



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۵۷ تا ۶۵
Vol. 46, No. 2, Winter 2014, pp. 57- 65



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)
(AJSR - ME)

بررسی چقرمگی شکست نانوکامپوزیت‌های B_4C-TiB_2 با روش آزمون فرورفتگی ویکرز در بارگذاریهای مختلف

حمیدرضا بهاروندی^۱، مهدی تاجداری^{۲*}، علیرضا مرادخانی^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شرق تهران

(دریافت ۱۳۹۱/۹/۲، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۱۵)

چکیده

با توجه به گستردگی و کارایی روز افزون سرامیکها در صنایع مختلف، نیاز به شناسایی دقیق خواص مکانیکی آنها با حداقل صرف زمان و هزینه برای طراحی بهینه مهم است. در این پژوهش با ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیت B_4C با ده درصد حجمی دی-بوریید تیتانیوم، مقادیر دانسیته، مدول الاستیسیته و سختی آنها تعیین شده و مقدار چقرمگی شکست آنها توسط روابط مختلف تعیین چقرمگی شکست به روش آزمون فرورفتگی ویکرز در بارگذاریهای ۱۰۰N و ۱۵۰N بدست آمده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاصل دقت و کارایی معادله اصلاح شده تعیین چقرمگی شکست با استفاده از سطح اثر ترک در مقایسه با دیگر روابط را در پی داشت. همچنین مکانیزم رشد ترکهای ناشی از بارگذاریهای مختلف در نتایج حاصل از معادلات چقرمگی شکست اثر گذار بود.

کلمات کلیدی

چقرمگی شکست، نانوکامپوزیت، روش فرورفتگی، دی بوریید تیتانیوم، کاربیدبور.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: tajdari@yahoo.com

۱- مقدمه

بطور کلی فلزات انتقالی شامل عنصر بور به دلیل خواص شبه فلزی پیشرفته، نقطه ذوب و سختی بالا بعنوان مواد قابل استفاده در دمای بالا، بطور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه هستند [۱ و ۲]. دی‌بورید تیتانیوم پودری با ساختار هگزاگونال و خواص بالقوه عالی است. سختی و نقطه ذوب بالا، دانسیته پایین، هدایت الکتریکی و حرارتی خوب و مقاوم به جذب شیمیایی از ویژگیهای این ماده سرامیکی است [۳]. پودر دی‌بورید تیتانیوم نسبت به عوامل شیمیایی خورنده مقاوم است، بعلاوه بعلت سختی و نقطه ذوب بالا و همچنین پایداری ابعادی بعنوان یک ماده دیرگداز مطرح است [۲].

در دی‌بورید تیتانیوم پیوند بین صفحات ۰۰۱ نسبت به دیگر مسیرهای کریستالی ضعیف‌تر است [۴]. بدلیل خواص ویژه پودر دی‌بورید تیتانیوم، این پودر دارای مصارف زیادی در صنعت است که از مهمترین آنها می‌توان به کاربرد آن در زره‌های سبک وزن، نازل موشک‌ها، پوششها و ساخت قایق‌کهای تبخیر اشاره نمود. بدلیل قیمت بالا و فرایندهای خیلی پیچیده و زیاد، تولید قطعات از آن صرفاً برای ساخت قطعات خاص و کاربردهای ویژه استفاده می‌شود [۵].

خواص عمومی دی‌بورید تیتانیوم به عواملی چون روش ساخت مثل زینتر کردن بدون فشار و پرس داغ^۱ و پرس ایزواستاتیک گرم، خواص پودر اولیه و دانسیته جرم نهایی وابسته است [۵]. نقطه ذوب دی‌بورید تیتانیوم حدود 2980°C است. علاوه بر این دمای کارکرد در اتمسفر اکسیدی برای این ماده 800°C و در اتمسفر احیایی بیش از 2000°C است [۶].

دی‌بورید تیتانیوم دارای هدایت حرارتی بسیار بالایی است [۷] و ضریب انبساط حرارتی آن در محورهای مختلف کریستالوگرافی در دماهای مختلف متفاوت است [۶ و ۷]. بنابراین دی‌بورید تیتانیوم یک آنیزوتروپی انبساط حرارتی دارد. این آنیزوتروپی وقتی که اندازه دانه آن بواسطه زینترینگ نامناسب از مقدار حد بحرانی بزرگتر شود، تنشهای درونی قابل توجهی در طول فرایند سرمایش ایجاد می‌کند و سبب تشکیل میکروتورکهای در نمونه می‌شود [۸].

در بین کاربردهای دیرگداز، بعد از کاربردهای تنگستن، تیتانیوم و سیلیکون، کاربیدبور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و به‌عنوان یک ماده استراتژیک، به علت سختی بالا، دانسیته پایین، سطح مقطع بالا برای جذب نوترون و پایداری شیمیایی بکار برده می‌شود [۹]. کاربیدبور با داشتن نقطه ذوب بالا، سختی بالا، دانسیته کم و سطح مقطع بالا برای جذب نوترون، در تاسیسات

هسته‌ای و صفحات زرهی سبک وزن بشکل ویژه‌ای بکار برده می‌شود [۱۰]. خواص فیزیکی و مکانیکی کاربیدبور مورد استفاده در این پژوهش، در فعالیت پژوهشی دیگری توسط مولفین این مقاله [۱۱] بطور کامل بحث شده و بدست آمده است.

