فصلنامه‌ی علمی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۱۱، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۱

ساخت و بررسی قطعات کامپوزیتی C/C_f –ZrB_2-ZrC-SiC و C/C_f -ZrB_2-SiC مقاوم در برابر فرسایش با روش زینتر بدون فشار

نوع مقاله: علمی پژوهشی

مهری مشهدی[۱]، محمدحسین بخشی[۲]

[۱]دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

[۲]دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

mohammadhoseinb1994@gmail.com

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۷ تیر ۱۴۰۰

پذیرش: ۱۱ مهر ۱۴۰۰

صفحه ۴۸ تا صفحه ۶۵

در دسترس در نشانی:
www.ijcse.ir

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۵۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی:
۲۷۸۳-۳۰۰۳

کلیدواژه:

C/Cf-ZrB2-ZrC-SiC، مقاومت به فرسایش، C/Cf-ZrB2-SiC، زینتر بدون فشار، UHTCs

چکیده:

*در این پژوهش هدف دستیابی به قطعات کامپوزیتی مستحکم و مقاوم به فرسایش و تخریب حرارتی C/Cf-ZrB2-ZrC-SiC و C/Cf-ZrB2-SiC با روش زینتر بدون فشار می‌باشد. نمونه‌های C/Cf-ZrB2-SiC با استفاده از پودرهای سنتزشده ZrB2 و SiC بین ۷ یه‌هایی از پارچه‌ی کربنی آغشته‌شده به رزین تهیه شدند. بعد از پرس‌شدن با فشار ۵ بار در دمای ۱۶۰۰℃ و به مدت ۲ ساعت در کوره اتمسفر کنترل تحت اتمسفر Ar عملیات حرارتی شدند. در مرحله بعد برای بررسی تاثیر اضافه‌شدن ZrC و مقایسه با نمونه‌های C/Cf-ZrB2-SiC، قطعات کامپوزیتی C/Cf-ZrB2-ZrC-SiC نیز تهیه شدند. این کار با سنتز پودر سرامیکی ZrB2-ZrC-SiC بین ۷ یه‌هایی از پارچه‌های کربنی با استفاده از زیرکون (ZrSiO4)، B4C، کربن اکتیو، با حضور و بدون حضور Si به همراه الیاف کربنی خرد شده صورت پذیرفت. نمونه‌ها بعد از پرس و یافتن استحکام خام به کوره اتمسفر کنترل تحت اتمسفر Ar منتقل شده و در دمای ۱۶۰۰℃ به مدت ۲ ساعت تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. به منظور بررسی خواص ریزساختاری و فازی نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز پرتو اشعه ایکس (XRD)، و برای بررسی خواص مکانیکی و مقاومت به اکسیداسیون کامپوزیت‌ها ازآزمون استحکام خمشی سه‌نقطه‌ای و شعله اکسی‌استیلن استفاده شد. چگالی میانگین برای نمونه‌های کامپوزیتی پرس‌نشده و پرس‌شده C/Cf-ZrB2-SiC-ZrC به ترتیب تقریبا مقادیر ۵ gr/cm3 و ۵/۵ و استحکام خمشی این کامپوزیت‌ها به طور میانگین، ۳۰۳ MPa به دست آمد. نرخ فرسایش خطی نمونه‌های پرس‌نشده و پرس‌شده C/Cf-ZrB2-SiC-ZrC درآزمون فرسایش با شعله اکسی استیلن به ترتیب تقریبا مقادیر ۳/۱۱ µm/s و ۱/۷۴ و نرخ فرسایش جرمی پرس‌نشده و پرس‌شده به ترتیب به طور میانگین ۴/۸۶ و ۲/۴۱ (10-4*g/s) اندازه‌گیری شد. چگالی میانگین برای نمونه‌های C/Cf-ZrB2-SiC، ۵/۰۳ gr/cm3 اندازه‌گیری شد. هم چنین استحکام خمشی این کامپوزیت‌ها به طور میانگین ۲۴۵ MPa و نرخ فرسایش خطی وجرمی نمونه‌ها به ترتیب ۲/۱۶ µm/s و ۳/۲۸ (10-4 *g/s) به دست آمد.*

DOR کد: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7

۱– مقدمه

نقطه ذوب بالا، سختی زیاد، چگالی نسبتاً کم، پایداری

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

شیمیایی عالی و پایداری حرارتی خوب کامپوزیت‌های ZrB_2-ZrC-SiC آن‌ها را کاندیداهای بالقوه‌ای برای کاربردهای ساختاری و ویژه در دماهای بالا می‌کند، برای کاربردهای مختلف مانند سپرهای حرارتی، موتورها، المنت کوره و وسایل نقلیه فراصوتی [۳-۱].

اگرچه کامپوزیت‌های ZrB_2-ZrC-SiC عملکرد بسیار بهتری نسبت به سیستم‌های مونوفاز یا فاز دوتایی نشان داده‌اند، اما مشکلات مهمی از جمله محدودشدن قابلیت پخت‌پذیری، شکنندگی ذاتی و مقاومت در برابر اکسیداسیون ضعیف هنوز هم کاربردهای مهندسی آن‌ها را محدود می‌کند. هم‌چنین خواص مختلف و متنوع کامپوزیت‌های C/C_f-ZrB_2-SiC نیز آن‌ها را یکی از مورد توجه‌ترین کامپوزیت- سرامیک‌های دمابالا (UHTCMCs) کرده است. این خواص شامل دانسیته پایین، مقاومت شوک حرارتی مطلوب، هدایت گرمایی و الکتریکی خوب و امکان ساخت قطعات توسط ماشین‌های تخلیه الکتریکی، مقاومت عالی در برابر فرسایش و اکسیداسیون در دماهای بالا، مقاومت بالا در برابر رشد افراطی دانه‌ها در هنگام پخت، قابلیت پخت‌پذیری عالی و پایداری شیمیایی مناسب در محیط‌های نامطلوب با شرایط سخت می‌باشند [۱، ۴].

پژوهش‌هایی مبنی بر استفاده از سرامیک‌های دمابالا (UHTC) به عنوان پوشش نیز صورت گرفته است. در گزارشی که اخیرا ارائه شده ژوئتینگ[۱] و همکارانش [۵] مقاومت در برابر فرسایش ۵ نوع UHTC بر پایه ZrB_2 و ZrC را در دماهای بالا بررسی کردند. آن‌ها از ترکیبات ZrC, ZrC-SiC, ZrB_2, ZrB_2-SiC, ZrB_2-ZrC-SiC استفاده کردند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که ترکیبات بر پایه ZrB_2 مقاومت در برابر فرسایش بهتری از ترکیبات بر پایه ZrC در همان شرایط نشان دادند [۵]. ماده سرامیکی ZrC به علت دارا بودن درصدی از پیوند فلزی، هدایت حرارتی به اندازه ۲۰/۵ W/(M.K) را داراست، در نتیجه مقاومت به شوک حرارتی در این ماده مطلوب است. باند کووالانسی به این ماده نقطه ذوبی به اندازه ۳۵۳۰°C می‌دهد. این ماده که غیر استوکیومتریک است کربن آن به ماکزیمم ۰/۹۸ می‌رسد و اگر بالاتر از این مقدار باشد، در ماده کربن آزاد وجود دارد که مطلوب نیست. این ماده مقاومت خوبی در مقابل حملات اسیدی حتی در دمای بالا دارد. سختی بالایی به اندازه ۲۵/۵ GPa و مدول الاستیک به اندازه ۴۴۰ GPa دارد. از روش‌های تولید آن می‌توان به احیای زیرکونیا با گرافیت، کربوترمال و سل ژل اشاره کرد. زینتر نانو پودر ZrC در دمای بالاتر از ۲۰۰۰°C اتفاق می‌افتد و استفاده از پرس گرم می‌تواند جهت رسیدن به دانسیته مورد نیاز، مطلوب باشد. در نهایت می‌توان برای رسیدن به دانسیته حداکثر از روش SPS استفاده کرد. در بالاتر از ۸۰۰°C زیرکونیوم کارباید دچار اکسیداسیون می‌شود، لذا برای رفع مشکل این ماده را با ZrB_2 و SiC کامپوزیت می‌کنند و مقاومت در برابر اکسیداسیون را تا ۱۸۰۰°C افزایش می‌دهند.

هم‌چنین با کامپوزیت‌سازی مقاومت ماده در برابر فرسایش و هم‌چنین استحکام مکانیکی آن افزایش می‌یابد. کارباید و بورایدهای زیرکونیوم به دلیل دارا بودن هدایت حرارتی و الکتریکی خوب، مقاومت در برابر شوک حرارتی بسیار خوبی دارند. هم‌چنین در برابر خوردشدن در برابر فلزات مایع مقاوم

[۱] Xueting Xu

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

هستند. کاهش تخلخل از چالش‌های استفاده از این ماده می‌باشد که با SPS قابل بهبود است [۶].

