

تأثیر افزودن نانو گرافیت بر سختی و چرمگی شکست کامپوزیت‌های ساخته شده به روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای ZrB₂-SiC

مهدی شاهدی اصل^۱، مهران جابری زمهریر^۲، زهرا احمدی^۳، سروش پرویزی^{*}

^۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی مواد، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۳ استادیار دانشکده مهندسی مواد و فناوری‌های نوین، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

* parvizi@sru.ac.ir

چکیده:

کامپوزیت‌های دما بالای دی‌بورید زیرکونیم-کاربید سیلیسیم به روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای و با افزودن مقادیر مختلف نانو ورقه‌های گرافیت (۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی) ساخته شدند. تفجوشی نمونه‌ها در دمای ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۷ دقیقه در محیط خلاء و با اعمال فشار بیرونی ۴۰ مگاپاسکال به انجام رسید. تأثیر نانو ورقه‌های گرافیتی بر سختی و چرمگی شکست نمونه‌ها بررسی و تحلیل شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش میزان افزودنی نانو گرافیت، سختی کامپوزیت‌ها کمابیش به صورت خطی از ۱۹/۵ گیگاپاسکال برای نمونه فاقد افزودنی به ۱۲/۱ گیگاپاسکال برای نمونه تقویت شده با ۱۰ درصد وزنی نانو گرافیت کاهش یافت. عکس این روند درباره چرمگی شکست نمونه‌ها دیده شد به گونه‌ای که از ۴/۳ مگاپاسکال جذر متر در نمونه فاقد افزودنی به ۱/۲ مگاپاسکال جذر متر برای کامپوزیت دارای ۷/۵ درصد وزنی نانو گرافیت افزایش یافت. افت سختی نمونه‌ها با افزایش مقدار نانو گرافیت به نرمی ذاتی این ماده نسبت داده شد و لی ارتقای چشمگیر چرمگی شکست با افزوده شدن این نانو ماده، به فعال شدن سازوکارهای گوناگون چرمه شدن مرتبط بود.

اطلاعات مقاله:

دريافت: ۳ دی ۱۳۹۶

پذيرش: ۲۴ اردبیلهشت ۱۳۹۷

كلید واژه:

دی‌بورید زیرکونیم، کاربید سیلیسیم، تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای، نانو گرافیت، سختی، چرمگی شکست

۱- مقدمه
گرمایی بالا و پایداری شیمیایی خوبی دارد [۱-۴]. برخورداری از این چنین ویژگی‌هایی، سبب شده است که سرامیک‌های دی‌بورید زیرکونیم برای کاربردهای سازه‌ای دما بالا همچون ابزارهای برش، سپرهای گرمایی در تجهیزات فراصوتی، بوتهای ذوب فلز و الکترودهای دما بالا سودمند باشد [۵-۷]. پژوهش‌های نوین نشان داد که

دی‌بورید زیرکونیم (ZrB₂) دارای پیوند شیمیایی غالب اشتراکی با ساختار AlB₂ هگزاگونال است. این ماده دمای ذوب بسیار بالا (بیش از ۳۲۰۰ درجه سانتی‌گراد)، مدول کشسان زیاد، سختی زیاد، مقاومت الکتریکی پایین، رسانش



چگالش، قابلیت تحمل بار نیز حفظ شود. هر چند چرمگی شکست نامطلوب سرامیک‌های ZrB_2 -SiC همچنان مانع برای کاربرد آن در محیط‌های تهاجمی است. تا به امروز ذرات ZrO_2 [۱۵]، ویسکر SiC [۱۶]، فیبر کربن [۱۷]، گرافیت ورقه‌ای [۱۸] و غیره در جهت چرمگه کردن کامپوزیت‌های پایه ZrB_2 افزوده شده‌اند. دمای انتقال فازی ZrO_2 (نزدیک ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) با توجه به دمای کاری پیش‌بینی شده برای سرامیک‌های پایه ZrB_2 (بالاتر از ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد)، توانایی چرمگه کردن ذرات ZrO_2 را محدود کرده است. ویسکر SiC نیز به دلیل خطرات ناشی از بیماری‌زا بودن آنها پیشنهاد نمی‌شود [۱۹]. همچنان، تخریب و شکسته شدن فیبرهای کربنی، ویژگی‌های این کامپوزیت‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

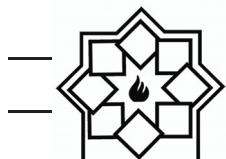
گرافیت به واسطه استحکام زیاد، دمای ذوب بالا، ساختار لایه‌ای و به تبع آن ویژگی روانسازی، مقاومت به شوک گرمایی خوب و چرمگی شکست بالای آن، یک ماده جذاب برای کاربردهای دما بالا است [۲۰]. پژوهشگران ثابت کرده‌اند که چرمگی شکست سرامیک‌های ZrB_2 -SiC با افزودن گرافیت ورقه‌ای که نسبت طول به عرض بالایی دارد، بیشتر بهبود می‌یابد. همچنان، افزودن گرافیت به این کامپوزیت در مقایسه با کامپوزیت بدون افزودنی می‌تواند از استحکام خمشی آن به میزان ۳۰۰ مگاپاسکال بکاهد [۲۱] و [۲۲]. اما در مقابل، کامپوزیت ZrB_2 -SiC-graphite در دمای ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز استحکام خود را می‌تواند تا ۱۲۰ مگاپاسکال حفظ کند [۲۲].

