

بررسی تأثیر ترکیب شیمیایی و دمای تف جوشی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت SiC-5TiB₂ تقویت شده توسط گرافن کوانتوم دات با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی

مریم نظری، حمیدرضا بهاروندی* و ناصر احسانی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۱۴)

چکیده: هدف از این تحقیق، ساخت و بررسی خواص نانوکامپوزیت‌های SiC-5TiB₂ تقویت شده با نانوذرات گرافن کوانتوم دات به روش ساخت تف جوشی بدون فشار می‌باشد. بدین ترتیب مواد اولیه SiC، TiB₂ و گرافن کوانتوم دات در ابعاد نانومتری مورد استفاده قرار گرفتند. ابتدا پیش از انجام هرگونه اقدامی، با استفاده از نرم افزار Minitab 14 طراحی نمونه‌های آزمایشی صورت گرفت. طراحی با روش تاگوچی مطابق با آرایه L9 انجام شد و پارامترهای میزان تقویت‌شونده گرافن کوانتوم دات در سه سطح ۰/۲ و ۰/۶ و ۱ درصد وزنی و دمای تف جوشی در مقادیر ۲۰۰۰، ۲۱۰۰ و ۲۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تعریف شدند. فرآیند تف جوشی در دماهای مشخص در اتمسفر آرگون به مدت زمان دو ساعت انجام شد. در ادامه، آنالیزهای پراش اشعه ایکس، طیف‌سنجی رامان، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی و طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز صورت گرفت. همچنین از آزمون‌های تعیین چگالی، میکروسختی و چقرمگی شکست به منظور بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی استفاده شد. ریز ساختار نمونه‌ها نیز با هدف بررسی مکانیزم‌های چقرمگی شکست مورد بررسی واقع شدند. نتایج نشان داد که پارامتر میزان تقویت‌شونده در رده اول تأثیرگذاری و دمای تف جوشی در رده دوم قرار دارد و بهترین نتایج در نمونه با مقدار ۰/۶ درصد وزنی گرافن کوانتوم دات و دمای تف جوشی ۲۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شده است که میزان سختی و چقرمگی شکست در این نمونه به ترتیب ۲۷/۷ گیگاپاسکال و $3/3 \text{ MPa.m}^{1/2}$ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: کاربرد سیلیسیم، گرافن کوانتوم دات، نانو کامپوزیت SiC-5TiB₂، تف جوشی، تاگوچی.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: H.R.Baharvand@gmail.com

Investigating the Effect of Chemical Composition and Sintering Temperature on Mechanical Properties of SiC-5TiB₂ Nano Composite Reinforced by Graphene Quantum dot using Taguchi Test Design Method

M. Nazari, H. R. Baharvandi* and N. Ehsani

Composite Materials & Technology Center, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

The purpose of this research was to fabricate and investigate the properties of SiC-5TiB₂ nano composites reinforced by graphene quantum dot nanoparticles via pressure less sintering method. In this way, SiC, TiB₂, and graphene quantum dot raw materials were used in nanometer dimensions. First, before performing any laboratory operations, experimental samples were designed using Minitab 14 software. The design was done by the Taguchi method according to the L9 array and the parameters of the amount of graphene quantum dot amplification in three levels were set at 0.2, 0.6, and 1 wt.% and sintering temperatures were defined as 2000, 2100, and 2200°C. The sintering process was carried out at certain temperatures in argon atmosphere for 2 h. XRD, FESEM, FTIR and Raman spectroscopy were performed. Density, micro hardness, and fracture toughness measurements were used for further investigations of physical and mechanical properties. The microstructure of the samples was also observed to determine the fracture toughness mechanisms. The results showed that the parameter of the amount of reinforcement was in the first rank of influence and the sintering temperature was in the second rank, and the best results were obtained in the sample with the amount of 0.6 wt.% of graphene quantum dot and the sintering temperature of 2100 °C, where hardness and fracture toughness values were obtained to be 27.7 GPa and 3.3 MPa.m^{1/2}, respectively.

Keywords: SiC, Graphene quantum dot, SiC-5TiB₂ nanocomposite, Sintering, Taguchi.

۱- مقدمه

کاربرد سیلیسیم یکی از پرکاربردترین سرامیک‌های دمای بالا می‌باشد. این ماده سرامیکی دارای خواص سختی مناسب، وزن مخصوص پایین، هدایت حرارتی عالی، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون بالا می‌باشد (۴-۱) که این ویژگی‌ها آن را برای کاربردهای ترمومکانیکی مناسب ساخته است (۶-۵).

یکی از کاربردهای کامپوزیت‌های زمینه کاربرد سیلیسیم در قسمت جلویی دماغه هواپیماهای جنگنده می‌باشد (۷). این قسمت باید توانایی سرویس‌دهی در شرایط دمایی بیش از ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان طولانی را داشته باشد. با توجه به گزارشات صورت گرفته و پیشرفت‌های روز افزون تجهیزات نظامی و جنگی، در هواپیماهای آمریکایی و اروپایی با مدل‌های به ترتیب X-38 و Pre-X کامپوزیت زمینه سرامیکی کاربرد سیلیسیم با موفقیت آزمایش شده است (۸). با توجه به پیش‌بینی‌ها این انتظار وجود دارد که نسل جدیدی از

هواپیماهای مافوق صوت با سرعت‌های بیش از ۵ MACH به زودی در تجهیزات نظامی وارد شوند. بنابراین تحقیقات در زمینه بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه کاربرد سیلیسیم ادامه دارند.

تف جوشی کاربرد سیلیسیم با دو روش تف جوشی جامد و مایع صورت می‌گیرد (۱۰-۹). که در میان روش‌های مناسب جهت تف جوشی کاربرد سیلیسیم می‌توان به روش پرس گرم (۱۱)، پرس ایزواستاتیک گرم (۱۲)، پلاسما جرقه (۱۳)، تف جوشی به کمک ماکروویو (۱۴) اشاره داشت. در این میان روش تف جوشی بدون فشار برای ساخت قطعات با ابعاد بزرگ و شکل پیچیده روش مناسبی است (۱۵).

چقرمگی شکست ضعیف کاربرد سیلیسیم کاربردهای این دسته از کامپوزیت‌ها را محدود ساخته است. این مسئله ناشی از پیوند کووالانسی قوی کاربرد سیلیسیم می‌باشد و نفوذ در خود کربن و سیلیکون را به درون ساختار کاربرد سیلیسیم کاهش

دیده می‌شود.

گرافن کوانتوم دات‌ها نیز به‌عنوان جدیدترین عضو خانواده بزرگ کربن می‌باشند این ماده به‌عنوان نسل جدید مواد نانو در واقع اتم گرافن با ضخامت کم هستند ساختار لایه ای دارند (اندازه آن‌ها کوچک‌تر از ۱۰۰nm و ضخامت کمتر از ۱۰ لایه دارند) و شبکه کریستالی مشابه شانه عسل دارد، که هر اتم کربن در آن یک پیوند کووالانت با سه اتم دیگر کربن دارد و در حلقه‌های ۶ تایی منظم قرار گرفته‌اند. گرافن کوانتوم دات‌ها پیوند سطحی خوب و شبکه درهم ریخته π - π دارند (۲۸-۳۰). بنابراین پیش‌بینی می‌شود که گرافن کوانتوم دات به‌عنوان یک افزودنی جدید در مقادیر کمتر از مواد کربنی گزارش شده تاکنون موجب بهبود خواص کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی و حتی کاهش دمای زینتر شود.

این گزارش معتقد است که تاکنون تحقیق مشابهی در خصوص بررسی خواص کامپوزیت‌های SiC-5TiB_2 در حضور تقویت شونده گرافن کوانتوم دات صورت پذیرفته است. در این تحقیق تأثیر مقادیر مختلف گرافن کوانتوم دات (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۱ درصد وزنی) در دماهای مختلف تف‌جوشی (۲۱۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) بر خواص مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت زمینه سرامیکی کاربرد سیلیسیم با روش طراحی آزمایش مورد بررسی واقع شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- طراحی آزمایش

در این تحقیق طراحی آزمایش‌ها مطابق با روش تاگوچی انجام گرفت. این روش که ترکیبی از تکنیک‌های آماری و ریاضی است، می‌تواند با کمترین تعداد آزمایش‌ها با تکیه بر اصول مهندسی کیفیت شرایط بهینه را ایجاد کند. مهم‌ترین مزیت آن کاهش در مدت زمان تولید محصولات و نمونه‌ها می‌باشد. در تحقیق حاضر هدف بررسی تأثیر افزودن نانو لوله‌های کربنی و دمای تف‌جوشی بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت SiC-5TiB_2 می‌باشد.

