

مروري بر تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در کامپوزیت‌های دیبورید تیتانیومی

علی صداقت‌آهنگری حسین‌زاده، آرش فرجی، مسعود کاظمی

پژوهشگاه مواد و انرژی

چکیده: بدنه‌های سرامیکی بر پایه بوریدها، کاربیدها و نیتریدها دارای ویژگی‌هایی نظیر سختی بالا، نقطه ذوب بالا و مقاومت به اکسیداسیون بالا هستند. از بین اصلی ترین ترکیبات آنها می‌توان به دیبورید زیرکونیوم، دیبورید هافنیوم و دیبورید تیتانیوم اشاره کرد. پیوند اشتراکی قوی در بوریدها موجب افزایش نقطه ذوب، مدول کشسان و سختی در این گروه از سرامیک‌ها می‌شود. بدلیل بالا بودن هدایت حرارتی و الکتریکی بوریدها می‌توان از آنها به عنوان مواد دیرگذار و قطعاتی نظیر پوشش‌های مقاوم به سایش و ابزار برشی استفاده کرد. همچنین به عنوان کاتد برای پبل الکتروشیمیایی در فرآیند تولید آلومینیم کاربرد دارد. به منظور استفاده بهینه از این ترکیبات و ساختن کامپوزیت‌هایی با خواص موردنظر از تقویت‌کننده‌هایی (SiC, TiC, C و عناصر فلزی) استفاده می‌شود. در این مقاله کامپوزیت‌های تقویت شده با این ترکیبات بررسی شده‌اند. همچنین با توجه به بررسی‌های صورت گرفته معمولاً از افزودنی SiC برای بهبود ویژگی‌های حرارتی، مکانیکی و مقاومت به اکسیداسیون در اکثر محیط‌ها استفاده می‌شود.

کلمات کلیدی: TiB₂, کامپوزیت، دیبورید تیتانیوم، SiC



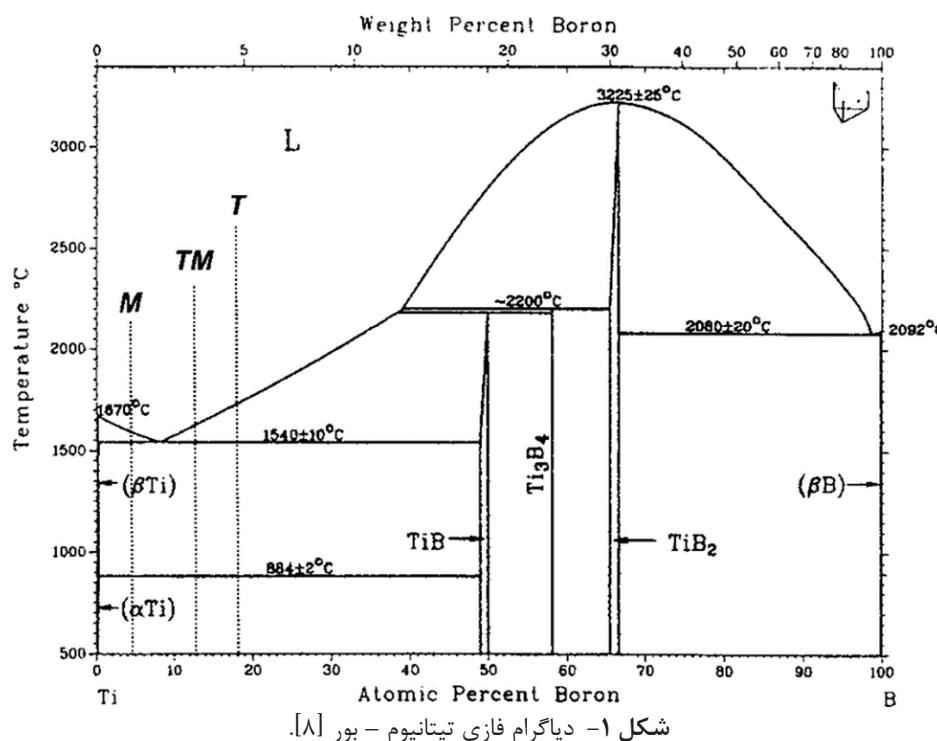
مهندس آرش فرجی، نویسنده
مسئلول، پژوهشگاه مواد و
انرژی

۱- مقدمه

دیبوریدها در مقایسه با نیتریدها و کاربیدها دارای ضریب انبساط حرارتی پایین‌تر و هدایت حرارتی بالاتر می‌باشند. این ویژگی موجب افزایش مقاومت به شوک حرارتی و استفاده از آن‌ها برای کاربردهای دما بالا می‌شود. همچنین دلیل بالا بودن هدایت حرارتی و الکتریکی آن‌ها مربوط به پیوندهای شیمیایی، سطوح انرژی ترازهای الکترونی و پیوندهای میان اتم‌های بور می‌باشد. بنابراین از آن‌ها می‌توان به عنوان مواد دیرگذار و قطعاتی نظیر پوشش‌های مقاوم به سایش، ابزار برشی در صنایع نظامی و هوافضا و همچنین کاتد برای پبل الکتروشیمیایی هال-هرولت در فرآیند تولید آلومینیم و صنایع هسته‌ای استفاده نمود.

