

بررسی خواص نانوکامپوزیت پایه تیتانیوم متراکم شده به روش استاتیکی در فشار های متفاوت

فرزاد فریبا^{۱*}، رضا جمشیدی^۲

* نویسنده مسئول: Farzad.Fariba@Gmail.com

چکیده

واژه‌های کلیدی

نانوکامپوزیت، متالورژی پودر، پرس استاتیکی سرد، تقویت کننده‌ی کاربید سیلیسیم.

تاریخ ارسال: ۹۴/۰۹/۲۸

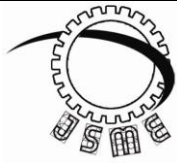
تاریخ بازنگری: ۹۴/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۱/۲۵

امروزه ساخت انواعی از نانوکامپوزیت‌ها، برای دستیابی به موادی که دارای خواص ترکیبی از ماده پایه و ماده افزودنی باشند، مورد توجه محققان و مراکز تحقیقاتی قرار گرفته است. یکی از روش‌های ساخت نانوکامپوزیت‌ها استفاده از روش متالورژی پودر می باشد، زیرا با استفاده از این تکنیک علاوه بر کاهش ضایعات احتمالی، می توان موادی را که دارای نقطه‌ی ذوب بالا هستند با مواد دارای نقطه‌ی ذوب پایین تر ترکیب نمود که این کار با روش ریخته گری بسیار دشوار می باشد. در این تحقیق، آلیاژ تیتانیوم برای بهبود خواص مکانیکی با تقویت کننده‌ی کاربید سیلیسیم ترکیب شده و تشکیل یک نانوکامپوزیت داده است. در این تحقیق برای تولید این نانوکامپوزیت، از روش فشردن استاتیکی با استفاده از دستگاه پرس سرد استفاده شده است. برای بررسی تاثیر نانو کاربید سیلیسیم در خواص مکانیکی نمونه ها، سه درصد مختلف تقویت کننده‌ی نانوپودر کاربید سیلیسیم و همچنین، سه فشار کامپکت مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، آزمایش‌های چگالی، مشاهده مرزبندی دانه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، تست فشار و آزمایش سختی برای استخراج خواص مکانیکی نمونه ها، انجام شده است. در نهایت نتایج آزمایش های انجام شده به همراه تحلیل نتایج ارائه شده است.

۱- استادیار گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان.

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان.



Journal of
Solid Mechanics
in Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



Investigation of the titanium nano composite statically compacted with the different pressure

Farzad Fariba^{1*}, Reza Jamshidi²

* Corresponding Author: Farzad.Fariba@Gmail.com

Abstract:

Building the Nano composites for getting material with combinational properties and improving properties of currently used material has been taken significant attention. One of the ways of building Nano composites is using a method known as powder metallurgy. Because with this method not only wastes are decreased to minimum but we can also mix the materials with high melting point with the materials with low melting point which is a difficult thing to do with foundry method. In this research titanium alloy for improvement in its mechanical properties is mixed with silicon carbide reinforcing. Knowing the fact that silicon carbide is in Nano scale these two materials start building Nano composites. The powder metallurgy method is the best way for mixing these two materials together. To make sure that the properties of the made alloy is similar to the foundry alloy, the static compression methods are used. For comparison the results, two factors such as the Nano silicon carbide percentage and the static compression pressure are. Also, Density experiment, observation of grain boundaries using a scanning electron microscope, pressure test and the hardness experiment was done on it.

Key words:

Nano composites,
powder metallurgy,
Static compression pressure,
Titanium,
Silicon carbide reinforcing.

1- Assistant Professor, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran.

2- MSc Student, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran.

۱- مقدمه

همراه چقرمگی شکست مطلوب، حد خستگی بالا و همچنین، شکل پذیر باشند. آنان در تحقیق خود نشان دادند آلیاژهای تیتانیوم و آلومینیم دارای این خصوصیات می باشند. این دو فلز به صورت خالص استحکام مطلوب را نداشته و به این دلیل در عمل کاربردی ندارند. مونتلگرو و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۷ به بررسی عملیات تثبیت کامپوزیت تیتانیوم و رسیدن به بیشترین چگالی با روش آلیاژسازی مکانیکی پرداختند. آن ها نشان دادند که هنگام میکس کردن و زینترینگ و کامپکت کردن بیشترین حالت اکسید شدن روی می دهد و برای حل آن از مواد آنتی اکسیدان استفاده نمودند. صادقیان و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۱ نشان دادند اگر فشرده سازی پودر در حالت سرد انجام پذیرد، جهت زینتر نمودن پودر به فرآیندهای دیگری همانند فشرده سازی گرم، اکستروژن گرم و پرس ایزواستاتیک گرم نیاز می باشد و از این روش اقدام به تولید یک نوع نانو کامپوزیت نمودند. خان و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۳ به بررسی میکرو ساختار و خواص فشاری و کششی پودر Ti-6Al-4V پرداختند. ژانگ و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۵ تحقیقاتی در خصوص ساخت نانو کامپوزیت های زمینه تیتانیومی انجام دادند. آن ها نشان دادند که در بسیاری از موارد، پودر تیتانیوم به عنوان ماتریس به همراه افزودنی هایی مانند ذرات سرامیکی همچون زیرکونیوم، آلومینا، مولیبدن، ، کاربید سیلیسیم، خواص مکانیکی و سختی را بهبود می بخشد. آن ها در ساخت این نانو کامپوزیت ها از عملیات آسیاب کاری مکانیکی، پرس سرد و اکستروژن گرم استفاده کردند. آن ها همچنین نشان دادند که نوع ماده تقویت کننده بر اساس خاصیتی که از ماده نهایی انتظار می رود، انجام می گیرد. به طوریکه مثلاً با افزودن کاربید بور که سومین ماده سخت در طبیعت می باشد (پس از الماس و نیتريت بور)، سختی،

