

بررسی تحلیلی و تجربی روش متالورژی انفجاری پودر دی بوراید تیتانیوم با استفاده از محیط واسط آب

یونس کریمی کاکاوند^۱، معین گنجی^۲، علی مهدی پور عمرانی^{۳*}، علی علیزاده^۴

۱ و ۲- دانشجوی کارشناس ارشد ۳ و ۴- استادیار

دانشگاه صنعتی مالک اشتر- تهران

(تاریخ وصول: ۹۴/۵/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۱۷)

چکیده

دی بوراید تیتانیوم یک ترکیب مقاوم به سایش است که دارای سختی زیاد، چگالی پایین و رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا در حالت جامد است. در این تحقیق، فرآیند متالورژی پودر انفجاری برای تولید نمونه از پودر دی بوراید تیتانیوم مورد بررسی و امکان سنجی قرار گرفته است. ابتدا حل تحلیلی فرآیند متالورژی پودر انفجاری با محیط واسط آب به منظور تعیین ماده منفجره مناسب برای شکل دهی پودر دی بوراید تیتانیوم انجام گرفت. در بخش تجربی نیز با طراحی چیدمان های مختلف، قطعاتی با این روش تولید گردید. بررسی چگالی و سختی قطعات تولید شده نشان داد که در صورت استفاده از تله اندازه حرکت با ارتفاع مناسب و پودر تیتانیوم در ساختار چیدمان ها می توان موج شوک کششی برگشتی به داخل قالب را کاهش داده و دیسک هایی با چگالی نسبی ۹۸٪ و سختی ۲۶۰۰ ویکرز تولید نمود. همچنین بررسی ریزساختار قطعات تولید شده با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که اتصال بین ذرات پودر به خوبی برقرار شده و نمونه ها فاقد هرگونه ترک می باشند.

واژه های کلیدی: متالورژی پودر انفجاری، موج شوک، پودر دی بوراید تیتانیوم.

Analytical and Experimental Investigation of Explosive Powder Metallurgy Method of Titanium Diboride Using Water as the Interface Medium

Y. Karimi Kakavand, M. Ganji, A. Mehdi-poor Omrani*, A. Alizadeh

Maleke Ashtar University of Technology, Tehran

(Received: 08/25/2015, Accepted: 11/08/2015)

Abstract

Titanium diboride is a wear-resistant compound having high hardness, low density and high electrical and thermal conductivity in the solid state. In this study, the explosive powder metallurgy process for production of samples from TiB_2 powder was investigated. At first, analytical solution of the explosive powder metallurgy process with water as interface medium was performed in order to determine the suitable explosive material to consolidate the TiB_2 powder. In the experimental section, with the different design of assemblies the pieces were produced with this method. Analysis of the density and hardness of the produced parts showed that the use of momentum traps with proper height and titanium powder in the assemblies, can reduce the shock wave stretching back into the die and produce disks with relative density of 98% and a hardness of 2600 Vickers. In addition, investigation of the microstructure of the produced components using scanning electron microscopy showed that there was a good connection between the powder particles and the samples were free of any cracks.

Keyword: Explosive Powder Metallurgy, Shock Wave, Titanium Diboride Powder.

۱- مقدمه

با تداوم این عمل برای سایر دانه‌های پودر عمل فشردن پودر انجام می‌گیرد. از سوی دیگر با توجه به اینکه سطح پودر از دمای بالایی برخوردار است، در اثر برخورد دانه‌های پودر به یکدیگر جوش خوردن ذرات پودر تحت مکانیسمی شبیه به مکانیسم جوشکاری انفجاری انجام می‌گیرد. پس دو فرایند فشردن و جوش خوردن ذرات پودر به یکدیگر با عبور موج شوک از پودر صورت گرفته و به عملیات ثانویه تف جوشی نیازی نیست [۷].

شکل‌دهی پودر TiB_2 به روش متالورژی پودر سنتی نیازمند درجه حرارت بالا ($1800^\circ C$) جهت پخت و زمان ماندگاری طولانی است. چنین شرایطی سبب رشد قابل توجه دانه شده که باعث افت خواص مکانیکی آن (به خصوص چقرمگی شکست و استحکام خمشی) می‌شود که برای غلبه بر این مشکل‌ها دو راه‌حل وجود دارد. در روش اول از اتصال‌دهنده‌های فلزی و غیرفلزی مخلوط شده با پودر TiB_2 استفاده می‌شود که با افزودن این اتصال‌دهنده‌ها دمای پخت کاهش می‌یابد و در روش دوم از فرآیندهای متالورژی پودر انفجاری استفاده می‌شود [۳، ۵، ۶].

هر یک از محققین روش خاصی را در عبور موج شوک از پودر برگزیده و تحقیقات خود را بر روی آن روش معطوف کرده‌اند اما به طور کلی متالورژی پودر انفجاری به دو روش کلی مستقیم و غیرمستقیم قابل انجام است. در روش مستقیم ماده منفجره تقریباً در تماس مستقیم با پودر قرار دارد و برای انتقال بهتر انرژی و جلوگیری از اکسیداسیون پودر، قطعه‌ای واسط بین آن و ماده منفجره قرار می‌گیرد. این روش به صورت‌های محوری و شعاعی قابل انجام است. در روش غیرمستقیم ماده منفجره در تماس مستقیم با پودر نبوده و انرژی حاصل از انفجار باعث به حرکت درآمدن یک صفحه پرنده^۲ می‌شود. سپس صفحه پرنده با سنبه در تماس با سطح پودر برخورد کرده و باعث تراکم و شکل‌دهی پودر می‌شود [۹]. در ادامه روش متالورژی پودر انفجاری مستقیم محوری و فعالیت‌های انجام گرفته در این زمینه به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

۱-۱- متالورژی پودر انفجاری مستقیم محوری

یکی از روش‌های متالورژی پودر انفجاری، شکل‌دهی مستقیم محوری پودر است که به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. در این روش پودر درون قالب فلزی قرار می‌گیرد. موج حاصل از انفجار به صورت موج شوک وارد سنبه و سپس محیط پودر شده و با تراکم و تف جوشی همزمان پودر، باعث شکل‌دهی آن می‌شود. این روش معمولاً برای قطعاتی با نسبت طول به قطر کم‌تر از یک، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹ و ۱۰].

مامالیس و همکارانش [۱۱] پودر مس با ذرات کروی را با روش شعاعی چند قالبی شکل‌دهی کرده و صفحات نازک مستطیل شکل تولید کردند. آن‌ها در ادامه تغییرات میکرو ساختاری، اتصال بین

دی بوراید تیتانیوم (TiB_2) به دلیل داشتن ترکیبی عالی از خواص از جمله نقطه ذوب بالا ($3225^\circ C$)، چگالی پایین ($4/5 \text{ g/cm}^3$)، سختی زیاد (20 GPa)، رسانایی الکتریکی خوب ($22 \times 10^6 \Omega \text{cm}$)، رسانایی حرارتی خوب (96 W/mK)، مدول الاستیک، مقاومت سایشی و استحکام بالا و ثبات شیمیایی قابل توجه، یکی از مواد پرکاربرد در ساختارهای با دما و مقاومت سایشی بالاست [۶-۱]. توانایی خاصیت بالای جذب نوترون به همراه دمای ذوب بالا، این ماده بهترین انتخاب برای کنترلر میلر در راکتورهای هسته‌ای است [۴]. از دیگر کاربردهای TiB_2 می‌توان به استفاده از آن در ساخت ابزارهای برشی، ساخت ذره و قطعات سایشی مقاوم در برابر شرایط کارکردی سخت اشاره کرد [۵]. دشواری شکل‌دهی قطعات TiB_2 به دلیل استحکام و سختی بالا، علت اصلی هزینه زیاد و محدودیت‌های آن در کاربردهای مهندسی شده است. به همین علت برای شکل‌دهی آن از روش‌های شکل‌دهی پودر مانند متالورژی پودر سنتی و انفجاری استفاده می‌شود [۶].