کامپوزیت‌های کربن- کربن خواص منحصر به فردی مانند دانسیته کم، ضریب انبساط حرارتی پایین، استحکام بالا در دمای زیاد، هدایت حرارتی بالا و مقاومت به شوک حرارتی بالایی را دارا هستند. خصوصیات برجسته این ماده سبب شده است تا کامپوزیت کربن کربن سر دسته مواد دارای کاربرد دما بالا مانند موتور موشک‌ها، دماغه، حاشیه‌های هدایت‌کننده و دیگر قسمت‌های سیستم‌های محافظ حرارتی باشد. دمای عملیاتی این قطعات ممکن است سریعا از دمای محیط به بالای ۳۰۰۰°C برسد و در این شرایط چند ثانیه تا چند صد ثانیه باقی بماند. ولی این مواد در مقابل فرسایش توسط گاز پر سرعت خارج شونده از جت و فرسایش با ذرات در بالای ۲۰۰۰°C آسیب‌پذیر هستند. لذا کاربرد این ماده در تجهیزات مدرن هوافضایی با کارایی بالا نظر به پیشرفت رو به رشد این بخش محدود شده است. ثابت شده است که افزودن سرامیک‌های فوق دما بالا به طور مثال بورایدها و کاربیدهای فلزات واسطه به زمینه کربن کربن یکی از متداول ترین روش‌ها برای بهبود مقاومت به فرسایش است و در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری برای توسعه کامپوزیت‌های C/C-UHTC انجام شده است. ثابت شده است که استفاده از سرامیک‌های دما بالا و کاربایدها و بورایدهای فلزات انتقالی در کامپوزیت‌های کربنی یکی از روش‌هایی است که برای افزایش مقاومت به فرسایش به کار می‌رود. چون در این کامپوزیت‌ها سرامیک‌های دما بالا در مقادیر کم و در نقش تقویت‌کننده بوده‌اند لذا بهبود در خواص مقاومت به فرسایش محدود بوده است. کامپوزیت‌هایی که دارای مقادیر زیادی ZrC و SiC باشند به نحوی که بتوانند یک زمینه سرامیکی پیوسته ایجاد کنند و هم‌چنین از خواص مواد کربنی مانند الیاف کربنی به عنوان تقویت‌کننده استفاده شود، می‌توان خواص مقاومت به فرسایش را به طور چشم‌گیری افزایش داد [۷]. از زیرکونیوم کارباید به عنوان یک ماده فوق دیرگداز، در دمای زیاد و به کمک فشار می‌توان قطعه متراکم تولید کرد زیرا زینترینگ این ماده به دلیل ضریب نفوذ در خود پایین و باند کووالانسی قوی، مشکل است. روش اصلی برای زینتر زیرکونیوم کارباید استفاده از روش SPS است که سینتیک نفوذ را با اعمال جریان مستقیم پالسی بهبود می‌دهد. هم‌چنین از $MoSi_2$ به عنوان کمک زینتر زیرکونیوم کارباید از ۰ تا ۹٪ حجمی استفاده می‌شود. هم چنین این ماده در مقادیر کم نیز، به افزایش دانسیته زیرکونیوم کارباید کمک می‌کند [۸].

کاربایدها و بورایدهای Hf و Zr به دلیل نقطه ذوب بالا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند اما به دلیل هزینه پایین تولید و دانسیته کم‌تر، ZrC به میزان بیش‌تری مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از الیاف کربنی می‌تواند مقاومت به شوک حرارتی و چقرمگی شکست سرامیک‌ها را به میزان چشم‌گیری بهبود دهد. به دلیل کاربرد این مواد در شرایط دما بالا لازم است خواص فرسایشی آن‌ها معین شود. استفاده از شعله اکسی‌استیلن یکی از راه‌های در دسترس و ارزان برای سنجش خواص فرسایشی است که برای سنجش اولیه میزان مقاومت به فرسایش مواد به کار می‌رود [۹]. استفاده از بورایدها و کاربیدهای زیرکونیوم به صورت تکی به دلیل مقاومت به اکسیداسیون پایین و ضعف‌های دیگر محدود شده است. لذا با کامپوزیت‌سازی این ضعف‌ها را تا حد چشم‌گیری

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

برطرف می‌کنند. به عنوان مثال افزودن فاز دومی مانند ZrB_2 یا SiC به زیرکونیوم کارباید سبب می‌شود مقاومت به اکسیداسیون و هم‌چنین مقاومت به فرسایش و شوک حرارتی بهبود یابد. این بهبود در خواص به تشکیل لایه غیرفعال در سطح کامپوزیت نسبت داده می‌شود. از این رو به طور مثال کامپوزیت سه‌تایی $ZrC-30ZrB_2-10SiC$ که به روش‌های پرس گرم یا SPS تولید شده است، در هر دو حالت خواص بهتری از زیرکونیوم کارباید تک‌فاز و هم‌چنین کامپوزیت دوتایی از این مواد دارد. هم‌چنین با کامپوزیت‌سازی خواص مکانیکی نیز بهبود پیدا می‌کند. عمده این بهبود خواص در نتیجه کامپوزیت‌سازی، به اثر محدودکردن رشد دانه نسبت داده می‌شود و در هر دو روش پرس گرم یا SPS با کامپوزیت‌سازی رشد دانه شدیدا محدود خواهد شد و دانه‌های همگن‌تری به دست خواهند آمد، لذا خواص بهتر می‌شوند. دلیل دوم بهبود خواص به افزایش تراکم قطعه نهایی با کامپوزیت‌سازی نسبت داده می‌شود. برخی از مواد مانند B_4C، B_2O_3، SiC و $MoSi_2$ با استفاده در کامپوزیت C/C به عنوان افزودنی سبب بهبود مقاومت به اکسیداسیون این ماده در دماهای پایین و متوسط شده‌اند؛ ولی در دماهای بالاتر نتوانسته‌اند مقاومت به اکسیداسیون خوبی را برای کامپوزیت ایجاد کنند [۶]. سرامیک‌های دما بالا مانند HfB_2-SiC، ZrB_2-ZrC، ZrB_2-SiC و ZrC-SiC به دلیل نقطه ذوب بالا، مقاومت در برابر فرسایش فوق‌العاده‌ای را در تست قوس جت از خود نشان داده‌اند؛ اما کاربرد آن‌ها به دلیل پایین‌بودن چقرمگی شکست و مقاومت به شوک حرارتی ضعیف، محدود شده‌است. استفاده از الیاف کربنی به عنوان تقویت‌کننده بر شکنندگی ذاتی این مواد غلبه می‌کند [۱۰].

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته و شرایط موجود کشور در پژوهش حاضر هدف دستیابی به قطعات کامپوزیت-سرامیکی مستحکم و مقاوم به اکسیداسیون و تخریب حرارتی $C/C_f-ZrB_2-ZrC-SiC$ و C/C_f-ZrB_2-SiC با استفاده از مواد صنعتی و کم‌هزینه و از طریق روش زینتر بدون فشار می‌باشد. در نهایت به منظور بررسی خواص ریزساختاری و فازی نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز پرتو اشعه ایکس (XRD)، و برای بررسی خواص مکانیکی و مقاومت به اکسیداسیون کامپوزیت‌ها از آزمون استحکام خمشی سه‌نقطه‌ای و شعله اکسی‌استیلن استفاده شد.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد و روش‌ها

برای دستیابی به قطعات $C/C_f-ZrB_2-ZrC-SiC$ از زیرکون ($ZrSiO_4$)، B_4C، کربن اکتیو و سیلیسیوم استفاده شد. هم‌چنین برای ساخت قطعات C/C_f-ZrB_2-SiC از پودر سنتزشده ZrB_2 و SiC بهره گرفتیم. پارچه کربنی، الیاف کربن (C_f) و رزین فنولیک از درجه تجاری شیمیران (ایران) و اتانول از شرکت Merck نیز برای همه نمونه‌ها استفاده شد. به منظور بررسی خواص ریز ساختاری و فازی نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز پرتو اشعه ایکس (XRD)، و برای بررسی خواص مکانیکی و مقاومت به اکسیداسیون کامپوزیت‌ها از آزمون استحکام خمشی سه‌نقطه‌ای و شعله اکسی‌استیلن استفاده شد.

استحکام خمشی سه‌نقطه‌ای نمونه‌های تولیدشده در دمای اتاق اندازه‌گیری شد. بارگذاری خمشی با نرخ ۲ mm/min در

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

دستگاه سنجش استحکام مکانیکی شرکت zwick ساخته کشور آلمان صورت پذیرفت. هم‌چنین چگالی کلی و درصد تخلخل ظاهری نمونه‌های کامپوزیتی ساخته‌شده با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه شد:

$$\text{چگالی} = \frac{D}{S-L} * \rho_L \quad (۱)$$

وزن قطعه خشک بر حسب گرم: D

وزن اشباع قطعه بر حسب گرم: S

وزن قطعه در حالت غوطه وری: I

چگالی مایع غوطه وری :ρ

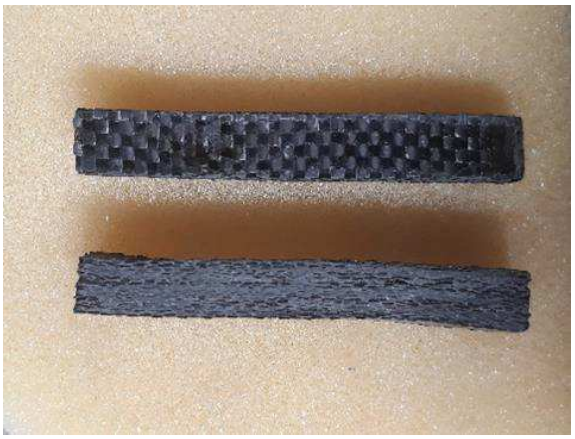
$$\text{تخلخل ظاهری} = \frac{S-D}{S-I} \quad (۲)$$

۲-۱-۱- آماده‌سازی نمونه‌های C/C_f-ZrB_2-SiC

برای ساخت کامپوزیت C/C_f-ZrB_2-SiC از پودر سیلیکون کارباید و زیرکونیوم دی‌بوراید سنتزشده استفاده گردید. SiC ۲۰% وزنی و ZrB_2 ۸۰% وزنی نمونه‌ها را تشکیل دادند، که برای هر نمونه ۲ گرم کامپوزیت پودری شامل ۰/۴ گرم سیلیکون کارباید و ۱/۶ گرم زیرکونیوم دی‌بوراید استفاده شد. ۲ گرم بچ ما با ۱۰۰ گرم اتانول به همراه روانساز درون محفظه آسیاب ماهواره‌ای قرار گرفتند و برای مدت ۱ ساعت آسیاب شدند. مخلوط حاصل در آون قرار گرفته و در دمای ۹۰°C خشک شدند. در پایان پودر حاصل در هاون کوبیده شد.