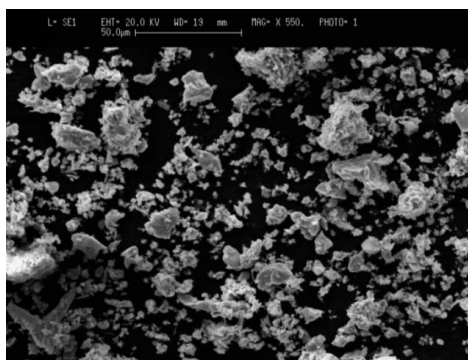
مطالعات در زمینه صنایع حمل و نقل، هوافضا، پزشکی و الکترونیک نشان می دهد که آلیاژهای با نسبت استحکام به وزن بالا، چقرمگی شکست مطلوب، حد خستگی و شکل پذیری مطلوب بسیار مورد توجه این صنایع می باشد. آلیاژهای تیتانیوم، منیزیم و آلومینیوم از پرکاربردترین فلزات در این صنایع می باشند. با افزودن عناصر دیگر به این فلزات، خواص آن ها را بهبود داده و در حقیقت نقاط ضعف این آلیاژ ها را بر طرف می نمایند. با افزودن درصد های مختلفی از نانو ذرات به فلز پایه خواص بهبود یافته گوناگونی حاصل می شود که می توان برای هر کاربرد بخصوص آن را مورد استفاده قرار داد. وزن کم نانو کامپوزیت های به کار رفته در این مواد، یکی از مهم ترین علل کاربرد وسیع این مواد در صنایع مختلف مخصوصاً در خودروسازی و هوافضا بوده است. د. وزن کم همواره یکی از نکات برجسته و شاخص در تکنولوژی خودروسازی و صنایع هوافضا بوده است که در آن کاهش وزن همواره به عنوان یک ویژگی منحصر به فرد مطرح بوده است. از این رو محققان تحقیقات وسیعی را بر روی این نوع مواد شروع نموده و توسعه داده اند.

اسمیت [۱] در سال ۱۹۸۴ نشان داد که با افزودن عناصری از قبیل نانو کامپوزیت ها می توان خواص مواد فلزی از جمله آلیاژ های تیتانیوم و آلومینیم را بهبود داده و مورد استفاده قرار داد. وان لی و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۶ در یک مقاله تحقیقاتی نشان دادند چنان چه مرحله تراکم و فشرده سازی از ابتدا به صورت گرم انجام گیرد، معمولاً به فرآیندهای زینترینگ دیگری نیاز نخواهد بود. مونگخامکلانگ و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۸ در زمینه کاربردهای صنعت حمل و نقل، هوافضا، پزشکی و الکترونیک نشان داد که آلیاژهای مورد استفاده در این صنایع باید دارای نسبت استحکام به وزن بالا و مناسب، به

خواص مکانیکی نمونه به دست آمده، با استفاده از تست های خواص مکانیکی بررسی شده است. آزمایش های انجام شده برای نمونه ها آزمایش سختی، استحکام فشاری و بررسی ریز ساختار ها می باشند.

۲- عملیات و روش تولید نمونه ها

ماده ی اولیه مورد استفاده در این تحقیق پودر تیتانیوم با مش زیر ۴۵ میکرومتر و پودر نانو کاربید سیلیسیم با مش بندی آن ۶۵-۴۵ نانومتر می باشند. به منظور ریزتر کردن پودر و افزودن نانو پودر کاربید سیلیسیم و ماده ی روان ساز استتاریک اسید باید از آسیاب استفاده شود. برای تهیه ی سه نوع پودر تیتانیوم با درصد های وزنی ۰٪ و ۵٪ و ۱۰٪ نانو پودر کاربید سیلیسیم از یک آسیاب سیاره ای^۵ استفاده شد. همچنین، با استفاده از دستگاه گریز از مرکز چودر یکنواخت و همگنی به دست آمد. برای اطمینان از توزیع یکنواخت نانو پودر در پودر پایه و نیز مشاهده دانه ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۶ استفاده شده است. در شکل (۱) پودر تیتانیوم آسیاب شده با بزرگنمایی^۷ های مربوطه با درصد های ذکر شده از پودر نانو کاربید سیلیسیم نشان داده شده است. همان طور که در عکس ها مشاهده می شود پودر هایی با شکل کروی، سوزنی، استوانه ای، عضله ای، غیر منظم وجود دارد.



