

سنتز نانوکامپوزیت TiB-Ti و مقایسه خواص مکانیکی آن با رینگ آببند مکانیکی SiC سینتر شده

محمد باقر رهائی^{*}، علی شفیع، مجتبی خلقی و نصرا... عربیان

دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی مواد

* نویسنده مسئول مکاتبات: محمدباقر رهائی (E-mail: m.b.rahaei@gmail.com)

چکیده

در مطالعه حاضر، نانوکامپوزیت TiB-24%wt.Ti به روش سنتز احتراقی با فشار پرس مانند ابعاد قطعه رینگ آببند SiC سینتر شده ساخته شد. سپس خواص مکانیکی نمونه ها شامل چقرمگی شکست و ماکروسختی به ترتیب با استفاده از آزمونهای ویکرز و راکول A مقایسه شد. چگالی نمونه های بالک به روش ارشمیدس اندازه گیری شد. فازهای تشکیل شده از قطعات با آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) مشخص و ریز ساختار آنها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشاهده شد. مشاهدات میکروسکوپی از نمونه نانوکامپوزیت TiB-24%wt.Ti مورفولوژی سوزنی از کریستالیت های TiB با اندازه قطر ۳۰ نانومتر تا ۱ میکرومتر و طول ۱ تا ۱۰ میکرومتر را نشان داد. همچنین اندازه دانه های SiC از ۱۰۰ نانومتر تا ۱ میکرومتر مشاهده شد. بررسی اولیه از خواص مکانیکی، چگالی و ریزساختار قطعه نانوکامپوزیت TiB-24%wt.Ti نتایج مناسب در مقایسه با آببند مکانیکی SiC برای کار در پمپ را نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت TiB-Ti، سنتز احتراقی، SiC سینتر شده، خواص مکانیکی، آببند مکانیکی.

Abstract

In this research, TiB-24%wt.Ti nanocomposite was fabricated by combustion synthesis method using isostatic pressing similar to dimension of sintered SiC seal ring specimen. Mechanical properties of samples involve fracture toughness and macro hardness were compared by the Vickers and criterion RA methods, respectively. The density of the synthesized bulk samples were measured according to Archimedes's method. The contracted phases and microstructure were characterized by XRD and SEM, respectively. SEM overview of TiB-24%wt.Ti nanocomposite was showed basic needle morphologies of TiB crystallites include needle sizes of 30 nm to 1 μm in diameter and 1 to 10 μm in length. Also for SiC, grain size was observed from 100 nm to 1 μm. Primary evaluation of mechanical properties, density and microstructure of TiB-24%wt.Ti were showed suitable results in comparison to SiC mechanical seal ring for using in pump.

آلیاژی فلزی نرم و افزودنی استحکام بخش (معمولاً ماده‌ای
سرامیکی است) که برای تامین استحکام، سفتی، روانکاری
و غیره مناسب تهیه می شوند [۱]. قطعات متالورژی پودر
معمولاً به روش های سینترینگ، اسپارک پلاسما
سینترینگ، پرس گرم، پرس ایزواستاتیک گرم و سنتز
احتراقی ساخته می شوند. از متداولترین فرآیندها برای
تولید محصولات سرامیکی شامل بوریدها، کاربیدهها،
نیتریدها و اکسیدهای فلزی استفاده از پرس گرم است.

۱- مقدمه

کامپوزیت ها به دلیل دارا بودن نسبت استحکام به وزن
بالا، مدول الاستیک خوب، مقاومت برشی عالی، مقاومت
خزشی مناسب، مقاوم در برابر سایش و همچنین ضریب
انبساط حرارتی پایین کاربردهای فراوانی در صنایع پیدا
کرده اند. کامپوزیت های زمینه فلزی مجموعه ای از زمینه

در طراحی مدرن پمپ ها، تحقیقات در سه بخش اصلی افزایش راندمان، کاهش هزینه های ساخت و افزایش طول عمر قطعات ادامه دارد.

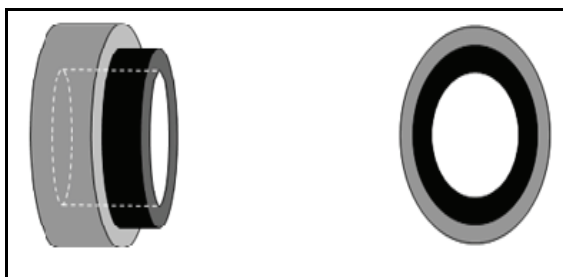
سازندگان پمپ با بررسی اطلاعات، اجزایی را که بیش از همه خراب می شوند شناسایی نموده و سعی در کشف علت خرابی آنها دارند تا با رفع عیوب طراحی از بوجود آمدن مشکلات جلوگیری کنند.