در این پژوهش، تاثیر افزودن مقادیر مختلف نانو گرافیت بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ZrB_2 -SiC که به روش

چگالش کامل دیبورید زیرکونیم -بدون اعمال فشار بیرونی به هنگام فرآیند تفحوشی- دشوار است زیرا این ماده پیوند اشتراکی قوی و ضریب نفوذ در خود پایینی دارد و همچنان رشد ناهمسانگرد دانه و حبس شدن تخلخل‌های ناشی از ساختار بلوری هگزاگونال، چگالش ماده را با چالش روپرس می‌سازد [۹-۸]. نیاز به سرامیک‌های ZrB_2 چگال برای نخستین بار در سازه‌های هسته‌ای با مقاطع جذب نوترون بالا احساس شد و سپس با گسترش پژوهش درباره چگال شدن این ماده به برنامه‌های هوافضایی راه یافت زیرا چگالی پایین، موجب افت خواص ترمومکانیکی می‌شود [۱۰].

در پژوهش‌های پیشین نشان داده شد که بدون ZrB_2 افزودنی تنها به روش پرس گرم در دمای ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با فشار ۲۰ تا ۳۰ مگاپاسکال یا در دماهای پایین‌تر (۱۷۹۰ تا ۱۸۴۰ درجه سانتی‌گراد) با فشار بسیار بالا (۸۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاپاسکال) چگال می‌شود [۱۱]. در سال‌های اخیر، تفحوشی پلاسمای جرقه‌ای نیز برای ساخت سرامیک‌های ZrB_2 -SiC به کار گرفته شده است که با یک جریان پالسی DC و در بی بهبود سینتیک تفحوشی، منجر به تولید نمونه‌های چگال می‌شود [۱۲-۱۳]. اگرچه ZrB_2 چگال مزایای بسیاری دارد، اما ویژگی‌های ذاتی آن مانند چرمگی شکست پایین (شکست زود هنگام به علت شکست ترد) و مقاومت اندک به اکسایش دما بالای آن هنوز نیز از محدودیت‌های بزرگ برای استفاده گستردگی آن است [۱۳ و ۱۴].

یکی از روش‌های غلبه بر مشکلات تولید سرامیک‌های پایه ZrB_2 ، اصلاح ساختار و ترکیب (برای نمونه کامپوزیت ZrB_2 و SiC) است، به گونه‌ای که همزمان با افزایش

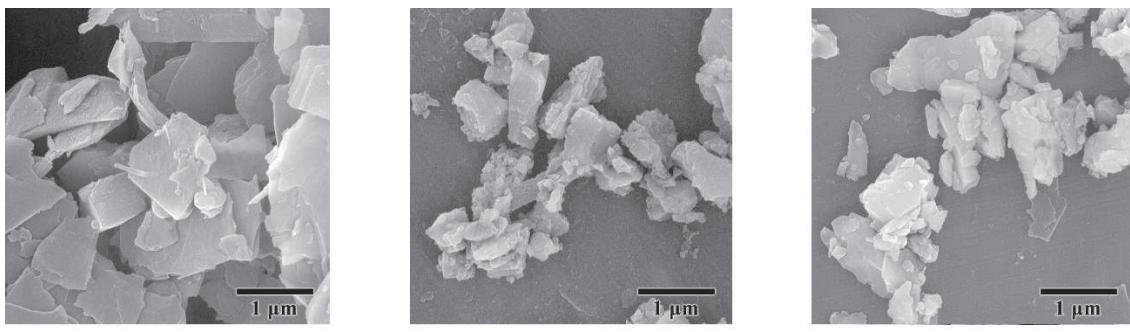


مجموعه C ZrB₂-SiC اضافه شد. بدین منظور، پودرهای مواد اولیه نخست به صورت مجزا در اتانول به مدت ۶۰ دقیقه به روش فرماصوتی پراکنده شدند و سپس اختلاط آنها با یکدیگر به مدت ۳۰ دقیقه به همان روش به انجام رسید. مخلوط پودر تهیه شده، روی یک هیتر مجهز به همزن مغناطیسی قرار داده شد و پس از تبخیر اتانول، در یک کوره خشک کن ساده برای خشک شدن کامل استقرار یافت. مخلوط پودر خشک شده، پس از خردایش از الک با مش ۱۰۰ عبور داده شد. سرانجام پودرهای آماده شده درون قالب گرافیتی پوشیده شده با فویل گرافیت، ریخته شد و فرآیند تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای در یک کوره پرس گرم تحت خلاء (مدل SPS-20T-10) ساخت چین انجام گرفت. تفجوشی و چگالش همه نمونه‌ها در دمای نهایی ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۷ دقیقه و با اعمال فشار ۴۰ مگاپاسکال به انجام رسید.

تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای ساخته شده است، بررسی خواهد شد.

۲- فعالیت‌های تجربی

در این پژوهش، از پودر ZrB₂ (اندازه ذرات کمتر از ۲ میکرومتر و خلوص ۹۹/۹ درصد)، پودر SiC (اندازه ذرات کمتر از ۵۰۰ نانومتر و خلوص ۹۹ درصد) و نانو ورقه گرافیت (ضخامت کمتر از ۱۰۰ نانومتر و خلوص ۹۹/۵ درصد) خریداری شده از شرکت Xuzhou Hongwu به عنوان مواد اولیه استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از این پودرها در شکل ۱ به نمایش درآمده است. پودرها بر اساس ترکیب‌های از پیش تعیین شده برای نمونه‌های کامپوزیتی، توزین و همگن‌سازی شدند. در همه نمونه‌های کامپوزیتی با زمینه ZrB₂، ۲۵ درصد حجمی فاز تقویت کننده SiC افزوده شد. همچنین افزودنی نانو گرافیت در مقادیر گوناگون ۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی به



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مواد اولیه: (الف) دیبورید زیرکونیم، (ب) کاربید سیلیسیم و (پ) گرافیت.