(الف)

استحکام فشاری و سایشی نانوکامپوزیت حاصل افزایش چشمگیری می یابد.

نانوتکنولوژی، پدیده ای است که می تواند منجر به بهبود خواص مواد گردد، به طوری که مطالعات نشان می دهند با ساخت نانوکامپوزیت های زمینه تیتانیوم که توسط نانوذرات مختلف (معمولاً سرامیکی) تقویت شده باشند، می توان به این مهم دست یافت [۳ و ۱]. برای ساخت نانوکامپوزیت ها روش های مختلفی از قبیل روش الکتروشیمیایی و تعادلی گرفته تا تکنیک های مکانیکی و ترمو مکانیکی مورد استفاده قرار می گیرند. هر روش برای تهیه نوع خاصی از نانو کامپوزیت ها با کاربرد ها و خواص مشخصی به کار می رود. روش های مکانیکی و ترمومکانیکی نظیر تثبیت به کمک موج شوک، پرس گرم، پرس گرم ایزواستاتیک و اکستروژن گرم به دلیل ماهیت مکانیکی آن ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند. در ورش معمول و به کار رفته در این مقاله، پس از ترکیب و همگن سازی پودر اولیه با پودر نانو، مراحل جهت تثبیت و تراکم و سپس زینتر نمودن قطعه خام مورد نیاز می باشد. در عملیات زینتر نمودن نمونه ای یکپارچه به دست می آید. به طور کلی با بررسی تحقیقات انجام شده در این خصوص، می توان نتیجه گیری نمود که اگر فشرده سازی پودر در حالت سرد انجام پذیرد، جهت زینتر نمودن پودر به فرآیندهای دیگری همانند فشرده سازی گرم، اکستروژن گرم و پرس ایزواستاتیک گرم نیاز است [۵، ۸]. در مقابل، چنان چه مرحله تراکم و فشرده سازی از ابتدا به صورت گرم انجام گیرد، معمولاً به فرآیندهای زینترینگ دیگری نیاز ندارد [۹].

در مقاله حاضر، با استفاده از روش فشرده سازی استاتیکی، پودر نانو کاربید به عنوان ماده افزودنی به پودر تیتانیوم افزوده شده و با اطمینان از همگن شدن پودر، عملیات زینتر در کوره حرارتی انجام شده است. نمونه ها در سه درصد مختلف صفر، ۵ و ۱۰ درصد کاربید سیلیسیم تهیه شده و در سه فشار استاتیکی مختلف فشرده شده اند. در حقیقت تاثیرات فشار فشرده سازی و نیز درصد کاربید سیلیسیم در

^۵ Planetary ball mill

^۶ Scanning Electron Microscope

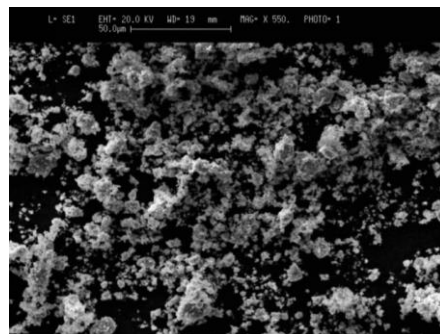
^۷ Zoom

راحت در آوردن نمونه بعد از اعمال فشار، پودر آماده شده با استفاده از یک قیف به آرامی داخل قالب ریخته شد. سپس با استفاده از یک پرس ۳۰ تنی هیدرولیک سنبه قالب تحت نیروی فشاری قرار می گیرد. نیروی فشاری وارده در سه مرحله و برابر با مقادیر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ تن می باشند که به ترتیب با توجه به مساحت مقطع سنبه، متناظر با فشار های ۱/۲۴، ۱/۹۵، و ۲/۴۹ گیگا پاسکال می باشند.

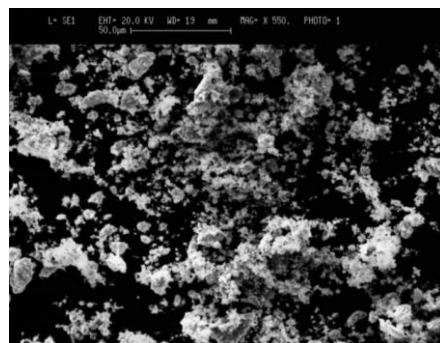
پس از این که قطعات به روش استاتیکی فشرده شدند برای ایجاد ساختار یکپارچه، نمونه ها باید تحت عمل زینترینگ قرار گیرند. با توجه به این که عمل زینترینگ در دمایی برابر با ۷۰ تا ۸۰ درصد نقطه ذوب فلز پایه انجام می شود [۷۳] و نقطه ذوب تیتانیوم ۱۶۶۵ درجه سانتی گراد می باشد، دمای کوره را روی ۱۲۰۰ درجه تنظیم کرده و به منظور جلوگیری از اکسید شدن قطعات گاز آرگون به داخل کوره تزریق شد. پس از رسیدن نمونه ها به دمای مورد نظر قطعات در مدت زمان یک ساعت در دمای مذکور نگه داشته شده و بعد از آن اجازه داده شد تا دمای کوره به آرامی دمای محیط برسد. بعد از رسیدن دمای کوره به دمای محیط، نمونه ها از داخل کوره خارج شدند. بنابراین در نهایت، تعداد نه نمونه قرص شکل از این ماده به قطر ۱۰ میلیمتر و شعاع ۱۵ میلیمتر و در سه درصد مختلف و سه فشار متفاوت به دست آمدند. در این مرحله، برای استخراج خواص مکانیکی نمونه ها، آزمایش هایی انجام شد که در ادامه توضیح داده شده اند.