می‌دهد، لذا تف‌جوشی کاربرد سیلیسیم خالص پایین بوده بنابراین از فعال‌کننده‌های پخت مانند ترکیبات کربنی، بورایدی و اکسیدی استفاده شده است. ضعف در خواص در اثر حضور عیوبی از جمله تخلخل‌ها، ترک‌ها و یا رشد بیش از اندازه دانه‌ها ظاهر می‌شود (۱۶). در بررسی روش‌های اصلاح خواص کامپوزیت‌های سرامیکی با استفاده از مواد تقویت‌شونده، می‌توان به دو حالت تک جزئی و چند جزئی افزودنی‌ها اشاره داشت (۱۷). از جمله مواد تقویت‌شونده کاربردها (۱۸)، نیتريد‌ها (۱۹) و اکسیدها (۲۰) می‌باشند. در سال‌های اخیر استفاده از افزودنی‌های خانواده کربنی از جمله گرافیت (۲۱)، نانو الیاف کربنی (۲۲)، گرافن (۲۳) و اکسید گرافن کاهش یافته (۲۴) مورد توجه واقع شده است و گزارشاتی در خصوص بهبود برخی خواص نیز گزارش شده است.

در یک کار تحقیقاتی تأثیر میزان گرافن بر خواص مکانیکی و تف‌جوشی کامپوزیت‌های SiC در حضور نانو ذرات $\beta\text{-SiC}$ در دمای 2200°C و با روش تف‌جوشی بدون فشار مورد بررسی قرار گرفته است (۲۵). محققان در کنار ظهور تخلخل‌ها در ساختار که دلیل آن را آگلومره شدن، عنوان نمودند میزان بهینه چگالی را برای نمونه شامل ۱ درصد وزنی گرافن و ۵ درصد وزنی نانو ذرات $\beta\text{-SiC}$ ، ۹۹/۰۴ درصد گزارش داده‌اند. در گزارش دیگری که تأثیر میزان صفحات گرافن بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه SiC ساخته شده با روش تف‌جوشی پرس گرم در دمای ۲۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفته است، مکانیزم‌های بهبود چقرمگی به‌صورت پل‌زنی و شاخه‌ای شدن گزارش شده است درحالی‌که مکانیزم انحراف ترک به صورت محدود ظاهر شده، بیشترین میزان چقرمگی شکست را $4/4 \text{ MPam}^{1/2}$ در نمونه شامل ۶ درصد وزنی صفحات گرافن ثبت نموده‌اند (۲۶).

پژوهش‌ها نشان می‌دهد (۲۷) با استفاده از روش تف‌جوشی جرقه پلاسما و تقویت‌شونده نانو صفحات گرافن بهبود چقرمگی شکست کامپوزیت با زمینه کاربرد سیلیسیم به میزان ۴۰ درصد در نمونه شامل ۲ درصد وزنی نانو صفحات گرافن

جدول ۱- پارامترهای انتخابی و سطوح هر پارامتر

| سطح ۳ | سطح ۲ | سطح ۱ | پارامتر |
|-------|-------|-------|---------------------------------------|
| ۱ | ۰/۶ | ۰/۲ | درصد وزنی گرافن کوانتوم دات (GQD(%WT) |
| ۲۲۰۰ | ۲۱۰۰ | ۲۰۰۰ | دمای تف جوشی (°C) |

جدول ۲- نحوه انجام آزمایش‌ها مطابق آرایه متعامد L9 تاگوچی

| شماره آزمایش | میزان گرافن کوانتوم دات %WT | دما (°C) |
|--------------|-----------------------------|----------|
| ۱ | ۰/۲ | ۲۰۰۰ |
| ۲ | ۰/۲ | ۲۱۰۰ |
| ۳ | ۰/۲ | ۲۲۰۰ |
| ۴ | ۰/۶ | ۲۰۰۰ |
| ۵ | ۰/۶ | ۲۱۰۰ |
| ۶ | ۰/۶ | ۲۲۰۰ |
| ۷ | ۱ | ۲۰۰۰ |
| ۸ | ۱ | ۲۱۰۰ |
| ۹ | ۱ | ۲۲۰۰ |

در این رابطه γ متغیر پاسخ و n تعداد دفعات انجام آزمایش می‌باشد. بر اساس رابطه (۱) سطحی که بیشترین میزان S/N (سیگنال به نویز) را داشته باشد سطح بهینه اعلام می‌شود (۳۱).

۲-۲- مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد نیاز جهت انجام تحقیق شامل پودرهای کاربید سیلیسیم α با خلوص ۹۹ درصد ساخت کشور چین می‌باشد. شکل ذرات کروی با اندازه متوسط ذرات کمتر از μm ۱ می‌باشند. در شکل (۱) الگوی پراش اشعه ایکس^۲ پودر کاربید سیلیسیم مصرفی نشان داده شده است.

دی بوراید تیتانیوم نیز از شرکت چینی Chengdu Rong Feng با اندازه میانگین ذرات ۶۷ nm تهیه شده است که نتایج آنالیز اشعه ایکس آن در شکل (۲) مشاهده می‌شود.

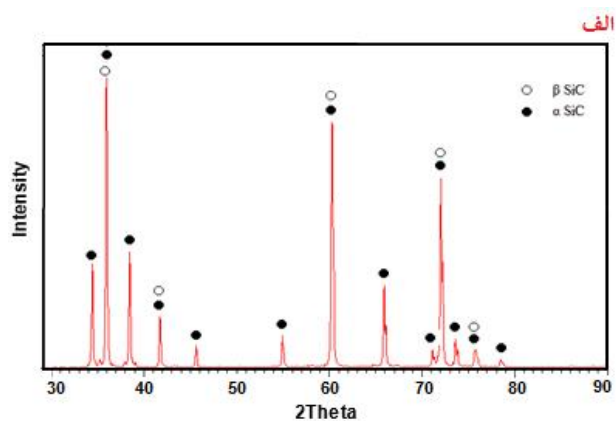
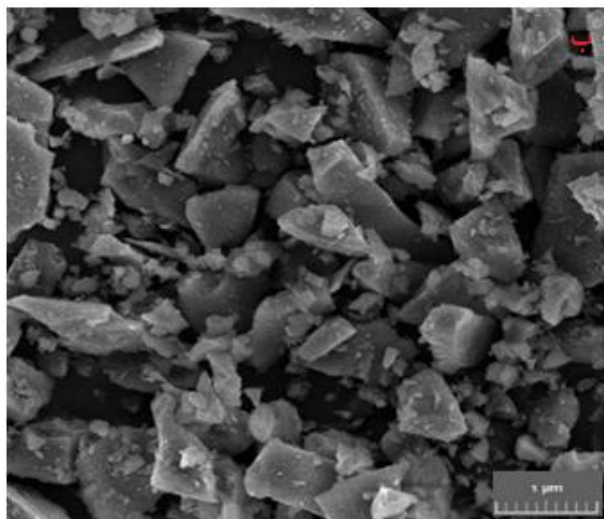
گرافن کوانتوم دات نیز با روش کربونیزاسیون از منبع گلو تامیک اسید سنتز شده است (۳۲).

اولین و مهم‌ترین پارامتری که در تحقیق حاضر به بررسی آن در فرایند ساخت، پرداخته می‌شود درصد وزنی نانو ذرات گرافن کوانتوم دات می‌باشد. علاوه بر این پارامتر، با توجه به مطالعات انجام شده و شرایط تولید نمونه‌ها دمای تف جوشی پارامتر فرآیندی دیگری است که تأثیر آن بر روی متغیر پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. هر یک از پارامترهای عنوان شده طبق جدول (۱) در ۳ سطح مختلف در نظر گرفته شدند که اطلاعات آن‌ها در جدول دیده می‌شود.