تاکنون روشهای بسیاری برای تعیین چقرمگی شکست مواد ابداع و بکارگیری شده است. از دقیق‌ترین این روشها، می‌توان به روش‌های $SENB^2$ 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 اشاره نمود که انجام آنها بسیار هزینه‌بر است. یکی دیگر از روشهایی که در سه دهه اخیر برای تعیین چقرمگی شکست مواد ترد بسیار مورد توجه قرار گرفته است؛ استفاده از روش سطح اثر انواع فرورونده‌ها است. دلیل این موضوع ساخت ساده نمونه‌های مورد آزمایش و افزایش سرعت در تعیین چقرمگی مواد در این روش است. تاکنون محققین بسیاری در این زمینه تحقیق کرده‌اند. پالمکویست^۵ [۱۲] این روش را با استفاده از فرورونده ویکرز برای اولین بار ابداع و ارائه کرد، آنستیس^۶ و همکارانش [۳] روش پالمکویست را بسط و آنرا با دقت بالا برای بسیاری از مواد ترد آزمایش کرده و به رابطه معروف و پر کاربردی دست یافتند. ایوانس^۷ [۱۴-۱۶] در راستای دسته‌بندی مواد، با توجه به میزان تردی آنها تلاشهای فراوانی انجام داد و به طبقه‌بندی معادلات ارائه شده خود توسط فرورونده ویکرز پرداخت. مین^۸ و همکارانش [۱۷] سعی در تعیین چقرمگی شکست مواد ترد با استفاده از فرورونده‌های هرم سه وجهی و چهار وجهی کردند. ساخارووا^۹ و همکارانش [۱۸] برای ارتباط چقرمگی شکست با ترکهای ساطع شده از اطراف فرورونده مخروطی تلاش کردند.

بیشتر تحقیقات در راستای ارتباط ترکهای شکل گرفته با چقرمگی شکست در اطراف فرورونده ویکرز نسبت به سایر فرورونده‌ها انجام شده است و در این راستا معادلات فراوانی ارائه شده است. در جدول (۱) برخی از معادلات پرکاربرد تعیین چقرمگی شکست مواد ترد به روش آزمون فرورفتگی ویکرز مشاهده می‌شود که در پژوهشی دیگر توسط مولفین این مقاله [۱۹]، به چهار دسته شامل معادلات پالمکویست، نیم‌سکه‌ای، روش خوراندن منحنی و معادله محاسبه چقرمگی شکست با استفاده از تکنیک سطح اثر ترکها طبقه‌بندی شدند. این تقسیم‌بندی بر مبنای میزان تردی مواد مورد آزمایش، مکانیزم پیشروی ترکها، میزان بارگذاری و دقت خروجی آنها در نظر گرفته شده بود.

جدول (۱): برخی معادلات چقرمگی شکست به روش آزمون فرورفتگی ویکرز

شماره معادله	مدل ترک	معادله	مرجع
۱	پالمکویست	$K_{IC} = 0.018Hv a^{1/2} \left(\frac{E}{Hv}\right)^{0.4} \left(\frac{c}{a-1}\right)^{-0.5}$	[۲۰]
۲	پالمکویست	$K_{IC} = 0.0515 \left(\frac{P}{C^{3/2}}\right)$	[۲۱]
۳	پالمکویست	$K_{IC} = 0.079 \left(\frac{P}{a^{3/2}}\right) \text{Log}(4.5 \frac{a}{c})$	[۱۴]
۴	پالمکویست	$K_{IC} = 0.015 \left(\frac{E}{Hv}\right)^{3/5} \left(\frac{P}{C^{3/2}}\right) \left(\frac{1}{a}\right)^{-0.5}$	[۲۲]
۵	نیم سکه‌ای	$K_{IC} = 0.016 \left(\frac{E}{Hv}\right)^{1/2} \frac{P}{C^{3/2}}$	[۱۳]
۶	نیم سکه‌ای	$K_{IC} = 0.067 Hv \cdot a^{1/2} \left(\frac{E}{Hv}\right)^{3/5} \left(\frac{C}{a}\right)^{-1/2}$	[۲۴]
۷	نیم سکه‌ای	$K_{IC} = 0.0752 \frac{P}{C^{3/2}}$	[۱۵]
۸	نیم سکه‌ای	$K_{IC} = 0.0726 \frac{P}{C^{3/2}}$	[۲۱]
۹	نیم سکه‌ای	$K_{IC} = 0.014 \left(\frac{E}{Hv}\right)^{1/2} \frac{P}{C^{3/2}}$	[۲۳]
۱۰	نیم سکه‌ای	$K_{IC} = 0.16 Hv a^{1/2} \left(\frac{C}{a}\right)^{-3/2}$	[۱۵]
۱۱	تکنیک خوراندن منحنی	$K_{IC} = 0.0089 \left(\frac{E}{Hv}\right)^{3/5} \left(\frac{P}{a \cdot c^{1/2}}\right)$	[۲۲]
۱۲	تکنیک خوراندن منحنی	$K_{IC} = 0.0889 \left(\frac{Hv \cdot P}{\sum_{i=1}^4 c_i}\right)^{1/2}$	[۲۵]
۱۳	تکنیک خوراندن منحنی	$K_{IC} = 0.4636 \left(\frac{E}{Hv}\right)^{3/5} \frac{P}{a^{3/2}} 10^F$	[۱۶]
۱۴	تکنیک خوراندن منحنی	$K_{IC} = 0.018 \left(\frac{E}{Hv}\right)^{1/2} \frac{P}{C^{3/2}}$	[۲۶]
۱۵	تکنیک خوراندن منحنی	$K_{IC} = \left(Hv a^{1/2}\right) \left(\frac{E}{Hv}\right)^{3/5} 10^y$	[۱۶]
۱۶	معادله جدید	$K_{IC} = 0.003693 \left(\frac{E}{Hv}\right)^{1/2} t_{Ave}^{1/2} \frac{P}{A^{3/2}}$	[۲۷]

تشکیل یافته در اطراف بخش فرورفته در نمونه بر حسب mm، مساحت سطح اثر کل میکروتُرک‌های تشکیل یافته در اطراف بخش فرورفته بر حسب mm² هستند. همچنین مقادیر F و Y بترتیب برابرند با [۱۶]:

