

## بررسی عددی و تجربی فرآیند تراکم انفجاری پودر Al-B<sub>4</sub>C برای تولید قطعه کامپوزیتی

معین گنجی<sup>۱</sup>، یونس کریمی کاکاوند<sup>۲</sup>، علی مهدی پور عمرانی<sup>۳\*</sup>، علی علیزاده<sup>۴</sup>

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

۳ و ۴- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

(تاریخ وصول: ۹۴/۳/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۲۲)

### چکیده

تراکم انفجاری پودر یکی از روش‌های توسعه یافته متالورژی پودر است که با توجه به محدودیت های روش متالورژی پودر سنتی جهت شکل‌دهی مواد، توسعه یافته است. در این فرآیند به منظور دست یابی به چگالی بالاتر به جای استفاده از نیروی پرس از انرژی آزاد شده انفجار یک ماده منفجره برای شکل دادن و تف جوشی همزمان پودر استفاده می‌شود. تراکم انفجاری پودر با دو روش اصلی مستقیم و غیرمستقیم قابل انجام است. در این مقاله ضمن معرفی روش های مختلف تراکم انفجاری پودر و پیشینه تحقیقات انجام شده در این زمینه، شبیه‌سازی آن به منظور شکل‌دهی پودر Al-B<sub>4</sub>C با استفاده از نرم‌افزار Autodyn انجام گرفته که در آن با توجه به متقارن بودن ماهیت آزمایش مدل سازی به صورت دو بعدی تقارن محوری صورت پذیرفت. از مدل ماده جانسون- کوک برای تعریف مواد استفاده شده و اثر نسبت جرمی ماده منفجره به پودر و ضخامت لایه آب بر فشارهای ایجاد شده در محیط پودر به صورت نمودارهای فشار - زمان بررسی شده است. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت  $M_E / M_P$  از ۱/۵ به ۲/۵، بیشینه فشار ایجاد شده در محیط پودر به میزان ۱۵٪ افزایش می‌یابد و با افزایش ضخامت لایه آب به مقدار ۱۰ میلی‌متر، بیشینه فشار ایجاد شده در محیط پودر به میزان ۳۱٪ کاهش می‌یابد، که هر دو اثر به خاطر وجود اتلاف انرژی توجیه شدند. در ادامه با استفاده از روش انفجاری دیسک‌هایی از پودر مذکور و با چگالی ۹۹٪ چگالی تئوری تولید شد.

واژه‌های کلیدی: تراکم انفجاری پودر، موج شوک، پودر Al-B<sub>4</sub>C

## Numerical and Experimental Investigation of Explosive Powder Compaction Process for the Production of Composite Parts Al-B<sub>4</sub>C

M. Ganji, Y. Karimi Kakavand, A. Mehdipoor Omrani\*, A. Alizade

Maleke Ashtar University of Technology, Tehran

(Received: 06/2/2015, Accepted: 10/14/2015)

### Abstract

Explosive powder compaction is one of the developed methods of powder metallurgy that has been investigated due to the limitations of the traditional powder metallurgy. In the process in order to achieve higher density, instead of pressing force, the energy released by the explosion of an explosive is used to compact and sinter the powder simultaneously. Explosive powder compaction can be done by the two main methods, direct and indirect. In this paper, within the introduction of different methods of explosive powder compaction and the history of conducted researches, AUTODYN software has been used to simulate the forming procedure of the Al-B<sub>4</sub>C powder in which due to the symmetrical nature of the experiment, the modeling was conducted as a two-dimensional axial symmetry. Johnson - Cook model was used to define the materials and the effects of the mass ratio of explosion to powder and water layer thickness on the created pressures in the powder ambient was presented in pressure-time diagrams. The results showed that increasing the ratio of  $M_E / M_P$  from 1.5 to 2.5, increased the created pressure in the powder as much as 15% and increasing the thickness of the water layer to 10mm reduced the created pressure in the powder as much as 31%, that both effects were justified due to the dissipation of energy. Then, some discs were made from the mentioned powder by the explosive method, and their density was 99% of theoretical density.

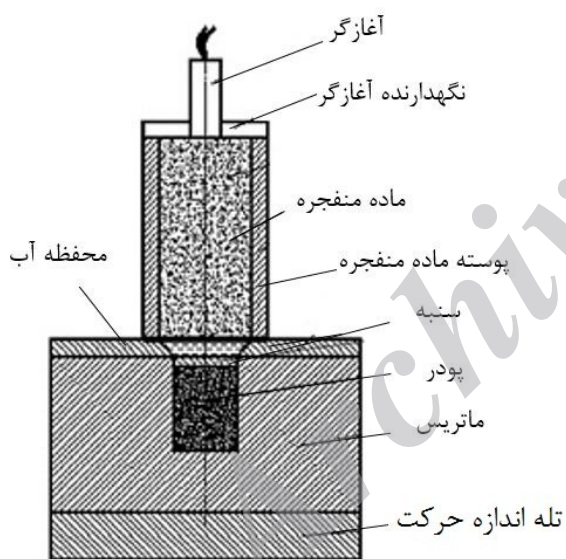
**Keyword:** Explosive Powder Compaction, Shock Wave, Al-B<sub>4</sub>C Powder.

۱- مقدمه

زمینه تحقیقاتی هم با شبیه‌سازی همراه بودند که هدف از انجام آن-ها درک بهتر ماهیت پدیده انفجاری و بهینه کردن شرایط آزمون‌های عملی بود [۱۸-۲۰].

**روش‌های تراکم انفجاری پودر:** هر یک از محققین روش خاصی را در عبور موج شوک از پودر برگزیده و تحقیقات خود را بر روی آن روش معطوف داشته‌اند اما به طور کلی تراکم انفجاری پودر به دو روش اصلی مستقیم و غیرمستقیم قابل انجام است.

