شده است، بیشترین استحکام خمشی $525 MPa$ و چقرمگی شکست $3/7 MPa.m^{1/2}$ را نشان داده است. بهبود چقرمگی شکست به علت تشکیل ریز ترک‌ها و انحراف ترک‌ها است که به عدم انطباق ضریب انبساط حرارتی دی‌بورید کروم و کاربید بور می‌باشد [۱۶ و ۴۷].

¹ Yamada


 شکل ۷- انقباض و نرخ انقباض برای نمونه‌های B₄C- CrB₂ [۴۹].

۳- نتیجه‌گیری

تاکنون روش‌های بسیاری برای سینتر کاربید بور به کار رفته است، با این حال به نظر می‌رسد که روش سینتر فاز مایع علاوه بر بهبود سینتر پذیری کاربید بور، خواص نهایی آن را نیز افزایش می‌دهد. مکانیزم سینتر فاز مایع، ذوب کمک سینتر در دمایی بسیار پایین‌تر از نقطه ذوب کاربید بور و افزایش نفوذ حجمی و نفوذ مرز دانه‌ای است که منجر به کاهش تخلخل و افزایش تراکم محصول نهایی خواهد شد. واکنش لوله‌های موئین، انحلال و رسوب مجدد پارامترهای مهمی در سینتر فاز مایع می‌باشند که بر سینتر پذیری و خواص مکانیکی محصول نهایی اثر گذار هستند. در این بین کمک سینترهای اکسیدی و غیر اکسیدی بسیاری به منظور سینتر فاز مایع کاربید بور، به آن افزوده شده‌اند و هر یک از آن‌ها تاثیر متفاوتی بر خواص محصول نهایی داشته‌اند. دمای سینتر، اندازه ذرات، میزان و نوع کمک سینترها و ... عوامل مهمی هستند که در میزان فاز مایع تشکیل شده و خواص کاربید بور تاثیر گذار می‌باشند. در جدول ۲ خلاصه‌ای از خواص انواع افزودنی‌هایی که به کاربید بور افزوده شده‌اند آورده شده است.

جدول ۲- خلاصه‌ای از خواص انواع افزودنی‌ها و کاربید بور.

مواد اولیه	بهترین درصد افزودنی (wt.%)	دمای سینتر (درجه سانتی‌گراد)	روش سینتر	دانه‌سینه نسبی (%)	تافتنس شکست (MPa.m ^{1/2})
B ₄ C, Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , SiC ₂ , TiC ₂ , α-Si ₃ N ₄	۱۰ wt.% Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , ۱۰ wt.% SiC ₂ , TiC ₂ و ۲۰ wt.% α-Si ₃ N ₄	۱۸۰۰	سینتر بدون فشار	۹۳/۵	۴/۱
B ₄ C, Al ₂ O ₃	۳	۲۱۵۰	سینتر بدون فشار	۹۶	-
B ₄ C و کاولینیت	۳۰	۲۰۵۰	سینتر بدون فشار	۹۶	۲/۷
B ₄ C و تالک	۳۰	۲۱۵۰	سینتر بدون فشار	۹۸/۵	۳
B ₄ C و Al	۳	۲۰۵۰	سینتر بدون فشار	۹۲/۵	۵
	۴			۹۵	۴/۹
	۵			۹۵	۴/۵
	۳	۲۱۵۰		۹۵	۵/۵
	۴			۹۵	۴/۲
	۵			۹۵	۳/۴
B ₄ C و Si	۱۵	۱۸۳۰	پرس گرم	۹۸/۷	۴/۶۲
B ₄ C و SiB ₆	۵	۲۰۵۰	سینتر بدون فشار	۹۴	۲/۵
	۵	۲۱۵۰		۹۸	۲/۷
B ₄ C و TiB ₂	۳۰	۲۱۵۰	سینتر بدون فشار	۹۸/۵	۳/۴
B ₄ C و TiB ₂	۱۰ wt.% TiB ₂ و ۱ wt.% Fe	۲۱۵۰	سینتر بدون فشار	۹۷	-
B ₄ C و CrB ₂	۲۵	۲۰۱۵	سینتر بدون فشار	۹۰/۲	۲/۶
	۲۷/۵			۹۳/۳	۲/۷
	۲۵	۲۰۳۰		۹۸/۱	۳/۷
	۲۷/۵			۹۶/۳	۵/۸
B ₄ C و CrB ₂	۲۲/۵	۲۰۵۰	پرس گرم	۹۸	۳/۲