۲- مروري بر منابع مطالعاتی

سرامیک‌های کاربیدی، نیتریدی و بوریدی به دلیل پیوند شیمیایی قوی دارای پایداری ساختاری در دمای بالا می‌باشند [۲-۱]. سیستم Ti-B دارای سه فاز با ساختار اورتومبیک است که فازهای TiB و Ti₃B₄ در اثر واکنش پریتکتیک به ترتیب در دمای ۲۲۰۰ و ۲۱۸۰ درجه سانتیگراد تجزیه می‌شوند [۳-۴]. در حالی که TiB₂ در دمای حدود ۳۲۲۵ درجه سانتیگراد به صورت ناگهانی ذوب می‌شود [۵]. فاز B دارای محدوده شکل‌گیری باریکی ۴۹-۵۰ درصد اتمی بور می‌باشد و در ۷ درصد اتمی بور و دمای حدود ۱۵۵۰ درجه سانتی‌گراد با محلول جامد Ti واکنش یوتکتیک می‌دهد [۶]. همچنین واکنش پریتکتیک فاز TiB₂ و Ti₃B₄ و فاز مذاب در دمای ۲۰۲۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد [۷-۸]. همان‌طور که در شکل ۱ (دیاگرام فازی Ti-B) مشاهده می‌شود در دمای ۲۰۸۰ درجه سانتی‌گراد، TiB₂ با بور واکنش یوتکتیک می‌دهد [۹-۸].



شکل ۱- دیاگرام فازی تیتانیوم - بور [۸].

TiB₂ به دلیل اینکه دارای سختی حدود ۳۲ GPa، استحکام خمی حدود ۱۰۰۰ MPa، مدول کشسان ۵۳۰ GPa نقطه ذوب حدود ۳۲۲۵ درجه سانتی گراد، هدايت الکترونیکی و حرارتی بالا، پایداری شیمیایی بالا، مقاومت به شوک حرارتی بالا، مقاومت به سایش بالا می باشد در قطعات با کاربرد دما بالا به کار می رود. همچنین به دلیل داشتن پیوندهای کوالانسی در ترکیب و ضربی خودنفوذی پایین، دارای قابلیت تفجیشی پایینی است [۱۶-۱۰].

۳- فعالیت‌های تجربی صورت گرفته بر روی کامپوزیت‌های بر پایه TiB₂

به منظور بهبود قابلیت تفجیشی و خواص مکانیکی و فیزیکی سرامیک‌های از جنس TiB₂ از ترکیبات مختلفی مانند TiC استفاده شده است [۲۲-۱۷].

۳-۱-۳- کامپوزیت TiB₂-SiC

SiC قطعه‌ای سرامیکی با سختی ۲۰ تا ۲۷ گیگا پاسکال، چقمرمگی ۲-۵ MPa.m^{1/2} می‌باشد. هنگامی که SiC به صورت تقویت کننده افزوده می‌شود به دلیل بهبود چگالش و ممانعت از رشد دانه‌ها چقمرمگی شکست را تا ۹-۶ MPa.m^{1/2} افزایش می‌دهد [۲۳]. بنابراین کامپوزیت‌های بر پایه TiB₂ به همراه تقویت کننده SiC دارای مقاومت به اکسایش بالا هستند [۲۴]. حضور ذرات SiC در زمینه، با ممانعت از رشد دانه‌ها و ایجاد مانع در برابر رشد ترک‌ها، خواص مکانیکی کامپوزیت را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، جهت جلوگیری از کاهش بیش از حد سختی و دستیابی به خواص بهینه می‌توان از روش مناسب تفجیشی و چگالش برای این سرامیک‌ها استفاده کرد [۲۵-۲۶]. در جدول ۱ برخی از خواص TiB₂ و SiC نشان داده شده است.