کامپوزیت‌ها به روش ارشمیدس و در محیط آب مقطر اندازه‌گیری شد. چگالی نظری نمونه‌ها نیز از روی قانون مخلوطها با توجه به درصد حجمی اجزای سازنده هر

پس از پایان فرآیند تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای، لایه‌های گرافیت روی سطوح نمونه‌ها با سنگ الماسه حذف و سپس نمونه‌ها با استفاده از سنباده پرداخت شدند. چگالی بالک



الکترونی روبشی (مدل Mira3 Tescan) ساخت جمهوری چک FESEM مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز شیمیایی عنصری نیز به روش طیف‌سنجی پراکنده انجام شد.

۳- نتایج و بحث

چگالی نسبی هر ماده، یکی از شاخص‌های تعیین کننده خواص مکانیکی (از جمله سختی، چرمگی و استحکام خمی) آن ماده است. برای نمونه، تخلخل‌های موجود در یک نمونه، هیچ گونه مقاومتی در برابر فشار وارد ناشی از فرو رونده ویکرز از خود نشان نمی‌دهند و از این رو، تغییر شکل در سطح قطعه در معرض آزمون سختی‌سنجی، آسان‌تر رخ می‌دهد و عدد سختی کمتری گزارش می‌شود. از همین‌رو، سختی کامپوزیت‌های دارای تخلخل بالا، پایین‌تر از کامپوزیت‌های چگال است. نمودار چگالی نسبی نمونه‌های کامپوزیتی ZrB₂-SiC بر حسب میزان نانو گرافیت افزوده شده در شکل ۲ به نمایش درآمده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، به جز نمونه دارای ۱۰ درصد وزنی که آن نیز کمتر از ۲ درصد تخلخل دارد، همه نمونه‌های دیگر به چگالی نسبی ۱۰۰ درصد نزدیک شده‌اند. بنابراین به نظر می‌رسد که افزودن نانو گرافیت در شرایط فرآوری پژوهش کنونی، تأثیر چندان مشهودی بر چگالش این کامپوزیت‌ها نداشته باشد. هر چند افزودن ۵ درصد وزنی نانو گرافیت، چگالی را به سبب تشکیل فازهای درجای با چگالی ذاتی بیشتر که مهم‌ترین آنها فاز ZrC با چگالی نظری ۶/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و چگال‌تر از هر سه پودر ZrB₂, SiC و گرافیت است،

کامپوزیت برآورد شد. از حاصل تقسیم چگالی بالک بر چگالی نظری هر نمونه، چگالی نسبی آن نمونه به دست آمد. سختی نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه سختی‌سنجی ویکرز ساخت شرکت کوپا پژوهش (مدل KM2/01-92123) و با اعمال نیروی ۵ کیلوگرم به مدت ۱۵ ثانیه (با میانگین ۵ تکرار) به دست آمد. چرمگی شکست نمونه‌ها از راه اندازه‌گیری مستقیم طول ترک‌های ناشی از فرو رونده ویکرز و با فرمول پیشنهادی توسط انتیس و همکاران (رابطه ۱) تعیین شد. در این رابطه، E ضریب کشسانی، H_v سختی ویکرز، L نیروی فرو رونده و C میانگین نصف طول ترک ایجاد شده است. طول ترک‌ها با استفاده از یک میکروسکوپ نوری (مدل Nikon Eclipse MA100) اندازه‌گیری شد.

$$K_{IC} = (0.016 \pm 0.004) \left(\frac{E}{H_v} \right)^{1/2} \left(\frac{L}{C^3 / 2} \right) \quad (1)$$

ضریب کشسانی نیز توسط فرمول پیشنهاد شده از سوی نیلسن و همکاران (رابطه ۲) تخمین زده شد. در این رابطه، E₀ ضریب کشسانی نظری یک کامپوزیت فرضی صد درصد چگال است که به کمک قانون مخلوط‌ها برآورد شده است. ضریب کشسانی ZrB₂, SiC و گرافیت به ترتیب ۵۰۰، ۴۱۰ و ۱۵ گیگاپاسکال در نظر گرفته شد. همچنین P نشان دهنده درصد حجمی تخلخل‌ها و μ ضریب شکل نیلسن (برابر ۰/۴) فرض شده است.

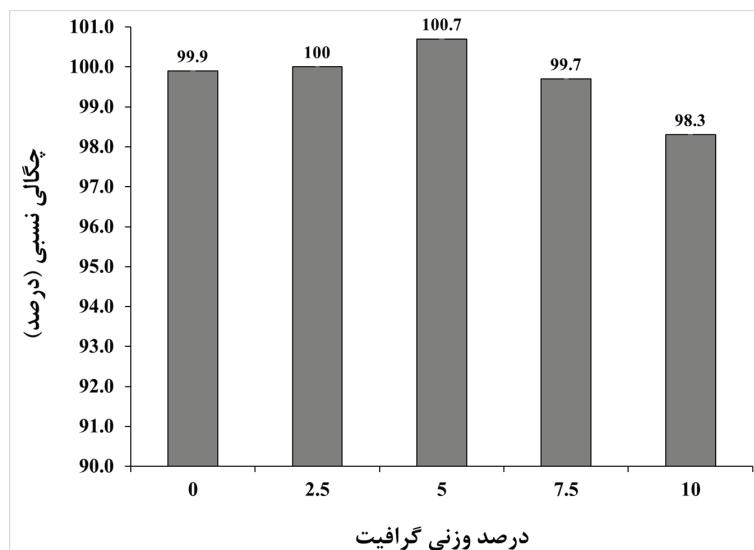
$$E = E_0 \frac{(1 - P)^2}{1 + \frac{P}{\rho - 1}} \quad (2)$$

ریزساختار سطوح شکست و پرداخت شده نمونه‌های تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای شده به کمک میکروسکوپ



عنوان منبع کربنی) با ناخالصی‌های اکسیدی روی سطح ذرات پودر ZrB₂ تشکیل شده است. جزئیات بیشتر و دقیق‌تر در این ارتباط در قالب یک مقاله جداگانه ارایه شده است [۲۳].