1. Subramanian, C., Suri, A. K., Murthy, T. S. R. Ch., "Development of Boron-based materials for nuclear applications", Technology Development Article, 2010, 313, 14-22.
2. Lipp, A., "Boron Carbide, Production, Properties and Applications", Technological Review, 1995, 14, 28-33.
3. Shi, L., "Low Temperature Synthesis Crystalline B4C Ultrafine Powders", Solid State Communications, 2003, 28, 5-7.
4. Zorzi, J. E., Perottoni, C. A., Jornada, J. A. H. da., "Hardness and wear resistance of B4C ceramics prepared with several additives", Mat. Let. 2005, 59, 2932-2935.
5. Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R. A., Chhowalla, M., "Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress", J. Am. Ceram. Soc., 2011, 94, 3605-3628.
6. Hollenbery, G. W., Cammings, W. V., "Effect of fast neutron irradiation on the structure of Boron Carbide", J. Am. Ceram. Soc., 1996, 60, 11-12.
7. Yuhua, Zh., Aiju, L., Yansheng, Y., Ruixia, Sh., Yingcai, L., "Reactive and dense sintering of reinforced-toughened B4C matrix composites", Materials Research Bulletin, 2004, 39, 1615-1625.
8. Ye, F., Hou, Zh., Zhang, H., Liu, L., "Densification and Mechanical Properties of Spark Plasma Sintered B4C with Si as a Sintering Aid", J. Am. Ceram. Soc., 2010, 93, 2956-2959.
9. Thevenot, F., "A review on boron carbide", Key Eng. Mat., 1991, 56-57, 59-88.
10. Speyer, R. F., Lee, H., "Advances in pressureless densification of boron carbide", J. Mater. Sci., 2004, 39, 6017-6021.
11. Grigor'ev, O. N., Dubovik, T. V., Bega, N. D., Shcherbina, O. D., Subbotin, V. I., Kotenko, V. A., Prilutskii, É. V., Rogozinskaya, A. A., Lychko, V. V., Berezhinskii, I. L., Udovenko, L. M., "Effect of Silicon-Containing Additives on the Phase Constitution and Properties of Boron Carbide Composites", Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2011, 50.
12. Peng, L., Xinyan, Y., Hongqiang, R., Liang, Y., "Microstructure and mechanical properties of BC-TiB-Al composites fabricated by vacuum infiltration", 2010, 29, 92.
13. Champagne, B., Angers, R., "Mechanical properties of hot-pressed B - B4C materials", J. Am. Ceram. Soc., 1979, 62, 49-53.
14. Lixin, M., Yunqi, G., Wenxin, L., "Experimental study and performance analysis of new ceramic materials", Project supported by the Heilongjiang Provincial Department of Education, China, 2010, 978-1-4244-5326.
15. Larsson, P., Axen, N., Hogmark, S., "Improvements of the microstructure and erosion resistance of boron carbide with additives", J. Mat. Sci., 2000, 35, 3433-3440.
16. Suri, A. K., Subramanian, C., Sonber, J. K., Murthy, T. S. R. Ch., "Synthesis and consolidation of boron carbide: a review", International Materials Reviews, 2010, 55, 4-40.
17. Kim, H. W., Koh, Y. H., Kim, H. E. "Densification and mechanical properties of B4C with Al2O3 as a sintering aid", J. Am. Ceram. Soc., 2000, 83, 2863-2865.
18. Goldstein, A., Geffen, Y., Goldenberg, A., "Boron carbide-zirconium boride in situ composites by the reactive pressureless sintering of boron carbide-zirconia mixtures", J. Am. Ceram. Soc., 2001, 84, 642-644.
19. Çelik, Y., Göller, G., Yücel, O., Şahin, F., "Spark Plasma Sintering of Boron Carbide and Effects of Various Additives on Sintering and Material Properties", Advances in Science and Technology, 2010, 63, 79-84.
20. Sun, Sh. Ch., Sakamoto, T., Nakai, K., Kurishita, H., Kobayashi, S., Xu, J., Cao, H., Gao, B., Bian, X., Wu, W. Y., Gan-Feng Tu, Seiji Matsuda, Microstructures and mechanical properties in B4C-CeO2 ceramics, Journal of Nuclear Materials, 2011.
21. Panasyuk, D., Oreshkin, V. D., Maslennikova, V. R., "Kinetics of the Reactions of Boron Carbide with Liquid Aluminum, Silicon, Nickel, and Iron", Poroshkovaya Metallurgiya, 1979, 199, 79.
22. Vasilos, T., and Dutta, S. K., "Low temperature hot pressing of boron carbide and its properties", J. Am. Ceram. Soc. Bull. ,1974, 53, 453-454.
23. Lee, Ch. H., Kim, Ch. H., "Pressureless sintering and related reaction phenomena of Al2O3 doped B4C", J. Mater. Sci., 1992, 27, 6335-40.
24. Guoxin, J., and Shenghong, W., "Hot pressing of boron carbide at low temperature", J. Powder Metall. Technol., 1995, 13, 108-111.
25. Baharvandi, H. R., Hadian, A. M., "Investigation on Addition of Kaolinite on Sintering Behavior and Mechanical Properties of B4C", J. Mat. Eng. Perform., 2009, 18, 433-437.
26. Baharvandi, H. R., Hadian, A. M., Abdizade, H. Ehsani, N., "Investigation on addition of talc on sintering behavior and mechanical properties of B4C", J. Mat. Eng. Perform., 2006, 15, 280-283.
27. Wang, K., Krstic, V. D., "Mechanical properties of reaction sintered TiN ceramics with B4C addition", J. Mater. Sci., 2003, 4567-4571.
28. Sigl, L. S., "Processing and Mechanical Properties of Boron Carbide Sintered with TiC", J.