از مهمترین قطعاتی که در سالهای گذشته تحقیقات وسیعی را به خود اختصاص داده است، آببند های مکانیکی پمپ ها است. کار این قطعات در پمپ های دوار جلوگیری از نشت سیال است، ضمن اینکه تکیه گاه شافت نیز می باشد. برای آببندی کامل و مطمئن در دما و فشار بالا در قطعات دوار از آنها استفاده می شود. در شکل ۱ آب-بند مکانیکی نشان داده شده است.



شکل ۱: قطعه آببند مکانیکی [۵].

مهمترین جزء در آببندهای مکانیکی واشرهای آببندی می باشند که از مهمترین مشخصه های آن، سختی و مقاومت به سایش بالا است [۱،۲]. در شکل ۲ شماتیکی از سطوح لغزشی آببند مکانیکی از نمای کلی و بالا نشان داده شده است.



شکل ۲: شماتیکی از واشر آببند مکانیکی.

روشی دیگر در ساخت سرامیک ها با تکنولوژی بالا، پرس ایزو استاتیک گرم است. در روش پرس گرم، پودر سرامیکی داخل قالب در یک کوره دمای بالا قرار گرفته و تحت فشار تک محوری قرار می گیرد. در حالی که نمونه در دمای بالا (زیر نقطه ذوب) قرار دارد، به هم آمیختگی قبلی ذرات پودری تا حدی انجام می شود که در طول زمان مورد نیاز کل قطعه سینتر شود. این عملیات از نظر کاربرد انرژی خیلی گران است.

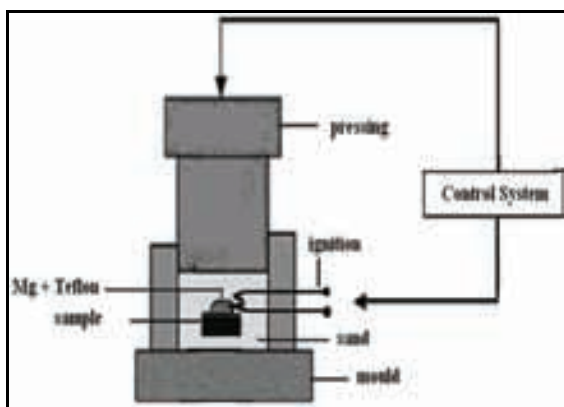
در روش پرس ایزو استاتیک گرم، پودر ابتدا پرس شده تا شکل مطلوب بدست آید و سپس تا دمای 2000°C گرم شده و تحت فشار یک سیال کاری، معمولاً یک گاز خنثی در فشار بیشتر از 120 MPa قرار می گیرد. مزیت این روش آن است که می توان قطعات پیچیده تر تولید کرد، اما به هر حال تجهیزات و آماده سازی قطعه خام قیمت محصولات را افزایش می دهد [۲]. در دو دهه اخیر روش دیگری موسوم به روش سنتز احتراقی معرفی گردیده است که بدلیل مزایای اقتصادی شدیداً در تولید بعضی از قطعات سرامیکی مورد توجه قرار گرفته است. سنتز احتراقی دما بالا از جمله روشهایی است که برای تولید کامپوزیت های مختلف از جمله TiB/Ti به کار برده می شود. کامپوزیت زمینه فلزی TiB/Ti چندین مشخصه دارد. پایداری شیمیایی بیشتر، تنش باقیمانده کمتر و تافنس بیشتر از فاز TiB را در مقایسه با Ti_5Si_3 , CrB , SiC و B_4C دارند. ضریب انبساط خطی، هدایت حرارتی و چگالی دو فاز TiB و Ti نزدیک به هم هستند [۲]. مزیت تکنیک سنتز احتراقی شامل ملزومات انرژی کم، سادگی نسبی فرآیند و تجهیزات، خلوص بالای محصولات و قیمت کم است [۳]. در واکنش سنتز احتراقی، از حرارت آزاد شده ناشی از واکنش شیمیایی بین مواد اولیه جهت پیشبرد واکنش استفاده می شود. همانند بسیاری از واکنش های شیمیایی، شروع واکنش بین اجزاء در سنتز احتراقی، نیاز به صرف انرژی فعال سازی دارد. اگر انرژی فعال سازی بقدری باشد که بتواند واکنش بین اجزاء را آغاز نماید، آنگاه حرارت آزاد شده ناشی از این واکنش قادر است انرژی فعال سازی جهت ادامه واکنش را بصورت خود بخود تامین کند [۴]. بسیاری از مواد کامپوزیتی به این روش ساخته می شوند.

پودرها به مدت ۹ ساعت آسیاکاری شدند. این زمان نسبتاً کم باعث می شود که از واکنش های شیمیایی و آلیاژسازی مکانیکی در طی فرایند آسیاکاری جلوگیری و شرایط مناسب برای انجام واکنش احتراق فراهم شود. در جدول ۱ مشخصات آسیاب غلتشی آمده است.

جدول ۱: مشخصات آسیاب غلتشی گلوله ای.