طبق فرم استاندارد نمونه استحکام خمشی، پارچه‌های کربنی تلقیح شده با رزین در ابعاد ۱ در ۷ cm^2 بریده شدند. سپس پارچه‌ها به مقدار مناسبی از رزین آغشته شدند و کامپوزیت پودری آسیاب‌شده روی آن‌ها پاشیده شده و عمل آغشتن و پاشیدن برای ۲۰ پارچه متوالی انجام شد. نمونه‌های تولیدشده در قالب فولادی روانکاری شده قرار گرفته و تحت پرس با میزان فشار ۵ بار قرار گرفتند. طی آزمایش‌های متعدد مشخص شد که تحت فشارهای بالاتر نمونه‌ها دچار دفرمگی می‌شوند. سپس نمونه‌های خام پرس‌شده به کوره اتمسفر کنترل، تحت اتمسفر Ar منتقل‌شده و به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۶۰۰°C عملیات حرارتی شدند.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها جهت بررسی‌های مورفولیژیکی، ریزساختاری و فازی از آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز پرتو اشعه ایکس (XRD)، و برای بررسی خواص مکانیکی و مقاومت به اکسیداسیون و فرسایش کامپوزیت‌ها از آزمون استحکام سه‌نقطه‌ای و شعله اکسی‌استیلن استفاده شد.



شکل ۱- قطعات کامپوزیت- سرامیکی C/C_f-ZrB_2-SiC تهیه شده با روش زینتر بدون فشار

۲-۱-۲- آماده‌سازی نمونه‌های C/C_f-ZrB_2-ZrC-SiC

از دو بچ مختلف برای آماده‌سازی و سنتز پودر کامپوزیتی ZrB_2-SiC-ZrC استفاده شد. بچ ۱ شامل سیلیکات زیرکونیوم، کاربید بور، کربن سیاه و سیلیسیوم و بچ ۲ متشکل از همین پودرها بدون سیلیسیوم بودند، که در کنار الیاف کربنی (C_f) با نسبت وزنی ۲ درصد به مدت ۱ ساعت با سرعت ۲۰۰ rpm در کنارگلوله‌های زیرکونیایی با نسبت گلوله به پودر

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

۲۰ به ۱ آسیاب شدند. برای دستیابی به میزان بهینه الیاف کربنی خردشده، الیاف در مقادیر ۱۰٪، ۷٪، ۵٪، ۲٪ وزنی در کنار ۲/۵ گرم پودر و ۱۰۰ گرم اتانول در آسیاب ماهواره‌ای قرار گرفتند و برای ۱ ساعت آسیاب شدند. برای مقادیر ۱۰، ۷ و ۵٪ وزنی، پخش‌شدن غیریکنواخت الیاف کربنی و تشکیل آگلومره‌هایی از آن‌ها مشاهده شد که به همین جهت برای ادامه‌ی کار مناسب دیده نشدند. اما در مقدار ۲٪ وزنی الیاف به صورت منظم و یکنواخت دیسپرز شده و در نهایت ۲٪ وزنی الیاف به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. چهار نمونه با دو بچ ترکیبی (جدول ۱) تهیه شد. ۲/۵ گرم از هر بچ با ۱۰۰ گرم اتانول به همراه روانساز درون محفظه آسیاب ماهواره‌ای قرار گرفتند و برای مدت ۱ ساعت آسیاب شدند. مخلوط حاصل در آون قرار گرفته و در دمای ۹۰°C خشک شدند. در پایان پودرهای حاصل در هاون کوبیده شدند.

جدول ۱- فرمولاسیون مواد اولیه برای سنتز پودر (بچ ۱ و ۲)

ترکیب	$ZrSiO_4$	B_4C	C	Si
بچ ۱	70.10	7.00	22.88	0
بچ ۲	66.65	6.59	23.27	3.29

واکنش‌هایی که طی آن از مواد اولیه به فازهای مورد نظر ZrB_2 و ZrC و SiC دست پیدا می‌کنیم مطابق زیر است.

برای بچ ۱:

$$3ZrSiO_4 + B_4C + 15C \rightarrow ZrB_2 + 2SiC + ZrC + 12CO$$

برای بچ ۲:

$$3ZrSiO_4 + B_4C + 16C + Si \rightarrow ZrB_2 + 4SiC + ZrC + 12CO$$

در مرحله‌ی بعد پارچه‌های کربنی تلقیح‌شده با رزین در ابعاد ۱/۵ در $1/5\ cm^2$ بریده شدند. پودرهای آماده‌شده از مرحله قبل روی پارچه‌ی کربنی بریده‌شده و آغشته‌شده با رزین فنولیک پاشیده‌شده و سپس پارچه‌ی بعدی روی آن قرار گرفت و عمل آغشتن رزین و پاشیدن پودر تکرار شد. این عمل چندین بار تکرار شد تا به ضخامت مورد نظر برسیم. از لحاظ وزنی نیز تقریبا ۵۷٪ وزنی کل کامپوزیت از پودر سرامیکی و ۴۳٪ وزنی از پارچه کربنی تشکیل شده‌است. نمونه‌های به دست آمده در قالب فولادی روانکاری شده قرار گرفته و سپس تحت پرس سرد با فشار ۵ بار قرار گرفتند تا استحکام خام مطلوبی به دست آید. در فشار پرس‌های بالاتر نمونه‌ها دچار دفرمگی می‌شدند از این رو فشار بهینه‌ی ۵ بار پس از بارها آزمایش انتخاب شد. نمونه‌ها بعد از پرس به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۶۰۰°C و اتمسفر آرگون تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. نمونه‌های B1 و B1-P حاصل از بچ ۱ و نمونه‌های B2 و B2-P نمونه‌های حاصل از بچ ۲ می‌باشند. همچنین نمونه‌های B1 و B2 بدون پرس و نمونه‌های B1-P و B2-P نمونه‌های پرس‌شده تحت فشار ۵ بار می‌باشند که اثر پرس هم در ادامه بررسی شده و شرح داده می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نتایج نمونه‌های C/C_f-ZrB_2-SiC

۳-۱-۱- بررسی ریزساختاری کامپوزیت‌های C/C_f-ZrB_2-SiC

در شکل ۲ تصویر الکترون‌های برگشتی از کامپوزیت C/C_f-ZrB_2-SiC را مشاهده می‌کنیم که در سه نقطه مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که مشهود است مناطقی با کانتراست متفاوت در تصویر وجود دارد که متناظر با ترکیبات مختلف است. مطابق آنالیز EDX منطقه خاکستری رنگ A فیبر کربنی و کربن پسماند حاصله از بایندر می‌باشد. هم‌چنین نواحی روشن‌تر B و C ذرات ZrB_2 و SiC را نشان می‌دهند. که در نقطه C با توجه به آنالیز EDX مربوط به ZrB_2 می‌باشد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

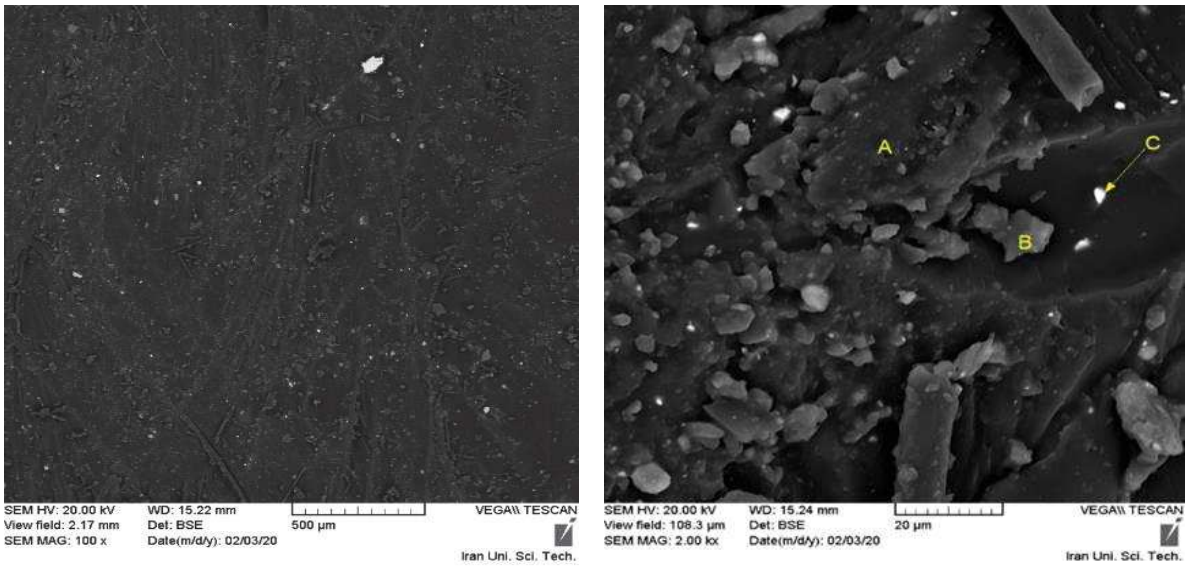
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

شکل ۳ آنالیز از نقطه A، B و C در شکل ۲ است. بخش C در شکل ۲ به صورت روشن‌تر قابل مشاهده است. چگالی زیرکونیوم دی‌بوراید بیش‌تر از کاربید سیلیسوم می‌باشد و با توجه به این نکته باید رنگ آن روشن‌تر از رنگ کاربید سیلیسوم در تصویر باشد.