با توجه به توضیحات بالا استفاده از تقویت کننده SiC به دلیل سازگاری شیمیایی و بهبود خواص مکانیکی برای ساخت کامپوزیت زمینه TiB₂ مناسب است. با استفاده از پرس گرم با فشار ۲۰-۶۰ MPa و محدوده دمایی ۲۰۰۰-۲۱۰۰ درجه سانتی گراد و مدت زمان حدود ۳۰ تا ۶۰ دقیقه می‌توان به چگالی ۹۶ تا ۹۹,۸٪ دست یافت [۲۳]. همچنین با توجه به گزارشات محققین مقدار بهینه مورد استفاده از ذرات SiC به عنوان تقویت کننده ۲۵ تا ۳۰ درصد حجمی بوده که استحکام خمی ۷۱۰ مگاپاسکال و چقمرمگی ۵-۷ MPa.m^{1/2} را نشان داده است [۲۷-۲۹]. همانطور که گفته شد SiC برای بهبود مقاومت در مقابل اکسایش و استحکام خمی با کاهش رشد دانه‌ها در طول تفجیشی به سرامیک‌های بر پایه TiB₂ اضافه می‌شود [۳۰].

جدول ۱- ویژگی‌های TiB_2 و SiC .[۲۶-۲۳]

$\alpha - SiC$	TiB_2	ویژگی
۲۸۰۰	۳۳۲۵	نقطه ذوب (°C)
۳/۲۱	۴/۵۲	چگالی (g/cm³)
۳۲-۲۷	۳۵-۲۵	سختی (GPa)
۴۵۰	۳۷۰-۳۰۰	استحکام خمی (MPa)
۳/۱ - ۴/۶	۳ - ۴/۵	چقرمگی (MPa.m¹/²)
۴۱۰	۵۴۰	مدول کشسان (GPa)
$۴/۱۶ \times 10^{-۶}$ در جهت C	$۸/۶ \times 10^{-۶}$ در جهت C	ضریب انبساط حرارتی (°C⁻¹)
.۰/۱۴	.۰/۲۲	ضریب پواسون

کامپوزیت TiB_2-SiC معمولاً با عملیات مخلوط کردن مکانیکی پودرهای SiC و TiB_2 و انجام فرایند پرس گرم بر روی آنها تولید می‌شوند [۳۱]. سازوکار بهبود چقرمگی در کامپوزیت به این صورت می‌باشد که زمانی که ترک به دانه‌های کشیده TiB_2 و ذرات SiC می‌رسد، ترک در امتداد مرزدانه‌های ضعیف رشد نموده و چقرمگی افزایش می‌یابد و علاوه بر این با افزایش درصد حجمی SiC میزان فازهای ناخالص توزیع شده در ماده نیز کاهش می‌یابد [۳۴-۳۲]. در شکل ۲ مسیر رشد ترک و تصویر میکروسکوپی سطح پرداخت شده کامپوزیت TiB_2-SiC مشاهده می‌شود. همچنین جهت افزایش بیشتر چقرمگی شکست، خواص مکانیکی و چگالی از ویسکرهای SiC بهجای ذرات SiC استفاده می‌شود. در جدول ۲ اثر افزودن ویسکر SiC بر خواص مکانیکی کامپوزیت مشاهده می‌شود [۳۶-۳۳].

شکل ۲- مسیر رشد ترک و تصویر میکروسکوپی سطح پرداخت شده کامپوزیت TiB_2-SiC .[۳۶]

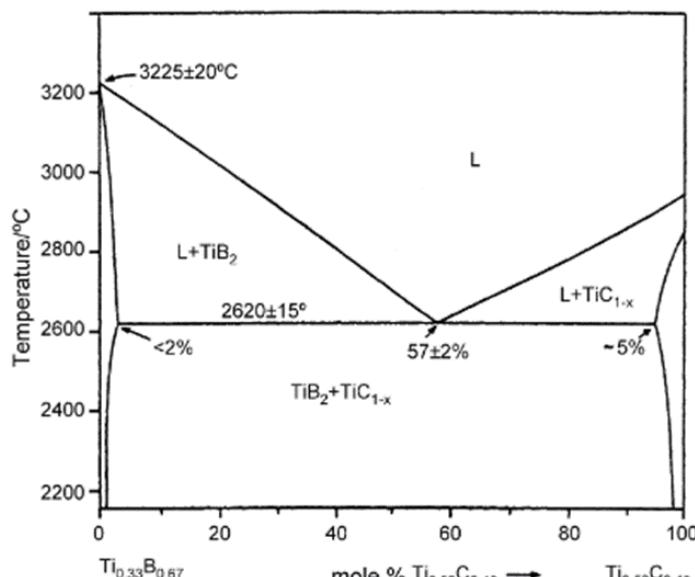
همچنین در پژوهشی مشاهده گردید که در کامپوزیت زمینه TiB_2 تقویت شده با SiC تهییه شده به روش SPS با افزودن ۳۰ درصد حجمی SiC چگالی کامپوزیت از ۹۲ درصد به ۹۹/۵ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، چقرمگی شکست کامپوزیت از ۳ MPa.m¹/² به ۶/۴ MPa.m¹/² به دلیل کردن مکانیزم‌های افزایش چقرمگی و کنترل رشد دانه بهبود یافت [۳۷].