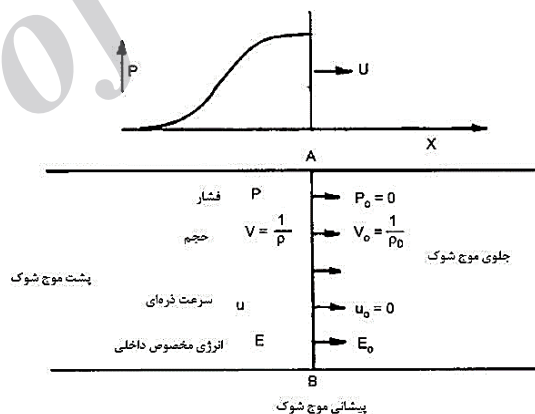
- روش مستقیم: یکی از روش‌های مورد استفاده توسط محققین، شکل-دهی مستقیم محوری پودر است که به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. در این روش پودر درون قالب فلزی قرار گرفته و موج حاصل از انفجار به صورت موج شوک با عبور از محیط‌های آب و سنبه وارد محیط پودر می‌شود. با عبور موج شوک از پودر فرایند شتاب گرفتن دانه پودر از یک سو و ایجاد لایه ذوب شده سطحی پودر تحت فرایند ایجاد حرارت موضعی، از سوی دیگر باعث برخورد دانه‌های پودر به یکدیگر و جوش خوردن آن‌ها تحت ساز و کاری شبیه به جوشکاری انفجاری می‌شود. این روش معمولاً برای قطعاتی که نسبت طول به قطر آن‌ها کم تر از یک است، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱].



شکل ۲- شکل دهی مستقیم محوری پودر به روش انفجاری [۲۲].

دومین روش در تراکم انفجاری پودر مستقیم، شکل دهی شعاعی پودر است که معمولاً برای قطعات استوانه‌ای با نسبت طول به قطر حدود ۱۰ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش که شماتیک آن در شکل (۳) نشان داده شده است، پودر ماده مورد نظر داخل لوله‌ای شکل پذیر مانند آلومینیوم یا فولاد قرار داشته و ماده منفجره نیز کل لوله را در برمی‌گیرد. با آغازگری ماده منفجره از رأس لوله و عبور موج انفجاری و ایجاد موج شوک در طول لوله، موج شوک به صورت شعاعی وارد پودر شده و باعث تراکم و شکل دهی آن می‌گردد [۲۳].

تراکم انفجاری پودر 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، مراحل فشردن و تف جوشی به‌طور همزمان انجام می‌شود. بسیاری از محدودیت‌های ایجاد شده در خواص مکانیکی و شیمیایی مواد، با استفاده از این روش برطرف شده است، زیرا زمان کافی برای توزیع نابجایی‌ها و حتی تشکیل فازهای متفاوت وجود ندارد [۱]. موج شوک یک جبهه مسطح است که با عبور آن از ماده مشخصات ماده مثل فشار، حجم مخصوص، سرعت ذره‌ای و انرژی داخلی به صورت ناگهانی تغییر کرده و پس از گذشت زمانی برابر با زمان عرض پالس<sup>۱</sup> موج شوک، به مقدار اولیه خود برمی‌گردند. در شکل (۱)، صفحه‌ی AB معرف جبهه‌ی شوک است که ناحیه تحت موج شوک را از قسمتی که هنوز تحت موج شوک قرار نگرفته است، جدا می‌سازد. وقتی که جبهه شوک به صفحه‌ای مثل AB می‌رسد باعث افزایش ناگهانی در فشار از  $P_0$  به  $P$  می‌شود. در نتیجه تغییر فشار چگالی از  $\rho_0$  به  $\rho$ ، حجم مخصوص از  $V_0$  به  $V$ ، سرعت ذره از  $u_0$  به  $u$  و انرژی داخلی مخصوص از  $E_0$  به  $E$  تغییر می‌کند [۲].

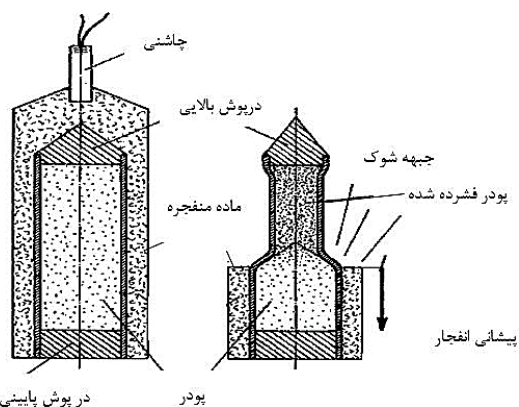


شکل ۱- وضعیت ماده در جلو و پشت پیشانی انفجار [۲].

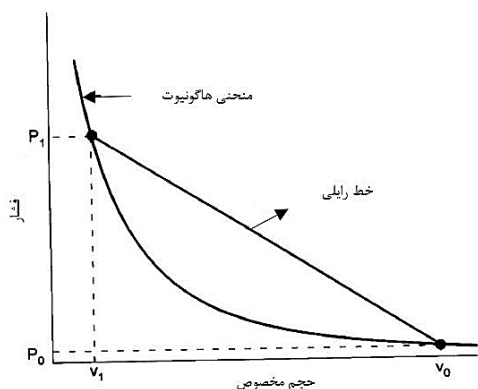
تراکم انفجاری پودر از نیمه دوم قرن بیستم مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفت و برای اولین بار نیز دو دانشمند به نام های لاروکا و پیرسون [۳]، اولین پرس انفجاری یک طرفه و دو طرفه را برای فشردن پودر مواد ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. از جمله تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، می‌توان به شکل دهی پودر مواد آهنربای دائمی از جنس Nd-Fe-B، شکل دهی صفحات مسی به شکل مربع، شکل دهی پودر کاربید تنگستن، شکل دهی پودرهای فولاد تندبر، تراکم نانو ذرات Y-TZP، شکل دهی پودر آلیاژی مس گرافیت، شکل دهی پودر سوپر هادی‌ها، شکل دهی پودر کامپوزیت آلومینیوم - سیلیسیوم، شکل دهی نانو پودر بیسموت تلورید، شکل دهی پودر Al-TiB<sub>2</sub> - ساخت ماده متخلخل یک‌جبهه و شکل دهی پودر مس-تنگستن، اشاره کرد [۱۷-۴]. علاوه بر انجام آزمون‌های عملی در این

$$U = C_0 + su \quad (۴)$$

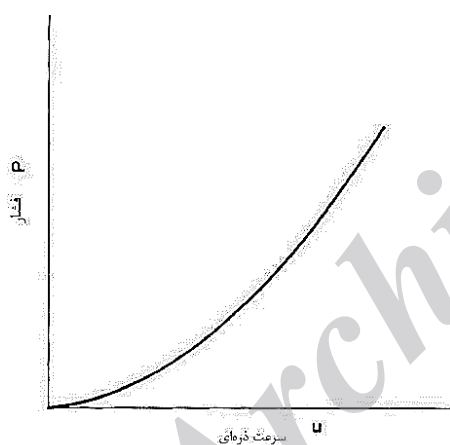
در این معادلات  $\rho$  چگالی،  $U_s$  سرعت موج شوک،  $u_p$  سرعت ذره‌ای،  $P$  فشار،  $E$  انرژی داخلی،  $V$  حجم مخصوص،  $C_0$  سرعت ذاتی توده ماده و  $s$  نشانگر یک ضریب ثابت است. همچنین اندیس صفر بیانگر حالت ماده قبل از عبور موج شوک و اندیس یک بیانگر حالت ماده پس از عبور موج شوک است. با استفاده از این معادلات می‌توان نمودارهای هاگونیوتی  $P - V$  و  $P - u$  که به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) آمده‌اند را رسم کرد [۲].