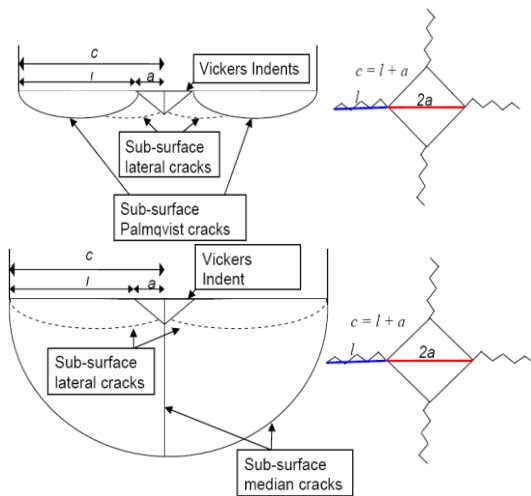
$$y = -1/59 - 0/34x - 2/02x^2 + 11/23x^3 - 24/97x^4 + 15/32x^5$$

$$F = -1/59 - 0/34x - 2/02x^2 + 11/23x^3 - 24/97x^4 + 16/32x^5$$

و مقدار X نیز در روابط فوق برابر است با:

$$x = \text{Log} \left(\frac{c}{a}\right)$$

شکل (۱) بیانگر شماتیک کلی ترکهای تشکیل یافته در مدل‌های پالمکویست و نیم‌سکه‌ای است. معادلات دسته سوم بر حسب میزان تردی مواد، بارگذاری و طول ترکهای تشکیل یافته در اطراف بخش فرورفته در غالب دو دسته اول متغییر است. بدین معنا که ریشه استخراج ضریب نیمه تجربی آنها بیشتر بر پایه سعی و خطا است.



شکل (۱): مدل ترک پالمکویست (بالا)، مدل ترک شعاعی (پایین) [۲۷]

مقادیر C و a درج شده در شکل (۱) معادل همان پارامترهای تعریف شده در معادلات جدول (۱) هستند. مقدار l نیز معرف طول ترک تشکیل یافته از انتهای بخش فرورفته ویکرز تا انتهای ترک است. بطور کلی در سه دسته اول از معادلات (پالمکویست، نیم سکه‌ای و تکنیک خوراندن منحنی)، چقرمگی شکست با طول ترکهای ساطع شده از اطراف فرورونده ویکرز ارتباط داده شده است، اما در دسته چهارم سطح اثر ترکها به همراه مقدار میانگین ضخامت میکروتُرکها با چقرمگی شکست ارتباط داشته و از جدیدترین معادلات است. نتایج برخی از معادلات جدول (۱) در مواردی تا بیش از

در جدول (۱)، K_{IC} بیانگر مقدار عامل بحرانی شدت تنش در حالت اول شکست (چقرمگی شکست) بر حسب $MPa \cdot \sqrt{m}$ ، میزان بارگذاری الماس ویکرز، بر حسب N، مقدار طول ترک بر حسب mm، E مدول یانگ نمونه بر حسب GPa، Hv سختی ویکرز نمونه بر حسب GPa، a نصف قطر بخش فرورفته در نمونه بر حسب mm، t_{Ave} ضخامت میانگین میکروتُرک‌های

برای بهبود قابلیت زینتر پذیری کاربیدبور، TiB_2 به عنوان یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای افزودن به ترکیب اولیه در نقش فاز ثانویه شناخته شده است [۲۹]. در این پژوهش نیز از پودر نانوکامپوزیتی TiB_2 با ۱۰٪ درصد حجمی تهیه شده به روش سل-ژل در ترکیب با B_4C استفاده شده است. این پودر نانوکامپوزیتی حاوی ۲ درصد حجمی از کربن به عنوان مکمل نیز بوده است. منبع تامین کننده کربن برای ترکیب اولیه، رزین فنولیک بوده است. جدول (۳) بیانگر ترکیب شیمیایی موجود در پودر Nano- TiB_2 مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول (۳): ترکیب شیمیایی Nano- TiB_2 مصرفی

ترکیب شیمیایی	٪ وزنی
TiB_2	۹۸
TiO_2	۰/۵
Mg	۰/۵
Si	۰/۳
C	۰/۸

زینتر قطعات در دمای $2225^\circ C$ تحت اتمسفر گاز آرگون و به مدت ۱ ساعت انجام شد. ابتدا به منظور خروج مواد آلی نمونه‌ها تا $200^\circ C$ حرارت داده شدند. نرخ افزایش دمای کوره $10^\circ C/min$ در اتمسفر آرگون در نظر گرفته شد. بعد از اتمام زمان زینتر کوره را خاموش کرده و اجازه داده شد تا کوره به طور طبیعی تا دمای محیط سرد شود. دانسیته نمونه‌های نانوکامپوزیت مطابق روش ارشمیدس [۳۰]، مدول الاستیسیته آنها بر پایه استاندارد ASTM C769 [۳۱] و مقادیر سختی با استفاده از روش ویکرز و براساس استاندارد ASTM C1327 [۳۲] بدست آمد. برای آزمایش سختی و چقرمگی شکست، سطح نمونه‌ها با دستگاه پولیش تا دقت ۱ میکرون آماده‌سازی، صیقلی و با اعمال بارهای مختلف عمودی به وسیله دستگاه سختی سنجی اثر گذاری شد.

۳- نتایج حاصل از آزمایش‌ها

۳-۱- دانسیته، مدول الاستیسیته و سختی نمونه‌ها

دانسیته خام نمونه‌های نانوکامپوزیت با استفاده از دانسیته TiB_2 که برابر $4/5 \text{ gr/cm}^3$ و دانسیته B_4C که برابر $3/5 \text{ gr/cm}^3$ برای تمامی نمونه‌ها به صورت یکسان و برابر با $2/51 \text{ gr/cm}^3$ بدست آمد و از اثر دهی تغییرات ناشی از ناخالصی‌های موجود در نمونه‌ها در محاسبه دانسیته صرف نظر شد. دانسیته-های مختلفی برای دی‌بورید تیتانیوم گزارش شده است که متداولترین آنها $4/52 \text{ gr/cm}^3$ است [۶]. نمونه‌های پرس داغ شده از این پودر دانسیته‌های کوچکتر یا مساوی $4/376 \text{ gr/cm}^3$

۳۰٪ خطا را در پی داشته است [۱۳]. اما با توجه به سادگی و سرعت ساخت نمونه‌ها و روند آزمایش آنها، توجه ویژه‌ای به این روش شده است و محققین را برانگیخته تا در راستای افزایش دقت معادلات این روش کوششهای فراوانی انجام دهند، چرا که با افزایش دقت خروجی معادلات، برتری آنها در مقایسه با سایر روشها مشهود و بدیهی است. معادله ۱۶ از جدول (۱) از جدیدترین معادلات ارائه شده در این روش است و ضریب نیمه تجربی آن با انجام آزمایش‌های لازم بر روی کامپوزیتهای B_4C-C توسط مولفین همین مقاله [۱۹] از مقدار $0/03693$ به $0/03655$ اصلاح شد. این تغییر در جهت افزایش دقت مقادیر خروجی از معادله انجام شد.