نسبت گلوله به پودر	قطر	ارتفاع	دور	اندازه گلوله های فولادی
۲۵-۲۰	۲۰ cm	۱۵ cm	۶۰ RPM	۱ و ۰/۵ cm

مواد آسیاب شده تحت فشار ۳۰ MPa پرس سرد شدند تا تقریباً به ۵۰٪ چگالی تئوری برسند. برای انجام احتراق، پلت با ابعاد ۱۰ cm قطر سیلندر × ۱۰ cm ارتفاع تهیه و در یک محفظه فولادی قرار گرفته و احتراق با کویل حرارتی بر سطح نمونه شروع شد. نمونه ها ۵ ثانیه پس از شروع احتراق تحت فشار پرس ایزواستاتیک هیدرولیکی با سیال روغن (۱۰۰ مگاپاسکال) به مدت ۱۰ ثانیه قرار گرفتند (شکل ۴). سپس برای مشاهده میکروساختار از آزمون های مکانیکی نمونه ها برش و پولیش شدند.



شکل ۴: شماتیک دستگاه سنتز احتراقی (شامل محفظه احتراقی، پرس اتوماتیک و تجهیزات جانبی).

۲-۲- بررسی ریز ساختار

پس از سنتز نمونه، فازهای تشکیل شده به کمک آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD-Philips Xpert-MPD) و مشاهدات ریز ساختار از نمونه ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-S360) انجام شد. برای مشاهدات

کاربید سیلیسیم از جمله ترکیبات کاربیدی مهم است که در پمپ ها به عنوان واشر آببند مکانیکی (قسمت سطوح سخت) به کار برده می شود. یکی از روشهای مهم تولید آن روش سینترینگ است، که روشی پر هزینه و زمان بر می باشد [۵,۶].

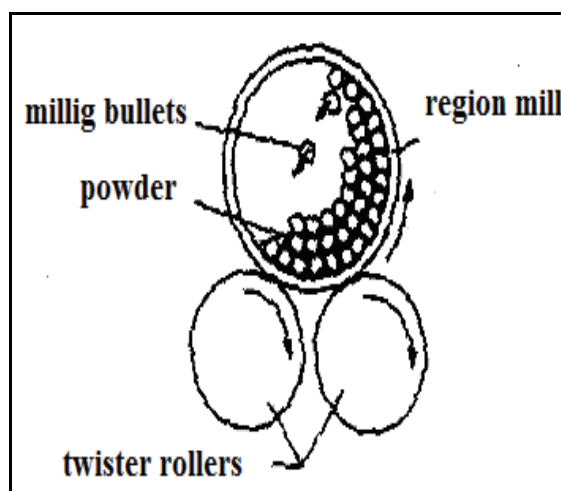
با توجه به اهمیت آببندهای مکانیکی در حفاظت از نشت محصول در صنایع انتقال سیال مجهز به شافت در حال گردش (مانند پمپها، همزنها، موتور خودرو، توربین ها و غیره)، در این پژوهش سعی شد تا رینگهای آببند مکانیکی به روش سنتز احتراقی تولید شود.

بنابراین نانو کامپوزیت TiB-24% wt.Ti به روش سنتز احتراقی همراه با فشار پرس ایزواستاتیک ساخته شد. سپس خواص مکانیکی و ریز ساختار این کامپوزیت با SiC سینتر شده مقایسه شد.

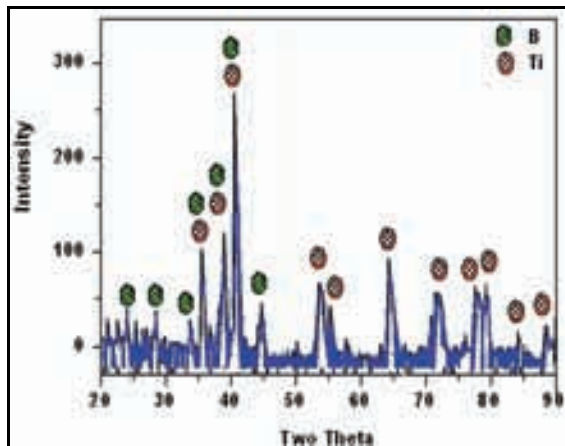
۲- فعالیت های تجربی

۲-۱- روش ساخت (آسیاکاری و سنتز احتراقی همراه با پرس ایزواستاتیک)

مخلوطی از پودرهای Ti (10-30 μm, 97.5 % purity) و B (5-20 μm, 97% purity) با نسبت مناسب برای به دست آوردن نانو کامپوزیت TiB-24% wt.Ti تهیه شد. به منظور همگن سازی مخلوط پودر اولیه عملیات آلیاژسازی مکانیکی در یک دستگاه آسیاب غلطکی یا آسیاب انرژی کم انجام شد (شکل ۳).



شکل ۳: تصویر شماتیک از آسیاب گلوله ای غلطکی [۷].



شکل ۵: آنالیز پراش پرتو ایکس پودر های بور و تیتانیوم پس از انجام آسیاکاری.