اندکی افزایش می‌دهد ولی مقادیر بالاتر این افزودنی موجب افت میزان چگالش می‌شود که دلیل آن را می‌توان به آگلومره شدن ورقه‌های گرافیتی نسبت داد. شایان ذکر است که فاز ZrC در پی واکنش شیمیایی افزودنی گرافیت (به



شکل ۲- چگالی نسبی نمونه‌های کامپوزیتی بر حسب میزان نانو گرافیت افزوده شده.

گرم ساخته شده بود، چگالی نسبی ۹۳/۲ درصد و سختی ویکرز ۱۳/۱ گیگاپاسکال گزارش شده است [۲۴]. با همین مقایسه می‌توان به اهمیت دستیابی به چگالی کامل در کامپوزیت‌ها و تاثیر آن روی مقدار سختی پی برد. همچنین مقدار سختی نمونه چگال و دارای ۵ درصد وزنی نانو گرافیت، برابر ۱۶/۶ گیگاپاسکال اندازه‌گیری شد که کمایش با عدد سختی گزارش شده (۱۶/۵ گیگاپاسکال [۲۴]) برای یک نمونه مشابه کامپوزیت چگال پرس گرم شده یکسان است. همان گونه که در نمودار شکل ۴ دیده می‌شود، سختی کامپوزیت‌ها با افزایش میزان افزودنی نانو گرافیت، تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه همه نمونه‌های کامپوزیتی کمایش به چگالی نسبی

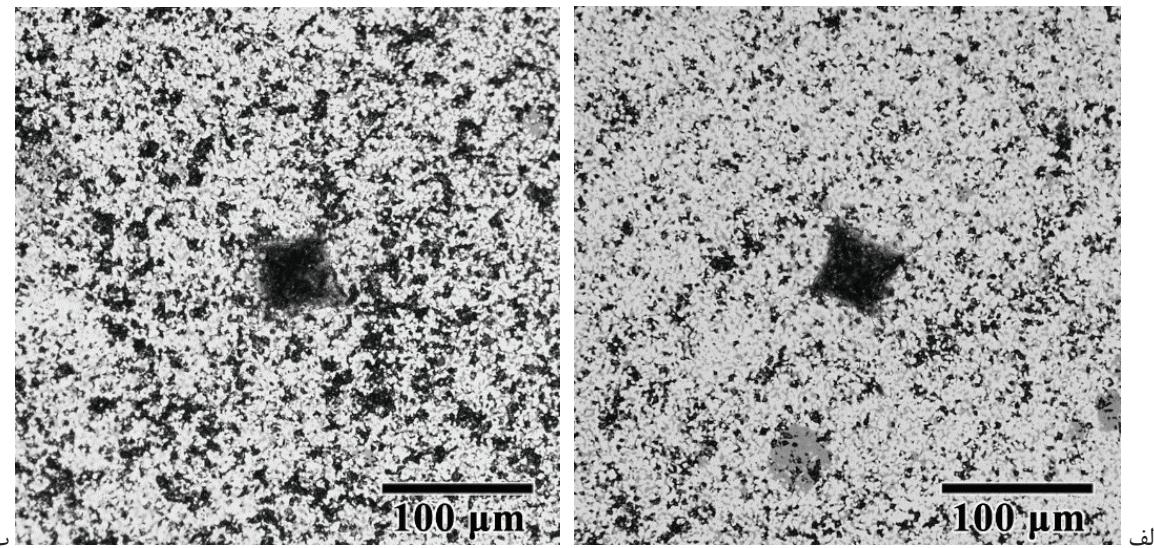
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری از محل اثر فرو رونده ویکرز در آزمون سختی‌سنجدی با نیروی ۵ کیلوگرمی بر نمونه‌های کامپوزیتی فاقد افزودنی و دارای ۲/۵ درصد وزنی افزودنی نانو گرافیت را نشان می‌دهد. در شکل ۴ نیز، عدد سختی ویکرز نمونه‌های کامپوزیتی به عنوان تابعی از مقدار نانو گرافیت افزوده شده به نمایش درآمده است که از ۱۹/۵ گیگاپاسکال برای نمونه فاقد افزودنی نانو گرافیت تا ۱۲/۱ گیگاپاسکال برای نمونه دارای ۱۰ درصد وزنی نانو گرافیت در تغییر است. در این پژوهش، سختی کامپوزیت چگال و فاقد افزودنی به ۱۹/۵ گیگاپاسکال رسید که در قیاس با سایر نمونه‌ها بیشترین عدد سختی را دارد. در یک پژوهش دیگر درباره کامپوزیتی با ترکیب مشابه که به روش پرس