۳- روش انجام تست های خواص مکانیکی

در این تحقیق برای استخراج برخی از خواص مکانیکی از قبیل درصد تخلخل، سختی و رفتار فشاری نمونه ها آزمایش هایی انجام شد. همچنین، برای بررسی ریز ساختارها در حالت های مختلف با استفاده از میکروسکوپ روبشی از ساختار میکروسکوپی نمونه ها عکسبرداری شد. روش انجام آزمایش ها در زیر شرح داده شده است.



(ب)



(ج)

شکل (۱) عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده در حالت های (الف) پودر تیتانیوم خالص با بزرگ نمایی ۵۰۰، (ب) پودر تیتانیوم با ۵٪ نانو پودر کاربید سیلیسیوم و بزرگ نمایی ۵۵۰، (ج) پودر تیتانیوم با ۱۰٪ نانو پودر کاربید سیلیسیوم و بزرگ نمایی ۵۵۰. بعد از تهیه پودر یکنواخت و همگن، پودر در داخل یک قالب به صورت استاتیکی فشرده شد. برای این منظور از قالبی استفاده شد که سخت کاری شده باشد تا در هنگام فشار دچار شکست نشود. قالب مربوطه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲) قالب سخت کاری شده برای انجام فشرده گی استاتیکی

بعد از مونتاژ و سر هم کردن قالب و روغن کاری دیواره داخلی قالب و نیز سنبه و پیشانی بالایی پله، جهت

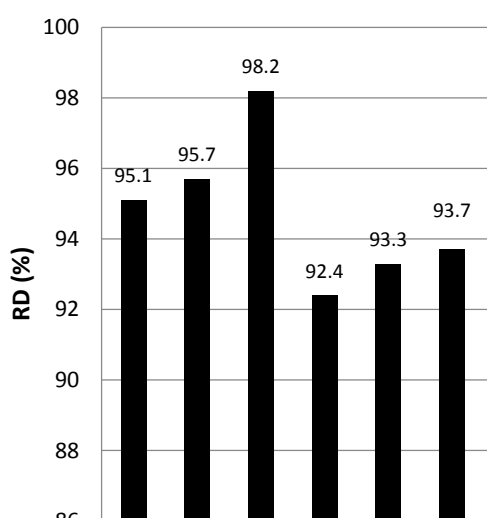
است. دستگاه با ایجاد نشانه با فشار استاندارد ۱۰ کیلوگرم بر روی نمونه به صورت اتوماتیک سختی نمونه را محاسبه نموده و در نشانگر دیجیتالی خود به معرض نمایش قرار می دهد.



شکل (۴) دستگاه تست سختی.

۴- بحث و نتایج آزمایشی

نتایج حاصل از آزمایش چگالی نمونه های کامپکت شده در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین، درصد تراکم در شکل (۵) آورده شده است. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش فشار کامپکت تراکم کاهش یافته و با افزایش درصد تقویت کننده تراکم افزایش می یابد.



شکل (۵) درصد تراکم تمامی نمونه های کامپکت شده

۳-۱- اندازه گیری چگالی

یکی از روش های تعیین مقدار چگالی و درصد تراکم، اندازه گیری وزن غوطه وری و تعیین حجم اجسام با استفاده از ترازو می باشد. برای محاسبه حجم نمونه ها از آب مقطر با خلوص ۹۹/۹٪ استفاده شد. در این حالت با استفاده از غوطه وری نمونه و اندازه گیری وزن نمونه با استفاده از یک ترازوی حساس و متعاقب آن حجم نمونه ها درصد تخلخل و تراکم نمونه ها اندازه گیری شد. درصد تراکم و تخلخل اندازه گیری شده نمونه ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

۳-۲- تعیین استحکام فشاری

برای انجام تست فشار از دستگاه تست سه کاره مدل کوپا رومیزی که برای تست کشش، فشار و خمش مورد استفاده قرار می گیرد استفاده شد. در شکل (۳) این دستگاه نشان داده شده است. در این دستگاه نمونه توسط دو فک محکم نگه داشته شده و سپس فک بالایی با حرکت رو به پایین خود نمونه را تحت فشار قرار می دهد. مقادیر نیرو و جابه جایی توسط دستگاه ثبت شده و نمودار تغییرات نیرو و تنش بر حسب جابه جایی رسم می شود.