همه واکنشهای حالت جامد مستلزم ایجاد یک یا چند فاز محصول بین واکنش دهنده ها هستند. سرعتهای واکنش با سطوح تماس اولیه و با نفوذ قسمتهای واکنش دهنده داخل فازهای محصول تحت تاثیر قرار می گیرد. برای بیشتر فرآیندهای حالت جامد سطح تماس اولیه ثابت است و سرعت نفوذ محدود شده است.

بنابراین واکنشهای حالت جامد وابسته به دما می باشند. با انجام آلیاژسازی مکانیکی بعلت انجام شکست و جوش خوردن ذرات پودر، سطح واکنش افزایش می یابد. بنابراین فعالیت شیمیایی با انجام آلیاژسازی مکانیکی افزایش می یابد. همچنین بخاطر تعداد زیاد عیوب کریستالی تاثیر سدهای سینتیکی شیمیایی به حداقل می رسد و شرایط مورد نیاز برای انجام واکنشهای حالت جامد را فراهم می سازد.

زمان عملیات آسیاکاری و نوع آسیاب بر روی ترمودینامیک و کینتیک واکنش های شیمیایی و استحاله های فازی و در نتیجه بر روی نوع و ساختار محصول نهایی تاثیر می گذارد. از این رو آسیا کاری در مدت زمان کم برای همگن سازی و بهتر شدن شرایط سینتیکی برای انجام واکنش احتراق انجام شد [۱۱].

در شکل ۶ نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس آمده است، که این نتایج نشان دهنده تشکیل نانو کامپوزیت TiB/Ti شامل دو فاز تیتانیوم و تیتانیوم بوراید می باشد. با توجه با اینکه پودرهای Ti و B به نسبت وزنی ۸۶ : ۱۴ مخلوط شده اند.

فازی نمونه های بالک از سنبله ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ استفاده شد و سپس نمونه ها پولیش شدند. علاوه بر این برای دیدن بهتر فازها و مورفولوژی تیغه ای فاز TiB در نمونه بالک TiB-24%wt.Ti قبل از مشاهده تصاویر میکروسکوپی، نمونه اچ شد. محلول اچ شامل ۱۵mL HNO₃ - ۱۰mL HF - ۷۵ mL H₂O و مدت زمان اچ نیز ۲ دقیقه بود [۷].

۳-۲- آزمایشات مکانیکی

ماکرو و میکرو سختی نانوکامپوزیت TiB-24%wt.Ti و SiC سینتر شده به ترتیب به روش های RA و ویکرز اندازه گیری شدند.

تافنس شکست بوسیله ایندنتور ویکرز به دست آمد. بار ایندنتور روی نمونه های پولیش شده حدود ۲۰ کیلوگرم به مدت ۱۵ ثانیه بود. تافنس شکست (K_{IC}) با استفاده از رابطه ۱ به دست آمد [۸،۹]. که در آن E مدول الاستیک [۸]، H_v سختی ویکرز، P بار اعمالی و C شعاع ترک می باشند.

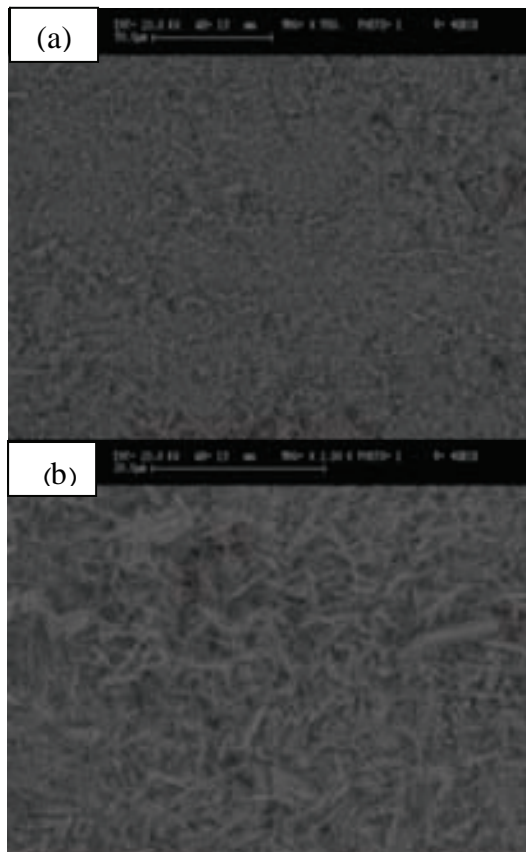
چگالی نمونه های سنتر شده بوسیله آب بر طبق آزمون ارشمیدس انجام شد [۱۰].