متالورژی پودر به دلیل نرخ تولید بالا، عدم نیاز به مواد افزودنی جهت افزایش قدرت نفوذ، عدم وجود گرادپان چگالی و خصوصیات مکانیکی در طول قطعه تولید شده و دقت ابعادی بالا، روشی مناسب برای شکل‌دهی مواد سخت به شمار می‌آید. فرآیند متالورژی پودر به دو روش سنتی و انفجاری قابل انجام است. فرآیند متالورژی پودر سنتی در دو مرحله انجام می‌گیرد که در مرحله اول ابتدا پودر ماده مورد نظر با استفاده از پرس‌های هیدرولیکی دو طرفه در قالب فشرده می‌شود و به سبب آن دانه‌های پودر در یکدیگر نفوذ کرده و فضای خالی موجود بین آن‌ها پر می‌شود. این امر سبب جوش خوردن دانه‌های پودر و افزایش چگالی قطعه می‌گردد. در مرحله دوم قطعه تحت فرآیند تف جوشی^۱ قرار می‌گیرد که سبب جوش خوردن کامل ذرات، حذف تخلخل‌های موجود و استحکام قطعه می‌شود. در صورتی که پودر ماده مورد نظر از سختی و استحکام بالایی برخوردار باشد، فرآیند خرد شدن و تغییر شکل دانه‌های پودر جهت نفوذ به فضاهای خالی به سختی انجام می‌گیرد و همین امر باعث کاهش چگالی نهایی قطعه حاصل از روش متالورژی پودر سنتی خواهد شد [۷].

متالورژی پودر انفجاری با هدف برطرف کردن برخی محدودیت‌های متالورژی پودر سنتی از نیمه دوم قرن بیستم میلادی و برای اولین بار توسط لاروکا و پیرسون [۸] به منظور فشردن پودر مواد مورد استفاده قرار گرفت. این فرآیند یکی از روش‌های شکل‌دهی دینامیکی پودر است که در آن موج حاصل از انفجار یک ماده منفجره باعث ایجاد یک موج شوک در قطعه واسطه بین پودر و ماده منفجره می‌شود. با عبور موج شوک ایجاد شده از پودر، انرژی داخلی ذرات پودر افزایش یافته و سبب شتاب گرفتن دانه‌های پودر می‌شود. با شتاب گیری دانه‌های پودر، هر دانه با دانه مقابل خود برخورد کرده و

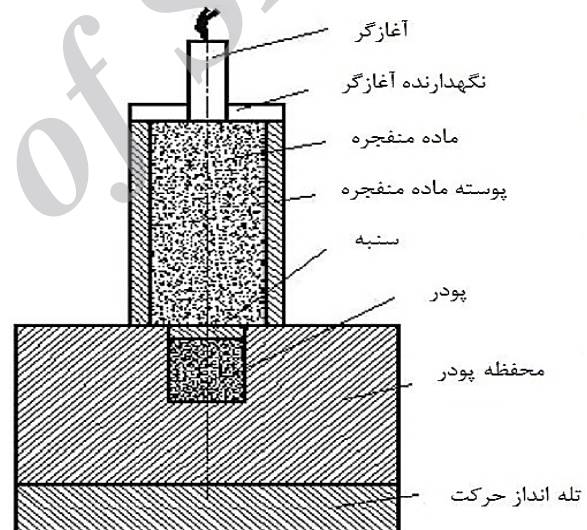
جوش خورده و قطعاتی با خصوصیات مکانیکی بهتر و بدون ترک، تولید می‌شود [۱۶].

چیبا و همکارانش [۱۷] پودر سیلیکون نیتريد را با استفاده از این روش و بدون استفاده از مواد افزودنی شکل دادند و قطعه‌ای بدون ترک و با چگالی بیش از ۹۸٪ چگالی تئوری ایجاد کردند. آن‌ها در ادامه تحقیقات خود پودر تیتانیوم آلومیناید و پودرهای مغناطیسی Sm-Fe-N و Sm-Fe-N/(Ni,Co) را با روش زیر آب شکل‌دهی کرده و به خواص مناسبی دست یافتند [۱۸ و ۱۹]. کیم و همکارانش [۲۰ و ۲۱] پودر اکسید روی را به روش زیر آب شکل‌دهی کرده و مورفولوژی و ساختار نمونه‌ها را به وسیله پراش اشعه ایکس^۱ و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها قطعاتی بدون ترک با چگالی ۹۹٪ چگالی تئوری، بدون رشد دانه و با مقاومت مرز دانه‌ای بالا در مقایسه با قطعات تولید شده به روش متالورژی پودر سنتی تولید کردند. آن‌ها در ادامه تحقیقات خود پودر دی‌اکسید تیتانیوم را نیز با موفقیت شکل‌دهی کرده و قطعاتی با چگالی ۹۶٪ چگالی تئوری به دست آوردند.

اسکندری و هوکاموتو [۲۲] کامپوزیت زمینه آلومینیومی با درصدهای مختلف دی‌بوراید تیتانیوم را با روش زیر آب شکل‌دهی کرده و سپس قطعات را در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۷۰ دقیقه تحت عملیات تف جوشی قرار دادند. آن‌ها چگالی، سختی و مقاومت خمشی قطعات حاصل شده را قبل و بعد از تف جوشی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که قطعات تف جوشی شده دارای خواص بهتری می‌باشند. مشهدی و همکارانش [۲۳] نانو کامپوزیت AIN-TiN را با روش متالورژی پودر انفجاری زیر آب با فشار ۱۰ GPa شکل‌دهی کرده و قطعاتی با چگالی ۹۸٪ چگالی تئوری به دست آوردند. بررسی‌ها نشان داد که اندازه دانه‌ها بعد از فرآیند ۲۲٪ کاهش یافته و ترکیب شیمیایی بدون تغییر مانده است. ژو و همکارانش [۲۴] پودرهای مس و تنگستن را به روش آلیاژسازی مکانیکی و با استفاده از آسیاب سیاره‌ای تهیه کرده و سپس پودر مس-تنگستن را تا دمای ۱۰۰۰ °C حرارت دادند. در ادامه با فشار موج شوک ۱۰ GPa و به روش زیر آب شکل‌دهی کرده و قطعه‌ای بدون ترک و با چگالی ۱۶/۴۴ g/cm^۳ به دست آوردند.

هدف از این پژوهش بررسی تحلیلی و تجربی فرآیند متالورژی پودر انفجاری مستقیم محوری با محیط واسط آب برای شکل‌دهی پودر دی‌بوراید تیتانیوم با استفاده از مواد منفجره C4 و HMX است. در بخش تحلیلی فشار ایجاد شده در فصل مشترک اجزای چیدمان محاسبه شده است. با مقایسه فشار ایجاد شده در پودر با استفاده از حل تحلیلی و فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی پودر بر اساس مراجع، توانایی مواد منفجره ذکر شده برای شکل‌دهی پودر دی‌بوراید تیتانیوم مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش تجربی دیسک‌هایی از پودر مذکور با شرایط آزمایش مختلف تولید گردید.