شکل (۳) دستگاه تست فشار.

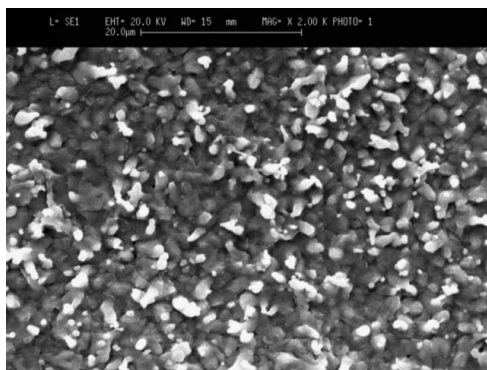
۳-۳- آزمایش سختی

در این تحقیق، برای تعیین سختی سنجی نمونه ها از روش سختی سنجی ویکرز استفاده شد. برای افزایش دقت اندازه گیری نمونه های کامپکت شده از پنج نقطه مختلف این تست انجام شد. شکل (۴) مربوط به عکس این دستگاه

کامپکت ۲/۴۹ گیگا پاسکال بوده و کمترین مقدار آن مربوط به تیتانیوم با ۰٪ تقویت کننده‌ی نانو پودر کاربید سیلیسیم با فشار ۱/۲۴ گیگا پاسکال است.

در شکل (۶) تصویر میکروسکوپی نمونه های تولید شده تیتانیوم با درصد های مختلف تقویت کننده‌ی کاربید سیلیسیم نشان داده شده است. هدف از گرفتن این عکس ها مشاهده‌ی سطح دانه و مقایسه‌ی بین سطح دانه‌ها برای درصد های مختلف تقویت کننده‌ی کاربید سیلیسیم می باشد.

با مقایسه‌ی تصاویر گرفته شده از نمونه‌ها دیده می شود مرزبندی دانه‌ها در برخی موارد مشخص بوده و با توجه به اینکه فشار کامپکت بالاست تخلخل‌ها بسیار کم بوده و در برخی موارد یافتن قسمت‌های متخلخل برای گرفتن عکس توسط میکروسکوپ الکترونی به دشواری انجام می شود. این امر نشان دهنده یکپارچگی مناسب نمونه‌ها می باشد. با افزایش فشار کامپکت در نمونه‌هایی با درصد تقویت کننده‌ی یکسان نظم مرز دانه‌ها بیشتر شده و تخلخل کمتر به چشم می‌خورد. همچنین، با افزایش درصد تقویت کننده‌ی نانو پودر کاربید سیلیسیم برای نمونه‌هایی که تحت فشار یکسان کامپکت شده‌اند تخلخل کاهش می‌یابد و تعداد حفره های بیش تری مشاهده می شود. این قسمت‌ها یا چاله‌ها محل قرارگیری نانو پودرهای کاربید سیلیسیم هستند.



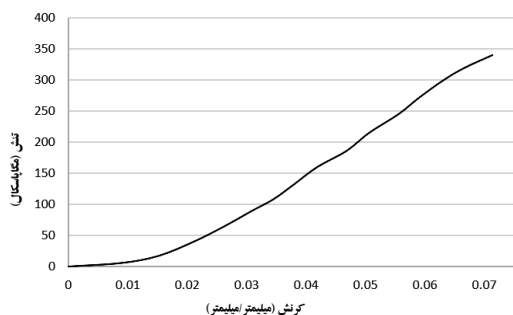
(الف)

جدول (۱) چگالی نمونه‌ها با درصد های مختلف کاربید سیلیسیم و تحت فشارهای متفاوت.

تخلخل %	تراکم %	چگالی g/cm^3	حجم cm^3	جرم g	فشار GPa	درصد SiC
۴/۹	۹۵/۱	۴/۵۸	۰/۵۴	۲/۴۸	۱/۲۴	۰
۴/۳	۹۵/۷	۴/۷۰	۰/۵۱	۲/۴۰	۱/۹۵	۰
۱/۸	۹۸/۲	۴/۷۳	۰/۵۳	۲/۵۱	۲/۴۹	۰
۷/۶	۹۲/۴	۴/۸	۰/۵۷	۲/۷۶	۱/۲۴	۵
۶/۷	۹۳/۳	۴/۸۲	۰/۵۷	۲/۷۷	۱/۹۵	۵
۶/۳	۹۳/۷	۴/۸۷	۰/۵۷	۲/۸۰	۲/۴۹	۵
۱۰	۹۰	۴/۸۲	۰/۶۲	۲/۹۹	۱/۲۴	۱۰
۸/۲	۹۱/۸	۴/۹۰	۰/۴۹	۲/۴۳	۱/۹۵	۱۰
۶/۷	۹۳/۳	۵	۰/۵۸	۲/۹۰	۲/۴۹	۱۰

با مقایسه‌ی نمودارها و جداول مربوط به چگالی نتایج مهمی به دست می‌آید. درصد تراکم به دست آمده برای نمونه‌ها نشان دهنده تراکم مطلوب نمونه‌ها می باشد. برای درصد های یکسان کاربید سیلیسیم در هر سه مورد با افزایش فشار کامپکت چگالی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین درصد تراکم افزایش و تخلخل کاهش می‌یابد.