در این پژوهش با ساخت و آزمایش چقرمگی شکست با بارگذاریهای مختلف توسط روش آزمون فروروندگی ویکرز بر روی نانوکامپوزیتهای $B_4C-NanoTiB_2$ مقادیر خروجی از آنها با یکدیگر مقایسه می‌شود.

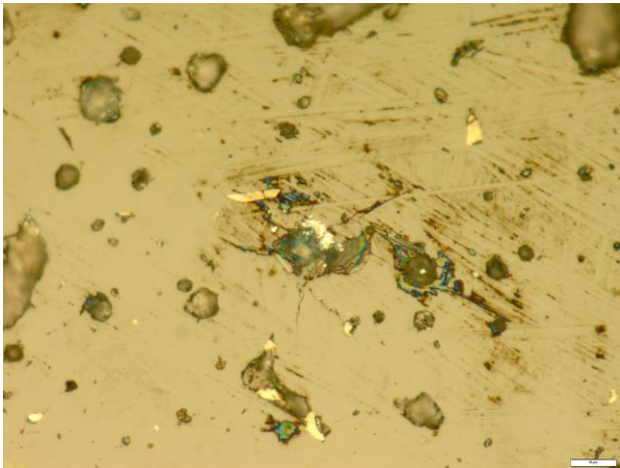
۲- آزمایشات تجربی

هدف از انجام آزمایشاتی که در ادامه شرح داده می‌شود، ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتهای B_4C-TiB_2 برای تعیین چقرمگی شکست آنها است. روش ساخت نمونه‌ها بر طبق الگوی حاصل از فعالیت پژوهشی مرادخانی و همکارانش [۲۸] از این قرار بود که پس از توزین مواد اولیه توسط ترازوی دیجیتالی، عملیات آسیاب با کمک آسیاب سیاره‌ای به مدت دو ساعت و با سرعت 150 rpm در محیط ایزوپروپانول انجام شد. دوغاب حاصل پس از خروج از آسیاب به مدت ۲۴ ساعت در خشک‌کن حرارتی در دمای $110^\circ C$ قرار گرفت. شکل‌دهی پودرهای آسیاب شده پس از الک کردن و یکنواخت‌سازی اندازه ذرات، با استفاده از پرس هیدرولیک تحت فشار 80 MPa و در قالب‌های فولادی انجام شد. در نهایت نمونه‌ها به صورت قطعه‌های استوانه‌ای شکل به قطر $1/2 \text{ cm}$ و ارتفاع 1 cm ساخته شدند.

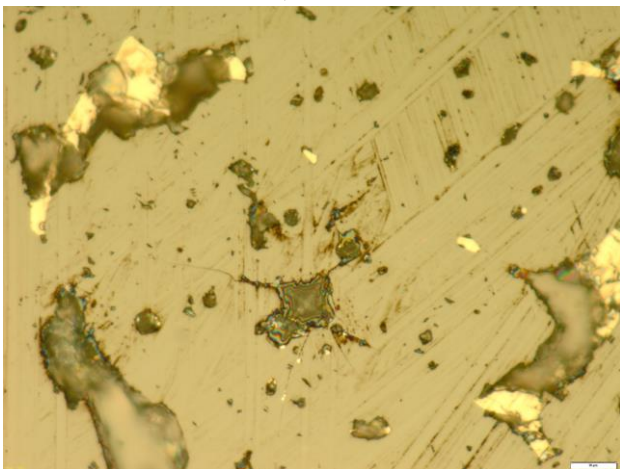
مواد موجود در پودر کاربیدبور مورد استفاده در جدول (۲) مشاهده می‌شود. ترکیبات اضافی بیانگر وجود ناخالصی در پودر کاربیدبور است.

جدول (۲): درصد عناصر شیمیایی موجود در پودر کاربیدبور

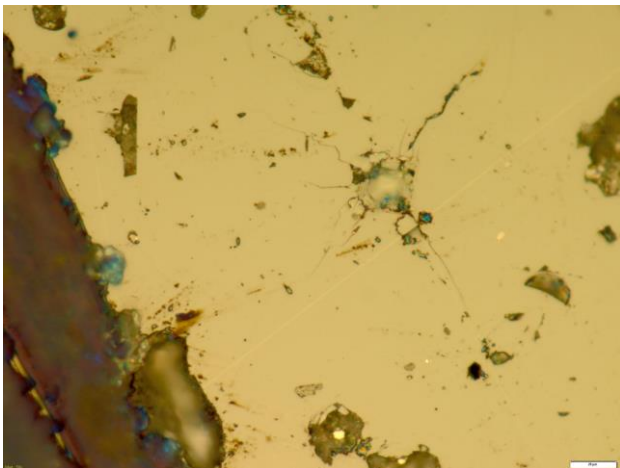
نوع ترکیب	درصد وزنی
B	۷۶/۱
C	۲۰/۳
B_2O_3	۱/۹۶
Fe	۰/۷۳
Si	۰/۹۱



شکل (۲): اثر ویکرز بر نانو کامپوزیت با بارگذاری ۵۰N



شکل (۳): اثر ویکرز بر نانو کامپوزیت با بارگذاری ۱۰۰N



شکل (۴): اثر ویکرز بر نانو کامپوزیت با بارگذاری ۱۵۰N

دارند که برابر با $96/6$ درصد دانسیته تئوری است [۳۳]. از آنجایی که در درجه حرارت‌های زینترینگ، رشد دانه به آسانی اتفاق می‌افتد، ساخت بدنه‌های مونولیتیک دی‌بورید تیتانیوم با دانسیته بالا مشکل است [۳۴].