جدول ۲- اثر افزودن ویسکر SiC بر خواص مکانیکی کامپوزیت [۳۵].

استحکام خمشی	چگالی نسبی	چقرمگی شکست	مقدار SiCw	نمونه
MPa	درصد	MPa.m ^{1/2}	درصد حجمی	
±۳۷۶ ۳۷	۹۸/۹	۳/±۴ ۰/۵	۰	A
±۶۷۸ ۳۰	۹۹/۳	۶/±۵ ۰/۴	۱۰	B
±۶۴۰ ۳۵	۹۸/۹	۷/±۳ ۰/۵	۲۰	C
±۴۶۹۳۸	۹۳/۴	۷/±۸ ۰/۴	۳۰	D

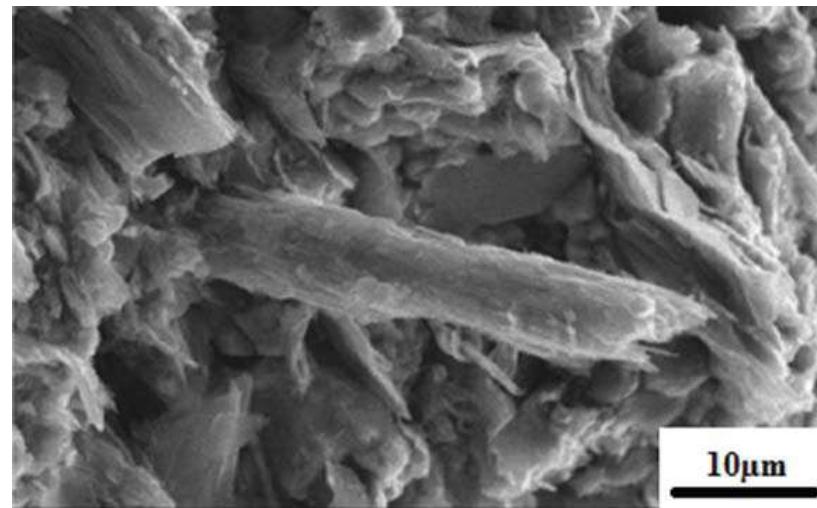
۲-۳- کامپوزیت TiB_2-TiC

TiC نیز برای بهبود خواص کامپوزیت بر پایه TiB_2 مورد استفاده قرار می‌گیرد. مثلاً در تحقیقاتی از ترکیب TiC و TiB_2 استفاده شد که بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که این ترکیب تا دمای 2500 درجه از نظر ترمودینامیکی پایدار می‌باشد و در دمای 2600 درجه دچار استحاله یوتکنیک می‌شود (شکل ۳). همچنین سختی ویسکر این کامپوزیتها در دمای اتاق برابر با 23 GPa می‌باشد که پایین‌تر از سختی هر کدام از ترکیبات TiC و TiB_2 به صورت خالص می‌باشد. به دلیل ناسازگاری ضرایب انبساط حرارتی TiC و TiB_2 در دمای 600 درجه شاهد ایجاد انحراف در مسیر پیشروی ترک یا ایجاد انحراف در مسیر رشد آن و در نتیجه افزایش چقرمگی می‌باشیم [۳۸، ۱۴]. علاوه بر این پس از افزودن TiC مشاهده می‌شود که مرزدانه‌ها قفل شده و در سرعت رشد دانه‌ها تأخیر به وجود می‌آید که منجر به افزایش استحکام این کامپوزیت‌ها می‌گردد [۳۹ و ۲۱].

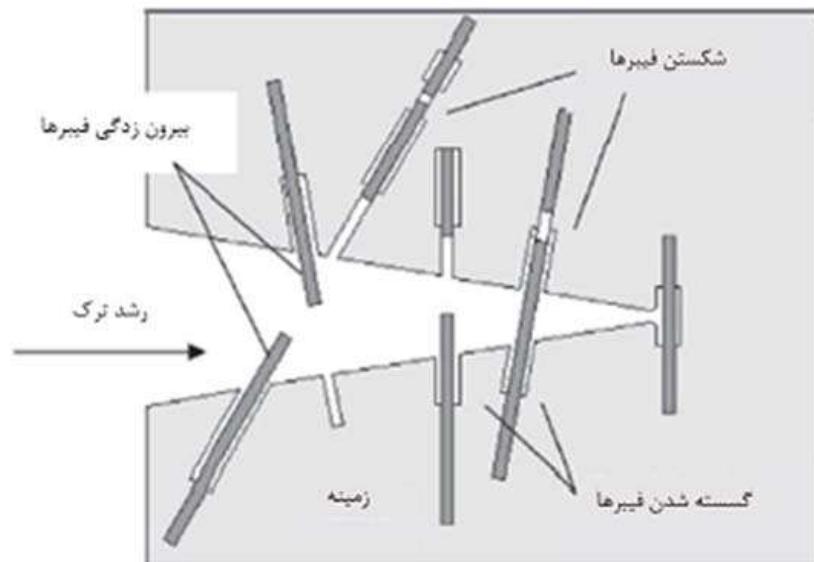
شکل ۳- دیاگرام فازی TiB_2-TiC_{1-x} [۱۴]