ذرات و نحوه شکل‌گیری جت ذرات را در طول فرآیند مورد بررسی قرار دادند. آندو و همکارانش [۱۲] پودر آمورف نئودیمیموم- آهن- بور را با روش متالورژی پودر انفجاری مستقیم محوری، شکل‌دهی کردند. قطعاتی با چگالی بیش از ۹۵٪ چگالی تئوری و بدون ترک در تحقیقات آن‌ها گزارش شده است. آن‌ها در آزمایش‌های خود از پودر کاربید سیلیکون استفاده کردند. استفاده از این پودر سبب کاهش موج‌های برگشتی و جلوگیری از ترک در نمونه آمورف شد. وگلر و همکارانش [۱۳] با استفاده از این روش پودر کاربید تنگستن را شکل‌دهی کرده و نتایج آن را با روش استاتیکی مقایسه کردند. ظهور و مهدی‌پور [۱۴] شکل‌دهی انفجاری محوری پودر تنگستن را با موفقیت انجام دادند. آن‌ها پس از انجام شبیه‌سازی فرآیند، در آزمایش تجربی قطعه‌ای بدون ترک و با چگالی بیش از ۹۵٪ چگالی تئوری تولید کردند. بوکامسکی و فدرووا [۱۵] اثرات فیزیکی تراکم انفجاری بر نانو پودر آلومینا و ترکیبات فازی آن را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها سرامیکی با ساختار نانو (۲۰۰ nm)، چگالی نسبی بیش از ۹۷٪ و میکرو سختی ۲۳/۵ GPa به دست آوردند.



شکل ۱- چیدمان متالورژی پودر انفجاری مستقیم محوری [۱۴].

متالورژی پودر انفجاری مستقیم محوری با محیط واسط آب: از دهه آخر قرن بیستم میلادی، تحقیقات بر به‌کارگیری روش‌های نوین به منظور دستیابی به کیفیت بالاتر و حذف ترک در شکل‌دهی پودر مواد سخت و آلیاژهای نوین مثل ترکیبات بین فلزی متمرکز شد. نتیجه تحقیقات انجام شده به ابداع روش متالورژی پودر انفجاری با محیط واسط آب منجر شد. در این روش که شماتیکی از آن در شکل (۲) نشان داده شده است، با عبور موج شوک حاصل از انفجار ماده منفجره از آب، پهنای موج شوک افزایش می‌یابد. با افزایش زمان ماندگاری موج شوک، مدت زمانی که پودر تحت موج شوک است بیش‌تر شده و ضخامت لایه ذوب شده سطح پودر نیز افزایش می‌یابد. با ضخیم‌تر شدن این لایه، ذرات پودر به شکل بهتری به یکدیگر

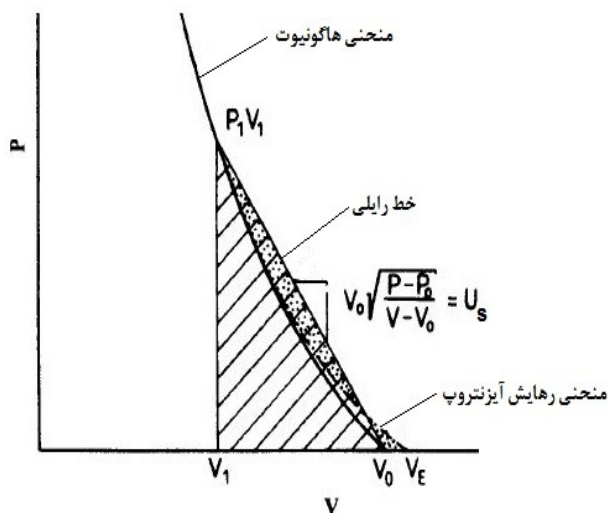
1- X-Ray Diffraction (XRD)

2- Scanning Electron Microscope (SEM)

در معادله (۲) با در نظر گرفتن $P_0 = 0$ ، معادله ی $P - U$ به صورت معادله ی شماره (۶) نشان داده می شود.

$$P = \rho_0 U_S U_P \quad (6)$$

در معادله (۶) پارامتر $\rho_0 U_S$ امپدانس شوک نامیده می شود و با حرف بزرگ Z نمایش داده می شود. میزان فشار نهایی ایجاد شده در دو جسم، به نسبت امپدانس آن ها بستگی دارد [۲۵].



شکل ۳- منحنی هاگونیوت P-V [۲۵].

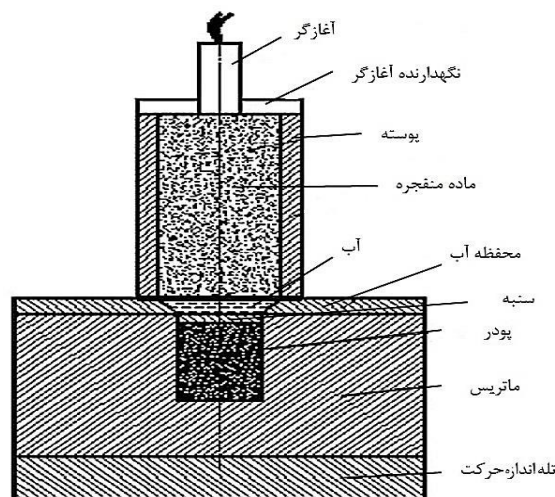
۳-۱- تعیین فشار دینامیکی مورد نیاز جهت شکل دهی پودر

میرز با ارائه نموداری در کتاب رفتار دینامیکی مواد، روشی برای تعیین فشار مورد نیاز جهت شکل دهی پودر مواد مختلف ارائه کرد. در این نمودار که در شکل (۴) نشان داده شده است، حداقل فشار دینامیکی مورد نیاز جهت شکل دهی به سختی پودر نسبت داده شده است و با داشتن سختی پودر مورد نظر می توان فشار لازم جهت شکل دهی آن را به آسانی از روی نمودار تعیین نمود [۲۶]. با توجه به نمودار شکل (۴) حداقل فشار مورد نیاز برای شکل دهی پودر دی-بوراید تیتانیوم حدود ۳۵ GPa است؛ بنابراین ماده منفجره باید بتواند حداقل فشاری معادل ۳۵ GPa را در محیط پودر ایجاد کند تا بتواند آن را شکل دهی کند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- حل تحلیلی فرآیند تراکم پودر انفجاری

در این بخش، فشار ایجاد شده در فصل مشترک اجزای چیدمان متالورژی پودر انفجاری نشان داده شده در شکل (۲) به روش تحلیلی تعیین می گردد. بدین ترتیب با به دست آوردن فشار ایجاد شده در محیط پودر، کارایی مواد منفجره مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۲- چیدمان متالورژی پودر انفجاری مستقیم زیر آب [۱۴].

۲-۱- تعیین پارامترهای حالت یک ماده تحت موج شوک

معادله حالت هر ماده مکان هندسی نقاطی است که ماده در بارگذاری های انفجاری و دینامیکی می تواند تحت شرایط آن نقاط قرار گیرد. برای توصیف حالت موج، از پنج متغیر فشار، حجم مخصوص، سرعت ذره ای، سرعت موج شوک و انرژی داخلی مخصوص استفاده می شود و برای ایجاد رابطه بین هر دو متغیر، باید از سه معادله ی بقای جرم، بقای اندازه حرکت، بقای انرژی که به معادلات رنکین-هاگونیوت معروف اند و یک معادله تجربی استفاده کرد. این معادلات به ترتیب بدین شکل نشان داده می شوند [۲۵].

$$\rho_0 U_S = \rho_1 (U_S - U_P) \quad (1)$$

$$P_1 - P_0 = \rho_0 U_S U_P \quad (2)$$

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2} (P_1 + P_0) (V_0 - V_1) \quad (3)$$

$$U_S = C_0 + S U_P \quad (4)$$

یکی از روابط مهم بین متغیرها، رابطه فشار و حجم مخصوص (معادله ۵) است که نمودار آن در شکل (۳) رسم شده است. در نمودار $P-V$ ، خطی که حالت اولیه و نهایی ماده را به هم وصل می کند، خط رایلی نامیده می شود. شیب این خط برابر سرعت موج شوک است. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می شود، با افزایش فشار، شیب منحنی افزایش می یابد به این معنی که با افزایش فشار، موج شوک دارای سرعت بیش تری است. بار برداری از روی ماده از طریق یک موج رهایش آیزنتروپ^۱ صورت می گیرد که می تواند توسط یک منحنی هاگونیوت به خوبی تقریب زده شود. ناحیه بین خط رایلی و هاگونیوت بیان گر میزان انرژی باقی مانده در قطعه پس از عبور موج شوک است. این افزایش انرژی داخلی به صورت افزایش دمای قطعه خود را نشان می دهد [۹ و ۲۵].