شکل ۳- شکل‌دهی مستقیم شعاعی پودر به روش انفجاری [۲۳].



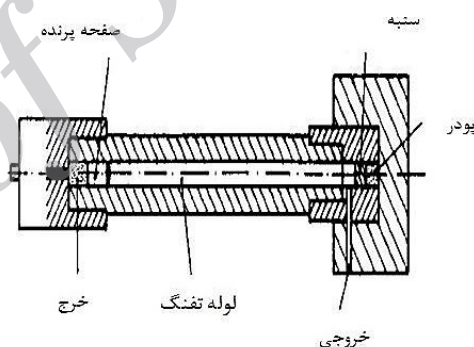
شکل ۵- منحنی هاگونیوت  $P - V$  [۲].



شکل ۶- منحنی هاگونیوت  $P - u$  در حالت  $u = 0$  [۲].

در نمودار  $P - V$ ، خطی که حالت اولیه و نهایی ماده را به هم وصل می‌کند، خط رایلی نامیده می‌شود. شیب این خط برابر سرعت موج شوک است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش فشار، شیب منحنی افزایش می‌یابد به این معنی که با افزایش فشار، موج شوک دارای سرعت بیش تری است. بار برداری از روی ماده از طریق یک موج رهایش<sup>۳</sup> آیزنترپ صورت می‌گیرد که می‌تواند توسط یک منحنی هاگونیوت به خوبی تقریب زده شود. ناحیه بین خط رایلی و هاگونیوت بیانگر میزان انرژی باقیمانده در قطعه پس از عبور

روش غیرمستقیم: در روش غیرمستقیم ماده منفجره در تماس مستقیم با پودر نبوده و با فاصله از آن قرار دارد. یکی از روش‌های غیرمستقیم استفاده از یک صفحه پرنده<sup>۱</sup> است. همان‌گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، رها شدن پرتابه درون لوله و برخورد آن با سنبه باعث انتقال انرژی و ایجاد موج شوک در سنبه و در نهایت فشرده شدن پودر می‌شود [۲۳].



شکل ۴- شکل‌دهی غیر مستقیم انفجاری به کمک تفنگ گازی [۲۳].

**تعیین پارامترهای حالت یک ماده تحت موج شوک:**  
معادله حالت هر ماده مکان هندسی نقاطی است که ماده در بارگذاری‌های انفجاری و دینامیکی می‌تواند تحت شرایط آن نقاط قرار گیرد. برای توصیف حالت موج شوک از پنج متغیر استفاده می‌شود و برای ایجاد رابطه بین هر دو متغیر، باید از سه معادله بقای جرم، بقای اندازه حرکت و بقای انرژی که به معادلات رنکین - هاگونیوت<sup>۲</sup> معروف‌اند و یک معادله تجربی استفاده کرد. این معادلات به ترتیب بدین شکل نشان داده می‌شوند.

$$\rho_0 U_s = \rho (U_s - u_p) \quad (۱)$$

$$P - P_0 = \rho_0 U_s u_p \quad (۲)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2} (P + P_0) (V_0 - V) \quad (۳)$$

تعیین ماده منفجره و نسبت جرمی مناسب و سپس انجام آزمون‌های عملی، برای اولین بار پودر کامپوزیتی  $Al-B_4C$  به روش انفجاری متراکم شد.

## ۲- روش تحقیق

پس از تعیین حداقل فشار مورد نیاز برای تراکم کامل پودر، شبیه‌سازی نرم‌افزاری به منظور تعیین ماده منفجره مناسب که قادر به ایجاد این حداقل فشار باشد، انجام گرفت. در ادامه پس از تولید پودر کامپوزیتی، طراحی و ساخت چیدمان مناسب برای انجام آزمون‌های عملی صورت پذیرفت.

### ۲-۱- شبیه‌سازی فرآیند تراکم انفجاری پودر

برای شبیه‌سازی فرآیند تراکم انفجاری پودر زیر آب از نرم‌افزار هیدرو کد Autodyn استفاده شده است. در این نرم‌افزار که برای شبیه‌سازی فرآیندهایی با تغییر شکل‌های شدید به خصوص فرآیندهای انفجاری طراحی شده، نوار ابزارهای لازم برای تعریف مسئله فراهم شده است. از دیگر ویژگی‌های خوب این نرم‌افزار می‌توان به بانک اطلاعاتی قوی آن که در بردارنده اطلاعات کاملی از مواد پرکاربرد صنعتی است، اشاره کرد. چیدمان مسئله همانند چیدمان استفاده شده توسط ظهور و مهدی‌پور [۲۲] است. با توجه به متقارن بودن مسئله، از حالت دوبعدی تقارن محوری<sup>۱</sup> استفاده شده است. معادله حالت ماده برای ماده منفجره  $C_4$  از نوع JWL<sup>۲</sup> و برای سایر اجزای چیدمان از نوع M-G<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده و از مدل ماده جانسون-کووک برای تعریف مواد استفاده شده است. بارگذاری از نوع فشار انتخاب شد، تعداد گام‌های زمانی برای حل مسئله ۲۵۰۰ عدد در نظر گرفته شد که فاصله هر یک برابر با ۴ نانو ثانیه بود. تنها شرایط مرزی تعریف‌شده برای حل مسئله، خروج جریان<sup>۴</sup> موج شوک حاصل از انفجار از انتهای میدان<sup>۵</sup> تعریف شده برای مدل‌سازی فرآیند است. ماده منفجره به صورت اولبری و سایر اجزای چیدمان به صورت اولبری-لاگرانژی تعریف شدند. زمان کل آنالیز برابر با ۱۰ میکرو ثانیه بود. نسبت جرمی ماده منفجره به پودر  $(M_E / M_P)$ ، برابر ۳/۵ و ارتفاع ستون آب mm ۱۰ است. در شکل (۸) نمای مش بندی شده فرآیند نشان داده شده است. به منظور تعیین فشارهای ایجاد شده در محیط پودر، سنجه‌هایی نرم‌افزاری در قسمت‌های مختلف آن از جمله در فصل مشترک سنبه - پودر قرار داده شده است.