$$K_{IC} = 0.0016 (E / H_v)^{1/2} (P / C^{3/2}) \quad (1)$$

۳- نتایج و بحث

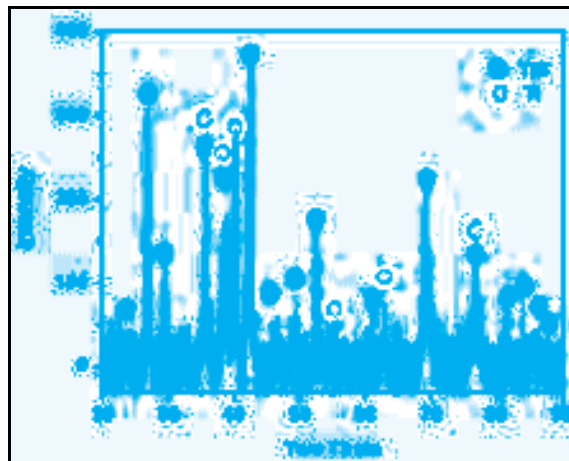
به منظور مطالعه تغییرات فازی ذرات پودر پس از آسیاکاری، از نتایج تفرق اشعه ایکس استفاده شد. همان طور که در شکل ۵ دیده می شود، آسیا کاری مخلوط در آسیاب غلطکی، باعث واکنش نشده و منجر به تشکیل فاز جدیدی نگردیده است، بلکه محصول نهایی شامل پودرهای تیتانیوم و بور است. علت آن پایین بودن انرژی این نوع آسیاب و مدت زمان کوتاه آسیاب است. در صورتیکه مدت زمان آسیاکاری در این آسیاب افزایش می یافت یا از آسیاب های با انرژی بالاتر در زمان هایی به مراتب کمتر از زمان فوق استفاده می شد، با انجام آلیاژسازی مکانیکی امکان تشکیل فازهای بین فلزی و یا محلول جامد وجود داشت [۴،۱۱].

نمودن اندازه کریستالیت ها، در نمونه ها مشاهدات میکروسکوپی پس از اچ در شکل ۸a-c در بزرگنمایی های مختلف نشان داده شده اند.



شکل ۷: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نانوکامپوزیت TiB-24%wt.Ti در بزرگنمایی های مختلف (a) $\times 5500$ و (b) $\times 2000$.

همانطور که تصاویر شکل ۸ نشان می دهند، نانوکامپوزیت TiB/Ti شامل تیغه های سفید رنگ فاز TiB و زمینه عنصر Ti است. مشاهدات میکروسکوپی از نمونه نانوکامپوزیت TiB-24%wt.Ti در قسمت a سه مورفولوژی نشان می دهد: سوزنی، میله ای و ورقه ای. همانطور که تصاویر نشان می دهند، بیشترین مورفولوژی سوزنی است. زیرا TiB رشد سریعتر موازی جهت b نسبت به جهت a یا c دارد که TiB با مورفولوژی سوزنی یا میله ای ایجاد می کند [۱۲، ۱۳]. در شکل ۸ قسمت b و c مورفولوژی سوزنی از کریستالیت های TiB شامل قطر با اندازه ۳۰ نانومتر تا ۱ میکرومتر و طول ۱ تا ۱۰ میکرومتر را نشان داده است. لازم به یادآوری است در مد شناسایی فاز، فاز



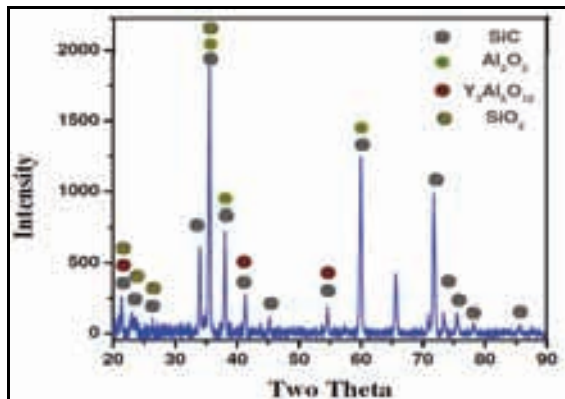
شکل ۶: آنالیز پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت TiB/Ti ساخته شده به روش سنتز احتراقی.

با داشتن جرم مولی عناصر Ti و B انتظار می رود واکنش احتراق $86_{(gr)} Ti + 14_{(gr)} B \rightarrow TiB-24\%wt.Ti$ انجام شود. همانطور که نتیجه تفرق اشعه ایکس در شکل ۶ نشان می دهد در نمونه TiB/Ti، فاز TiB و عنصر Ti وجود دارد و فاز TiB_۲ مشاهده نشد. در فرآیند سنتز احتراقی امکان انجام ۳ واکنش احتراق وجود دارد، که در جدول ۲ آمده است. انرژی آزاد و آنتالپی هر ۳ واکنش منفی است. انرژی آزاد واکنش ۱ کمتر از واکنش ۲ است. هنگامی که تیتانیم اضافی باشد واکنش ۳ رخ می دهد و فاز TiB به جای TiB_۲ تشکیل می شود [۲]. در جدول ۲ آنتالپی و انرژی آزاد واکنش ها آمده است.

جدول ۲: آنتالپی و انرژی آزاد تشکیل ترکیبات.