۳-۳- کامپوزیت TiB_2-C

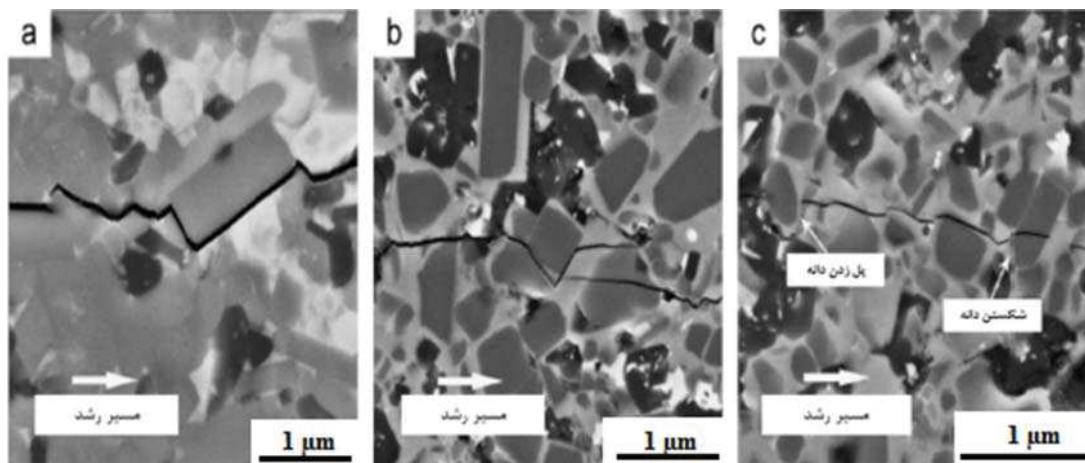
برای افزایش چقرمگی و استحکام در کامپوزیت‌های پایه TiB_2 در پژوهشی توسط یانگ مشاهده شد که با افزودن 2 تا 6 درصد وزنی فیبر کربن به کامپوزیت، چقرمگی و استحکام افزایش می‌یابد [۱۵]. این افزایش چقرمگی می‌تواند به دلیل پل زدن مسیر ترک و ایجاد سد انرژی برای پیشرفت ترک باشد که در شکل‌های ۴ و ۵ افزایش چقرمگی به دلیل ایجاد انحراف و پل زدن در مسیر ترک و همچنین تصاویر سطح مقطع شکست کامپوزیت TiB_2-C و فیبرهای کربن به صورت شماتیک نشان داده شده است [۳۴-۳۶]. در شکل ۶ تصویر ترک در دمای 1700 درجه سانتیگراد و مدت زمان سیتر 30 دقیقه در نمونه $TiB_2-80\%C$ مشاهده می‌شود [۳۶].



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح شکست کامپوزیت TiB_2 -C [۳۶].



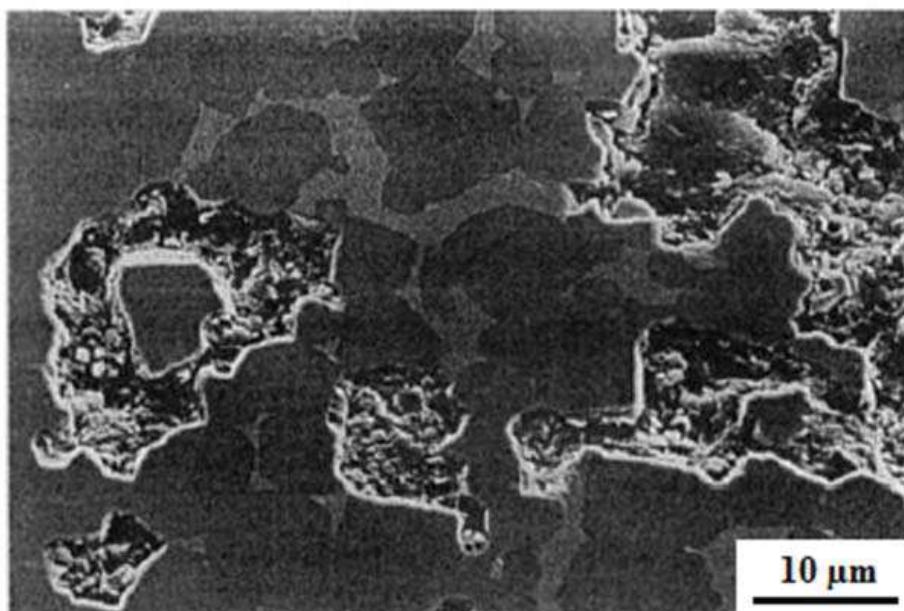
شکل ۵- سازوکارهای افزایش چرمگی در نتیجه افزودن فیبرهای کوتاه کربنی [۴۱].