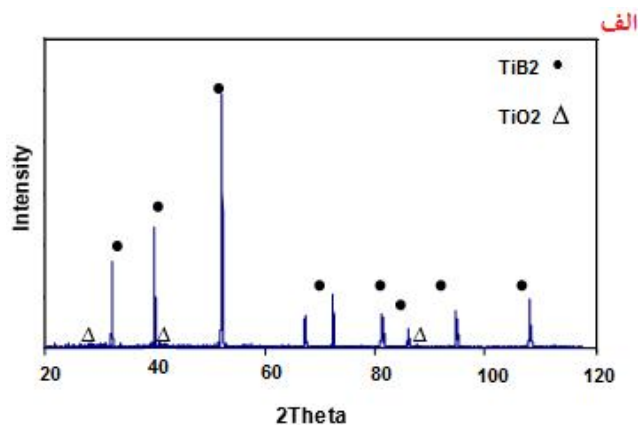
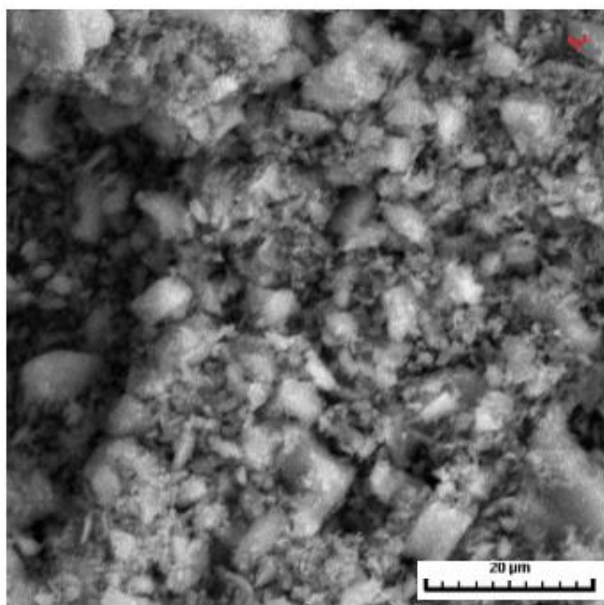
با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده و سطوح انتخابی برای آن‌ها طراحی آزمایش به روش تاگوچی مطابق با آرایه‌های متعامد L9 توسط نرم‌افزار مینی‌تب مطابق با جدول (۲) انجام گرفت. بر اساس این جدول با انجام ۹ آزمایش مختلف دستیابی به شرایط بهینه امکان‌پذیر می‌شود.

در بررسی‌های مورد نظر، از تابع زیان تاگوچی با رابطه نسبت سیگنال به نویز طبق معادله (۱) استفاده می‌شود.

$$S/N = -10 \log [1/n \sum (1/y_n)] \quad (1)$$



شکل ۱- الف) الگوی پراش اشعه ایکس و ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی گسیل میدانی از مورفولوژی پودر کاربید سیلیسیم.

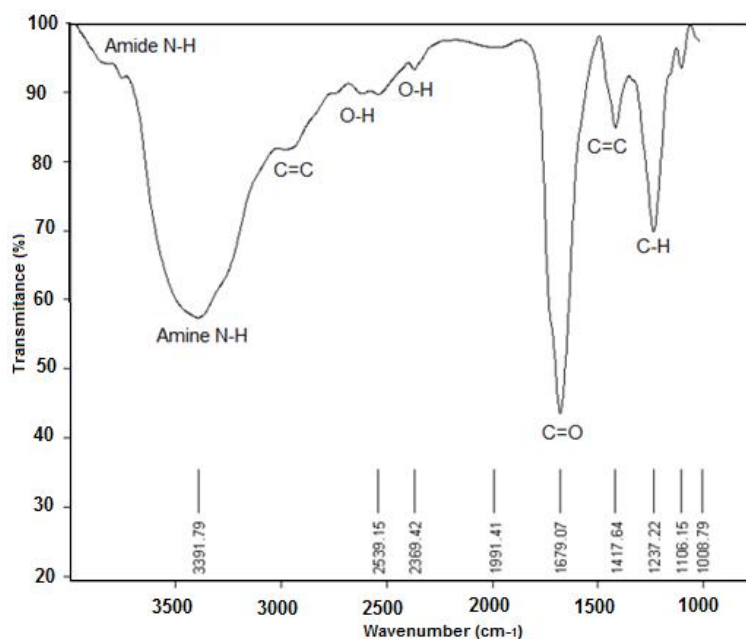


شکل ۲- الف) الگوی پراش اشعه ایکس و ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی گسیل میدانی از مورفولوژی پودر دی بوراید تیتانیم.

یکنواختی اندازه ذرات پودر و جلوگیری از آگلومره شدن ذرات، ترکیب در هاون با جنس عقیق ساییده و از الک با مش ۵۰ عبور داده شد تا برای ادامه مراحل ساخت آماده شدند. سپس نمونه‌ها توسط پرس هیدرولیک تک محوره تحت نیروی ۷۰ bar ساخته شده و نمونه‌های نهایی به شکل استوانه با قطر ۱۵ mm و ارتفاع ۵mm به دست آمدند. در ابتدا نمونه‌ها تا دمای ۶۰۰ °C با نرخ گرمایش

به منظور آماده‌سازی ترکیبات، مواد اولیه هر ترکیب با ترازوی با دقت ۰/۰۰۱g وزن کشی شده در کاپ پلیمری و گلوله‌هایی از جنس زیرکونیا با رعایت نسبت پودر به گلوله ۱:۱۰ در محیط مرطوب و در حضور محلول اتانول به مدت زمان ۲ ساعت با سرعت ۱۲۰ rpm آسیاب شدند.

در ادامه دوغاب حاصل در خشک کن با دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه خشک شد. با هدف حفظ



شکل ۳- نتایج FTIR گرافن کوانتوم دات سنتز شده به روش کربونیزاسیون.

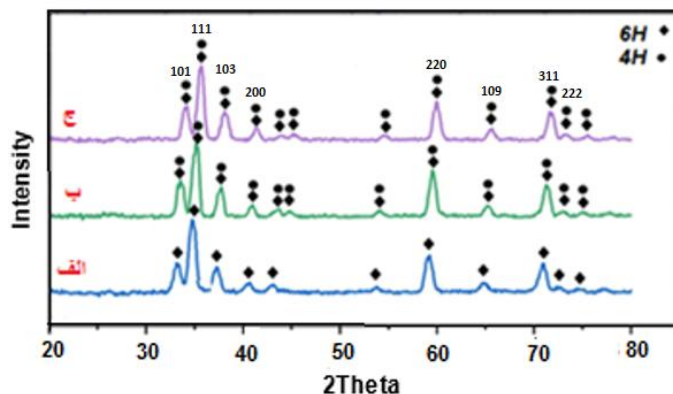
فیلتر نیکل و با ولتاژ شتاب‌دهنده ۴۰ Kv به دست آمد. آنالیز رامان با دستگاه Ocean optics و طول موج لیزر ۵۳۲ nm بررسی شد همچنین از دستگاه FTIR 27 Bruker Tensor Spectrophotometer به منظور شناسایی و بررسی گروه‌های عاملی گرافن کوانتوم دات استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

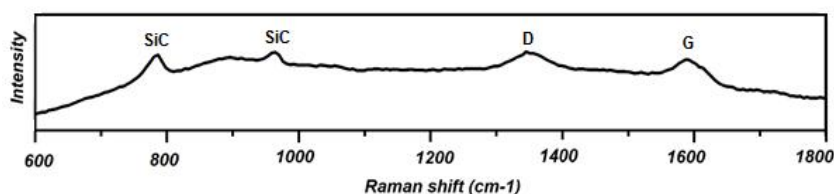
به منظور بررسی و شناسایی گروه‌های عاملی گرافن کوانتوم دات سنتز شده، مشخصات با استفاده از طیف مادون قرمز (FTIR) مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج در شکل (۳) قابل مشاهده است. بررسی گروه‌های عاملی در گستره ۴۰۰۰-۱۰۰۰ cm^{-1} نشان می‌دهد که نوارهای اصلی در ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ cm^{-1} دیده می‌شود که مربوط به پیوند کششی C=C بوده و تشکیل GQD را تأیید می‌کند. پیک پهن با مساحت ۲۸۰۰-۲۵۰۰ cm^{-1} مربوط به کشش O-H کربوکسیل اسید می‌باشد. در این میان پیک قوی مشاهده شده از ۱۶۰۰ تا ۱۷۳۰ cm^{-1} از ترکیب کربوکسیل اسید C=O و آمید C=O کششی در گرافن کوانتوم دات می‌باشد. پیک‌های کششی C=O و O-H کربوکسیلیک اسید

$2^\circ\text{C}/\text{min}$ به منظور حذف مواد فرار تحت فرایند حرارتی پیرولیز شدند در ادامه توسط کوره الممتی تحت اتمسفر آرگون و دماهای ۲۰۰۰، ۲۱۰۰ و ۲۲۰۰ $^\circ\text{C}$ به مدت دو ساعت تف جوشی می‌شوند و تا رسیدن به دمای محیط درون کوره تحت سرمایش قرار می‌گیرند.

