مروری بر تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در کامپوزیت های دی‌بورید تیتانیومی

علی صداقت‌آهنگری‌حسین‌زاده، آرش فرجی، مسعود کاظمی

پژوهشگاه مواد و انرژی



مهندس آرش فرجی، نویسنده مسئول، پژوهشگاه مواد و انرژی

a.faraji@merc.ac.ir

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 اصلی‌ترین 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. به دلیل بالا بودن هدایت حرارتی و الکتریکی بوریدها می‌توان از آنها به عنوان مواد دیرگداز و قطعاتی نظیر پوشش‌های مقاوم به سایش و ابزار برشی استفاده کرد. همچنین به عنوان کاتد برای پیل الکتروشیمیایی در فرآیند تولید آلومینیم کاربرد دارند. به منظور استفاده بهینه از این ترکیبات و ساختن کامپوزیت‌هایی با خواص مورد نظر از تقویت کننده‌هایی (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 معمولا از افزودنی SiC برای بهبود ویژگی‌های حرارتی، مکانیکی و مقاومت به اکسیداسیون در اکثر محیطها استفاده می شود.

کلمات کلیدی: TiB_2، کامپوزیت، دی‌بورید تیتانیوم، SiC

۱- مقدمه

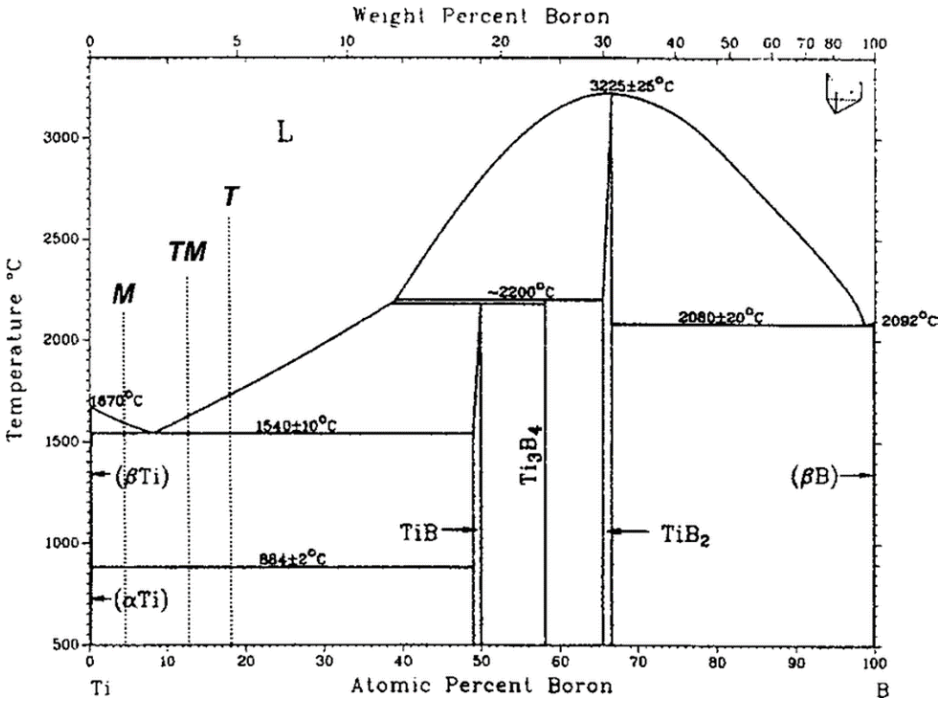
دی‌بوریدها در مقایسه با نیتریدها و کاربیدها دارای ضریب انبساط حرارتی پایین‌تر و هدایت حرارتی بالاتر می‌باشند. این ویژگی موجب افزایش مقاومت به شوک حرارتی و استفاده از آن‌ها برای کاربردهای دما بالا می‌شود. همچنین دلیل بالا بودن هدایت حرارتی و الکتریکی آن‌ها مربوط به پیوندهای شیمیایی، سطوح انرژی ترازهای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

۲- مروری بر منابع مطالعاتی

سرامیک‌های کاربیدی، نیتریدی و بوریدی به دلیل پیوند شیمیایی قوی دارای پایداری ساختاری در دمای بالا می‌باشند [۱-۲]. سیستم Ti-B دارای سه فاز با ساختار اورترومبیک است که فازهای Ti_3B_4و TiB در اثر واکنش پریتکتیک به ترتیب در دمای ۲۲۰۰ و ۲۱۸۰ درجه سانتیگراد تجزیه می شوند[۳-۴]. در حالی‌که TiB_2 در دمای حدود ۳۲۲۵ درجه سانتیگراد به صورت ناگهانی ذوب می شود [۵]. فاز TiB دارای محدوده شکل‌گیری باریکی (۵۰-۴۹ 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 TiB_2 و Ti_3B_4 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، TiB_2 با بور واکنش یوتکتیک می‌دهد [۸-۹].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.1.5]