شکل ۶- تصاویر مسیر پیشروی ترک در نمونه TiB_2 - 20% Vol SiC بوسیله میکروسکوپ الکترونی [۳۶].

۴-۳- کامپوزیت بر پایه TiB_2 تقویت شده با عناصر فلزی

جهت افزایش نرخ چگالی از تقویت کننده‌های فلزی در کامپوزیت‌های زمینه TiB_2 استفاده می‌شود. این تقویت کننده‌ها Fe , Ni , Co و ... می‌باشد. اما در فرآیند تفجوشی در فاز مایع باید به متغیرهای نظری زمان، اتمسفر، دما و درصد خلوص دقت شود. مثلاً از عیوب‌های کامپوزیت‌های TiB_2 -Fe حساس بودن فرآیند چگالش این کامپوزیت‌ها به ناخالصی‌هایی نظری اکسید درون پودر می‌باشد. به عبارت دیگر، در دمای سالیدوس، ناخالصی‌های اکسیدهای بور و واکنش‌های چگالش این بخارها هستند. رشد دانه‌ای که از طریق واکنش فاز بخار روی سطح ذرات TiB_2 ایجاد می‌شود موجب مصرف انرژی سطحی و افزایش اکتیویته در طول فرآیند تفجوشی می‌شود. در نتیجه جهت جلوگیری از رشد افراطی دانه در انجام واکنش تفجوشی در فاز مایع باید میزان اکسید موجود در پودرهای TiB_2 را در حد امکان کاهش داد. همچنین ناخالصی‌های اکسیژن و کربن موجود در پودر مسئول حل شوندگی فاز مذاب درون کامپوزیت است. در شکل ۷ ترشوندگی کامل و ناقص درون کامپوزیت‌های زمینه TiB_2 ناشی از تقویت‌کننده آهن تحت فرآیند تفجوشی در فاز مایع نشان داده شده است. بنابراین با افزایش مقدار اکسیژن، پخش شدن مذاب آهن و ترشوندگی توسط آن کمتر می‌شود، در صورتیکه در پودرهای با اکسیژن کمتر از ۲۶٪ زاویه ترشوندگی کوچکتر از ۵ درجه بعد از ۱۰ دقیقه تفجوشی به دست می‌آید [۳۹].



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی از سرمت TiB_2 - 20 %Vol Fe تفجوشی شده در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد [۳۹].

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته مشاهده می‌شود که در کامپوزیت‌های زمینه TiB_2 بر اساس کاربرد و خواص مدنظر می‌توان از تقویت‌کننده‌های مختلفی نظری SiC , TiC , C و Fe استفاده نمود. تقویت کننده SiC سبب افزایش چقرمگی و مقاومت به اکسایش می‌گردد. تقویت کننده TiC سبب با توجه به اینکه سبب افزایش چقرمگی و بهبود خواص مکانیکی می‌گردد اما بر روی سختی در دمای اتاق اثر مطلوبی ندارد. تقویت کننده‌های فلزی نسبت به SiC و TiC با توجه حساسیت‌های بسیار در نحوه فرایند و ترکیب شدن از کاربرد کمتری برخوردار می‌باشند. همچنین در جدول ۳ خلاصه اثر تقویت‌کننده‌های مختلف بر روی کامپوزیت‌های زمینه TiB_2 آورده شده است.