به منظور بررسی خواص مکانیکی و بررسی ریز ساختاری، نمونه‌ها تحت آزمایش‌های مختلفی قرار گرفتند که در ادامه به بررسی هر یک می‌پردازیم. میزان چگالی نمونه‌ها با روش ارشمیدس، مطابق با استاندارد ASTM B311 مورد بررسی قرار گرفت. میکروسختی نیز بر اساس استاندارد ASTM 1327 محاسبه شد. همچنین در ابتدا به منظور بررسی ریز ساختار، نمونه‌ها پولیش شده و در ادامه توسط محلول موراکامی اچ می‌شوند و بررسی‌های بیشتر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی^۳ مدل MIRA3 TESCAN-XMU صورت گرفت. همچنین به منظور آنالیز فازی مواد خام و تف جوشی شده از دستگاه پراش اشعه ایکس ساخت شرکت کشور ایتالیا با مدل 2000APD-GNR استفاده شد. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌ها در بازه ۸۰-۱۰ درجه با پرتو $\text{Cu-K}\alpha$.



شکل ۴- الگوهای پراش اشعه ایکس ترکیبات مختلف گرافن کوانتوم دات بعد از فرایند تف جوشی در دمای ۲۱۰۰ درجه سانتی گراد (الف) نمونه ۲/۰، (ب) نمونه ۶/۰ و (ج) نمونه حاوی ۱ درصد وزنی QD.



شکل ۵- نتایج آنالیز رامان نمونه شماره ۹.

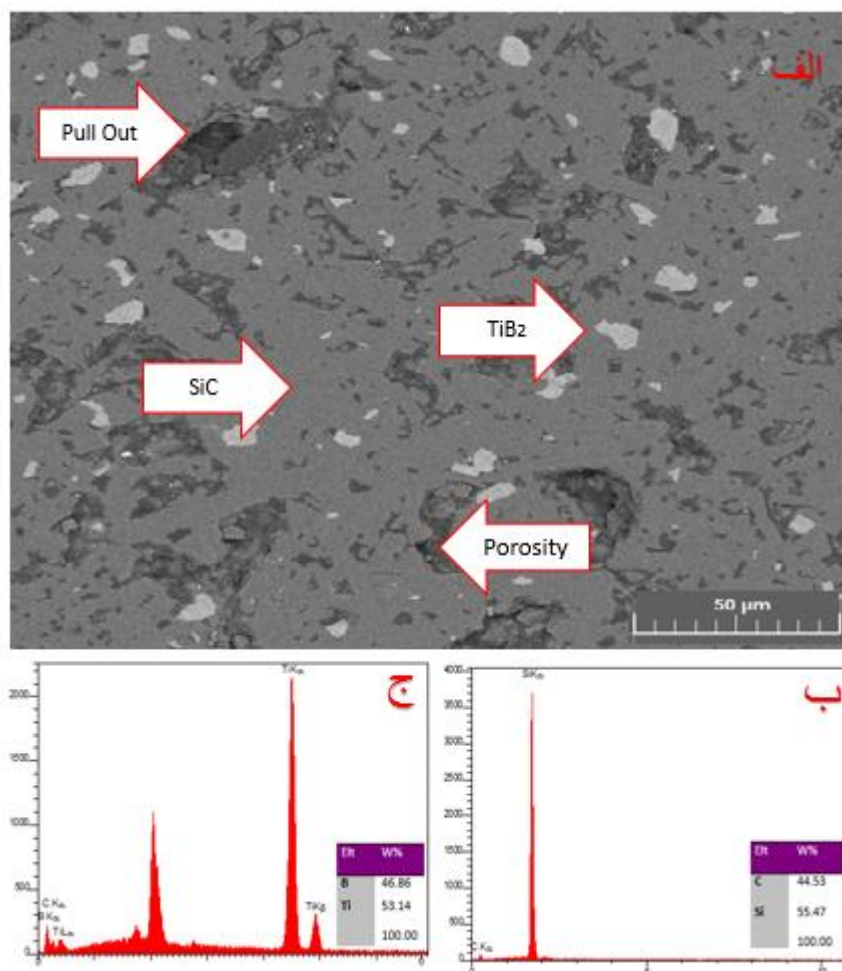
می شود.

اولین موضوع قابل تأمل پس از مقایسه الگوی پراش مقادیر مختلف گرافن کوانتوم دات جابه جایی جزئی پیک ها به سمت چپ می باشند که این مسئله با توجه به تفاوت در دگرریخت های α -SiC در طی فرایند تف جوشی رخ می دهد و اینگونه توجیه می شود که با تغییر آلوتروپی از 6H به (6H+4H) میزان کرنش از مقدار ۲/۴۷ به ۲/۹۱ می رسد و ساختار از 6H هگزاگونال با پارامتر شبکه (3.095),b(3.095),c(15.17) در نمونه ۲ به 4H هگزاگونال (3.08),b(3.08),c(47.75) در نمونه ۸ می رسد و میزان محسوس تغییرات کرنش شبکه مربوط به اندیس C از پارامتر شبکه می باشد.

به منظور بررسی حضور ذرات گرافن کوانتوم دات در زمینه کامپوزیت، آنالیز رامان صورت گرفت با توجه به نتایج آنالیز در شکل (۵) می توان دریافت که، دو پیک کاربید سیلیسیم در حدود ۷۸۵ و ۹۶۵ cm^{-1} شناسایی شده همچنین ارتعاش پیوندهای SP^2 اتم کربن به صورت باند D در مقدار ۱۳۳۵ cm^{-1}

حضور گروه های کربوکسیل را نشان می دهد. امید کششی $\text{C}=\text{O}$ و پیک کششی N-H مربوط به امید تازه تشکیل شده در محدوده ۳۷۰۰-۳۵۰۰ cm^{-1} تشکیل امید بین گروه های آمین و گروه کربوکسیل را نشان می دهد. کششی- ارتعاشی آمین N-H در ۳۳۶۰ cm^{-1} در هر دو منحنی نشان دهنده حضور گروه های آمین در گلوتامیک اسید و گرافن کوانتوم دات می باشند. گروه های شامل اکسیژن و نیتروژن نیز نشان دهنده حلالیت آبی بالا و پایداری در محلول می باشند.

الگوی پراش اشعه ایکس نمونه های کامپوزیت SiC-5TiB_2 تقویت شده با درصد های وزنی مختلف گرافن کوانتوم دات تف جوشی شده در دمای ۲۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت زمان ۲ ساعت در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل می توان مشاهده نمود، که نمونه ۲/۰ درصد وزنی گرافن کوانتوم دات شامل دگر ریخت α -SiC از نوع 6H می باشند اما با افزایش میزان گرافن کوانتوم دات در نمونه های ۶/۰ و ۱ درصد وزنی دگر ریخت های 4H و 6H^۴ در فاز های موجود مشاهده



شکل ۶- الف) تصویر FESEM نمونه شماره ۸ درصد وزنی GQD، ب و ج) آنالیز EDS مربوط به SiC (ب) و TiB₂ (ج).

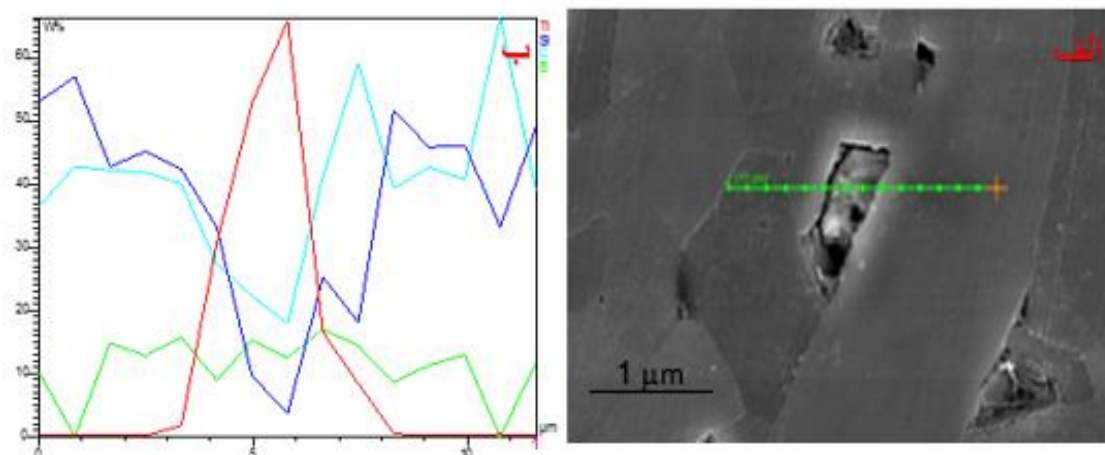
در شکل (۷) نیز آنالیز خطی مربوط به نمونه ۰/۶ گرافن کوانتوم دات نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تقریباً در تمام نقاط عناصر کربن و سیلیسیم حضور دارند که نشان‌دهنده زمینه کاربید سیلیسیم می‌باشد توزیع تقویت‌شونده TiB₂ نیز با حضور عناصر Ti و B در نمودار آنالیز تأیید می‌شود، همچنین وجود کربن در مقادیر بیش از ۳۵ درصد وزنی در نقاط ابتدایی و انتهایی و عدم کاهش چشمگیر آن در زمینه تأییدکننده توزیع همگن گرافن کوانتوم دات و کربن موجود در ترکیب کاربید سیلیسیم زمینه می‌باشد.