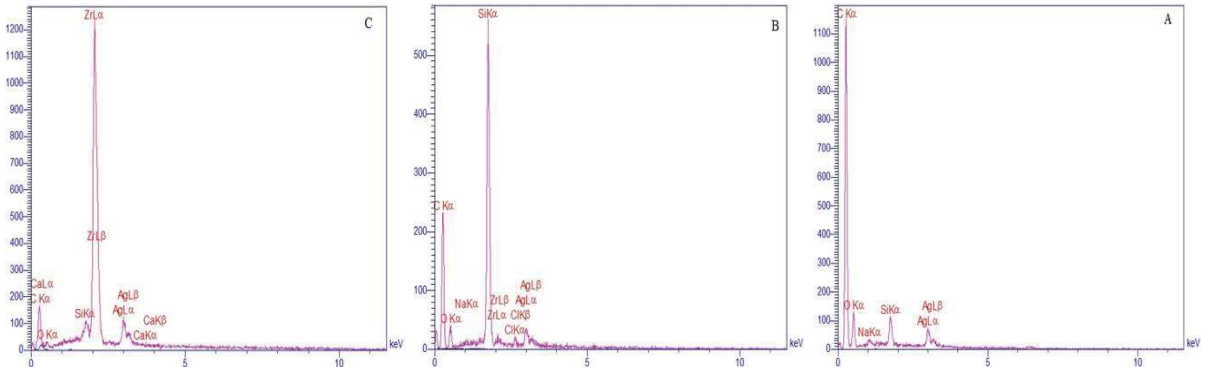
مطابق شکل ۳ که پیک بور و زیرکونیوم در آن مشاهده می‌شود احتمالا این نقطه خاکستری روشن دانه ZrB_2 است.

هم‌چنین شکل ۴ تصویر SEM از سطح همین نمونه بعد از تست فرسایش را نشان می‌دهد.

همان‌طور که می‌بینیم بعد از تست شعله نظم فیبرهای موجود در پارچه‌های کربنی زیاد به هم نخورده است و مقداری سطوح دچار سوختگی شده و بعضا دچار خردایش می‌گردند اما در نهایت ساختار کلی و ساختمان خود را در برابر شعله و حرارت حفظ کرده‌اند.



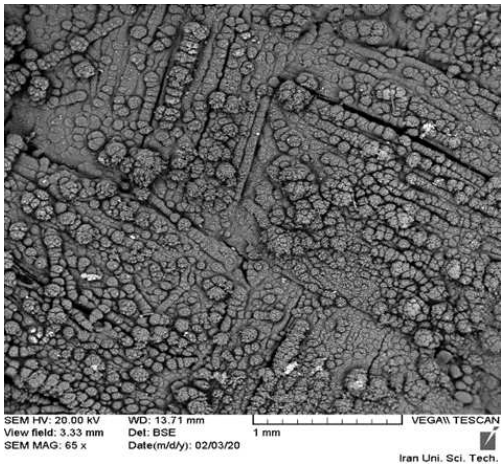
شکل ۲- تصویر الکترون برگشتی از سطح کامپوزیت C/C_f-ZrB_2-SiC



شکل ۳- آنالیز EDS از نقاط A و B و C نمونه‌های C/C_f-ZrB_2-SiC

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

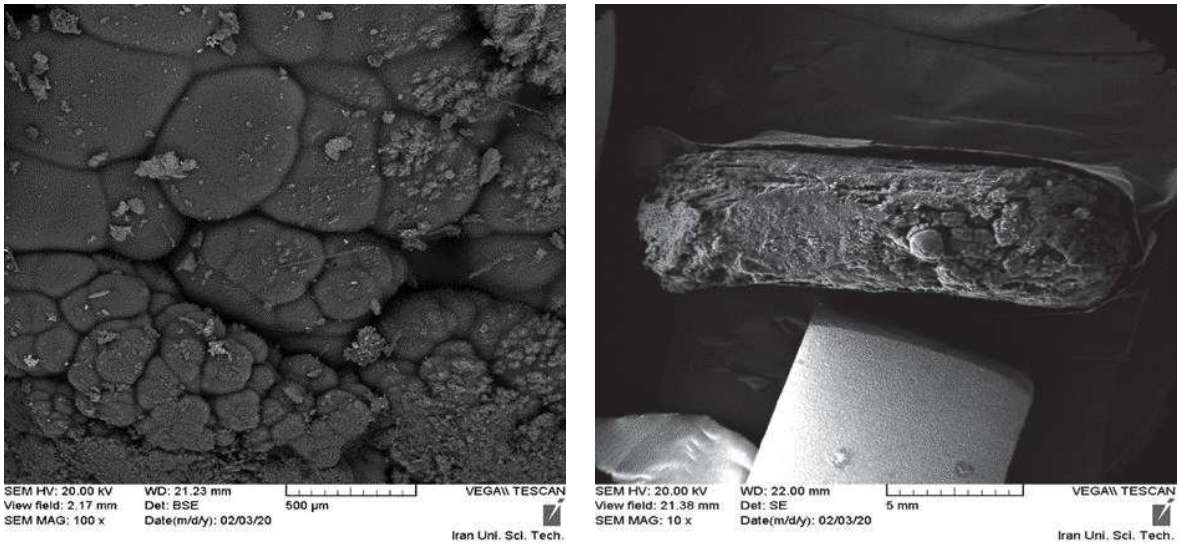


شکل ۴- تصویر SEM از نمونه بعد از تست فرسایش

در شکل ۵ سطح مقطع جانبی نمونه کامپوزیتی فرسایش یافته با شعله اکسی‌استیلن را نشان می‌دهد و ساختار سرامیکی بین لایه‌های کربنی قابل مشاهده است. مطابق شکل تخریب و ترک گسترده‌ای که باعث تخریب ساختار بشود در نمونه دیده نمی‌شود و از تراکم مناسب و پیوستگی برخوردار است. زیرکونیوم دی‌بوراید در دمای بالاتر از ۳۰۰۰°C و کاربید سیلیسیوم در بالاتر از ۲۷۰۰°C ذوب می‌شوند. دمای زینتر قطعه باید در حدود ۰/۷ الی ۰/۸ دمای ذوب نمونه باشد و دمای زینتر در این پژوهش ۱۶۰۰°C بوده است لذا رشد محسوسی در اندازه دانه مشاهده نشد اما استحکام خمشی نسبت به قطعه خام افزایش واضحی پیدا کرد. در شکل ۶ تصویر سطح کامپوزیت در برابر شعله دیده می‌شود.

در بخش‌هایی از سطح تخریب کمی رخ داده و ترک‌هایی قابل مشاهده است اما هم‌چنان می‌توان بیان کرد که سطح مقاومت خوبی را در برابر خوردگی ترمومکانیکی شعله ناشی از دما، فشار و سرعت جریان گاز آن از خود نشان داده است و ساختار و ساختمان خود را به خوبی حفظ کرده و در نهایت استحکام قابل قبولی از خود به نمایش گذاشته است.

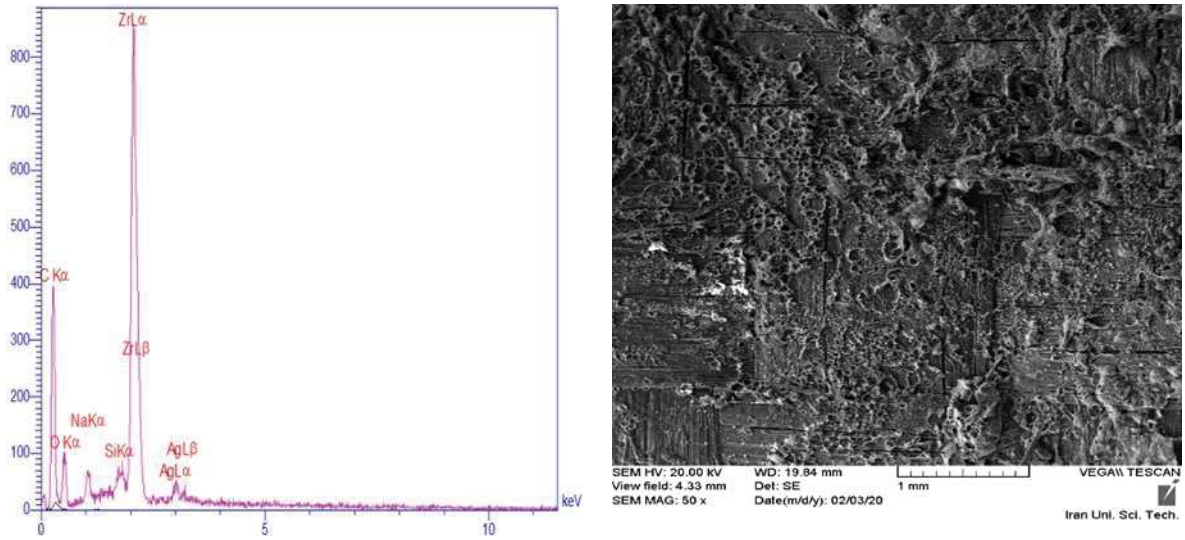
هم‌چنین در شکل ۶ آنالیز EDS از کل تصویر را نمایش داده است. این تصویر از سطح نمونه که پارچه کربنی است گرفته شده و علاوه بر کربن، پیک اکسیژن با مقدار ۳/۲٪ وزنی، زیرکونیوم با ۸/۴٪ وزنی و سیلیسیوم با ۱/۸٪ وزنی مشاهده می‌شود. احتمالا در سطح کامپوزیت که در معرض شعله اکسی‌استیلن واقع شده است، ZrO_2، SiO_2 و یا هردو تشکیل شده‌اند.