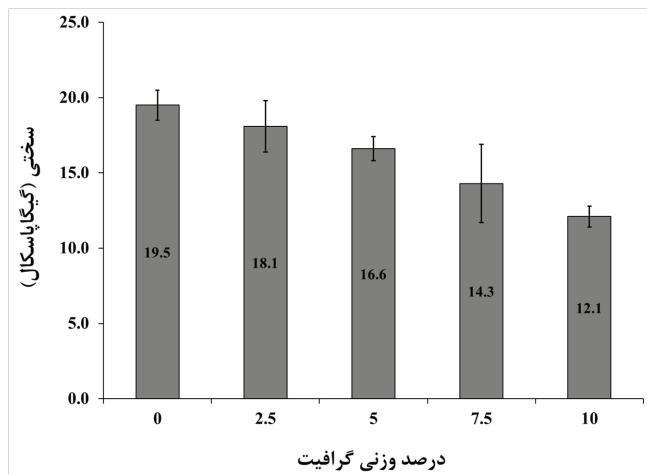
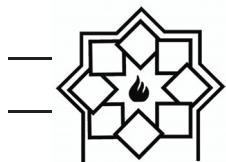
گرم ساخته شده بود، چگالی نسبی $93/2$ درصد و سختی ویکرز $13/1$ گیگاپاسکال گزارش شده است [۲۴]. با همین مقایسه می‌توان به اهمیت دستیابی به چگالی کامل در کامپوزیت‌ها و تاثیر آن روی مقدار سختی پی برد. همچنین مقدار سختی نمونه چگال و دارای 5 درصد وزنی نانو گرافیت، برابر $16/6$ گیگاپاسکال اندازه‌گیری شد که کمایش با عدد سختی گزارش شده $16/5$ گیگاپاسکال [۲۴] برای یک نمونه مشابه کامپوزیت چگال پرس گرم شده یکسان است. همان گونه که در نمودار شکل 4 دیده می‌شود، سختی کامپوزیت‌ها با افزایش میزان افزودنی نانو گرافیت، تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه همه نمونه‌های کامپوزیتی کمایش به چگالی نسبی کامل رسیده‌اند، کاهش در مقدار سختی را می‌توان به افزایش میزان افزودنی نانو گرافیت که ذاتاً ماده‌ای نرم است، نسبت داد.

کامل رسیده‌اند، کاهش در مقدار سختی را می‌توان به افزایش میزان افزودنی نانو گرافیت که ذاتاً ماده‌ای نرم است، نسبت داد.

شکل 3 تصاویر میکروسکوپ نوری از محل اثر فرو رونده ویکرز در آزمون سختی سنجی با نیروی 5 کیلوگرمی بر نمونه‌های کامپوزیتی فاقد افزودنی و دارای $2/5$ درصد وزنی افزودنی نانو گرافیت را نشان می‌دهد. در شکل 4 نیز، عدد سختی ویکرز نمونه‌های کامپوزیتی به عنوان تابعی از مقدار نانو گرافیت افزوده شده به نمایش درآمده است که از $19/5$ گیگاپاسکال برای نمونه فاقد افزودنی نانو گرافیت تا $12/1$ گیگاپاسکال برای نمونه دارای 10 درصد وزنی نانو گرافیت در تغییر است. در این پژوهش، سختی کامپوزیت چگال و فاقد افزودنی به $19/5$ گیگاپاسکال رسید که در قیاس با سایر نمونه‌ها بیشترین عدد سختی را دارد. در یک پژوهش دیگر درباره کامپوزیتی با ترکیب مشابه که به روش پرس

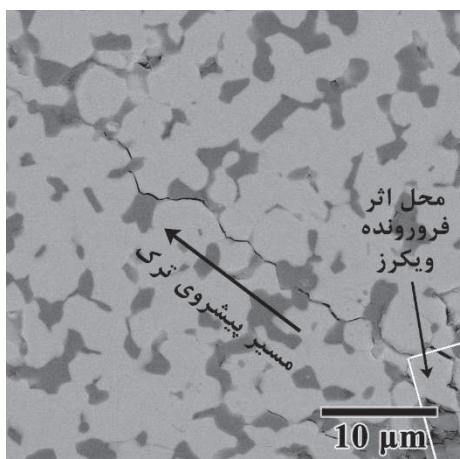


شکل 3 - تصاویر میکروسکوپ نوری از محل اثر فرو رونده ویکرز برای سختی سنجی نمونه‌های کامپوزیتی (الف) فاقد افزودنی نانو گرافیت و (ب) دارای $2/5$ درصد وزنی افزودنی نانو گرافیت.



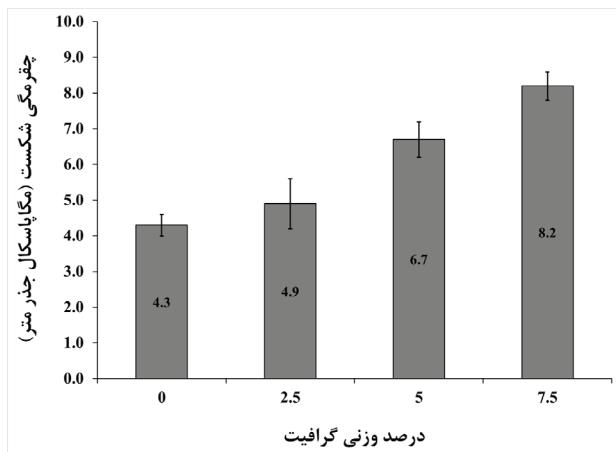
شکل ۴- سختی ویکرز نمونه‌های کامپوزیتی بر حسب میزان نانو گرافیت افزوده شده.

گرافیت افزایش می‌یابد به طوری که برای نمونه دارای ۷/۵ درصد وزنی نانو گرافیت به مقدار بیشینه ۸/۲ مگاپاسکال جذر متر می‌رسد. البته شایان ذکر است که در این پژوهش، امکان اندازه‌گیری چقمرمگی شکست برای نمونه دارای ۱۰ درصد وزنی نانو گرافیت فراهم نشد، زیرا به سبب وجود بیش از حد نانو ورقه‌های گرافیتی در ریزساختار نمونه، طول ترک‌های ناشی از فرو رونده ویکرز به آسانی قابل شناسایی و اندازه‌گیری نبود.