مقدار میانگین مدول الاستیسیته نمونه‌ها با سه مرتبه اندازه‌گیری برابر با $485/343$ GPa بدست آمد. مقدار مدول الاستیسیته دی‌بورید تیتانیوم برابر با $545-551$ GPa گفته شده است [۴]. از طرفی این مقدار برای کاربیدبور در حدود 446 GPa گزارش شده است [۱۹].

سختی کاربیدبور مصرفی نیز برابر با $30/2$ GPa بدست آمده است [۱۹]. با محاسبه سختی نمونه‌های نانو کامپوزیت مقدار آن برابر با 33 GPa بدست آمد. با بررسی این مقادیر ملاحظه می‌شود که با افزودن ده درصد حجمی $NanoTiB_2$ ، سختی کاربیدبور افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به کاهش تخلخل و افزایش دانسیته در نمونه‌ها نسبت داد.

۲-۳- چقرمگی شکست نمونه‌ها

با افزودن ده درصد حجمی از افزودنی TiB_2 ، مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌ها افزایش چشمگیری نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی خواهد یافت. دلیل این موضوع کاهش عیوب و منشأ حفرات و ترک‌ها در نانو کامپوزیت است [۲۹]. شکل‌های (۲) تا (۵) بترتیب اثر بارگذاری الماس ویکرز را در نمونه‌ها با اعمال بارهای عمودی 50 ، 100 ، 150 و 200 نیوتنی و به مدت $20S$ به وسیله دستگاه سختی‌سنجی اثر ویکرز بر هر نمونه را نشان می‌دهد که نحوه اعمال بارگذاری در این نمونه‌ها بطور تدریجی است. در شکل (۲) مقدار بارگذاری آنچنان ناچیز بوده که موجب تشکیل ترک‌ها در نمونه‌ها نمی‌شود. این امر موجب ناکارآمدی در نتایج خروجی معادلات چقرمگی شکست خواهد شد، زیرا با تشکیل نشدن ترک در نمونه‌ها امکان محاسبه مقدار چقرمگی شکست توسط این روش، در عمل غیر ممکن ولی از نظر ریاضی نتایج چقرمگی شکست بینهایت خواهند شد. شکل‌های (۳) و (۴) اثری از ترک‌ها را در اطراف بخش فرورفته از نمونه نشان می‌دهد. وجود اینگونه ترک‌ها موجب استاندارد شدن نمونه‌ها برای تعیین چقرمگی شکست می‌شود.

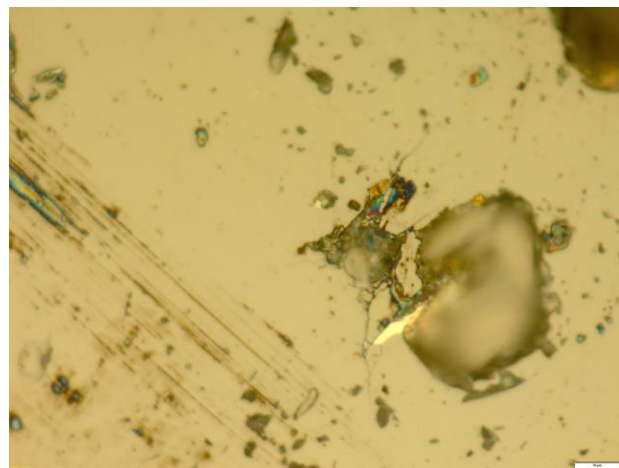
همواره نوعی تعادل در خروجی از نتایج با نوسانات این دو عامل برقرار خواهد شد.

در شکل (۶) مقادیر چقرمگی شکست به ازای بارگذاری $100N$ و $150N$ با استفاده از روابط ۵ تا ۱۶ از جدول (۱) مشاهده می‌شود. اعداد ۵ تا ۱۶ از جدول افقی معرف معادلات ۵ تا ۱۶ از جدول (۱) هستند. گفتنی است که مقادیر معادله ۱۶ با احتساب ضریب اصلاح شده بدست آمده در پژوهشهای قبلی محاسبه شد. همچنین برای بدست آوردن مقادیر رابطه ۱۶، از نرم افزار ایمج آنالایزر^{۱۲}، برای محاسبه مقدار ضخامت میکروتورکها و سطح اثر ترکها استفاده شده است. چگونگی انجام محاسبات توسط این نرم افزار در مرجع [۲۷] مفصل توضیح داده شده است.

با دقت در شکل (۶) می‌توان دریافت که با تغییرات میزان بارگذاری، مقادیر خروجی از معادلات چقرمگی شکست نیز تغییرات محسوسی را در پی خواهند داشت. این موضوع به ناخالصیهای موجود در نمونه‌ها، دقت دستگاه سختی‌سنجی و زمان بارگذاری مربوط می‌شود. از طرفی چنانچه گذشت روابط بیان شده نیز دارای خطاهایی در محاسبه چقرمگی شکست هستند، بویژه اینکه با ایجاد ترکهای نامنظم در اطراف بخش فرورفته و نیز پیشروی زیگزاگی ترک که امری ذاتی و بدیهی در مواد ترد محسوب می‌شود [۱۳]؛ دقت معادلات را بطور چشمگیری تحت تاثیر قرار خواهند داد. تمامی موارد یاد شده منجر به بروز چنین اختلافاتی در مقادیر چقرمگی شکست خواهند شد. مقادیر چقرمگی شکست در نانوکامپوزیتهای دی-بوریید تیتانیوم بین $3/5 MPa \cdot \sqrt{m}$ تا $5/5 MPa \cdot \sqrt{m}$ گزارش شده است [۲۹].