### ۲-۲- روش تهیه دیسک کامپوزیتی $Al-B_4C$

برای تولید پودر کامپوزیتی  $Al-B_4C$  از روش آسیاب مکانیکی استفاده شد و بدین منظور از آسیاب سیاره‌ای استفاده شد. به منظور تهیه مخلوط همگن از مواد اولیه، پودرهای آلومینیوم و کاربید بور با

موج شوک است. این افزایش انرژی داخلی به صورت افزایش دمای قطعه خود را نشان می‌دهد [۱-۲].

در معادله (۲) با در نظر گرفتن  $P_0 = 0$ ، معادله‌ی  $P - u$  به صورت زیر نشان داده می‌شود.

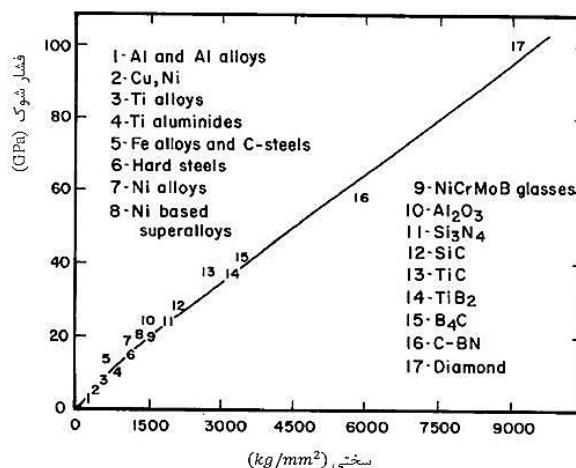
$$P = \rho_0 u U_s \quad (5)$$

معادله فوق پارامتر قابل توجهی را به صورت حاصل ضرب  $\rho_0 U_s$  در بردارد. این حاصل ضرب، امپدانس شوک نامیده می‌شود و با حرف بزرگ Z نمایش داده می‌شود. میزان فشار نهایی ایجاد شده در دو جسم، به نسبت امپدانس آن‌ها بستگی دارد [۲].

### تعیین فشار دینامیکی مورد نیاز جهت شکل دهی پودر:

میرز [۲۴] با ارائه نموداری در کتاب رفتار دینامیکی مواد، روشی را برای تعیین فشار مورد نیاز جهت شکل‌دهی پودر مواد مختلف ارائه کرد. در این نمودار که در شکل (۷) نشان داده شده است، حداقل فشار دینامیکی مورد نیاز جهت شکل‌دهی به سختی پودر نسبت داده شده است و با داشتن سختی پودر مورد نظر می‌توان فشار لازم جهت شکل‌دهی آن را به آسانی از روی نمودار تعیین نمود. ترکیب اولیه شامل مخلوط پودرهای Al و  $B_4C$  با درصد وزنی ۹۶٪ آلومینیوم و ۴٪ کاربید بور است که با توجه به نمودار و حداقل فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی آن حدود ۶ GPa است. پس ماده منفجره باید بتواند حداقل فشاری معادل ۶ GPa را در محیط پودر ایجاد کند.

$$0/04 \times 42 + 0/96 \times 4/5 = 6 \text{ G Pa}$$

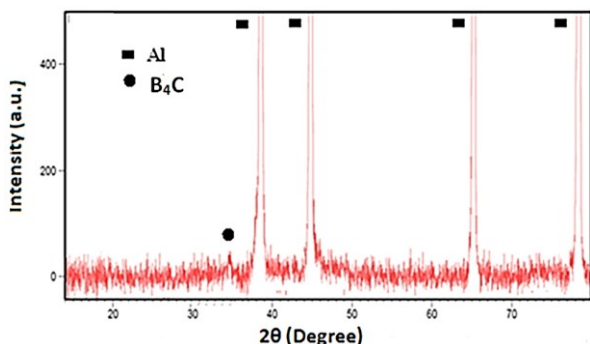


شکل ۷- تعیین فشار مورد نیاز جهت شکل‌دهی از روی سختی پودر [۲۴].

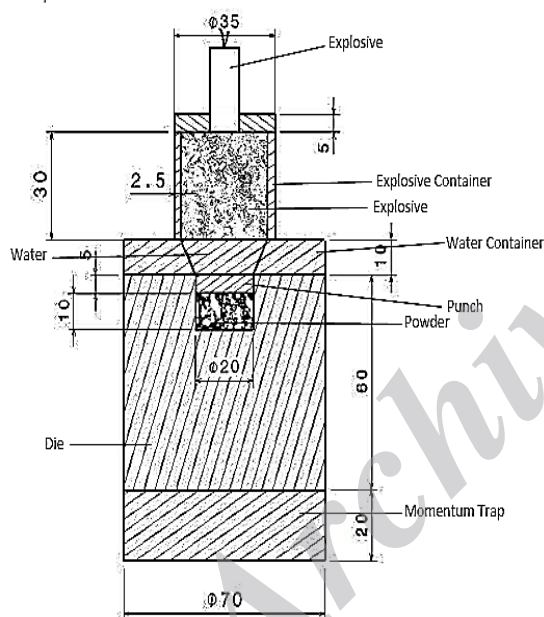
پودر کامپوزیتی  $Al-B_4C$  به وسیله روش‌های دیگر متراکم شده است که چگالی گزارش شده، حداکثر ۹۸ درصد چگالی تئوری بوده است [۲۵]. در این تحقیق پس از انجام شبیه‌سازی و

1- 2D Axial Symmetry  
2- Jones-Wilkins-Lee  
3- Mie-Grüneisen  
4- Flow out  
5- Domain

ظاهری ۷۰٪ و با نسبت درصد وزنی ۹۶٪ آلومینیوم و ۴٪ کاربید بور پر شد. ایجاد چگالی گفته شده به وسیله پرس هیدرولیکی صورت پذیرفت. ارتفاع ستون آب ۱۰ mm است و برای انجام آزمون‌های مورد نظر از ماده منفجره C4 استفاده شده است. مشخصات ماده منفجره و ضرایب ثابت معادله حالت و چگالی برای آب، فولاد St<sub>37</sub> و پودر Al-B<sub>4</sub>C، به ترتیب در جدول‌های (۲) و (۳) آورده شده است.