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

TiB_2 به دلیل اینکه دارای سختی حدود ۳۲ GPa، استحکام خمشی حدود ۱۰۰۰ MPa، مدول کشسان ۵۳۰ GPa، نقطه ذوب حدود ۳۲۲۵ درجه سانتی‌گراد، هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، پایداری شیمیایی بالا، مقاومت به شوک حرارتی بالا، مقاومت به سایش بالا می‌باشد در قطعات با کاربرد دما بالا به کار می‌رود. همچنین به دلیل داشتن پیوندهای کوالانسی در ترکیب و ضریب خودنفوذی پایین، دارای قابلیت تف‌جوشی پایینی است [۱۰-۱۶].

۳- فعالیت‌های تجربی صورت گرفته بر روی کامپوزیت‌های بر پایه TiB_2

به منظور بهبود قابلیت تف‌جوشی و خواص مکانیکی و فیزیکی سرامیک‌های از جنس TiB_2 از ترکیبات مختلفی مانند TiC استفاده شده است [۱۷-۲۲].

۳-۱- کامپوزیت TiB_2-SiC

SiC قطعه‌ای سرامیکی با سختی ۲۰ تا ۲۷ گیگا پاسکال، چقرمگی ۵-۲ $MPa.m^{1/2}$ می‌باشد. هنگامی که SiC به صورت تقویت کننده افزوده می‌شود به دلیل بهبود چگالش و ممانعت از رشد دانه‌ها چقرمگی شکست را تا ۹-۶ $MPa.m^{1/2}$ افزایش می‌دهد [۲۳]. بنابراین کامپوزیت‌های بر پایه TiB_2 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 تف‌جوشی و چگالش برای این سرامیک‌ها استفاده کرد [۲۵-۲۶]. در جدول ۱ برخی از خواص TiB_2 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 TiB_2 مناسب است. با استفاده از پرس گرم با فشار ۶۰-۲۰ MPa و محدوده دمایی ۲۱۰۰-۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد 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 تقویت‌کننده ۲۵ تا ۳۰ درصد حجمی بوده که استحکام خمشی ۷۱۰ مگاپاسکال و چقرمگی ۷-۵ $MPa.m^{1/2}$ را نشان داده است [۲۷-۲۹]. همانطور که گفته شد SiC برای بهبود مقاومت در مقابل اکسایش و استحکام خمشی با کاهش رشد دانه‌ها در طول تف‌جوشی به سرامیک‌های بر پایه TiB_2 اضافه می‌شود [۳۰].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.1.5]

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

ویژگی	TiB_2	α - SiC
نقطه ذوب (°C)	۳۳۲۵	۲۸۰۰
چگالی (g/cm^3)	۴/۵۲	۳/۲۱
سختی (GPa)	۳۵-۲۵	۳۲-۲۷
استحکام خمشی (MPa)	۳۷۰-۳۰۰	۴۵۰
چقرمگی ($MPa.m^{1/2}$)	۳ - ۴/۵	۳/۱ - ۴/۶
مدول کشسان (GPa)	۵۴۰	۴۱۰
ضریب انبساط حرارتی ($°C^{-1}$)	$۸/۶ \times ۱۰^{-۶}$ در جهت c	$۴/۱۶ \times ۱۰^{-۶}$ در جهت c
ضریب پواسون	۰/۲۲	۰/۱۴

کامپوزیت TiB_2-SiC معمولا 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 [۳۲-۳۴]. 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 بجای ذرات SiC استفاده می‌شود. در جدول ۲ اثر افزودن ویسکر SiC بر خواص مکانیکی کامپوزیت مشاهده می‌شود [۳۳-۳۶].



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 تهیه 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 $MPa.m^{1/2}$ به ۹/۴ $MPa.m^{1/2}$ به دلیل فعال کردن مکانیزم‌های افزایش چقرمگی و کنترل رشد دانه بهبود یافت [۳۷].