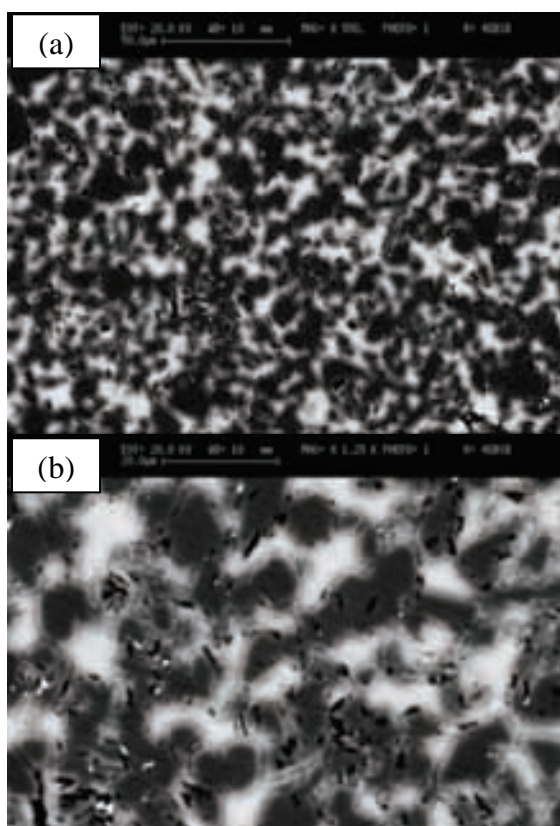
واکنش ها	آنتالپی ΔH (KJ/mole)	انرژی آزاد ΔG (KJ/mole)
۱) $Ti + B = TiB$	$\approx -158/84$	≈ -300
۲) $Ti + 2B = TiB_2$	≈ -293	≈ -300
۳) $Ti + TiB_2 = 2TiB$	$\approx -24/68$	≈ -25

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مشاهدات فازی در نانوکامپوزیت TiB/Ti در شکل ۷ آمده است. همانطور که تصاویر a و b در شکل ۷ در بزرگنمایی مختلف نشان می دهند، این نانو کامپوزیت یک ساختار پیوسته دارد. همچنین در آن تخلخل و فازهای تیره و روشن مشهود است. برای وضوح بهتر تصاویر و مشخص

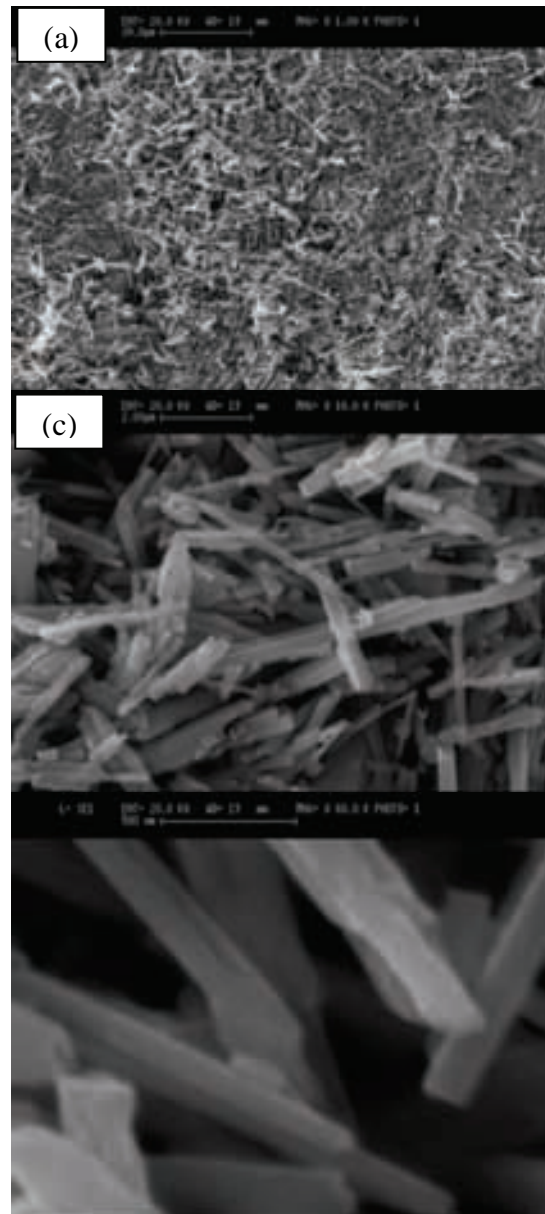


شکل ۹: آنالیز پراش پرتو ایکس آبند SiC سینتر شده.

Ti و تخلخل ها به صورت تیره مشخص هستند، اما در مد بررسی ویژگیهای سطحی در تصاویر SEM فقط نانو کریستالهای TiB سفید رنگ مشخص هستند.