شکل ۹- الگوی پراش اشعه X پودر کامپوزیتی Al-B<sub>4</sub>C.



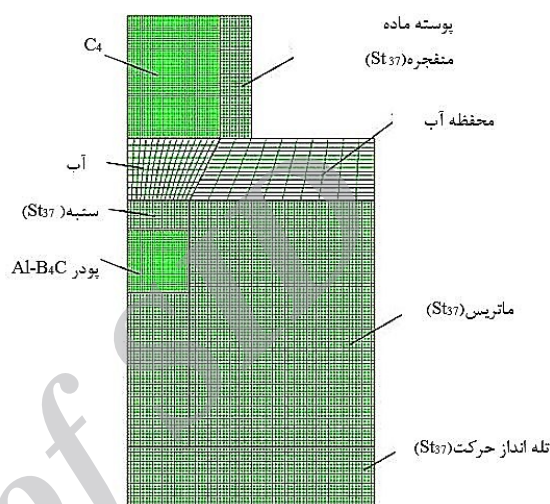
شکل ۱۰- ابعاد و مشخصات چیدمان استفاده شده در آزمایش‌های عملی.

با توجه به اینکه به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری میزان فشار ایجاد شده در محیط پودر توسط ماده منفجره C4 مشخص شد و این فشار از حداقل فشار مورد نیاز برای تراکم پودر که در مقدمه به آن اشاره شد بیش‌تر بود، لذا برای انجام آزمون‌های عملی از این ماده منفجره استفاده شد.

جدول ۲- مشخصات ماده منفجره C<sub>4</sub>[۲۶].

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	سرعت انفجار (m/s)	فشار چاپمن- جاگوت (GPa)	سرعت ذره‌ای چاپمن- جاگوت (m/s)
۱۶۰۱	۸۱۹۳	۲۸	۲۱۳۵

ترازوی دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین شدند. سپس به منظور انجام آسیاب مکانیکی مخلوط‌های تهیه شده وارد محفظه آسیاب شدند. مدت زمان آسیاب ۲۰ ساعت و سرعت دوران ۴۰۰ rpm بود. برای جلوگیری از اکسید شدن پودرها در حین آسیاب مکانیکی، از گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۹۹ درصد استفاده شد. جهت جلوگیری از افزایش دمای آسیاب بعد از هر یک ساعت آسیاب، عملیات آسیاب متوقف شده و بعد از سرد شدن محفظه، آسیاب ادامه می‌یافت. شرایط آسیاب مکانیکی پودر در جدول (۱) ارائه شده است.



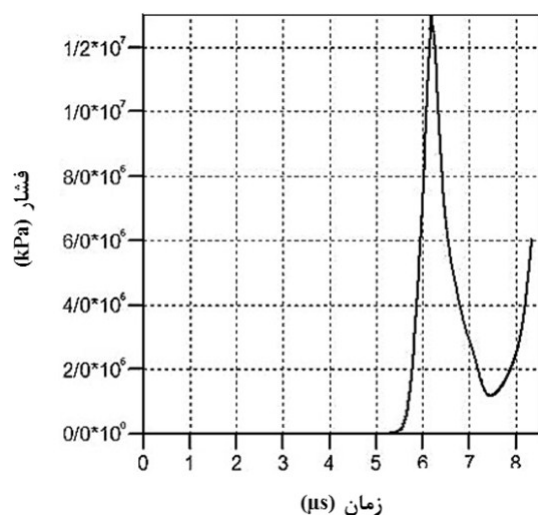
شکل ۸- مش بندی چیدمان به کار رفته در شبیه‌سازی فرآیند.

جدول ۱- شرایط آسیاب مکانیکی جهت تولید پودر کامپوزیتی Al-B<sub>4</sub>C.

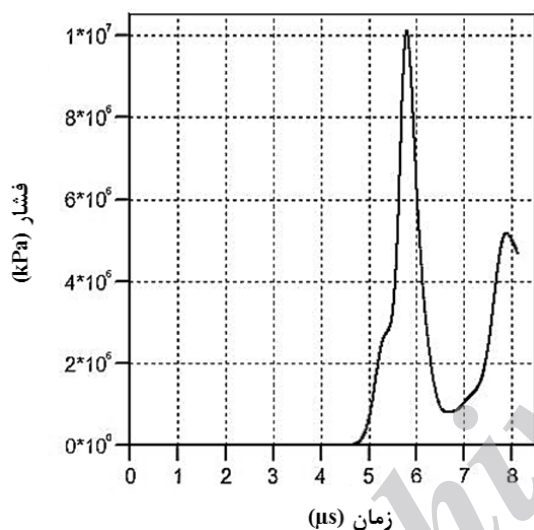
جنس محفظه و گلوله‌ها	فولاد ضدزنگ
نسبت گلوله به پودر (وزنی)	۱۵:۱
سرعت چرخش (rpm)	۴۰۰
قطر گلوله‌ها (mm)	۲۰
محیط	آرگون
زمان آسیاب (h)	۲۰

در شکل (۹) آنالیز XRD پودر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به غیر از دو فاز آلومینیوم و کاربید بور فاز دیگری شناسایی نشده است و آن نشان‌دهنده این است که در حین آلیاژسازی مکانیکی و اتمام آن فاز جدیدی نسبت به پودرهای اولیه ایجاد نشده است.

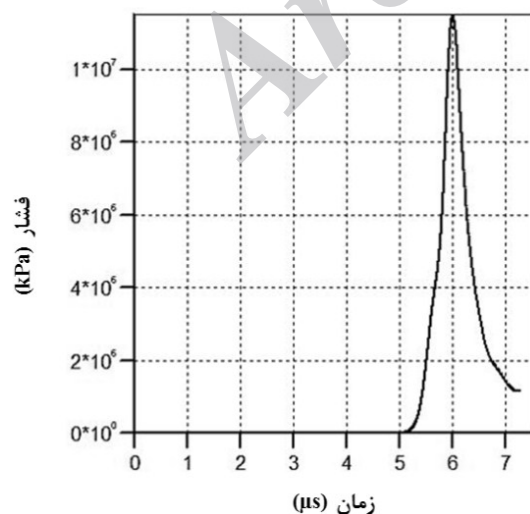
به منظور انجام آزمون‌های عملی و شکل‌دهی پودر اولیه از چیدمانی استفاده شد که شماتیک آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این چیدمان شامل آغازگر<sup>۱</sup>، محفظه مواد منفجره، ماده منفجره، سنبه، محفظه آب، محفظه پودر و تله اندازه حرکت است. برای آغازگری سیستم انفجاری مورد نظر از یک آغازگر الکتریکی استفاده شده است. ابعاد نشان داده در شکل برحسب میلی‌متر می‌باشند. قبل از انجام آزمون‌های عملی، فضای قالب با پودر Al-B<sub>4</sub>C با چگالی



شکل ۱۱- نمودار فشار - زمان برای نقطه‌ای از محیط پودر در فصل مشترک آن با سنبه.