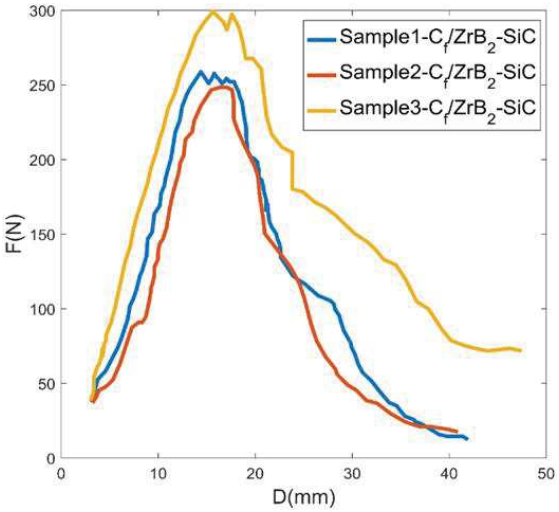
شکل ۵- تصویر SEM از سطح مقطع جانبی نمونه بعد از تست فرسایش

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]



شکل ۶- سطح کامپوزیت فرسایش یافته در برابر شعله اکسی‌استیلن و آنالیز EDS از سطح آن



شکل ۷- نمودار نیرو بر حسب فاصله برای سه نمونه کامپوزیت تولید شده در آزمون استحکام خمشی

۳-۱-۱- بررسی دانسیته و استحکام

سه نمونه‌ی کامپوزیتی با ترکیب C/C_f-ZrB_2-SiC تهیه شده و هرکدام تحت تست استحکام خمشی ۳ نقطه‌ای قرار گرفتند که نمودار آن در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد. طبق شکل قابل رویت است که افت استحکام در هر سه نمونه تقریبا یک باره اتفاق افتاده و احتمالا شکست به صورت ترد اتفاق صورت گرفته است. نتایج استحکام خمشی بیشینه در جدول ۲ آورده شده است. میانگین استحکام خمشی تقریبا ۲۴۵ MPa به دست آمد، که مقدار کم‌تری نسبت به کامپوزیت‌های سه تایی C/C_f-ZrB_2-SiC-ZrC می باشد و احتمالا به خاطر عدم حضور ZrC و تفاوت دانسیته قطعات می‌باشد. هم چنین نتایج مربوط به دانسیته بالک و درصد تخلخل ظاهری نیز در جدول ۳ آورده شد. برای دانسیته بالک طبق نتایج سه نمونه مورد آزمایش مقدار میانگین ۵/۰۳ به دست آمد. همین طور برای درصد تخلخل ظاهری مقدار میانگین۶/۱ محاسبه شد.

جدول ۲- نتایج استحکام خمشی کامپوزیت ZrB_2-SiC-C_f/C

نمونه	S1	S2	S3
استحکام خمشی (MPa)	۲۳۷	۲۲۴	۲۸۳

جدول ۳- نتایج دانسیته و درصد تخلخل ظاهری کامپوزیت ZrB2-SiC-Cf/C

نمونه	S1	S2	S3
دانسیته بالک (g/cm^3)	۴/۶	۴/۲	۵/۱
درصد تخلخل ظاهری	۶/۳	۵/۹	۶/۱

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

۳-۱-۲- بررسی نتایج شعله اکسی‌استیلن

آزمون فرسایش به وسیله شعله اکسی‌استیلن روی کامپوزیت C/C_f-ZrB_2-SiC انجام شد. دمای سطحی تا حدود ۲۶۰۰°C و برای مدت زمان ۱۲۰ ثانیه صورت پذیرفت. فاکتورهای مختلف تست برای سه نمونه کامپوزیتی در جدول ۴ نشان داده شده است. هم‌چنین نرخ فرسایش خطی و جرمی میانگین نمونه‌ها در جدول ۵ ذکر شده است.

میانگین نرخ فرسایش خطی میانگین برای نمونه‌ها ۱/۷۰ µm/s به دست آمد. میانگین نرخ فرسایش جرمی میانگین نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده $3/41\ g/s*10^{-4}$ اندازه‌گیری شد.

برخی محققان به نرخ فرسایش جرمی منفی دست یافته‌اند که این علامت منفی نشان از افزایش وزن در حین فرایند فرسایش با شعله اکسی‌استیلن دارد، زیرا به طور مثال با تبدیل ZrC به ZrO_2 طبعا شاهد افزایش وزن خواهیم بود.

دوی لی[1] و همکارانش [۱۴] نیز به اعداد ۱/۱۷ µm/s و ۱/۶۵ mg/s برای نرخ خطی و جرمی میانگین در دمای ۲۴۰۰°C با استفاده از قانون چگالی مخلوط‌ها، چگالی تئوری کامپوزیت مقدار $5/87\ gr/cm^3$ به دست آمد. لذا کامپوزیت به صورت نسبی حدودا ۸۹٪ به تراکم رسیده است.

دست یافتند. در حین آزمون با شعله اکسی‌استیلن به این دلیل که قطعاتی ریز از نمونه جدا شد (در اثر فشار ناشی از شعله)، به جای افزایش وزن، کاهش وزن مشاهده شد. تغییر ترکیب و وجود ZrC می‌تواند به افزایش خواص فرسایش کمک کند. در مقایسه با نمونه‌های کامپوزیتی سه‌تایی C/C_f-ZrC-ZrB_2-SiC خواص فرسایشی نمونه‌های تولید شده پایین‌تر است که احتمالا بیانگر تاثیر بالای ZrC در افزایش خواص مقاومت به اکسیداسیون می‌باشد.

۳-۲- بررسی نتایج نمونه‌های C/C_f-ZrB_2-ZrC-SiC

۳-۲-۱- بررسی‌های فازی با استفاده از آزمون پراش اشعه ایکس (XRD)

نتایج آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌های B1-P،B1 ، B2-P و B2 در شکل ۸ نمایش داده شده است. نمونه‌های B1 و B2 بدون پرس و نمونه‌های B1-P و B2-P پرس‌شده تحت فشار ۵ بار می‌باشند.

جدول ۴- نرخ فرسایش خطی و جرمی نمونه‌های کامپوزیتی زیر شعله آزمون فرسایش

نمونه	دمای سطح نمونه (T_f)	دمای سطح پشتی نمونه (T_b)	زمان فرسایش (s)	نرخ فرسایش جرمی ($g/s*10^{-4}$)	نرخ فرسایش خطی (µm/s)
S1	۲۶۰۰	۲۳۰۰	۱۲۰	۲/۴۴	۱/۸۴
S2	۲۶۰۰	۲۳۰۰	۱۲۰	۲/۸۱	۲/۰۲
S3	۲۶۰۰	۲۳۰۰	۱۲۰	۲/۳۴	۱/۶۱

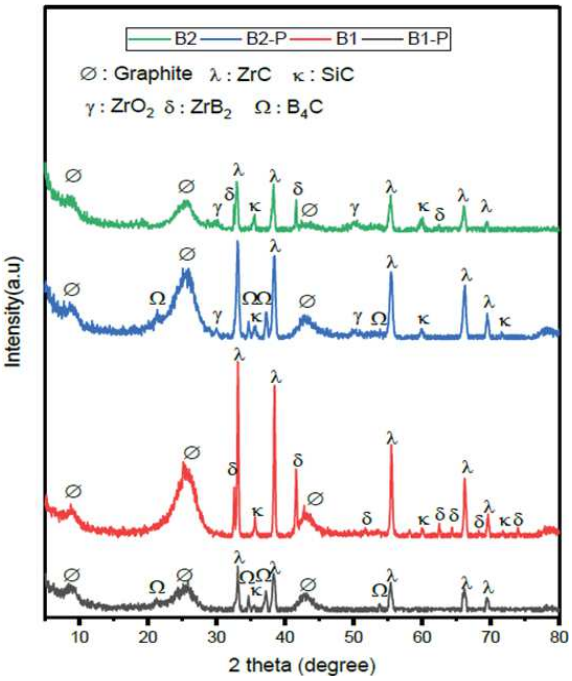
جدول ۵- نتایج فرسایش خطی و جرمی میانگین کامپوزیت C/C_f-ZrB_2-SiC

نام نمونه	نرخ فرسایش جرمی میانگین ($g/s*10^{-4}$)	نرخ فرسایش خطی میانگین (µm/s)
C/C_f-ZrB_2-SiC	۳/۲۸	۲/۱۶

[1] De-Wei Ni

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]



شکل ۸- طیف پراش اشعه ایکس نمونه‌های کامپوزیت- سرامیک C/C_f-ZrB_2-ZrC-SiC

در نمونه‌ی B2 مقداری ZrO_2 نانوکریستالی واکنش نکرده همان‌طور که گفتیم در هنگام عملیات حرارتی پیش‌سازهای اولیه با یکدیگر واکنش‌داده و فازهای ZrB_2، ZrC و SiC و هم چنین کربن پسماند پدید می‌آیند. $ZrSiO_4$ در دمای کم‌تر از ۱۰۰۰°C به SiO_2 و ZrO_2 تجزیه‌شده و این‌ها در ادامه با کربن واکنش داده و SiC و ZrC تشکیل می‌شوند. هم‌چنین بخشی از ZrO_2 با B_4C واکنش می‌دهد تا ZrB_2 تشکیل شود. احتملا همه SiO_2 در ادامه واکنش‌کرده یا مقدار نهایی آن بسیارکم بوده که پیک مربوط به آن قابل چشم‌پوشی بوده است. نمونه‌های B2 و B2-P که حاوی Si آزاد بودند نسبت به دو نمونه‌ی دیگر که ترکیبشان فاقد Si آزاد بود مقدار SiC بیش‌تری نشان دادند.