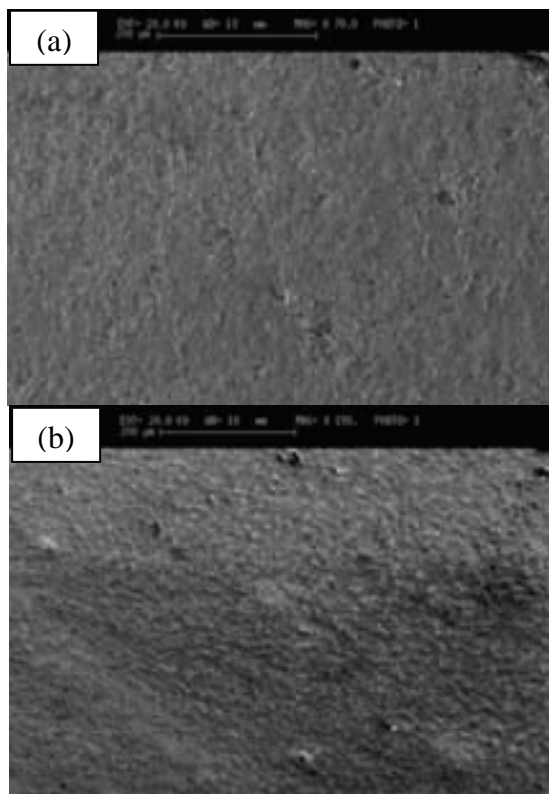
شکل ۱۰: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از SiC سینتر شده با بزرگنمایی های مختلف (a) $\times 550$ و (b) $\times 1250$.



شکل ۸: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نانوکامپوزیت TiB-24%wt.Ti پس از اچ در بزرگنمایی های مختلف (a) $\times 1000$ ، (b) $\times 10000$ و (c) $\times 60000$.

در سینتر کاربید سیلیسیم (SiC) همراه با افزودنی ها مانند ایتریا و آلومینا (Al_2O_3) زمان سینترینگ ۲ الی ۵ ساعت و دمای آن از $1700^\circ C$ تا $1950^\circ C$ می باشد [۱۴، ۱۵]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مشاهدات فازی در نمونه سرامیکی SiC در شکل ۱۰ در بزرگنمایی های مختلف آمده است. در قسمت a و b به وضوح تخلخل همراه با فاز تیره SiC و فازهای روشن دیگر

آنالیز تفرق اشعه ایکس برای نمونه آبند مکانیکی SiC سینتر شده در شکل ۹ آمده است، که فقط بیشتر فاز کاربید سیلیسیم همراه با مقدار کم فازهای افزودنی مانند اکسید آلومینیوم در نمونه وجود دارد تا زمان و دمای زینترینگ را کاهش دهند.



شکل ۱۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از (a) نانوکامپوزیت TiB/Ti سنتز شده و (b) آبند مکانیکی SiC سینتر شده.

نتایج سختی سنجی برای نمونه های نانوکامپوزیت TiB/Ti سنتز شده و SiC سینتر شده در جدول ۳ آمده است، که سختی نمونه نانوکامپوزیت TiB/Ti کمتر، اما در حد قابل قبول با نمونه SiC برای کار در پمپ است. البته چقرمگی شکست آن به دلیل وجود دو فاز در این نانوکامپوزیت و اثر فاز نانو TiB در زمینه تیتانیوم نسبت به نمونه SiC بیشتر است [۱۸، ۱۹]. همچنین چگالی هر دو نمونه کم و نزدیک به هم است. از این رو ریز ساختار و خواص مکانیکی نانو کامپوزیت TiB/Ti قابل قبول برای ارزیابی آزمون سایش و کار در پمپ به عنوان آبند مکانیکی است.

جدول ۳: خواص مکانیکی نمونه های نانوکامپوزیت

SiC و TiB-24%wt.Ti

نمونه ها	ماکرو سختی (RA)	میکرو سختی (Hv)	چقرمگی شکست (\sqrt{m} MPa)	چگالی (gr/cm^3)
TiB-Ti	۸۸	۱۰۵۰	۵/۶۹	۴/۲۷
SiC	۹۴	۱۴۹۵	۳/۵	۳/۰۶

مانند آلومینا به عنوان افزودنی مشابه مراجع [۱۷-۱۵] مشهود است. برای مشخص نمودن اندازه دانه های SiC در نمونه ها مشاهدات میکروسکوپی در شکل ۱۱ در بزرگنمایی بالا آمده است.



شکل ۱۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از SiC سینتر شده پس از اچ.

همانطور که تصویر نشان می دهد اندازه دانه های SiC تقریباً بین ۱۰۰ نانومتر تا ۱ میکرومتر مشابه مرجع [۱۷] است. در مقایسه با نانوکامپوزیت TiB/Ti اندازه دانه های آن بزرگتر و بیشتر مورفولوژی کروی دارند. همچنین در شکل ۱۲ تصاویر میکروسکوپی در مد مشاهده مورفولوژی سطحی، وجود تخلخل را به وضوح برای هر دو نمونه نانوکامپوزیت سنتز شده در شکل ۱۲a و کاربرد سیلیسیم سینتر شده در شکل ۱۲b نشان داده اند. همانطور که تصاویر در شکل ۱۲a-b نشان می دهند توزیع و اندازه تخلخل در هر دو نمونه تقریباً یکسان است. از این رو میکرو ساختار نمونه نانوکامپوزیت TiB/Ti قابل قبول در مقایسه با رینگ آبند مکانیکی SiC است. لازم به یادآوری است همیشه وجود تخلخل در قطعات متالورژی پودر مشهود است. در کار حاضر، وجود تخلخل به مقدار کم و با توزیع یکنواخت و تقریباً اندازه مناسب در هر دو نمونه مشاهده شد. همچنین وجود تخلخل های سطحی کم برای آبند های مکانیکی باعث به دام انداختن سیال در بین سطوح سایش در حین کار این قطعات در پمپ شده و ضمن افزایش روانکاری عمر مفید آنها را افزایش می دهند [۵].