$$P = \frac{C_0^2 (V_0 - V)}{[V_0 - S(V_0 - V)]^2} \quad (5)$$

معادله هاگونیوت مواد منفجره به صورت معادله شماره (۶) است [۲۶].

$$P_E = 2.412P_{CJ} - \left(\frac{1.7315P_{CJ}}{(U_P)_{CJ}} \right) U_P + \left(\frac{0.3195P_{CJ}}{(U_P)_{CJ}^2} \right) U_P^2 \quad (۶)$$

با جایگذاری مقادیر P_{CJ} و $(U_P)_{CJ}$ از جدول (۱) در معادله (۶)، معادله هاگونیوت ماده منفجره C4 به دست می آید.

$$P_E = 6.754 \times 10^{10} - 22.71 \times 10^6 U_P + 19626 U_P^2 \quad (۷)$$

همچنین معادله هاگونیوت برای آب به صورت معادله شماره (۸) است [۲۶].

$$P_W = \rho_W C_{0W} U_P + \rho_W S_W U_P^2 \quad (۸)$$

با جایگذاری مشخصات آب از جدول (۲) در معادله (۸)، معادله هاگونیوت آب به دست می آید.

$$P_W = 1.644 \times 10^6 U_P + 1.917 \times 10^3 U_P^2 \quad (۹)$$

بنا بر اصل گفته شده باید مقادیر فشار و سرعت در فصل مشترک ماده منفجره و آب برابر باشند، بنابراین فشار و سرعت ذره‌ای در فصل مشترک آب و ماده منفجره به صورت زیر حاصل می شود:

$$U_P = 2788 \left(\frac{m}{s} \right) \text{ و } P_W = 19.5 \text{ (GPa)}$$

موج شوک ایجاد شده در انتهای ستون آب به فصل مشترک آب و سنبه آلومینیومی می رسد و باعث ایجاد موج شوک در سنبه آلومینیومی می گردد. معادله هاگونیوت آب در فصل مشترک آن با سنبه به صورت معادله شماره (۱۰) است. مقدار سرعت ذره‌ای و فشار در سنبه آلومینیومی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_W = \rho_W C_{0W} (2U_{P0W} - U_P) + \rho_W S_W (2U_{P0W} - U_P)^2 \quad (۱۰)$$

با جایگذاری $U_{P0W} = 2788$ در معادله (۱۰)، خواهیم داشت:

$$P_W = 6.877 \times 10^{10} - 2.302 \times 10^7 U_P + 1917.158 U_P^2 \quad (۱۱)$$

همچنین معادله هاگونیوت در سنبه آلومینیومی به صورت معادله شماره (۱۲) خواهد بود:

$$P_{Al} = \rho_{Al} C_{0Al} U_P + \rho_{Al} S_{Al} U_P^2 = 1.458 \times 10^7 U_P + 3813.44 U_P^2 \quad (۱۲)$$

$$P_W = P_{Al} \rightarrow U_P = 1686 \left(\frac{m}{s} \right) \text{ و } P_{Al} = 35.4 \text{ (GPa)}$$

و در نهایت مقدار سرعت ذره‌ای و فشار در فصل مشترک سنبه آلومینیومی و پودر TiB_2 ، محاسبه می شود.

$$P_{Al} = \rho_{Al} C_{0Al} (2U_{P0Al} - U_P) + \rho_{Al} S_{Al} (2U_{P0Al} - U_P)^2 \quad (۱۳)$$

با جایگذاری $U_{P0Al} = 1686$ در معادله (۱۳)، معادله هاگونیوت آلومینیوم 7075 در فصل مشترک با پودر حاصل می شود:

$$P_{Al} = 9.253 \times 10^{10} - 4.03 \times 10^7 U_P + 3813.44 U_P^2 \quad (۱۴)$$

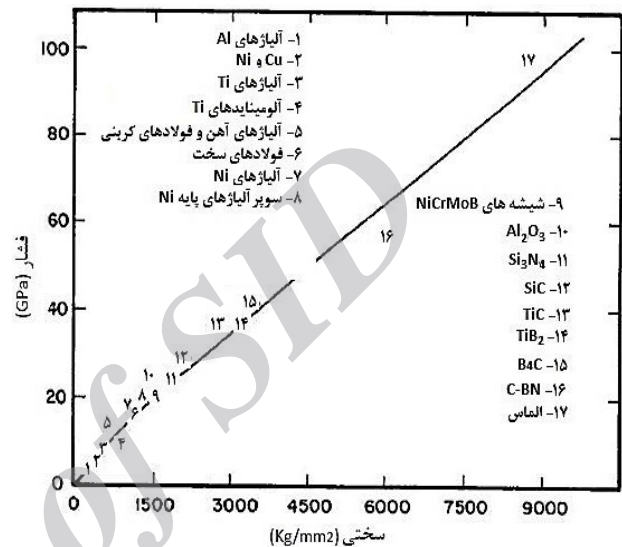
معادله هاگونیوت پودر نیز به صورت معادله شماره (۱۵) است:

$$P_p = \rho_p C_{0p} U_P + \rho_p S_p U_P^2 = 1.369 \times 10^7 U_P + 1355.76 U_P^2 \quad (۱۵)$$

$$P_{Al} = P_p \rightarrow U_P = 1874 \left(\frac{m}{s} \right) \text{ و } P_p = 30 \text{ (GPa)}$$

بنابراین فشار ایجاد شده در پودر طبق محاسبات فوق، 30 GPa است که از حداقل فشار مورد نیاز برای شکل دهی پودر دی بوراید تیتانیوم کم تر است. حل تحلیلی فرآیند متالورژی پودر انفجاری با ماده منفجره HMX نیز مشابه روند طی شده در بالا انجام گرفت که

در این تحقیق از مواد منفجره C4 و HMX برای شکل دهی پودر استفاده شده است. جنس سنبه، آلومینیوم 7075 است. نحوه انتخاب جنس سنبه به گونه ای بوده که بتواند بیشترین فشار ناشی از انفجار ماده منفجره را به محیط پودر انتقال دهد. بدین منظور با انجام محاسبات برای سنبه با جنس های مسی، آلومینیومی و فولادی، سنبه آلومینیومی بیشترین فشار را به محیط پودر انتقال داد. مشخصات مواد منفجره در جدول (۱) و ضرایب ثابت معادله حالت و چگالی سایر اجزای چیدمان در جدول (۲) آورده شده است.



شکل ۴- رابطه بین سختی مواد و فشار مورد نیاز برای شکل دهی پودر آن‌ها [۲۶].

جدول ۱- مشخصات ماده منفجره C4 و HMX [۲۷].