نتایج حاصل از این تحقیق نیز تا حدودی موید این مطلب است.

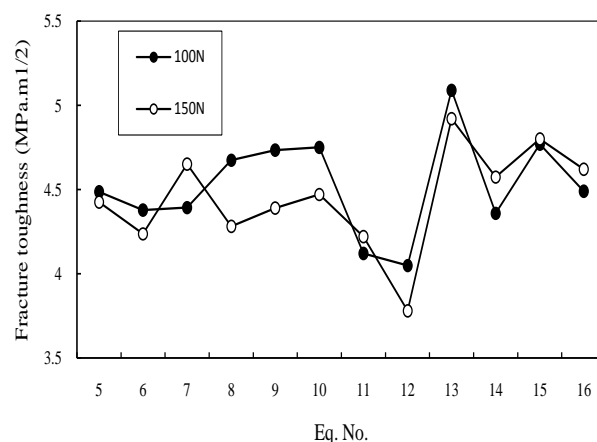
با توجه به اینکه معادلات ۱۰ و ۱۴ از پرکاربردترین معادلات جدول (۱) هستند، می‌توان میانگین نتایج این دو معادله را به ازای بارگذاری 100 و 150 نیوتن بعنوان چقرمگی شکست نمونه‌ها معرفی کرد. با بررسی شکل (۶) این مقدار برابر $4/54 MPa \cdot \sqrt{m}$ خواهد بود. از طرفی وجود ترکهای نامنظم در نمونه‌ها، کارایی معادله ۱۶ را نیز مورد ارزیابی قرار می‌دهد. از اینرو با بررسی مقدار چقرمگی شکست نمونه‌ها با مقادیر نتیجه شده از معادله ۱۶، میزان اختلاف آنها در حدود ۳٪ بدست می‌آید. این مقدار اختلاف ناچیز بیانگر وسعت کارایی معادله ۱۶ نسبت به پژوهشهای قبلی است.



شکل (۵): اثر ویکرز بر نانوکامپوزیت با بارگذاری $200N$

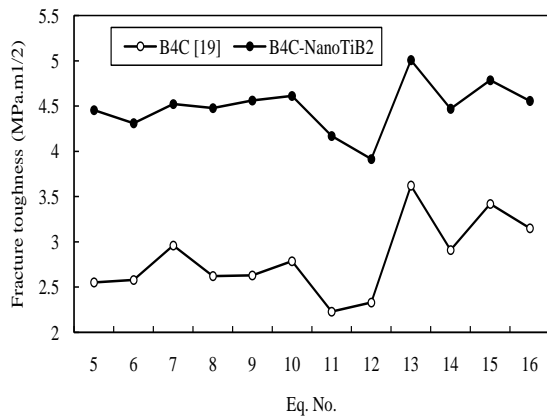
در شکل (۵) مقدار بارگذاری آنچنان زیاد بوده که موجب ایجاد تراشه^{۱۰} در نمونه‌ها می‌شود. بر طبق تئوری شکست گریفیث^{۱۱} [۳۵] و نتایج محققینی [۲۰-۲۷] که در زمینه ارتباط چقرمگی شکست با اثر بجامانده از آزمون ویکرز در نمونه‌ها تحقیقاتی را انجام داده‌اند، رخ دادن این پدیده موجب صرف مقداری انرژی هنگام بروز آن می‌شود و صرف این انرژی در تعیین چقرمگی شکست خطای بسیاری ایجاد می‌کند. از اینرو می‌توان اعمال نیروهای 100 و 150 نیوتنی به الماس ویکرز را برای این دسته از نانوکامپوزیتهای برای بررسی چقرمگی شکست آنها مناسب و کارآمد دانست. زیرا موجب ایجاد تراشه در نمونه‌ها نمی‌گردد و از طرفی ترکهایی را در اطراف بخش فرورفته ایجاد می‌نماید.

آنچنان که از اشکال (۳) و (۴) بر می‌آید با افزایش میزان بارگذاری در نمونه‌ها، مقدار رشد ترکها نیز بیشتر خواهد شد و از آنجایی که چقرمگی شکست نمونه‌ها با مقدار بارگذاری الماس ویکرز نسبت مستقیم و با میزان رشد ترکها نسبت عکس دارد،



شکل (۶): مقادیر چقرمگی شکست نمونه $B_4C-NanoTiB_2$

میانگین دو مقدار بارگذاری ۱۰۰ و ۱۵۰ نیوتن) برای نمونه‌های کاربیدبور حاوی $B_4C-NanoTiB_2$ با نمونه‌های B_4C خالص به ازای روابط ۵ به بعد موجود در جدول (۱) مورد مقایسه قرار گرفته است



شکل (۸): مقایسه مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های $B_4C-NanoTiB_2$ ، B_4C

چنانچه از شکل (۸) برمی‌آید، میزان مقادیر چقرمگی شکست کاربید بور با افزودن ۱۰٪ حجمی از دی‌بورید تیتانیوم بطور چشمگیری افزایش یافته است. بطوریکه این میزان افزایش با محاسبه هر کدام از روابط موجود حداقل ۲۸٪ است.

۴- نتیجه‌گیری

آنچه در این پژوهش اهمیت داشته بررسی رفتار و چگونگی رشد ترک در بارگذاریهای متنوع، بمنظور تعیین مقدار چقرمگی شکست نمونه‌های نانو کامپوزیت $B_4C-NanoTiB_2$ است. از اینرو می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- دانسیته، مدول الاستیسیته و سختی نمونه‌های مورد آزمایش به ترتیب برابر با $۲/۶۱ \text{ gr/cm}^3$ ، $۴۸۵/۳۴۳ \text{ GPa}$ ، ۳۳ GPa بدست آمدند.