۳-۱- چگالی

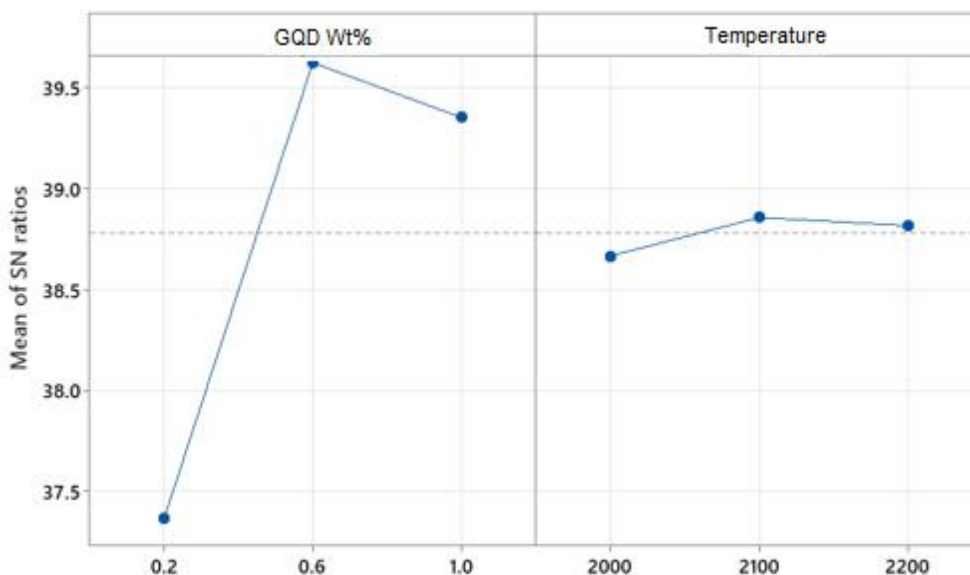
در شکل (۸) نتایج بررسی چگالی نسبی براساس نسبت S/N

و همچنین میزان باند G در مقدار 1580 cm^{-1} نشان‌دهنده تخریب شبکه SP² به واسطه پیوندهای SP³ مربوط به اتم‌های کربن می‌باشد نیز به درستی مشخصه‌یابی شده است. این مشخصات در گزارشات مشابه ثبت شده است (۳۳-۳۴) بدین طریق حضور نانو ذرات گرافن کوانتوم دات در ساختار نمونه‌های کامپوزیتی زمینه کاربید سیلیسیم تأیید شد.

در بررسی ریز ساختار با استفاده از میکروسکوپ FESEM چنانچه در تصویر شکل (۶) مشاهده می‌شود زمینه SiC (خاکستری رنگ) به همراه توزیع ذرات TiB₂ (مناطق روشن) در زمینه و همچنین تخلخل‌های موجود (مناطق سیاه رنگ) در ریز ساختار قابل مشاهده است. شناسایی فازها نیز به روش آنالیزتوزیع عنصری^۵ انجام گرفت.



شکل ۷- آنالیز خطی نمونه شماره ۵ که عناصر در آن به ترتیب با رنگ‌های قرمز (تیتانیم)، سورمه‌ای (سیلیسیم)، آبی (کربن) و سبز (بور) مشخص شده‌اند.



شکل ۸- اثرات اصلی عوامل انتخابی بر میزان چگالی.

جدول ۳- نتایج سیگنال به نویز چگالی

| دما (°C) | GQD (wt%) | سطح |
|----------|-----------|-----------|
| ۳۸/۶۷ | ۳۷/۳۷ | ۱ |
| ۳۸/۸۶ | ۳۹/۶۲ | ۲ |
| ۳۸/۸۲ | ۳۹/۳۵ | ۳ |
| ۰/۱۹ | ۲/۲۵ | اختلاف |
| ۲ | ۱ | رتبه‌بندی |

مربوط به نمونه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود بیشترین میزان چگالی مربوط به نمونه ۶، با مقدار ۹۶/۲۶ درصد می‌باشد.

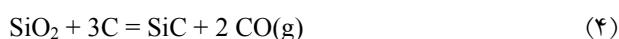
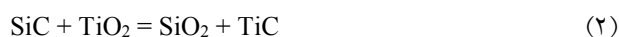
براساس این نتایج مؤثرترین عامل روی چگالی درصد وزنی ذرات تقویت‌شونده گرافن کوانتوم دات می‌باشد و پس از آن و در رتبه بعدی دمای تف جوشی قرار دارد (جدول ۳). با افزایش میزان GQD از ۰/۲ به ۰/۶ درصد وزنی افزایش قابل ملاحظه‌ای در بازده

جدول ۵- نتایج سیگنال به نویز سختی

| سطح | GQD (wt%) | دما (°C) |
|-----------|-----------|----------|
| ۱ | ۲۸/۳۵ | ۲۸/۳۲ |
| ۲ | ۲۸/۷۵ | ۲۸/۶۹ |
| ۳ | ۲۸/۵۲ | ۲۸/۶۲ |
| اختلاف | ۰/۴ | ۰/۳۷ |
| رتبه بندی | ۱ | ۲ |

جدول ۴- مقادیر محاسبه شده چگالی نسبی

| شماره آزمایش | چگالی (%) |
|--------------|-----------|
| ۱ | ۷۲/۱۰ |
| ۲ | ۷۵/۱۶ |
| ۳ | ۷۴/۳۵ |
| ۴ | ۹۵/۱۹ |
| ۵ | ۹۵/۷۰ |
| ۶ | ۹۶/۲۶ |
| ۷ | ۹۱/۹۰ |
| ۸ | ۹۳/۶۴ |
| ۹ | ۹۲/۸۰ |



۳-۲- سختی

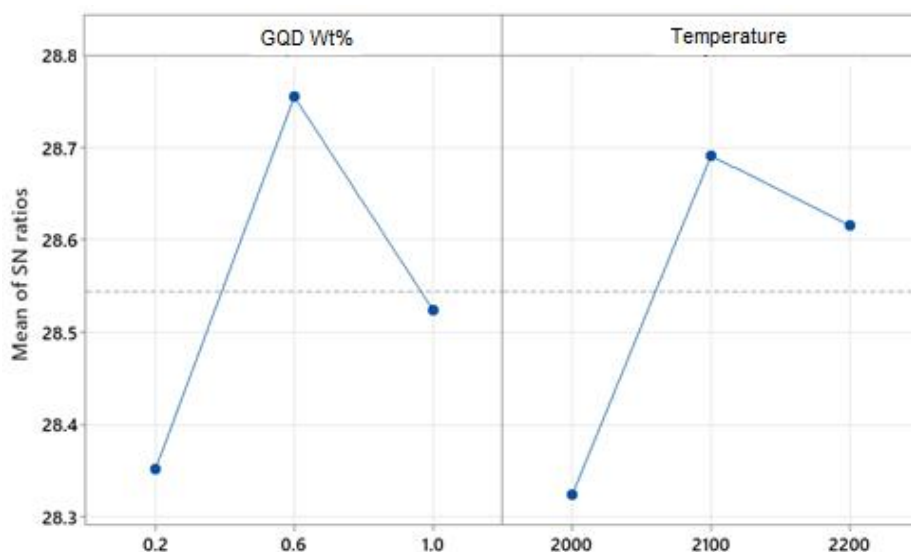
نتایج تست سختی بر اساس نسبت سیگنال به نویز در جدول (۵) لیست شده است. تأثیر میزان تقویت شونده گرافن کوانتوم دات و دمای تف جوشی روی سختی نیز در شکل (۹) مشاهده می شود. نتایج نشان می دهد که رتبه اول در میزان تأثیرگذاری، مربوط به فاکتور میزان تقویت شونده بوده و دمای تف جوشی در مرتبه دوم قرار دارد. نمونه شماره ۶ شامل میزان ۰/۶ درصد وزنی نانوذرات گرافن کوانتوم دات در دمای ۲۲۰°C بیشترین میزان سختی را ارائه می دهد.