- Eur. Ceram. Soc., 1998, 18, 1521-1529.
29. Baharvandi, H. R., Hadian, A. M., "Pressureless Sintering of TiB₂-B₄C Ceramic Matrix Composite", J. Mat. Eng. Perform., 2008, 17, 838-41.
 30. Sigl, L.S., Schwetz, K.A., "Pressureless sintering of boron carbide with carbon black", Euro - Ceram. II, 1991, 1, 517-521.
 31. Telle, R., Petzow, G. S., "Mechanisms in the liquid-phase sintering of boron carbide with silicon based melts", Mat. Sci. Monogr., 1987, 38, 961-973.
 32. Halverson, D. C., Pyzik, A. J., Aksay, I. A., "Processing and Microstructural Characterization of B₄C-Al Cermets", Ceramic Engineering and Science Proceedings, 1985, 6.
 33. Mashhadi, M., Taheri-Nassaj, E., Sglavo, V. M., "Pressureless sintering of boron carbide", Ceramics International, 2010, 36, 151-159.
 34. Lin, Q., Shen, P., Qiu, Zhang, F. D., and Jiang, Q., "Wetting of polycrystalline B₄C by molten Al at 1173-1473K", J. Scr. Mater., 2009, 60, 960-963.
 35. Danny, C. H., Aleksander, J. P., Ilhan, A. A., and William, E. S., "Processing of boron carbide-aluminum composites", J. Am. Ceram. Soc., 1989, 72, 775-780.
 36. Aizenshtein, M., Mizrahi, I., Froumin, N., Hayun, S., Dariel, M. P., Frage, N., "Interface interaction in the B₄C/(Fe-B-C) system", Mater. Sci. Eng. A., 2008, A495, 70-74.
 37. Mizrahi, I., Raviv, A., Dilman H., Aizenshtein, M., Dariel, M. P., Frage, N., "The effect of Fe addition on processing and mechanical properties of reaction infiltrated boron carbide-based composites", J. Mater. Sci., 2007, 42, 6923-6928.
 38. N. Frage, S. Hayun, S. Kalabukhov, and M. P. Dariel, "The effect of fe addition on the densification of B₄C powder by spark plasma sintering", Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2007, 46, 11-12.
 39. Telle, R., Petzow, G., "Reaction Sintering of Boron Carbide (B₄C) with Silicon and Titanium", Horiz. Powd. Metall., Proc. Int. Powd. Metall. Conf. Exhib., 1986, 2, 1155-8.
 40. Taylor, K. M., Falls, N., Palicka, R. J., "Dense carbide composite for armor and abrasives", US patent No. 3 765 300, 1973.
 41. Mallick, D., Kayal, T. K., Ghosh, J. O., Chakrabarti, P., Biswas, S., Maiti, H. S., "Development of multi-phase B-Si-C ceramic composite by reaction sintering", Ceram. Int., 2009, 35, 1667-1669.
 42. Chen, Z. F., Su, Y. C., Cheng, Y. B., "Formation and sintering mechanisms of reaction bonded silicon carbide-boron carbide composites", Key Eng. Mater., 2007, 352, 207-212.
 43. Ishimoto, Y., Matsushita, J., "Hardness in High Temperature of SiB₆-B₄C Mixture Sintered Body", J. Eur. Ceram. Soc., 1999, 17, 1541-1549.
۴۴. قدمی علی، بهاروندی حمیدرضا، احسانی ناصر، عبدی زاده حسین و اسکندری جم جعفر، "بررسی تاثیر SiB₆ بر ریزساختار و خواص مکانیکی کاربید بور"، نشریه مواد پرانرژی، ص ۲۵-۱۹، بهار و تابستان ۱۳۸۶.
45. Huang, S. G., Vanmeensel, K., VanderBiest, O., Vleugels, J., "Insitu synthesis and densification of sub micrometer-grained B₄C-TiB₂ composites by pulsed electric current sintering", J. Eur. Ceram. Soc., 2011, 31, 637-644.
 46. Tuffe, S., Dubois, J., Fantozzi, G., Barbier, G., "Densification, microstructure and mechanical properties of TiB₂-B₄C based composites", Int. J. Refract. Met. Hard Mater., 1996, 14, 305-310.
 47. Yamada, S., Hirao, K., Yamauchi, Y., Kanzaki, S., "Densification behaviour and mechanical properties of pressureless-sintered B₄C-CrB₂ ceramics", J. Mat. Sci., 2002, 37, 5007 - 5012.
 48. Yamada, S., Hirao, K., Yamauchi, Y., Kanzaki, Sh., "Mechanical and electrical properties of B₄C-CrB₂ ceramics fabricated by liquid phase sintering", Ceram. Int., 2003, 29, 299-304.
 49. Yamada, S., Hirao, K., Yamauchi, Y., Kanzaki, S., "Sintering behavior of B₄C-CrB₂ ceramics", J. Mat. Sci. Let., 2002, 21, 1445 - 1447.
 50. Tiwari, A., "Liquid phase sintering in microgravity", Current Sci., 2000, 79, 334-335.