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ترک ایجاد شده در گوشه اثر ناشی از فرو رونده ویکرز در نمونه کامپوزیتی فاقد افزودنی نانو گرافیت.

یکی از ترک‌های ایجاد شده در گوشه اثر ناشی از فرو رونده ویکرز در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده در شکل ۵ برای نمونه کامپوزیتی فاقد افزودنی نانو گرافیت به نمایش درآمده است. مقادیر برآورد شده برای چقمرمگی شکست نمونه‌های کامپوزیتی بر پایه رابطه انتیس نیز در شکل ۶ نمایش شده است. همان گونه که در این نمودار دیده می‌شود، چقمرمگی شکست نمونه چگال فاقد افزودنی نانو گرافیت برابر $4/3$ مگاپاسکال جذر متر است. عدد گزارش شده برای یک نمونه کامپوزیتی مشابه که به روش پرس گرم تفجوشی شده و به چگالی نسبی $93/2$ درصد رسیده است، برابر $3/8$ مگاپاسکال جذر متر به دست آمد. با این مقایسه، اثر منفی تخلخل زیاد روی چقمرمگی شکست نمونه‌های کامپوزیتی نیز آشکار می‌شود. به طور کلی، افزودن SiC به سرامیک‌های پایه ZrB_2 نه تنها باعث بهبود چگالی و سختی می‌شود، بلکه روی مقدار چقمرمگی شکست کامپوزیت‌ها نیز سودمند است. همان گونه که به روشنی در نمودار شکل ۶ دیده می‌شود، عدد چقمرمگی شکست نمونه‌های کامپوزیتی با افزایش درصد وزنی نانو

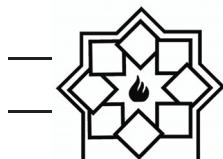


شکل ۶- چermگی شکست نمونه‌های کامپوزیتی بر حسب میزان نانو گرافیت افزوده شده

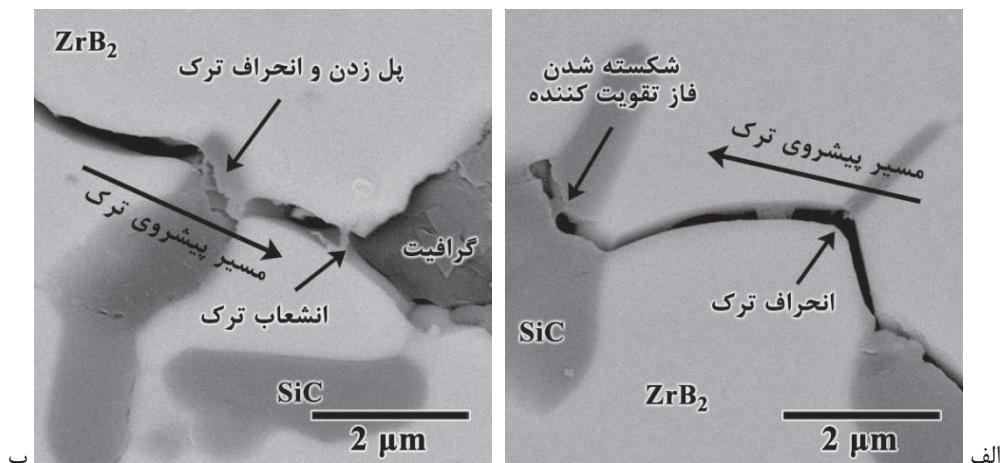
فازهای ثانویه موجود در یک ماده کامپوزیتی منجر به انحراف ترک می‌شود. هر چه شمار و زاویه انحراف بیشتر باشد - که به دلیل تنوع فازهای ثانویه در نمونه‌های تقویت شده با نانو ورقه‌های گرافیتی احتمال بیشتری دارد - نمونه کامپوزیتی به چermگی شکست بالاتری دست خواهد یافت. فازهای ثانویه نه تنها ممکن است از آغاز به مخلوط پودر افزوده شده باشد، بلکه امکان دارد که به هنگام فرآیند تفجوشی به صورت درجا در نمونه کامپوزیتی به وجود آیند. افرون بر انحراف ترک، سازوکارهای چermمه‌سازی دیگری همچون پل زدن ترک، انشعاب ترک و شکسته شدن ذرات SiC بزرگ نیز در نمونه‌های کامپوزیتی دیده می‌شود. بنابراین، افزایش مقدار چermگی شکست کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو ورقه‌های گرافیت را می‌توان به فعال شدن سازوکارهای یاد شده نسبت داد. پدیده انحراف ترک به خوبی در شکل ۷-الف نمایان است و ترک به مجرد اینکه به فاز کاربید سیلیسیم می‌رسد، مسیر حرکت خود را تغییر داده است. انشعاب ترک نیز آشکارا در نمونه کامپوزیتی تقویت شده با نانو گرافیت (شکل ۷-ب) دیده می‌شود که ناشی از برهم‌کنش ترک با فاز نرم گرافیت است. بهبود

افزایش چشمگیر در مقدار چermگی شکست نمونه‌های کامپوزیتی را می‌توان به تاثیر هم‌افزاینده حضور هم‌زمان فازهای کاربید سیلیسیم با اندازه زیر میکرونی و نانو ورقه‌های گرافیتی نسبت داد. شایان ذکر است که افزون بر اینها، به کار بردن نانو گرافیت موجب تشکیل فازهای درجای جدیدی همچون کاربید زیرکونیم و کاربید بور نیز در ریزساختار نهایی کامپوزیت‌ها می‌شود. این فازهای جدید بر اثر احیای ناخالصی‌های اکسیدی حاضر در سطح ذرات دیبورید زیرکونیم، همچون اکسید زیرکونیم (زیرکونیا) و اکسید بور (بوریا) پدیدار شده‌اند.