تغییرات میزان سختی را با افزایش میزان تقویت شونده می توان این گونه استنباط کرد که با افزایش میزان گرافن کوانتوم دات تا ۰/۶ چگالی افزایش یافته و میزان تخلخل ها حداقل می شوند و سختی نیز افزایش می یابد (جدول ۶). با افزایش مقادیر بیشتر تقویت شونده، به دلیل افزایش میزان تخلخل ها و خروج فازهای گازی از سیستم سختی روند کاهشی را در پیش می گیرد.

حال آن که در بررسی تغییرات دمای تف جوشی چنین استنباط می شود که حضور نانو ذرات گرافن کوانتوم دات در مرزخانه ها در دماهای پایین، به عنوان مانعی در برابر انتقال جرم عمل نموده و تراکم از طریق نفوذ مرزخانه و نفوذ شبکه ای را

ترمیم حاصل شد اما با افزایش تقویت شونده از ۰/۶ به ۱ درصد وزنی نسبت سیگنال به نویز افزایش نیافته بلکه روند کاهشی دارد. به نظر می رسد چنانچه نتایج ثبت شده در جدول (۴) نشان می دهد با افزایش میزان گرافن کوانتوم دات در میزان ۰/۶ درصد وزنی نفوذ بین ذرات از طریق سطح بیشتر بوده و اتصال ذرات بهتر صورت گرفته است و با بسته شدن کانال منافذ حجم تخلخل ها در ساختار کاهش یافته در نتیجه چگالی نسبی نیز افزایش می یابد. همچنین این میزان از گرافن کوانتوم دات موجب کاهش دمای تف جوشی شده اما با افزایش میزان گرافن کوانتوم دات و رسیدن به مقدار ۱ درصد وزنی، تبخیر فازهای گازی SiO و CO و خروج آن ها از سیستم (طبق واکنش های موجود) تشکیل تخلخل های ریز و پراکنده را به دنبال دارد این مسئله برای سیستم مضر بوده و تأثیر آن به صورت کاهش میزان چگالی نسبی در نتایج نمایان می شود این نتایج با گزارشی که رزمجو و همکارانش (۳۵) منتشر نموده اند مطابقت دارد برخی تخلخل های با سطوح وسیع و عریض نیز در تصاویر دیده می شوند که ناشی از کندگی در حین فرآیند سنباده زنی و متالوگرافی می باشند.

از جمله واکنش های موجود در سیستم سه تایی SiC-5TiB₂-GQD که به موجب حضور ذرات اکسیدی تیتانیم در مواد اولیه رخ می دهد می توان به موارد زیر اشاره داشت؛



شکل ۹- اثرات اصلی عوامل انتخابی بر میزان سختی.

جدول ۷- نتایج سیگنال به نویز چقرمگی شکست

| دما (°C) | GQD (wt%) | سطح |
|----------|-----------|-----------|
| ۷/۷۱۴ | ۹/۵۳۰ | ۱ |
| ۱۰/۶۹۰ | ۱۰/۵۲۱ | ۲ |
| ۱۰/۵۹۶ | ۱۰/۹۴۹ | ۳ |
| ۰/۹۷۶ | ۱/۴۲۰ | اختلاف |
| ۲ | ۱ | رتبه‌بندی |

۳-۳- چقرمگی شکست

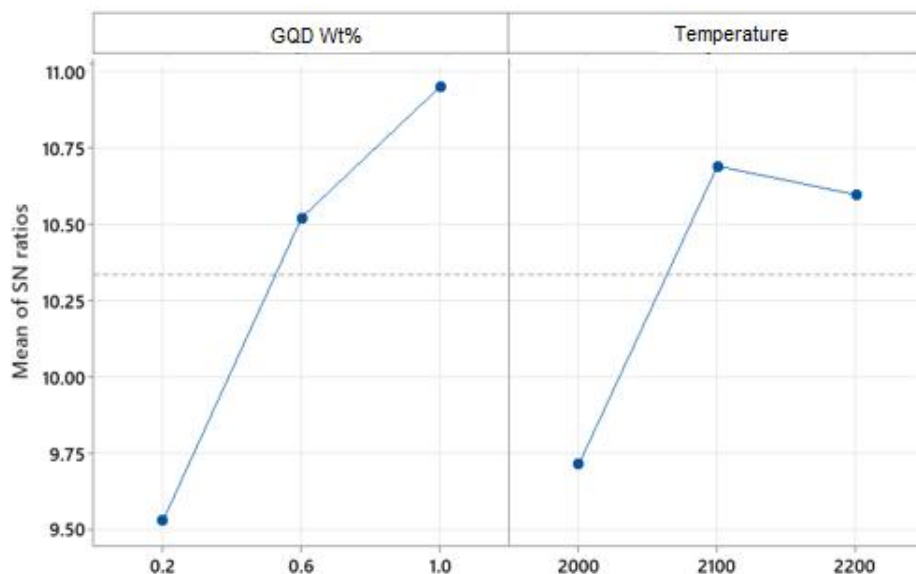
نتایج چقرمگی شکست با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی براساس مدل بزرگتر، بهتر بررسی و تحلیل شد. اثرات پارامترهای اصلی و نتایج سیگنال به نویز مطابق با شکل (۱۰) و جدول (۷) به دست آمده است. نتایج تحلیل به روش تاگوچی نشان می‌دهد که درصد وزنی گرافن کوانتوم دات بیشترین تأثیر را روی بازده ترمیم دارد.

چنانچه نتایج جدول (۸) نیز تأیید می‌کند نمونه حاوی ۱ درصد وزنی گرافن کوانتوم دات دارای بیشترین میزان چقرمگی شکست می‌باشد. این در حالی است که با افزایش دمای تف جوشی تا ۲۱۰۰°C روند افزایشی و سپس با رسیدن به ۲۲۰۰°C چقرمگی کاهش یافته است.

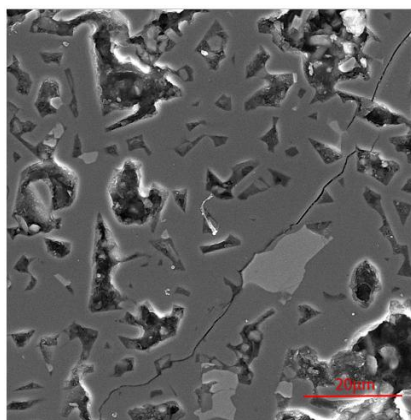
جدول ۶- مقادیر محاسبه شده سختی

| شماره آزمایش | سختی (GPa) |
|--------------|------------|
| ۱ | ۲۵/۲۰ |
| ۲ | ۲۶/۸۰ |
| ۳ | ۲۶/۵۰ |
| ۴ | ۲۶/۹۰ |
| ۵ | ۲۷/۷۰ |
| ۶ | ۲۷/۶۰ |
| ۷ | ۲۶/۱۵ |
| ۸ | ۲۷/۱۰ |
| ۹ | ۲۶/۸۰ |

سخت می‌کند. با افزایش دما، نیروی محرکه جهت خروج ذرات اکسیدی از سیستم تامین می‌شود و به دلیل نسبت بالای سطح به حجم ذرات گرافن کوانتوم دات شرایط جهت تماس بیشتر ذرات تقویت شونده با زمینه فراهم شده، لذا انتقال جرم و فرایند تف جوشی تسریع می‌یابد. بنابراین با کاهش حجم تخلخل‌ها، تراکم پذیری و سختی افزایش می‌یابند. در ادامه با افزایش بیشتر دما، طبق اثر زرنر، تأثیر مخرب رشد دانه بر اثر مثبت آن غالب شده و موجب کاهش سختی نمونه خواهد شد.



شکل ۱۰- شکل اثرات اصلی عوامل انتخابی بر چقرمگی شکست.