جدول ۳- اثر افزودن تقویت کننده‌های مختلف بر روی کامپوزیت‌های زمینه TiB_2

ردیف	تقویت کننده	خاصیت	توضیحات
۱	SiC	افزایش چرمه‌گی شکست - مقاومت به اکسایش بالا - بهبود خواص مکانیکی	به دلیل بهبود چگالش و ممانعت از رشد دانه‌ها
۲	TiC	پایداری ترمودینامیکی در دماهای بالا - سختی پایین - افزایش چرمه‌گی - افزایش استحکام	به دلیل ناسازگاری ضرایب انبساط حرارتی و دمای بالا
۳	C	افزایش چرمه‌گی و استحکام	به دلیل پل زدن مسیر ترک و ایجاد سد انرژی برای پیشرفت ترک
۴	عناصر فلزی	حساس بودن فرآیند چگالش	به دلیل وجود ناخالصی‌های اکسیدی

مراجع

- [1] Nekahi, Sahar, et al. "TiB₂-SiC-based ceramics as alternative efficient micro heat exchangers." *Ceramics International* 45.15 (2019): 19060-19067.
- [2] M.R. Salimpour, A.T. Al-Sammaraie, A. Forouzandeh, M. Farzaneh, Constructal design of circular multilayer microchannel heat sinks, *J. Therm. Sci. Eng. Appl.* 11(2018) 011001
- [3] Namini, Abbas Sabahi, et al. "Microstructure–mechanical properties correlation in spark plasma sintered Ti–4.8 wt.% TiB₂ composites." *Materials Chemistry and Physics* 223 (2019): 789-796.
- [4] Kovalčíková, Alexandra, et al. "Mechanical and tribological properties of TiB₂-SiC and TiB₂-SiC-GNPs ceramic composites." *Journal of the European Ceramic Society* 40.14 (2020): 4860-4871.
- [5] Mohanavel, Vinayagam. "Mechanical and microstructural characterization of AA7178-TiB₂ composites." *Materials Testing* 62.2 (2020): 146-150.
- [6] E. Courtright, H. Graham, A. Katz, and R. Kerans, "Ultra High Temperature Assessment Study – Ceramic Matrix Composites," Wright Patterson Air Force Base, Ohio, 1992.
- [7] G. Grimvall, A. Guillermet, "Phase Stability Properties of Transition Metal Diborides," in Am. Inst. Phy, 1991.
- [8] C. Subramanian, T. Murthy, A. Suri, "Synthesis and consolidation of titanium diboride," *Int J Refract Met Hard Mater*, 25 (2007), 345–50.
- [9] L. Sigl, K. Schwetz, "TiB₂-based cemented borides: a new generation of hard metals," *Powder Metall Int*, 23(4) (1991), 221–3.
- [10] A. Mukhopadhyay, G. Raju, B. Basu, A. Suri, "Correlation between phase evolution, mechanical properties and instrumented indentation response of TiB₂-based ceramics," *J Eur Ceram Soc*, 29 (2009), 505–16.
- [11] M. Feber, P. Becher, C. Finch, "Effect of microstructure on the properties of TiB₂ ceramics," *J Am Ceram So*, 66 (1983), C2–4.
- [12] W. Huazhang, W. Huilin, L. Yexian, "TiB₂-based inter cathode in aluminum electrolysis," *J. Light Met*, 5 (1993), 26–31.
- [13] D. Yanling, W. Weimin, "Research development on TiB₂ material," *J. Foshan Ceram*, 14 (2004), 7-11.
- [14] D. Vallauri, I. Atlas, A. Chrysanthou, "TiC–TiB₂ composites: a review of phase relationships, processing and properties," *J Eur Ceram Soc*, 28 (2008), 1697–713.
- [15] X. Jilai, H. A. Oye, "Wetting of graphite and carbon/TiB₂ composites by liquid aluminum," *J. Light Met. TMS*, Warrendale PA, (1993), 631–637.
- [16] B. Basu, G. Raju, A. Suri, "Processing and properties of monolithic TiB₂-based materials," *Int. Mater*, 51 (2006), 352–374.
- [17] M. Shibuya, Y. Yamamoto, M. Ohyanagi, "Simultaneous densification and phase decomposition of TiB₂–WB₂ solid solutions activated by cobalt boride addition," *J Eur Ceram Soc*, 27 (2007), 307–12.