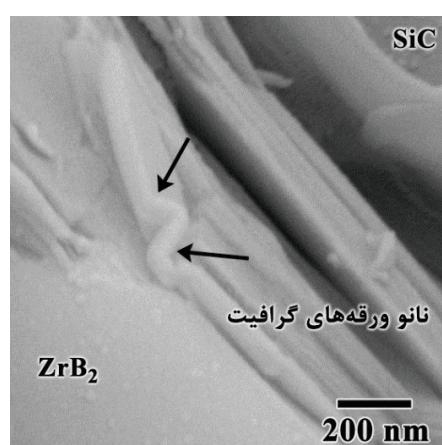
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مسیر ترک ناشی از فرو رونده ویکرز در سطح پولیش شده نمونه‌های کامپوزیتی فاقد افزودنی نانو گرافیت و دارای ۷/۵ درصد وزنی افزودنی نانو گرافیت در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. به طور کلی، مسیر گسترش ترک هر چه دارای پیچ و خم‌های بیشتری باشد، نمونه مربوطه دارای چermگی شکست بیشتری خواهد بود. در واقع، پر پیچ و خم بودن مسیر پیشروی ترک یک شاخص کیفی از جذب بیشتر انرژی ترک به هنگام گسترش آن است. برهم‌کنش ترک‌های ناشی از فرو رونده ویکرز با



ناسازگاری خواص ترمومکانیکی فازهای مختلف موجود در فصل مشترک کامپوزیت به هنگام پیشروی ترک است. در واقع به دلیل وجود اختلاف در مقادیر ضرایب انبساط گرمایی و مدولهای کشسان اجزای مختلف کامپوزیت (شامل مواد اولیه به کار رفته در مخلوط پودر و فازهای درجای جدید تشکیل شده به هنگام فرآیند تجوشی کامپوزیت)، پدیدار شدن تنش‌های پسماند اجتناب ناپذیر است. در شکل ۸، بروز تنش‌های پسماند در اطراف نانو ورقه‌های گرافیت را می‌توان از روی طرح کرنش ایجاد شده در آنها تشخیص داد.



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از مسیر ترک ناشی از فرو رونده ویکرز در سطح پولیش شده نمونه‌های کامپوزیتی (الف) قادر افزودنی نانو گرافیت و (ب) دارای ۷/۵ درصد وزنی افزودنی نانو گرافیت.



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از مقطع شکست نمونه کامپوزیتی دارای ۵ درصد وزنی افزودنی نانو گرافیت.

چقمرمگی شکست نمونه‌های گرافیت‌دار را می‌توان به نسبت ظاهری بالای نانو ورقه‌های گرافیت و سستی پیوند میان لایه‌های آن با دیگر فازها نیز نسبت داد که شانس وقوع انحرافها و انشعابهای ترک را افزایش می‌دهد. افزون بر موارد گفته شده، وقوع سازوکار بیرون زدن نانو ورقه‌های گرافیت نیز در سطح مقطع شکست کامپوزیت تقویت شده با ۵ درصد وزنی نانو گرافیت نمایان است (شکل ۸). رخداد این پدیده، نشان دهنده برهم‌کنش میان ترک‌ها با ریزساختار ماده به واسطه تنش‌های پسماند ناشی از



- and properties of ZrB₂-based ceramics," Journal of Materials Processing & Manufacturing Science, vol. 9, no. 2, pp. 156-170, 2000.
- [2] F. Monteverde, S. Guicciardi, A. Bellosi, "Advances in microstructure and mechanical properties of zirconium diboride based ceramics," Materials Science and Engineering A, vol. 346, pp. 310-319, 2003.
- [3] A. L. Chamberlain, W. G. Fahrenholtz, G.E. Hilmas, D.T. Ellerby, "High-strength zirconium diboride-based ceramics," Journal of the American Ceramic Society, vol. 87, no. 6, pp. 1170-1172, 2004.
- [4] M. Shahedi Asl, M. Ghassemi Kakroudi, "A processing–microstructure correlation in ZrB₂–SiC composites hot-pressed under a load of 10 MPa," Universal Journal of Materials Science, vol. 3, no. 1, pp. 14-21, 2015.
- [5] S. Q. Guo, "Densification of ZrB₂-based composites and their mechanical and physical properties: A review," Journal of the European Ceramic Society, vol. 29, no. 6, pp. 995-1011, 2009.

۴- نتیجه‌گیری

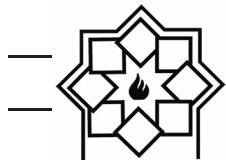
در این پژوهش، تأثیر مقدار افزودنی نانو ورقه‌های گرافیت بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ZrB₂-SiC ساخته شده به روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای بررسی شد. در این راستا، کامپوزیت فاقد افزودنی گرافیت و کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو ورقه‌های گرافیتی به میزان ۷/۵، ۵، ۲/۵ و ۱۰ درصد وزنی به روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای در دمای ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۷ دقیقه با فشار ۴۰ مگاپاسکال در شرایط خلاء ساخته شدند. با افزایش میزان افزودنی نانو گرافیت از ۰ تا ۱۰ درصد وزنی، به دلیل نرم بودن ذاتی این نانو ماده، سختی کامپوزیت از ۱۹/۵ گیگاپاسکال به ۱۲/۱ گیگاپاسکال کاهش یافت. با این وجود چرمگی شکست از ۴/۳ مگاپاسکال جذر متر برای نمونه تقویت نشده تا ۸/۲ مگاپاسکال جذر متر برای کامپوزیت تقویت شده با ۷/۵ درصد وزنی نانو گرافیت ارتقا یافت که به فعال شدن سازوکارهای گوناگون چرمگه شدن در این کامپوزیت‌ها نسبت داده شد.