ماده منفجره	ρ_0 (Kg/m ³)	D (m/s)	P_{CJ} (GPa)	U_{CJ} (m/s)
C4	۱۶۰۱	۸۱۹۳	۲۸	۲۱۳۵
HMX	۱۸۹۱	۹۱۱۰	۴۲	۲۴۳۸

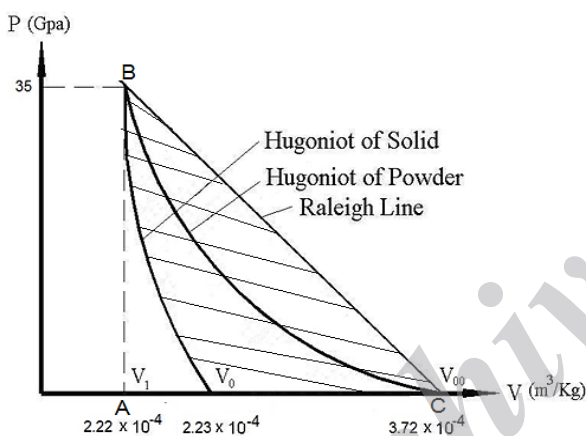
جدول ۲- مشخصات آب، آلومینیوم 7075 و پودر TiB_2 [۲۸].

ماده	ρ_0 (Kg/m ³)	C_0 (m/s)	S
آب	۹۹۸	۱۶۴۷	۱/۹۲۱
آلومینیوم 7075	۲۸۰۴	۵۲۰۰	۱/۳۶
پودر TiB_2	۲۶۹۰	۵۰۹۱	۰/۵۰۴

بنا بر اصل پایستگی، باید مقادیر فشار و سرعت در فصل مشترک دو ماده برابر باشند. پس با مساوی قرار دادن مقادیر فشار حاصل از معادلات هاگونیوت در دو ماده، مقادیر سرعت ذره‌ای و متعاقب آن فشار نهایی را می توان در فصل مشترکها به دست آورد [۲۵]. در این قسمت ابتدا فشار ایجاد شده در محیط پودر در صورت استفاده از ماده منفجره C4 محاسبه می گردد.

۲-۳- نحوه آماده‌سازی نمونه

در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان قبلی [۱۲ و ۱۴] در خصوص شکل‌دهی انفجاری پودر مواد مختلف و علی‌الخصوص پودر مواد سخت، چیدمان مناسبی برای تولید قطعه از پودر دی‌بوراید تیتانیوم در نظر گرفته شده و نمونه‌هایی از پودر مذکور به شکل دیسک تولید شود که بدین منظور برای انجام آزمایش‌های تجربی از چیدمان‌های نشان داده شده در شکل‌های (۹ و ۱۰) استفاده شد. این چیدمان‌ها شامل آغازگر^۱ و نگه‌دارنده آن، پوسته ماده منفجره، ماده منفجره، سنبه، محفظه آب، پودر، ماتریس و تله اندازه حرکت^۲ است. برای آغازگری سیستم انفجاری مورد نظر از یک آغازگر الکتریکی استفاده شد. همچنین جنس قالب و تله اندازه حرکت به دلیل یکبارمصرف بودن آن‌ها و برای کاهش هزینه‌ها، St₃₇ انتخاب شده است. در این پژوهش از پودر TiB₂ با متوسط اندازه ذرات ۵ μm استفاده شد که مورفولوژی ذرات آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۵- تعیین انرژی مخصوص لازم جهت شکل‌دهی انفجاری پودر دی‌بوراید تیتانیوم.

یکی از مشکلات اصلی در روش متالورژی پودر انفجاری مستقیم، موج شوک کششی برگشتی از انتهای ماتریس است که سبب از بین رفتن نمونه تولید شده می‌شود. برای حل این مشکل با استفاده از تکنیک-های علم مکانیک ضربه از تله اندازه حرکت استفاده گردید. این قطعه توسط یک اتصال ضعیف مثل چسب مونتاژ می‌شود و عملکرد آن بدین صورت است که پس از ورود موج فشاری به داخل آن، اتصال چسبی بین آن و ماتریس از بین رفته و پس از یک رفت و برگشت موج شوک در داخل آن، به حرکت درآمده و از قالب جدا می‌شود و همین امر باعث جلوگیری از ورود موج برگشتی به داخل قالب می‌شود. این قطعه با توجه به سرعت و طول موج طراحی شده و به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که پس از ورود کامل موج از ماتریس جدا شود [۲۹].

در نهایت فشار ایجاد شده در محیط پودر دی‌بوراید تیتانیوم، ۳۹ GPa محاسبه گردید.

۲-۲- تعیین نسبت جرم ماده منفجره به جرم پودر

برای تعیین میزان ماده منفجره لازم جهت استفاده در فرآیند تراکم انفجاری پودر دی‌بوراید تیتانیوم با محیط واسط آب، ابتدا انرژی لازم برای شکل‌دهی پودر، با استفاده از منحنی هاگونیوت دی‌بوراید تیتانیوم به دست آورده و سپس انرژی تولید شده از انفجار ماده منفجره نیز با استفاده از مراجع محاسبه گردید. با مساوی قرار دادن انرژی ورودی به سیستم و انرژی مصرفی، نسبت جرم ماده منفجره به جرم پودر مورد نظر تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که همواره بخشی از انرژی ایجاد شده توسط انفجار صرف افزایش دمای محیط و تغییر شکل‌های ناخواسته در حین فرآیند می‌گردد، بنابراین باید یک بازده برای انجام فرآیند در نظر گرفته شود که بسته به چیدمان آزمایش می‌بایست از ۰/۲ تا ۰/۵ در نظر گرفته شود [۲۵].

برای تعیین نسبت جرم ماده منفجره به جرم پودر، ابتدا انرژی مخصوص لازم جهت شکل‌دهی انفجاری پودر دی‌بوراید تیتانیوم با تعیین سطح محصور بین خط رایلی، محور حجم مخصوص و منحنی هاگونیوت دی‌بوراید تیتانیوم، به دست می‌آید. این ناحیه در شکل (۵) با هاشور مشخص شده است.

$$A = 35 \times 10^9 \left(\frac{3.72 \times 10^{-4} - 2.22 \times 10^{-4}}{2} \right) - A_{EOS} \quad (16)$$

سطح زیر منحنی هاگونیوت دی‌بوراید تیتانیوم نیز با انتگرال‌گیری از معادله هاگونیوت دی‌بوراید تیتانیوم در صفحه فشار-حجم مخصوص (معادله ۵) به دست آمده و برابر است با:

$$A_{EOS} = \int_a^b \frac{C_0^2 (V_0 - V)}{[V_0 - S(V_0 - V)]^2} dV = \int_{2.22 \times 10^{-4}}^{2.23 \times 10^{-4}} \frac{72.01 \times 10^6 (2.23 \times 10^{-4} - V)}{[2.23 \times 10^{-4} - 0.84(2.23 \times 10^{-4} - V)]^2} dV = 728 \left(\frac{j}{kg} \right) \rightarrow A = 2.62 \times 10^6 - 728 = 2.62 \times 10^6 \left(\frac{j}{kg} \right)$$

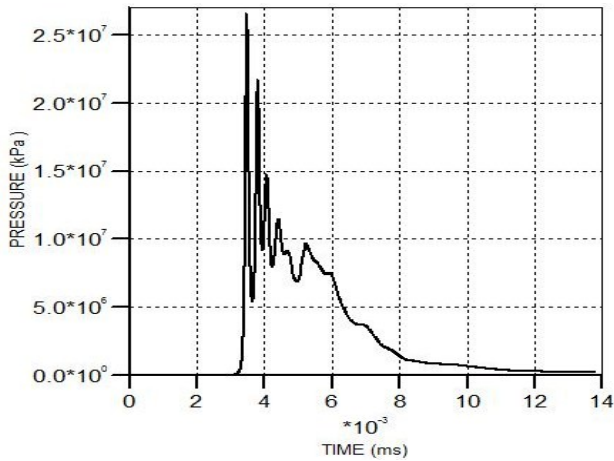
بنابراین برای شکل‌دهی هر کیلوگرم پودر دی‌بوراید تیتانیوم با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ به 2.62×10^6 ژول انرژی نیاز است. انرژی آزاد شده از انفجار هر کیلوگرم ماده منفجره HMX و C4 به ترتیب برابر 5.55×10^6 و 5.62×10^6 ژول است [۲۵]. بدین ترتیب با در نظر گرفتن حداقل راندمان جذب انرژی توسط پودر دی‌بوراید تیتانیوم، مقادیر نسبت جرمی برای استفاده از دو ماده منفجره ذکر شده بر اساس روابط ۱۷ و ۱۸ به دست می‌آیند.