شکل ۱۲- نمودار فشار - زمان برای نقطه‌ای از محیط پودر در فصل مشترک آن با سنبه برای نسبت  $M_E / M_P = 1/5$ .



شکل ۱۳- نمودار فشار - زمان برای نقطه‌ای از محیط پودر در فصل مشترک آن با سنبه برای نسبت  $M_E / M_P = 2/5$ .

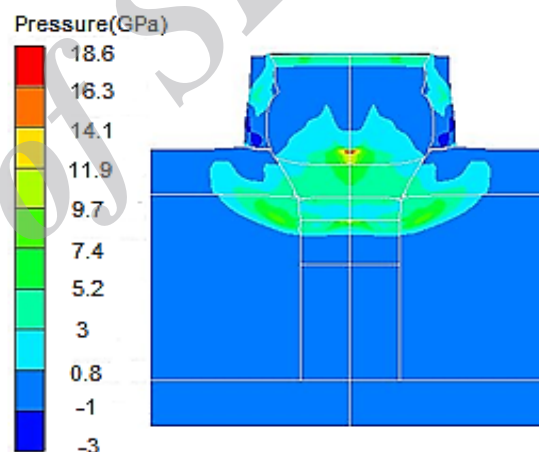
جدول ۳- مشخصات آب، فولاد St37 و پودر  $Al-B_4C$  [۲۷].

ماده	چگالی ( $kg/m^3$ )	$C_0$ (m/s)	S
آب	۹۸۸	۱۶۴۷	۱/۹۲۱
St <sub>37</sub>	۷۸۰۰	۳۵۷۴	۱/۹۲
Al-B <sub>4</sub> C	۱۸۲۰	۳۷۵۰	۰/۹۲۴

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- شبیه سازی فرآیند تراکم انفجاری

در شکل (۱۱) لحظه‌ای که نرم‌افزار در حال تحلیل داده‌های اولیه است و فشارهای ایجاد شده در قسمت‌های مختلف نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین فشار در خط مرکزی چیدمان قرار دارد. پس از اتمام شبیه‌سازی و تکمیل فرآیند، خروجی نرم‌افزار برای نقاط مورد نظر به صورت فشار در برابر زمان سپری شده از تحلیل، در قالب نمودارهایی به دست آمد.



شکل ۱۴- فشار در اجزاء مختلف فرآیند تراکم انفجاری پودر زیر آب در شش میکروثانیه بعد از شروع فرآیند.

شکل (۱۲) نمودار موج شوک را در محیط پودر نشان می‌دهد که بیشینه فشار ایجاد شده در آن حدود ۱۳ GPa است. با توجه به اینکه حداقل فشار لازم برای شکل‌دهی پودر  $Al-B_4C$ ، ۶ GPa عنوان شد؛ بنابراین انتظار می‌رود که ماده منفجره  $C_4$  بتواند پودر مورد نظر را شکل‌دهی کند.

در این مرحله اثر نسبت جرمی ماده منفجره به پودر بر فشارهای ایجاد شده در محیط پودر مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نمودار موج شوک را در محیط پودر و برای دو نسبت جرمی ۱/۵ و ۲/۵ نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت  $M_E / M_P$  از ۱/۵ به ۲/۵، بیشینه فشار ایجاد شده به میزان ۱۵٪ از مقدار ۱۰ GPa به ۱۱/۵ GPa افزایش یافته است.

### ۳-۲- ساخت دیسک کامپوزیتی Al-B<sub>4</sub>C

پس از انجام آزمایش دیسک‌هایی با قطر ۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر حاصل شد که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل (۱۷) نشان داده شده است. همچنین شرایط و نتایج آزمایش‌ها در جدول (۴) آمده است. با در نظر گرفتن چگالی آلومینیوم برابر ۲/۷ gr/cm<sup>3</sup> و چگالی کاربیدبور برابر با ۲/۴ gr/cm<sup>3</sup> [۲۷]، چگالی تئوری به روش زیر تعیین شد:

$$\rho = 0.04 \times 2.4 + 0.96 \times 2.7 = 2.69 \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right)$$



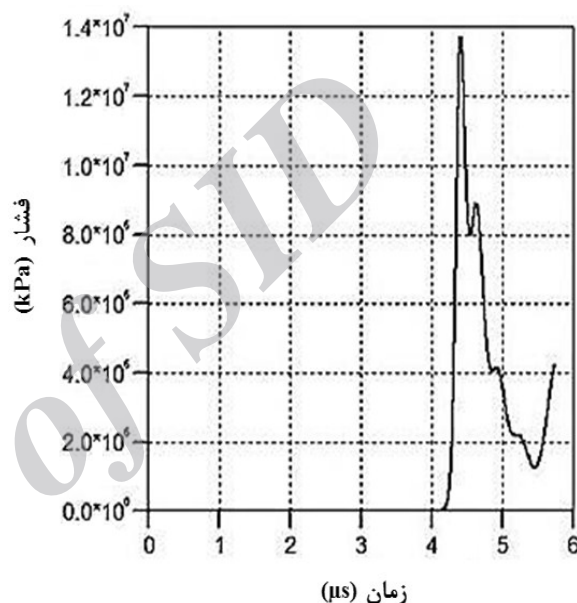
شکل ۱۷ - قطعه تولیدشده به روش تراکم انفجاری زیرآب.

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های انجام شده.