مشاهده شد که احتمال زیاد این بقایای ZrO_2 از تجزیه زیرکون هستند که بخاطر واکنش Si آزاد با C و مصرف آن و باقی نماندن کربن در اطراف ZrO_2 این‌ها بدون واکنش به همین صورت باقی مانده‌اند. این زیرکونیای آزاد واکنش نکرده برای سیستم می‌تواند مضر باشد زیرا در دماهای بالا به دلیل تغییر فاز منجر به ایجاد ریزترک‌ها شوند.

نمونه‌های B2-P و B1-P تقریبا نتایج مشابهی نشان دادند، فقط مقدار SiC در نمونه B2-P بخاطر Si آزاد نسبتا بالاتر بود. در نمونه‌های فشرده شده واکنش‌های حرارتی کاملا رخ نداد. آن‌ها حاوی B_4C واکنش نکرده بودند در حالی که اثری از ZrB_2 مشاهده نشد که احتمالا به دلیل تجمع گازهای CO بین لایه‌های فشرده شده از کربن است که از پیشرفت واکنش جلوگیری کرده است. به نظر می‌رسد چنین پیشگیری تاثیر بیش‌تری در شکل‌گیری ZrB_2 نسبت به سایر ترکیبات داشته است. علاوه بر این نمونه B2-P اثری از ZrO_2 را نشان می‌دهد که این ماده برای استفاده ایده‌آل نیست. نمونه B1 بدون هیچ نشانه‌ای از ترکیبات بدون واکنش، نتایج کاملا خوبی را نشان داد. علاوه بر این، کم‌ترین مقدار C را در مقایسه با سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد که کامل بودن واکنش بین پیش‌سازها را نشان می‌دهد.

جداول ۶ و ۷ به ترتیب اندازه بلورک‌های هر یک از ذرات در کامپوزیت‌های ساخته شده و آنالیز کمی فازی آن‌ها بر اساس روش ریتولد و نرم‌افزار MAUD نشان می‌دهد. اندازه بلورک برای هر نمونه پودری با استفاده از نرم‌افزار Xpert به صورت تقریبی محاسبه و در جدول ۶ آورده شده است. مشاهده می‌شود که بلورک‌ها درابعاد نانومتری هستند.

۳-۲-۲- بررسی‌های ریز ساختاری با استفاده از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

تصاویر SEM نمونه‌های B1 و B1-P را در شکل ۹ مشاهده

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

می‌کنید. مناطق خاکستری رنگ در تصاویر نشان‌دهنده‌ی الیاف کربن و نواحی سفید رنگ ترکیبات UHTCs را نشان می‌دهد. مطابق شکل a که مربوط به نمونه پرس نشده B1 می‌باشد ذرات و فیبرهای پارچه‌های کربنی با یکدیگر آمیخته شده‌اند و ذرات UHTCs به نحوی فیبرها را به هم چسبانده و آن‌ها را کنار یکدیگر نگه می‌دارند.

در شکل b که مربوط به نمونه‌ی B1-P می‌باشد فشار ناشی از فرایند پرس سبب جدا شدن برخی ذرات از درون لایه‌های پارچه‌ای شده است و توزیع ذرات از میان لایه‌ها را به هم می‌ریزد. تصاویر c و d مربوط به نمونه‌های B1 و B1-P پس از تست شعله اکسی‌استیلن می‌باشند. نمونه‌ها در معرض شعله در دمای ۱۵۰۰°C به مدت ۱۲۰ ثانیه قرار گرفتند. از این تصاویر مشاهده می‌شود که فرایند فرسایش با بیرون‌زدن الیاف و شکستگی انجام پذیرفته است. تصویر d میزان فرسایش بیش‌تر در نمونه B1-P را نسبت به نمونه B1 در تصویر c نشان می‌دهد که احتمالا به دلیل عدم وجود فاز ZrB_2 و SiC ایجاد می‌شود، که نمی‌تواند ازکامپوزیت در برابر شار گرما محافظت کند. نمونه B1 توزیع بهتری از ماتریس UHTCs در اطراف الیاف دارد. در نمونه فشرده شده B1-P سنتز کامل فاز و توزیع ماتریس UHTCs مانع عملکرد درست کامپوزیت شده است. مشاهده می‌شود که پودرهای پیش‌ساز قبل از عملیات حرارتی به الیاف کربن اضافه می‌شوند و پودرهای مذاب در پارچه‌های فیبر توزیع‌شده و منافذ بین الیاف را در نمونه B1 پر می‌کند که منجر به مقاومت به فرسایش حرارتی بهتر می‌شود. آن چه که باعث افت مقاومت به فرسایش در نمونه B1-P و خردشدگی رشته‌های الیاف پارچه‌های کربنی شده است عدم وجود کافی ذرات UHTCs در میان آن‌هاست.

در نمونه A1 ذرات UHTCs به خوبی رشته‌ها را کنار یک‌دیگر نگه داشته است و اجازه از هم گسیختگی و خردشدن را به آنان نداده است و پس از تست نظم نسبتا مشخصی در سیستم برقرار است. این در حالی ست که در نمونه‌ی B1-P که فاقد فازهای کافی UHTCs است فیبرها کاملا خرد شده و با UHTCs آمیخته شده‌اند.

جدول ۶- اندازه بلورک فازهای موجود در کامپوزیت‌های ساخته شده

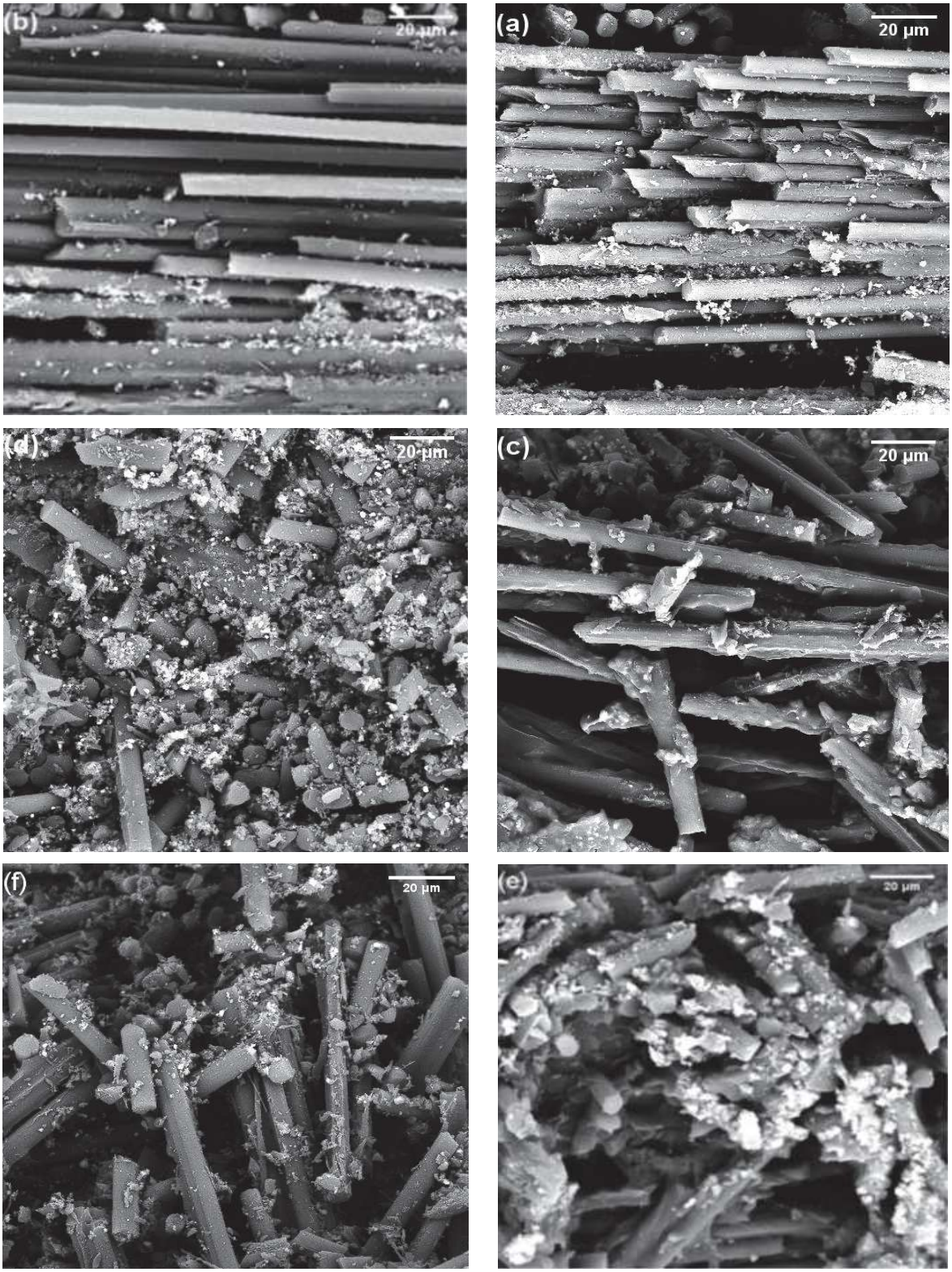
اندازه بلورک/ نام نمونه	ZrC(nm)	ZrB_2(nm)	SiC(nm)	ZrO_2(nm)	B_4C(nm)
B1	۲۵۵	۱۳۴	۱۰۶	-	-
B2	۲۳۵	۹۶	۸۶	۱۶	-
B1-P	۲۷۹	-	۹۶	-	۲۶
B2-P	۲۶۴	-	۳۵	۷۱	۳۱