$$\frac{M_e}{M_p} = \frac{A}{\eta e_{C4}} = \frac{2.62 \times 10^6}{0.2 \times 5.62 \times 10^6} = 2.33 \quad (17)$$

$$\frac{M_e}{M_p} = \frac{A}{\eta e_{HMX}} = \frac{2.62 \times 10^6}{0.2 \times 5.55 \times 10^6} = 2.36 \quad (18)$$

1- Detonator

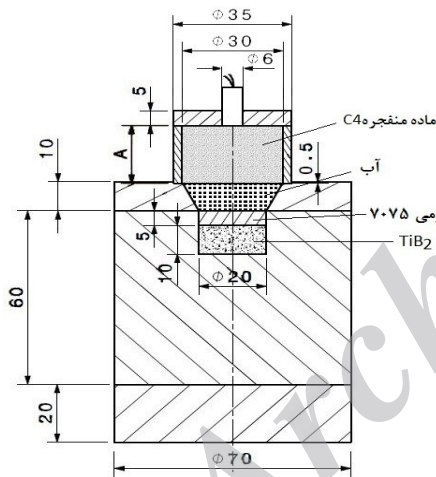
2- Momentum Trap



شکل ۸- پهنای موج شوک عبوری از تله اندازه حرکت در اثر انفجار ماده منفجره HMX.

۲-۳-۱- آماده سازی نمونه ها با ماده منفجره C4

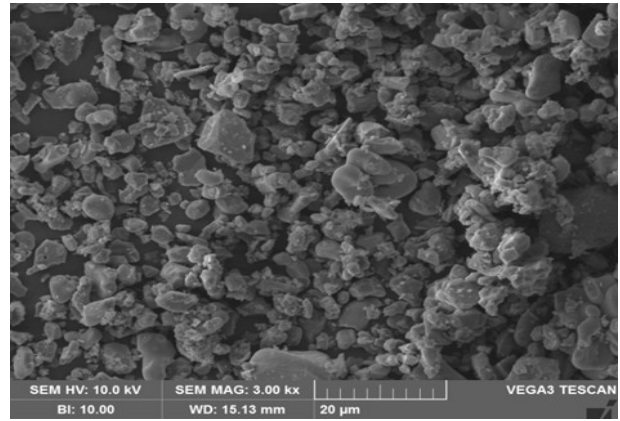
فضای ماتریس با پودر TiB_2 با چگالی نسبی 0.60 پر شد و سنبه داخل ماتریس قرار گرفت. سپس سایر اجزای چیدمان توسط چسب بر روی قالب و در محل مناسب مونتاژ شده و عملیات شکل دهی با نسبت های جرمی ماده منفجره به پودر $1/5$ ، $2/5$ و 3 انجام گرفت.



شکل ۹- ابعاد چیدمان متالورژی پودر انفجاری با ماده منفجره C4.

۲-۳-۲- آماده سازی نمونه ها با ماده منفجره HMX

برای آماده سازی نمونه ها از چیدمان نشان داده شده در شکل (۱۰) استفاده شد و عملیات شکل دهی با نسبت جرمی ماده منفجره به پودر 3 انجام گرفت. در این بخش چهار نمونه تهیه شد که در نمونه های اول و دوم فضای ماتریس با پودر TiB_2 با چگالی نسبی 0.60 پر شد و روی پودر به ترتیب سنبه های آلومینیومی با ضخامت های 5 و 8 میلی متر قرار گرفت. در نمونه های سوم و چهارم به منظور کاهش موج شوک برگشتی، ابتدا در فضای ماتریس پودر تیتانیوم ریخته و تا چگالی نسبی 0.65 فشرده شد. سپس فضای ماتریس با پودر TiB_2 با



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی ذرات پودر TiB_2 .

برای تعیین ضخامت تله اندازه حرکت، ابتدا پهنای موج شوک وارد شده به آن با استفاده از نرم افزار هایدروکد AUTODYN تعیین گردید و سپس ضخامت تله اندازه حرکت بر اساس معادله (۱۹) محاسبه شد.

$$T = C \times t \quad (19)$$

در معادله (۱۹)، T ضخامت تله اندازه حرکت، C سرعت صوت و t پهنای موج است. همان طور که در شکل های (۷ و ۸) نشان داده شده است، پهنای موج عبوری از تله اندازه حرکت برای مواد منفجره C4 و HMX به ترتیب تقریباً 4 و 11 میکرو ثانیه است؛ بنابراین ضخامت تله اندازه حرکت برای مواد منفجره ذکر شده برابر است با:

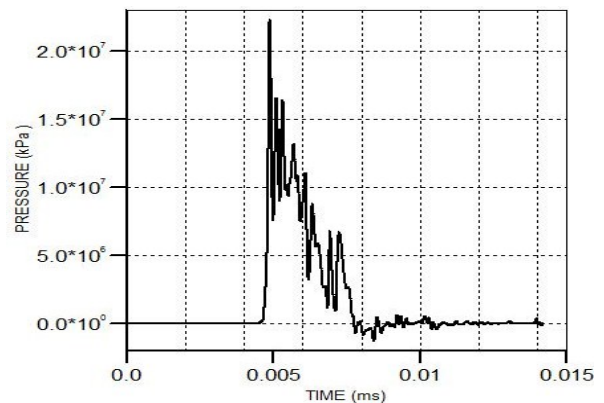
ضخامت تله اندازه حرکت برای ماده منفجره C4:

$$T = C_{S17} \times t = 4610 \times 4 \times 10^{-6} = 0.0184(m) = 18.4(mm)$$

ضخامت تله اندازه حرکت برای ماده منفجره HMX:

$$T = C_{S17} \times t = 4610 \times 11 \times 10^{-6} = 0.050(m) = 50(mm)$$

با توجه به محاسبات انجام شده، برای انجام آزمایش های تجربی از تله های اندازه حرکت با ضخامت های 20 و 50 میلی متر استفاده گردید.



شکل ۷- پهنای موج شوک عبوری از تله اندازه حرکت در اثر انفجار ماده منفجره C4.

جدول ۳- خواص به دست آمده از دیسک‌های تولید شده به روش

متالورژی پودر انفجاری با ماده منفجره HMX.