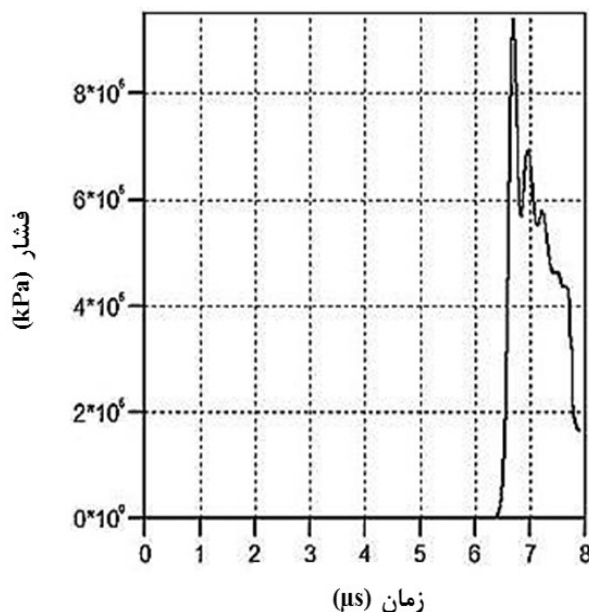
شماره آزمون	جرم پودر (gr)	جرم ماده منفجره (gr)	حجم پودر (cm <sup>3</sup> )	نسبت جرم ماده منفجره به جرم پودر (m <sub>f</sub> /m <sub>p</sub> )	چگالی واقعی (gr/cm <sup>3</sup> )	چگالی نسبی (%TMD)
۱	۵/۵	۱۳/۷۵	۲/۹۲۳	۲/۵	۲/۶۳۴	۹۸٪
۲	۵/۵	۱۹/۲۵	۲/۹۲۳	۳/۵	۲/۶۶۱	۹۹٪

برای مقایسه ریزساختار Al-B<sub>4</sub>C قبل از تراکم و بعد از تراکم، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. هدف از تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی صرفاً بررسی جوش خوردن ذرات، حذف تخلخل‌های پودر اولیه و نداشتن ترک در قطعات تولید شده بود. ریزساختار پودر قبل از تراکم شدن در شکل (۱۸) نشان داده شده است که در آن ذرات پودر کاملاً از هم جدا و ناپیوسته هستند. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی قطعات تراکم شده در شکل (۱۹) نشان داده شده است. با توجه به بررسی انجام شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، عدم مشاهده هرگونه تخلخل و میکرو ترک در ساختار قطعه نشان‌دهنده درستی نتایج حاصل از شبیه‌سازی در انتخاب نوع ماده منفجره و نسبت جرمی ماده منفجره به پودر و در نتیجه نتایج آزمون‌های عملی است و به نظر می‌رسد عدم دست‌یابی به چگالی نسبی ۱۰۰٪، چگالی تئوری، خطای آزمایش تعیین چگالی بوده و قطعات دارای چگالی ۱۰۰٪ چگالی تئوری باشند.

فشارهای ایجاد شده در پودر برای دو چیدمان با ضخامت لایه آب ۵ و ۱۵ میلی‌متر و با نسبت  $M_E / M_P = 3/5$  با شبیه‌سازی در نرم‌افزار به دست آمده و ثبت شدند. همان‌طور که در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت لایه آب میزان بیشینه فشار ایجاد شده به میزان ۳۱٪ از مقدار ۱۳/۸ GPa به ۹/۵ GPa کاهش یافته است. همچنین عرض پالس موج شوک عبوری از ۱ μs به ۱/۵ μs افزایش یافته است. افزایش عرض پالس، باعث افزایش زمان ماندگاری موج شوک در هر نقطه از محیط پودر شده و این عامل سبب جوش خوردن بهتر ذرات پودر می‌شود.



شکل ۱۵- نمودار فشار - زمان برای نقطه‌ای از محیط پودر در فصل مشترک آن با سنبه برای ضخامت لایه آب ۵mm.



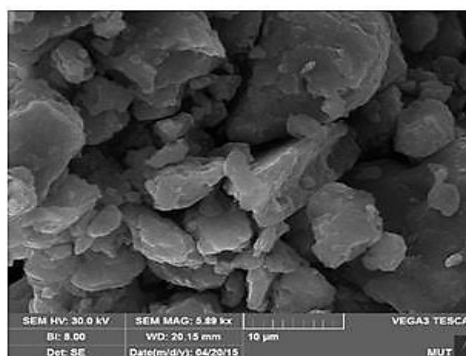
شکل ۱۶- نمودار فشار - زمان برای نقطه‌ای از محیط پودر در فصل مشترک آن با سنبه برای ضخامت لایه آب ۱۵mm.

#### ۴- نتیجه‌گیری

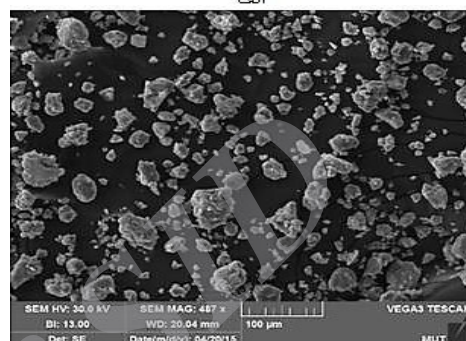
نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که انتخاب ماده منفجره C4 با نسبت جرمی ماده منفجره به پودر برابر ۳/۵ قادر به ایجاد حداقل فشار لازم برای تراکم پودر  $Al-B_4C$  است و پس از انجام آزمون‌های عملی و بررسی ریزساختار نمونه‌ها و اندازه‌گیری چگالی آن‌ها نتایج شبیه‌سازی صحه‌گذاری شدند. بررسی ریز ساختار نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ روبشی نشان داد که پیوند خوبی بین ذرات پودر برقرار شده و هیچ ترکی در ساختار آن‌ها مشاهده نشد. با استفاده از شبیه‌سازی مشخص شد با افزایش نسبت  $M_E / M_P$  از ۱/۵ به ۲/۵، بیشینه فشار ایجاد شده در محیط پودر به میزان ۱۵٪ از مقدار ۱۰ GPa به ۱۱۵٪ افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش ضخامت لایه آب به میزان ۱۰ میلی متر، میزان بیشینه فشار ایجاد شده در محیط پودر به میزان ۳۱٪ از مقدار ۱۳/۸ GPa به ۹/۵ GPa کاهش و عرض پالس موج شوک عبوری از ۱  $\mu s$  به ۱/۵  $\mu s$  افزایش می‌یابد.