برای فشارهای کامپکت یکسان با افزایش درصد کاربید سیلیسیم چگالی افزایش می‌یابد. با توجه به این که چگالی کاربید سیلیسیم ۳/۲۲ گرم بر سانتی متر مکعب است انتظار می‌رفت با افزایش درصد کاربید سیلیسیم چگالی نیز بیش از این افزایش پیدا کند که نتیجه‌ی عکس این قضیه بود. علت اصلی این امر مربوط به اندازه‌ی کوچک دانه‌های پودر کاربید سیلیسیم می‌باشد و این واقعیت که هر چه اندازه‌ی دانه‌ها ریزتر باشد فشردن آن مشکل تر خواهد بود. دلیل دیگر آن این است که ذرات فلزات راحت تر به یکدیگر می‌چسبند و جوش می‌خورند اما ذرات سرامیکی کاربید سیلیسیم که اطراف دانه‌های تیتانیوم را احاطه کرده‌اند مانع از تماس کامل بین ذرات تیتانیوم به یکدیگر می‌شوند که این امر نیز در مقدار درصد تخلخل و چگالی نقش اساسی خواهد داشت. همچنین، با مقایسه‌ی نمودارها این نتیجه به دست می‌آید که بیشترین مقدار چگالی مربوط به تیتانیوم با ۱۰٪ تقویت کننده‌ی نانو پودر کاربید سیلیسیم با فشار



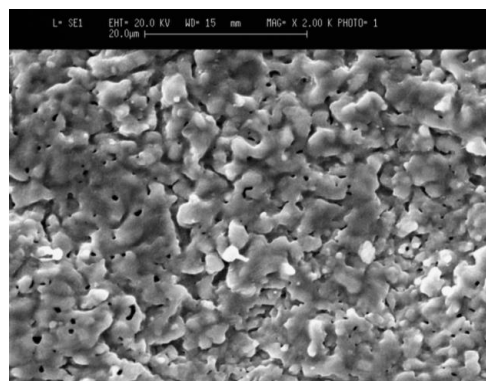
شکل (۷) منحنی فشار- جابه جایی مربوط به تیتانیوم با ۱۰٪ تقویت کننده کاربید سیلیسیم کامپکت شده با فشار ۲/۴۹ گیگا پاسکال

همچنین، مقادیر فشار تحملی و تنش فشاری شکست برای نمونه های مختلف در جدول (۲) لیست شده است.

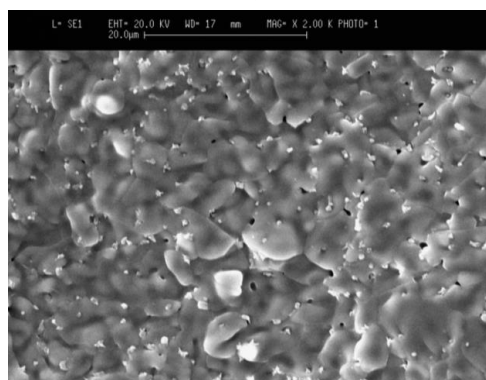
جدول (۲) تنش فشاری شکست برای نمونه های مختلف

درصد کاربید سیلیسیم	فشار کامپکت (گیگاپاسکال)	تنش فشاری شکست (مگاپاسکال)
۰	۱/۲۴	۱۰
۰	۱/۹۵	۷
۵	۲/۴۹	۲۷۰
۵	۱/۲۴	۲۲۸
۵	۱/۹۵	۱۵۰
۱۰	۲/۴۹	۱۱۰
۱۰	۱/۲۴	۱۸۵
۱۰	۱/۹۵	۷
۱۰	۲/۴۹	۱/۵

با مقایسه ی نمودارها و مشاهده ی تفاوت بین آنها برای فشارهای مختلف دیده می شود، در تیتانیوم خالص با افزایش فشار کامپکت تنش شکست افزایش می یابد و بنابراین رفتار منطقی از خود نشان می دهد. اما با اضافه شدن پودر نانو رفتار فشاری نمونه دچار تغییر می گردد. در کل با افزایش درصد نانو پودر، تحمل فشاری مقداری کاهش می یابد که علت آن نیز این است که با افزایش حفره ها ساختار تراکمی ماده یکپارچگی خود را مقداری از دست می دهد. در حقیقت افزودن نانو پودر کاربید سیلیسیم خواص



(ب)



(ج)