شماره نمونه	چگالی (Kg/m ³)	چگالی نسبی (%)	میکروسختی (ویکرز)
۱	۴۱۷۰	۹۵	۲۰۰۰-۲۴۰۰
۲	۴۲۰۵	۹۳/۸	۲۰۰۰-۲۴۰۰
۳	۴۲۶۰	۹۸	۲۵۰۰-۲۶۰۰
۴	۴۳۵۸	۹۷/۲	۲۴۵۰-۲۶۰۰

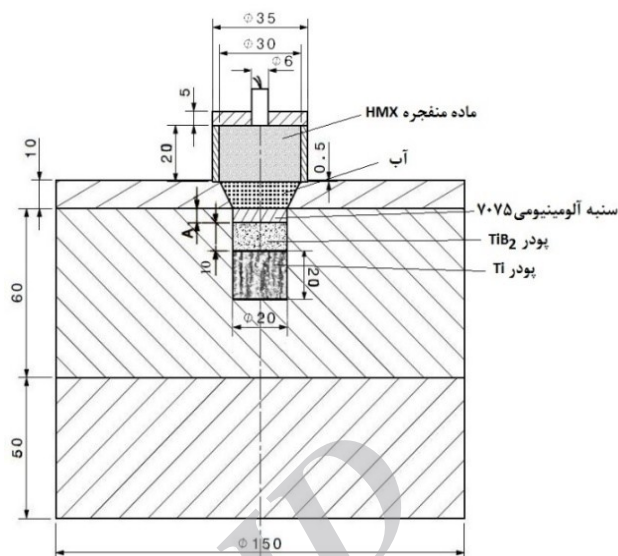
بررسی چگالی و سختی نمونه‌ها نشان داد هر چه ضخامت سنبه افزایش یابد چگالی و سختی قطعه‌های نهایی کاهش خواهد یافت. این پدیده به دلیل ضعیف شدن موج شوک در اثر عبور آن از سنبه اتفاق می‌افتد؛ بنابراین هر چه ضخامت سنبه بیش تر باشد موج شوک ضعیف‌تر شده و قدرت شکل‌دهی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج گزارش شده در جدول (۳) مشاهده می‌شود که نمونه‌های ۳ و ۴ دارای بیشترین سختی و چگالی هستند. لازم به ذکر است که بیشینه میکرو سختی به دست آمده برای TiB₂ در تحقیقات قبلی (۲۵۰۰ ویکرز)، کم‌تر از بیشینه میکرو سختی به دست آمده در این تحقیق است [۳۰].

همچنین بیشینه چگالی نسبی به دست آمده در این تحقیق (۹۸٪)، بیش‌تر از بیشینه چگالی نسبی گزارش شده برای TiB₂ در مطالعات قبلی (۹۷/۵۶٪) است [۴]. برای شکل‌دهی این نمونه‌ها از چیدمان نشان داده شده در شکل (۱۰) استفاده شد. در این چیدمان به دلیل استفاده از پودر تیتانیوم، موج شوک کششی برگشتی به داخل قالب به حداقل رسیده و همین امر سبب افزایش چگالی و سختی نمونه‌ها شده است. وجود موج شوک کششی برگشتی باعث تخریب برخی پیوندهای به وجود آمده و ایجاد حفره‌هایی در دیسک‌های تولیدی می‌شود که این امر مانع از دستیابی به چگالی و سختی بیش‌تر می‌گردد [۱۲].

استفاده از ماده منفجره قوی‌تر علی‌رغم قوی‌تر شدن موج شوک که یک نکته مثبت است، قدرت موج شوک کششی برگشتی از انتها و کناره‌های ماتریس را نیز افزایش می‌دهد، بنابراین در صورت استفاده از ماده منفجره قوی‌تر باید تله اندازه حرکت و ماتریس با ضخامت قطر بیش‌تری به کار برده شود.

تصاویر SEM سطح مقطع نمونه شماره ۴ در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این تصاویر نشان می‌دهند که ذرات پودر به خوبی جوش خورده‌اند. به دلیل وجود آب در چیدمان‌های استفاده شده، زمان ماندگاری موج شوک در محیط پودر افزایش یافته و همین امر سبب افزایش لایه ذوب شده سطحی پودر و کیفیت جوش خوردن ذرات آن شده است.

چگالی نسبی ۶۰٪ پر شده و از سنبه‌های آلومینیومی با ضخامت ۵ و ۸ میلی‌متر استفاده گردید.



شکل ۱۰- ابعاد چیدمان متالورژی پودر انفجاری با ماده منفجره HMX.

۳- نتایج و بحث

انجام فرآیند متالورژی پودر انفجاری با محیط واسط آب با استفاده از ماده منفجره C4 برای هیچ یک از چیدمان‌های آماده شده، به تشکیل قطعه منجر نشد. در این فرآیند پودر TiB₂ که به وسیله پرس سرد به چگالی نسبی ۶۰٪ رسیده بود، پس از انفجار مجدداً به شکل پودر درآمد و از قالب خارج گردید. علت اصلی این پدیده، ضعیف بودن ماده منفجره C4 و عدم توانایی آن در شکل‌دهی پودر TiB₂ است که در بخش حل تحلیلی نیز به آن اشاره شد.

شکل (۱۱) نمونه‌ای از قطعه‌ی شکل‌دهی شده به وسیله ماده منفجره HMX را نشان می‌دهد. پس از انجام فرآیند متالورژی پودر انفجاری به وسیله ماده منفجره HMX دیسک‌هایی با قطر ۲۰ mm و ضخامت تقریبی ۶ mm حاصل شد که خواص به دست آمده از آن‌ها در جدول (۳) آمده است.



شکل ۱۱- دیسک تولید شده به روش متالورژی پودر انفجاری با ماده

منفجره HMX.

نقش مهمی در محبوس کردن دیسک در درون ماتریس و عدم پرتاب آن به بیرون دارد. بررسی ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که ذرات پودر به خوبی به هم جوش خورده‌اند و هیچ گونه ترک و عیبی در آن‌ها وجود ندارد که این امر برتری روش متالورژی پودر انفجاری با محیط واسط آب را بر سایر روش‌های شکل‌دهی پودر نشان می‌دهد.

فهرست علائم

C_0	سرعت صوت (ms^{-1})
E	انرژی داخلی مخصوص (kg^{-1})
D	سرعت ماده منفجره (ms^{-1})
P	فشار (Pa)
S	ضریب ثابت
U	سرعت (ms^{-1})

علائم یونانی

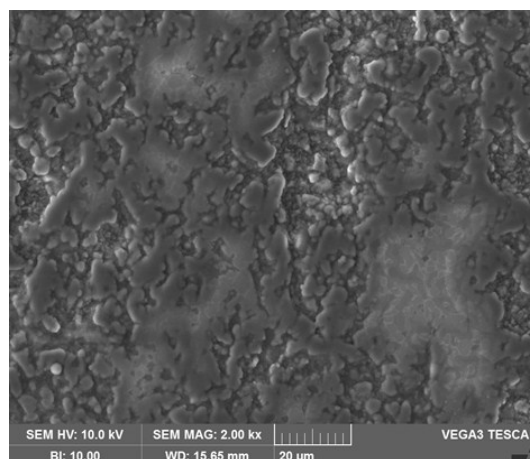
ρ	چگالی (kgm^{-3})
--------	----------------------

زیرنویس‌ها

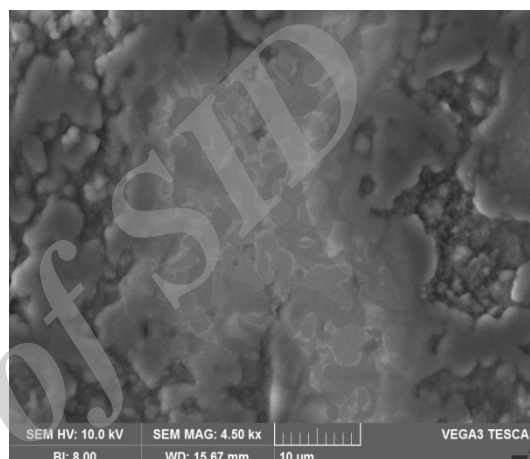
0	قبل از عبور موج شوک
1	تحت موج شوک
CJ	چاپمن-جاکوت
E	ماده منفجره
P	ذره
p	پودر
S	موج شوک
St	فولاد
W	آب