#### مراجع

- [1] Pruemmer, R. "Explosive Compaction of Powders and Composites"; Science Pub Inc, 2006.
- [2] Cooper, P. W. "Explosives Engineering"; VCH Pub, 1996.
- [3] LaRocca, E. W.; Pearson, J. "Explosive Press for Use in Impulsive Loading Studies"; Rev. Sci. Instrum. 1958, 29, 848-851.
- [4] 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.
- [5] Mamalis, A.; Gioftsidis, G. "A Consolidation Mechanism for the Compaction of Copper Powder at High Pressures"; J. Mater. Process. Technol. 1990, 23, 333-345.
- [6] Vogler, T.; Lee, M.; Grady, D. "Static and Dynamic Compaction of Ceramic Powders"; Int. J. Solid. Struct. 2007, 44, 636-658.
- [7] Hokamoto, K.; Tanaka, S. I.; Fujita, M. "Optimization of the Experimental Conditions for High-Temperature Shock Consolidation"; Int. J. Impact. Eng. 2000, 24, 631-640.
- [8] Djurado, E.; Boulch, F.; Pivkina, A.; Frolov, Y.; Van Landschoot, N.; Schoonman, J. "Cold Isostatic and Explosive Isodynamic Compaction of Y-TZP Nano Particles"; Solid State Ionics 2002, 154, 375-380.
- [9] Cambronero, L.; Gordo, E.; Torralba, J.; Ruiz-Prieto, J. "Comparative Study of High Speed Steels Obtained Through Explosive Compaction and Hot Isostatic Pressing"; Mater. Sci. Eng. A 1996, 207, 36-45.
- [10] Mamalis, A.; Gioftsidis, G.; Szalay, A. "Fracture Patterns in Explosively Compacted Copper/Graphite Powder Rods"; J. Mech. Work. Technol. 1989, 19, 239-249.
- [11] Mamalis, A. "Technological Aspects of High-T Super Conductors"; J. Mater. Process. Technol. 2000, 99, 1-31.
- [12] Sivakumar, K.; Bhat, T. B.; Ramakrishnan, P. "Dynamic Consolidation of Aluminium and Al-20 V/O SiCp Composite Powders"; J. Mater. Process. Technol. 1996, 62, 191-198.
- [13] Sivakumar, K.; Bhat, T. B.; Ramakrishnan, P. "Effect of Process Parameters on the Densification of 2124 Al-20 vol.% SiCp Composites Fabricated by Explosive Compaction"; J. Mater. Process. Technol. 1998, 73, 268-275.

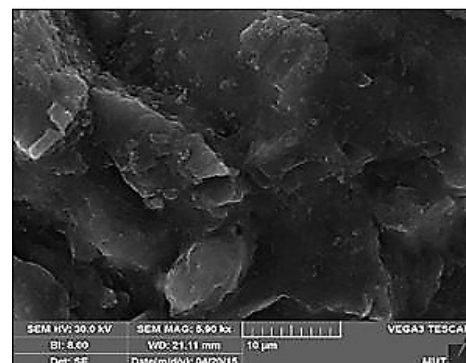


الف

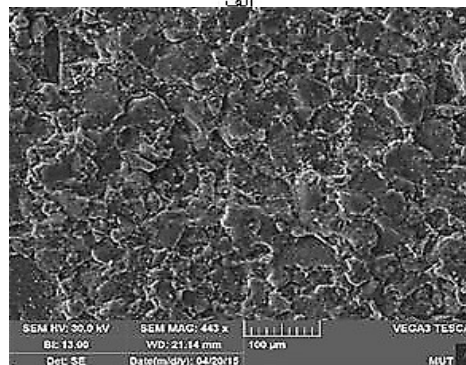


ب

شکل ۱۸- تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از پودر  $Al B_4C$  قبل از تراکم انفجاری پودر: الف) بزرگنمایی ۵/۸۹ kx و ب) بزرگنمایی ۴۸۷ x.



الف



ب

شکل ۱۹- تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از پودر  $Al B_4C$  پس از تراکم انفجاری پودر: الف) بزرگنمایی ۵/۸۹ kx و ب) بزرگنمایی ۴۴۳ x.



- [20] Manikandan, P.; Faruqi, A. N.; Raghukandan, K.; Mori, A.; Hokamoto, K. "Underwater Shock Consolidation of Mg-SiC Composites"; J. Mater. Sci. 2010, 45, 4518-4523.
- [21] 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.
- [22] Zohoor, M.; Mehdipoor, A. "Explosive Compaction of Tungsten Powder Using a Converging Underwater Shock Wave"; J. Mater. Process. Technol. 2009, 209, 4201-4206.
- [23] Blazynski, T. Z. "Explosive Welding, Forming, and Compaction"; Elsevier Applied Science, 1983.
- [24] Meyers, M. A. "Dynamic Behavior of Materials"; John Wiley & Sons, 1994.
- [25] Canakci, A. "Microstructure and Abrasive Wear Behaviour of B4C Particle Reinforced 2014 Al Matrix Composites"; J. Mater. Sci. 2011, 46, 2805-2813
- [26] Zukas, J. A.; Walters, W.; Walters, W. P. "Explosive Effects and Applications"; Springer Science & Business Media, 2002.
- [27] Marsh, S. P. "LASL Shock Hugoniot Data"; Univ of California Press, 1980.
- [14] Beck, J.; Alvarado, M.; Nemir, D.; Nowell, M.; Murr, L.; Prasad, N. "Shock-Wave Consolidation of Nanostructured Bismuth Telluride Powders"; J. Electron. Mater. 2012, 41, 1595-1600.
- [15] Eskandari, H.; Hokamoto, K. "Underwater Explosive Consolidation of Mechanically Milled Al/TiB<sub>2</sub> Composites"; In Proc. of the Materials Science Forum 2011, pp. 137-142.
- [16] Hokamoto, K.; Vesenjak, M.; Ren, Z. "Fabrication of Cylindrical Uni-Directional Porous Metal with Explosive Compaction"; Mater. Lett. 2014, 137, 323-327.
- [17] 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.
- [18] Carton, E.; Verbeek, H.; Stuiyinga, M.; Schoonman, J. "Dynamic Compaction of Powders by an Oblique Detonation Wave in the Cylindrical Configuration"; J. APPL. Ph. 1997, 81, 3038-3045.
- [19] Mamalis, A.; Vottea, I.; Manolacos, D. "Explosive Compaction/Cladding of Metal Sheathed/Superconducting Grooved Plates: FE Modeling and Validation"; Physica C: Superconductivity 2004, 408, 881-883.

Archive of SID