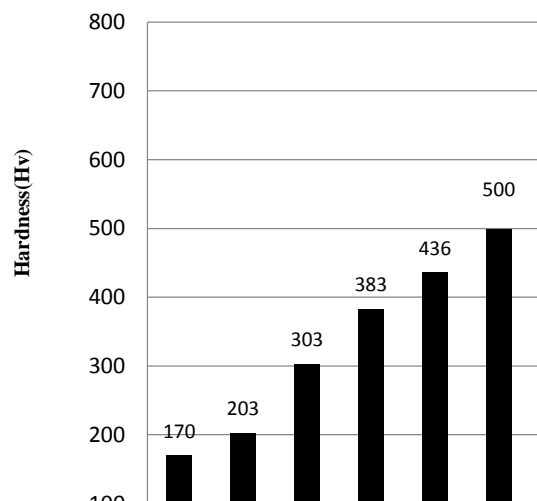
شکل (۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) تیتانیوم با ۰٪ تقویت کننده ی کاربید سیلیسیم و با بزرگ نمایی ۲۰۰۰. (ب) تیتانیوم با ۵٪ تقویت کننده ی کاربید سیلیسیم و با بزرگ نمایی ۲۰۰۰. (ج) تیتانیوم با ۱۰٪ تقویت کننده ی کاربید سیلیسیم و با بزرگ نمایی ۲۰۰۰.

در تصاویر با بزرگ نمایی بالا مشاهده می شود که شکل دانه های پودر تیتانیوم دارای سطحی متخلخل هستند. دانه های نانو پودر کاربید سیلیسیم زیر میکروسکوپ در مقایسه با دانه های تیتانیوم روشن تر دیده می شود. با افزودن نانو پودر کاربید سیلیسیم به تیتانیوم حفره های موجود بر روی سطح دانه ها با نانو پودر پر می شوند و در تصاویر میکروسکوپی قسمت های درخشان در سطح دانه ها این نانو پودرها را نشان می دهند.

در تست فشار نمونه ها، همانطور که در شکل (۷) مشاهده می شود بیشترین فشار تحملی در نمونه با ۵٪ تقویت کننده کاربید سیلیسیم با فشار کامپکت ۲/۴۹ گیگا پاسکال روی داده است.

۶۸۱ ۷۰۰ ۶۸۷ ۶۷۹ ۶۷۲ ۶۶۷ ۷/۶۶ ۱۰

نمودار شکل (۸) نشان می‌دهد که با افزایش فشار، سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابند و با افزایش درصد تقویت‌کننده‌ی نانو پودر کاربید سیلیسیم افزایش سختی بیش‌تری به‌دست می‌آید.



شکل (۸) سختی ویکرز میانگین تمام نمونه‌های کامپکت شده.

با مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های سختی و نمودارهای مربوطه دیده می‌شود سختی نمونه‌ها با درصد تقویت‌کننده‌ی یکسان، و افزایش فشار کامپکت افزایش می‌یابند. همچنین، با افزایش درصد تقویت‌کننده‌ی نانو پودر کاربید سیلیسیم سختی نمونه‌های کامپکت شده تحت فشارهای یکسان افزایش چشم‌گیری کرده‌اند. در نمونه تیتانیوم با ۱۰٪ تقویت‌کننده کاربید سیلیسیم با فشار کامپکت ۲/۴۹ گیگا پاسکال بیشترین سختی و نمونه تیتانیوم با ۰٪ تقویت‌کننده کاربید سیلیسیم با فشار کامپکت ۱/۲۴ گیگا پاسکال کمترین سختی اندازه‌گیری شده‌اند.

۵- نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج به دست آمده در این تحقیق دیده می‌شود با استفاده از روش متالورژی پودرچگالی نمونه‌ها به ۹۸ درصد رسیده است که نشان دهنده تولید مطلوب نمونه می‌باشد. رسیدن به درصد تخلخل حدود ۲ درصد با استفاده از روش متالورژی پودر مطلوب می‌باشد چرا که یکی از مشکلات

فشاری را بهبود بخشیده و مقداری کاهش داده است. البته این کاهش استحکام فشاری با افزایش چشمگیر سختی توجیه دارد. همچنین، با افزایش فشار کامپکت در درصد‌های مشابه از نانو پودر، استحکام فشاری کاهش یافته است. این امر نشان دهنده این است که در این حالت‌ها نمونه‌ها استحکام فشاری قابل قبولی از خود نشان نداده است. دیده می‌شود در درصد نانو پودر ۱۰ درصد خواص فشاری افت چشمگیری نموده است. چنین رفتاری در نانو کامپوزیت‌های پایه فلزی دور از انتظار نیست. خواص فشاری تا درصد‌های خاصی افزایش یافته و بعد از آن کاهش یافته است. علت این امر نیز این است که با افزایش نانو پودر‌ها از حد معین (حدود ۵ درصد) نانو پودر‌ها یکپارچگی ماده را مختل نموده و از چسبیدن پودر فلز پایه به یکدیگر ممانعت به عمل می‌آورند. این امر در نتایج جدول (۲) به وضوح دیده می‌شود.

نتایج حاصل از آزمایش سختی نمونه‌های کامپکت شده در جدول (۳) گزارش شده است. همچنین، سختی میانگین ۵ نقطه از هر نمونه به عنوان سختی آن در نظر گرفته شده و در شکل (۸) نشان داده شده است.