۵- تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق قرارداد شماره ۶۹۲۲ مورخ ۹۶/۴/۳ به انجام رسیده است.

مراجع

- [1] A. Bellosi, F. Monteverde, D.D. Fabbriche, C. Melandri, "Microstructure



- [11] D. Kalish, E.V. Clougherty, K. Kreder, "Strength, fracture mode, and thermal stress resistance of HfB₂ and ZrB₂," *Journal of the American society*, vol. 52, no. 1, pp. 30-36, 1969.
- [12] M. Shahedi Asl, Z. Ahmadi, S. Parvizi, Z. Balak, I. Farahbakhsh, "Contribution of SiC particle size and spark plasma sintering conditions on grain growth and hardness of TiB₂ composites," *Ceramics International*, p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.121>, 2017.
- [13] Balbo, D. Sciti, "Spark plasma sintering and hot pressing of ZrB₂-MoSi₂ ultra-high-temperature ceramics," *Materials Science and Engineering A*, vol. 475, p. 108–112, 2008.
- [14] W. M. Guo, G. J. Zhang, Y. M. Kan, P. L. Wang, "Oxidation of ZrB₂ powder in the temperature range of 650–800 °C," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 471, pp. 502-506, 2009.
- [15] D. J. Chen, W. J. Li, X. H. Zhang, P. Hu, J.C. Han, C.Q. Hong, W.B. Han, "Microstructural feature and thermal shock behavior of hot-pressed ZrB₂–
- [6] M. Shahedi Asl, M. Ghassemi Kakroodi, B. Nayebi, "A fractographical approach to the sintering process in porous ZrB₂–B₄C binary composites," *Ceram. Int*, vol. 41, p. 379–387, 2015.
- [7] S. M. Zhu, W.G. Fahrenholtz, G.E. Hilmas, "Enhanced densification and mechanical properties of ZrB₂-SiC processed by a preceramic polymer coating route," *Scripta Materialia*, vol. 59, p. 123–126, 2008.
- [8] S. Zhu, W. G. Farenholtz, G. E. Hilmas, Sh. C. Zhang, "Pressureless Sintering of Zirconium Diboride Using Boron Carbide and Carbon Additions," *Journal of American Ceramic Society*, vol. 90, pp. 3660-3663, 2007.
- [9] W. G. Fahrenholtz, G. E. Hilmas, "Refractory Diborides of Zirconium and Hafnium," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 90, no. 5, pp. 1347-1364, 2007.
- [10] F. Monteverde, "Ultra-high temperature HfB₂-SiC ceramics consolidated by hot-pressing and spark plasma sintering," *Journal of alloys and compounds*, vol. 428, pp. 197-205, 2007.



- polycrystalline graphite: the role in mixed mode fracture," *Carbon*, vol. 37, pp. 1633-1639, 1999.
- [21] Rezaie,W. G. Fahrenholtz, G. E. Hilmas, "Effect of hot pressing time and temperature on the microstructure and mechanical properties of ZrB₂-SiC," *Journal of Materials Science*, vol. 42, pp. 2735-2744, 2007.
- [22] S. Zhou, Z. Wang, W. Zhang, "Effect of graphite flake orientation on microstructure and mechanical properties of ZrB₂-SiC-graphite composite," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 485, p. 181–185, 2009.
- ز. احمدی، م. جابری زمهریر، م. شاهدی اصل، س. پرویزی، «تأثیر افزودنی نانو گرافیت بر رفتار چگالش کامپوزیت‌های دیبورید زیرکونیم-کاربید سیلیسیم ساخته شده به روش تفجیوشی پلاسمای جرقه ای»، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، پذیرفته شده [۲۳]. (۱۳۹۶)
- [24] M. Shahedi Asl, M. Ghassemi Kakroudji, R. Abedi Kondolaji, H. Nasiri, "Influence of graphite nano-flakes on densification and mechanical properties of hot-pressed ZrB₂-SiC composite," *Ceramics International*, vol. 41, p. 5843–5851, 2015.
- SiC-ZrO₂ composite," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 116, pp. 348-352, 2009.
- [16] S. Y. Du, L. Xu, X. H. Zhang, P. Hu, W.B. Han, "Effect of sintering temperature and holding time on the microstructure and mechanical properties of ZrB₂-SiCw composites," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 116, pp. 76-80, 2009.
- [17] F. Y. Yang, X. H. Zhang, J. C. Han, S. Y. Du, "Mechanical properties of short carbon fiber reinforced ZrB₂-SiC ceramic matrix composites," *Materials Letters*, vol. 62, pp. 2925-2927, 2008.
- [18] X. Zhang, Z. Wang, X. Sun, W. Han, C. Hong, "Effect of graphite flake on the mechanical properties of hot pressed ZrB₂-SiC ceramics," *Materials Letters*, vol. 62, p. 4360–4362, 2008.
- [19] R. Barea, M. Belmonte, I. Osendi, P. Miranzo, "Thermal conductivity of Al₂O₃/SiC platelet composites," *Journal of European Ceramic Society*, vol. 23, pp. 1773-1778, 2003.
- [20] M. Li, M. Tsujimura, M. Sakai, "Crack-face grain interlocking/bridging of a