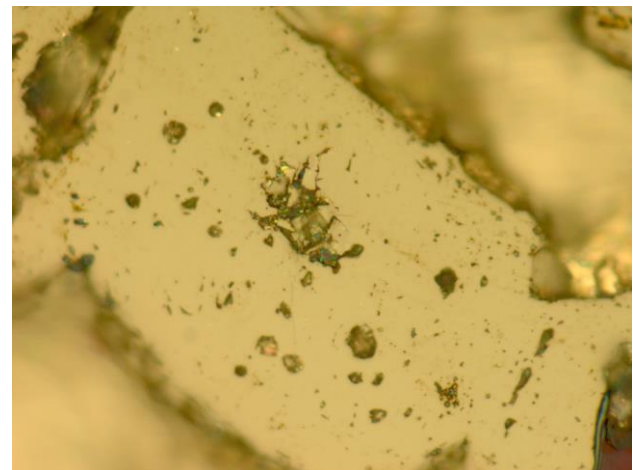
۲- با تغییرات میزان بارگذاری، نتایج مقادیر چقرمگی شکست حاصل از معادلات مختلف برای نمونه‌های $B_4C-NanoTiB_2$ نوسانات زیادی را در پی داشت و اعمال بارهای ۱۰۰N و ۱۵۰N برای تعیین چقرمگی شکست این نانو کامپوزیت مناسب و کارآمد است.

۳- میزان چقرمگی شکست نانو کامپوزیتها در حدود $۴/۵۴ \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ بدست آمد و نتایج معادله اصلاح شده محاسبه چقرمگی شکست توسط سطح اثر ترک، در مقایسه با نتایج دیگر معادلات از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و میزان اختلاف آن با معادلات پر کاربرد ناچیز است.

با دقت در نتایج معادلات ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که مقادیر بدست آمده در آنها اختلافاتی چشمگیر در مقایسه با دیگر روابط را دارند. شاید علت این موضوع در میزان اثر پذیری چقرمگی شکست از طول ترکهاست. بدین معنا که چقرمگی شکست در این دو رابطه با جذر طول ترک (C) رابطه دارد. این گونه اختلافات در تعیین چقرمگی شکست کامپوزیت‌های $Al_2O_3-NanoSiC$ و B_4C-C نیز بدست آمده است [۲۷ و ۱۹].

برای دستیابی به سطح اثر مناسب برای تعیین چقرمگی شکست نمونه‌ها باید توجه ویژه‌ای به زمان بارگذاری و چگونگی اعمال بار شود. با بررسی ساختار میکروسکوپی نانو کامپوزیتها و با توجه به اینکه نمی‌توان از تولید و ایجاد میکروتورها به هنگام فرایند تولید و سنتز جلوگیری کرد، می‌توان دریافت که همیشه رشد ترک بشکل آهسته خواهد بود و این رشد به زمان بارگذاری و نحوه اعمال بار وابستگی زیادی دارد.

شکل (۷) مقدار بارگذاری ۱۵۰N را بمدت ۴S بر نمونه‌ها نشان می‌دهد. در این شکل بر خلاف نمونه‌های قبلی شیب روند افزایش بارگذاری تندتر بوده و بمنظور مقایسه آن با نمونه‌های استاندارد قبلی انجام گرفته است.



شکل (۷): اثر ویکرز با بارگذاری ۱۵۰N و بشکل آبی بر روی نمونه

از شکل (۷) نمی‌توان برای تعیین مقدار چقرمگی شکست استفاده کرد. از آنجایی که بار با سرعت بیشتری به نمونه وارد شده است، موجب تشکیل نشدن تصویر کامل هرم ویکرز در آن می‌شود. از طرفی باعث ایجاد تراشه در اطراف بخش فرورفته نیز شده است. همچنین ترکهای تشکیل یافته به هیچ عنوان قابل بررسی نیستند، زیرا برخی ترکها در داخل تصویر هرم ویکرز شکل گرفته‌اند.

در شکل (۸) مقادیر چقرمگی شکست (حاصل شده از

of Vickers indentations as measure of toughness of hard metals.”, Arch. Eisenhuettenwes Vol. 33, pp. 629- 634, 1962.

Moradkhani A.R., Baharvandi H.R., Tajdari M, [۱۲] “Investigation of mechanical properties and microstructure of B₄C-C composites fabricated by hotpress”, The Modares Journal of Mechanics Engineering (in Persian), Vol. 12, No. 6, pp. 10- 18, 2013.

Ansatis G.R., Chantikul P., Lawn B.R., Marshall D.B., [۱۳] “A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness : I, Direct Crack Measurements”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 64, No. 9, pp. 532- 538, 1981.

Evanse A.G., Wilshaw T.R., [۱۴] “Quasi-static solid particle damage in brittle solid -I .Observation analysis ad implication”, Acta Metallurgica, Vol. 24, pp. 939- 956, 1976.

Evans A.G., Charles E.A., [۱۵] “Fracture toughness determinations by indentation”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 59, pp. 371- 372, 1976.

Evans A.G., [۱۶] “Fracture toughness :the role of indentation technique (In fracture mechanics applied to brittle materials) Freiman W, ed.”, ASTM STP 678, West Conshohocken, PA, pp. 112- 135, 1985.

Min L., Wei-min C., Nai-gang L., Ling-dong W., [۱۷] “A numerical study of indentation using indenters of different geometry”, Journal of MaterialsResearch, Vol .19, pp. 73- 78, 2004.

Sakharova N.A., Fernandes J.V., Antunes J.M., Oliveira M.C., [۱۸] “Comparison between Berkovich, Vickers and conical indentation tests :A three-dimensional numerical simulation study”, International Journal of the Solids and Structures, Vol. 46, pp. 1095- 1104, 2009.

Tajdari M., Baharvandi H.R., Moradkhani A.R., [۱۹] “Modification the Accuracy of Fracture Toughness Equation Coefficients Resulting from Irregular Surface Cracks Generated by Vickers Test of B₄C-C Composites”, The Modares Journal of Mechanics Engineering (in Persian), Vol. 13, No. 2, pp.12- 21., 2013.

Niihara K.A., [۲۰] “A fracture mechanics analysis of indentation induced Palmqvist crack in ceramic”, Journal of Materials Science, Vol. 2, pp. 221- 223, 1983.