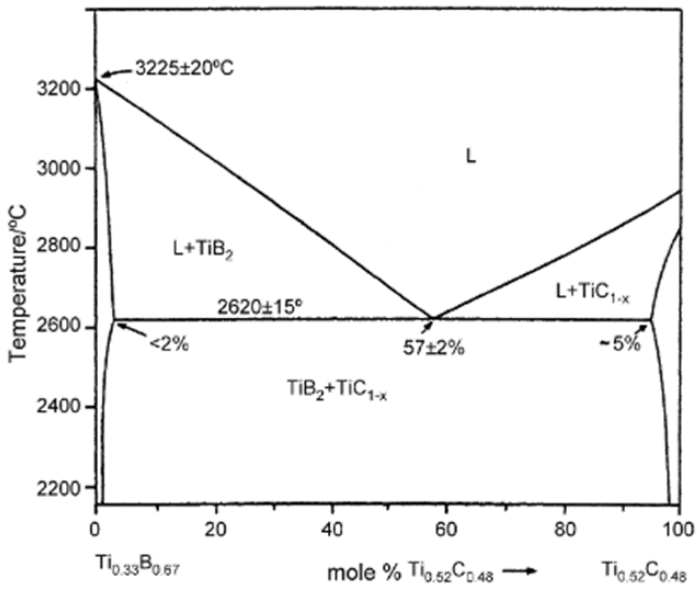
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.1.5]

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

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

۳-۲- کامپوزیت TiB_2-TiC

TiC نیز برای بهبود خواص کامپوزیت بر پایه TiB_2 مورد استفاده قرار می‌گیرد. مثلا در تحقیقاتی از ترکیب TiC و TiB_2 استفاده شد که بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که این ترکیب تا دمای ۲۵۰۰ درجه از نظر ترمودینامیکی پایدار می‌باشد و در دمای ۲۶۰۰ درجه دچار استحاله یوتکتیک می‌شود (شکل ۳). همچنین سختی ویسکرز این کامپوزیت‌ها در دمای اتاق برابر با ۲۳ GPa می‌باشد که پایین‌تر از سختی هرکدام از ترکیباتTiC و TiB_2 به صورت خالص می‌باشد. به دلیل ناسازگاری ضرایب انبساط حرارتی TiC و TiB_2 در دمای ۶۰۰ درجه شاهد ایجاد انحراف در مسیر پیشروی ترک یا ایجاد انحراف در مسیر رشد آن و در نتیجه افزایش چقرمگی می‌باشیم [۱۴، ۳۸] علاوه بر این پس از افزودن TiC مشاهده می‌شود که مرزدانه‌ها قفل شده و در سرعت رشد دانه‌ها تاخیر به وجود می‌آید که منجر به افزایش استحکام این کامپوزیت‌ها می‌گردد [۳۹-۴۰و۲۱].

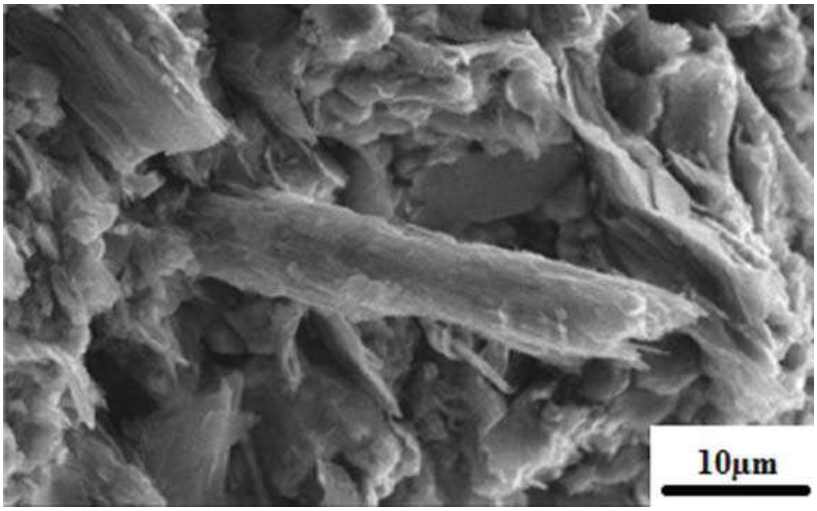


شکل ۳- دیاگرام فازی TiB_2-TiC_{1-x} [۱۴].