جدول ۷- آنالیز فازی کمی کامپوزیت‌های ساخته شده

درصدفاز/ نام نمونه	ZrC(wt%)	ZrB_2(wt%)	SiC(wt%)	ZrO_2(wt%)	B_4C(wt%)	Carbon(wt%)
B1	۴۲	۲۱	۱۴	-	-	۲۳
B2	۴۰	۱۸	۱۸	۸	-	۱۶
B1-P	۴۶	-	۱۹	-	۱۲	۱۳
B2-P	۴۵	-	۹	۵	۱۵	۲۶

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]



شکل ۹- تصاویر الکترون‌های برگشتی از کامپوزیت‌های زینترشده قبل از تست فرسایش a و b و پس از تست فرسایش c، d، e و f

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

تصاویر e و f به ترتیب نمونه‌های B2 و B2-P را نشان می‌دهند. این نمونه‌ها حین تست شعله عملکرد متوسطی از خود نشان دادند و به دلیل عدم وجود فازهای UHTCs فیبرها به صورت کامل بیرون‌زده و سیستم را مختل کرده‌اند.

۳-۳- دانسیته و استحکام

جداول ۸ و ۹ نتایج دانسیته، درصد تخلخل ظاهری و استحکام کامپوزیت- سرامیک‌های C/C_f-ZrB_2-ZrC-SiC زینتر شده در دمای ۱۶۰۰°C را نشان می‌دهد.

جدول ۸- نتایج استحکام خمشی کامپوزیت ZrB_2-SiC-ZrC-C_f/C

نمونه	B1	B2	B1-P	B2-P
استحکام خمشی (MPa)	235	219	336	۲۸۷

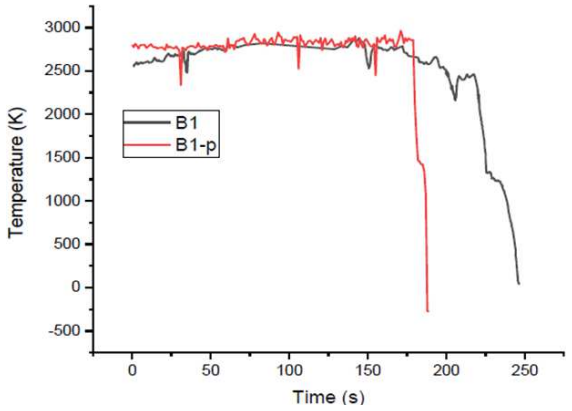
جدول ۹- دانسیته بالک و درصد تخلخل ظاهری نمونه‌های زینترشده

نمونه	B1	B2	B1-P	B2-P
دانسیته بالک (g/cm^3)	۵/۰۲	۵/۰۸	۵/۴۶	۵/۵۰
درصد تخلخل ظاهری	۱۶/۳	۱۳/۶	۶/۱	۵/۹

مطابق نتایج نمونه B1-P به دلیل انجام عملیات پرس دانسیته بالاتری نسبت به نمونه B1 دارد که درنتیجه درصد تخلخل کم‌تری نیز از خود نشان می‌دهد. هم‌چنین نمونه‌های پرس شده نسبت به نمونه‌های پرس‌نشده استحکام بالاتری دارند که دلیل عمده آن بالاتر بودن دانسیته و کم‌تربودن تخلخل در سیستم است. هم‌چنین قابل ذکر است که نمونه‌های حاوی سیلیکون آزاد استحکام کم‌تری نسبت به نمونه‌های بدون سیلیکون آزاد داشتند. علت این پدیده را می‌توان به وجود زیرکونیا آزاد و باقی مانده از تجزیه زیرکون نسبت داد که به دلیل استحاله‌های فازی در دماهای بالا حین پخت منجر به القا تنش در ترک در زمینه می‌گردد.

۳-۴- تست مقاومت به فرسایش با شعله اکسی استیلن

نمونه‌های B1 و B1-P تحت آزمون فرسایش با شعله اکسی استیلن قرار گرفتند. نمودار تغییرات دمای سطحی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. طبق نمودار مشاهده می‌شود که دمای شعله اکسی‌استیلن در سطح نمونه حدودا ۲۶۰۰°C بوده است. هم‌چنین زمان فرسایش توسط شعله ۱۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد.



شکل ۱۰- تغییرات دما- زمان سطح کامپوزیت‌ها حین فرسایش

نرخ فرسایش خطی و جرمی نمونه‌ها در جدول ۱۰ آورده شده است. میانگین نرخ فرسایش خطی نمونه B1 ۱/۹۴ میکرومتر بر گرم است که نسبت به کار سایر محققان نتیجه ای مطلوب به نظر می‌رسد.

ژی[۱] و همکارانش [۱۱] برای کامپوزیت C/C_f-ZrC-SiC تولید

[۱] Xie jing

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

شده به روش PIP به نرخ فرسایش خطی ۲/۴۸ میکرومتر بر گرم دست یافتند. آن‌ها دریافته بودند که هر قدر میزان ZrC موجود در بدنه بیش‌تر باشد نرخ فرسایش خطی بهتر خواهد بود لذا می‌توان بهبود در نرخ فرسایش خطی در پژوهش حاضر را به بیش‌تر بودن مقدار ZrC در نمونه نسبت به نمونه‌های تولید شده توسط ایشان نسبت داد. میانگین نرخ فرسایش جرمی نمونه کامپوزیتی B1 تولید شده ۱/۷ میلی‌گرم بر ثانیه اندازه‌گیری شد.

جدول ۱۰- نتایج نرخ فرسایش جرمی و خطی کامپوزیت های B1 و B1-P

نام نمونه	نرخ فرسایش جرمی میانگین ($g/s*10^{-4}$)	نرخ فرسایش خطی میانگین ($\mu m/s$)
B1	۴/۸۶	۳/۱۱
B1-P	۲/۴۱	۱/۷۴

در مورد نرخ فرسایش جرمی محققان یاد شده به عدد ۳/۵- دست یافتند. علامت منفی نشان از افزایش وزن در حین فرآیند فرسایش با شعله اکسی‌استیلن دارد؛ زیرا به طور مثال با تبدیل ZrC به ZrO_2 طبعا شاهد افزایش وزن خواهیم بود. در حین آزمون با شعله اکسی‌استیلن به این دلیل که قطعاتی ریز از نمونه جدا شد (در اثر فشار ناشی از شعله) به جای افزایش وزن، کاهش وزن مشاهده شد. هم‌چنین نرخ فرسایش جرمی کم‌تری نسبت به نمونه‌های C/C و C/C_f-SiC مشاهده شد که احتمالا خواص به دلیل ZrC و ZrB_2 بهتر شده است. ژائو[۱] و همکارانش [۱۲] نیز به عددی منفی برای نرخ فرسایش جرمی کامپوزیت C/ZrC دست پیدا کردند زیرا علی‌رغم تشکیل لایه اکسیدی بر روی سطح و افزایش وزن، با افزایش زمان فرایند، لایه از روی سطح بلند می‌شود و نرخ فرسایش خطی عددی منفی می‌شود. خواص فرسایشی نمونه‌های تولید شده نسبت به نمونه C/C_f-SiC-ZrB_2 تولیدشده توسط لیو[۲] و همکارانش [۱۳] که به مدت ۶۰ ثانیه نمونه‌ها را مورد فرسایش قرار دادند نیز بهتر است که احتمالا بیانگر تاثیر بالای ZrC در افزایش خواص مقاومت به اکسیداسیون می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با قرارگیری پودر سرامیکی و رزین بین پارچه‌های کربنی طی سیکل‌های پی در پی نمونه‌های کامپوزیتی- سرامیکی C/C_f-ZrB_2-SiC-ZrC و C/C_f-ZrB_2-SiC با روش زینتر بدون فشار تولید شدند. فاز ZrC با قرارگیری بر روی مرزدانه‌ها و جلوگیری از حرکت آن‌ها مانع رشد دانه‌های کامپوزیت شده و در نتیجه با افزایش مقدار ZrC اندازه دانه کوچک‌تر و استحکام افزایش می‌یابد. ذرات ZrC از طریق دو سازوکار تغییر مسیر ترک و پل‌زنی ترک باعث افزایش میزان چقرمگی شکست کامپوزیت‌های C/C_f-ZrB_2-SiC-ZrC می‌شوند. با بررسی‌هایی که صورت گرفت کامپوزیت‌های پرس شده نسبت به پرس نشده استحکام سرد و دانسیته بالاتری از خود نشان دادند. وجود Si آزاد در ترکیب مواد اولیه کامپوزیت C/C_f-ZrB_2-SiC-ZrC منجر به عدم واکنش کامل زیرکونیا می‌شود که به دلیل استحاله‌های فازی و ایجاد ریزترک خواص استحکام سرد کامپوزیت را به شدت کاهش می‌دهد. چگالی میانگین برای نمونه‌های کامپوزیتی پرس نشده و پرس شده C/C_f-ZrB_2-SiC-ZrC به ترتیب تقریبا مقادیر

[۱] Xiao

[۲] Liu Yue

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

gr/cm^3 ۵ و gr/cm^3 ۵/۵ و استحکام خمشی این کامپوزیت‌ها به طور میانگین، MPa ۳۰۳ به دست آمد.