Lawn H.R., Fuller E.R.: [۲۱] “Equilibrium penny-like

۴- فرآیند بارگذاری الماس ویکرز بر نمونه‌ها در محاسبه چقرمگی شکست توسط این روش اهمیت دارد و تدریجی بودن آن سبب افزایش دقت خروجی معادلات خواهد شد.

۵- افزودن ۱۰٪ حجمی از دی‌بورید تیتانیوم به B₄C موجب افزایش حداقل ۲۸ درصدی مقدار چقرمگی شکست کاربید بور می‌شود.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از پژوهشکده خودرو، مجتمع مواد و فناوریهای ساخت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فرهنگسرای بهاران و سرکار خانم رحیمی بخاطر انجام همکاریهای لازم کمال تشکر و قدردانی را بعمل می‌آورند.

۶- مراجع

Eul S. K., Cheol W. J., [۱] “Effect of iron and boron carbide on the densification and mechanical properties of titanium diboride ceramic”, Journal of American Ceramic Society, Vol. 72, pp. 1868- 1872, 1989.

Feber M. K., Becher P. F., [۲] “Effect of microstructure on the properties of TiB₂ Ceramics”, Journal of American Ceramic Society. Vol.66 No. 1, pp. 1, 1983.

Logan K. V., [۳] “process for making highly reactive sub-micron amorphous titanium diboride powder and products made there from”, U. S. Patent. Vol. 5, 160, pp. 716.

Gillies. D. C., lewis, D, [۴] “Bond strength in diborides of some group IV and V metals”, Journal of the less common metals, Vol. 12, pp. 202- 209, 1976.

Shim K. B, Wiencinski J. K., [۵] “Grain boundry structure in Titanium diboride”, Materials science, Vol. 189-190, pp. 129- 134, 1995.

Schery A., [۶] “Hard and peotective materials ” Hand book of thin film process technology, Institute of physics publishing, Philadelphia, 1995.

Schneider S. J.; [۷] “Engineering materials Handbook ” vol. 5, pp. 32- 36.

Weimer A. W., [۸] “Carbide, Nitride and boride materials synthesis and processing”, 1997

Medvedovski E., [۹] “Alumina Ceramics for Ballistic Protection, part 1”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 81, No. 3, pp. 27- 32, 2002.

Medvedovski E., [۱۰] “Alumina Ceramics for Ballistic Protection, part 2”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 81, No. 4, pp. 45- 50, 2002.

Palmqvist S., [۱۱] “Energy causing cracks at corners

- Mashhadi M., Taheri Nassaj A.W., Mashhadi M., Vincenzo M., Sglavo G., "Pressureless sintering of B_4C-TiB_2 composites with Al additions", Ceramic international, CERI- 4335; No. of Pages 7, 2011. [۲۹]
- ASTM B311, "Test Method for Density Determination for Powder Metallurgy (P/M) Materials Containing Less Than Two Percent Porosity", Developed by Subcommittee: B09.11, Book of Standards, Vol. 2, No. 5, 2002. [۳۰]
- ASTM C769, "Standard Test Method for Sonic Velocity in Refractory Materials at Room Temperature and Its Use in Obtaining an Approximate Young's Modulus.In", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15, No. 1, 2005. [۳۱]
- ASTM C1327, "Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics", Developed by Subcommittee: C28.01, Book of Standards, Vol. 15, No. 1, pp. 8, 2008. [۳۲]
- Zavitsanos P.D., Morris J. R., "Synthesis of titanium diboride by a self-propagation", Ceramic Engineering science production., Vol. 4, pp. 624- 633, 1983. [۳۳]
- John B., Wachtman Jr., Torizuka S., Hishio H, "High strength TiB_2 ", Ceramic Engineering science production Vol. 11., pp. 1454- 1460., 2008. [۳۴]
- Griffith A.A., "Philosophical Transactions", Series A, Vol. 221, pp. 163- 198, 1920. [۳۵]
- cracks indentation fracture" Journal of the Materials Science, Vol. 10, pp. 2016- 2024, 1975.
- Lauger M.T., "New formula for indentation toughness in ceramics.", Journal of Materials Science, Vol. 6, pp. 355- 356, 1987. [۲۲]
- Lawn B.R., Evans A.G., Marshall D.B., "Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system", Journal of American Ceramic Society, Vol. 63, pp. 574- 581, 1980. [۲۳]
- Nihhara K., Morena R. Hasselman P.H., "Evaluation of K_{IC} of brittle solids by the indentation method with low crack-to-indentation", Journal of Materials Science, Vol. 1, pp. 13- 16, 1982. [۲۴]
- Shetty D.K., Wright I.G., Mincer P.N., Cluar A.H, "Indentation fracture of WC-Co ceremets", Journal of Materials Science, Vol. 20, pp. 1873- 1882, 1985. [۲۵]
- Japanese Standard Association, "Testing method for fracture toughness of high performance ceramics", JIS R- 1607, 1990. [۲۶]
- Moradkhani A.R, Baharvandi H.R., Tajdari M., Latifi H.R., Martikainen J., "Determination of fracture toughness using the areas of micro crack tracks left in brittle materials by Vickers indentation test", Journal of Advanced Ceramic, Vol. 2, No. 1, pp. 87- 102, 2013. [۲۷]
- Moradkhani A. R., Baharvandi H. R., Vafaeseefat A., Tajdari M., "Microstructure and Mechanical Properties of Al_2O_3-SiC Nanocomposites with 0.05% MgO and Different SiC Volume Fraction", International journal of advanced design and manufacturing technology, Vol. 5, No. 3, pp. 99- 105, 2012. [۲۸]

۷- زیرنویس ها

- ^۱ Hot-press
^۲ Single Edge Notch Beam
^۳ Single Edge V-Notch Beam
^۴ Indentation Strenght Bending
^۵ Palmqvist
^۶ Anstis
^۷ Evans
^۸ Min
^۹ Sakharova
^{۱۰} Chipping
^{۱۱} Griffith
^{۱۲} Image Analyz