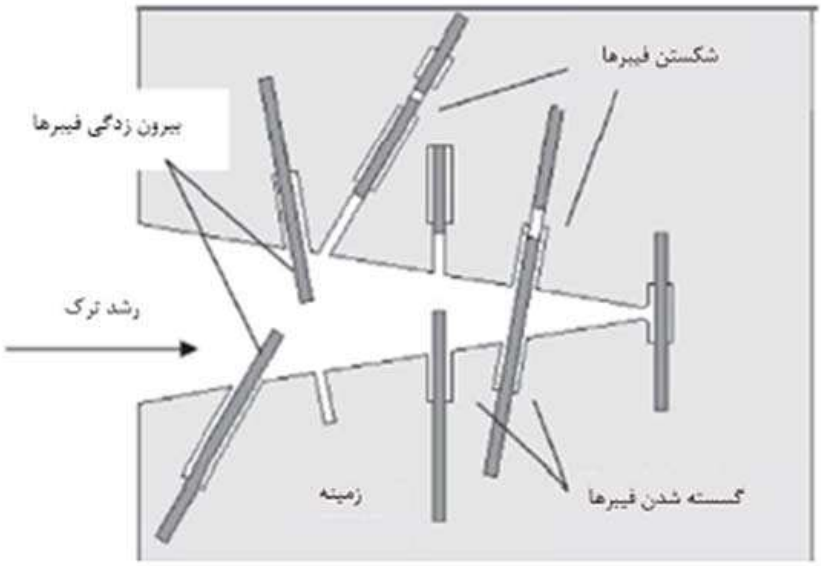
۳-۳- کامپوزیت TiB_2-C

برای افزایش چقرمگی و استحکام در کامپوزیت‌های پایه TiB_2 در پژوهشی توسط یانگ مشاهده شد که با افزودن ۲ تا ۶ 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 [۳۴-۴۱]. در شکل ۶ تصویر ترک در دمای ۱۷۰۰ درجه سانتیگراد و مدت زمان سینتر ۳۰ دقیقه در نمونه TiB_2-80%C مشاهده می‌شود [۳۶].

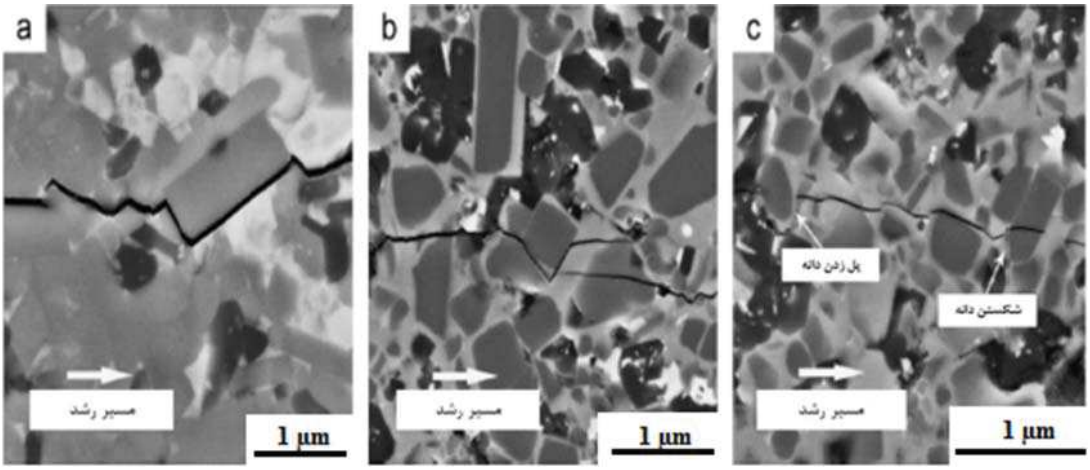
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.1.5]



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



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

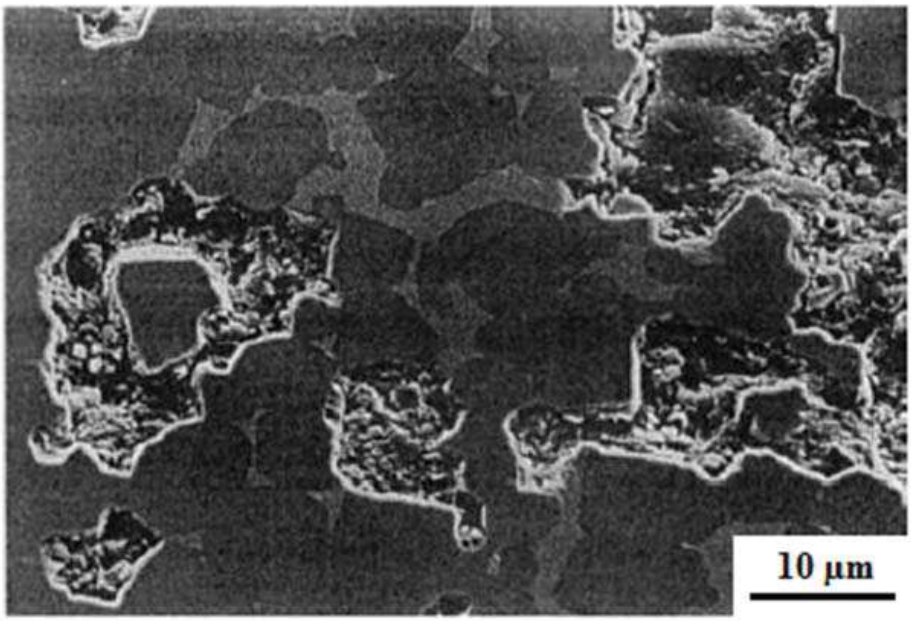


شکل ۶- تصاویر مسیر پیشروی ترک در نمونه TiB_2- 20% Vol SiC بوسیله میکروسکوپ الکترونی [۳۶].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.1.5]