مراجع

- [1] Gonzalez, R.; Barandika, M.; Ona, D.; Sánchez, J.; Villellas, A.; Valea, A.; Castro, F. "New Binder Phases for the Consolidation of TiB_2 Hardmetals"; Mater. Sci. Eng. A. 1996, 216, 185-192.
- [2] Kim, J.-S.; Kwon, Y.-S.; Dudina, D.; Lomovsky, O.; Korchagin, M.; Mali, V. "Nanocomposites TiB_2 -Cu: Consolidation and Erosion Behavior"; J. Mater. Sci. 2005, 40, 3491-3495.
- [3] Demirskyi, D.; Cheng, J.; Agawal, D.; Ragulya, A. "Densification and Grain Growth During Microwave Sintering of Titanium Diboride"; Scripta Mater. 2013, 69, 610-613.
- [4] Subramanian, C.; Murthy, T. C.; Suri, A. "Synthesis and Consolidation of Titanium Diboride"; Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2007, 25, 345-350.
- [5] Chlup, Z.; Bača, L.; Halasová, M.; Neubauer, E.; Hadraba, H.; Stelzer, N.; Roupčová, P. "Effect of Metallic Dopants on the Microstructure and Mechanical Properties of TiB_2 "; J. Eur. Ceram. Soc. 2015, 35, 2745-2754.
- [6] Peters, J.; Cook, B.; Harringa, J.; Russell, A. "Microstructure and Wear Resistance of Low Temperature Hot Pressed TiB_2 "; Wear. 2009, 266, 1171-1177.
- [7] Lennon, C. R. A. "An Investigation of the Mechanism and Controlling Parameters in Direct Explosive Compaction of Powder Metals"; PhD. Thesis, Queen's University, Chicago, 1979.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع دیسک تولید شده به روش متالورژی پودر انفجاری: (الف) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر و (ب) بزرگنمایی ۴۵۰۰ برابر.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق شکل‌دهی پودر سرامیکی دی‌بوراید تیتانیوم به روش متالورژی پودر انفجاری با موفقیت انجام گرفت. در این فرآیند خواص ماده منفجره و نسبت جرمی ماده منفجره به پودر، نقش‌های بسیار مؤثری در تولید قطعه با کیفیت مطلوب دارند و می‌بایست با توجه به نوع پودر مصرفی، محاسبات تحلیلی انجام شده و ماده منفجره و نسبت جرمی ماده منفجره به پودر مناسب تعیین گردند. نتایج حل تحلیلی نشان داد که ماده منفجره HMX با چگالی $1891 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ و سرعت انفجار 9110 (m/s) و نسبت جرمی ماده منفجره به پودر بیش‌تر از $2/36$ برای شکل‌دهی پودر TiB_2 مناسب است و صحت آن با انجام آزمون‌های تجربی به اثبات رسید. بررسی چگالی و سختی نمونه‌ها نشان داد که استفاده از پودر تیتانیوم با چگالی نسبی 65% در چیدمان نشان داده شده در شکل ۱۰، سبب افزایش چگالی و سختی نمونه‌ها می‌شود و با استفاده از این چیدمان می‌توان قطعاتی از جنس پودر دی‌بوراید تیتانیوم با چگالی نسبی 98% و سختی 2600 ویکرز تولید نمود. همچنین افزایش ضخامت سنبه هرچند سبب کاهش چگالی و سختی دیسک‌های تولید شده می‌شود اما

- [19] Chiba, A.; Hokamoto, K.; Sugimoto, S.; Kozuka, T.; Mori, A.; Kakimoto, E. "Explosive Consolidation of Sm-Fe-N and Sm-Fe-N/(Ni, Co) Magnetic Powders"; *J. Magn. Magn. Mater.* 2007, 310, e881-e883.
- [20] Kim, Y.; Ueda, T.; Hokamoto, K.; Itoh, S. "Electric and Microstructural Characteristics of Bulk ZnO Fabricated by Underwater Shock Compaction"; *Ceram. Int.* 2009, 35, 3247-3252.
- [21] Kim, Y.; Mitsugi, F.; Tomoaki, I.; Hokamoto, K.; Itoh, S. "Shock-Consolidated TiO₂ Bulk with Pure Anatase Phases Fabricated by Explosive Compaction Using Underwater Shockwave"; *J. Eur. Ceram. Soc.* 2011, 31, 1033-1039.
- [22] Eskandari, H.; Hokamoto, K. "Underwater Explosive Consolidation of Mechanically Milled Al/TiB₂ Composites"; In *Proc. of the Materials Science Forum*, 2011, 137-142.
- [23] Mashhadi, H. A.; Wada, N.; Tomoshige, R.; Manikandan, P.; Hokamoto, K. "Fabrication of Bulk AlN-TiN Nanocomposite by Reactive Ball Milling and Underwater Shock Consolidation Technique"; *Ceram. Int.* 2011, 37, 1747-1754.
- [24] Zhou, Q.; Chen, P. W.; Ma, D. Z. "Tungsten-Copper Composite Fabricated by Hot-Shock Consolidation"; In *Proc. of the Materials Science Forum* 2013, pp. 372-377.
- [25] Cooper, P. W. "Explosives Engineering"; VCH Pub, 1996.
- [26] Meyers, M. A. "Dynamic Behavior of Materials"; John Wiley & Sons, 1994.
- [27] Zukas, J. A.; Walters, W.; Walters, W. P. "Explosive Effects and Applications"; Springer Science & Business Media, 2002.
- [28] Marsh, S. P. "LASL Shock Hugoniot Data"; University of California Press, 1980.
- [29] Johnson, W. "Impact Strength of Materials"; Edward Arnold London, 1972.
- [30] Hokamoto, K.; Pruemmer, R.; Knitter, R.; Taira, K. "Hot Explosive Compaction of Diamond Powder Using Cylindrical Geometry"; *J. Mater. Sci.* 2008, 43, 684-688.
- [8] LaRocca, E. W.; Pearson, J. "Explosive Press for Use in Impulsive Loading Studies"; *Rev. Sci. Instrum.* 1958, 29, 848-851.
- [9] Pruemmer, R. "Explosive Compaction of Powders and Composites"; Science Pub Inc. 2006.
- [10] Blazynski, T. Z. "Explosive Welding, Forming, and Compaction"; Elsevier Applied Science. 1983.
- [11] Mamalis, A.; Gioftsidis, G. "A Consolidation Mechanism for the Compaction of Copper Powder at High Pressures"; *J. Mater. Process. Technol.* 1990, 23, 333-345.
- [12] Ando, S.; Mine, Y.; Takashima, K.; Itoh, S.; Tonda, H. "Explosive Compaction of Nd-Fe-B Powder"; *J. Mater. Process. Technol.* 1999, 85, 142-147.
- [13] Vogler, T.; Lee, M.; Gady, D. "Static and Dynamic Compaction of Ceramic Powders"; *Int. J. Solid. Struct.* 2007, 44, 636-658.
- [14] Zohoor, M.; Mehdipoor, A. "Explosive Compaction of Tungsten Powder Using a Converging Underwater Shock Wave"; *J. Mater. Process. Technol.* 2009, 209, 4201-4206.
- [15] Bukaemskii, A.; Fedorova, E. "Explosive Compaction and Low-Temperature Sintering of Alumina Nanopowders"; *Combust. Explos. Shock Waves.* 2008, 44, 717-728.
- [16] Hokamoto, K.; Tanaka, S.; Fujita, M.; Zhang, R.; Kodama, T.; Awano, T.; Ujjimoto, Y. "An Improved High-Temperature Shock Compression and Recovery System Using Underwater Shock Wave for Dynamic Compaction of Powders"; *J. Mater. Process. Technol.* 1999, 85, 153-157.
- [17] Chiba, A.; Tomoshige, R.; Nishida, M.; Imamura, K.; Fujita, M. "Explosive Powder Compaction with a Water Pressure Medium"; *Shock Waves* 1992, 463-468.
- [18] Chiba, A.; Nishida, M.; Tomoshige, R.; Imamura, K.; Moon, C. "Underwater-Shock Consolidation of TiAl Powder"; *Shock Waves* 1995, 279-284.