شکل ۱۱- مکانیزم‌های انحراف ترک در ذره TiB_2 و پل زنی در تخلخل‌ها و حفرات مربوط به نمونه شماره ۸

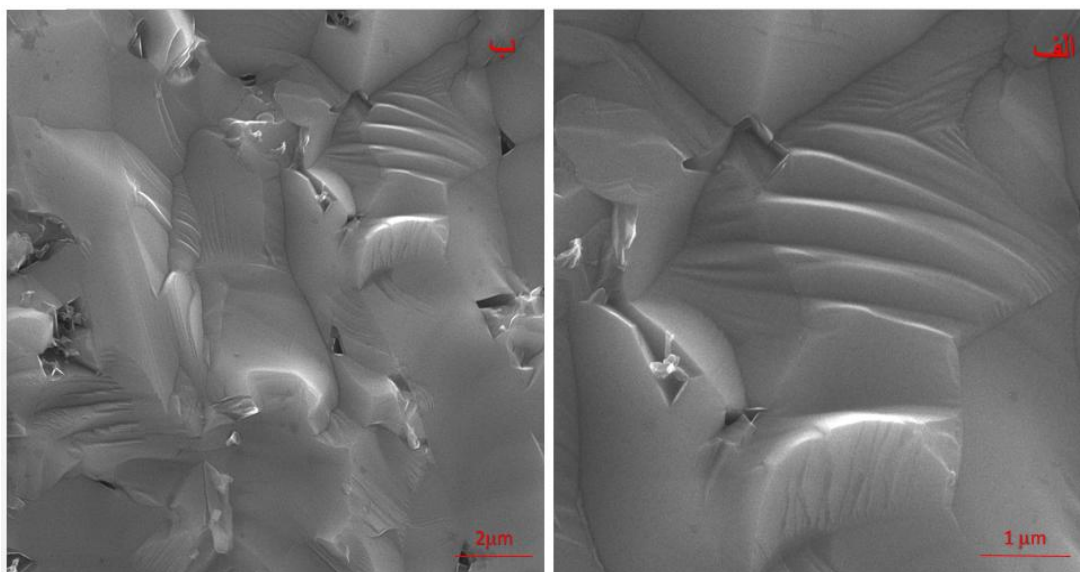
مکانیزم انحراف ترک به تفاوت در ضریب انبساط حرارتی مربوط می‌شود که نتیجه آن افزایش مقاومت مرزخانه به لغزش و انحراف ترک می‌باشد. نسبت ابعادی بالای ذرات نیز به پل زدن کمک می‌کند و حضور ذرات گرافن کوانتوم دات موجب انتشار طولانی تر ترک قبل از انهدام و فروپاشی می‌شود. در نتیجه میزان جذب انرژی بیشتر در طول انتشار ترک فراهم می‌شود. حضور ذرات تقویت شونده TiB_2 نیز در زمینه کاربید سیلیسیم موجب انحراف مسیر ترک از این ذرات شده و با مصرف انرژی ترک موجب بهبود میزان چقرمگی می‌شود (شکل ۱۱).

جدول ۸- مقادیر محاسبه شده چقرمگی شکست

| چقرمگی ($MPa.m^{1/2}$) | شماره آزمایش |
|--------------------------|--------------|
| ۲/۸ | ۱ |
| ۳/۲ | ۲ |
| ۳/۰ | ۳ |
| ۳/۱ | ۴ |
| ۳/۳ | ۵ |
| ۳/۷ | ۶ |
| ۳/۳ | ۷ |
| ۳/۸ | ۸ |
| ۳/۵ | ۹ |

عامل مهم دیگر که می‌تواند بر انحراف و طولانی تر شدن مسیر ترک مؤثر باشد، نسبت ابعادی دانه‌های کاربید سیلیسیم می‌باشد. هر چه دانه‌ها کشیده‌تر باشند، مسیر رشد ترک طولانی‌تر شده بنابراین چقرمگی شکست افزایش می‌یابد. کشیده شدن دانه‌ها به دلیل پدیده رشد دانه با افزایش دما رخ می‌دهد.

مکانیزم‌های بهبود چقرمگی شکست در نمونه‌ها به صورت دو مکانیزم انحراف ترک و پل زنی در تصاویر حاصل از FESEM نمایان می‌شود.



شکل ۱۲- تصاویر FESEM از سطح شکست نمونه ۵ و مشاهده مکانیزم‌های لایه لایه شدن و سرخوردگی.

داشت. موارد عنوان شده به صورت سرخوردگی^۶ و لایه لایه شدن^۷ دانه‌ها در تصاویر الف و ب شکل (۱۱) نشان داده شده است.

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، با ساخت نمونه‌هایی از کامپوزیت SiC-5TiB₂ به بررسی تأثیر تقویت‌شونده گرافن کوانتوم دات بر خواص این دسته از کامپوزیت‌ها پرداخته شد. به منظور بررسی بهتر از روش طراحی آزمایش تاگوجی استفاده شد و پارامترهای درصد وزنی تقویت‌شونده و دمای تف جوشی در سه سطح مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. بدین صورت که میزان تقویت‌شونده در مقادیر ۰/۲ و ۰/۶ و ۱ درصد وزنی و دماهای تف جوشی ۲۰۰۰°C، ۲۱۰۰°C و ۲۲۰۰°C تعریف شدند.

تأثیر این متغیرهای مستقل بر خواص چگالی، سختی و چقرمگی بررسی شد. میزان تقویت‌شونده و دمای تف جوشی بیشترین اثر را روی چگالی نمونه به ترتیب در مقادیر ۰/۶ درصد وزنی و ۲۱۰۰°C دارند. همچنین بیشترین میزان سختی با مقدار ۲۷/۷۰ GPa در نمونه ۶ حاصل شد. چقرمگی شکست نیز در مقدار حداکثری ۳/۸ MPa.m^{1/2} به دست آمد و

بنابراین می توان گفت به طور مؤثری میزان چقرمگی شکست نمونه و مساحت بالای ذرات GQD موجب می شود انرژی بسیاری برای بیرون کشیدن ذرات صرف شود در نتیجه چقرمگی شکست زمینه افزایش می یابد. پیش بینی می شود با کاهش اندازه ذرات و در واقع افزایش سطح آن‌ها، تعداد تماس‌های بین ذره‌ای در واحد حجم در یک نمونه افزایش یافته در نتیجه انتقال ماده از طریق انتقال سطحی بوده و انتقال از طریق بخار صورت نخواهد گرفت. در انتقال سطحی نیز انتقال جرم از طریق نفوذ حجمی و مرزدانه رخ می دهد. با ریز شدن دانه‌ها و افزایش سطح تقویت کننده، میزان ارتباط سطح با زمینه نیز افزایش یافته و موجب افزایش اصطکاک سطحی شده در نتیجه انرژی مورد نیاز جهت خروج و بیرون کشیدن ذرات گرافن کوانتوم دات از زمینه افزایش یافته و موفقیت در بهبود چقرمگی شکست را به دنبال دارد و در نهایت مقاوم سازی توسط ذرات تقویت‌شونده رخ می دهد. تأثیر این مسئله را می توان در به وجود آمدن پله‌های کلیواژ در تصاویر شکل (۱۲) مشاهده کرد. به بیان دیگر ظاهر شدن سطح شکست به صورت ناهموار، نشان دهنده اتلاف انرژی در ترک‌ها بوده و با افزایش طول انتشار ترک، بهبود چقرمگی شکست را به دنبال خواهیم

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیر انتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

مکانیزم‌های غالب در بهبود چقرمگی انحراف ترک و پل زدن عنوان شدند. پارامتر میزان تقویت‌شونده در رده اول و دمای تف‌جوشی در رده دوم از تأثیرگذاری روی تمام خواص قرار دارند و به ترتیب در مقادیر ۰/۶ درصد وزنی گرافن کوانتوم دات و ۲۱۰۰ °C بهترین تأثیرگذاری را دارند.