۳-۴- 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 نظیر زمان، اتمسفر، دما و درصد خلوص دقت شود. مثلا از عیب‌های کامپوزیت‌های TiB_2-Fe حساس بودن فرآیند چگالش این کامپوزیت‌ها به ناخالصی‌هایی نظیر اکسید درون پودر می‌باشد. به عبارت دیگر، در دمای سالیدوس، ناخالصی‌های اکسیدی ذرات TiB_2 باعث افزایش میزان رشد دانه بدون پیشرفت چگالش می‌شود که این ساز و کار رشد دانه در نتیجه تبخیر 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 حل‌شوندگی 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 کامپوزیت های زمینه TiB_2 بر اساس کاربرد و خواص مدنظر می‌توان از تقویت‌کننده‌های مختلفی نظیر 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 کامپوزیت های زمینه TiB_2 آورده شده است.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.1.5]

جدول ۳- اثر افزودن تقویت کننده‌های مختلف بر روی کامپوزیت های زمینه TiB_2.

ردیف	تقویت کننده	خاصیت	توضیحات
۱	SiC	افزایش چقرمگی 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 چقرمگی- افزایش استحکام	به دلیل ناسازگاری ضرایب انبساط حرارتی و دمای بالا
۳	C	افزایش چقرمگی و استحکام	به دلیل پل‌زدن 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. "TiB_2–SiC-based ceramics as alternative efficient micro heat exchangers." Ceramics International 45.15 (2019): 19060-19067.

[2] M.R. Salimpour, A.T. Al-Sammarraie, 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.% TiB_2 composites." Materials Chemistry and Physics 223 (2019): 789-796.

[4] Kovalčíková, Alexandra, et al. "Mechanical and tribological properties of TiB2-SiC and TiB_2-SiC-GNPs ceramic composites." Journal of the European Ceramic Society 40.14 (2020): 4860-4871.

[5] Mohanavel, Vinayagam. "Mechanical and microstructural characterization of AA7178-TiB_2 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 C9eram Soc, 29 (2009), 505–16.

[11] M. Feber, P. Becher, C. Finch, "Effect of microstructure on the properties of TiB_2 ceramics," J Am Ceram So, 66 (1983), C2–4.

[12] W. Huazhang, W. Huilin, L. Yexian, "TiB_2-based inter cathode in aluminum electrolysis," J. Light Met, 5 (1993), 26–31.

[13] D. Yanling, W. Weimin, "Research development on TiB_2 material," J. Foshan Ceram, 14 (2004), 7-11.

[14] D. Vallauri, I. Atlas, A. Chrysanthou, "TiC–TiB_2 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/TiB_2 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 TiB_2-based materials," Int. Mater, 51 (2006), 352–374.

[17] M. Shibuya, Y. Yamamoto, M. Ohyanagi, "Simultaneous densification and phase decomposition of TiB_2–WB_2 solid solutions activated by cobalt boride addition," J Eur Ceram Soc, 27 (2007), 307–12.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.1.5]

[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–TiB_2 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 TiB_2– 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 TiB_2 and TiB_2–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-TiB_2 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/TiB_2 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 TiB_2/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 TiB_2," 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–TiB_2 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 TiB_2 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 TiB_2 particles," Ceram Int, 36(7) (2010), 2181–8.

[35] J. Deng, X. Ai, "Microstructure and Mechanical Properties of Hot-Pressed TiB_2–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، عمادی ر، ذاکری م، "بررسی تاثیر مقدار SiC بر خواص مکانیکی کامپوزیت TiB_2-SiC سینتر شده با روش سینتر جرقه پلاسما"، هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی مواد و متالورژی و سیزدهمین کنفرانس مشترک انجمن متالورژی و مواد ایران و انجمن ریخته‌گری ایران، (۱۳۹۸)

[۳۸] امینی کیاب، طیبی فرد س.ع، یوزباشی ا.ع، "سنتز ترکیب کامپوزیتی TiB_2-SiC به روش "MACS، 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 TiB_2 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.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.1.5]