نرخ فرسایش خطی نمونه‌های پرس نشده و پرس شده C/C_f-ZrB_2-SiC-ZrC در آزمون فرسایش با شعله اکسی‌استیلن به ترتیب تقریبا مقادیر µm/s ۳/۱۱ و ۱/۷۴ و نرخ فرسایش جرمی پرس نشده و پرس شده به ترتیب به طور میانگین ۴/۸۶ و ۲/۴۱ ($g/s*10^{-4}$) اندازه‌گیری شد.

در نمونه‌های C/C_f-ZrB_2-SiC نتایج بهینه‌یابی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش، نمونه بهینه را نمونه‌ای با ۶۵٪ وزنی از پودر سرامیکی و ۴۵٪ وزنی از پارچه‌های کربنی و ۰/۰۲٪ وزنی از الیاف بریده شده مشخص کرد که نتایج بررسی مجدد، تطابق نتایج پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار با داده‌های تجربی را نشان داد.

بررسی سایر خواص مکانیکی نمونه‌ها نیز بهبود آن‌ها را در مقدار بهینه از پودر و الیاف بریده شده نشان داد که افزایش درصد وزنی این الیاف و پودر به دلیل عدم توانایی در توزیع مناسب و تمایل شدید آن‌ها به تجمع وکلوخه شدن افت خواص را در پی داشت. بافت و نظم الیاف کربنی در کامپوزیت‌های دوتایی C/C_f-ZrB_2-SiC پس از تست شعله اکسی‌استیلن دچار اعوجاج و به هم‌ریختگی کمی شد. هم چنین فازهای موجود در سیستم نسبت به قبل تست از نظر ترکیبی و شیمیایی دچار تغییر زیادی نشدند.

چگالی میانگین برای نمونه‌های کامپوزیتی برای نمونه‌های C/C_f-ZrB_2-SiC، gr/cm^3 ۵/۰۳ اندازه‌گیری شد. هم‌چنین استحکام خمشی این کامپوزیت‌ها به طور میانگین MPa ۲۴۵ اندازه‌گیری شد. نرخ فرسایش خطی و جرمی نمونه‌ها به ترتیب µm/s ۲/۱۶ و ۳/۲۸ ($g/s*10^{-4}$) به دست آمد.

مراجع

[1] Liu C, Zhang L, Yuan X, Liu H, Li C, Hou X. Preparation of ZrB_2-ZrC-SiC-ZrO_2 nanopowders with in-situ grown homogeneously dispersed SiC nanowires. Mater Des. 2020.

[2] Akbarpour Shalmani SA, Sobhani M, Mirzaee O, Zakeri M. Effect of HfB_2 and WC additives on the ablation resistance of ZrB_2–SiC composite coating manufactured by SPS. Ceram Int. 2020.

[3] Adibpur F, Tayebifard SA, Zakeri M, Shahedi Asl M. Spark plasma sintering of quadruplet ZrB_2–SiC–ZrC–Cf composites. Ceram Int. 2020; 46(1):156–64.

[4] Ma H Bin, Zhang GJ, Liu HL, Liu JX, Lu Y, Xu FF. Effect of WC or ZrC addition on thermal residual stresses in ZrB_2-SiC ceramics. Mater Des. 2016; 110:340–5.

[5] Xu X, Pan X, Niu Y, Li H, Ni D, Huang S, et al. Difference evaluation on ablation behaviors of ZrC-based and ZrB_2-based UHTCs coatings. Corros Sci.2021; 180 (August2020).

[6] S. Q. Guo, Y. Kagawa, T. Nishimura, D. Chung, and J. M. Yang, "Mechanical and physical behavior of spark plasma sintered ZrC-ZrB_2-SiC composites," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 28, no. 6, pp. 1279–1285, Jan. 2008.

[7] J. Xie, K. Li, H. Li, Q. Fu, and L. Guo, "Ablation behavior and mechanism of C/C-ZrC-SiC composites under an oxyacetylene torch at 3000°c," Ceram. Int., vol. 39, no.4, pp. 4171– 4178, May 2013, doi: 10.1016/j.ceramint.2012.

[8] D. Sciti, S. Guicciardi, and M. Nygren, "Spark plasma sintering and mechanical behaviour of ZrC-based composites," Scr. Mater., vol. 59, no. 6, pp. 638–641, Sep.2008, doi: 10.1016/j.scriptamat.2008.

[9] D. Zhao, C. Zhang, H. Hu, and Y. Zhang, "Ablation behavior and mechanism of 3D C/ZrC composite in oxyacetylene torch environment," Compos. Sci. Technol., vol. 71, no. 11, pp. 1392–1396, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.compscitech.2011.

[10] S. Chen, C. Zhang, Y. Zhang, D. Zhao, H. Hu, and Z. Zhang, "Mechanism of ablation of 3D C/ZrC-SiC composite under an oxyacetylene flame," Corros. Sci., vol.68, pp. 168–175, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.corsci.2012.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

[11] Xie, Jing, et al. "Ablation behavior and mechanism of C/C–ZrC–SiC composites under an oxyacetylene torch at 3000°C." *Ceramics International* 39.4 (2013):4171.4178.

[12] Huang D, Zhang M, Huang Q, Wang L, Xue L, Tang X, et al. Ablation mechanism of r infiltration and pyrolysis with preform SiC composite fabricated by polyme-ZrC-ZrB_2-C/C.9–. Corros Sci. 2015.

[13] Liu, Yue, et al. "Erosion resistance of C/C-ZrB-SiC composites exposed to oxyacetylene torch." Erosion resistance of C/C torch." Journal of the European Ceramic Society 36.15 (2016).

[14] B. W. Chen, D. W. Ni, C. J. Liao, Y. L. Jiang, J. Lu, and S. M. Dong, "Long-term ablation behavior and mechanisms of 2D-C_f/ZrB_2-SiC composites at temperatures up to2400°C," Corros. Sci., vol. 177, no. July, 2020.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]

Iranian Journal of
Ceramic Science & Engineering
Vol. 11, No. 1, 2022

Fabrication and Inspection of C/C_f-Zrb_2-Zrc-Sic and C/C_f-Zrb_2-Sic Composite Parts Resistant to Ablation by Pressureless Sintering Method

Mehri Mashhadi [1], Mohamad Hosein Bakhshi*

[1]Faculty of Materials and Manufacturing Engineering, Malek Ashtar University of Technology

* mohammadhoseinb1994@gmail.com

Abstract: In this research, the aim is to achieve strong and ablation-resistant composite parts C/C_f-ZrB_2-ZrC-SiC and C/Cf-ZrB_2-SiC by non-pressure sintering method. C/C_f-ZrB_2-SiC samples were prepared using synthesized ZrB_2 and SiC powders between layers of resin-impregnated carbon fabric. After pressing with pressure 5 times at 1600 °C and heat treatment for 2 hours in a controlled atmosphere furnace under Ar atmosphere. In the next step, C/C_f-ZrB_2-ZrC-SiC composite parts were prepared to investigate the effect of ZrC addition and compare it with C/C_f-ZrB_2-SiC samples. This was done by synthesizing ZrB_2-ZrC-SiC ceramic powder between layers of carbon fabrics using zircon ($ZrSiO_4$), B_4C, activated carbon, with or without Si, along with shredded carbon fibers. For this purpose, the prepared powders after wetting and drying along with resin were sprayed between carbon fabrics and the resulting samples were pressed 5 times by cold pressing after 20 layers. After pressing and finding the raw strength, the samples were transferred to a control atmosphere furnace under Ar atmosphere and subjected to heat treatment for 2 hours at 1600°C. Scanning electron microscopy (SEM) and X-ray analysis (XRD) were used to investigate the microstructural and fuzzy properties of the samples, and the three-point flexural strength test and oxytocin flame were used to investigate the mechanical properties and oxidation resistance of composites. The linear erosion rates of C/C_f-ZrB_2-SiC and C/C_f-ZrB_2-SiC-ZrC samples in the oxytocin flame abrasion test were 2.16 and 1.74 μm/s, respectively, and the average erosion rates were 3.28. And 2.41 (4-10 g/s*) were measured. Also, the mean density values for C/C_f-ZrB_2-SiC and C/C_f-ZrB_2-SiC-ZrC samples were 4.67 and 05.03 gr/cm3, respectively, and the flexural strength was 303 and 245 MPa, respectively.

Keywords: C/C_f-ZrB_2-ZrC-SiC, ablation-resistant, C/C_f-ZrB_2-SiC, pressureless sintering, UHTCs.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.14.7]