۴- نتیجه گیری

مراجع

- [1] M. Cirakoglu, S. Bhaduri, S.B. Bhaduri, *Journal of Alloys and Compounds*, **347**, 2002, 259.
- [2] Z. Xinghong, X. Qiang, H. Jiecai, V.L. Kvanin, *Materials Science and Engineering A*, **348**, 2003, 41-46.
- [3] S. Gorsse, J.P. Chaminade, V.L. Petitcorps, *Composites Part A*, **29**, 1998, 1229.
- [4] L. Lu, M.O. Lai, *Materials and Design*, **16**, 1995, 33.
- [5] F. Kagawa, US Patent 005,080,378 A (1992).
- [6] L. Harmon, *Materials and Design*, **3**, 2002, 577.
- [7] H. Feng, D. Jia, Y. Zhou, *Composites: Part A*, **36**, 2005, 558.
- [8] J. Zhang, L. Wang, L. Shi, W. Jianga, L. Chena, *Scripta Materialia*, **56**, 2007, 241.
- [9] G.R. Anstis, P. Chantikul, B.R. Lawn, D.B. Marshall, *Journal of the American Ceramic Society*, **64**, 1981, 533.
- [10] D. Richerson, "Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design", 2th, Marcel Dekker, New York, 1992.
- [11] T. Yamamoto, A. Otsuki, K. Ishihara, P.H. Shingu, *Materials Science and Engineering A*, **240**, 1997, 6471.
- [12] B.J. Kooi, Y.T. Pei, H. JTMD, *Acta Materialia*, **51**, 2003, 831.
- [13] R. Banerjee, A. Genc, D. Hill, P.C. Collins, H.L. Fraser, *Scripta Materialia*, **53**, 2005, 1433.
- [14] OB. L'opez, A.L. Ortiz, F. Guiberteau, N.P. Padture, *Journal of the European Ceramic Society*, **27**, 2007, 2521-2527.
- [15] A. Gubernat, L. Stobierski, P. Labaj, *Journal of the European Ceramic Society*, **27**, 2007, 781-789.
- [16] G. Magnani, L. Beaulardi, L. Pilotti, *Journal of the European Ceramic Society*, **25**, 2005, 1619-1627.
- [17] C. Reynaud, F. Thévenot, T. Chartier, J.-L. Besson, *Journal of the European Ceramic Society*, **25**, 2005, 589-597.
- [18] H.T. Tsang, C.G. Chao, C.Y. Ma, *Scripta Materialia*, **7**, 1997, 37.
- [19] Z.H. Jin, R.H. Dodds, *Engineering Fracture Mechanics*, **71**, 2004, 1651.

با توجه به مصرف انرژی کم و زمان کوتاه فرآیند سنتز احتراقی، در این پژوهش سعی شد تا این روش برای ساخت آبندهای مکانیکی استفاده شود. از این رو با توجه به خواص مناسب نانوکامپوزیت TiB-24%wt.Ti، این نانو کامپوزیت به روش سنتز احتراقی ساخته شد. تصاویر میکروسکوپی از نمونه نانوکامپوزیت پس از اچ، مورفولوژی سوزنی از فاز نانو TiB شامل اندازه قطر بین ۳۰ نانومتر تا ۱ میکرومتر و طول ۱ تا ۱۰ میکرومتر نشان داد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی وجود تخلخل به مقدار کم و با توزیع یکنواخت و تقریباً اندازه مناسب در هر دو نمونه مشاهده شد. با توجه به خواص عالی آبندهای مکانیکی SiC، خواص مکانیکی و ریزساختار نانوکامپوزیت فوق با آن مقایسه شد. ارزیابی خواص نمونه های نانوکامپوزیت سنتز شده و SiC سینتر شده به ترتیب سختی ۸۸ و ۹۴ راکول A، چقرمگی شکست ۵/۶۹ و ۳/۵ MPa مگاپاسکال در مجذور متر، و دانسیته ۴/۲۷ و ۳/۰۶ g/cm³ بود، که نتایج نزدیک به هم را نشان دادند. از این رو، بررسی اولیه نشان داد این نانوکامپوزیت خواص مناسب برای ارزیابی در پمپ برای جایگزینی آبندهای مکانیکی SiC را دارد.