- [18] J. Park, Y. Koh, H. Kim, C. Hwang, E. Kong, "Densification and mechanical properties of titanium diboride with silicon nitride as sintering aid," *J Am Ceram Soc*, 82(11) (1999), 3037–42.
- [19] L. Qiu, B. Yao, Z. Ding, "Characterization of structure and properties of TiN–TiB₂ nano-composite prepared by ball milling and high pressure heat treatment," *J Alloys Compd*, 456 (2008), 436–40, 2008.
- [20] D. Green, "Microcracking mechanisms in ceramics," in *Fracture mechanics of ceramics*, 5 (1983), 457–78.
- [21] Z. Zhao, L. Zhang, W. Liu, Y. Yin, "Bulk ultrahard composites in the eutectic TiB₂–TiC system by SHS under high gravity," *Int J Self-Propag High-Temp Synth*, 18 (2009), 186–93.
- [22] S. Bhaumik, C. Divakar, A. Singh, G. Upadhyaya, "Synthesis and sintering of TiB₂ and TiB₂–TiC composite under high pressure," *Mater Sci Eng A*, 279 (2000), 275–81.
- [23] Y. Ohya, M. Homann, G. Petzow, "Sintering of in-situ synthesized SiC–TiB₂ composites with improved fracture toughness," *J. Am. Ceram. Soc*, 75(2) (1992), 2479–2783.
- [24] D. Kuo, W. Kriven, "Mechanical behavior and microstructure of SiC and SiC/TiB₂ ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc*, 18 (1998), 51–57.
- [25] M. Flinders, D. Ray, A. Anderson, R. Cutle, "High-toughness silicon carbide as armor," *J Am Ceram Soc*, 88(8) (2005), 2217–26.
- [26] P. Karandikar, G. Evans, S. Wong, M. Aghajanian, M. Sennett, "A review of ceramics for armor applications In: *Advances in ceramic armor IV*," in John Wiley & Son iNC, Hoboken, 2009.
- [27] D. Zhu, S. Liu, X. Yin, L. Yang, C. Xiao, H. Zhou, "In-situ HIP synthesis of TiB₂/SiC ceramic composites," *J Mater Proc Tech*, 187 (1999), 89–90.
- [28] S. Torizuka, K. Sato, H. Nishio, T. Kishi, "Effect of SiC on interfacial reaction and sintering mechanism of TiB₂," *J Am Ceram Soc*, 78 (1995), 1606–10.
- [29] J.S. LEE, K. Yoshida, T. Yano, "Influence of fiber volume fraction on the mechanical and thermal properties of unidirectionally aligned short-fiberreinforced SiC composites," *J. Foshan Ceram*, 24 (2004), 7–11.
- [30] W. Gu, K. Faber, "Steinbrech RW. Microcracking and R-curve behavior in SiC–TiB₂ composites," *Acta Metall Mater*, 40(11) (1992), 3121–8.
- [31] D. Magley, R. Winholtz, K. Faber, "Residual stress in a two-phase microcracking ceramic," *J Am Ceram Soc*, 73(6) (1990), 1641–4.
- [32] A. Evans, K. Faber, "Crack-growth resistance of microcracking brittle materials," *J Am Ceram Soc*, 67(4) (1984), 255–60.
- [33] G. Zhang, X. Yue, Z. Jin, J. Dai, "In situ synthesized TiB₂ toughened SiC," *J. Eur. Ceram. Soc*, 16 (1996), 409–412.
- [34] D. Bucevac, S. Boskovic, B. Matovic, V. Krstic, "Toughening of SiC matrix with in-situ created TiB₂ particles," *Ceram Int*, 36(7) (2010), 2181–8.
- [35] J. Deng, X. Ai, "Microstructure and Mechanical Properties of Hot-Pressed TiB₂–SiCw Composites," *Materials Research Bulletin*, 33 (1998), 575–582.
- [36] H. Chen, Z Wang, Z. Wu, "Investigation and characterization of densification, processing and mechanical properties of TiB₂–SiC ceramics," *Materials and Design*, 64 (2014), 9–14.
- [۳۷] غفوری ف، احمدیان م، عمامی ر، ذاکری م، "بررسی تاثیر مقدار SiC بر خواص مکانیکی کامپوزیت کامپوزیت TiB₂-SiC سیتر شده با روش سینتر جرقه پلاسمای ایلان و انجمن مهندسین متالورژی و مواد ایران"، هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی مواد و متالورژی و سیزدهمین کنفرانس مشترک انجمن متالورژی و مواد ایران و انجمن ریخته گری ایران، (۱۳۹۸)
- [۳۸] امینی کیاب، طبی فرد س.ع، یوزباشی اع، "سنتر ترکیب کامپوزیتی MACS" به روش "TiB₂-SiC" پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی و جامعه علمی ریخته گری ایران، (۱۳۹۰)
- [39] C. Blanc, F. Thevenot, D. Goeuriot, "Microstructural and mechanical characterization of SiC–submicron TiB₂ composites," *J Eur Ceram Soc*, 19(5) (1999), 561–9.
- [40] R. Telle, L. S. Sigl, and K. Takagi, "Boride-Based Hard Materials," in *Handbook of Ceramic Hard Materials*, Wiley- VCH, (2000), 803–947.
- [41] M. Pan, P. Hoffman, D. Green, J. Hellmann, "Elastic properties and microcracking behavior of particulate titanium diboride–silicon carbide composites," *J Am Ceram Soc*, 80(3) (1997), 692–8.