جدول (۳) نتایج تست سختی ویکرز ۱۰ کیلوگرم انجام شده روی پنج نقطه از نمونه‌های کامپکت شده به روش استاتیکی.

میانگین HV	سختی HV _۱	سختی HV _۲	سختی HV _۳	سختی HV _۴	سختی HV _۵	درصد SiC %
۱۷۰	۱۵۸	۱۶۲	۱۶۷	۱۷۷	۱۸۶	۰
۲۰۳	۱۹۱	۱۹۵	۲۰۱	۲۰۹	۲۱۹	۲/۴۹
۳۰۳	۲۹۲	۲۹۶	۳۰۰	۳۰۸	۳۱۹	۴/۹۸
۳۸۳	۳۷۳	۳۷۹	۳۸۳	۳۸۷	۳۹۳	۷/۴۷
۴۳۶	۴۲۳	۴۲۹	۴۳۵	۴۴۳	۴۵۰	۹/۹۴
۵۰۰	۴۸۹	۴۹۵	۵۰۱	۵۰۵	۵۱۰	۱۲/۳۱
۵۰۰	۴۹۱	۴۹۴	۵۰۲	۵۰۶	۵۰۷	۱۰
۵۸۰	۵۶۴	۵۷۰	۵۷۹	۵۸۸	۵۹۹	۱۰

۷- منابع

- [1] Smith P.R. and Froes F., Developments in titanium metal matrix composites, 36, 1984, pp. 19-26.
- [2] Wan-li G.U., Bulk Al/SiC nanocomposite prepared by ball milling and hot pressing method, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 16, 2006, pp. 398-401.
- [3] Moongkhamklang P., Elzey D.M. and H.N. Wadley, Titanium matrix composite lattice structures. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 39, 2008, pp. 176-187.
- [4] Montealegre Meléndez, I., E. Neubauer, and H. Danninger, Consolidation of titanium matrix composites to maximum density by different hot pressing techniques. 06, 2007, pp3-6.
- [5] Sadeghian Z., et al., Microstructural and mechanical evaluation of Al-TiB₂ nanostructured composite fabricated by mechanical alloying. Journal of Alloys and Compounds, 29, 2011, pp. 7758-7763.
- [6] Khan D.F., et al., Compaction of Ti-6Al-4V powder using high velocity compaction technique, Materials & Design, 2013, 50(0), pp. 479-483.
- [7] Zhang Y., Wang L., ZrO₂ solid superacid porous shell/void/TiO₂ core particles (ZVT)/polyvinylidene fluoride (PVDF) composite membranes with anti-fouling performance for sewage treatment, Chemical Engineering Journal, 2015, 260, pp. 258-268.
- [8] Foganolo J.B., et al., 6061 Al reinforced with zirconium diboride particles processed by conventional powder metallurgy and mechanical alloying. Journal of material science, 2004, 39, pp. 127-132.
- [9] Mohammad Sharifi E., Karimzadeh F., Enayati M.H., Fabrication and evaluation of mechanical and tribological properties of boron carbide reinforced aluminum matrix nanocomposites. Materials & Design, 2011, 32, pp. 3263-3271.

این روش افزایش تخلخل می باشد. بنابراین، می توان صحت و درستی عملیات انجام شده را تایید نمود. چگالی نمونه ها با افزایش فشار کامپکت افزایش یافته اما با افزایش درصد تقویت کننده ی کاربید سیلیسیم کاهش می یابد. بررسی نمونه های کامپکت شده زیر میکروسکوپ الکترونی روبشی مرزبندی دانه ها را مشخص می کند. با مقایسه ی تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ ملاحظه می شود افزایش سرعت و فشار موجب زیاد شدن تراکم نمونه ها می شود. با مقایسه ی نمودارهای تنش- کرنش فشاری ملاحظه می شود در بهترین حالت ممکن (۵ درصد نانو کاربید سیلیسیم و فشار ۱/۲۴ گیگا پاسکال) تنش شکست به مقدار ۲۲۷ مگاپاسکال رسیده است که البته نسبت به حالت خالص مقداری کاهش یافته است اما با افزایش بیشتر نانو پودر، استحکام فشاری کاهش می یابد. اعداد به دست آمده در حالت خالص برای استحکام فشاری (۲۷۰ مگاپاسکال) و مقایسه آن از مراجع نشان هب نرکه با افزایش سرعت و فشار تنش و کرنش نمونه ها افزایش می یابند ولی با افزایش نانو پودر کاربید سیلیسیم تنش ها و کرنش های تسلیم ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابند. با مقایسه ی نمودارهای سختی نیز این نتیجه بدست می آید که با افزایش سرعت و فشار کامپکت سختی نمونه ها افزایش می یابند و با افزایش تقویت کننده این افزایش در سختی نمونه ها افزایش چشم گیری می یابند.

۶- فهرست علائم

ρ	چگالی (g/cm ³)
V	حجم (cm ³)
RD	درصد تراکم
HV	سختی (ویکرز)
SiC	کاربید سیلیسیم
SEM	میکروسکوپ الکترونی روبشی