واژه‌نامه

1. graphene quantum dot (GQD)
2. X-ray diffraction (XRD)
3. field emission scanning electron microscopy (FESEM)
4. allotropy
5. energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)
6. sliding
7. delamination

مراجع

1. Khodaei M, Yaghoobzadeh O, Baharvandi HR, Esmaeeli S, Javi H. The effect of Cr₂O₃ additions on sinterability and mechanical properties of liquid-phase sintered SiC ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020 Jul 15; 829:154501. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154501>
2. Ciudad E, Borrero-López O, Rodríguez-Rojas F, Ortiz AL, Guiberteau F. Effect of intergranular phase chemistry on the sliding-wear resistance of pressure less liquid-phase-sintered α -SiC. *Journal of the European Ceramic Society*. 2012 Feb 1;32(2):511-6. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.09.011>
3. Eom JH, Kim YW, Song IH. Effects of the initial α -SiC content on the microstructure, mechanical properties, and permeability of macro porous silicon carbide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2012 Jun 1;32(6):1283-90. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.11.040>
4. Yu J, Zhao G, Zhang C, Chen L. Dynamic evolution of grain structure and micro-texture along a welding path of aluminum alloy profiles extruded by porthole dies. *Materials Science and Engineering: A*. 2017 Jan 13; 682:679-90. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.11.089>
5. Akin I, Kaya O. Microstructures and properties of silicon carbide-and gaphene nanoplatelet-reinforced titanium diboride composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017 Dec 30; 729:949-59. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161110>
6. Kovalčíková A, Tatarko P, Sedlak R, Medved' D, Chlup Z, Múdra E, Dusza J. Mechanical and tribological properties of TiB₂-SiC and TiB₂-SiC-GNPs ceramic composites. *Journal of the European Ceramic Society*. 2020 Nov 1;40(14):4860-71. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.04.045>
7. Xu X, Luan X, Zhang J, Cao X, Zhao D, Cheng L, Riedel R. Significant improvement of ultra-high temperature oxidation resistance of C/SiC composites upon matrix modification by SiHfBCN ceramics. *Composites Part B: Engineering*. 2023 Mar 15; 253:110553. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110553>
8. Li L, Wang Y, Cheng L, Zhang L. Preparation and properties of 2D C/SiC-ZrB₂-TaC composites. *Ceramics International*. 2011 Apr 1; 37(3):891-6. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.10.033>
9. Lee SK, Kim CH. Effects of α -SiC versus β -SiC starting powders on microstructure and fracture toughness of SiC sintered with Al₂O₃-Y₂O₃ additives. *Journal of the American Ceramic Society*. 1994 Jun;77(6):1655-8. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1994.tb09771.x>
10. Pan Z, Fabrichnaya O, Seifert HJ, Neher R, Brandt K, Herrmann M. Thermodynamic evaluation of the Si-C-Al-YO system for LPS-SiC application. *Journal of phase equilibria and diffusion*. 2010 Jun;31:238-49. <https://doi.org/10.1007/s11669-010-9695-7>
11. Yang Q. Role of Al on the microstructure and mechanical properties of hot-pressed ABC-SiC.
12. Perera DS, Tokita M, Moricca S. Comparative study of fabrication of Si₃N₄/SiC composites by spark plasma sintering and hot isostatic pressing. *Journal of the European Ceramic Society*. 1998 Apr 1;18(4):401-4. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(97\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(97)00139-8)

13. Wan J, Duan RG, Mukherjee AK. Spark plasma sintering of silicon nitride/silicon carbide nanocomposites with reduced additive amounts. *Scripta Materialia*. 2005 Sep 1;53(6):663-7. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.05.037>
14. Yang H, Zhou X, Yu J, Wang H, Huang Z. Microwave and conventional sintering of SiC/SiC composites: Flexural properties and microstructures. *Ceramics International*. 2015 Nov 1;41(9):11651-4. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.05.126>
15. Eom JH, Seo YK, Kim YW. Mechanical and thermal properties of pressureless sintered silicon carbide ceramics with alumina–yttria–calcia. *Journal of the American Ceramic Society*. 2016 May;99(5):1735-41. <https://doi.org/10.1111/jace.14114>
16. Khodaei M, Yaghoobzadeh O, Baharvandi HR, Dashti A. Effects of different sintering methods on the properties of SiC-TiC, SiC-TiB₂ composites. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018 Jan 1;70:19-31. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.09.005>
17. Saeedi HM, Abbasi S, Mirkazemi M. Comparison the effect of temperature and amount of SiC on properties and microstructure of foam glass from waste soda-lime glass and cathode ray tube display panel. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.027>
18. Yaghoobzadeh O, Nazari M, Mashhadi M. The effect of rapid microwave sintering process on the electrical conductivity, thermal conductivity and mechanical properties of Al-TiC composites. *Materials Research*. 2018 Oct 11;21:e20180324. <https://doi.org/10.1590/19805373MR-2018-0324>
19. Rafaniello W, PLICHTA MR, VIRKAR AV. Investigation of Phase Stability in the System SiC□AlN. *Journal of the American Ceramic Society*. 1983 Apr;66(4):272-6. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1983.tb15713.x>
20. Yaghoobzadeh O, Nazari M, Mashhadi M. The effect of rapid microwave sintering process on the electrical conductivity, thermal conductivity and mechanical properties of Al-TiC composites. *Materials Research*. 2018 Oct 11;21: e20180324. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0324>
21. Jamwal A, Prakash P, Kumar D, Singh N, Sadasivuni KK, Harshit K, Gupta S, Gupta P. Microstructure, wear and corrosion characteristics of Cu matrix reinforced SiC–gaphite hybrid composites. *Journal of Composite Materials*. 2019 Aug;53(18):2545-53. <https://doi.org/10.1177/0021998319832961>
22. Chan KF, Zaid MH, Mamat MS, Liza S, Tanemura M, Yaakob Y. Recent developments in carbon nanotubes-reinforced ceramic matrix composites: A review on dispersion and densification techniques. *Crystals*. 2021 Apr 21;11(5):457. <https://doi.org/10.3390/cryst11050457>
23. Miranzo P, Ramírez C, Román-Manso B, Garzón L, Gutiérrez HR, Terrones M, Ocal C, Osendi MI, Belmonte M. In situ processing of electrically conducting gaphene/SiC nanocomposites. *Journal of the European Ceramic Society*. 2013 Sep 1;33(10):1665-74. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.01.021>
24. Zhang X, An Y, Han J, Han W, Zhao G, Jin X. Gaphene nanosheet reinforced ZrB₂–SiC ceramic composite by thermal reduction of gaphene oxide. *Rsc Advances*. 2015;5(58):47060-5. <https://doi.org/10.1039/C5RA05922D>
25. Razmjoo A, Baharvandi HR, Ehsani N. Pressureless sintering of SiC matrix composites reinforced with nano-β-SiC and gaphene. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2022 Sep;59(5):729-41. <https://doi.org/10.1007/s43207-022-00213-0>
26. Sedlák R, Kovalčíková A, Girman V, Múdra E, Rutkowski P, Dubiel A, Dusza J. Fracture characteristics of SiC/gaphene platelet composites. *Journal of the European Ceramic Society*. 2017 Nov 1;37(14):4307-14. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.067>
27. Yadhukulakrishnan GB, Rahman A, Karumuri S, Stackpoole MM, Kalkan AK, Singh RP, Harimkar SP. Spark plasma sintering of silicon carbide and multi-walled carbon nanotube reinforced zirconium diboride ceramic composite. *Materials Science and Engineering: A*. 2012 Aug 30; 552:125-33. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.020>
28. Tian P, Tang L, Teng KS, Lau SP. Gaphene quantum dots from chemistry to applications. *Materials today chemistry*. 2018 Dec 1; 10:221-58. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2018.09.007>
29. Facure MH, Schneider R, Mercante LA, Correa DS. A review on gaphene quantum dots and their nanocomposites: from laboratory synthesis towards agricultural and environmental applications. *Environmental Science: Nano*. 2020;7(12):3710-34. DOI: 10.1002/slct.202102353
30. Chen W, Lv G, Hu W, Li D, Chen S, Dai Z. Synthesis and applications of gaphene quantum dots: a review. *Nanotechnology Reviews*. 2018 Apr 25;7(2):157-85. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2017-0199>
31. Roy RK. Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement. John Wiley & Sons; 2001 Feb 13. ISBN: 978-0-471-36101-5
32. Wu X, Tian F, Wang W, Chen J, Wu M, Zhao JX. Fabrication of highly fluorescent gaphene quantum dots using L-glutamic acid for in vitro/in vivo imaging and sensing. *Journal of Materials Chemistry C*. 2013;1(31):4676-84. <https://doi.org/10.1039/C3TC30820K>
33. Miranzo P, Ramírez C, Román-Manso B, Garzón L, Gutiérrez HR, Terrones M, Ocal C, Osendi MI, Belmonte M. In situ processing of electrically conducting gaphene/SiC nanocomposites. *Journal of the European Ceramic Society*. 2013 Sep 1;33(10):1665-74. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.01.021>

- doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc. 2013.01.021
34. Cai N, Guo D, Wu G, Xie F, Tan S, Jiang N, Li H. Decreasing resistivity of silicon carbide ceramics by incorporation of gaphene. *Materials*. 2020 Aug 13;13(16):3586. <https://doi.org/10.3390/ma13163586>
35. Razmjoo A, Baharvandi HR, Ehsani N. The effect of gaphene addition on the properties of SiC ceramics—A review. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2022 Apr;58(2):437-60, <https://doi.org/10.1007/s41779-022-00701-w>